

多源信息融合关键问题、研究进展与新动向

陈科文 张祖平 龙 军

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410075)

摘 要 近年来,国内外掀起了多源信息融合技术研究的新热潮。对信息融合技术的最新研究进展进行了综述;首先探讨了信息融合的概念与本质;然后从信息处理和融合系统设计的角度,全面阐述了信息融合所面临的问题与挑战,以及现有的主要融合模型与方法分类,同时分析了信息融合方法论研究的发展趋势和一些新领域;接着纵览了信息融合技术的广泛应用;特别讨论了几个新兴的应用领域。最后对信息融合研究路线作了总结和展望。

关键词 信息融合,融合模型,融合方法论,信息融合应用

中图分类号 TP274,TP391 **文献标识码** A

Multisource Information Fusion: Key Issues, Research Progress and New Trends

CHEN Ke-wen ZHANG Zu-ping LONG Jun

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract In recent years, a new research boom of multisource information fusion technologies has been set off both in China and abroad. This paper proposed a comprehensive review of the information fusion state of the art. Firstly, the paper explored the conceptualizations and essence of information fusion, then comprehensively reviewed the issues and challenges involved in information fusion from the perspectives of both information processing requirements and fusion system's design considerations, as well as the existing major fusion models and approaches, at the same time especially analyzed the future trends of the research on information fusion methodologies, including some relatively new areas. Next, wide ranges of information fusion applications were surveyed and some emerging application areas were specially discussed. At last, the summary and outlook of information fusion research routes were presented.

Keywords Information fusion, Fusion models, Fusion methodologies, Applications of information fusion

1 引言

多源信息融合(简称为信息融合)是指组合和合并多个来源的信息或数据以便形成一个统一结果的技术。它起源于军事领域中的多传感器综合应用,往往又叫多传感器数据融合(或数据融合),是对人或动物利用各种感官来获取信息并通过大脑综合分析来认识客观世界的一种功能模拟^[1]。随着研究的进展,信息融合领域中的“传感器”泛指各种信息来源,除了电子传感器,还包括数据库、网络系统等等。借助机器系统实现信息融合,既能有效地提高系统性能,也能扩展人的认识能力、辅助人类决策、提高解决问题的效率。因此,信息融合技术在军事和民用领域都有广阔的应用前景。近几年来,随着信息科技的发展,国内外掀起了信息融合技术研究的新热潮。

信息融合技术已广泛应用于很多领域,比如:目标跟踪、情报分析、军事指挥、图像处理、工业控制、环境监测、智能系统设计等等。作为一门边缘学科,多源信息融合打破了众多

学科之间的间隔,为各学科的研究者们提供了互相借鉴与合作的机会,开辟出很多新的研究领域,这也是本文希望达到的目标之一。

本文对多源信息融合的关键问题、现有方法和应用情况进行了梳理,其反映了最新的研究进展,指明了未来的发展方向。第2节介绍信息融合的定义、目的、任务及实现层次,从而揭示其内涵;第3节从信息处理和系统设计与实现两个角度全面分析信息融合所面临的问题与挑战;第4节介绍信息融合主要模型及其演化版本;第5节介绍信息融合方法论的研究进展,并分析其未来发展趋势,其中包括一些新理论与新技术;第6节介绍信息融合应用研究进展,重点讨论几个民用领域的研究;最后总结了信息融合技术研究路线,并展望了未来前景。

2 信息融合的概念与层次

信息融合是一个多学科交叉的研究领域,文献中很多术语通常可互换使用,如信息融合、数据融合、信息集成、数据聚

到稿日期:2012-10-03 返修日期:2013-03-15 本文受国家自然科学基金项目(60970095,60873081,M0921005),教育部博士点基金项目(20120162110077)资助。

陈科文(1970—),男,博士生,主要研究方向为信息融合与信息系统,E-mail:ckw888@126.com;张祖平(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为信息融合与信息系统、参数计算与生物计算、网络容错路由算法及协议;龙 军(1972—),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为网络数据资源管理与服务、网格计算等。

合等,但“信息融合”一词更具有一般性。对于信息融合的概念,国内外研究学者分别从不同领域或角度给出了多种定义或解释,但至今仍没有一个被普遍接受^[1,2],典型定义有:信息融合是一种多层次、多方面的数据处理过程,对来自多个信息源的数据进行自动检测、关联、相关、估计及组合等处理;信息融合组合来自多个传感器的数据和相关信息,以获得比单个独立传感器更详细而精确的推理;信息融合是研究利用各种有效方法把不同来源、不同时间点的信息自动或半自动地转换成一种能为人类或自动的决策提供有效支持的表示形式^[3]。

信息融合本质上是对大脑综合分析信息能力的模拟,其目的是要获得对事物(包括实体、关系和事件)的认识或相关知识,以促进有效决策。其中,实体既包括各个目标对象也包括融合主体(系统或人),关系反映了实体间的关联和所处情境,而事件一般跟时间有关,反映了实体的动态行为、状态或关系的变化(包括某种情境中实体的出现与消失)。信息融合的核心任务包括:(1)多源信息组合、优势互补,提高信息的完整性;(2)排除冗余与噪声、降低不确定性,提高信息的精确度和可靠性;(3)化解矛盾、去伪存真,提高信息的一致性和可信度。各任务相辅相成,由此带来很多其它好处,如扩展系统时空覆盖范围、提高信息和资源的利用率,支持更有效的推理与决策,改善系统整体性能等等。

信息融合的实现可以位于不同的抽象层次,一般可分为:数据级(或信号级、像素级)融合、特征级融合和决策级融合,分别是对原始数据、从中提取的特征信息和经过进一步评估或推理得到的局部决策信息进行融合。数据级和特征级融合属于低层次融合,而高层次的决策级融合涉及到态势认识与评估、影响评估、融合过程优化等等(见第4节)。信息融合的实现方式多样,涉及面很广。事实上,信息融合已发展成为一种通用的信息处理手段和思维模式。

综上所述,我们给出一个较为通用的定义:所谓信息融合,是把从不同空间或时间上获得的多个来源的同质或异构信息进行不同抽象层次的合并或集成,以得到有关实体、关系或事件的更完整、更精确、更可靠的信息或推论。

3 信息融合所面临的问题与挑战

针对不同的应用目的、系统环境和数据特征,信息融合需要面临很多问题与挑战,主要体现在如下两个方面。

3.1 数据/信息处理方面的问题与挑战

信息融合要处理的数据/信息可能具有多种不同的特性,其中最大的挑战就是待融合的信息具有不完善性(imperfection),主要表现为信息的不确定、不精确、不完整、模糊、多义、冲突等等^[1,4,5]。当然,有的数据/信息同时具有多种特性,目前对于不完善信息的分类还没有严格的、统一的标准。综合现有文献^[1,2,4,5],就数据处理而言,信息融合需要考虑下列问题:

(1)数据的不确定性(uncertainty):有多种不同的定义,通常可从两个方面来理解,一是客观事物状态变化或事件发生具有随机性,二是观测者对客观事物的判断没有绝对的把握,即置信度不是百分之百。

(2)数据的不精确性(imprecision):描述事物的数据不是

一个单值,而是一个区间值或集合,主要表现为数据的含糊性(vagueness)和多义性(ambiguity),比如对传感器测量数据有时会有多种解释,对事物的判断和某些语言知识或符号的含义不具体或模棱两可;另外,信息不充分或数据不完整(incompleteness)也会使得对测量数据的解释与推理变得困难。

(3)数据的不一致性(inconsistency):表现为数据的冲突性(conflict)、异常性(outlier)或虚伪性(spuriousness),多源数据可能会对同一目标做出相互矛盾的解释,即存在冲突;有限的测量精度、噪声和干扰因素都会产生一些虚假数据或伪信息。若不对冲突或虚假数据进行识别和特殊处理,融合算法可能会得出错误结论。

(4)数据的关联性(association):多组数据可能在时间上或空间上存在关联,比如可能是来自同一目标源的数据。

(5)数据的相关性(correlation):由多个测量节点受到相同噪声的影响,或者数据在传播和融合过程中发生重复计算等多种原因引起。若不解决数据相关性问题,则融合算法可能会得出过高或过低的估计结果或信任值。

(6)数据的不同标度(calibration):不同信息源提供的数据都是在各自的参考框架内,比如时间上不同步、数据速率不一致、空间分辨率有差异、数据维数不匹配等等。融合前必须将它们进行时空配准,变换到一个公共的参考框架中去,或采取其它方式来处理数据差异。

(7)数据的不同性质或形态(modality):需融合的多源数据可能在性质上相似(同类数据)和不同(异类数据),比如声音和图像数据是异类数据,属于不同媒体形式。

(8)数据的不同粒度(granularity):多源数据可能处于不同的粒度级别(如区分对象所用的属性集合大小不同),或者处于不同的抽象级别上(如信号/数据级、目标/特征级或决策/符号级)。

(9)数据的动态性(dynamicness):多源数据可以反映目标的静态属性和动态状态,而对于动态数据,融合时需要考虑数据的“新鲜度”和测量历史。

(10)数据的处理量(computational load):在某些应用场合,信息融合系统要处理的数据量和维数可能很大,为了提高融合时效性、降低融合难度,需要对数据进行压缩和降维处理,或者采用分布式或分级式融合。

对于融合前后数据/信息的各种特性的度量/评估、不同特性信息的处理方法,一直都是人们的研究热点。此外,近几年有关“软/硬数据”融合^[6]或“软信息”融合也受到关注。传统信息融合主要处理电子传感器或机器所产生的“硬数据”,它们一般具有良好定义的特征;而“软数据”是人为生成的或知识性的数据(如语言文字或图形符号),带有很大不确定性和模糊性。

3.2 信息融合系统设计与实现方面的问题与挑战

信息融合系统的设计与实现需要研究一套工程化的方法与规范,一般认为要解决的主要问题有^[2,7,8]:(1)首先是系统建模问题;(2)相关融合算法评价标准与选择的工程指南;(3)信息融合数据库与知识库技术;(4)传感器等资源的管理与调度;(5)信息融合系统效能评估方法和标准。在上述各方面虽有很多研究成果,但仍不够成熟,也缺乏统一规范或标准。实用而灵活的融合系统结构模型和通用的融合支撑平台的建立都有很大的挑战性。

研究工作绝大多数都局限于信号/检测级和目标级估计

等低层次融合,关于决策级融合和过程优化等高层次信息融合(HLIF)的研究相对较少。近年来信息融合学术界总结并提出了 HLIF 的 5 大挑战^[9]: (1)HLIF 建模问题(包括态势和环境模型), (2)HLIF 信息表示(包括语义、知识和复杂表示), (3)系统设计技术(包括基于应用场景、基于用户和分布式代理等设计方式), (4)决策支持过程(推理、推论和各种关系), (5)评估方法(性能/有效性度量、经验案例研究)。对于 HLIF, 近几年强调“以人为中心”^[10], 让人或用户参与到信息融合过程中, 如态势认识和威胁评估, 以充分发挥人的作用, 弥补机器系统的不足。其中, 需要解决异类数据融合、人机交互与协同处理等问题。

另外须补充和强调的是, 基于传感器网络和互联网的分布式大规模信息融合系统(比如用于军事情报、智能交通、Web 信息集成等领域的系统)的建立及其中存在的海量数据的高效融合、信息融合的安全性、资源管理与融合优化等问题的解决也都具有挑战性。

4 信息融合模型的研究进展

信息融合模型包括功能模型、结构模型、过程模型和数学模型等, 前 3 类模型密切相关, 可统称为信息融合模型, 而数学模型是指各种信息融合方法(见第 5 节)。

至今人们已提出了多种信息融合模型, 如 JDL 模型、OODA 模型、Omnibus 模型、STDF 模型等等^[2,9,11], 其中应用最广泛的是 JDL 模型及其演化版本。JDL 模型最初是面向军事应用而提出的^[8], 主要包括 4 级: 第 1 级“目标评估”、第 2 级“态势评估”、第 3 级“威胁评估”和第 4 级“过程优化”。后来研究者发现有必要增加第 0 级, 对于这一级功能, 很多学者先后进行了不同的变更和解释, 如: 信息源预处理、信号级优化、次目标估计、信号/特征估计、检测级融合等。为了将 JDL 模型从军事应用推广到民用领域, 人们又将第 3 级“威胁评估”改为“影响评估”。长期以来, 有关信息融合的研究工作绝大多数都局限于第 1 级“目标评估”。有人建议把它分解为两级, 即“位置级融合”和“目标识别级融合”^[12]。随着信息融合技术研究的深入和应用领域的推广, 有些问题的复杂度和难度超出了自动融合系统的能力, 需要人的参与才能解决。因此, 研究者们又在 JDL 修正模型的基础上增加了第 5 级“用户优化”, 即人的认知优化融合功能^[2]。

为了突出信息融合系统的实际设计问题, 更好地支持高层次融合和系统开发, 数据融合信息组(DFIG)对 JDL 模型作了修改, 将信息融合功能与资源管理功能相分离(见图 1); 资源管理又可分为传感器控制、平台部署和用户选择等, 以实现任务目标^[9]。

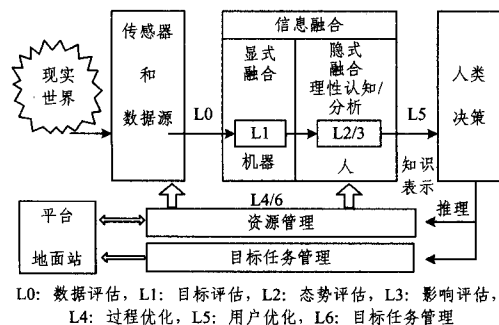


图 1 DFIG 信息融合模型

如图 1 所示, DFIG 模型各级功能的定义^[9,11]如下: 第 0

级—数据评估: 在像素/信号级数据关联的基础上, 估计和预测信号/目标的可观测状态; 第 1 级—目标评估: 在数据关联、连续/离散状态估计的基础上, 估计和预测实体状态; 第 2 级—态势评估: 估计和预测实体间的关系; 第 3 级—影响评估: 估计和预测参与实体的行动态势所产生的效果, 也包括多方行动计划之间的交互所带来的影响; 第 4 级—过程优化(资源管理的一个要素): 自适应地获取和处理数据, 以支持目标感知; 第 5 级—用户优化(知识管理的一个要素): 针对不同用户自适应地检索与显示数据, 以支持认知决策和行动; 第 6 级—目标任务管理(平台管理的一个要素): 自适应地对资源实体进行时空控制并确定目标, 以便在受到各种外界因素约束的情况下支持团队的决策和行动。

JDL 模型及其变种都是面向技术的功能模型, 强调各个融合级别的功能差异。还有一些融合模型是更加面向人类决策而提出的, 强调人的作用与机器融合的统一与结合, 其中最典型的就是 OODA(观察-定向-决策-行动)循环模型。这个模型与 DFIG 模型之间可建立映射^[11]: 观察对应于目标评估(L1), 定向对应于态势/影响评估(L2/3), 决策对应于用户优化(L5), 行动对应于过程优化(L4)。针对不同的应用, OODA 模型又有多个细化版本, 如扩展的 OODA 模型、M(模块)-OODA、T(团队)-OODA、C(认知)-OODA 和 TECK(技术, 情感, 文化, 知识)-OODA 模型等^[11]。其中 C-OODA 模型可用于指挥与控制等动态复杂的决策环境, 比如文献^[11]研究了用户与信息融合系统之间决策的即时性问题, 基于 C-OODA 模型和控制理论, 对达成一个决策的信息输入延时和执行该决策的动作输出延时进行了建模和分析。

此外, 文献^[13]为面向情报应用的高层次信息融合定义了一个综合性实现框架——可重组认知合成(RCS), 它把不同融合模型和算法有机地结合在一起并具有扩充性。

上述各模型可为信息融合系统的设计提供参考, 但实际信息融合系统的结构模型取决于 3 个方面: (1)融合层次, 包括数据级、特征级和决策级融合, 或 JDL 模型中不同功能级别, 比如: 面向军事应用的第 0-2 级融合结构模型^[14,15]中的每级结构都不同; (2)融合功能的部署, 可分为集中式结构、分布式结构和混合结构; (3)应用环境, 近几年研究人员基于 JDL 模型提出了一些特定于应用的信息融合结构模型, 比如用于战场态势估计的结构模型^[15]、用于虚拟制造的 JDL-U 模型^[16]等。因此至今仍不存在一个支持所有融合级别的通用的结构模型。事实上, 大多数系统针对专门用途仅实现了某个或部分级别的信息融合, 且信息融合功能通常是作为现代信息系统的一个模块或子系统。

5 信息融合方法论的研究进展

5.1 信息融合方法的分类

多源信息融合所面临的问题多样而复杂, 为此人们提出了大量的理论与方法, 出现在文献中的方法分类有: (1)基于物理模型、参数模型和认知识别模型的方法分类; (2)基于状态模型、统计理论、知识规则和信息理论的方法分类^[17]; (3)基于信号处理与估计理论、统计推断理论、信息论、决策论、人工智能和几何分析的方法分类^[1]; (4)基于概率统计的传统方法和基于人工智能的现代方法分类; (5)面向数据/信息不同特性的方法分类^[4]; (6)面向不同融合功能级别的方法分

类^[2]。可见,信息融合方法论涵盖众多学科。

须特别指出,最后两种分类法跟前面提到的信息融合两方面的问题与挑战相对应,能为人们在解决实际问题时或开发融合系统时选择合适的融合算法提供指导,也能让人们更容易地从整体上了解信息融合技术领域。

不论方法如何分类,常用的信息融合方法主要有以下几种:加权平均法、Bayes 方法、Kalman 滤波法、D-S 证据合成方法、模糊推理、神经网络和粗糙集方法。对于这些经典方法,已有大量文献作了讨论,如文献[4]与文献[18],在此不再赘述。

不完善信息的处理是信息融合要面临的主要挑战之一,可采用多种数学理论与方法^[1,4]。对于数据不确定性或随机性的处理,应用最早且最广泛的理论是概率论。Bayes 方法(包括 Bayes 估计、Bayes 滤波和 Bayes 推理网络)就是基于概率论的典型信息融合方法。D-S 证据理论是对概率论的推广,既可处理数据的不确定性,也能应对数据的多义性。而对于数据的模糊性、不完全性和不同粒度的处理,通常分别采用模糊集理论、可能性理论和粗糙集理论。对于具有混合特性的数据,可综合应用多种理论方法,比如模糊 D-S 证据理论、模糊粗糙集理论等。另外,研究发现随机集理论可把以上理论统一起来,具有广泛适应性^[2,8]。当然,不完善数据的处理还可采用人工智能计算方法,如神经网络、遗传算法、蚁群算法等等。

大多数信息融合研究工作集中于目标估计级融合,常用方法可分为 3 类:状态估计或滤波方法、数据关联方法以及分类与识别方法^[1,2]。但是对于高层次融合,尚未形成一套完善的方法体系;其中态势和影响评估主要采用各种推理理论和人工智能处理算法;而融合性能度量 and 过程优化可分别采用基于信息论和控制论的思想。面向不同功能级别的具体融合方法可参阅有关文献^[1,2]。

5.2 信息融合方法论的研究发展趋势

5.2.1 改进现有的信息融合方法

目的是提高融合方法的性能或扩大其适应面。首先需要研究信息各种特征(如第 3.1 节所述)的正确度量方法^[19,20]和融合性能评价方法^[21],比如改进证据理论时,需要研究证据间的距离/相似度/支持度^[20,22-24]、冲突度/矛盾性^[25-27]、证据可靠性、重要性和特定性等^[20,27]。在此基础上再研究现有融合方法的改进和扩展,例如:(1)通过修改证据组合规则或证据源数据模型来解决高冲突证据组合问题,这是一个研究热点,已提出大量方法^[22,23,26,27];扩展证据理论,比如 DSmt 证据理论(即 Dezert-Smarandache 理论)^[28]将辨识框架由密集扩大到高密度和超密集,并定义了新的证据组合规则,其应用前景广阔,成为了一个重要研究方向^[29,30]。(2)拓展模糊集理论,包括直觉模糊集、多值直觉模糊集、L-模糊集与 L-直觉模糊集、区间值模糊集与区间值直觉模糊集、Vague 集等理论,例如文献[31]研究了多值直觉模糊集信息融合。(3)还可改进粒子滤波^[32]、Kalman 滤波^[33,34]和信息融合滤波理论^[34]等等。

5.2.2 综合应用多种信息融合方法

这样可以取长补短,得到比采用单个方法更好的融合结果。有关研究工作主要集中于将几种常用的融合方法相结合并加以改进,例如:模糊理论、神经网络和遗传算法两两结合

或三者结合;模糊逻辑和 Kalman 滤波相结合;小波变换和 Kalman 滤波相结合;模糊理论和最小二乘法相结合;模糊集理论与粗糙集理论相结合并改进^[35];模糊集理论与证据理论相结合并改进^[17]等等。

5.2.3 研究应用不成熟的和新兴的信息融合方法

随机集理论、支持向量机理论、本体论、博弈论、商空间粒计算理论等在信息融合领域中的应用仍需进一步深入研究。Web Service 和云计算等新型计算模式也逐渐用于信息融合领域。目前的研究工作还包括一些受生物学启发的智能融合方法^[36]。

基于随机集理论的信息融合研究工作目前主要局限于多源异类信息的统一表示与建模^[5]和多目标/群目标跟踪技术,如概率假设密度(PHD)算法及其改进等^[1,37],人们期望以该理论为基础建立统一的信息融合理论框架^[2,8,38],但目前还有很大差距。支持向量机(SVM)理论主要用于数据的分类,可较好地解决小样本、高维特征空间和不确定条件下的数据融合问题,人们已提出很多种算法,如模糊 SVM、小波 SVM、孪生 SVM、排序 SVM 等等^[1,39,40],针对具体应用,须研究 SVM 算法及其参数和核函数的优化选择问题。本体既能表示信息的语义,又能反映信息的粒度及关系,因此本体论有助于不同知识型信息的融合,如 Web 信息融合^[41]和多模态信息的融合;另外,高层次信息融合中广泛使用基于知识的推理,本体论可提供有效的支持^[42],融合系统中的知识库可借助本体论思想进行高效组织^[43]。博弈论可为多源信息冲突环境下的信息融合问题^[44,45]和多代理融合系统的设计^[46]提供有效的解决途径,博弈论融合属于高层次信息融合范畴,可用于态势评估与认识、威胁预测和传感器管理等,典型算法有基于贝叶斯网络的博弈融合算法、分散式马尔科夫博弈论方法等,但博弈融合的应用有待推广,相应模型和算法也需要改进^[46]。与粗糙集理论一样,商空间(Quotient Space)理论也属于粒计算范畴^[47],也有望用于多粒度多层次的信息融合以及海量数据融合,但目前的研究工作很有限^[48],值得进一步深究;在基于粒计算理论实现信息融合时,需要研究信息粒的表示、粒层的转换和粒的计算方法等问题^[47],以及复合粒计算模型^[35]的应用。

Web Service 和云计算是基于互联网的新兴计算技术。Web Service 可为异构信息服务的集成与融合提供很好的解决方案,目前基于 Web Service 的信息融合技术主要用于地理信息系统^[49],如提供地理空间数据融合^[50]和卫星遥感图像融合^[51]服务,也可利用 Web Service 实现多传感器数据共享与融合优化^[52],另外文献[53]基于语义 Web Service 实现了异构的生物特征身份信息的融合。云计算具有超级计算能力、海量数据存储能力和透明方便的服务访问接口,可为信息融合算法的实现和融合系统的开发提供一种新的解决方案,特别是能应对海量多维数据实时融合的挑战,如军事情报融合^[54]和互联网上信息资源的融合与集成^[55]。文献[56]提出了组合云模型和改进的蚁群算法,用云计算平台对 CO₂ 浓度监测数据进行融合。

5.2.4 信息融合方法论的其它研究方向

研究信息融合理论分支和应用领域中的特定问题与方法,比如图像融合、多目标跟踪、Web 信息融合等等仍然存在很多问题需要解决,信息融合在民事领域中的应用还有很大

发展空间,需要提出改进的或创新的方法(见第6节)。

随着网络技术和信息的爆炸式增长,分布式信息融合、海量数据融合、安全的信息融合和多模态异类信息融合的实现有待进一步研究。分布式融合目前主要采用多代理(multi-agent)技术来实现并取得了一定成果^[57];海量数据融合需采用比较先进的新方法,如商空间等粒计算方法、粒度SVM^[39]及其它能处理大规模问题的SVM改进算法^[40]等等;融合的安全性问题目前主要在无线传感器网络的数据融合中得到了深入研究^[58,59];多模态异类信息融合可采用基于随机集或本体论等方法。但是,上述各类信息融合的方法论都不太成熟,也缺乏足够的实践经验。另外,这些信息融合问题也可考虑采用Web Service和云计算方案来解决。

6 信息融合技术应用研究进展

6.1 多传感器应用系统

大多数有关信息融合的研究工作都是针对多传感器数据的融合,因此信息融合技术主要应用于带有多个传感器或传感器网络的信息与控制系统^[1,2,17],例如:军事情报系统、海洋监视系统、战争防御系统、自动火炮系统、工农业机器人^[60]、故障诊断与生产监控系统^[61]、刑侦反恐防暴扫雷等安保系统、医疗检测与诊断系统^[62]、矿山安全监测监控系统^[16]、自然环境及资源监测监控系统^[16]、智能交通系统^[63]、智能汽车^[64]、无人飞机、智能家居系统等等。顺便指出,无线传感器网络(WSN)中有一种数据融合主要不是针对传感器的具体应用,而是用于高效无线通信协议的设计,通过“数据聚合”来减少射频传输数据量,从而节省能量和延长传感器寿命^[59]。

6.2 图像融合与目标跟踪

这是信息融合技术的两个重要研究分支^[1,2,65],在军事和民用领域都有广泛应用,例如:夜战武器将红外热像与微光图像融合、医学中将CT图像与MRI图像融合、遥感应用中将SAR图像与可见光图像融合^[65]、战争防御系统对敌方目标的识别与跟踪^[1]、机器人对被抓取物件的识别和自我移动导航^[60]、汽车对行人和附近物体的探测与跟踪^[64]等等。

图像融合的研究重点是像素级融合;根据具体应用,可综合利用小波变换和非子采样轮廓波变换(NSCT)等多种几何变换方法,并改进融合算子^[66];特征级和决策级图像融合、动态图像融合、交叉媒体融合等还有待深入研究^[65]。单目标跟踪技术已成熟,而多目标跟踪,尤其是杂波环境下多个机动目标跟踪技术还有待进一步研究;目前的工作是改进多假设跟踪(MHT)算法和基于随机集的概率假设密度(PHD)滤波器^[1,37],也可将MHT算法与联合概率数据关联(JPDA)算法、交互式多模型算法相结合^[2]等等。

6.3 智能交通与汽车

随着汽车数量的增加和交通工程的发展,为了给人们提供更安全、更高效、更舒适、更绿色的交通工具和旅行体验,研究人员利用信息与通信技术一方面改造交通基础设施,发展智能交通系统^[63],另一方面,开发具有感知与自治能力的汽车^[64]。信息融合将在其中发挥重要作用,比如通过融合车载和路上多种传感器数据,可实时了解车况和路况、节能减排、检测交通事件;采用目标检测和夜视等技术可避免车祸;通过融合不同来源的交通信息,可实时评估交通态势、估计旅行时

间、避免交通拥塞;多种定位与导航技术和环境感知与理解技术的综合应用,可改善汽车导航功能或实现自动驾驶等等^[63,64]。

6.4 医疗保健和公共卫生

信息融合在医学领域应用较早而且非常广泛^[67],包括各种医学图像融合^[65,68]与疾病诊断^[62]、计算机辅助治疗、慢性病(如糖尿病)发展研究^[69]等等,相关应用还有生物信息学研究^[70]、健康信息管理等。近年来其在中医诊断和家庭保健方面也取得了进展。传统中医主要依靠“望、闻、问、切”等主观手段和个人知识来诊断疾病,现在可运用信息采集与融合技术并结合中医知识库,对中医四诊信息进行融合识别,从而提供更客观、准确和高效的中医诊断方法^[71]。健康护理监控系统利用多个传感器监测残疾人、老年人或病人的身体状况与行为,通过信息融合发现异常现象;一旦出现健康或安全问题,就会自动通知护理或急救人员^[72,73]。

在公共卫生方面,通过健康信息交换,将来自多个数据源的公共卫生事件和疾病信息进行融合,可了解疾病的传播与发展,促进对公众健康态势的认识,有利于疾病预防控制中心采取相应措施控制新兴传染病的蔓延和自然灾害疫情^[69]。

6.5 计算机与网络安全

计算机和网络可能会受到各种各样的攻击。计算机系统由于具有高度复杂性,因此对攻击的检测与理解严重依赖于不同来源的多种证据的收集与关联。计算机与网络安全保障的4个阶段,即预防、检测和制止侵犯以及受侵后恢复,都可采用信息融合技术,但在入侵检测方面的研究最活跃。

入侵检测实际上是一种模式分类与识别任务。对于攻击检测,由于安全相关的事件复杂多样,需要采用多种分类器才能获得好的整体性能;而在结果分析中,通过组合多个警报也能提高入侵检测系统的性能和可用性。因此分类器组合和警报相关/组合成为了该领域信息融合的研究重点^[74]。另外,还必须考虑数据的组织和一致性调整。前者需要考虑数据的来龙去脉和相关信息;后者是利用信息的冗余性或多处检测数据的相互校验来提高数据和事件分析的可靠性,从而发现潜在的攻击^[74]。

6.6 Web 信息融合

如何从Web或因特网中高效方便地获取人们真正需要的高质量信息一直是研究热点。Web信息融合是指合并不同来源的Web信息(可能存在于表面静态Web页面或深层Web数据库中),以便向用户提供一个统一的浏览结果。Web信息融合涉及到许多领域^[41],如Web信息提取、Web搜索、Web挖掘、自然语言处理、Web服务、本体论与语义Web、基于Web的智能系统等。

目前的研究工作主要集中于两个方面:信息检索(IR)数据融合和Web文档知识融合。前者通常是指把多个IR分系统针对同一个查询返回的多个已排序的结果文档列表,合并成单一的列表后呈现给用户^[75]。而后者主要利用语义本体和自然语言处理技术来分析多个文档的内容,通过消除知识的冗余、冲突和不完整性,为用户提供具有一致性的知识^[43]。多文档知识融合包括半结构化文本(主要指XML格式)和非结构化文本(指HTML格式或其它文本)的知识融合^[43]。另外,Web信息融合还包括交叉媒体(如文本与图像)的融合和多语言(如中英文)信息融合。Web服务组合也可认为是

Web 信息融合的一种特殊形式,已成为一个研究热点。Web 信息融合技术的发展将促进用于信息检索、科研、教育、医疗和管理等领域的基于 Web 的支持系统^[76]的研究与开发。

6.7 数据隐私保护及其它应用

某些研究领域都涉及到数据隐私问题,最著名的例子有统计披露控制和隐私保护型数据挖掘。当把具体的人口普查数据提供给社会学或医学研究者时不能泄露相关敏感信息,通过数据挖掘从商业数据库中获取关联规则时也不允许泄露特定客户的敏感信息^[77]。

信息融合在数据隐私中所起的作用主要体现在两个方面^[77]:一是保护方法通常依赖于数据聚合,如“微聚合”法,以便扰乱和屏蔽特定的敏感值;二是使用记录链接来匹配与合并多个来源的数据,这样既可估测被保护数据的泄露风险,又可实现不同数据源之间的隐私保护型链接。

此外,信息融合还可用于地理信息系统(GIS)^[49,50]、工商业中管理决策^[78]等众多领域。

结束语 信息融合的理论与应用范畴非常广,跨越众多学科。本文首先阐明了信息融合的目的、任务、优势及实现层次,并给出了一个较为通用的定义,从而澄清了信息融合的概念,揭示了其本质;然后从信息的特性与处理需求、融合系统的设计与实现这两个角度阐述了多源信息融合中的问题与挑战、主要模型与方法,总结和分析了信息融合方法论与应用研究进展及新动向。

总的来说,信息融合技术的研究正由低层次融合向高层次融合发展,同时考虑了人类的参与、资源管理与融合过程的优化;研究重点从来自各类传感器等硬件设备的“硬数据”融合逐渐转移到来自数据库和网络等信息系统的“软信息”或“软/硬数据”融合;信息融合技术的研究在军事领域更加深入,而在民用领域不断推广,并且信息融合理论与相关学科、信息融合理论研究与应用研究并行发展、相互促进。

随着网络技术和信息的爆炸式增长,分布式、多层次和海量信息的融合技术将成为发展的主流。信息融合的应用面将更加宽泛,可从底层融合和高层融合两方面出发来解决特定应用中的信息融合问题。底层融合可充分利用各种新型传感器技术和其它信息获取途径(如物联网、移动终端等)来扩大应用范围;高层融合应用主要应考虑充分挖掘现有网络与信息资源的潜力,提高信息与控制系统的效能及智能化程度。信息融合将成为各个学科领域的一种通用的信息处理模式。

参考文献

- [1] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等.多源信息融合(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2010
- [2] 彭冬亮,文成林,薛安克.多传感器多源信息融合理论及应用[M].北京:科学出版社,2010
- [3] Boström H, Andler S F, Brohede M, et al. On the Definition of Information Fusion as a Field of Research[R]. Tech. Rep. HS-IKI-TR-07-006. Informatics Research Centre, University of Skövde, 2007
- [4] Khaleghi B, Khamis A, Karray F O. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art[J]. Information Fusion, 2013, 14(1):28-44
- [5] 徐晓斌,文成林,刘荣利.基于随机集理论的多源信息统一表示

- 与建模方法[J].电子学报,2008,36(6):1174-1181
- [6] Hall D L, McNeese M, Llinas J, et al. A framework for dynamic hard/soft fusion[C]//Proc. of the 11th International Conference on Information Fusion. Cologne, Germany, 2008:1-8
- [7] 何友,关欣,王国宏.多传感器信息融合研究进展与展望[J].宇航学报,2005,26(4):524-529
- [8] Hall D L, Llinas J. 多传感器数据融合手册[M].杨露菁,耿伯英,译.北京:电子工业出版社,2008
- [9] Blasch E, Llinas J, Lambert D. High Level Information Fusion developments, issues, and grand challenges: Fusion 2010 panel discussion[C]//Proc. of the 13th International Conference on Information Fusion. Edinburgh, UK, 2010:1-8
- [10] Hall D L, McNeese M D, Hellar D B, et al. A cyber infrastructure for evaluating the performance of human centered fusion [C]//Proc. of the 12th International Conference on Information Fusion. Seattle, USA, 2009:1257-1264
- [11] Blasch E P, Breton R, Valin P, et al. User information fusion decision making analysis with the C-OODA model [C]// Proc. of the 14th International Conference on Information Fusion. Chicago, USA, 2011:1-8
- [12] 何友,薛培信,王国宏.一种新的信息融合功能模型[J].海军航空工程学院学报,2008,23(3):241-248
- [13] Solano M A, Ekworo-Osire S, Tanik M M. High-Level fusion for intelligence applications using Recombinant Cognition Synthesis [J]. Information Fusion, 2012, 13(1):79-98
- [14] 赵宗贵.信息融合技术现状、概念与结构模型[J].中国电子科学研究院学报,2006,1(4):305-312
- [15] 赵宗贵,李君灵,王珂.战场态势估计概念、结构与效能[J].中国电子科学研究院学报,2010,5(3):226-230
- [16] De Vin L J, Holm M, Ng A H C. The Information Fusion JDL-U model as a reference model for Virtual Manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26: 629-638
- [17] 于洪珍,徐立中,王慧斌.监测监控信息融合技术[M].北京:清华大学出版社,2011
- [18] 简小刚,贾鸿盛,石来德.多传感器信息融合技术的研究进展[J].中国工程机械学报,2009,7(2):227-232
- [19] Cholvy L. Modelling information evaluation in fusion [C]//Proc. of the International Conference on Information Fusion. 2007:1-6
- [20] Li Xin-de, Dezert J, Smarandache F, et al. Evidence supporting measure of similarity for reducing the complexity in information fusion [J]. Information Sciences, 2011, 181:1818-1835
- [21] van Laere J. Challenges for IF performance evaluation in practice [C]//Proc. of the International Conference on Information Fusion. 2009:866-873
- [22] 韩德强,邓勇,韩崇昭,等.基于证据距离与不确定度的证据组合方法(英文)[J].红外与毫米波学报,2011,30(5):396-400,468
- [23] Liu Zhun-ga, Jean D, Pan Quan, et al. Combination of sources of evidence with different discounting factors based on a new dissimilarity measure [J]. Decision Support Systems, 2011, 52(1): 133-141
- [24] Jousselme A-L, Maupin P. Distances in evidence theory: Comprehensive survey and generalizations [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2012, 53:118-145
- [25] He You, Hu Li-fang, Guan Xin, et al. New method for measuring the degree of conflict among general basic probability assignments [J]. Science China: Information Sciences, 2012, 55

- [26] 史超,程咏梅. 基于证据冲突度的多传感器冲突信息组合方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 865-868
- [27] 杨风暴, 王肖霞. D-S证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010
- [28] Smarandache F, Dezert J. Advances and Applications of DSMT for Information Fusion(Vol. 1-3)[M]. Rehoboth: American Research Press, 2004, 2006, 2009
- [29] 黄心汉, 李鹏, 王敏. 广义证据推理融合结构[J]. 智能系统学报, 2010, 5(6): 487-491
- [30] Airouche M, et al. Pedestrian tracking using color, thermal and location cue measurements; a DSMT-based framework [J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(5): 999-1010
- [31] 王超, 周启海, 李燕. 多值直觉模糊集信息融合研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(8): 236-238, 264
- [32] 杨小军, 潘泉, 王睿, 等. 粒子滤波进展与展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2): 261-267
- [33] Shen X J, Luo Y T, Zhu Y M, et al. Globally optimal distributed Kalman filtering fusion [J]. Science China: Information Science, 2012, 55(3): 512-529
- [34] 邓自立. Wiener 滤波, Kalman 滤波和信息融合滤波理论研究进展[J]. 黑龙江大学学报, 2011, 2(3): 37-44
- [35] 薛志远, 张清华. 复合粒计算模型研究进展[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2010, 22(5): 631-640
- [36] Casey M C, Damper R I. Special Issue on Biologically-Inspired Information Fusion[J]. Information Fusion, 2010, 11(1): 2-3
- [37] 郝燕玲, 孟凡彬, 王素鑫, 等. 一种新的多机动目标跟踪的 GMPHD 滤波算法[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(7): 873-877
- [38] 彭冬亮, 文成林, 徐晓滨, 等. 随机集理论及其在信息融合中的应用[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(11): 2199-2203
- [39] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2-10
- [40] 文益民, 王耀南, 吕宝粮, 等. 支持向量机处理大规模问题算法综述[J]. 计算机科学, 2009, 36(7): 20-25, 31
- [41] Yao J, Raghavan V, Wu Z. Web information fusion: A review of the state of the art[J]. Information Fusion, 2008, 9(4): 446-449
- [42] Kokar M M, Matheus C J, Baclawski K. Ontology-based situation awareness[J]. Information Fusion, 2009, 10(1): 83-98
- [43] 刘平峰, 章佩璐, 张军, 等. 面向主题的 Web 信息融合模型[J]. 图书情报工作, 2011, 55(8): 40-43
- [44] 王刚. 多源信息冲突环境下的博弈融合问题[D]. 沈阳: 东北大学, 2004
- [45] 曲阳, 徐林, 王建辉, 等. 基于信息博弈的多源信息融合方法[C]// 2005 年全国自动化新技术学术交流会. 东南大学学报, 2005: 10-14
- [46] Yin H, Wang L, Nong J. Survey on Game-theoretic Information Fusion [C]// 2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery(FSKD 2010). Yantai, China, 2010: 2147-2151
- [47] 张燕平, 等. 商空间与粒计算—结构化问题求解理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- [48] 徐峰, 张铃. 基于商空间的非均匀粒度聚类分析[J]. 计算机工程, 2005, 31(3): 26-28, 53
- [49] Florea M C, Duclos-Hindie N, Bosse E. A Web-Service Approach for Multisensor Data Fusion and Geographic Information Systems[C]// 4th International Workshop on Information Fusion and Geographical Information Systems. St Petersburg, Russia, 2009: 209-223
- [50] Szekeely P, Knoblock C A, Gupta S, et al. Exploiting semantics of web services for geospatial data fusion [C]// Proc. Part of the 19th ACM SIGSPATIAL/Int. Conf. on Advances in Geographic Information Systems. New York, USA, 2011: 32-39
- [51] Xie Bin, Xu Gong-bo, Yu Le. Online image fusion of remotely sensed satellite imagery using web services chain[C]// Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication(ICFCC 2010). Wuhan, China, 2010: 49-52
- [52] Babitski G, Bergweiler S, Hoffmann J, et al. Ontology-Based Integration of Sensor Web Services in Disaster Management[C]// Proc. of Third International Conference on GeoSpatial Semantics (GeoS 2009). Mexico city, Mexico, 2009: 103-121
- [53] Rodriguez L P, Poza M J, Gomez J M, et al. Biometric authentication devices and semantic Web services: An approach for multi modal fusion framework[C]// International Conference on Biomedical Electronics and Devices. 2008: 95-100
- [54] Cheng Xi, Liao Xue-jun. The Application of Cloud Computing in Military Intelligence Fusion[C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences(ICM 2011). Nanjing, China, 2011: 241-244
- [55] 宋正德, 魏震方. 云计算环境下信息资源的融合与集成[J]. 中国科技信息, 2011(24): 95
- [56] 胡军国, 祁亨年. 基于云计算平台的 CO₂ 空间数据融合算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(4): 1003-1008
- [57] Das S. Agent-based information fusion[J]. Information Fusion, 2010(11): 216-219
- [58] Alzaid H, Foo E, Nieto J G. Secure data aggregation in wireless sensor network: a survey [C]// Proc. of the Australasian Information Security Conference. 2008: 93-106
- [59] 陈正宇, 杨庚, 陈蕾, 等. 无线传感器网络数据融合研究综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1601-1604
- [60] 赵小川, 罗庆生, 韩宝玲. 机器人多传感器信息融合研究综述[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(8): 1-4, 11
- [61] 吕峰, 王秀青, 杜海莲, 等. 基于信息融合技术故障诊断方法与进展[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(S): 217-221
- [62] Dou W, Dong A, Chi P, et al. Brain tumor segmentation through data fusion of T2-weighted image and MR spectroscopy [C]// 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2011: 10-12
- [63] Faouzi N E, Leung H, Kurian A. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges-A survey [J]. Information Fusion, 2011, 12(1): 4-10
- [64] Stiller C, León F P, Kruse M. Information fusion for automotive applications-An overview[J]. Information Fusion, 2011, 12(4): 244-252
- [65] 敬忠良, 肖刚, 李振华. 图像融合: 理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [66] Li Tian-jie, Wang Yuan-yuan. Biological image fusion using a NSCT based variable-weight method[J]. Information Fusion, 2011, 12: 85-92
- [67] Dasarathy B V. Information fusion in the realm of medical applications-A bibliographic glimpse at its growing appeal[J]. Information Fusion, 2012, 13(1): 1-9
- [68] Miranda S V, Carrasco M, Pachon J. Procedure of high precision

- fusion of CT-MRI images for head-neck cancer with new antenna frame[J]. Radiotherapy and Oncology, 2011, 98(Sup. 1): S41
- [69] Ozonoff A, Cuzzolin F, Snow P. Special Issue on Information Fusion Applications to Human Health and Safety[J]. Information Fusion, 2012, 13(2): 102-104
- [70] Masulli F, Mitra S. Natural computing methods in bioinformatics; a survey[J]. Information Fusion, 2009, 10(3): 211-216
- [71] 徐璘, 王忆勤, 邓峰, 等. 中医四诊多源信息融合分析方法的研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2010, 28(6): 1203-1205
- [72] Marhic B, Delahoche L, Solau C, et al. An evidential approach for detection of abnormal behaviour in the presence of unreliable sensors[J]. Information Fusion, 2012, 13(2): 146-160
- [73] Tapia D I, Fraile J A, Luis A, et al. Healthcare Information Fusion Using Context-Aware Agents[C]// 5th International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems(HAIS 2010). San Sebastian, Spain, 2010: 96-103
- [74] Corona I, Giacinto G, Mazzariello C, et al. Information fusion for computer security; State of the art and open issues[J]. Information Fusion, 2009, 10(4): 274-284
- [75] Wu Sheng-li. Applying the data fusion technique to blog opinion retrieval[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(1): 1346-1353
- [76] Yao Jing-tao. An introduction to Web-based support systems [J]. Journal of Intelligent Systems, 2008, 17(1-3): 267-281
- [77] Navarro-Arribas G, Torra V. Information fusion in data privacy: A survey[J]. Information Fusion, 2012, 13(4): 235-244
- [78] Yan Xiao-jun, Wang Wei-rui, Liang Jian-ping. How to design and apply a decision support system based on multi-source heterogeneous data fusion(MSHDF) technology for the site selection of green food production base(GFPB)[C]// 2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing(IITA-GRS 2010). Qingdao, China, 2010: 627-33
-
- (上接第 5 页)
- [18] Lochert C, Hartenstein H, et al. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments[C]// Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2003
- [19] Lochert C, Mauve M, et al. Geographic routing in city scenarios [J]. ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review, 2005, 9(1): 69-72
- [20] Zhao J, Cao G. VADD: Vehicle-Assisted data delivery in vehicular ad hoc networks[C]// Proceedings of the INFOCOM 2006. New York, 2006: 1-12
- [21] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, et al. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[C]// Proceedings of the 25th International Conference on Computer Communications, INFOCOM 2006. IEEE, 2006
- [22] Shafiee K, Leung V C M. Connectivity-aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in VANETs[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(2): 131-141
- [23] Naumov V, Gross T R. Connectivity-Aware routing(CAR) in vehicular ad-hoc networks[C]// Proceedings of the 26th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007). New York, 2007: 1919-1927
- [24] Tonguz O, Wisitpongphan N, Bai F, et al. Broadcasting in VANET[C]// Proceedings of 2007 Mobile Networking for Vehicular Environments. 2007
- [25] Khabazian M, Ali M. A Performance Modeling of Connectivity in Vehicular Ad Hoc Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2440-2450
- [26] Khabazian M, Ali M M. A Continuous Communication Path Availability Analysis in Vehicular Ad Hoc Networks[C]// Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2009. IEEE 69th. 2009
- [27] Nzouonta J, Nakayama M K, Borcea C. On deriving and incorporating multihop path duration estimates in VANET protocols [J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 2011, 21(2): 1-23
- [28] Zhao Jing, Zhang Yang, Cao Guo-hong. Data pouring and buffering on the road; A new data dissemination paradigm for vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3266-3277
- [29] Ding Yong, Xiao Li. SADV: Static-node-assisted adaptive data dissemination in vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(5): 2445-2455
- [30] Wischoff L, et al. SOTIS-a self-organizing traffic information system. in Vehicular Technology Conference[C]// Proceedings of VTC. 2003
- [31] Yu B, Xu C, Guo M. Adaptive Forwarding Delay Control for VANET Data Aggregation[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011(99)
- [32] Lochert C, Björn S, Martin M. A probabilistic method for cooperative hierarchical aggregation of data in VANETs[J]. Ad hoc Networks, 2010, 8(5): 518-530
- [33] Dietzel S, Boto B, et al. A fuzzy logic based approach for structure-free aggregation in vehicular ad-hoc networks[C]// Proceedings of the sixth ACM international workshop on Vehicular Inter Networking. ACM, Beijing, China, 2009: 79-88
- [34] Jong-moon C, Kim M, et al. Time Coordinated V2I Communications and Handover for WAVE Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(3): 545-558
- [35] Bi Yuan-guo, Liu Kuang-hao, Cai Lin X, et al. A Multi-Channel Token Ring Protocol for QoS Provisioning in Inter-Vehicle Communications [J]. IEEE Trans. Wireless Communication, 2009, 8(11)
- [36] Zang Yun-peng, Stibor L, et al. A Novel MAC Protocol for Throughput Sensitive Applications in Vehicular Environments [C]// Proceedings of Vehicular Technology Conference. 2007
- [37] Han Chong, Dianati D, Tafazolli R, et al. A Novel Distributed Asynchronous Multi-Channel MAC Scheme for Large-Scale Vehicular Ad Hoc Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012(99)
- [38] Wang Qing, Leng Su-peng, Fu Hui-rong, et al. An IEEE 802.11p-Based Multichannel MAC Scheme With Channel Coordination for Vehicular Ad Hoc Networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(2): 449-458
- [39] 宋超, 刘明, 龚海刚, 等. 基于分布式实时信息的车载网络路由协议[J]. 软件学报, 2011(03): 466-480
- [40] 陈丽, 李治军, 姜守旭, 等. 车载 Ad hoc 网络中基于移动网关的数据传输[J]. 计算机学报, 2012(03): 454-463