

车载自组织网络在智能交通中的应用研究综述

程嘉朗¹ 倪 巍¹ 吴维刚¹ 曹建农² 李宏建³

(中山大学信息科学与技术学院计算机系 广州 510006)¹

(香港理工大学电子计算学系 香港)² (总后勤科学研究所 北京 100071)³

摘 要 对基于车载网络的智能交通技术进行了全面的总结和分析。首先,通过分析智能交通系统的需求和车辆自组织网络的特点,指出将车载网络应用于智能交通系统面临的问题和挑战。然后,对现有的基于车载网络的智能交通应用进行了分类:安全性相关、效率相关和资讯娱乐 3 个大类,以及进一步按照技术方法进行详细分类。按照这个分类,对研究现状进行了深入分析,比较了不同方法的利弊。基于对现有工作的分析,总结出了存在的问题和不足,并对未来的研究工作发展进行了展望。

关键词 车载自组织网络,车联网,智能交通,问题和挑战,综述

中图法分类号 TP393,TP399 文献标识码 A

Survey on Vehicular Ad hoc Network Based Intelligent Transportation System

CHENG Jia-lang¹ NI Wei¹ WU Wei-gang¹ CAO Jian-nong² LI Hong-jian³

(Department of Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)¹

(Department of Computing, Hongkong Polytechnic University, Hongkong, China)²

(Logistics Science Research Institute, Beijing 100071, China)³

Abstract This paper reviewed the state-of-the-art in VANET-based ITS application and gets insights into the topic, firstly analyzed the challenges to be addressed and then reviewed existing works. According to the purpose of solutions and approaches used, we provided an overall categorization of existing works and discussed them with deep analysis. Different approaches were compared with pros and cons. Based on the analysis of existing works, we found out problems to be addressed and directions of future research.

Keywords Vehicular Ad hoc network, Connected vehicles, Intelligent transportation system, Issue and challenge, Survey

1 引言

智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)整合了电子、通信、计算机等不同的技术领域,通过利用先进的通信技术,构建大规模、实时、准确和高效的交通管理系统。与以道路管理为目标的传统交通系统不同,智能交通系统的目标是通过先进的技术将实时准确的道路信息和便捷的服务提供给驾驶者,并有效地调整交通控制方案,减少交通阻塞和提高驾驶安全性,以此来提升驾驶者的驾驶体验。美国、日本以及欧盟地区已经有众多有关智能交通系统方面的研究和部署在开展中^[1]。在我国,虽然智能交通系统研究起步较晚,但近年来也得到较大的发展,北京、上海和广州等不少城市都已经开始部署一些简单的智能交通系统^[2]。

目前的智能交通系统基本上还是以集中式的机制为主,通过各种途径收集路况信息,将其汇集到智能交通控制中心

进行决策处理,然后将交通引导信息通过广播、引导设施等途径发布,或者通过控制路面交通设施如信号灯来贯彻实施决策结果。这类系统的两个典型例子是目前已经实际部署的十字路口交通控制系统,SCOOT^[3]和 SCAT^[4]。通过部署在十字路口的路面的传感器或检测设备收集交通流量数据,控制中心基于流量数据对各个十字路口的红绿灯调度周期及各方向绿灯时间进行计算,以实现车辆快速、及时通过,减少等待时间。然而,这样的智能交通管理机制需要在路面部署大量的传感器和检测设备才能获取到准确的交通信息,这不但需要巨大的人力物力开支,而且难以适应复杂多变的交通流量情况。

近年来,随着车载自组织网络(Vehicular Ad hoc Network, VANET)的发展,车辆具备了通信和信息处理的能力,分布式的交通控制成为可能。车辆可以通过分布式的协调、同步等,实现对道路资源的合理分配,控制车辆安全、高效地

本文受国家自然科学基金(61379157),广东省自然科学基金(S2012010010670),广州市珠江科技新星专项基金(2011J2200088)资助。

程嘉朗(1989—),男,硕士生,主要研究领域为网络与分布式计算、车载自组织网络,E-mail:chjlang@mail2.sysu.edu.cn;倪 巍(1990—),男,硕士生,主要研究领域为网络与分布式计算、车载自组织网络;吴维刚(1976—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为网络与分布式计算、自组织网络、云计算;曹建农(1960—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为无线网络、分布式计算、移动计算;李宏建(1979—),男,副研究员,主要研究领域为无线 Ad hoc 网络、网络安全。

行驶,大大推动了智能交通系统的发展^[5]。

车载自组织网络是一种自组织、结构开放的车间通信网络,是移动自组织网络在交通系统中的实例化,也是智能交通系统的重要构成部分。VANET的主体是安装了通信与计算设备的车辆,可以实现车辆间通信(vehicle-to-vehicle, V2V)和车辆与路边基础设施通信(vehicle-to-infrastructure, V2I)。随着智能交通、车联网成为国民经济和社会发展的重点领域, VANET已经成为影响社会发展的核心技术之一。预期在不久的将来,随着VANET的大量部署, VANET在事故预警、交通安全、交通管理、乘客娱乐以及驾驶环境等方面将会起着至关重要的作用,有望成为物联网的典型应用之一。目前, VANET的技术研究得到了学术界的空前关注,成为无线网络与通信领域的热点。由ACM、IEEE、IFAC和TRB联合主办的首届国际车联网大会已经于2012年12月顺利召开,进一步推动了车载网络在学术研究和应用方面的发展。

基于车载网络,车辆本身可以具有检测能力和通信能力,系统采集数据的方式从以前靠传感器采集信息转变到车辆可以主动发布和传播消息。这可以更加方便获得准确和实时的交通数据,而且可以利用车间通信做出之前利用传感器无法做到的事情。譬如,日本新能源和产业技术综合开发机构展示了最新的车队一体无人驾驶行车系统¹⁾。多辆卡车分别保持4米间距、以时速80公里的同一速度进行了试跑。每辆卡车上都安装了自动驾驶系统,通过车辆间的通信,各辆车可以共享速度和刹车等信息,从而使得系统能够同时控制多辆卡车。与车辆各自行驶相比,此系统能够节省油耗15%以上。

目前, VANET在智能交通系统中的典型应用与服务主要包括安全驾驶、交通控制与管理,以及资讯娱乐等。安全驾驶方面的应用服务包括紧急刹车警示、碰撞事故避免警示、安全距离警示和变车道警示等。这类应用主要是为了避免车辆之间发生碰撞,保障车辆驾驶的安全性。交通控制与管理方面的应用包括路径规划和导航、拥塞处理、十字路口控制、停车场控制等。这类应用的目的是提高交通设施的效率,节约驾乘人员的时间。资讯娱乐相关的服务主要是信息查询与Internet服务,包括新闻资讯、Email、文件获取等。这类应用的目标是为人们提供更便捷的信息服务,提高人们在行车过程中的舒适度。在VANET的推动下,智能交通系统的发展迅速,大量研究围绕VANET和ITS开展。本文将对车联网在智能交通系统中的应用研究进行归类和分析,总结存在的问题,并给出未来的研究方向。

本文第2节指出当前VANET和ITS研究中存在的问题与挑战,第3节详细介绍几类主要应用的研究现状并对其方法进行分析讨论,最后总结了目前工作中存在的问题,并对未来的重点研究方向进行了展望。

2 问题与挑战

智能交通系统的主要目的在于提高交通网络的安全性和效率。出于安全和高效两方面考虑,智能交通系统应满足以下要求:

1) 安全性。安全是交通系统考虑的首要因素,所以,任何智能交通系统应用的设计都在满足安全性的前提下开展。

2) 高可靠性、鲁棒性。由于高速移动、动态变化等因素,使得交通系统中的各种异常状况会频繁出现。相应地,相关机制和算法必须具有高度的可靠性、鲁棒性以便处理异常状况,并为安全性保障提供支持。

3) 实时性。这是智能交通系统区别于传统交通系统的主要特征。智能交通系统要能够根据实时的交通情况,对交通进行实时控制和引导。相应的交通系统对交通状况的处理要及时、快速才能够到达目的。

4) 可扩展性。交通网络内车流量经常是动态变化的,面对交通流量的增加,智能交通系统应易于扩展,在面对复杂多变的交通情况下依然能有效地工作。

VANET是自组织网络的一种特殊形态,除了具有一般自组织网络的特性,如无线传输距离短、自组织管理、低带宽等外, VANET作为车辆节点构成自组织网络,又有许多不同于其他自组织网络的独有特征:

1) 网络拓扑受限,但具有高度动态性,网络连接难以维持。由于车辆沿道路分布, VANET拓扑结构自然受道路拓扑限制。车辆移动速度快, VANET的拓扑始终处于频繁的变化中,网络的连通性也会不断发生变化。

2) 消息传播具有方向性,受地理位置的限制。VANET的数据通信往往与地理位置有关,有一定的方向性。譬如, VANET中安全消息具有后向传递性,在事故预警时,消息总是向来车的方向进行传播。

3) 节点移动具有规律性,可预测性强。由于车辆要沿着既有的道路行驶,运动路径受到道路分布的限制,有明显的规律性,可以基于路径规划或地图等信息进行预测。

4) 节点的能量和存储充足。VANET的节点是装载在车辆中的,其能量充足,也没有严格的物理大小限制,因此节点的本地资源丰富。

VANET应用于ITS可以有效地监测交通网络的流量,根据实时的交通情况对交通控制策略作出自适应的调整。为了满足智能交通系统的需求,利用VANET设计智能交通系统应该解决以下几个问题:

1) 保证消息能以低延迟在车载网络中传输。这是出于智能交通系统中的安全性的考虑,因为交通安全相关的应用往往对节点操作的实时性有很高的要求。譬如,当前车刹车制动时,后续车辆应该在很短的时间内采取相应操作,避免事故发生。

2) 高可靠性。由于VANET的应用经常涉及到人车的安全性,所用到的各种算法机制必须先保证高度可靠性,其次才考虑性能。

3) 可扩展性。VANET是由车辆节点组成的网络,节点密度可能会很大,相应地,网络的规模也会比较大。因此,用于VANET的机制和算法必须适应这样的情形,才能够进行有效的扩展。

4) 分布式协同的一致性。VANET作为一种特定的分布式系统,其各类应用都难免会涉及到分布式协同的问题。尤其是在交通控制和安全驾驶方面的应用中,往往要多个节点车辆合作才能实现目标,这就需要解决分布式系统中的一致性问题。

¹⁾ <http://www.people.com.cn/24hour/n/2013/0226/c25408-20596212.html>

3 研究现状与分析

3.1 总体分类

本节将对利用车载网实现的智能交通系统应用的特点进行归纳,并给出分类,同时概括介绍每一类应用要解决的问题和使用的方法。

如图 1 所示,根据智能交通系统的具体需求,我们将基于 VANET 的智能交通系统应用分为 3 大类:保证驾驶安全性的应用;提高交通系统效率的应用;提供资讯娱乐功能的应用。

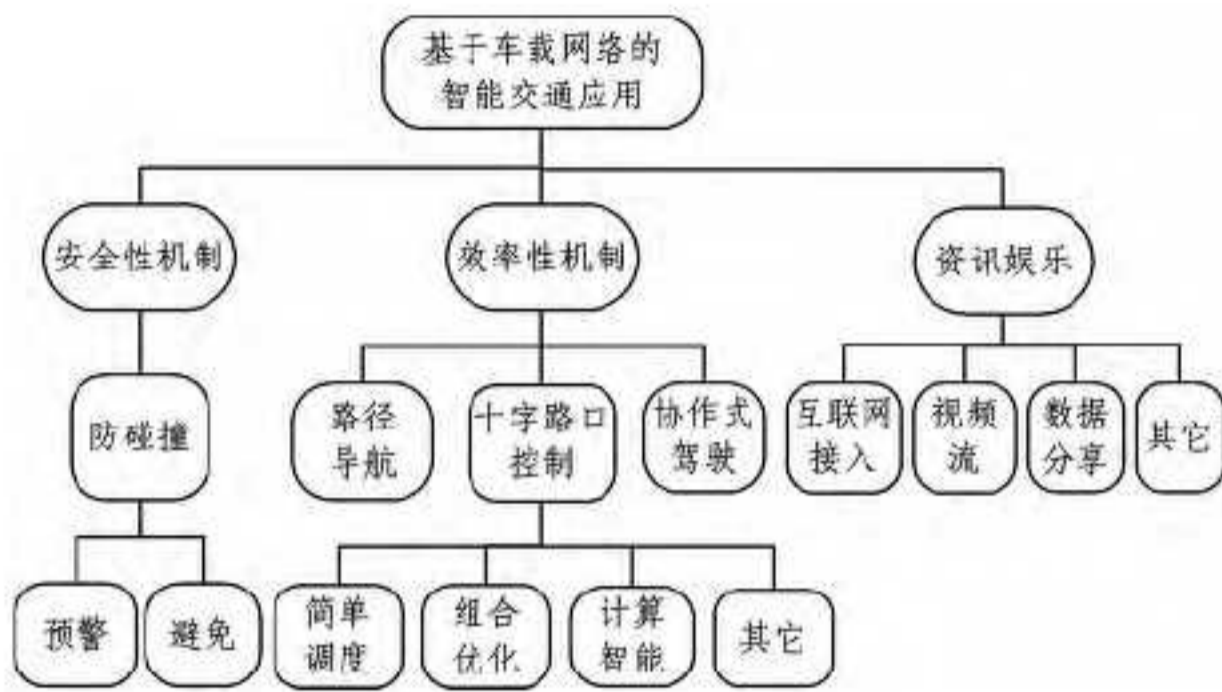


图 1

1) 安全性相关的应用主要是防碰撞。防碰撞有多个应用场景,具体包括紧急刹车警示、碰撞事故避免警示、安全距离警示和变车道警示等。防碰撞的目的在于提高车辆行驶的安全性,减少车辆碰撞和事故的发生。按照防碰撞的机制,这类应用可以进一步分为两类。

碰撞警告机制。向有潜在碰撞危险的车辆提前发出警告信息,以便驾驶者有足够的时间进行反应。这类应用通常要求车辆相互之间车载网络发送自身的位置和速度等交通信息,车辆根据自身和附近车辆的运行轨迹判断自己与附近的车辆是否有潜在的碰撞危险,是否向驾驶者发出警告信息。或者车辆在检测到交通事故后,将事故信息通过车载网络发布到其它车辆,让车辆提前为前方道路的事故做好准备。例如,在高速公路上,车辆在检测到前方发生车辆相撞事故后,告诉后面的车辆事故发生的地点,后车接收到该信息便提前减速或变换车辆,避免连环追尾事故的发生。

碰撞避免机制。该类机制是基于自动驾驶技术的。通过提前计算车辆合适的行驶速度和路径并控制车辆的行为来避免车辆发生碰撞。同样地,这类方法要求车辆相互之间交换位置和速度等交通信息。由于安全性的要求,消息传输延迟要低和可靠性要高,因为只有保证消息在较短时间被接收和处理的前提下,才能提前在事故发生前给出警告或者控制车辆速度。

2) 提高交通系统效率相关的应用的目的是提高交通网络的效率,减少道路拥塞,减少行程时间,提高交通网络吞吐量,减少车辆废气排放量等。目前的主要应用包括十字路口交通灯控制、路径规划与导航、车辆协同驾驶等。城市交通堵塞大部分都是发生在十字路口区域,所以不少研究都根据实时的交通流量情况,自适应地调节十字路口信号灯,更高效和公平地安排各方向红绿灯的时间和次序,以达到缓解十字路口交通堵塞的目的。为此,研究人员应用了大量的方法于十字路口交通控制。有的研究通过车载网收集各方向车流量情况,

利用公式计算红绿灯的周期和各方向的绿灯时间。有一部分研究将十字路口控制问题建模成一个组合最优化问题,利用如动态规划等方法去求解。还有利用计算智能的方法处理十字路口复杂多变的交通状况。

除了十字路口交通控制外,提高交通系统效率的另一种方法是为车辆规划出合理的行驶路线,避免大量车辆集中驶向同一段路,以此来平衡交通网络各路段的负载,提高整个交通网络的吞吐量。还有就是利用车间通信和自动驾驶技术,实现车辆协作式驾驶。例如,前文提到的日本新能源和产业技术综合开发机构展示了最新的车队一体无人驾驶行车系统,安排若干车辆组成一个车队协同前进,这样不仅减少了车辆频繁加减速带来的废气排放量,同时也避免车辆之间发生碰撞,提高了车辆行驶的安全性。这些效率性相关的应用对网络的延迟性能和可靠性没有安全相关的应用那么高,但是它要求系统的处理信息的规模较大,特别在涉及交通优化方面的问题时,系统通常需要在流量动态变化的情况下及时和自适应地调整控制策略。

3) 资讯娱乐相关的应用,包括 Internet 访问、内容分享和视频流等。这类应用的目的是为车内乘客提供娱乐和便捷的信息服务。这类应用需要考虑网络带宽、数据路由和隐私保护等相关的问题。

3.2 安全性机制

安全性相关的应用包括紧急刹车警示、碰撞事故避免警示、安全距离警示和变车道警示等。如前所述,这类应用按照所采用的方法有:(1)碰撞预警。车辆相互交换各自的位置、速度等信息,车辆经过计算判断是否有潜在碰撞危险,若有危险,则为驾驶者提前发出警告,让驾驶者有足够的反应时间来刹车或变换车道,避免碰撞事故的发生。(2)碰撞避免。车辆通过车载网络交换信息,根据这些交通信息计算行驶路径,调整行驶速度和车辆间的相离,避免碰撞发生。

3.2.1 碰撞预警机制

利用 GPS 和车间通信(V2V),可以实现十字路口防碰撞系统^[6,7]。Morioka 等人利用 GPS、陀螺仪和车间通信提出了一个十字路口防碰撞系统^[6]。为了防止车辆在没有红绿灯的十字路口因为互相不能看到对方而发生碰撞,该系统利用了 5.8GHz 频带的无线电波传递信息。当车辆驶向十字路口时,会发出侦测信息,包括车辆位置和速度等,若此时其它车辆接到该信号,它们互相之间会交换信息并判断是否有在十字路口发生碰撞的危险。若有危险,则警告驾驶者。

类似地,Miller 等人提出了一个十字路口车辆合作式防碰撞的系统^[7]。车辆利用 GPS 获取位置和速度,同时利用车载设备获取如刹车状态、刹车压力和转向盘角等车辆的参数。通过车间通信交换这些信息,车辆不仅可以计算各自的行驶轨迹,判断轨迹是否有交叉,计算车辆的碰撞时间(time-to-collision, TTC),还可以结合驾驶者的反应时间和车辆参数计算出避免时间(time-avoidance, TTA)。当发现车辆行驶轨迹有竞争时,系统通过比较避免时间和碰撞时间来决定是否给驾驶者警告。若驾驶者有足够的时间来避免碰撞发生,则毋须给驾驶者警告,以免干扰驾驶者正常行驶。

与以上利用车间通信实现十字路口防碰撞的系统不同,Wang 等人利用车辆与部署在十字路口的基础设施之间的通信来防止车辆发生碰撞^[8]。车辆驶向十字路口时将各自位置

和速度等信息发送给路边基础设施,其计算出 TTC 和 TTA 后,判断是否向车辆发送警告消息。与利用车间通信的方法相比,该系统利用集中式处理的方法避免了由于车辆大量广播消息造成的网络拥塞和消息延迟,提高了网络性能。

与需要视线传播的技术如激光、雷达和声波相比,车间通信技术可以将信息传递到更多车辆,从而让其它车辆遇到事故时有更加充足的反应时间。车载网络除了可以应用在十字路口防碰撞外,还可以在高速公路上防止事故连环发生。Reichardt 等人提出了一个名为 CarTALK2000 的基于车间通信的驾驶员辅助系统^[9]。在该系统中,车辆由于交通事故、机件故障或者其它原因需要减速或者停车时,会通过 VANET 以多跳的形式发布紧急事故警告信息,告诉其它车辆事故车辆的地点和速度等信息。这样,即使车辆距离发生事故的地点相隔较远或者由于障碍物阻碍而无法看到事故车辆,仍然可以在第一时间意识到事故发生,从而采用相应的行动避免事故连环发生。

基于车载网实现的车辆防碰撞应用需要车辆将消息准确及时地分发到其它附近的车辆。由于车载网拓扑结构复杂多变和通信链路不可靠的特点,传统的移动自组织网络(Mobile Ad hoc Network, MANET)的 MAC 层协议和数据包路由协议对这类应用并不适用。Ye 等^[10]提出了一个在高速公路上车辆协同防止追尾事故发生的车载网络 MAC 层和数据路由协议。

Biswas 等^[11]也提出了一个类似的协议。他们讨论了在车间通信下实现协同防碰撞对 MAC 层和数据路由的需求,提出了在车辆防追尾碰撞的情形下数据包如何路由的问题。在该协议下,车辆遇到紧急情况后会向后面的车辆发送警告信息,接收到警告信息的车辆根据消息到来的方向来决定是否转发该消息到其它车辆。若消息是从它后面的车辆传送过来,该消息将会被忽略。消息通过多跳转发,直到所有车辆都能收到警告并及时采取行动避免追尾碰撞发生。然而,这种方法有两个方面的问题:(1)产生了大量的消息,造成整个车载网络消息泛滥。(2)对于同一事故,多个车辆会产生冗余消息。这样,当车辆数量增加时,消息数目大量增加,消息很可能在 MAC 层发生碰撞而不得不重发,而大量的消息重发又会造成更多的消息延迟。

为了使警告消息在较低延迟的情况下传递到车辆,Xue 等^[12]提出了利用拥塞控制和区分服务的方法来实现紧急警告消息的有效传输。他们设计了发送速率调整算法来控制网络拥塞,同时通过考虑车辆在故障发生时不同状态的转换,避免产生大量的冗余消息。通过控制消息发送速率和减少冗余消息数,该方法能够使警告信号以较低延迟分发到车辆。

为了解决预警消息的重复、泛滥,研究人员开始将分簇的方法用于传播消息^[13-15]。Little 和 Agarwal 等人提出根据车辆的行驶车道将车辆组成不同的簇^[13]。每一簇由簇内的排头的车辆和队尾的车辆标识。经过分簇后,消息在簇内成员之间传输或者以多跳的方式在不同的簇之间传输。文章利用时滞容错网络(Delay Tolerant Networking)的运输监护机制^[16]设计了一个消息分发机制,并且分析这种传输策略在不同交通情况下的性能。同样利用分簇的方法,Taleb 等人结合车辆的紧急级别提出了基于分簇的具有风险意识(cluster-based risk-aware)的车辆协作式防碰撞机制^[14,15]。本文根据

前进的方向、车辆相互之间的距离和相对速度对车辆分簇,并提供一系列机制来管理簇成员的加入和退出。同时,为了提高 MAC 层的响应性能,降低消息延迟,作者提出一个基于车辆风险的 MAC 协议去代替 IEEE 802.11 中原有的指数回避算法。首先,他们根据车辆在簇中的位置定义每一辆车的紧急级别。然后,每一辆车的 MAC 访问延迟被设定为紧急级别的函数,延迟大小与紧急级别成反比。

3.2.2 碰撞避免机制

防碰撞应用除了可以为有潜在碰撞危险的车辆提前发出警告外,还可以通过计算汽车速度,提前、适当地改变车辆行驶轨迹来避免车辆发生碰撞^[17,18]。Chen 等人基于车间通信构建了一个分布式计算网格 VGrid^[17]。通过车载网络交换信息,VGrid 不仅可以监测交通网络的情况,在有事故发生时及时给车辆发出警告,而且可以利用网格计算的能力准确地计算每一辆车的行驶速度的安全范围。这种方式通过适当控制网络内车辆的行驶速度不仅可以提高车辆行驶的安全性,还可以平滑交通流量,减少道路拥塞。同样,为了达到提高安全性和提高交通网络效率的目的,Milanes 等人提出一个基于车辆与道路基础设施通信(V2I)的交通管理系统^[18]。系统设置了一个控制中心来负责管理和处理在整个区域内的车辆发送过来的信息,经过计算后,将警告和推荐的行驶速度、前后车需要保持的距离以及车辆的行驶状态等信息发送给车辆。系统通过模糊逻辑技术评价车辆的行驶状态,它分别以当前车辆速度与推荐速度的误差和当前车距与推荐的车距的误差为输入,判断车辆是否正在安全高效地行驶。

防碰撞除了以上提到的要考虑车载网络的传输性能,保证消息以低延迟传送外,还要考虑实际工程带来的问题。例如大部分防碰撞应用都需要利用 GPS 技术来获取车辆的位置或速度信息,但是由于设备精度和车辆快速移动的原因,GPS 获得的信息会有误差。针对以上两个原因,Maruoka 等人提出了一个改进的碰撞判断方法,提高了判断车辆碰撞的准确率^[19]。另外,Han 等人^[20]从工程实践方面考虑了在 VANET 环境下实现车辆防碰撞的问题。例如 GPS 的多径问题和通信网络的延迟和丢包问题。Mitropoulos 等人^[21]从系统实现的角度提出了一个完整的碰撞系统,考虑了如何在农村等车辆密度较低的地区有效地发布危险信息。

3.3 交通效率相关机制

利用车载网络可以更有效地准确地获取车辆位置状态等信息,掌握交通网络的实时流量情况,这不仅有利于交通流量的监测,同时有助于计算适合的交通管理方案,提高交通网络的吞吐量。现在,利用 VANET 提高交通网络效率的方法主要有两类:(1)十字路口控制。由于目前城市交通堵塞很多都是发生在十字路口,因此,如何提高十字路口的吞吐量,降低车辆在十字路口的等待时间成为了提高交通网络效率的重要研究课题。(2)车辆行驶路径导航。造成交通网络堵塞的另一个原因是大量车辆驶向相同的路段,导致繁忙路段堵塞了大量车辆,这成为了整个交通网络的瓶颈。现在,不少研究工作开始通过车载网络收集车辆信息,为车辆规划行驶路径,以此来平衡交通网络各个路段的负载,保证道路畅通。近年来,随着自动驾驶技术和车载网网络的发展,不少工作开始研究车辆协作式驾驶。协作式驾驶不仅可以提高车辆行驶的安全性,还可以提高车辆行驶的效率。接下来,将分别介绍十字路

口控制、路径规划与导航以及协作式驾驶这 3 方面应用目前的研究与进展。

3.3.1 十字路口控制机制

十字路口的控制一直是交通管理的重要研究课题。传统的解决方案利用固定次序和时间的红绿灯来调度车辆安全高效地通过十字路口。显然,这种方法不能适应复杂多变的交通情况。为了应对动态变化的十字路口交通流量情况,研究人员利用了基于传感器网络的交通感应十字路口控制系统。引言中所提到的两个典型例子 SCOOT^[3] 和 SCAT^[4] 已经部署在许多国家作为主要的交通管理系统。

基于传感器交通管理系统的主要缺点是需要部署大量的传感器于路面,同时由于传感器部署密度以及检测误差等原因,系统难以收集到准确的交通信息,难以适应复杂多变的道路情况。基于车载网络的方法就可以克服以上问题。通过车辆主动发送各自的交通信息,这类系统能够更加准确地掌控交通情况,从而对十字路口的红绿灯方案做出自适应的调整。

1) 基于简单调度的十字路口控制

在文献^[22,23]中,十字路口通过 V2I 收集车辆信息,得出车辆密度后计算合适的红绿灯周期并分配各方向绿灯的持续时间。Gradinescu 等人提出一个基于车辆与十字路口控制中心通信的自适应交通灯控制系统^[22]。控制中心通过车载网收集各个方向车辆的信息,计算各方向的车辆密度。基于 Webster 公式^[24],它计算出红绿灯周期的长短,并根据各方向的车辆密度按比例地分配各方向的绿灯时间。Maslekar 等人也利用 VANET 和 Webster 公式提出了自适应的交通灯控制方案^[23]。为了减少消息数量,在十字路口等待的车辆首先根据各自的方向分簇,然后由簇头发送簇的信息如密度和簇长度等给控制中心,算法根据修改后的 Webster 公式计算红绿灯周期并分配各方向的绿灯时间。与传感器网络相比,基于车载网除了可以获取车辆的位置和速度外,更能获得关于车辆的更丰富的信息,例如车辆的种类、将要行驶的路径等。利用这些信息,可以达到无线传感器网络无法满足的要求。例如现实生活中,救护车、警车等车辆通常具有优先通行权,所以在调度十字路口交通灯时可根据车辆的优先级优先让这些车辆通过。Wunderlich 等人通过车载网根据各方向的车辆队列长度和车辆优先级,实现了一个区分车辆优先级的十字路口交通控制系统^[25]。

2) 基于组合优化的十字路口控制

前面提到的方法都是经过收集车辆信息,然后经过简单计算来调整红绿灯的调度策略。这种方法虽然可以根据实时的交通情况对十字路口做出自适应的调整,但通常不能达到最优的调度效果。实际上十字路口交通控制问题可以被视为一个资源调度的优化问题,在这个问题中,十字路口是所有车辆共享的唯一的资源,交通控制的目标就是如何合理调配这个资源,使整个十字路口的交通效益最大化。动态规划^[26,27]、分支界限^[28,29]和线性规划^[30]等常用优化方法被运用于十字路口交通控制中。

在文献^[26]中,系统通过车辆与基础设施通信(V2I)的方式收集获取位置、速度和等待时间,并以此作为状态变量将十字路口交通控制问题以状态-空间的形式表示,然后利用动态规划的方法得到最优调度方案。文献^[27]同样利用 V2I 收集车辆信息,在该系统中,控制中心每 5 秒收集一次车辆信

息,每 20 秒进行一次调度,通过动态规划和枚举的方式得出最优化的方案。文献^[28,29]将十字路口交通控制建模为一个流水线作业调度的问题,并利用分枝界限的方法降低了求解的时间。在文献^[30]中,作者根据元胞传输模型^[31],将十字路口交通优化问题建模为一个混合整数线性规划问题。将交通控制问题建模成组合最优化问题求解,可以得到最优的调度策略。以上提到的方法虽然可以获取问题的最优解,但仍然有两个主要缺点:(1)模型过于理想化,忽略了实际上可能会遇到的如道路拓扑结构多样性和车辆发生故障等众多问题。(2)计算量庞大。十字路口的交通情况复杂多变,若利用以上优化技术,求解空间将会十分庞大,耗费大量时间,无法满足实际交通控制的实时性需求。基于以上原因,这类方法的实用性不强。

3) 基于计算智能的十字路口控制

在实际生活中,道路拓扑结构、道路容量、车辆、驾驶者甚至天气都会对十字路口的交通控制造成影响。这些不同因素使十字路口控制系统成为了一个庞大复杂的非线性和带有随机性的系统。为了应对这些复杂多变的因素,研究人员利用计算智能的方法求解这些问题。计算智能的方法包括:模糊逻辑系统、神经网络、进化计算、群体智能和加强学习等。这些方法不要求问题有一个精确的模型,它能够根据交通系统的动态变化做出自适应的调整,并能在一定时间内得出这类复杂问题的最优解或次优解。

模糊逻辑不需要对交通控制问题建立一个准确的数学模型,通过定义合适的隶属度函数和模糊规则,可以有效地解决十字路口交通管理问题。Milanes 等人利用车间通信和模糊逻辑实现了一个十字路口交通控制系统^[32]。一辆自动驾驶汽车和另一辆普通车辆通过车间通信交换位置和速度等信息,计算两辆车在十字路口的交汇地点,并且通过模糊控制系统调整汽车速度,使得两辆车安全高效地通过十字路口。然而,若隶属度函数和模糊规则仅是依靠专家知识人为地预先设定,则难以达到最优的调度。所以,模糊逻辑通常会结合遗传算法或者神经网络的方法或者学习最合适的隶属度函数和模糊规则来构建模糊控制系统^[33,34]。

需要注意的是,利用进化计算和群体智能的方法求解交通控制问题通常会耗费大量的计算时间,往往只能在线下计算出最优的调度方案,难以满足实时性的需求。为了达到交通控制的实时性,研究人员采用强化学习的方法实现十字路口控制的线上优化。

在考虑单个十字路口的情形下,通常采用强化学习中的 Q 学习来求解问题^[35,36]。Q 学习通常包括状态、行动和得分 3 个元素。一个 agent 根据不同的状态采取不同的行动,然后它会从环境中得到一个得分,agent 根据这个得分调整行动,从而学习到在不同状态下采取相应的行动的策略。Abdulhai 等人应用 Q 学习实现了在单个十字路口的自适应交通灯控制^[35]。文章在固定红绿灯次序的前提下通过学习,根据实时的交通情况,决定延长当前方向的绿灯时间还是转换到下一个红绿灯模式。为了提高系统的适应性,Tantawy 等人考虑了在红绿灯次序可变化的情况下如何有效地通过学习达到自适应控制的问题^[36]。在研究中,他们提出了 3 种模型并通过实验选择最合适的一种模型来描述系统的状态。

多 agent 系统既可用来实现单个十字路口的交通灯控

制,也可用于协调多个十字路口的交通灯。Kurt 等人将车辆和十字路口都看作是 agent,在多 agent 系统中提出了基于预约的单个十字路口管理的方案^[37-39]。在这个系统中,十字路口被划分成若干格,驶向十字路口的车辆向十字路口预约这些方格,根据这些请求,控制中心决定接受还是拒绝预约,以此来协调所有车辆的行为。在考虑多个十字路口的交通灯协调问题时,每个十字路口被看作一个 agent,每个 agent 通过强化学习调整交通灯调度策略。Wiering 等人利用基于模型的强化学习方法控制交通网络里的每一个十字路口交通灯^[40]。在他们的研究中,每个交通灯作为一个 agent,以车辆的等待时间作为状态,agent 之间交换状态信息,agent 根据这些信息学习调度策略,使车辆在通过十字路口的总体等待时间最小化。

4) 基于轨迹计算的十字路口控制

有一类十字路口的交通控制是通过直接控制车辆的行驶轨迹实现的。基于车辆的速度、位置及去向等信息,计算车辆的合理行驶轨迹(无碰撞),然后通过控制车辆的速度和方向使车辆按照既定轨迹行驶,安全高效地通过十字路口区域^[18,32,41]。该类方法也可以看作是一种碰撞避免机制(见 3.2.2 小节),只不过其应用场景不是一般的车距预警和控制,而是特定的十字路口。

文献^[41]通过车辆间通信收集所有十字路口所有车辆的位置和速度等信息,并通过计算控制每一辆车的行驶速度和轨迹,使得车辆之间不发生碰撞并尽可能地少停车。与交通灯的“停走”策略相比,这种方法可以减少车辆在十字路口的停车次数,减少废气排放和提高吞吐量。但是,要在十字路口这个高度动态的系统中为每一辆车计算行驶轨迹,需要大量复杂的计算,实时性难以保证。

3.3.2 路径规划和导航

由于车辆的普及和城市道路的复杂化,人们对导航功能的需求也越来越高。传统的导航系统往往根据地理上的地图为用户规划出一条最短路径,但是若大量车辆都选择同一路径而驶向相同的路段,则会造成该路段拥塞,这样驾驶者反而会因此浪费大量的时间。合理的路径规划应该根据整个网络各路段的交通情况,综合考虑行程时间和道路拥塞情况等因素,为用户寻找一条合适的路线,使得交通网络内各路段的负载变得均衡,减少车辆的行程时间,提高网络效益。

车联网能够以比较低的成本、比较高的效率收集交通网络的流量信息,从而能较好地根据实时的交通情况解决城市车辆导航问题^[42,43]。传统导航指出的最短路径,有时候会让司机陷入拥塞,而拥塞不仅仅浪费时间,还浪费油料。在文献^[42]中,作者从省油的角度考虑利用车联网的信息导航。该导航系统通过 VANET 收集交通信息并且将历史交通信息记录在一个表中,在导航时根据历史交通信息预测未来的交通情况。类似地,在 Collins 等人^[43]的研究中,他们考虑行程花费时间、道路拥塞情况、油耗以及废气排放等方面因素,设计了一个适应度函数,该函数反映了路径的代价。车辆每行驶一段路后都重新规划行驶路径,它从若干条候选路径中选择代价最小的作为它新的行驶路径。以上都是以集中式收集信息和控制的方法来解决路径导航问题,这种系统的优势是方便高效,但是系统的扩展性不强。文献^[44,45]采用了一种分布式的方式实现车辆的导航。在 Leontiadis 等人的研究工

作中,他们讨论了利用车辆分布式导航的可行性^[44]。车辆在通过一个路段后,会记录下在该路段行驶的时间,以此来反应该路段的拥塞情况。同时,车辆会周期性广播它记录下的道路信息,并与网络一跳范围内的其它车辆交换信息。根据这些信息,车辆独立地计算行驶路径,并且根据实时的道路信息对路径做出调整。虽然车辆并不能获取整个交通网络的交通信息,但是实验表明,该分布式的路径规划方法在仅仅依靠一跳范围内的车间通信的情况下也能有效减少车辆的行驶时间。Chim 等人提出在实时和分布式的方式下,基于车联网搜寻到的路况信息指导用户到达目的地的方案^[45]。在这个方案中,车辆向路边基础设施发送位置和目的地等信息,导航时,基础设施相互之间通信,交换信息并寻找最佳的行驶路径。同时,信息源可以被恰当地验证。为了保护司机的隐私,文章通过匿名认证的方法保证目的地和司机的信息不向任何人透露。

此外,在城市中,越来越多的汽车意味着停车位的日益紧张,利用车联网寻找停车位是一项实用性极强的工作^[46-48]。Verroios 等提出,一旦进入停车场,车辆必须寻找到达空的停车位的最优路径^[46]。因此,就必须考虑车辆到每个候选点的时间、离终点的距离、停车位依旧空闲的可能性。研究人员把这个问题归纳为随时间变化的旅行推销员问题,并且提出了一种能够访问所有空闲停车位的方法。考虑后停车后的车辆安全问题,Lu 等人提出了智能停车方案^[47]。该方案不仅能够给司机提供实时停车导航服务,还能够智能防盗窃,并且将停车信息人性化地发送出去。Caliskan 等人^[48]考虑了在发布停车位信息时如何降低消息数的问题,并提出了拓扑独立、可扩展的消息分发算法。在周期性地广播信息时,系统对应用层信息进行分析,并且基于信息的相关性聚合相关的信息,从而减少了分发消息需用的带宽。

3.3.3 协作式驾驶

自动驾驶技术和车载网络的发展为实现车辆协作式驾驶提供了技术基础。在协作式驾驶中,车辆通过车间通信互相协调各自的行为,保证车辆安全高效地共同行驶。这种分布式的协调方法因为不需要借助任何基础设施,所以有很强的可扩展性,无论是在繁忙的都市路段还是在缺乏交通管理的农村郊区地区,协作式驾驶都可以大大提高驾驶的安全性和效率。

协作式驾驶在保障安全性方面的应用主要体现在车辆防碰撞上。前文提到的大部分防碰撞的应用^[11-15]都利用协作式驾驶的方法为有潜在碰撞危险的车辆提前给予警告,让驾驶者有足够时间做出反应来保证安全。另外一类保证驾驶安全的方法是通过协调车辆的行为来避免车辆碰撞发生。例如,在文献^[32,41]中,车辆通过车间通信获得十字路口其它车辆的信息,计算出合理的速度和行驶轨迹来避免与其它车辆发生碰撞。这种方法不仅保证了车辆的安全,还提高了十字路口的吞吐量。

协作式驾驶还可以提高交通的效率。在协作式驾驶中,有一种基于领导者的控制方式。在这种方式中,车辆组成一组,组内有一个领导者将命令和参考的动作广播给其它车辆。组内每一辆车根据领导者的指令和附近其它车辆的信息决定自己的行动。文献^[49-51]利用了这种方式协调车辆队列的加减速。在文献^[51]中,每一辆车利用自身与前方车车辆以

及领头车辆的相对距离来控制自身的速度,使车辆相互之间保持适当的距离和使整个车队稳定地向前行驶。这样有利于提高燃油效率和交通吞吐量。类似地,在文献[49]中,车辆根据前方车辆和领头车辆的速度和加速度使得一个货车队列稳定地前进。为了保证稳定性,在该系统中,所有车辆先缓存接收到的行动命令,然后同步地执行命令。这对网络的延迟有很高的要求。在实际的车辆系统中,领导者除了发布参考指令外,还可能要处理如车辆加入车队、车辆离开车队以及车队之间的协作等复杂的情况。这样就要求车队组内以及车队之间要有周期性的、可靠的数据通信[52]。在 Li 等人的研究中[53],若干车队的领导者通过相互通信,安排车队通过十字路口的次序,使得众多车辆能安全地和低延迟地通过十字路口。

在没有领导者的协同驾驶中,如何保证车辆行为的一致性就成为一个非常重要的问题。在这种方式下,车辆可能通过多对多的车间通信实现较复杂的行为。在文献[54]中,车辆通过车间通信根据自身的行为更新一个公共的状态空间,并根据来自车辆的数据作加权平均计算,得出下一步的行驶轨迹。作者分析了在什么情况下,车辆可以达成一致的决策。为了达到一致性,信息必须在有限的时间内传输到所有车辆。同时他们指出,与相向数据通信相比,单向数据通信的收敛性较弱。

3.4 资讯娱乐

与资讯娱乐相关的应用主要包括网络接入、视频传输、数据共享、信息发布等。这些应用可以减少人们在旅途过程中感觉到的枯燥乏味,使得人们依旧生活在熟悉的网络环境中,甚至还可以进行正常的商务办公。

3.4.1 互联网接入

网络接入是用户应用的基础。没有可靠的网络接入,就没有可靠的应用服务。Ksentini 等人[55]提出了一个面向 Internet 接入的 QoS 框架。它包含了基于代理的 PVI 协议和 PBR 算法,并且以 IEEE 802.11p EDCA 为核心。而 Khabazian 等人[56]则研究了车联网可持续通信的问题。研究的结果表明,路径可用的平均持续时间和数据包平均延迟随着传输范围的增大而增大。因此,传输范围不应该比可接受的通信可用距离大,以便保持一个可接受的数据包平均延迟。Taleb 等人[57]提出了一种稳定的路由协议,用来支持 ITS 中的服务。他们提出根据车辆的移动信息(包括位置、方向、速度、数字化绘制的地图)对通信链路的断裂进行预测,并基于此建立路由,保证了车联网内部通信的高可靠性。同时这个方案减少了在高速移动的车联网的整体上的通信量。通过延长选择路径的连接持续时间,洪泛的几率也减小了。

3.4.2 视频流数据分发

车载网络中的视频传输分为两类,非实时的视频文件传输(包括电影、用户自拍短片等)和实时的视频传输(紧急事件实时视频传输、路边视频广告传输、车间视频通话)。

针对视频流的可靠传输,Asefi 等人提出了一种集成的、用于在车联网环境下无缝地发送视频包的方案[58]。首先,根据一个质量驱动的路由方案,从固定的网络经过多跳向目的车辆发送视频。然后,根据另一个有效的网络移动性管理方案,组成一个预切换方案。大量的实验证明了这个方案在视频质量、移交延迟和信号代价上表现得比较好。而

Xing 等人[59]利用改进的 SVC 实现了在公路场景下视频流的传输服务。相比于现在的下载速度和接收者缓冲水平,研究人员提出的方案可以根据需要,利用合适数量的视频增强层提高视频体验的质量。类似于 Xing 等人的方法,Razzaq 等人提出了基于 SVC 流的方案[60]。这个方案首先计算了候选路径的质量,然后根据他们的重要性分配不同的层。在本节中,曾经提到过实时视频流的巨大作用,但是实时视频流的传输并不是那么容易的。为此,Guo 等人提出了一种 V3 架构,用来在 V2V 网络中提供实时视频流服务[61]。V2V 网络中往往存在两个问题,一是 V2V 网络可能会中断,二是 V2V 网络是移动的和瞬息万变的。而 V3 架构融合了一种新的信号机制,使得不断地触发发送者给接收者发送视频的事件。在一个分段的网络环境中,它也采用了存储_携带_转发的方法发送视频数据。

由于车载网带宽有限,而视频数据量往往十分巨大,有时候车辆会遇到带宽不足的情况。在这种条件下,Lee 等人提出可以请求邻近的车辆帮助本车下载视频流[62]。这种场景被称作为车辆通信中的协作流。除了请求邻近车辆的帮助外,也可以从优化数据包的角度考虑,从而提高数据流的传输量和质量。Seferoglu 等人[63]通过改善编码方式,达到了在广播方式中增大吞吐量的目的。他们将若干个较小的数据包合并成一个单独的大包,提高了每次传输的信息量。总而言之,视频流的传输的关键在于,要尽量最大化网络输出,同时最大化视频质量。面对这么多视频流的发送方法,Xie 等人研究了在不同数据发送和缓存管理机制下视频流的表现[64]。

3.4.3 一般化数据共享

与视频传输一样,车辆之间数据的访问和共享也是车联网的重要应用之一。这些数据可以包括音乐、文件资料等,它们可以为用户提供极大的娱乐性和方便性。由于车辆的高移动性,并且车联网的拓扑结构经常变化,车间网络连接断开会频繁发生。

数据复制常用来避免数据访问过程中出现间歇性的网络中断,并且提高在分布式系统中的数据访问的表现。Zhang 等人[65,66]研究了车载网络环境下的数据缓存问题。其基本思路是通过车辆间共享缓存的数据,提高数据访问效率。在 Roadcast[65]机制中,作者主要是考虑了数据的流行度(popularity)对缓存的放置和替换的影响。而在 V-PADA[66]中,车辆被分成不同的组,以实现基于分组的数据复制和缓存。V-PADA 包含两个要素:一个车辆组协议用来确定组结构和预测组分割;一个数据管理模块用来指导组成员复制和预取最合适的数据。

Liu 等人则考虑了停放在道路边的车辆[67]。由于停放车辆不移动,是有效的数据存放和转送节点,利用移动车辆和停靠车辆之间的联系,实现了文件依次发送,减少了不必要的信息和碰撞,并且加快了数据共享速度。

数据有效性的研究见于文献[68,69]。Lim 等人提出了一种基于状态的协作式缓存无效机制[68]。而针对不同数据大小,Firo 等人提出了大 cache 和小 cache 的概念[69]。对于大 cache,他们提出利用相互独立的节点决定是否存储内容以及存储多久的策略。而在小 cache 中,他们设计了一种内容替换策略,这种策略允许存储节点成功地存储新接收的数据,同时又保持分布式系统良好的表现。

3.4.4 其他应用

车载网还可以用于交通信息查询、虚拟市场、新闻获取、天气查询等相关应用。Lee 等人^[70]提出了一种基于车联网的虚拟电子市场——FleaNet。在 FleaNet 中,顾客(在移动的车辆中)或者商店表达他们自己的意愿——买或卖。例如,如果某人想买或卖一个东西,就发送一个请求。这些请求是随机发送的,同时还利用了其他顾客的流动性,以便找到东西的买家或卖家。而对于车联网来说,最主要的服务依旧是和交通相关的。

Chen 等人^[71]则根据贝叶斯网络模型,提出了整合不同信息得到完整交通信息的方法。Zhang 等人^[72]提出了一种自动搜集和动态传送交通信息的方法,作为动态交通信息服务的模板。

结束语 VANET 和 ITS 经过近年来的发展,取得了不少研究成果,但是仍然处在初级的发展阶段,有许多技术问题有待解决。

1) 目前在车辆协作式驾驶的研究中,防碰撞的应用居多,效率性管理控制相对较少而且多数为十字路口控制机制。在防碰撞的应用研究中,大部分研究都局限于数据传输层面,研究如何提高数据传输可靠性来及时警告车辆,而没有从交通管理机制上进行考虑,使车辆在较复杂的路面下仍然能协同合作,在保证安全性的同时提高车辆行驶的效率。

2) 通信开销大,导致可扩展性和可靠性较差。目前大部分的工作的应用场景较单一,没有考虑通信开销和实际道路交通复杂变化的情况。特别是在车流量较大的情形下,系统很可能由于车载网络的负载过大而无法正常工作。

3) 缺乏统一的和真实度高的测试平台和工具。目前的仿真工具要么只关注网络通信,要么只关注交通模型,无法将车载网络的网络特性和交通系统的模型整合起来^[73]。这样使得基于车间通信的交通控制机制无法进行有效的仿真和评估。现有的评估工作一般都是基于个别设计和实现,随意性强,可比性差。

4) 缺乏通用性的系统模型。实际的交通系统受很多因素的影响,而且这些因素往往都较复杂,随机性强,因此交通系统是一个复杂的系统。然而目前大多数的系统模型都是针对具体的应用场景而设计的,难以反映系统在实际应用中的性能。

针对目前研究中存在的问题,结合 VANET 和 ITS 的发展趋势,基于 VANET 的 ITS 技术的研究将会以下面的几个方向为重点。

1) 通用准确的系统模型,包括数学模型和计算模型。交通系统涉及多方面的因素,综合考虑这些因素,构建一个准确度较高的系统模型(如车辆移动模型、十字路口控制模型等),将对系统设计、仿真测试有很大帮助。

2) 节点间的分布式协同机制。车载网络的应用往往需要节点相互协调,从而能使系统稳定和有效的控制。然而车载网络高度动态化的特性和高扩展性的要求,使得传统网络环境和一般的自组织网络环境下的分布式协同机制和算法无法适应 VANET 这样的环境。所以需要提出针对 VANET 和交通控制的有效的分布式协同机制。

3) 高可靠性、高可扩展性、低开销的数据分发和收集方

案。智能交通应用尤其是安全性相关的应用对网络的消息可靠传输和延迟性能有很高的要求。未来的研究工作应关注如何提高消息传输的可靠性和降低传输开销。例如从系统机制的设计上减少消息数从而避免网络拥塞,或者从网络协议的设计上提高 MAC 层的响应性能。

4) 基于 VANET 的分布式控制与基于路面检测的集中式控制的结合。集中式控制的特点是方便高效,而分布式控制则是易于扩展、部署。由于基于路面检测的系统已经有实际部署,未来的研究中必须考虑如何利用现有的资源,与 VANET 机制结合起来,实现有层次的、高效可靠和扩展性强的交通管理系统。

5) 结合参与式感知的智能交通管理。参与式感知是传感器网络技术的最新进展,通过利用智能手机的感知功能,收集用户的状态数据,如移动速度、场景图像等。参与式感知也可以应用于智能交通系统中,使系统获得更丰富的交通信息,做出更有效的管理。

6) 融合车载网络与交通行为的综合实验仿真系统。VANET 和 ITS 通常涉及大量的车辆和网络设施,所以在实际的实验中评估系统性能的代价非常昂贵。设计实现一个可靠的、真实度较高的仿真平台可以更方便、准确和有效地验证系统性能。

参考文献

- [1] An S, Lee B H, Shin D R. A Survey of Intelligent Transportation Systems [C] // Proceedings of the Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. Bali, Indonesia, 2011, 332-337
- [2] 金茂青. 中国智能交通发展历程浅谈[J]. 交通科技, 2013(2): 140-142
- [3] Robertson D I, Bretherton R D. Optimizing networks of traffic signals in real time—the SCOOT method[J]. Vehicular Technology, 1991, 40(1): 11-15
- [4] Sims A G, Dobinson K W. The Sydney coordinated adaptive traffic(SCAT) system philosophy and benefits[J]. Vehicular Technology, 1980, 29(2): 130-137
- [5] Toor Y, Muhlethaler P, Laouiti A. Vehicle Ad Hoc networks: applications and related technical issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(3): 74-88
- [6] Morioka Y, Sota T, Nakagawa M. An anti-car collision system using GPS and 5.8 GHz inter-vehicle communication at an off-sight intersection[C] // Proceeding of the Vehicular Technology Conference. Boston, America, 2000, 5: 2019-2024
- [7] Miller R, Huang Q. An adaptive peer-to-peer collision warning system[C] // Proceeding of the Vehicular Technology Conference. Birmingham, UK, 2002, 1: 317-321
- [8] Wang S Y, Cheng Y W, Lin C C, et al. A vehicle collision warning system employing vehicle-to-infrastructure communications [C] // Wireless Communications and Networking Conference, 2008(WCNC 2008). IEEE, 2008: 3075-3080
- [9] Reichardt D, Miglietta M, Moretti L, et al. CarTALK 2000: Safe and comfortable driving based upon inter-vehicle-communication [C] // Proceeding of the Intelligent Vehicle Symposium. Versailles, France, 2002, 2: 545-550

- [10] Ye F, Adams M, Roy S. V2V wireless communication protocol for rear-end collision avoidance on highways[C]//Proceeding of the Communications Workshops, Beijing, China, 2008; 375-379
- [11] Biswas S, Tatchikou R, Dion F. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety[J]. Communications Magazine, 2006, 44(1): 74-82
- [12] Yang X, Liu J, Vaidya N, et al. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning[C]//Proceeding of the Mobile and Ubiquitous Systems; Networking and Services, Boston, America, 2004; 114-123
- [13] Little T, Agarwal A. An information propagation scheme for VANETs[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation Systems, Austria, 2005; 155-160
- [14] Taleb T, Ooi K, Hashimoto K. An efficient collision avoidance strategy for ITS systems[C]//Proceeding of the Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, America, 2008; 2212-2217
- [15] Taleb T, Benslimane A, Ben L. Toward an effective risk-conscious and collaborative vehicular collision avoidance system[J]. Vehicular Technology, 2010, 59(3): 1474-1486
- [16] Fall K, Hong W, Madden S. Custody transfer for reliable delivery in delay tolerant networks[R]. IRB-TR-03-030, 2003
- [17] Chen A, Khorashadi B, Chuah C, et al. Smoothing vehicular traffic flow using vehicular-based ad hoc networking & computing grid(VGrid)[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 2006; 349-354
- [18] Milanés V, Villagra J, Godoy J, et al. An intelligent V2I-based traffic management system[J]. Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 49-58
- [19] Maruoka T, Sato Y, Nakai S, et al. An extended collision judgment algorithm for vehicular collision avoidance support system (VCASS) in advanced ITS[C]//Proceeding of the Vehicular Technology Conference, Calgary, Canada, 2008; 1-5
- [20] Tan H, Huang J. DGPS-based vehicle-to-vehicle cooperative collision warning: Engineering feasibility viewpoints[J]. Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(4): 415-428
- [21] Mitropoulos G K, Karanasiou I S, Hinsberger A, et al. Wireless local danger warning: Cooperative foresighted driving using intervehicle communication [J]. Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 539-553
- [22] Gradinescu V, Gorgorin C, Diaconescu R, et al. Adaptive traffic lights using car-to-car communication[C]//Proceeding of the Vehicular Technology Conference, Dublin, Ireland, 2007; 21-25
- [23] Maslekar N, Boussedjra M, Mouzna J, et al. VANET based adaptive traffic signal control[C]//Proceeding of the Vehicular Technology Conferenc(VTC Spring), Budapest, Hungary, 2011; 1-5
- [24] Chaudhary N A, Kovvali V G, Alam S M M. Guidelines for selecting signal timing software[R]. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2002
- [25] Wunderlich R, Liu C, Elhanany I, et al. A novel signal-scheduling algorithm with quality-of-service provisioning for an isolated intersection[J]. Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(3): 536-547
- [26] Cai C, Wang Y, Geers G. Adaptive traffic signal control using vehicle-to-infrastructure communication; a technical note[C]//Proceedings of the Second International Workshop on Computational Transportation Science, New York, America, 2010; 43-47
- [27] Priemer C, Friedrich B. A decentralized adaptive traffic signal control using V2I communication data[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation Systems, St. Louis, America, 2009; 1-6
- [28] Yan F, Dridi M, El Moudni A. Control of traffic lights in intersection; A new branch and bound approach[C]//Proceeding of the Service Systems and Service Management, Melbourne, Australia, 2008; 1-6
- [29] Li C, Shimamoto S. An Open Traffic Light Control Model for Reducing Vehicles' CO2 Emissions Based on ETC Vehicles[J]. Vehicular Technology, 2012, 61(1): 97-110
- [30] Lin W H, Wang C. An enhanced 0-1 mixed-integer LP formulation for traffic signal control[J]. Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(4): 238-245
- [31] Daganzo C F. The cell transmission model; A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory[J]. Transportation Research Part B; Methodological, 1994, 28(4): 269-287
- [32] Milanés V, Pérez J, Onieva E, et al. Controller for urban intersections based on wireless communications and fuzzy logic[J]. Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1): 243-248
- [33] Qiao J, Yang N, Gao J. Two-stage fuzzy logic controller for signalized intersection[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2011, 41(1): 178-184
- [34] Srinivasan D, Choy M C, Cheu R L. Neural networks for real-time traffic signal control[J]. Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(3): 261-272
- [35] Abdulhai B, Pringle R, Karakoulas G J. Reinforcement learning for true adaptive traffic signal control[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(3): 278-285
- [36] El-Tantawy S, Abdulhai B. An agent-based learning towards decentralized and coordinated traffic signal control[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation Systems(ITSC), Funchal, 2010; 665-670
- [37] Dresner K, Stone P. Multiagent traffic management: A reservation-based intersection control mechanism[C]//Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, New York, America, 2004; 530-537
- [38] Dresner K, Stone P. Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism[C]//Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, New York, America, 2005; 471-477
- [39] Dresner K, Stone P. A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management[J]. J. Artif. Intell. Res. (JAIR), 2008, 31: 591-656
- [40] Wiering M A. Multi-agent reinforcement learning for traffic light control[C]//Proceedings of the Seventeenth International Conference on Machine Learning, San Francisco, America, 2000; 1151-1158
- [41] Lee J, Park B. Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment[J]. Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 81-90

- [42] Chen P Y, Guo Y M, Chen W T. Fuel-Saving Navigation System in VANETs[C]//Proceeding of the Vehicular Technology Conference Fall. Ottawa, Canada, 2010; 1-5
- [43] Collins K, Muntean G M. Route-based vehicular traffic management for wireless access in vehicular environments[C]//Proceeding of the Vehicular Technology Conference. Calgary, Canada, 2008; 1-5
- [44] Chim T, Yiu S, Hui L, et al. VSPN: VANET-based Secure and Privacy-preserving Navigation[J]. IEEE Transactions on Computer, 2014, 63(2): 510-524
- [45] Leontiadis I, Marfia G, Mack D, et al. On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks[J]. Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1537-1548
- [46] Verroios V, Efstathiou V, Delis A. Reaching available public parking spaces in urban environments using ad hoc networking[C]//Proceeding of the Mobile Data Management. Lulea, Sweden, 2011, 1: 141-151
- [47] Lu R, Lin X, Zhu H, et al. SPARK: a new VANET-based smart parking scheme for large parking lots[C]//Proceeding of the INFOCOM, Rio de Janeiro, Brazil, 2009; 1413-1421
- [48] Murat C, Daniel G, Martin M. Decentralized discovery of free parking places[C]//Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks. New York, America, 2006; 30-39
- [49] Gehring O, Fritz H. Practical results of a longitudinal control concept for truck platooning with vehicle to vehicle communication[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation System. Boston, America, 1997; 117-122
- [50] Liu X, Goldsmith A, Mahal S S, et al. Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation Systems. Oakland, America, 2001; 625-630
- [51] Seiler P, Pant A, Hedrick K. Disturbance propagation in vehicle strings[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(10): 1835-1842
- [52] Tsugawa S, Kato S, Tokuda K, et al. A cooperative driving system with automated vehicles and inter-vehicle communications in Demo 2000[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation Systems. Oakland, America, 2001; 918-923
- [53] Li L, Wang F Y. Cooperative driving at blind crossings using intervehicle communication[J]. Vehicular Technology, 2006, 55(6): 1712-1724
- [54] Moreau L. Leaderless coordination via bidirectional and unidirectional time-dependent communication[C]//Proceeding of the Decision and Control. Maui, America, 2003, 3: 3070-3075
- [55] Ksentini A, Tounsi H, Frikha M. A proxy-based framework for QoS-enabled Internet access in VANETS[C]//Proceeding of the Communications and Networking. Tozeur, France, 2010; 1-8
- [56] Khabazian M, Mehmet-Ali M, Aissa S. Analysis of continuous communication availability in vehicular ad hoc networks[J]. Systems Journal, 2013, 7(1): 137-150
- [57] Taleb T, Sakhaee E, Jamalipour A, et al, Nemoto Y. A stable routing protocol to support ITS services in VANET networks[J]. Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3337-3347
- [58] Asefi M, Céspedes S, Shen X, et al. A Seamless Quality-Driven Multi-Hop Data Delivery Scheme for Video Streaming in Urban VANET Scenarios[C]//Proceeding of the Communications. Kyoto, Japan, 2011; 1-5
- [59] Xing M, Cai L. Adaptive video streaming with inter-vehicle relay for highway VANET scenario[C]//Proceeding of the Communications(ICC). Ottawa, Canada, 2012; 5168-5172
- [60] Razzaq A, Mehaoua A. Video transport over VANETs; Multi-stream coding with multi-path and network coding[C]//Proceeding of the Local Computer Networks. Denver, America, 2010; 32-39
- [61] Guo M, Ammar M H, Zegura E W. V3: A vehicle-to-vehicle live video streaming architecture[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2005, 1(4): 404-424
- [62] Lee C H, Huang C M, Yang C C, et al. A Cooperative Video Streaming System over the Integrated Cellular and DSRC Networks[C]//Proceeding of the Vehicular Technology Conference. San Francisco, America, 2011; 1-5
- [63] Seferoglu H, Markopoulou A. Opportunistic network coding for video streaming over wireless[C]//Proceeding of the Packet Video 2007. Lausanne, Switzerland, 2007; 191-200
- [64] Xie F, Hua K A, Wang W, et al. Performance study of live video streaming over highway vehicular ad hoc networks[C]//Proceeding of the Vehicular Technology Conference. Baltimore, America, 2007; 2121-2125
- [65] Zhang Y, Zhao J, Cao G. Roadcast: A Popularity Aware Content Sharing Scheme in VANETs[C]//Proceeding of the Distributed Computing Systems. Montreal, Canada, 2009; 223-230
- [66] Zhang Y, Cao G. V-PADA: Vehicle-Platoon-aware data access in VANETs[J]. Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2326-2339
- [67] Liu N, Liu M, Chen G, et al. The sharing at roadside: Vehicular content distribution using parked vehicles[C]//Proceeding of the International Conference on Computer Communications. Orlando, America, 2012; 2641-2645
- [68] Lim S, Yu C, Das C R. Cooperative cache invalidation strategies for internet-based vehicular Ad Hoc networks[C]//Proceeding of the Computer Communications and Networks. San Francisco, America, 2009; 1-6
- [69] Fiore M, Casetti C, Chiasserini C. Caching Strategies Based on Information Density Estimation in Wireless Ad Hoc Networks[J]. Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2194-2208
- [70] Lee U, Park J S, Amir E, et al. FleaNet: A virtual market place on vehicular networks[J]. Vehicular Technology, 2010, 59(1): 344-355
- [71] Chen L, Tan W, Shi L. Information fusion of Vehicular Ad hoc Networks based Bayesian Networks[C]//Proceeding of the Communication Software and Networks. Xi'an, China, 2011; 64-67
- [72] Zhang Q, Zhao J H. A model for automatic collection and dynamic transmission of traffic information based on VANET[C]//Proceeding of the Intelligent Transportation Systems. Anchorage, America, 2012; 373-378
- [73] 张国庆, 陈旻, 许钟, 等. 适用于 VANET 仿真的车辆合成运动模型[J]. 计算机科学, 2009, 36(8): 67-70