

基于 Copula 模型实现的车辆碰撞协同预警*

林竞力^{1,2,3,4}, 杨炜明⁵, 严功军⁴, Danda B. RAWAT⁶, 王邦吉¹

(1. 西华大学 电气信息学院, 成都 610039; 2. 电子科技大学, 成都 610054; 3. 四川九洲电器集团有限责任公司, 四川 绵阳 621000; 4. 印第安纳大学, 美国 科科莫 46904; 5. 重庆工商管理大学, 重庆 400067; 6. 东肯塔基大学, 美国 里士满 40475)

摘要: 近十年来, 智能交通系统(ITS)和车载网络开始融合紧密, 从而彻底改变了事件侦查和交通信息传送的方式。车辆碰撞协同预警系统是其中一个重要方向。根据预设的一系列车辆碰撞协同预警系统(CCWS)的参数, 如前后两辆车之间的距离、司机的反应时间、相对速度和加速性能等, 采用 Copula 模型对这些参数进行分析并得到车辆发生碰撞的条件概率, 从而为其建立相互的联系, 从全局的角度多方面对碰撞作出预测。最后的仿真验证了此分析结果的正确性。

关键词: 智能交通系统; 车辆碰撞协同预警系统; 碰撞概率

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)10-3761-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.040

Cooperative collision warning based on Copula method

LIN Jing-li^{1,2,3,4}, YANG Wei-ming⁵, YAN Gong-jun⁴, Danda B. RAWAT⁶, WANG Bang-ji¹

(1. School of Electrical & Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China; 3. Sichuan Jiuzhou Group Co., Ltd., Mianyang Sichuan 621000, China; 4. Indiana University, Kokomo IN 46904, USA; 5. Chongqing Technology & Business University, Chongqing 400067, China; 6. Eastern Kentucky University, Richmond, KY 40475, USA)

Abstract: Recently, intelligent transportation system(ITS) and vehicular Ad hoc networks(VANET) change the mode of event detection and information transmission. One of the key components is cooperative collision warning system(CCWS). According to the assumed parameters, such as headway distance, driver reaction time, relative velocity and acceleration, this paper derived the probability of collision based on Copula algorithm. Thus it connected these parameters together and made collision warning more accuracy. In addition, extensive simulations demonstrate the effectiveness of the analysis.

Key words: ITS; CCWS; probability of collision

0 引言

近年来, 车载自组网(VANET)系统获得了大量关注。因为其注定将改变人们的行车方式, 许多车辆制造商、政府机构和标准化团体已经开始推广 ITS 和 VANET 融合观念, 如车对车通信联盟(Car-2-Car Communication Consortium)、车辆安全通信联盟(Vehicle Safety Communications Consortium)、本田高级安全汽车项目(Honda's Advanced Safety Vehicle Program)^[1]等。

VANET 最初源于为行车司机提供前方施工、拥堵情况等路况信息服务, 因此 VANET 主要关注于安全应用。车辆凭借其配备的无线收发器与其他车辆或道路设施通信, 交换车辆运动状况和地理位置信息。利用这些信息可预测碰撞发生概率^[2~4]。Huang 等人^[5]研究了使用车载无线电对各车实时定位的方法; Greene 等人提出了一种早期预警的算法; Huang 等人^[6]提出了用卡尔曼滤波器发现位置及轨迹估算中错误的方法。因为车辆的移动, 其整体布局是一种完全动态

的拓扑结构, 利用位置误差侦测碰撞较为困难, Chang 等人^[7]把数据融合系统使用 GPS 坐标以预测车辆的碰撞。但是, 单独用数据融合来获取车辆的运动力学信息有一定困难。Martinez 和 Ma 等人^[8,9]评估了 CCWS 在 VANET 系统中的可行性; Young 等人^[10]提出了使用类似飞机使用的黑匣子的事件数据记录器的事后再现技术; Sebastian 等人^[11]提出使用图表模型获取多条道路上的多台车辆复杂互动关系的方法, 其可利用邻近的车辆信息和运动参数(车辆位置、速度、行驶的方向)来预测碰撞。但该模型忽视了车辆的加速和减速这两个重要的参数。另外, Yang 等人^[12]为 CCWS 提出了一个车辆沟通协议; Chen 等人^[13]为发生最为频繁的车辆追尾情况提出了一种沟通协议。Misener 等人^[4]使用传感器来预测碰撞, 但传感器受环境影响较大, 如照相机在良好照明的环境下工作很好, 但是在夜晚表现很差。总体而言, 虽然事实上碰撞是由多个参数共同作用造成, 但这些模型都忽视了车辆的大范围移动, 仅凭单个参数对车辆的碰撞进行预测。而 Copula

收稿日期: 2012-03-05; **修回日期:** 2012-04-17 **基金项目:** 四川省教育厅自然科学基金重点资助项目(09ZA160); 西华大学重点资助项目(Z0920912); 印第安纳大学项目基金资助项目(2263160)

作者简介: 林竞力(1977-), 男, 重庆人, 讲师, 博士, 主要研究方向为现代通信和智能交通(jillin@uestc.edu.cn); 杨炜明(1978-), 男, 重庆人, 副教授, 博士, 主要研究方向为随机过程、统计、概率论、智能系统等; 严功军(1976-), 男, 四川绵阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向为智能汽车、汽车无线网络、车载网络、信息安全、通信系统等; Danda B. RAWAT, 美国人, 讲师, 博士, 主要研究方向为车载网络、无线网络、通信网络 MAC 层等。

函数描述了多元变量间的相关性,其将联合分布函数与它们各自的边缘分布函数相联系,从而建立非正态分布变量的联合分布函数^[14,15]。基于此,本文在一系列反映行驶运动力学及碰撞概率的参数基础上,对碰撞概率进行了推导。

1 车辆碰撞的运动性

对于配备有无线收发器、能够与任何其他车辆和路边的基础设施进行通信的车辆而言,其交换的信息如运动信息和位置信息可用于碰撞的预测估计。

本文主要对以下两类碰撞预警参数进行研究:

a) 运动参数。前后两辆车的距离;司机的反应时间;相对加速度;相对速度;警报时间(发出警报并避免事故的时间)。

b) 条件概率参数。给定前后车距、速度、加速度的情况下发生碰撞的条件概率。

1.1 运动系统参数和五秒钟定则

1) 安全距离 安全距离是最重要、使用最广泛的参数。例如60英里/h的速度时为68.58 m即代表车辆在以60英里/h的速度下行驶时停车所需的绝对最小距离^[16]。此安全距离正好大致是车辆以公里的时速行驶三秒的距离。所以,在ITS文献中,安全距离一般根据三秒钟定则进行计算^[17]。本文把计算出的安全距离作为绝对安全距离。

2) 司机反应时间 在面临紧急情况的时候,司机需要一定的反应时间。根据统计记录数据可知,在公路上司机的反应时间约为两秒^[18]。因此,本文中使用两秒钟作为反应时间。在此需要注意的是,三秒钟定则是根据运动力学原理计算的车辆停止所需的绝对时间,而两秒钟体现了一个普通司机的反应时间,是完全主观的。

3) 警告距离 根据上述的三秒钟准则和两秒钟反应时间,本文使用五秒钟定则来定义碰撞警告距离:用于停车的三秒钟和用于司机反应的两秒钟相加后乘以车辆的速度。也就是说,需要在两辆车之间的距离等于或小于警告距离之前就发出报警。

1.2 两车间距离

X_i 是两相邻车辆间的距离,其满足对数正态分布^[18,19]。通信距离 X 为发射端和接收端之间的距离。在图1中,令 $X = \sum_{i=1}^m X_i$, 因为 $X_1, X_2, \dots, X_m$ 相互独立,由大数定律可知, X 大致满足正态分布。

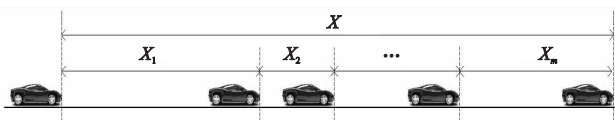


图1 车辆间距与通信距离

1.3 安全距离

安全距离是CCWS系统的重要参数。不失一般性,假设在时间 $t_0 = 0$ 时,车 i 和车 j 同向或相向行驶,车 j 在车 i 之前。图2中随机变量 X 表示同向行驶的两车之间的距离。

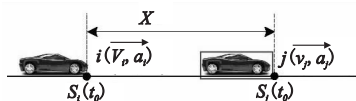


图2 两同向行驶车辆场景描述

在此只考虑同一条道上的车辆发生碰撞。根据上述的五

秒钟定则,可得到安全距离为

$$D_w = 5v_m \quad (1)$$

其中: D_w 是安全距离, v_m 是极限速度。假定在时间 $t_0 = 0$ 时, $X > D_w$, 在时间 t_0 时, 车 i 和车 j 的速度分别是 $v_i(t)$ 和 $v_j(t)$, 加速度分别是 $a_i(t)$ 和 $a_j(t)$, 则两车相撞的距离 X_c 可由五秒钟定则得到

$$X_c = 5 |v_j(t) - v_i(t)| \quad (2)$$

假设 $X_c \leq D_w$, 则可得告警距离为

$$X_w = D_w - X_c \quad (3)$$

同样地, 当两车间的距离小于 X_c 时, 可得到一个碰撞区。这些距离之间的关系如图3所示。

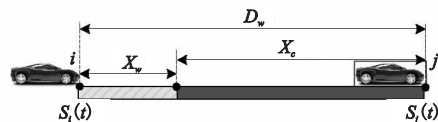


图3 告警距离

假设道路限速 v_m , 此道路行驶的所有车辆都遵循此速度限制。当时间 $t \geq 0$ 时, 在 t 时刻, 车辆的加速度 $a(t)$ 定义如下:

若 $a(0) = 0$, 则 $t \geq 0$ 时, $a(t) = 0$

$$\text{若 } a(0) > 0, \text{ 则 } a(t) = \begin{cases} a(0) & \text{当 } t \leq \frac{v_m - v_0}{a(0)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{若 } a(0) < 0, \text{ 则 } a(t) = \begin{cases} a(0) & \text{当 } t \leq \frac{-v_0}{a(0)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

即车辆的速度没有达到最大速度 v_m 或者停下来之前, 其加速度保持为 $a(0)$ 不变, 其余时刻加速度为0。实际统计数据表明, 此近似基本能反映车辆的运行情况。

若某车的初速度为 $v(0)$, 则时间 t 时的瞬时速度 $v(t)$ 定义为

$$v(t) = v(0) + \int_0^t a(u) du \quad (4)$$

其中: 对 $u \in [0, t]$, $a(u)$ 是时间 t 时的瞬时加速度。

如此可得

若 $a(0) = 0$, 则 $t \geq 0$ 时, $v(t) = v(0)$

$$\text{若 } a(0) > 0, \text{ 则 } v(t) = \begin{cases} v(0) + a(0)t & \text{当 } t \leq \frac{v_m - v_0}{a(0)} \\ v_m & \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{若 } a(0) < 0, \text{ 则 } v(t) = \begin{cases} v(0) + a(0)t & \text{当 } t \leq \frac{-v_0}{a(0)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

时间区间 $[0, t]$ 中车辆行驶的距离为

$$s(t) = \int_0^t v(x) dx \quad (5)$$

如此, 对于车 i 和车 j , 简单起见, 令 $v_i = v_i(0)$, $a_i = a_i(0)$, $v_j = v_j(0)$, $a_j = a_j(0)$, 则瞬时速度 $v_i(t)$, $v_j(t)$ 和瞬时加速度 $a_i(t)$, $a_j(t)$ 可由上面公式求得。

假设在连接建立时刻(时间0), 两辆车之间的距离是 D_{ij} 。两车在时间 t 时的距离可写为

$$S_t = s_j(t) - s_i(t) + D_{ij} \quad (6)$$

给定安全距离 D_w , 可得

$$X_c \leq s_j(t) - s_i(t) + D_{ij} \leq D_w \quad (7)$$

1.4 碰撞时间

报警信息重复发送时间 t_m 是预警的重要参数, 其决定了

发送报警信息的频率。设 t_w 为两辆车进入报警区的时间,则

$$s_j(t_w) - s_i(t_w) + D_{ij} \leq D_w \quad (8)$$

设 t_c 为两车在碰撞区的时间,则

$$s_j(t_c) - s_i(t_c) + D_{ij} \leq D_c \quad (9)$$

如此可得

$$t_m = t_c - t_w \quad (10)$$

2 碰撞概率

由第 1 章可见,一方面需对运动信息参数作出估计,另一方面需计算给定的两车在实时运动信息参数下发生碰撞的条件概率。由于运动信息参数彼此相关,条件概率的计算比较复杂,因此需要一种能在运动信息参数相关的条件下进行建模的方法。

首先定义二元随机变量 Y_1 :

$$Y_1 = \begin{cases} 1 & \text{当 } \log D_{ij} < \log D_w \\ 0 & \text{当 } \log D_{ij} \geq \log D_w \end{cases} \quad (11)$$

由于 D_{ij} 服从对数正态分布,从而 $\log D_{ij}$ 服从正态分布。

令 v_r 表示两车间的安全相对速度,从而可定义二元随机变量 Y_2 :

$$Y_2 = \begin{cases} 1 & \text{当 } v_j(t) - v_i(t) > v_r \\ 0 & \text{当 } v_j(t) - v_i(t) \leq v_r \end{cases} \quad (12)$$

令 a_r 表示两车间的安全相对速度,从而可定义二元随机变量 Y_3 :

$$Y_3 = \begin{cases} 1 & \text{当 } a_j(t) - a_i(t) > a_r \\ 0 & \text{当 } a_j(t) - a_i(t) \leq a_r \end{cases} \quad (13)$$

因为 $Y_i (i=1,2,3)$ 为二元随机变量,且具有分布函数:

$$F(Y_i) = \begin{cases} 0 & \text{当 } Y_i < 0 \\ 1 - p_i & \text{当 } 0 \leq Y_i < 1 \\ 0 & \text{当 } Y_i \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

其中: p_i 为 $Y_i = 1$ 时的概率,即 $P_r(Y_i = 1)$ 。

令 C 表示车 i 和车 j 之间是否发生碰撞的二进制随机变量。因此,需寻求在给定 $Y_i (i=1,2,3)$ 条件下 C_{ij} 的条件概率:

$$P(C|Y_1, Y_2, Y_3) = \frac{P(C, Y_1, Y_2, Y_3)}{P(Y_1, Y_2, Y_3)} \quad (15)$$

彼此相关的离散变量的联合分布不唯一,其形式也极难得到。因为各运动信息参数关系确定,因此,本文引入高斯 Copula 函数构建该分布函数^[14]。

2.1 高斯 Copula 函数

若 $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)' \sim H$, 其中 H 是一个 m 维分布函数,具有边缘分布 $H_1, H_2, \dots, H_m$, 则一个 Copula 函数具有形式为

$$C_H(u_1, u_2, \dots, u_m) = H\{H_1^{-1}(u_1), H_2^{-1}(u_2), \dots, H_m^{-1}(u_m)\} \quad (16)$$

其中: $u_i \in (0, 1), i=1, 2, \dots, m$ 。

当 $X \sim N_m(0, \Gamma)$, 且 $H_i = \Phi$, 则可得到 Copula 函数的特殊形式之一即高斯 Copula, 通常用 $C_\Phi(u|\Gamma)$ 表示, 其密度函数为

$$C_\Phi(u|\Gamma) = |\Gamma|^{1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}q^T \Gamma^{-1}q + \frac{1}{2}q^T q\right\} \\ |\Gamma|^{1/2} \exp\left\{\frac{1}{2}q^T (I_m - \Gamma^{-1})q\right\} \quad (17)$$

其中: $q = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$ 中的元素为 $q_i = \Phi^{-1}(u_i), i=1, 2, 3$ 。给定边缘分布 $F_1, F_2, \dots, F_m$, 则可得到多元分布为

$$G(y) = C_\Phi\{F_1(y_1), F_2(y_2), \dots, F_m(y_m)|\Gamma\} \quad (18)$$

若边缘分布变量是离散变量, 则其联合概率可通过对式 (18) 求 Radon-Nikodym 导数得到

$$g(y) = P(Y_1 = y_1, Y_2 = y_2, \dots, Y_m = y_m) = \\ \sum_{j_1=0}^1 \sum_{j_2=0}^1 \dots \sum_{j_m=0}^1 (-1)^{m+\sum_{i=1}^m j_i} C_\Phi(u_1^{j_1}, u_2^{j_2}, \dots, u_m^{j_m}|\Gamma) \quad (19)$$

其中: $u_i^1 = F_i(y_i), u_i^0 = F_i(y_i -)$ 。若 y_i 取值于整数域, 则 $F_i(y_i -) = F_i(y_i - 1)$ 。

2.2 联合概率 $P(C, Y_1, Y_2, Y_3)$

在本文中, 根据运动信息参数可知, 其为 $m=4$ 的情况。因此, $P(C, Y_1, Y_2, Y_3)$ 具有如下形式:

$$P_r = P(C, Y_1, Y_2, Y_3) = \\ C_\Phi(\omega^1, u_1^1, u_2^1, u_3^1) - C_\Phi(\omega^0, u_1^1, u_2^1, u_3^1) - \\ C_\Phi(\omega^1, u_1^0, u_2^1, u_3^1) - C_\Phi(\omega^1, u_1^1, u_2^0, u_3^1) - \\ C_\Phi(\omega^1, u_1^1, u_2^1, u_3^0) + C_\Phi(\omega^1, u_1^1, u_2^0, u_3^0) + \\ C_\Phi(\omega^1, u_1^0, u_2^1, u_3^0) + C_\Phi(\omega^1, u_1^0, u_2^0, u_3^1) + \\ C_\Phi(\omega^0, u_1^1, u_2^1, u_3^0) + C_\Phi(\omega^0, u_1^1, u_2^0, u_3^1) + \\ C_\Phi(\omega^0, u_1^0, u_2^1, u_3^1) - C_\Phi(\omega^1, u_1^0, u_2^0, u_3^0) - \\ C_\Phi(\omega^0, u_1^1, u_2^0, u_3^0) - C_\Phi(\omega^0, u_1^0, u_2^1, u_3^0) - \\ C_\Phi(\omega^0, u_1^0, u_2^0, u_3^1) - C_\Phi(\omega^0, u_1^0, u_2^1, u_3^0) \quad (20)$$

其中: $\omega^1 = F(C), \omega^0 = F(C-1), u_i^1 = F_i(y_i), u_i^0 = F_i(y_i - 1), i=1, 2, 3$ 。如此, 即可得到式 (15) 的分子。

2.3 联合概率 $P(D, A, V)$

式 (15) 中分母为给定的距离、加速度和速度的联合概率 $P(D, A, V)$ 。

假设车辆的速度满足正态分布, 即 $V \sim N(\mu_v, \sigma_v)$, 同样地, 假设车辆的加速度满足正态分布 $A \sim N(\mu_a, \sigma_a)$; 根据前述可知, 车辆间距离满足对数正态分布, 即 $D \sim \log N(\mu_d, \sigma_d)$ ^[20]。

由于 D, A 和 V 都是连续随机变量, 多元扩散模型^[14, 21, 22]可通过密度函数定义如下:

$$P(D, A, V; \Gamma) = C_\Phi\{F_1(D), F_2(A), F_3(V)|\Gamma\} \cdot \\ f_1(D)f_2(A)f_3(V) \quad (21)$$

2.4 条件概率 $P(C|D, A, V)$

如此, 可计算给定距离、加速度和速度条件下碰撞事故发生的条件概率:

$$P(C|D, A, V) = \frac{P(C, D, A, V)}{P(D, A, V)} \quad (22)$$

根据上面的讨论, 可分别使用式 (20) 计算 $P(C, D, A, V)$ 和式 (21) 计算 $P(D, A, V)$, 最终得到 $P(C|D, A, V)$ 。

3 讨论

本文得到了一系列预测碰撞的相关参数, 其值均可计算。本章讨论两种碰撞预测, 即加权碰撞预测和基于优先级预测。

3.1 加权碰撞预测

当两车行驶于同条道上时, 可考虑加权碰撞预测的基本思路:

$$C_I = \omega_1 \frac{X}{5v_m} + \omega_2 P_c + \omega_3 \frac{v_m - v_r}{v_m} + \omega_4 \frac{2v_m a_r}{v_m} \quad (23)$$

其中: C_I 是碰撞指数; $\frac{X}{5v_m}$ 描述车距效应; $\frac{v_m - v_r}{v_m}$ 描述相对速度效应; $\frac{2v_m a_r}{v_m}$ 描述相对加速度效应; 记为 $1 \geq \omega_1 \geq \omega_2 \geq \omega_3 \geq \omega_4 \geq 0$ 。 C_I 越小, 发生碰撞概率越高, 反之越低。运动参数可在车

辆间反复交换。在时间 t_m 内,根据新的运动参数,预警信息得以更新。

此算法综合了所有运动相关参数来预测碰撞,因此准确性较高。例如,虽然车 i 和车 j 相距很近,只有 20 m,但都以 60 km 的时速行驶,加速度也相同,报警信号就不会发出。而若车 i 以很高的速度和加速度靠近车 j ,然后把速度和加速度降到与车 j 一样,则只会发出一次报警信号,而不会反复报警。

3.2 基于优先级预测

假设优先顺序为 $X > P_c > v_r > a_r$,则当两车在同一条道上时,按照 X 、 P_c 、 v_r 和 a_r 的顺序依次查询,若某参数预示要发生碰撞,则碰撞报警发出;否则,进入下一参数查询。相比而言,此预测方式执行较为简单。

4 仿真

本文使用 MATLAB 软件对在给定的距离、速度、加速度时发生碰撞概率进行仿真。假设相对速度 v_r 满足 $v_j(t) - v_i(t) > v_r$,对相对加速度 a_r 和值 $\log D_w$ 进行改变,仿真结果如图 4 所示。由图可见,仿真结果与分析一致,当 D_w 变小时,发生碰撞的概率变大,这是因为越小的 D_w 意味着留给碰撞预警发出的时间越短。当安全相对加速度 a_r 变大时,加速度数值的差 $a_j(t) - a_i(t) - a_r$ 变小,此加速度更接近安全加速度。因此,碰撞发生概率减小。

另外,为了研究相对速度对碰撞的概率产生的影响,使用安全相对速度和加速度作为变量,假设 $D_{ij} < \log D_w$ 时,碰撞发生概率如图 5 所示。由图可见,当 a_r 或 v_r 增大时,发生碰撞的概率减小,这是因为真实速度或加速度更加接近于安全速度或加速度要求。

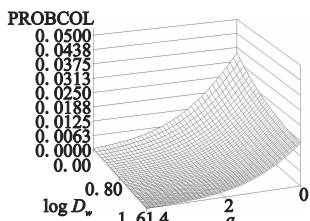


图4 碰撞发生概率与 $\log D_w$ 和 a_r 的关系

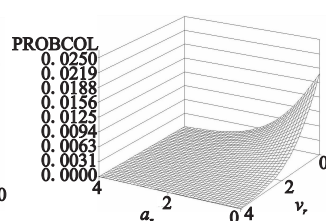


图5 碰撞发生概率与 v_r 和 a_r 的关系

5 结束语

本文推导了用于预测碰撞发生的运动参数和条件概率表达式。其使用统计学方法描述给定运动参数时碰撞发生的概率,并给出了可供司机反应的时间表达式,对车辆碰撞协同预警系统的设计有一定理论意义。在将来的工作中,考虑通过获取实际交通数据对碰撞预测进行仿真,以便进一步充实本文的分析结果。另外,还可考虑在系统中整合一些传感器来提高预测的稳定性和正确性。

参考文献:

- [1] TAKAHASHI A, ASANUMA N. Introduction of Honda ASV-2 (advanced safety vehicle-phase 2) [C]//Proc of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2000:694-701.
- [2] SOTELO M Á, Van LINT J W C, NUNES U, et al. Introduction to the special issue on emergent cooperative technologies in intelligent transportation systems[J]. IEEE Trans on Intell Transport Sys, 2012,13(1):1-4.
- [3] ELBATT T, GOEL S K, HOLL G, et al. Cooperative collision war-

ning using dedicated short range wireless communications[C]//Proc of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. New York: ACM Press,2006:1-9.

- [4] MISENER J A, SENGUPTA R, KRISHNAN H. Cooperative collision warning: enabling crash avoidance with wireless technology [C]//Proc of the 12th World Congress on ITS. 2005:1960-1970.
- [5] HUANG Ching-ling, FALLAH Y P, SENGUPTA R, et al. Intervehicle transmission rate control for cooperative active safety system[J]. IEEE Trans on Intell Transport Sys, 2011,12(3):645-658.
- [6] HUANG J H, TAN H S. Error analysis and performance evaluation of a future-trajectory-based cooperative collisionwarning system [J]. IEEE Trans on Intell Transport Sys, 2009,10(1):175-180.
- [7] CHANG B R, TSAI H F, YOUNG C P. Intelligent data fusion system for predicting vehicle collision warning using vision/GPS sensing[J]. Expert Syst Appl, 2010,37(3): 2439-2450.
- [8] MARTINEZ F J, CANO J C, CALAFATE C T, et al. Assessing the feasibility of a vanet driver warning system[C]//Proc of the 4th ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks. 2009:39-45.
- [9] MA Xiao-min, CHEN Xian-bo, REFAI H H. Performance and reliability of dsrc vehicular safety communication: a formal analysis[J]. EURASIP Journal Wirel Commun Netw, 2009,2009(3):1-13.
- [10] YOUNG C P, CHANG B R, LIN J J, et al. Cooperative collision warning based highway vehicle accident reconstruction [C]//Proc of the 8th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. 2008:561-565.
- [11] SEBASTIAN A, TANG M, FENG Y, et al. Multi-vehicles interaction graph model for cooperative collision warning system [C]//Proc of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2009:929-934.
- [12] YANG X, LIU L, VAIDYA N, et al. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning [C]//Proc of the 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. 2004:114-123.
- [13] CHEN L, PENG Y, TSENG Y. An infrastructure-less framework for preventing rear-end collisions by vehicular sensor networks [J]. Communications Letters, 2011,15(3):358-360.
- [14] SONG P X K. Multivariate dispersion models generated from Gaussian Copula[J]. Board of the Foundation of the Scandination Journal of Statistics, 2000,27(2): 305-320.
- [15] JOE H. Parametric family of multivariate distributions with given margins[J]. Journal of Multivariate Anal, 1993,46(2): 262-282.
- [16] General Atomics Sciences Education Foundation. Investigation #6: driving safety[R]. 2003.
- [17] The California DMV. The california DMV driver handbook [EB/OL]. http://www.cal-driver-ed.com/dmv-handbook/26.htm.
- [18] YAN G, OLARIU S, SALLEH S. A probabilistic routing protocol in vanet [C]//Proc of the 7th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia. 2009:579-584.
- [19] YAN G. Proving location security in vanet [D]. Norfolk: Computer Science Department, OLD Dominion University, 2009.
- [20] PUAN O C. Driver's car following headway on single carriageway roads[J]. Malaysian Journal of Civil Engineering, 2004,16(2): 15-27.
- [21] MARSHALL A W, OLKIN I. Families of multivariate distribution [J]. Journal of Amer Statist Assoc, 1988,83(403): 834-841.
- [22] NELSEN R B. The theory of dispersion models [M]. London: Chapman & Hall, 1997.