

信息融合理论的基本方法与进展¹⁾

潘 泉 于 昕 程咏梅 张洪才

(西北工业大学自动控制系 西安 710072)

(E-mail: quanpan@nwpu.edu.cn)

摘 要 信息融合是现代信息技术与多学科交叉、综合、延拓产生的新的系统科学研究方向, 由于其在军事和民用领域已经展现出的有效与广阔的理论和应用前景, 而备受国内外学者和众多实际工程领域专家的高度关注. 文章对近几年来信息融合国际年会和近百种国际学术期刊进行了统计分析, 对信息融合在军事和民用领域的应用分布情况、所采用的各种不同数学工具和研究方法所占的比例、融合系统建模方法、算法、发展动向、存在的问题和解决这些问题的思路给出了系统的综述.

关键词 多传感器系统, 信息融合, 模型, 算法

中图分类号 TP273

Essential Methods and Progress of Information Fusion Theory

PAN Quan YU Xin CHENG Yong-Mei ZHANG Hong-Cai

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(E-mail: quanpan@nwpu.edu.cn)

Abstract This paper presents a statistical analysis on international annual meetings and international academic periodicals of nearly hundred kinds in the past few years. It also summarizes the application distribution situation of information fusion in the military and civil fields, the percentage of different mathematic tools and research approaches adopted, the models of fusion system, information fusion algorithms and the development tendency, existing problems, and how to solve these problems.

Key words Multisensor system, information fusion, fusion model, fusion algorithm

1 引言

随着微电子技术、信号检测与处理技术、计算机技术、网络通信技术以及控制技术的飞

1) 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金(教技函[2001]1号)、国家自然科学基金(60172037)和航空基础科学基金(99D53041)资助

Supported by Foundation of Trans-Century Talents of Ministry of Education of P. R. China(No. 1 of 2001), National Natural Science Foundation of P. R. China(60172037) and Aeronautic Basic Science Foundation of P. R. China(99D53041)

收稿日期 2001-07-19 收修改稿日期 2002-03-18

Received July 19, 2001; in revised form March 18, 2002

速发展,各种面向复杂应用背景的多传感器系统大量涌现.在这些多传感器系统中,信息表现形式的多样性,信息数量的巨大性,信息关系的复杂性,以及要求信息处理的及时性、准确性和可靠性都是前所未有的.这就使得利用计算机技术对获得的多传感器信息在一定准则下加以自动分析、优化综合以完成所需的估计与决策——多传感器信息融合技术得以迅速发展^[1~12].

早在 20 世纪 70 年代末期,在一些公开出版的文献中就开始出现有关信息综合的概念或名词.在其后的较长一段时期,人们普遍使用“数据融合”这一名词.直到 20 世纪 90 年代,考虑到传感器信息的多样性,“信息融合”一词被广泛采用.对信息融合概念的描述多种多样,文献[13]给出了许多根据特定行为定义的融合概念和相关的应用领域.近来,文献[14]提出了一种对信息融合比较概括的描述,在此基础上我们给出如下描述:融合是一种形式框架,其过程是用数学方法和技术工具综合不同源信息,目的是得到高品质的有用信息.“高品质”的精确定义依赖于应用.这样,存在各种不同种类、不同等级的融合,如数据融合、图像融合、特征融合、决策融合、传感器融合、分类器融合等.对不同来源、不同模式、不同媒质、不同时间、不同地点、不同表示形式的信息进行综合,最后可以得到对被感知对象更加精确的描述.

信息融合的功能可以概括为:扩大时空搜索范围,提高目标可探测性,改进探测性能;提高时间或空间的分辨率,增加目标特征矢量的维数,降低信息的不确定性,改善信息的置信度;增强系统的容错能力和自适应能力;随之而来的是降低推理的模糊程度,提高了决策能力,从而使整个系统的性能大大提高.从根本上说来,上述结果来源于信息的冗余性及互补性.因此,多传感器信息融合往往可以获得单传感器难以获得的结果,其性能往往会有质的飞跃.从原理上讲,上述思想可以进一步执行到多设备、多系统融合.

近年来,随着计算机技术和网络通信技术的飞速发展,以及二者之间日趋紧密的相互促进,加之军事应用领域的 C⁴I 系统和 IW 系统的迫切需要,信息融合技术取得了惊人的发展,包括对多种目标的探测^[15~17]、识别^[18~22]、跟踪^[23~26]以及关于战场监视、态势和威胁评估等.同时,信息融合的应用领域不断扩展,从开始诞生的军事领域,逐渐向其它领域渗透,如:智能机器人与智能车辆领域、医学图象处理与诊断、气象预报、地球科学、农业应用领域、现代制造领域和经济商业领域等等.此外,信息融合还被用于火车定位、鱼类识别或车辆通过的探测^[27]等等.信息融合技术应用范围日趋广泛,同时在一些实际应用中也取得了相应的成效,例如:突尼斯的 Nagesware S V Rao 提出了一种基于物理规则的物理系统融合方法,在甲烷氢氧化物探测中,取得了满意的效果^[28];法国的 Serge Reboul 提出了对风速和风向进行融合,较好地解决了风场问题^[29];美国的 Jacqueline Le Moigne 和 James A Smith 研制了一种融合系统(Landsat),可用来监控植被的变化情况^[30]等.

美国是信息融合技术起步较早、发展最快的国家.美国国防部早在七十年代就资助从事声纳信号理解及融合的研究.1988 年,美国国防部将信息融合技术列为九十年代重点开发的 20 项关键技术之一,并取得了一些研究成果,开发了一系列 C⁴I 系统^[2,3]及 IW 系统^[4, 31~35].除美国外,其他西方国家也普遍重视信息融合技术的研究.英国陆军开发了诸如炮兵智能信息融合系统(AIDD)、机动和控制系统(WAVELL)等,并于 1982 年提出研制“海军知识库作战指挥系统”;1987 年又与西德等欧洲五国制定了联合开展“具有决策控制的多传感器信号与知识综合系统(SKIDS)”^[36]的研究计划.此外,法、德等北约国家在这方面的

研究工作也十分活跃,如汤姆逊公司已将信息融合技术应用于 MARTHA 防空指挥控制系统中.德国已在“豹 2”坦克的改进计划中采用信息融合、人工智能等关键技术.

在学术方面,美国于 1984 年成立了数据融合专家组,从 1988 年起美国海陆空三军每年联合召开一次学术会议,并通过 SPIE 发表有关论文.从 1998 年开始,由 NASA 艾姆斯氏试验研究中心、美国陆军研究部、IEEE 信号处理学会、IEEE 控制系统学会、IEEE 宇航和电子系统学会发起每年召开一次的信息融合国际会议,至今已开过四届 (Fusion'98-Fusion'2001),使全世界有关学者都能及时了解和掌握信息融合技术发展的新动向,促进了信息融合技术的发展.下面是有关情况的统计表.

表 1 军事应用与民事应用四届年会的比例表
Table 1 Proportion of military and civil applications of four conferences

年 份	军用 文章 (%)	民用 文章 (%)	理论及综 合类文章 (%)
Fusion'98	63	37	—
Fusion'99	54	42	4
Fusion'2000	44	39	17
Fusion'2001	47	33	20

表 2 各类研究方法四届年会分类统计表
Table 2 Classified stat of research methods of four conferences

年 份	智能化 方法 (%)	非智能 化方法 (%)	其 他 (%)
Fusion'98	48	52	—
Fusion'99	44	49	7
Fusion'2000	35	47	18
Fusion'2001	41	42	17

表 3^[39] 91~99 百篇英文期刊文章* 应用领域情况统计表
Table 3 Stat of application fields of hundred english papers from 1991 to 1999

通用	军事	医学	地理科学	机器人	工程
19%	37%	7%	17%	14%	6%

表 4 91~99 百篇英文期刊文章* 数学工具统计表
Table 4 Stat of mathematics tools of hundred english papers from 1991 to 1999

概率论	模糊理论	证据推理 理论	神经网络	其他
23%	33%	18%	11%	15%

*) 英文期刊包括:IEEE 学报、IEEE 系统、人与控制学报、IEEE 地球科学与遥感学报、最优工程、模糊集和系统、国际智能系统杂志、宇航科学与技术、IEEE 宇航与电子系统学报、国际遥感杂志、计算机科学、计算机视觉和图像理解、IEEE 神经网络学报、国际近似推理杂志、模式识别、模式识别科学、摄影测绘工程与遥感、医学人工智能、IEEE 智能系统、IEEE 生物医学工程学报、IEEE 仪器与测量学报、IEEE 机器人技术和自动控制学报、图像和视觉计算、信息检索、信息科学、国际系统科学杂志、智能和机器人系统杂志、机器人技术和自治系统、信号处理、模式分析及应用、IEEE 模式分析和机器智能学报

从表 1 和表 3 可以看出,尽管信息融合在军事领域的地位始终突出,但是随着信息融合技术的发展,其应用领域得以迅速扩展.特别是表 3 反映的情况表明,信息融合已成为现代信息处理的一种通用工具和思维模式.

从表 2 和表 4 看,目前以模糊理论、神经网络、证据推理等为代表的所谓智能方法占有相当大的比例,这或许是因为,这些方法兼有对问题描述的非建模优势和语言化描述与综合优势的原因.

从整体上分析,近年来,随着人工智能技术的发展,信息融合技术有朝着智能化、集成化的趋势发展.最新的研究动向包括:

- 1) 研究并完善实用的算法分类和层次划分方法;
- 2) 研究并发展实用的融合系统测试和评估方法;
- 3) 建立系统设计和算法选择的工程指导方针;
- 4) 编撰信息融合辞典,规范领域术语和定义;
- 5) 发展并完善 JDL 模型,以解决现有 JDL 所不能处理的多图像融合^[37]以及合成传感器 (complex meta sensors)^[38]等问题.

信息融合的研究尽管取得了不少成果^[5~12, 39~65], 但至今尚未形成统一的理论框架, 绝大部分工作都是针对特定应用领域开展的. 随着信息融合的涵盖面越来越广, 从系统角度看, 信息融合不仅是信息的获取、处理、理解和评估, 还应包括对传感器的管理与控制. 本文基于我们近年来的工作, 结合国内外最新发展, 试图给出一个统一的研究框架. 本文第二部分总结了近年来国内外的研究工作, 给出了信息融合的各种模型框架; 第三部分对信息融合的各种算法进行了分析比较; 最后对存在的问题和解决问题的设想给出了一些意见和建议.

2 信息融合模型

近 20 年来, 人们提出了多种信息融合模型. 其共同点或中心思想是在信息融合过程中进行多级处理. 现有系统模型大致可以分为两大类: a) 功能型模型, 主要根据节点顺序构建; b) 数据型模型, 主要根据数据提取加以构建. 在 20 世纪 80 年代, 比较典型的功能型模型主要有 UK 情报环、Boyd 控制回路 (OODA 环); 典型的数据型模型则有 JDL 模型. 20 世纪 90 年代又发展了瀑布模型和 Dasarathy 模型. 1999 年 Mark Bedworth 综合几种模型, 提出了一种新的混合模型. 下面对上述典型模型的结构图和优缺点进行分析与比较.

2.1 情报环^[66]

情报处理 (图 1) 包括信息处理和信息融合. 目前已有许多情报原则, 包括: 中心控制 (避免情报被复制); 实时性 (确保情报实时应用); 系统地开发 (保证系统输出被适当应用); 保证情报源和处理方式的客观性; 信息可达性; 情报需求改变时, 能够做出响应; 保护信息源不受破坏; 对处理过程和情报收集策略不断回顾, 随时加以修正. 这些也是该模型的优点, 而缺点是应用范围有限.

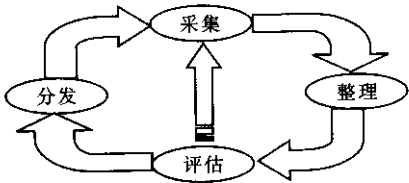


图 1 UK 情报环
Fig. 1 UK information loop

UK 情报环把信息处理作为一个环状结构来描述. 它包括 4 个阶段: a) 采集, 包括传感器和人工信息源等的初始情报数据; b) 整理, 关联并集合相关的情报报告, 在此阶段会进行一些数据合并和压缩处理, 并将得到的结果进行简单的打包, 以便在融合的下一阶段使用; c) 评估, 在该阶段融合并分析情报数据, 同时分析者还直接给情报采集分派任务; d) 分发, 在此阶段把融合情报发送给用户 (通常是军事指挥官), 以便决策行动, 包括下一步的采集工作.

2.2 JDL 模型^[67]

1984 年, 美国国防部成立了数据融合联合指挥实验室, 该实验室提出了他们的 JDL 模型 (图 2), 经过逐步改进和推广使用, 该模型已成为美国国防信息融合系统的一种实际标准.

JDL 模型把数据融合分为 3 级: 第 1 级为目标优化、定位和识别目标; 第 2 级处理为态势评估, 根据第 1 级处理提供的信息构建态势图; 第 3 级处理为威胁评估, 根据可能采取的行动来解释第 2 级处理结果, 并分析采取各种行动的优缺点. 过程优化实际是一个反复过程, 可以称为第 4 级, 它在整个融合过程中监控系统性能, 识别增加潜在的信息源, 以及传感器的最优部署. 其他的辅助支持系统包括数据管理系统 (存储和检索预处理数据) 和人-机界面等.

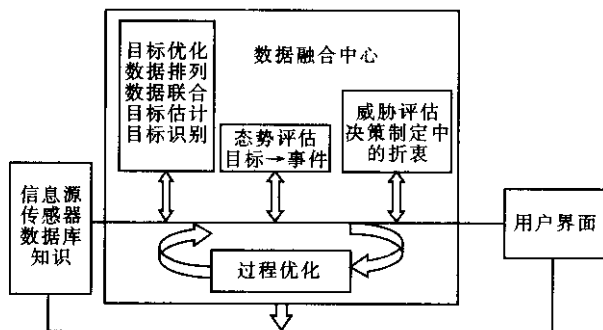


图 2 JDL 数据融合处理模型

Fig. 2 JDL data fusion processing model

2.3 Boyd 控制环^[68]

Boyd 控制环 (OODA 环, 即观测、定向、决策、执行环), 它首先应用于军事指挥处理, 现在已经大量应用于信息融合. 从图 3 可以看出, Boyd 控制回路使得问题的反馈迭代特性显得十分明显. 它包括 4 个处理阶段: a) 观测, 获取目标信息, 相当于 JDL 的第 1 级和情报环的采集阶段; b) 定向, 确定大方向, 认清态势, 相当于 JDL 的第 2 级和第 3 级, 以及情报环的采集和整理阶段; c) 决策, 制定反应计划, 相当于 JDL 的第 4 级过程优化和情报环的分发行为, 还有诸如后勤管理和计划编制等; d) 行动, 执行计划, 和上述模型都不相同的是, 只有该环节在实用中考虑了决策效能问题.

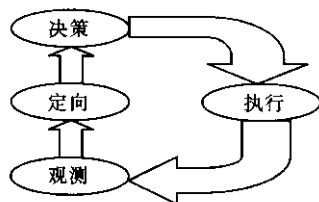


图 3 Boyd 回路

Fig. 3 Boyd loop

OODA 环的优点是它使各个阶段构成了一个闭环, 表明了数据融合的循环性. 同时由图 3 可以看出, 随着融合阶段不断递进, 传递到下一级融合阶段的数据量不断减少. 但是 OODA 模型的不足之处在于, 决策和执行阶段对 OODA 环的其它阶段的影响能力欠缺, 并且各个阶段也是顺序执行的.

2.4 扩展 OODA 模型^[69]

扩展 OODA 模型 (图 4) 是加拿大的洛克西德马丁公司开发的一种信息融合系统结构. 该种结构已经在加拿大哈利法克斯导弹护卫舰上使用. 该模型综合了上述各种模型的优点, 同时又给并发和可能相互影响的信息融合过程提供了一种机理. 用于决策的数据融合系统被分解为一组有意义的高层功能集合 (例如图 4 给出的由 N 个功能单元构成的集合), 这些功能按照构成 OODA 模型的观测、形势分析、决策和执行 4 个阶段进行检测评估. 每个功能还可以依照 OODA 的各个阶段进一步分解和评估. 图 4 中标出的节点表示各个功能都与那几个 OODA 阶段相关. 例如: 功能 A 和 N 在每个阶段都有分解和评估, 而功能 B 和 C 只与 OODA 的部分或单个阶段有关.

该模型具有较好的特性, 即环境只在观测阶段给各个功能提供信息输入, 而各个功能都依照执行阶段的功能行事. 此外, 观测、定向和决策阶段的功能仅直接按顺序影响其下各自一阶段的功能, 而执行阶段不仅影响环境, 而且直接影响 OODA 模型中其它各个阶段的功能.

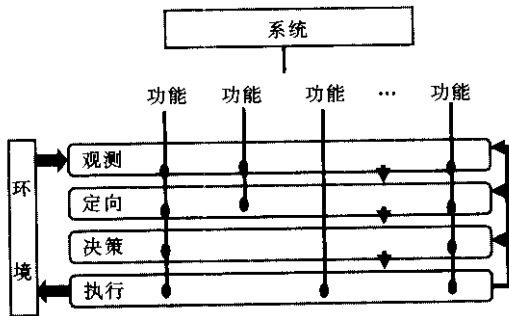


图 4 扩展的 OODA 模型
Fig. 4 Extended OODA model

2.5 瀑布模型^[56, 66]

瀑布模型(图 5)由 Bedworth 等于 1994 年提出,广泛应用于英国国防信息融合系统,并得到了英国政府科技远期规划数据融合工作组的认可.它重点强调了较低级别的处理功能.它的传感和信号处理、特征提取和模式处理环节相对应于 JDL 的第 1 级,而态势评估和决策制定分别对应于 JDL 的第 2,3,4 级.

可以看出,尽管瀑布模型的融合过程划分得最为详细,但是它并没有明确的反馈过程,这应该算是它的主要缺点.

2.6 Dasarathy 模型^[13, 64, 66]

Dasarathy 模型包括有 5 个融合级别,如表 5 所示.

表 5 Dasarathy 模型的 5 个融合级别
Table 5 Five fusion levels of dasarathy model

输入	输出	描述
数据	数据	数据级融合
数据	特征	特征选择和特征提取
特征	特征	特征级融合
特征	决策	模式识别和模式处理
决策	决策	决策级融合

综上可以看到,瀑布模型对底层功能作了明确区分,JDL 模型对中层功能划分清楚,而 Boyd 回路则详细解释了高层处理.情报环涵盖了所有处理级别,但是并没有详细描述.而 Dasarathy 模型是根据融合任务或功能加以构建,因此可以有效地描述各级融合行为.

2.7 混合模型^[66, 67]

混合模型(图 6)综合了情报环的循环特性和 Boyd 控制回路的反馈迭代特性,同时应用了瀑布模型中的定义,每个定义又都与 JDL 和 Dasarathy 模型的每个级别相联系.在混合模型中可以很清楚地看到反馈.该模型保留了 Boyd 控制回路结构,从而明确了信息融合处理中的循环特性,模型中 4 个主要处理任务的描述取得了较好的重现精度.另外,在模型中也较为容易地查找融合行为的发生位置.如图 7,形成了前述模型所没有的环中环结构.

图 7 中 DM 为决策制定,CP 为关系处理,C 为控制,RT 为资源分配,SP 为信号处理,S 为传感,PP 为模式处理,FE 为特征提取.

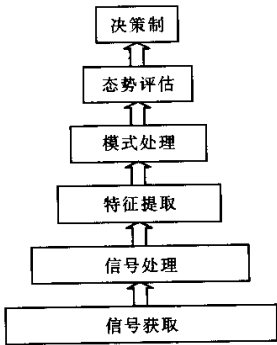


图 5 瀑布模型
Fig. 5 Waterfall model

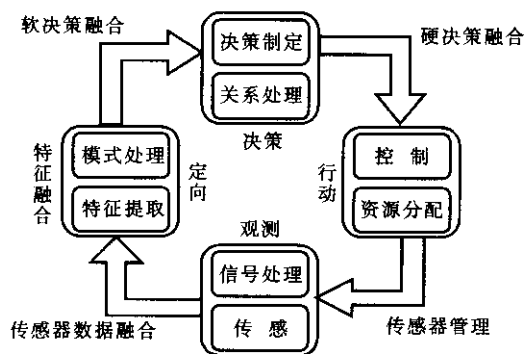


图 6 混合模型
Fig. 6 Omnibus model

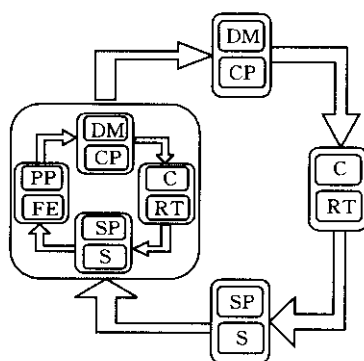


图 7 空中防御的环中环描述
Fig. 7 Loop-loop model in air defence

3 信息融合算法

信息融合中数学工具的功能是最基本和多重的, 它将所有的输入数据在一个公共空间内得以有效描述, 同时它对这些数据进行适当综合, 最后以适当的形式输出和表现这些数据. 在信息融合领域使用的主要数学工具或方法有概率论、推理网络、模糊理论和神经网络等其中使用较多的是概率论、模糊理论、推理网络. 当然, 除了这几种常用的方法之外, 还有其他很多解决途径.

3.1 概率论

在融合技术中最早应用的就是概率论^[39]. 在一个公共空间根据概率或似然函数对输入数据建模, 在一定的先验概率情况下, 根据贝叶斯规则合并这些概率以获得每个输出假设的概率, 这样可以处理不确定性问题^[14, 16, 18, 70, 71]. 贝叶斯方法的主要难点在于对概率分布的描述, 特别是当数据是由低档传感器给出时, 就显得更为困难. 另外, 在进行计算的时候, 常常简单地假定信息源是独立的, 这个假设在大多数情况下非常受限制. 卡尔曼滤波方法^[72, 73]则根据早先估计和最新观测, 递推地提供对观测特性的估计. 另外, 概率论和模糊集理论的综合应用给解决多源数据的融合问题提供了工具.

3.2 推理网络

推理网络的构建和应用有着很长的历史, 可以追溯到 1913 年由一位名叫 John H Wigmore 的美国学者所做的研究工作. 近来, 许多对于分析复杂推理网络的理论往往基于贝叶斯规则的推论, 并且都被归类于贝叶斯网络. 目前, 大多数贝叶斯网络的研究都包括了对于概率有效传播的算法拓展, 同时它在整个网络中也充当了新证据的角色. 同时贝叶斯网络在许多 AI 任务里都已作为对于不确定推理的标准化有效方法. 贝叶斯网络的优点是简洁、易于处理相关事件. 缺点是不能区分不知道和不确定事件, 并且要求处理的对象具有相关性. 在实际运用中一般不知道先验概率, 当假定的先验概率与实际相矛盾时, 推理结果很差, 特别是在处理多假设和多条件问题时显得相当复杂.

此外, 证据理论在推理网络分析中也扮演着重要角色. 证据推理^[74, 75]是一种数学工具, 它允许人们对不精确和不确定性问题进行建模, 并进行推理, 为组合不确定信息提供了另一条思路, 它是概率论的推广. 根据不同的决策模式, 可以对信息的特殊性和确定性进行折衷.

证据推理在不确定性的表示、量度和组合方面的优势受到大家的重视。在改进自身不足的同时又结合其他方法的长处,先后推广到概率范围和模糊集,不仅可以像贝叶斯推理那样结合先验信息,而且能够处理像语言一样的模糊概念证据。缺点是对结果往往给出过高估计,对未进行冲突处理的许多算法,输入数据的微小变化会对输出造成很大的影响;当处理的对象相容性较大时,其性能变坏。

3.3 模糊理论

模糊集理论是基于分类的局部理论,因此,从产生起就有许多模糊分类^[76]技术得以发展。隶属函数可以表达词语的意思,这在数字表达和符号表达之间建立了一个便利的交互接口^[77~80]。在信息融合的应用中主要是通过特征相连的规则对专家知识进行建模。另外,可以采用模糊理论来对数字化信息进行严格地、折衷或是宽松地建模^[81~85]。模糊理论的另一个方面是可以处理非精确描述问题,还能够自适应地归并信息^[86]。对估计过程的模糊拓展可以解决信息或决策冲突问题,应用于传感器融合、专家意见综合以及数据库融合,特别是在信息很少,又只是定性信息的情况下效果较好。

3.4 神经网络

神经网络是由大量互联的处理单元连接而成,它基于现代神经生物学和认知科学在信息处理领域应用的研究成果。神经网络应用于信息融合的历史并不长。它具有大规模并行模拟处理、连续时间动力学和网络全局作用等特点,有很强的自适应学习能力,从而可以替代复杂耗时的传统算法,使信号处理过程更接近人类思维活动。利用神经网络的高速并行运算能力,可以实时实现最优信号处理算法。利用神经网络分布式信息存储和并行处理的特点,可以避免模式识别方法中建模和特征提取的过程,从而消除由于模型不符和特征选择不当带来的影响,并实现实时识别,以提高识别系统的性能。

神经网络的层或节点可以用多种方式相互连接,对输入向量进行非线性变换^[25, 87~89],当输入输出关系未知时,可以得到较为理想的结果^[15, 90~92]。为了获取概率、可能性或证据分布数据,也可将神经网络技术与前述理论结合使用^[93]。比如在处理冲突信息问题中,与基于迭代优化的神经网络方法相比,聚类法计算复杂性较低,但性能也略逊一些。因此文献[94]将 Potts spin 理论和证据推理相结合,提出了快速神经网络聚类法,较好地兼顾了上述问题。

3.5 其它

在信息融合技术研究中还有许多不同的方法,代表性的有以下几种。

1) 小波法。文献[95]中基于小波分解对具有不同焦点的图像进行融合,该方法在保存测试图像的边缘信息方面,比其他的图像融合方法更为出色。

2) 马尔可夫方法。文献[96]在纵队识别问题中应用了隐马尔可夫建模(HMM)技术。任务是结合纵队组织结构的一般性先验信息,根据对单个目标的不完整观测资料,推断出目标的成分和纵队的组织结构。而双马尔可夫链(PMC)^[97]模型,是经典隐马尔可夫链(HMC)的推广。

3) 熵法。文献[98]应用 Kullback-Leibler 熵作为代价,对多传感器多目标跟踪进行资源分配。对于二元探测网络最优化问题,应用基于熵规范的方法^[99];对处理突发事件,或是关于那些先验概率不确定的事件,具有非常好的鲁棒性。

4) 类论^[100]。类论用于捕获目标之间的共性和关系。这个特征使得类论成为描述信息融合系统和信息融合本身过程极具潜力的方法。可以将类论应用于基于小波的多传感器目标

识别系统和基于特征的自动多传感器识别系统 (AMFRS) 等。

5) 随机集^[101]. 在多目标跟踪算法中的随机集理论大约是在 20 年前提出的. 但也只是近来, 人们才开始在理论上系统讨论多目标跟踪和随机集理论两者之间的结合。

6) 生物学灵感法^[102]. 随着空中和卫星传感器的种类、数量和覆盖面积不断增长, 遥感图像数传也在迅速发展. 及时开发这些数据需要对多维空间场所的信息进行有效呈现和搜索的技术. 文中介绍了由生物学得到灵感而导出的算法, 这种算法用于把多传感器图像融合成统一的风格呈现, 并且可以对多传感器信号进行快速搜索。

7) Choquet 积分法^[103]. Choquet 积分法可以融合数字信息. 它根据模糊测量的数据值, 具有处理多余信息源或补充的信息源情况的潜能. 由于利用了层次化的可分解模糊测量, 因此该方法的优点是降低了处理复杂性、简化了过程优化, 以及模块化等。

8) JSM 法^[104]. 统计推论和贝叶斯分析方法都具有定量的特性. 然而, 对于那些本质是定性的以及相关的数据, 例如组织结构、经济和政治关系、心理、社会以及历史条件, 定量的方法通常不适合处理它们. 在最近十年间, 莫斯科的 Victor Konstantinovich Finn 教授得到了一种直接的定性/相关数据分析方法, 即一种信息融合的新工具——Finn 称之为“JSM 方法”(为了纪念英国思想家 John Stuart Mill). 他通过运用一种“符号”手段, 即一种基于数学逻辑和形式分析概念的方法, 在许多应用中证明是有效的, 这些应用的范围从化学和药理学到社会学和劳动关系等。

9) HyM 法^[105]. HyM 是一种混合方法, 用于研究大范围和复杂的综合智能信息系统. 这类系统结合了传统信息系统研究方法和基于知识系统的研究方法. 在对传统的信息系统、基于知识的系统、复杂的联合运作和智能信息大系统等进行拓展的过程中, 都可以应用这种方法。

10) Chu 空间法^[106]. 提出了一种诊断信息融合的新方法——Chu 空间。

11) 非线性梯度滤波^[107]. 一种称为梯度滤波的技术可以解决一些图像中存在的目标边缘狭小问题。

12) 小波神经元滤波器^[108]. 它是一个基于线性 FIR (远红外) 滤波器和小波神经元模型的非线性滤波器, 在噪声消除以及对图像信号的预处理方面较为有效。

4 值得注意的几个问题及设想

信息融合技术已经成功地应用于多种领域, 但在理论研究和实际应用中仍有大量的问题有待解决. 信息融合系统是一个具有强烈不确定性的复杂大系统, 处理方法受到现有理论、技术、设备的限制. 因此, 在对信息融合系统的研究过程中存在着一些固有的问题, 为了解决这些问题, 本文试图给出系统实现和设计的几个基本原则. 但值得注意的是, 目前并不存在一套完善的原则. 同时在系统设计过程中, 前期和基础的系统分析 (包括体系分析、算法选择、需求分析等等) 是不可少的。

4.1 传感器组的设计

很多人都认为多个低档的传感器可以替代一个精确传感器. 但是实际上如果不经特殊的处理, 多个低劣质传感器(探测和识别率低于 50%)的融合结果往往比单个传感器还要差. 在信息融合应用中, 一般认为传感器性能是静态的、高斯的和零均值概率分布. 然而在现实世界中, 传感器性能是动态和非高斯的. 环境条件(比如地形的影响, 大气条件, 局部环境等等)能够使传感器性能大幅度变化. 随着传感器越来越先进, 环境条件却对它们的影响越来越复杂. 如果使用了不恰当的传感器, 或在其性能、误差统计等方面给出错误的先验信息, 就很难获得理想的融合效果.

因此在信息融合系统的设计中, 为了保证系统的精确度、实时性以及降低成本, 应该根据理论模型和测试数据范围适当选择合适的传感器组, 并且兼顾系统的操作简便性和可靠性. 同时为了精确描述传感器的性能, 还要考虑局部动态环境的影响及其对策, 小心地对传感器动态性能进行建模或校准. 该信息与传感器数据一起, 作为融合算法选择和使用的必要的输入. 另外, 应该仔细分析每组传感器和类型, 从而决定如何从传感器数据中提取尽可能多的信息. 还要进行适当的规范转换、滤波、特征提取、以及修正等步骤.

4.2 算法的选择

尽管在学术界一直存在着哪种算法最优的讨论, 但是在选择信息融合算法的时候, 要明白并不存在完美的算法, 应该根据可以获得的先验数据来分析和选择适当的鲁棒和精确的算法. 这就带来了融合算法对先验信息的依赖问题, 设计者可以考虑多算法的自适应混合途径来解决问题.

对于实际应用中存在的训练数据不足情况, 可以考虑混合模式识别技术. 另外, 如果把模式分类器与一个自动推理环节相结合, 根据具体任务或实际环境来解释得到的结果, 也有可能克服由于缺乏训练数据带来的问题.

对于算法实时性问题, 各种实际应用中的计算量和快速性要求是不一样的. 例如相对于地面系统, 机载系统具有实时性要求高的特点. 同时, 算法的鲁棒性与精度之间存在着矛盾, 实际上鲁棒的操作比最优的操作精度要差一些. 因此, 应该根据实际问题, 对算法的实时性、精确性和鲁棒性作合理地折衷选择, 这是算法选择的重要准则.

4.3 系统评估问题的讨论

实现融合系统的一个困难就是如何量化系统的效用. 为了发展支持实际应用的有效信息融合系统, 目前国外一些学者, 如 Waltz 和 Llinas 等提出建立性能和效能度量的指标体系, 但这对于完成整个系统的评估是不够的. 应该建立从系统设计—实施—使用效果的全过程评估, 要建立实用的评估体系, 包括指标体系和算法体系, 但是这些非常依赖于具体问题的要求和现代数学的发展.

国外一些学者提出用数据融合系统工程学科来解决系统的构件、评估和设计选择等问题. 可以通过绘制信息价值图^[109]或构建数据融合节点树来进行系统评估. 在评估过程中主要考虑以下因素: 已评估的影响; 实时性和其他的物理约束; 可用的资源性能^[110]. 在性能评估中用到的重要的量测数据, 对探测来说包括探测统计数据(探测概率以及虚警率)、关联品质(提取特征的精度)和反应时间(可由计算误差得到); 对跟踪来说包括轨迹统计数据(轨迹数目、漏掉的轨迹数目、伪轨迹数目、轨迹改变的数目、轨迹中断的数目)、轨迹品质(特征质量、轨迹正确率、轨迹精确度)和反应时间(包括跟踪起始时间和跟踪结束时间); 对

分类来说,正确分类数目与全部分类数目之比,以及错误分类的代价则是衡量全局性能的指标^[111]。

对于分层融合系统,评价其性能的方法包括量测融合与状态向量融合。其中量测融合尽管是最优的,然而其计算代价太大;而状态向量融合算法较为节省计算机资源,但是由于该方法根据公共先验估计或是公共过程噪声来进行关联,因此它并不是最优的。状态向量融合又分为加权协方差、信息矩阵和伪量测法^[112]。但是这些方法在对真实系统进行评估的时候却仍然存在着难题。因此,基于现代计算机技术和 VR 技术等现代仿真技术,建立实际系统规范真实的仿真系统,从而对整个融合过程进行实验分析比较研究。就目前来讲,这可能是唯一有效的系统评估途径。

4.4 面向复杂系统的信息融合

对于目前在军事上十分重要的 C³I 和 IW 等领域,以及民用上现代制造和金融证券等方面,仅仅依靠单一的融合体系或方法是远不能解决问题的。对于这样的复杂系统,在网络环境下,以信息处理为核心,适当选择融合理论与技术,同时具有友好的人机交互方式,这也许是解决问题较理想的选择。目前对于这些新问题,研究手段已扩展到信息栅格、知识发现和数据挖掘以及分布式信息融合技术等。

5 总结

信息融合是现代信息技术与多学科交叉、综合、延拓产生的新的系统科学研究方向,由于其在军事和民用领域展现出的广阔应用前景,受到国内外众多学者和有关部门的高度关注。本文对近几年信息融合国际年会和近百种国际学术期刊进行了统计分析,对信息融合在军事和民事领域的应用分布情况、采用的数学工具和研究方法、融合系统建模、融合算法、发展动向、存在的问题和解决这些问题的思路给出了系统的综述。

尽管信息融合技术已经成功运用于多种领域,但目前在理论上尚未形成统一的框架,而在实际系统设计上则缺乏有效的指导原则,系统全过程的评估方法研究更是成效甚微。需要指出的是,本文的范围基本上是近年来国外学者的研究概况。事实上国内这几年有不少学者在这一领域开展了卓有成效的工作^[5,8~12,38,53,57,58,70,113~139],限于篇幅未能给予涉及。

References

- 1 Varshney P K. Distributed Detection and Data Fusion. New York: Springer-Verlag, 1996
- 2 Waltz E, Linas J. Multisensor Data Fusion. Boston: Artech House, 1990
- 3 Hall D L. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion. Boston, London: Artech House, 1992
- 4 Collier M. Information Warfare Modeling I. San Antonio, TX: Southwest Research Inst. Publishing, 1996
- 5 He You. Wang Guo-Hong et al. Multisensors Information Fusion and Its Applications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 10 ~ 149 (in Chinese)
- 6 Hovanessian SA. Introduction to Sensor System. New York: Artech House, INC. 1988
- 7 Klein G A. Advances in Man-Machine Systems Research, U. 47-92. Greenwich: CT. JAI Press, Inc., 1987. 68 ~ 103
- 8 Li Hong-Zhi. Information Fusion Techniques. Beijing: National Defence Industry Publishing Corporation, 1996. 8 ~ 32 (in Chinese), 1996
- 9 Zhu Nan-Zhi, Zhu De-Cheng. Command Automatization Systems Engineering. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. 52 ~ 69 (in Chinese)
- 10 Liu Shu-Yang, Cheng Wang-Zi. C³I Systems Development Techniques. Beijing: National Defence Industry Publishing Cor-

- poration, 1997. 13 ~ 25 (in Chinese)
- 11 Liu Tong-Ming, Xia Zu-Xun, Xie Hong-Cheng. Data Fusion Techniques and Its Applications. Beijing: National Defence Industry Publishing Corporation, 1998. 143 ~ 256 (in Chinese)
- 12 Kang Yao-Hong. Data Fusion Theories and Its Applications. Xi'an: Xidian University Publishing Corporation, 1997. 1 ~ 53 (in Chinese)
- 13 Luo L C, Kay M G. Multisensor integration and fusion for intelligent machines and systems. US: Abbex Publishing Corporation, 1995. 321 ~ 456
- 14 Wald L. An European proposal for terms of reference in data fusion. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, **XXXII** (7) : 651 ~ 654
- 15 Bastiere A. Methods for multisensor classification of airborne targets integrating evidence theory. *Aerospace Science and Technology*, 1998, **2** (G) : 401 ~ 411
- 16 Kam M. Rorres C, Chang W, Zhu X. Performance and geometric interpretation for decision fusion with memory. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic - Part A: Systems and Humans*, 1999, **29** (1) : 52 ~ 62
- 17 Lampropoulos G A, Anastassopoulos V, Boulter J F. Constant false alarm rate detection of point targets using distributed sensors. *Optical Engineering*, 1998, **37** (2) : 401 ~ 416
- 18 Buede D M, Girardi P. A target identification comparison of Bayesian and Dempster-Shafer multisensor fusion. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic - Part A: Systems and Humans*, 1997, **27** (5) : 569 ~ 577
- 19 Antony R T. Database support to data fusion automation. *Proceeding of the IEEE*, 1997, **85** (1) : 39 ~ 53
- 20 Ben-yacoub S, Abdeljaoued Y, Mayoraz E. Fusion of face and speech data for person identity verification. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, **10** (5) : 1065 ~ 1074
- 21 Figue J, Grabisch M, Charbonnel M P. A method for still image interpretation relying on a multi-algorithms fusion scheme: Application to human face characterization. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, **103** (2) : 317 ~ 337
- 22 Mirhosseini A R, Hong Y, Kin M L, Tuan P. Human face image recognition: An evidence aggregation approach. *Computer Vision and Image Understanding*, 1998, **71** (2) : 213 ~ 230
- 23 Rago C, Willett P, Alford M. Predetection fusion: Resolution cell grid effects. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, **35** (3) : 778 ~ 789
- 24 Aziz A M, Tummala M, Cristi R. Fuzzy logic data correlation approach in multisensor-multitarget tracking systems. *Signal Processing*, 1999, **76** (2) : 195 ~ 209
- 25 Fayman J A, Pirjanian P, Christensen H, Rivlin E. Exploiting process integration and composition in the context of active vision. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic Part C: Applications and Reviews*, 1999, **29** (1) : 73 ~ 86
- 26 Sworder D D, Boyd J E, Clapp G A. Image fusion for tracking manoeuvring targets. *International Journal of Systems Science*, 1997, **28** (1) : 1 ~ 14
- 27 Tang X. Multiple competitive learning network fusion for object classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic Part B: Cybernetics*, 1998, **28** (4) : 532 ~ 543
- 28 Nageswara S V Rao, David B Reister, Jacob Barhen. Fusion method for physical systems based on physical laws. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 89 ~ 95
- 29 Serge Reboul, Damien Brige, Mohammed Benjelloun. Optimal segmentation by random process fusion. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 344 ~ 348
- 30 Jacqueline Le Moigne, James Smith. Image registration and fusion in remote sensing for NASA. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 375 ~ 382
- 31 Black B J. Modeling organization configuration and decision processes for information. Monterey, CA: Naval postgraduate school publishing corporation, 1997. 102 ~ 145
- 32 Schechtman G M. Manipulating the OODA loop: The overlooked role of information resource management in information warfare. Air Force Inst. of Tech., Wright-Patterson AFB, OH. 1996, 28 ~ 39
- 33 Elam D E. Attacking the infrastructure: Exploring potential uses of offensive information warfare. Monterey, CA: Naval postgraduate school publishing corporation, 1996. 3 ~ 9
- 34 Dishong D J. Studying the Effect of Information Warfare on C² Decision Making. Monterey, CA: Naval postgraduate school publishing corporation, 1994. 44 ~ 48
- 35 Wood R J. Information Engineering the Foundation of Information Warfare. Air Force Coll., Maxwell AFB, AL. 1995
- 36 Greenway P. The SKIDS data fusion project. Sensor Fusion IV, Proceedings of SPIE, Orlando, Florida, 1991. 1611
- 37 Waltz E. The principles and practice of image and spatial data fusion. In: Proceedings of 8th Natl. Data Fusion Confer-

- ence, Dallas, TX, 1995
- 38 Hall D L, Ogrodnik. Passive exploitation of the electromagnetic environment for improved target tracking, situation assessment, and threat refinement. In: Proceedings of 9th Natl. Symp. On Sensor Fusion, Monterey, CA: Naval postgraduate school publishing corporation, 1996
- 39 Valet L, Mauria G, Bolon Ph. A statistical overview of recent literature in information fusion. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 95 ~ 102
- 40 Sun Zhong-Kang, Zhou Yi-Yu, He Li-Xian. The Active and Passive Orientation Techniques of Single-Multi base. Beijing: National Defence Industry Publishing Corporation, 1996. 82 ~ 135 (in Chinese)
- 41 Farina A, Studer T E. Radar Data Processing. Vol. I. II. Research Studies Press Ltd, 1985
- 42 Harris C J. Application of Artificial Intelligence to Command and Control Systems. London: Peter Pergrinus LTD, 1988. 115 ~ 135
- 43 Sun Long-Xiang, Zhang Zu-Ji translate. Radar Data Processing, Vol. II. Beijing: National Defence Industry Publishing Corporation, 1992. 35 ~ 86 (in Chinese)
- 44 Waltz E L. Data Fusion for C³I Systems. International C³I Handbook. Palo Alto, California: EW Communications Inc, 1986. 217 ~ 226
- 45 Bar-Shalom Y Ed. Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced Application. Vol. II, Decham, MA: Artech House INC, 1992
- 46 Blackman S S. Multiple-target Tracking with Radar Application. Norwood, MA: Artech House, 1986. 35 ~ 98
- 47 Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion. In: Proceeding of the IEEE, 1997, **85**(1): 6 ~ 23
- 48 Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and Data Association. Orlando, FL: Academic Press, 1988. 111 ~ 135
- 49 Bar-Shalom Y Ed. Multitarget-multisensor tracking: Advanced application. Vol. I, Decham, MA: Artech House, 1990. 5 ~ 36
- 50 Bar-Shalom Y, Li X R. Estimation and Tracking: Principles, Techniques and Software. Boston. MA: Artech House, 1993. 23 ~ 46
- 51 Bar-Shalom Y, Li X R. Multitarget-multisensor Tracking: Principles and Techniques. Storrs. CT: Yba Publishing, 1995. 223 ~ 258
- 52 Brookner E. Tracking and Kalman Filtering Made Easy. US: John Wiley & Sons. Inc, 1998. 308 ~ 389
- 53 Sun Zhong-Kang. Radar Numerical and Data Processing. Beijing: National Defence Industry Publishing Corporation, 1983. 67 ~ 119 (in Chinese)
- 54 Zhou Hong-Ren, Jing Zhong-Liang, Wang Pei-De. Maneuverable Target Tracking. Beijing: National Defence Industry Publishing Corporation, 1991. 67 ~ 103 (in Chinese)
- 55 Yang Jing-Yu. Battlefield Data Fusion Techniques. Beijing: Engineering Industry Publishing Corporation, 1994. 55 ~ 68 (in Chinese)
- 56 Dong Zhi-Rong. The Theory Bases of Naval Vessels Command and Control Systems. Beijing: National Defence Industry Publishing Corporation, 1996. 89 ~ 125 (in Chinese)
- 57 Yu Kang-Lun, Yu Chang-Hai. Research of an Evaluation Model of Target Threat Sort, the Evaluation of Combat Effectiveness. Beijing: Military Science Publishing Corporation, 1996. 69 ~ 93 (in Chinese)
- 58 Dai Zi-Li, Tan Qing-Hai. Modern Naval Carrier Fight System (II). Beijing: Engineering Industry Publishing Corporation, 1990. 84 ~ 96 (in Chinese)
- 59 Gao De-Ping, Huang Xue-Mei. Multisensors and data fusion (I). *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1): 1 ~ 4 (in Chinese)
- 60 Gao De-Ping, Huang Xue-Mei. Multisensors and data fusion (II). *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(2): 11 ~ 16 (in Chinese)
- 61 Varshney P K. Multisensor data fusion. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1997, **9**(6): 245 ~ 253
- 62 Belur V Dasarthy. Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative application. *Proceedings of the IEEE*, 1997, **85**(1): 24 ~ 38
- 63 Steinberg Alan N. Data fusion system engineering. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000
- 64 Paradis Stephence, Roy Jean. An architecture and a facility for the integration of all levels of data fusion. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 278 ~ 284
- 65 Christopher B. The data fusion tree paradigm and its dual. In: Proceedings of the 7th National Symposium in Sensor Fusion.

US: 1994. 132 ~ 144

- 66 Mark Bedworth, Jane O' Brien Jemity. The omnibus model: A new model of data fusion. In: Proceedings of 1999 International Conference on Information Fusion. California, USA: Sunnyvale, 1999. 337 ~ 345
- 67 Hannah P, Starr A. Decisions in condition monitoring—An exemplar for data fusion architecture. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 291 ~ 298
- 68 Carl B Frankel, Mark D Bedworth. Control, estimation and abstraction in fusion architectures: Lessons from human information processing. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 130 ~ 137
- 69 Elisa Shahbazian Dale E, Blodgett Paul Labbé. The extended OODA model for data fusion systems. In: Proceedings of 2001 International Conference on Information Fusion. Canada: 2001. 106 ~ 112
- 70 Jeon B, Landgrebe D A. Decision fusion approach for multitemporal classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Special Issue on Data Fusion)*, 1999, **37**(3): 1227 ~ 1233
- 71 Pan H, D Mc Michael, Lendjel M. Inference algorithms in Bayesian networks and the probanet system. *Digital Signal Processing*, 1998, **8**(4): 231 ~ 243
- 72 Kam M, Zhu X, Kalata P. Sensor fusion for mobile robot navigation. *Proceeding of the IEEE*, 1997, **85**(1): 288 ~ 295
- 73 Saha R K, Chang K C. An efficient algorithm for multisensor track fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, **34**(1): 200 ~ 210
- 74 Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton N J: Princeton University Press, 1976. 133 ~ 185
- 75 Smets P. The transferable belief model. *Artificial Intelligence*, 1994, **66**(2): 197 ~ 234
- 76 Keler J H, Qiu H. Fuzzy sets methods in pattern recognition. *Lecture Notes in Computer Science*, 1988, **301**: 173 ~ 182
- 77 Dong-Hoon-lee, Daihee-Park. An efficient algorithm for fuzzy weighted average. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, **87**(1): 39 ~ 45
- 78 Pham T D, Yan H. A kriging fuzzy integral. *Information Sciences*, 1997, **98**(1): 157 ~ 173
- 79 Yager R R. New modes of owa information fusion. *International Journal of Intelligent Systems*, 1998, **13**(7): 661 ~ 681
- 80 Cujet C, Vincent N. Data fusion modeling human behaviour. *International Journal of Intelligent Systems*, 1998, **13**(1): 27 ~ 40
- 81 Solaiman B, Pierce L E, Ulaby F T. Multisensor data fusion using fuzzy concepts: Application to land-cover classification using ers-1/jers-1 sar composites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Special Issue on Data Fusion)*, 1999, **37**(3): 1336 ~ 1325
- 82 Chanussot J, Mauris G, Lambert P. Fuzzy fusion techniques for linear features detection in multitemporal sar images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Special Issue on Data Fusion)*, 1999, **37**(3): 1292 ~ 1305
- 83 Nauck D, Kruse R. Obtaining interpretable fuzzy classification rules from medical data. *Artificial Intelligent in Medicine*, 1999, **16**(2): 149 ~ 169
- 84 Russo F. Recent advances in fuzzy techniques for image enhancement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, **47**(6): 1428 ~ 1434
- 85 Delmotte F, Borne P. Modeling of reliability with possibility theory. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic-Part A: Systmes and Humans*, 1998, **28**(1): 78 ~ 88
- 86 Dubois D, Prade H. Qualitative possibility theory and its applications to constraint satisfaction and decision under uncertainty. *International Journal of Intelligent Systems*, 1999, **14**(1): 45 ~ 61
- 87 Ng K C, Trivedi M M. A neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation and multirobot convoying. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic Part B: Cybernetics*, 1998, **28**(6): 829 ~ 840
- 88 Nauck D, Kruse R. A neuro-fuzzy method to learn fuzzy classification rules from data. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, **89**(3): 277 ~ 288
- 89 Rowley H A, Baluja S, Kanade T. Neural network-based face detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence*, 1998, **20**(1): 23 ~ 38
- 90 Niu Y M, Wong Y S, Hong . An intelligent sensor system approach for reliable tool flank wear recognition. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, **14**(2): 77 ~ 84
- 91 Tupin F, Bloch I, Maitre H. A first step toward automatic interpretation of sar images using evidential fusion of several structure detectors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3): 1327 ~ 1343
- 92 Gader P, Mohamed M, Chiang J H. Handwritten word recognition with character neutral networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1997, **27**(1): 158 ~ 165
- 93 Madani K, Chehira A, BBouchefra K, maurin T, Reynaud R. Hybrid neural-based decision level fusion architecture; ap-

- plication to road traffic collision avoidance. *Optical Engineering*, 1998, **37**(2): 370 ~ 377
- 94 Johan Schubert. Managing inconsistent intelligence. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 389 ~ 395
- 95 Xuan Yang, Wan-Hai Yang, Ji-Hong Pei. Different focus points images fusion based on wavelet decomposition. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 214 ~ 219
- 96 Johan Björnfot, Per Svensson. Modeling the column recognition problem in tactical information fusion. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 179 ~ 185
- 97 Wojciech Pieczynski. Pairwise Markov chains and bayesian unsupervised fusion. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 263 ~ 270
- 98 Pierre Dodin, Julien Verliac, Vincent Nimier. Analysis of the multisensor multitarget tracking resource allocation problem. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 823 ~ 828
- 99 Denis Pomorski. Entropy based optimization for binary detection networks. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 1194 ~ 1201
- 100 Scott A DeLoach, Mieczyslaw M Kokar. Category theory approach to fusion of wavelet-based features. In: Proceedings of 1999 International Conference on Information Fusion. California, USA: Sunnyvale, 1999. 610 ~ 617
- 101 Shozo Mori. Random sets in data fusion: Formalism to new algorithms. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 536 ~ 543
- 102 William Ross, Allen Waxman, William Streilein, Verly J, Liu Fang, Michael Braun, Paul Harmon, Rak S. Multi-Sensor 3D Image Fusion and Interactive Search. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 501 ~ 508
- 103 Vicenç Torra. On a family of fuzzy measures for data fusion with reduced complexity. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 529 ~ 535
- 104 Robert W Burch. Semeiotic data fusion. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 865 ~ 870
- 105 Simon Kendal, Chen X, Masters A. HyM: A methodology for the development of integrated hybrid intelligent information systems. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 871 ~ 876
- 106 Hung T Nguyen, Vladik Krainovich. Chu spaces—A new approach to diagnostic information fusion. In: Proceedings of 1999 International Conference on Information Fusion. California, USA: Sunnyvale, 1999. 904 ~ 909
- 107 Francisco Torrens, Facultat de Química. Resolution enhancement with nonlinear gradient filtering. In: Proceedings of 1999 International Conference on Information Fusion. California, USA: Sunnyvale, 1999. 29 ~ 38
- 108 Noriaki Suetake, Naoki Yamauchi, Takeshi Yamakawa. Wavelet neuron filter with the local statistics oriented to the pre-processor for the image signals. In: Proceedings of 1999 International Conference on Information Fusion. California, USA: Sunnyvale, 1999. 939 ~ 946
- 109 Timothy J Peterson, Malur K Sundareshan. Information value mapping for fusion architectures. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 144 ~ 151
- 110 Shahbazian E, Hallsworth R, Turgeon D. Target tracking and identification issues when using real data. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 284 ~ 289
- 111 Theil A, Kester L J H M, Bossé É. On measures of performance to assess sensor fusion effectiveness. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 1117 ~ 1121
- 112 Chang K C. Evaluating hierarchical track fusion with information matrix filter. In: Proceedings of 2000 International Conference on Information Fusion. France: Paris, 2000. 46 ~ 52
- 113 Ding Zhen, Pan Quan, Zhang Hong-Cai, Dai Guan-Zhong. Adaptive fusion algorithm for multiple passive sensor tracking. *Journal of Northwestern Polytechnical University Transaction*, 1997, **15**(4): 570 ~ 573 (in Chinese)
- 114 Pan Quan, Liu Gang, Dai Guan-Zhong, Zhang Hong-Cai. Combined interacting multiple models probabilistic data association algorithm. *Journal of Aeronautics*, 1999, **20**(3): 234 ~ 239 (in Chinese)
- 115 Kang Wei, Pan Quan, Zhang Hong-Cai, Dai Guan-Zhong. Data fusion algorithm based on state and attribute parameter. *Chinese Journal of Aeronautics*, 1999, **12**(2): 100 ~ 105
- 116 Kang Wei, Pan Quan, Zhang Hong-Cai, Dai Guan-Zhong. A new data association fusion algorithm with attribute parameters incorporated. *Journal of Northwestern Polytechnical University Transaction*, 1999, **17**(4): 539 ~ 543 (in Chinese)
- 117 Dai Guan-Zhong, Pan Quan, Zhang Shan-Ying, Zhang Hong-Cai. The developments and problems in evidence reasoning. *Control Theory and Applications*, 1999, **16**(4): 465 ~ 469 (in Chinese)

- 118 Wen Cheng-Lin, Liu Xian-Xing, Pan Quan, Zhang Hong-Cai. The methods of multiresolutional estimation based on multiple sensors in nonlinear system. *Journal of Engineering Mathematics*, 1999, **16** (2) :52 ~ 56 (in Chinese)
- 119 Liu Xian-Xing, Pan Quan, Zhang Yu-Fa, Zhang Hong-Cai. Study on algorithm of multisensor management based on efficiency function. *Control and Decision*, 1999, **14** (supplement) :581 ~ 584 (in Chinese)
- 120 Liu Xian-Xin, Pan Quan, Zhang Hong-Cai, Dai Guan-Zhong. Study on algorithm of sensor management based on functions of efficient and waste. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2000, **13** (1) :39 ~ 44
- 121 Zhang Shan-Ying, Pan Quan, Zhang Hong-Cai. A new kind of combination rule of evidence theory. *Control and Decision*, 2000, **15** (5) :540 ~ 544 (in Chinese)
- 122 Liu Xian-Xing, Cheng Yong-Mei, Pan Quan, Zhang Hong-Cai. Construction and analysis of closed loop control scheme for multisensor data fusion systems. *Information and Control*, 2000, **29** (2) :145 ~ 151 (in Chinese)
- 123 Wen Cheng-Lin, Pan Quan, Zhang Hong-Cai, Dai Guan-Zhong. Multiscale distributed fusion estimation in multi-sensor single model dynamic systems. *Control Theory and Applications*, 2000, **17** (6) : 481 ~ 486
- 124 Wen Cheng-Lin, Pan Quan, Zhang Hong-Cai, Dai Guan-Zhong. Multiscale distributed fusion estimation algorithm in single-sensor multi models dynamic system. *Journal of Tsinghua University* (Science and Technology), 2000, **40** (S2) :51 ~ 55 (in Chinese)
- 125 Wen Cheng-Lin, Pan Quan, Zhang Hong-Cai, Dai Guan-Zhong. Multiscale distributed fusion estimation algorithm in multi-sensor multi models dynamic system. *Acta Automatica Sinica*, 2000, (suppl. B) :66 ~ 70 (in Chinese)
- 126 Pan Quan, Zhang Shan-Ying, Cheng Yong-Mei, Zhang Hong-Cai. Some research on robustness of evidence theory. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27** (6) :798 ~ 805 (in Chinese)
- 127 Pan Quan, Liang Yan, Liu Gang, Dai Guan-Zhong, Zhang Hong-Cai. Performance analysis of interacting multiple model algorithm. In: Proceedings of the 14th World Congress of International Federation of Automatic Control. Beijing, 1999, **H** : 163 ~ 168
- 128 Pan Quan, Jiao L-Y, Zhang Hong-Cai. Fault detection and identification of dynamic systems using multiple model adaptive estimation. In: Proceedings of IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. United Kingdom: Hull, 1997. 1153 ~ 1158
- 129 Pan Quan, Ding Zhen, Zhang H. General probability data association algorithm. In: Proceedings of the 3rd China/Russia International Conference on Automatic Control. Beijing: 1995
- 130 Ding Zhen, Pan Quan, Zhang H. Adaptive two station passive tracking algorithm. In: Proceedings of the 3rd China/Russia International Conference on Automatic Control. Beijing: 1995
- 131 Yang Xiu-Zhen. Research on the key techniques of C³I system [Ph. D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999 (in Chinese)
- 132 Kang Wei. Research on multisensor multitarget tracking data fusion techniques [Ph. D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999 (in Chinese)
- 133 Wen Cheng-Lin. Multiscale estimation theory and application [Ph. D. Thesis]. Northwestern Polytechnical University, 1999 (in Chinese)
- 134 Du Ya-Juan. Research on auto target recognition based on invariant theory [Ph. D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000 (in Chinese)
- 135 Zhao Wei. Research on the modeling, estimation and fusion methods of multiscale system [Ph. D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000 (in Chinese)
- 136 Liu Xian-Xing. Research on sensor management methods [Ph. D. Thesis]. Northwestern Polytechnical University, 2000 (in Chinese)
- 137 Liang Yan. Research on adaptive multiple model estimation theory and application of hybrid system [Ph. D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001 (in Chinese)
- 138 Zhang Lei. Research on optimal estimation theory and algorithm of a generic dynamic multiscale system [Ph. D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001 (in Chinese)
- 139 Cheng Yong-Mei. Research on adaptive coordination tracking algorithm of active/passive sensor [Ph. D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001 (in Chinese)

控制,混合系统和动态多尺度系统的建模与估计,智能信息处理,多目标跟踪,小波理论及其在图像处理中的应用等.

(**PAN Quan** Ph. D. . He is now a professor of automatic department of Northwestern Polytechnical University, adviser of doctor, the member of international information fusion institute (ISIF) , and the assistant director of automatization institute of Shaanxi. His research interests include information fusion theories and applications, modeling and simulation of C³I systems, modeling of dynamic systems, estimation and control, modeling and estimation of hybrid sytems and dynamic multiscale systems, intelligent information process, multitarget tracking, wavelet theories and applications in image process etc. .)

于 昕 西北工业大学自动控制系博士研究生. 目前研究方向为多传感器信息融合、智能信息处理.

(**YU Xin** Ph. D. candidate of automatic department of Northwestern Polytechnical University. Her research interests are multisensors information fusion, intelligent information process.)



The 5th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'04)
June, 2004, Hangzhou, P. R. China
Call for Papers

The World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) is now a bi-annual event and a major control event held in China. The 5th WCICA (WCICA'04) will be held in Hangzhou of China in June, 2004. The conference will provide worldwide researchers, engineers and professionals excellent opportunities to get together and exchange their findings and views. The conference will focus on both theory and applications. In addition to the technical sessions, there will be plenary and invited sessions. All the submissions will be reviewed and accepted ones will be included in the conference proceedings. Topics include, but are not limited to:

P1 Theory and Method

P 1-1 Control Theory

- P1-1-1 System and Control Theory
- P1-1-2 Nonlinear Systems
- P1-1-3 Large-Scale Systems
- P1-1-4 Hybrid Systems and DEDS
- P1-1-5 Distributed Control Systems
- P1-1-6 Modeling, Identification, and Estimation

P 1-2 Control Methods

- P1-2-1 Advanced Control (Adaptive Control, Variable Control, Robust Control, H_{∞} Control)

- P1-2-2 Optimal Control and Optimaization
- P1-2-3 Nonlinear Control
- P1-2-4 Fault Diagnosis

P 1-3 Intelligent Control

- P1-3-1 Artificial Intelligence and Expert Systems
- P1-3-2 Neural Networks
- P1-3-3 Fuzzy Algorithms, Genetic Algorithms and Evolutionary Computing
- P1-3-4 Intelligent Control, Fuzzy Control, and Larning Control

(Continued on Page 627)