



基于车车通信的车辆防碰撞算法

陈友荣^{1,2}, 万锦昊², 陈俊洁¹, 任条娟¹

(1. 浙江树人大学信息科技学院, 浙江 杭州 310015;

2. 常州大学信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 为了提前预测车辆碰撞事故和降低碰撞事故发生概率, 提出了基于车车通信的车辆防碰撞算法(VACA)。VACA 根据自身和周围邻居车辆的北斗位置坐标, 在水平和垂直两个方向上分别采用 Kalman 预测算法预测下一时刻的车辆行驶状态, 采用数据预判方法直接确定一定发生碰撞或不发生碰撞的情况。当不能直接判断时, 则计算加速度可变下的安全距离, 建立和求解碰撞状态预测模型, 获得碰撞预测时间最小值。如果该最小值小于阈值, 则发出报警信号提醒驾驶员。仿真结果表明, 与基于车辆间通信的智能防碰撞报警模型(IVCWM)和车辆提前预警的防碰撞算法(ECWA)比较, VACA 可提前发现碰撞情况, 而且更准确, 有一定的应用价值。

关键词: 车车通信; 防碰撞; 北斗定位; 预警

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016289

Vehicle anti-collision algorithm based on vehicle to vehicle communication

CHEN Yourong^{1,2}, WAN Jinhao², CHEN Junjie¹, REN Tiaojuan¹

1. College of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China

2. School of Information Science & Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China

Abstract: In order to improve the accuracy of predicting vehicle collision accidents and reduce the probability of collision accidents, vehicle anti-collision algorithm (VACA) based on vehicle to vehicle communication was proposed. According to Beidou location coordinates of vehicle itself and other vehicles in the vicinity, VACA used Kalman prediction algorithm to predict next vertical and horizontal locations of vehicles. VACA used data prejudice method to directly judge whether collision will happen. When it could't be directly judged, safe distance with variable acceleration was calculated, and collision state prediction model was established and solved, then minimum collision prediction time could be obtained. If the minimum time was less than threshold value, alarm signal would be sent to remind driver. Simulation results show that compared with IVCWM and ECWA, VACA can predict collision accident more accurately and has certain application value.

Key words: vehicle to vehicle communication, anti-collision, Beidou localization, warning

收稿日期: 2016-09-13; 修回日期: 2016-11-14

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究计划基金资助项目 (No.2015C33028, No. 2016C33038); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61501403); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY15F030004)

Foundation Items: Zhejiang Provincial Public Welfare Technology Application and Research Project of China (No.2015C33028, No. 2016C33038), The National Natural Science Foundation of China (No.61501403), Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY15F030004)

1 引言

全世界每年大约有 124 万人死于交通事故,2 000 万~5 000 万人经受由于交通事故而造成的非致命伤害。按照目前的交通事故趋势,预测到 2030 年,交通事故将增加 65%,并将成为世界排名第 5 的主要死亡原因。在经济方面,由于道路交通事故受伤而引起的直接经济损失估计为 5 180 亿美元,其中低收入国家的经济损失占其国民生产总值的 1%,中等收入国家的占其国民生产总值的 1.5%,发达国家的占其国民生产总值的 2%。由于交通事故造成高死亡率和严重的经济损失,联合国在 2011 年 5 月倡导一个全球计划——“十年道路安全行动 2011-2020”,大力提倡安全驾驶^[1]。

在中国,汽车已经成为人们的日常代步工具。据统计,2014 年全国汽车保有量达到 1.54 亿辆,从 2003 年的 2 400 万辆增长到 1.54 亿辆,近十年汽车年均增加 1 100 多万辆,是 2003 年汽车数量的 6.4 倍。车市的繁荣一方面拉动了内需,有力地促进了经济增长;另一方面也引发了能源、环境、交通等一系列危机,特别是最近几年交通安全问题日益突出,中国道路交通安全形势十分严峻,伤亡人数居高不下。2014 年全国交通事故死亡人数约为 3.4 万人,每万车死亡人数为 2.22 人,直接经济损失约 8 亿元。交通事故已成为我国公民主要死亡原因之一,严重威胁着人民群众生命和财产的安全^[2]。虽然我国政府相关部门开展了大量卓有成效的工作,如改善道路状况、加大交通违法的处罚力度、加强驾驶员的安全教育等。但是由于交通管理部门缺乏大量的人力、物力、财力,难以彻底查处和杜绝一些违规现象,违规处罚也仅具有事后惩戒作用,而且交通事故的发生固然有人为因素,也有许多非人为甚至不可预测、不可控制的因素,因此仅仅依靠单纯的交通管理仍无法有效地改善交通事故的发生。

在交通事故中,碰撞是交通事故的主要表现形式。美国高速公路安全管理局的数据显示,79%的追尾事故是由于驾驶者的分心。如果驾驶者能提前半秒意识到危险,则事故发生率可降到 60%。奔驰公司的研究数据表明:如果驾驶者能提前 1~2 s 预测到未来交通风险,并采取正确的操作,则大多数的碰撞事故可以避免^[3]。纵观上述事故原因,除提高驾驶员驾驶技能、强化驾驶员自觉遵守交规意识之外,迫切需要一种技术手段提醒驾驶员,从而预防车辆碰撞事故的发生,车辆防碰撞系统由此应运而生。

目前,车辆防碰撞系统中的防碰撞算法研究已经取得一定的成果。如参考文献[4]评估当车辆闯红灯时语音告警信息对车辆防碰撞的效果,并分析其中的偶然关系。实验证明:语音告警信息能及时帮助驾驶者检测闯红灯车辆,使驾驶者有充足的时间和空间减速,从而避免冲突车辆的碰撞。参考文献[2,5,6]研究车辆在直线行驶过程中的防碰撞算法。其中参考文献[2]根据速度、加速度等车辆行驶信息,考虑到驾驶者类型和自身车辆和跟随车辆的行驶关系,提出了一种基于车辆间通信的智能防碰撞报警模型(intelligent vehicle collision warning model based on intervehicle communication,IVCWM)。参考文献[5]根据车载雷达、GPS 和车载摄像头,提出基于人工势场的引导策略和道路危险势场,建立弹性绳模型,实现高速公路上的车道保持和紧急避障功能。参考文献[6]结合激光雷达测距和机电控制技术,提出了一种车辆防追尾碰撞系统的实现方案。参考文献[7,8]研究车辆在转弯过程中的防碰撞算法。其中,参考文献[7]通过雷达、GPS、摄像头等传感器,采集车辆状态信息和驾驶人操作信息,分析驾驶人行为特征,并结合估计的道路曲率,提出弯道车辆碰撞报警算法。参考文献[8]提出在双向停车控制的农村交叉口上右转车辆防碰撞报警系统。该系统根据 GPS 数据,分析车辆转弯的实际加速度,判断接近车辆和转弯车辆间是否可能发生碰撞。如果发生碰撞,则对转弯车辆的驾驶员发出警报。参考文献[3,9-11]研究直行和转弯的车辆防碰撞算法。其中,参考文献[3]提出一种基于模拟车载网络物理系统的车辆运动预测和碰撞风险评估方法。该方法考虑车辆的运动或位置、驾驶者的行为和道路几何信息,预测车辆位置和计算车辆间的实时距离,并比较安全距离的阈值,评估车辆碰撞风险。参考文献[9]提出反复监督的模糊神经网络控制算法,保持车辆间距离在一个安全范围内,从而避免交通事故的发生。参考文献[10]主要考虑自身车辆和目标车辆的方位角和相对角,计算非侧面和侧面的防碰撞模块,采用灰色模糊理论求解模块,确定目标危险度。参考文献[11]基于车车通信的关系信息(relationship information,RI),计算是否存在潜在的碰撞,提出一种车辆提前预警的防碰撞算法(early collision warning algorithm,ECWA)。

综上所述,参考文献[2-10]只是根据当前位置、速度、加速度等行驶状态,直接判断是否发生碰撞风险,没有对未来碰撞事故进行预测。而且参考文献[2,4-8]只是考虑车辆在某一种场景下行驶的防碰撞算法。虽然参考文



献[3, 9-11]考虑了多个场景,但是没有考虑车辆变道、加速度可变等问题,即车辆行驶的位置、速度和加速度是一个具有方向性的可变矢量。同时考虑到如果分解成多个情况考虑,则算法就比较复杂,很难做到面面俱到。因此,考虑中国的北斗定位模块,提出一种基于车车通信的车辆防碰撞算法(vehicle anti-collision algorithm, VACA)。每个车辆安装一个带有亚米级北斗定位模块和无线通信模块的防碰撞设备,通过车车通信广播自身北斗坐标,接收周围邻居车辆的北斗坐标。根据自身和邻居车辆的实时位置坐标, VACA 将车辆行驶方向分解成水平和垂直两个方向,分别对每一个方向采用 Kalman 预测算法预测下一个时刻的位置、速度和加速度,并进行数据的预判,快速选出不可能碰撞或一定碰撞的情况。对于其他情况,计算考虑加速度可变的安全距离,建立碰撞状态预测模型。求解该模型,获得水平和垂直方向都达到安全距离的碰撞预测时间最小值。当该最小值小于设置的阈值,则发出报警提醒驾驶员。VACA 可适用于车辆行驶的多个场景(同向行驶、相向行驶、十字路口等),考虑加速度可变情况,符合实际情况。与 IVCWM 和 ECWA 比较, VACA 可提前发现碰撞情况,更准确。

2 防碰撞算法原理

碰撞预警设备方案如图 1 所示。

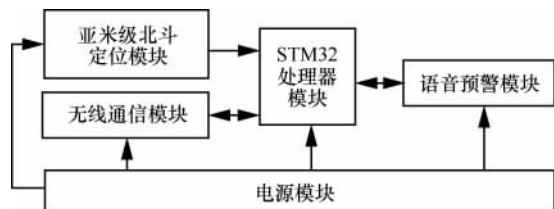


图 1 碰撞预警设备方案

在 VACA 中,作如下假设。

(1)所有车辆安装如图 1 所示的碰撞预警设备。通过该设备,车辆可采集自身的北斗定位坐标,接收邻居车辆的位置坐标,并存储在位置信息表中。

(2)碰撞预警设备主要由亚米级北斗定位模块、STM32 处理器模块、无线通信模块、语音预警模块和电源模块组成。其中,无线通信模块具有 1 km 以上的通信距离,可实现车辆间的单跳通信;亚米级北斗定位模块可获取车辆的地理坐标信息,其定位误差在 1 m 以内;语音预警模块根据算法计算的结果,采用语音提醒的方式发出预警内容,提醒驾驶人员;STM32 处理器模块是碰撞预警设备的处理

核心,实现北斗定位信息的采集、通信、处理和决策预警等功能。

(3)无线通信模块只单跳广播自身的信息,具有较小的通信时延,不多跳传输数据。

(4)北斗定位模块可提供有效的位置信息。

基于碰撞预警设备,利用车车通信技术实现车辆与周围 1 跳通信范围内其他车辆的位置信息交换,并提出一种基于车车通信的车辆防碰撞算法。该算法只根据自身和邻居车辆的位置信息,预测到达安全距离的时间,判断是否存在碰撞可能,并提醒驾驶人员注意。该算法包括位置信息获取、Kalman 预测和碰撞状态预测,具体原理如下。

2.1 位置信息获取和 Kalman 预测

每间隔 1 s 通过北斗定位模块采集其输出经纬度,采用如下地球坐标经典计算式可获知位置坐标:

$$x^B = r \cos \phi \cos \lambda, y^B = r \cos \phi \sin \lambda \quad (1)$$

其中, x^B 和 y^B 分别表示本车辆的地球横坐标和纵坐标, r 表示地球平均半径, ϕ 表示本车辆所在的纬度, λ 表示本车辆所在的经度。将计算的当前自身地球坐标存储到信息表中,并通过无线广播发送最新位置信息分组。同时接收周围其他邻居车辆的最新位置信息分组,判断是否第一次出现。如果第一次出现,则建立一个新的信息表,将数据存储在信息表中,否则将数据添加到已有信息表中。如果在一段时间内没有接收到该邻居车辆的位置信息分组,则表示该车辆已经离开本车辆的通信范围,删除该车辆的信息表。

当获知自身车辆和其周围邻居车辆的最新位置信息,采用 Kalman 预测算法对自身车辆和周围车辆的下一时刻水平和垂直方向的状态信息进行预测^[12]。令 $c_t = [x_t, v_t, a_t]^T$ 作为 t 时刻的车辆行驶状态,其中 x_t 、 v_t 、 a_t 分别表示车辆在 t 时刻水平或垂直方向的位置、速度和加速度,则根据测量值的不断输入,循环执行 Kalman 预测算法,则可不断输出水平方向和垂直方向的下一个时刻预测值。

2.2 碰撞状态预测

如果分别分析不同场景下车辆是否发生碰撞,则算法比较复杂,很难做到面面俱到。同时考虑到不管车辆如何行驶,发生碰撞的结果是两个车辆的位置发生重叠。因此分解车辆碰撞行为,分别从水平方向和垂直方向研究车辆的防碰撞。如图 2 所示,将车辆的行驶行为分解成水平方向和垂直方向,则车辆的防碰撞问题转化成同一方向的防碰撞问题。以水平方向为例,说明该方向的碰撞状态预测方法。

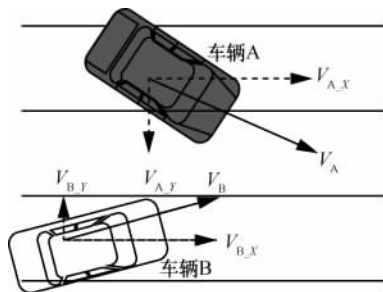


图2 行驶方向的水平和垂直方向分解

2.2.1 数据的预判断

为简便程序运算,根据当前时刻的值和下一时刻的预测值,分析水平或垂直方向状态无变化、同向行驶预测轨迹重合、相向行驶预测轨迹重合、反向不碰撞和预测行驶轨迹不重合 5 种情况,并确定一定会发生碰撞以及一定不会发生碰撞的情况,做出报警或不报警的操作。

情况 1:如图 3 所示,当两车辆在水平方向都没有速度和加速度,即 $x_A^{t+1} = x_A^t$, $x_B^{t+1} = x_B^t$ 时,如果 $|x_B^t - x_A^t| \leq d_{th}$,其中, d_{th} 表示距离判断阈值,则两车辆的水平方向预测轨迹将发生重叠,需要进一步判断垂直方向,否则不存在发生碰撞的可能。

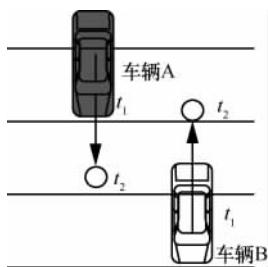


图3 水平方向无变化

情况 2:如图 4 所示,当车辆 A 和车辆 B 往同一方向行驶。若在后面行驶的车辆 A 的下一时刻预测位置在车辆 B 的下一时刻预测位置的前面,即满足式(2),则两车辆的水平方向预测轨迹将发生重叠。

$$\begin{aligned} & ((x_B^t - \hat{x}_B^{t+1}) \times (x_A^t - \hat{x}_A^{t+1}) \geq 0) \& \\ & ((x_A^t - x_B^t) \times (\hat{x}_A^{t+1} - \hat{x}_B^{t+1}) \leq 0) \end{aligned} \quad (2)$$

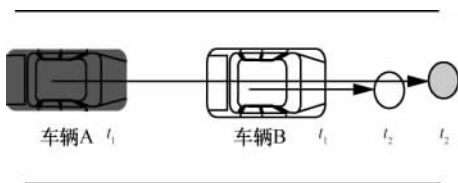


图4 同向运动预测轨迹重合

情况 3:如图 5 所示,当车辆 A 和车辆 B 往相向方向行驶且车辆 A 当前时刻位置到下一时刻预测位置的直线与车辆 B 当前时刻位置到下一时刻预测位置的直线有重合,即满足式(3),则可判断两车辆的水平方向预测轨迹将发生重叠。

$$\begin{aligned} & ((x_B^t - \hat{x}_B^{t+1}) \times (x_A^t - \hat{x}_A^{t+1}) \leq 0) \& \\ & ((x_A^t - x_B^t) \times (\hat{x}_A^{t+1} - \hat{x}_B^{t+1}) \leq 0) \end{aligned} \quad (3)$$

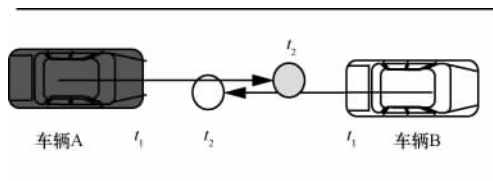


图5 相向运动预测轨迹重合

情况 4:如图 6 所示,车辆 A 和车辆 B 向不同方向行驶,且车辆 A 当前时刻位置到下一时刻预测位置的直线与车辆 B 当前时刻位置到下一时刻预测位置的直线不重合,即满足式(4),则可判断不会发生碰撞。

$$\begin{aligned} & ((x_A^t - x_B^t) \times (\hat{x}_A^{t+1} - x_A^t) \geq 0 \& \\ & (\hat{x}_A^{t+1} - x_A^t) \times (\hat{x}_B^{t+1} - x_B^t) \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

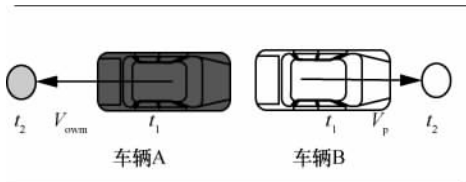


图6 反向行驶不碰撞

情况 5:如图 7 和 8 所示,当在下一个时刻,车辆 A 和 B 在水平方向的预测轨迹没有重叠,则需要进一步分析和处理,具体内容如下。

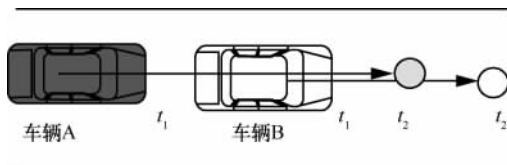


图7 同向预测轨迹不重合

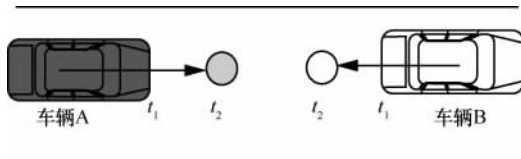


图8 相向预测轨迹不重合



2.2.2 安全距离计算

车辆制动时加速度随时间变化的过程如图 9 所示。其中, t_r 表示驾驶员反应时间 (一般为 0.7~1.5 s), t_b 表示制动器协调时间 (一般为 0.5 s), t_s 表示制动减速度增长时间, $a_{\max}$ 表示最大减速度, 其方向与当前车辆速度相反。当紧急制动时, $a_{\max}$ 一般为 7.5~8 m/s², 普通制动时为 3~5 m/s²。车辆安全距离主要包括 3 个部分, 并以水平方向安全距离为例说明这 3 个部分^[13]。

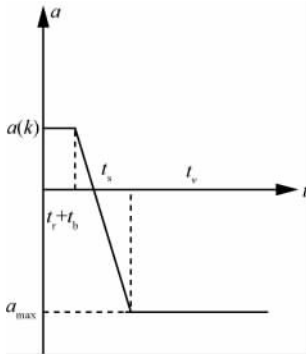


图 9 加速度随时间的变化过程

(1) 在 $t_r + t_b$ 时间内, 水平位移 S_1 可表示为:

$$S_1 = (t_b + t_r)v_x^A + \frac{1}{2}(t_b + t_r)^2 a_x^A \quad (5)$$

其中, v_x^A 表示车辆 A 在当前时刻的水平方向速度, a_x^A 表示车辆 A 在当前时刻的水平方向加速度。

(2) t_s 时间段内, 其水平加速度为:

$$a(k) = (a_{\max} - a_x^A)k / t_s + a_x^A \quad (6)$$

水平速度可表示为:

$$v = v_x^A + (t_b + t_r) a_x^A + (a_{\max} - a_x^A)k^2 / 2t_s + a_x^A k \quad (7)$$

其中, t_s 与道路的摩擦系数有关。则水平位移 S_2 表示为:

$$S_2 = \int_0^{t_s} v dk = t_s v_x^A + t_s(t_b + t_r) a_x^A + \frac{t_s^2 a_x^A}{3} + \frac{t_s^2 a_{\max}}{6} \quad (8)$$

(3) 在 t_s 时间段内, 水平加速度恒定为 $a_{\max}$, 直到速度降到零, 则水平位移 S_3 为:

$$S_3 = \frac{v^2}{2a_{\max}} = \frac{1}{2a_{\max}}(v_x^A + (t_b + t_r) a_x^A + (a_{\max} - a_x^A)t_s / 2)^2 \quad (9)$$

(4) 所有阶段的水平位移和即水平方向的安全距离 $D_{b,x}(v_x^A, a_x^A)$ 。

$$D_{b,x}(v_x^A, a_x^A) = S_1 + S_2 + S_3 \quad (10)$$

2.2.3 碰撞状态预测

在实际车辆行驶过程中, 车辆的加速度是可变的。假设车辆加速度是线性变化且未来 1 s 内两车辆不会发生碰撞, 则车辆 A 和 B 的水平加速度为:

$$\begin{aligned} a_A(k) &= \frac{(\hat{a}_{x,A}^{t+1} - a_{x,A}^t)k}{\Delta_T} + a_{x,A}^t \\ a_B(k) &= \frac{(\hat{a}_{x,B}^{t+1} - a_{x,B}^t)k}{\Delta_T} + a_{x,B}^t \end{aligned} \quad (11)$$

其中, k 表示预测时间, $a_{x,A}^t$ 和 $a_{x,B}^t$ 分别表示已知当前时刻车辆 A 和 B 的水平加速度, $\hat{a}_{x,A}^{t+1}$ 和 $\hat{a}_{x,B}^{t+1}$ 分别表示经过 k 时间后, 车辆 A 和 B 的预测水平加速度, Δ_T 表示数据采集周期。以车辆 B 作为参考物, 则车辆 A 的相对水平加速度为:

$$\begin{aligned} a(k) &= (\hat{a}_{x,A}^{t+1} + a_{x,B}^t - a_{x,A}^t - \hat{a}_{x,B}^{t+1})k / \Delta_T + \\ & a_{x,A}^t - a_{x,B}^t = A_1 k + A_2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $A_1 = (\hat{a}_{x,A}^{t+1} + a_{x,B}^t - a_{x,A}^t - \hat{a}_{x,B}^{t+1}) / \Delta_T$, $A_2 = a_{x,A}^t - a_{x,B}^t$ 。

当前时刻的相对水平速度为 $V_1 = v_{x,A}^t - v_{x,B}^t$, 则对水平变加速度进行定积分可求得水平速度关于时间的变化。

$$\begin{aligned} v(k) &= V_1 + \int_0^k a(k) dk = V_1 + \int_0^k (A_1 k + A_2) dk \\ &= \frac{A_1}{2} k^2 + A_2 k + V_1 \end{aligned} \quad (13)$$

当前时刻的相对水平距离为 $D_1 = X_{x,A}^t - X_{x,B}^t$, 则对 $v(k)$ 进行定积分, 获得车辆 A 和 B 的相对水平距离关于时间的变化式为:

$$\begin{aligned} D_x(k) &= D_1 + \int_0^k v(k) dk = D_1 + \int_0^k (\frac{A_1}{2} k^2 + A_2 k + V_1) dk \\ &= \frac{A_1}{6} k^3 + \frac{A_2}{2} k^2 + V_1 k + D_1 \end{aligned} \quad (14)$$

将式(12)、式(13)代入式(10), 可获得自变量为 k 的水平方向安全距离为:

$$D_{b,x}(k) = B_4 k^4 + B_3 k^3 + B_2 k^2 + B_1 k + B_0 \quad (15)$$

$$B_4 = -A_1^2 / (8a_{\max}) \quad (16)$$

$$B_3 = -(2A_1 A_2 + t_s A_1^2 + 2(t_b + t_r) A_1) / (4a_{\max}) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= -((2A_2 + t_s A_1 + (t_b + t_r) A_1)(V_1 + t_s A_2 / 2 + t_s a_{\max} / 2 + \\ & (t_b + t_r) A_2)) / (2a_{\max}) + A_2(t_b + t_r + t_s) + \\ & A_1((t_b + t_r)^2 / 2 + t_s^2 / 4) + t_s(t_b + t_r) A_1 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= -((2A_2 + t_s A_1 + (t_b + t_r) A_1)(V_1 + t_s A_2 / 2 + t_s a_{\max} / 2 + \\ & (t_b + t_r) A_2)) / (2a_{\max}) + A_2(t_b + t_r + t_s) + \\ & A_1((t_b + t_r)^2 / 2 + t_s^2 / 4) + t_s(t_b + t_r) A_1 \end{aligned} \quad (19)$$

$$B_0 = -(V_1 + t_s A_2 / 2 + t_s a_{\max} / 2 + (t_b + t_r) A_2)^2 / (2a_{\max}) + V_1(t_b + t_r + t_s) + A_2((t_b + t_r)^2 / 2 + t_s^2 / 3) + t_s^2 a_{\max} / 6 + t_s(t_b + t_r) A_2 \quad (20)$$

根据式(13)和式(14),在水平方向上,当 $D_x(k) \leq D_{b,x}(k)$ 时,两车辆水平方向位置重合。同理,在垂直方向上,当 $D_y(k) \leq D_{b,y}(k)$ 时,两车辆垂直方向位置重合。因此车辆 A 的碰撞状态预测问题转换为以下优化模型:

$$\begin{aligned} \min(k) \\ \text{s.t. } 0 \leq D_x(k) \leq D_{b,x}(k), \\ 0 \leq D_y(k) \leq D_{b,y}(k) \quad k \in R^+ \end{aligned} \quad (21)$$

2.2.4 碰撞模型求解

直接采用最优化算法求解优化模型(21)的方法计算量较大,不适合在处理能力有限的 STM32 处理器中运算,因此采用以下步骤求解。令:

$$\begin{aligned} D'_x(k) &= D_x(k) - D_{b,x}(k) \\ &= C_4 k^4 + C_3 k^3 + C_2 k^2 + C_1 k + C_0 \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$D'_y(k) = D_y(k) - D_{b,y}(k) \leq 0 \quad (23)$$

其中, $D'_x(k)$ 和 $D'_y(k)$ 分别为两车水平和垂直方向的相对位移差减去其安全距离的函数, $C_4 = -B_4$, $C_3 = A_1/6 - B_3$, $C_2 = A_1/2 - B_2$, $C_1 = V_1 - B_1$, $C_0 = D_1 - B_0$ 。

步骤 1 采用如下方法计算不等式(22)的解。利用一元四次方程求根公式求解函数 $D'_x(k)=0$ 的正实数根。如果没有正实数根,则表示当 $k \geq 0$ 时,函数 $D'_x(k)$ 没有与 x 轴相交,代入 0 判断 $k \geq 0$ 区间的函数值。如果函数值大于 0,则模型(21)无正实物解,跳到步骤 4,否则解为区间 $k \geq 0$ 。如果 n_1 有个正实数解,则将这些正实数根和 0 从小到大排序,可得 $x_1, x_2, \dots, x_{n_1+1} (x_1=0)$, 分别选择 $-2, (x_i + x_{i-1})/2, i=1, \dots, n_1-1$ 和 x_{n_1+2} 共 n_1+1 个值代入函数,计算函数值并判断该函数值是否小于零,从而获得水平方向的解,即区间 ϕ_x 。

步骤 2 采用步骤 1 的方法,计算不等式(23)的解。如果无正实物解,跳到步骤 4,否则获得垂直方向的解,即区间 ϕ_y 。

步骤 3 如果区间 ϕ_x 和 ϕ_y 没有交集,则模型(21)无正实物解,跳到步骤 4,否则计算下确界 $K = \inf(\phi_x \cap \phi_y)$, 即优化模型(21)的解(车辆的碰撞预测时间)。

步骤 4 如果模型(21)无正实数解,则表示不可能发生碰撞,不执行报警操作,否则判断和报警阈值时间 K_{th} 的大小。当 $K < K_{th}$ 时,执行报警,通过语音预警模块输出报警信号。

3 算法实现

VACA 主要采用 Kalman 预测算法和基于加速度可变的相对车间安全距离计算方法,建立防碰撞的优化模型,求解该优化模型并根据计算结果判断是否进行语音预警。VACA 的具体步骤如图 10 所示。

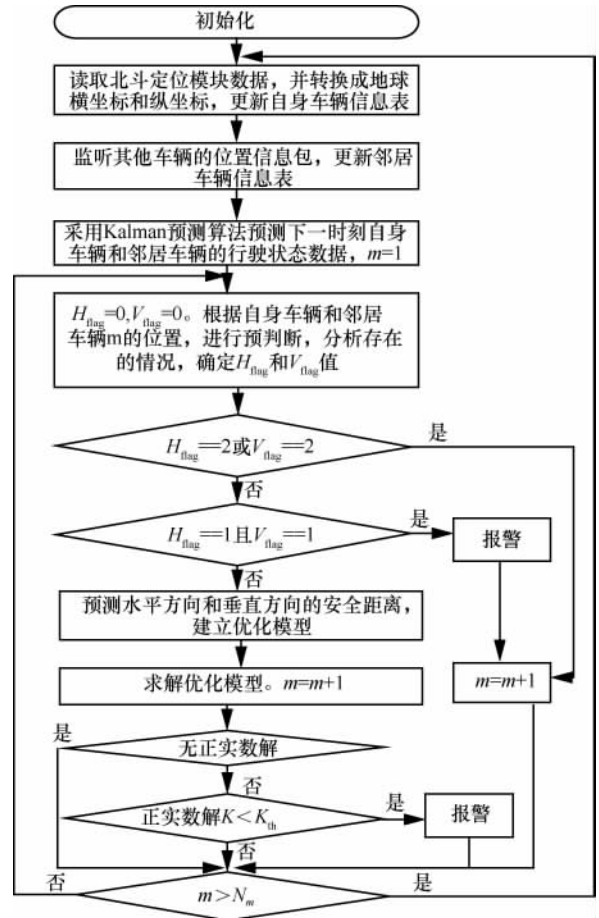


图 10 VACA 实现流程

步骤 1 参数初始化,将车辆的行驶行为分解成水平方向和垂直方向,则车辆的防碰撞问题转换成同一方向的防碰撞问题。

步骤 2 读取自身北斗定位模块输出的经纬度数据,转化为地球横坐标和纵坐标,通过无线通信模块广播发送自身的位置信息分组,并将自身车辆的信息采集时间、位置坐标更新到自身车辆信息表中。

步骤 3 监听其他车辆的位置信息分组,更新邻居车辆信息表。如果监听到位置信息分组,读取该车辆 ID、信息采集时间和位置坐标。判断是否第一次接收该车辆的位



置信息分组。如果第一次接收,则在邻居车辆位置信息表中新建一个该邻居车辆 ID 的信息行,将位置坐标和信息采集时间存储到该信息行中,否则将这些数据添加到已有的该邻居车辆信息行中。如果在一段时间内没有接收到该邻居车辆的位置信息包,则表示该车辆已经离开自身车辆的通信范围,删除该车辆的信息行。

步骤 4 根据自身车辆和邻居车辆的信息表,采用 Kalman 预测算法预测下一时刻水平方向和垂直方向的自身车辆和邻居车辆的位置坐标,速度和加速度等行驶状态数据,且 $m=1$ 。

步骤 5 令两车辆水平方向和垂直方向的预测轨迹没有发生重叠,即 $H_{\text{flag}}=0, V_{\text{flag}}=0$ 。其中, H_{flag} 表示两车辆水平方向的预测轨迹是否发生重叠的标识符, V_{flag} 表示两车辆垂直方向的预测轨迹是否发生重叠的标识符。根据自身车辆和邻居车辆 m 的当前时刻行驶状态数据(位置、速度和加速度)和下一时刻的预测数据,对水平方向和垂直方向上数据进行预判,即分析水平或垂直方向上状态无变化(对应变量赋值 2)、同向行驶预测轨迹重合(对应变量赋值 1)、相向行驶预测轨迹重合(对应变量赋值 1)和反向不碰撞(对应变量赋值 0)4 种情况下的预测轨迹,确定 H_{flag} 和 V_{flag} 的值,直接确定将会发生碰撞和不会发生碰撞的情况。如果 $H_{\text{flag}}=2$ 或 $V_{\text{flag}}=2$,则不会发生碰撞, $m=m+1$,直接跳到步骤 7。如果 $H_{\text{flag}}=1$ 且 $V_{\text{flag}}=1$,则将发生碰撞,马上报警, $m=m+1$,直接跳到步骤 7。

步骤 6 预测水平方向和垂直方向的安全距离,根据当前时刻和下一个时刻的位置、速度和加速度,建立碰撞状态预测模型(21),并求解该预测模型, $m=m+1$ 。如果模型(21)无正实数解,则表示不发生碰撞,执行不报警操作,跳到步骤 7,否则获得正实数解 K 。判断 K 值和预先设置的阈值 K_{th} 的大小。如果 $K < K_{\text{th}}$,执行报警操作,通过语音预警模块输出警报信号,否则执行不报警操作,跳到步骤 7。

步骤 7 如果 $m > N_m$,其中 N_m 表示当前邻居车辆位置信息表中邻居车辆个数,则跳到步骤 2,否则跳到步骤 5。

4 算法仿真

4.1 实验数据获取和参数选择

当自身车辆周围存在多辆邻居车辆时,自身车辆可接收邻居车辆的位置信息,采用 VACA 迭代计算自身车辆和某一邻居车辆的碰撞预测时间和预测是否发生碰撞,即多车辆碰撞预测问题可转化成多个两车辆碰撞预测问题。

因此在实验数据获取过程中,只考虑两车辆情况,分别在两车辆上放置实验数据获取设备。该设备采集和广播自身车辆行驶过程中的北斗位置数据,并存储所有历史数据。分析两车辆的实际行驶位置数据,从中选择部分位置数据表示相向行驶、同向行驶和十字路口 3 种场景下的变加速运动,并假设该数据可精确表示车辆的行驶位置。同时在每一个场景的变加速运动数据中选择 3 个点,模拟匀速运动和匀加速运动的车辆位置数据。采用 MATLAB 软件计算 3 个场景下 3 种运动的碰撞预测时间、预警时刻、预警位置、预警临界时刻和预警临界位置等参数,获得仿真结果值。仿真参数设置见表 1。

表 1 参数设置

参数	取值
路径损失指数 $Loss$	4.6
制动减速度 $a_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	-5
距离判断阈值 d_{th}/m	2
报警阈值时间 K_{th}/s	2
驾驶员反应时间 t_r/s	1
制动协调时间 t_b/s	0.5
完全制动时间 t_s/s	1.2

4.2 仿真结果分析

如图 11 所示,车辆沿着黑色行驶轨迹循环行驶,与车辆的实际行驶路径基本一致。选择数据采集周期 1 s 和变加速度运动数据,采用 VACA 获得车辆实际行驶过程中的车辆行驶路径和预警结果。

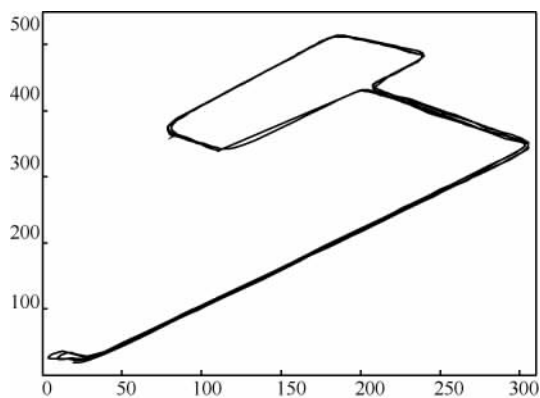


图 11 车辆行驶路径轨迹(单位:m)

场景 1:如图 12 所示,车辆 A、B 位于同一车道,且两车辆相向行驶。在初始时刻 0,车辆 A、B 开始接收到对方车辆位置信息,并计算两车辆间的安全距离与相对位移差,采用 Kalman 预测算法获得下一时刻的预测位置,求解模型(21)获得碰撞预测时间。在时刻 1~3,车辆不需要报

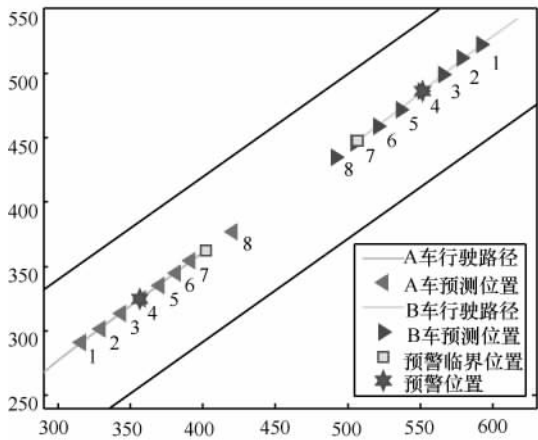


图 12 相向行驶场景下车辆行驶路径和预警位置(单位:m)

警。在时刻 4, 车辆 A 和 B 的碰撞预测时间小于报警阈值时间, 因此两车辆在当前位置发出报警。如果车辆 A 和 B 继续行驶, 则在时刻 7, 两车辆达到预警临界位置, 此时车辆 A 和 B 的安全距离大于车辆间距离, 将发生碰撞。

场景 2: 如图 13 所示, 车辆 A、B 位于同一车道, 且两车辆同向行驶。在初始时刻 0, 车辆 A、B 开始接收到对方车辆位置信息。后车 A 突然加速, 进入追赶状态, 从而可能与速度较慢的前车辆 B 发生碰撞。在时刻 1~5, 车辆 A 不需要报警。在时刻 6, 车辆 A 的碰撞预测时间小于报警阈值时间, 因此发出警报。如果车辆 A 和 B 继续行驶, 则在时刻 8, 两车辆达到预警临界位置, 此后车辆 A 将与车辆 B 发生追尾碰撞。

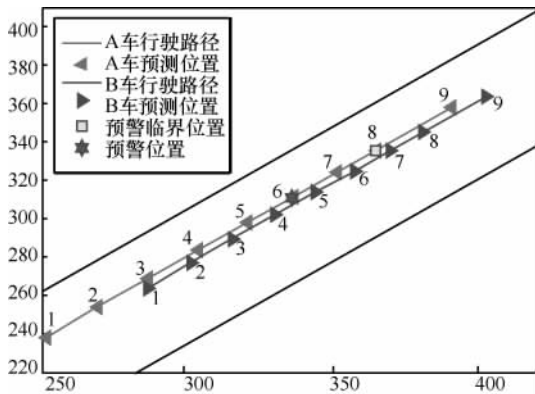


图 13 同向行驶场景下车辆行驶路径和预警位置(单位:m)

场景 3: 如图 14 所示, 车辆 A、B 通过十字路口时, 车辆 B 缓慢驶向十字路口, 而车辆 A 以极快的速度驶向十字路口。在时刻 1~6, 两车辆预测不需要报警。在时刻 7, 车辆 A 和 B 的碰撞预测时间都小于报警阈值时间, 因此车辆 A 和 B 都发出警报。如果车辆 A 和 B 继续行驶, 则在时

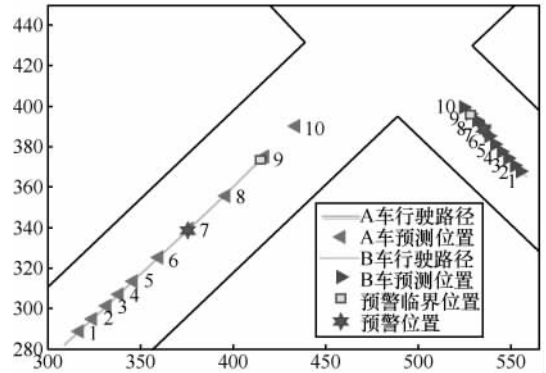


图 14 十字路口场景下车辆行驶路径和预警位置(单位:m)

刻 9, 两车辆达到预警临界位置, 此后车辆 A 和 B 将发生碰撞。总之, 在相向行驶场景、同向行驶场景和十字路口行驶场景下, VACA 都能预测到未来的碰撞情况。

为方便说明算法的预测结果, 选择数据采集周期 0.1 s。在每一个实际数据间均匀补充 9 个点, 获得两车辆变速运动的位置数据, 并模拟匀速运动和匀加速运动的车辆位置数据。在每个位置点, 计算车辆间距离和安全距离, 从而获得准确的预警临界时刻。如图 15 所示, 不管两车辆是匀速运动或匀加速运动, 还是变加速运动, 在每一个场景中, 当算法报警时 VACA 的预警时刻都比其预警临界时刻提前 2 s 左右。因此利用 VACA 可预测到两车辆的碰撞, 且提前发出预警。

在仿真过程中, 扩展 IVCWM 算法^[2]在十字路口场景的应用, 即将车辆行驶行为分成水平方向和垂直方向, 每个方向上分别应用 IVCWM 算法计算碰撞预测时间。扩展 ECWA 在相向行驶和同向行驶两个场景下的应用, 即将车辆相对距离除以相对速度的值作为碰撞预测时间。因此可比较相向行驶、同向行驶和十字路口 3 个场景下 VACA、IVCWM 和 ECWA 的碰撞预测时间误差。其中, 碰撞预测时间误差定义为车辆开始预测时, 每一个时刻的碰撞预测时间与预警临界时刻的误差平均值。

如图 16 所示, 当两车辆匀速运动和匀加速运动时, 车辆加速度是一个常量, 车辆位置数据有规律地变化, 因此 3 个场景下的 VACA 能精确预测到碰撞, 其碰撞预测时间误差最小。当两车辆变速运动时, 车辆的速度和加速度变化明显, 因此 VACA 的碰撞预测时间误差大于匀速和匀加速运动时的碰撞预测时间误差。但是由于 VACA 考虑加速度可变情况, 建立和求解加速度可变的优化模型, 模型的解更符合车辆行驶的实际情况, 因此与 IVCWM 和 ECWA 相比, VACA 的碰撞预测时间误差也最小。ECWA 只考虑

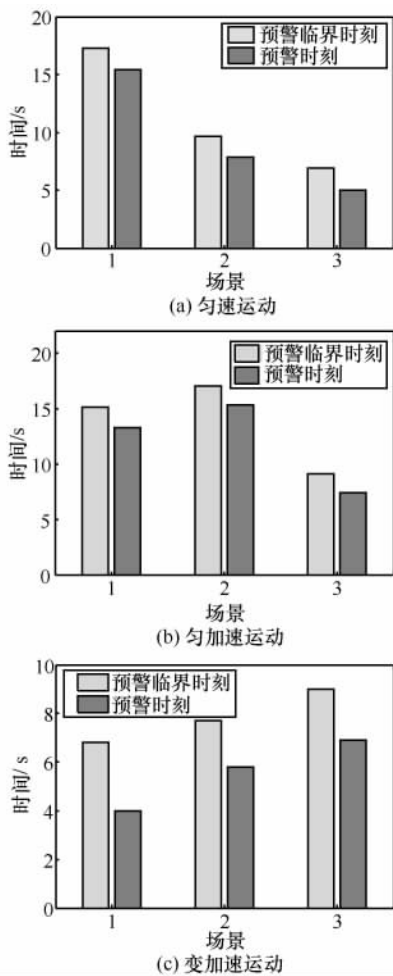


图 15 3 种运动下 3 个场景的 VACA 预警时刻和预警临界时刻比较

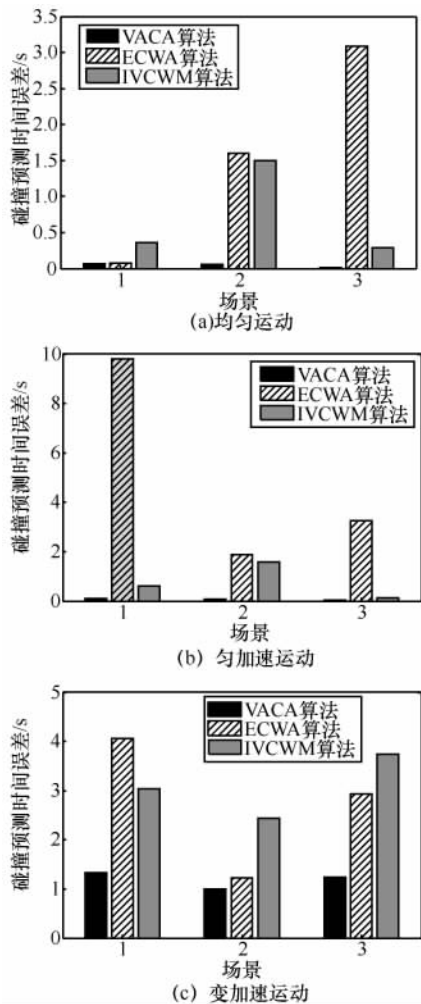


图 16 3 种运动下 3 个场景的碰撞预测时间误差比较

车辆到相对速度方向所在直线的距离和相对速度,没有考虑车辆的加速度,且比较适合于同向行驶,其相向行驶和十字路口场景下的碰撞预测时间误差起伏较大。IVCW 只是考虑 TTA(time to avoidance)、TTC(time to collision)等几个关键参数,碰撞判断模型比较简单,因此 ECWA 和 IVCWM 算法的碰撞预测时间误差较大。总之,不管在同向行驶或相向行驶场景下,还是在十字路口场景下,与 IVCWM 和 ECWA 相比,VACA 预测更准确,可提高碰撞避免的概率。

5 结束语

设计碰撞预警设备,提出一种基于车车通信的车辆防撞算法。首先,提出算法原理,包括位置坐标获取、Kalman 预测和碰撞状态预测。其中将车辆的行驶行为分解成水平方向和垂直方向,分别预测下一时刻水平或垂直

方向车辆状态信息,并进行位置数据的预判断,直接确定一定发生或不发生碰撞情况,执行报警或不报警操作。当不能直接判断碰撞情况时,实时计算自身车辆与其他车辆在两个方向上且加速度可变的相对位移差和安全距离差,建立碰撞状态预测模型(21)。求解该预测模型,计算碰撞预测时间最小值。一旦满足报警条件,则向驾驶人员发出警报。其次,提出算法的实现步骤。最后给出算法的仿真参数,分析相向行驶、同向行驶和十字路口 3 种场景,比较 VACA 的预警时刻和预警临界时刻,比较 VACA、IVCWM 和 ECWA 的碰撞预测时间误差。

总之,VACA 可适用于车辆行驶的多个场景(同向行驶、相向行驶碰撞、十字路口等),考虑加速度可变情况,更加符合实际情况。与 IVCWM 和 ECWA 算法比较,VACA 的碰撞报警时间更精确,可提前发现碰撞情况,提高碰撞避免的概率。但是 VACA 对北斗定位模块的定位精度要求

较高,需要亚米级北斗定位模块,当前民用北斗定位模块无法满足本算法的定位精度要求,因此下一阶段目标是考虑采用市场上定位精度较低但成本便宜的民用北斗定位模块,引入超声波等其他检测手段,研究多数据融合的车辆防碰撞算法,进一步降低算法所需要的硬件成本。

参考文献:

- [1] MUKHTAR A, XIA L, TANG T B. Vehicle detection techniques for collision avoidance systems: a review [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2318-2338.
- [2] WANG J F, YAN X D, NIE S, et al. Research on intelligent vehicle collision warning model based on intervehicle communication[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 1-7.
- [3] WU C Z, PENG L Q, HUANG Z, et al. A method of vehicle motion prediction and collision risk assessment with a simulated vehicular cyber physical system[J]. Transportation Research Part C, 2014, 47 (2): 179-191.
- [4] YAN X D, XUE Q W, MA L, et al. Driving simulator based test on the effectiveness of auditory red-light running vehicle warning system based on time-to-collision sensor [J]. Sensors, 2014, 14(2): 3631-3651.
- [5] 曹昊天, 宋晓琳, 黄江. 基于弹性绳理论的自主车辆防碰撞的路径规划[J]. 汽车工程, 2014, 36(10): 1230-1236.
CAO H T, SONG X L, HUANG J. Path planning of autonomous vehicle for collision avoidance based on elastic band theory[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(10): 1230-1236.
- [6] 尹小琴, 朱喜行, 张盼盼. 高速公路车辆防追尾碰撞系统的设计与控制研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(9): 1080-1084.
YIN X Q, ZHU X H, ZHANG P P. A study on the design and control of vehicle rear-end collision avoidance system in freeway[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(9): 1080-1084.
- [7] 迟瑞娟, 肖庆, 丁洁云. 基于风险状态预估的弯道车辆前撞报警算法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 146-153.
CHI R J, XIAO Q, DING J Y. Vehicle forward collision warning algorithm based on risk prediction on curved roads [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 146-153.
- [8] DABBOUR E, EASA S. Proposed collision warning system for right-turning vehicles at two-way stop-controlled rural intersections [J]. Transportation Research Part C, 2014, 42 (42): 121-131.
- [9] MON Y J, LIN C M. Supervisory recurrent fuzzy neural network control for vehicle collision avoidance system design [J]. Neural Computer & Application, 2012, 21(8): 2163-2169.
- [10] 胡鸿豪, 李磊. 基于灰色模糊理论汽车防撞系统的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2091-2099.
- HU H H, LI L. Simulation study of vehicle collision avoidance system based on grey and fuzzy theory [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2091-2099.
- [11] HUANG C M, LIN S Y. An early collision warning algorithm for vehicles based on V2V communication [J]. International Journal of Communication Systems, 2012, 25(6): 779-795.
- [12] LIU Y Y, LIAN B W, ZHAO H W, et al. Indoor pseudolite relative localization algorithm with Kalman filter[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 1-7.
- [13] 王登贵, 张敬东, 张健, 等. 车辆纵向安全距离算法及其防撞预警系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7): 2203-2205, 2222.
WANG D G, ZHANG J D, ZHANG J, et al. Research on vehicle vertical safety distance algorithm and anti-collision alarm system[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(7): 2203-2205, 2222.

[作者简介]



陈友荣(1982-),男,博士,浙江树人大学信息科技学院副教授,常州大学信息科学与工程学院硕士生导师,主要研究方向为无线传感网和物联网。



万锦昊(1994-),男,常州大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为无线传感网和车联网。



陈俊洁(1995-),女,浙江树人大学信息科技学院本科在读,主要研究方向为车联网算法仿真。



任条娟(1965-),女,浙江树人大学信息科技学院院长、教授,主要研究方向为无线传感网和车联网。