

文章编号: 1002-0411(2002)03-250-06

数据融合研究的回顾与展望

徐毅¹ 金德琨¹ 敬忠良²

(1. 西北工业大学自动控制系 西安 710072; 2. 上海交通大学航空航天信息与控制研究所 上海 200030)

摘要: 本文结合近年来国内外的研究成果, 回顾数据融合研究的发展历程, 首先介绍了数据融合的通用处理模型和面向系统体系的处理模型, 接着探讨了体系结构、位置融合、属性融合、态势威胁评估和应用等方面的问题, 最后对数据融合的未来研究方向进行了展望.*

关键词: 数据融合; 位置融合; 属性融合; 态势威胁评估

中图分类号: TP13

文献标识码: B

STATUS AND DEVELOPMENT OF DATA FUSION

XU Yi¹ JIN De-kun¹ JING Zhong-liang²

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

2. Institute of Aerospace Information and Control, School of Electronics and Information Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030)

Abstract: This paper overviews the development of data fusion. First, both the general process model and the system-architecture-oriented process model of data fusion are introduced. Second, several important topics are discussed, such as architecture, positional fusion, identity fusion, assessment of situation and threat and applications. Finally, the challenges and the further research tendencies are also discussed.

Keywords: data fusion, positional fusion, identity fusion, assessment of situation and threat

1 引言(Introduction)

在未来的陆海空天立体化战争中, 电磁环境十分恶劣, 诱饵干扰异常复杂, 目标数量日益增多, 机动强度越来越高, 隐身和超低空突防技术被广泛采用, 仅仅依靠单传感器所提供的信息无法满足现代战术需要, 必须利用多传感器提供的观测数据, 实时地进行目标检测和综合处理, 以获取位置估计、目标属性、行为意图、态势评估、威胁分析、火力控制、精确制导、电子对抗、作战模拟和辅助决策等作战信息, 以提高作战效能和己方生存力。

随着现代战争复杂环境下传感器数量和种类的不断增多, 信息组合形式的多样性和信息量的急剧倍增, 军事指挥员面临着多源信息组合爆炸的难题, 越来越迫切地需要一种新的技术途径对巨量信息进行解释、分析和评估。正是在这样的背景下, 数据融合理论逐渐引起了世界范围内的广泛关注, 世界各主要军事大国竞相投入大量的人力、物力和财力对数据融合理论及其应用进行研究, 从而使其成为当前国际上十分活跃的研究领域之一。

70 年代末 80 年代初, 美军的军用 C³I 系统数据融合^[7,8]和 BETA 系统^[9]的有关内容见于公开文献中, 这表明数据融合作为一门独立的学科开始在军事应用中受到青睐。美国国防部早在 1984 年就成立了数据融合专家小组(DFS), 指导、组织和协调数据融合技术的研究; 并在 1988 年将数据融合列入 90 年代重点研究发展的二十项关键技术之一。数据融合是一个多级别、多层次的处理过程, 涉及到对多源数据和信息进行探测、互联、相关、估计和综合以得到提炼的位置估计和属性估计, 以及完整和及时的态势评估和威胁评估^[1]。数据融合是一门跨学科的综合信息处理理论, 涉及到系统论、信息论、控制论、人工智能和计算机通信等众多领域和学科。数据融合理论与经典信号与信息处理理论存在着本质的区别, 不同之处在于数据融合所处理的多传感器信息具有更为复杂的形式, 而且可以在数据层、属性层和决策层等不同信息层次上体现^[6]。

与单传感器数据处理系统相比, 数据融合系统

* 收稿日期: 2001-06-12

具有以下一些突出的优点^[11-61]:

(1) 增强了生存能力——采用分布式结构, 整个系统不易受到敌方干扰或自然灾害的完全破坏;

(2) 拓展了空间覆盖范围——通过多传感器作用区域的交叠覆盖, 可扩展空间的覆盖范围;

(3) 拓展了时间覆盖范围——可以在更多的时间采样点上采集目标的探测数据;

(4) 提高了检测性能——利用多传感器的协同作用, 可提高系统的检测概率;

(5) 提高了空间分辨率——多传感器孔径可以获得比单传感器更高的空间分辨率;

(6) 信息精确度与可信度高——多传感器的联合信息降低了目标位置估计和属性估计的不确定性。

和单传感器系统相比, 数据融合系统也存在着成本增高、可靠性降低、复杂性增加和功耗增大等不利因素, 在具体应用时必须权衡利弊, 加以综合考虑。

本文结合近年来国内外的研究成果, 回顾数据融合研究的发展历程, 首先介绍了数据融合的通用处理模型和面向系统体系的处理模型, 接着探讨了体系结构、位置融合、属性融合、态势威胁评估和应用等方面的问题, 最后指出了该领域面临的挑战, 并对数据融合的未来研究方向进行了展望。

2 数据融合模型(Model of data fusion)

从不同的观点出发, 存在着两个著名的数据融合处理模型^[10]: 通用处理模型和面向系统体系的处理模型。通用处理模型着眼点在于信息输入输出的前后级层次关系, 而面向系统体系的处理模型更注重于系统应用的体系结构。

在通用处理模型中, 将融合处理分为三级: 第一级是位置和属性融合。利用各种传感器和数据链路传送来的信息, 进行数据配准、数据关联、目标跟踪、特征提取和目标分类等处理, 输出的是关于目标的位置估计和属性估计; 第二级是敌我双方态势评估, 包括态势提取和态势评估两部分内容。态势提取是利用第一级的处理结果, 构造态势表达式, 以说明敌方兵力分布的现状。态势评估是基于前后关系的分析, 说明敌我兵力分布的变化, 并能对敌方的下一步行动作出预测; 第三级是敌方兵力威胁评估, 以敌我双方兵力的能力为基础, 对战争的风险和致命程度进行估计。第二级和第三级之间的区别在于: 第二级仅给出关于敌方行为模式的说明, 并预测敌方兵力

的意图, 而第三级量化了敌方的威胁能力, 预测未来战争的发展和变化。

通用处理模型强调以下四个方面: (1) 融合处理过程中的各个步骤的信息输入输出; (2) 推理层次必须从一级到三级, 通过这些阶梯式的层次, 融合输出将从较特殊的个体情况推广到较一般的全局情况; (3) 处理方法的明显变化, 第一级融合主要采用数字方法, 如线性非线性估计、模式识别、统计概率等; 第二级和第三级融合主要采用符号推理的方法, 如人工智能等; (4) 有统一的数据库系统提供支持。

面向系统体系的处理模型和通用处理模型相比, 融合处理是以总线方式为基础构筑的, 各处理节点内部和各处理节点之间的信息流动完全通过总线进行。融合处理也分为三级: 第一级是同类信息源融合和异类信息源融合, 第二级是态势提取和态势评估; 第三级是威胁评估。这三级之间是并列的, 而非通用处理模型中所体现出来的串联关系。

面向系统体系的处理模型强调以下四个方面: (1) 体现出分布式处理的特点; (2) 在第一级处理中, 对融合处理的分类是从传感器的信息源的性质来划分的; (3) 最终的输出结果是动态组合态势表达(DISR), 是对前述并列的三级信息处理结果的汇总; (4) 没有统一的数据库, 各融合节点按照实际需要配备各自所需的数据库系统。

统一的研究术语和模型框架是非常必要的, 不仅能够保证研究者之间有效的交流和沟通, 而且还能保证各系统之间的互操作性和功能应用模块的标准性、重用性和互换性。上述的两个模型已成为世界各国学者研究数据融合的基本出发点。

3 数据融合研究的几个重要内容(Several important topics of data fusion)

由于数据融合研究主要基于军事应用背景, 所以很长时间以来其技术一直处于高度保密状态。随着研究的深入和应用领域的扩大, 有关这方面的研究内容和成果才渐渐披露于各种学术会议和公开文献中。三军信息融合会议、SPIE 传感器年会, IEEE Trans. AES 和 AC 等会刊成为主要的学术交流园地。

3.1 体系结构

构建一个数据融合系统首先必须考虑数据融合体系结构的设计, 这时候设计者不可避免地会面临以下三个重要的问题:

(1) 如何组合传感器, 保证数据融合系统的输入

输出满足用户的使用要求;

(2) 如何合理选择数据处理结构, 保证数据融合的有效性, 最大限度地发挥数据融合的优势;

(3) 大量的输入数据有助于提高融合精度, 同时也会导致融合计算量呈级数级增加, 如何控制计算量, 降低处理负荷.

被广泛采用的体系结构大致分为三类: 中心式、分布式和混合式^[1-4, 11-17]. 中心式是把所有的传感器原始数据或经过预处理的数据都送入中心处理器进行融合处理, 其优点是处理精度高, 算法修改容易, 缺点是对硬件资源要求(如存储空间、计算速度和通信带宽等)高, 可靠性低. 分布式是指各局部节点先利用自身的传感器测量信息对目标进行位置估计和属性估计, 然后通过数据链路, 将各局部估计送入总站, 由总站形成对目标的最终联合估计.

其优点是降低了对中心计算总站的计算速度和存储空间的要求, 对通信带宽要求低, 可靠性大大提高, 缺点是处理精度较中心式低. 而混合式融合处理正是根据特定的实际需要, 在速度、带宽、跟踪精度和可靠性等相互影响的各种制约因素之间取得平衡.

采取何种体系结构完全是为了满足各种不同的实际需求, 在设计数据融合体系结构时, 还必须考虑诸如通信、信息处理、数据库管理、人机接口和传感器管理等许多支撑技术. 文[11]提出了用专家系统监控数据融合体系结构的性能的概念; 文[13]建议了评估体系结构的标准, 如跟踪连续性和跟踪精度、生存力、传感器降级数据的修复性、计算时间和计算复杂性和数据传输负荷等; 文[15]提出了基于知识的方法的 ATR 融合体系结构, 文[16]就一具体应用详细阐述了体系结构中有关模块的功能, 文[17]讨论并分析了几种典型的数据融合体系结构, 进行了对比.

为了保证融合输出的有效性和精度, 应尽可能地选取原始数据进行融合, 不可避免地会造成计算复杂程度的增加和对通信带宽要求的提高. 因此, 在具体应用中, 比较可行的方法是对原始数据采取特征提取和预处理的方法适当地减少融合输入的数据量, 以降低计算负荷, 以损失精度为代价来换取实时性的要求.

3.2 位置融合

多传感器观测目标, 提供诸如俯仰角、方位角、图象坐标、距离和距离变化率等测量信息, 融合系统首先对测量数据进行时间外推、坐标变换、和数据配

准补偿等量测预处理, 接着进行数据关联和目标跟踪, 利用最优估计理论, 以获得目标的位置信息. 位置融合是在单传感器单目标跟踪和单传感器多目标跟踪的研究基础上发展起来的, 其实质是多传感器多目标跟踪, 必须要解决数据关联和估计算法两个核心的问题.

常见的数据关联算法^[41]包括最近邻法、全邻最优法、航迹分裂法、高斯和法、整数规划法、多假设法、概率数据关联法、联合概率数据关联法和神经网络法等. 研究人员^[42]对上述的几种常用算法进行了对比评估, 数据关联算法也在不断的修正完善, 目前不仅成功地解决了密集多回波环境下单目标的数据关联问题, 而且还成功地解决了密集多回波环境下多目标的数据关联问题.

常见的状态估计算法包括通用最小二乘法、加权最小二乘法、极大似然概率法、极大验后估计法和卡尔曼滤波等, 最常用的是卡尔曼滤波及其变形^[18-25]. 文[18]针对两个传感器的应用情况, 提出了先进行状态滤波再进行融合估计的“状态矢量融合算法”和先进行观测融合再进行状态估计的“观测矢量融合算法”, 并指出在完全相同的条件下, “观测矢量融合算法”的估计精度高于“状态矢量融合算法”; 文[20]将文[18]中的传感器应用数目由两个扩展到 N 个; 文[19]针对复杂杂波环境中的多传感器机动目标跟踪提出了一种滤波器串联的融合算法; 文[22]讨论了参与融合的观测值的数目与跟踪精度的关系, 并对文[18~20]中的几种典型算法进行了扩展和改进; 文[21]给出了基于最小二乘法的非同步信息之间的时间配准补偿, 并设计了红外成像和雷达两种传感器融合的跟踪滤波器; 文[25]提出了一种基于神经网络的信息融合与并行自适应跟踪算法. 由于估计算法的理论和技术在众多领域得到了广泛的应用, 估计算法的研究是数据融合领域成果最丰硕最成熟的部分.

3.3 属性融合

属性融合是把来自不同传感器和信息源送来的目标数据进行处理形成的一个组合的目标属性说明. 传感器可以是被动式的, 也可以是主动式的; 传感器数据类型可以是 RCS 数据、图象数据、红外数据、可见光谱数据、时域数据、频域数据或同时包含有时频域信息的混合特征数据等.

较定位融合而言, 属性融合主要涉及到目标的特征提取和目标分类, 目标特征指的是目标的几何方位、几何尺寸与形状、图象纹理与材质、基于时域、

频域或小波分析的特征信号等. 属性融合涉及到数字信号处理、数字图象处理和模式识别等技术的应用. 其中, 具有代表性的有: 经典推理法、Bayesian 推理法、Dempster-Shafer 法、模糊数学法、聚类分析法、专家系统法和逻辑模版法等.

经典推理法在给定先验前提假设下计算出一个识别的概率, 方法的精度和信度必须在多次重复的意义上解释. 它有以下缺点: (1) 一次仅能估计两个假设(H_0 和 H_1); (2) 多变量数据的复杂度高; (3) 不能直接使用先验似然估计.

Bayesian 推理法^[26]将 Bayes 推理用于目标识别, 与经典推理法的基本观点是对立的. 其缺陷为: (1) 定义先验似然函数困难; (2) 当需要多个可能假设和多条相关事件时复杂度高; (3) 需要对应的互不相容假设; (4) 缺乏分配总的不确定性的能力.

Dempster-Shafer 法^[27]通过命题和集合之间的一一对应, 把命题的不确定性问题转化为集合的不确定性问题. 通过引入信任函数, 当概率值已知时, Dempster-Shafer 理论变为了概率论, 当先验概率很难获得时, Dempster-Shafer 理论较概率论更为有效. 该方法的缺陷是计算复杂度高.

模糊数学法^[28]是建立在一组可变的模糊“IF-THEN”规则基础上的. 这些规则的来源既可以是专家的信息也可以是通过输入-输出数据对的映射得到. “IF-THEN”规则的模糊概念是以隶属函数来表达的, 通过使某些指标函数取得最优值, 以获得最佳辨识效果. 该方法的难点在于如何构造合理有效的隶属函数和指标函数.

聚类分析法^[29]需要定义一个相似性函数或关联度量以提供一个表示任何两个特征向量之间“接近”程度或不相似程度的值. 其缺陷是: 其本身的启发性使得数据排列方式、相似性参数的选择、聚类算法的选择等都对聚类有影响.

专家系统法^[31]的成功与否在很大程度上依赖于建立一个先验知识库, 有效的知识库是用丰富的工程实践经验来建立的. 虽然不明确要求使用物理模型, 但却是建立在对要识别的实体的组成和结构有一个彻底了解的基础上. 当目标物体能根据其组成部分及其相互关系来识别时, 这种方法特别有用, 但当目标物体特别复杂时, 可能失效.

逻辑模版法^[32]根据物理模型直接计算实体的某些特征(时域、频域或小波域的数据或图象), 与预先存储的目标特征(目标特征文件)或根据观测数据进行预测的物理模型的特征进行比较. 比较过程涉

及到计算预测数据和实测数据的关联, 如果相关系数超过了一个预先规定的阈值, 则认为两者存在着匹配关系. 物理模型法由于计算量大, 在非实时环境中有很好的效果, 但是在实时环境中可能无法满足要求.

另外, 熵法^[30]和自适应神经网络法^[33]等也成为属性融合研究中的重要理论支持.

3.4 态势威胁评估

态势评估和威胁评估的主要任务是为军事指挥员的决策提供依据. 态势评估和威胁评估由于涉及到更多不确定的、复杂的因素, 譬如, 军事学说、战略思想、兵力部署、战术实施、军事装备特点、地形地貌和气候对军事装备的影响等, 其难度和复杂程度更甚于位置融合和属性融合.

研究人员对战争行为的理解不同而引出了各种各样的战争模型. Lanchester 战斗模型^[37]给出了交战的敌我双方力量损耗的经典表达式, 揭示了双方兵力效能彼此消涨的基本规律; Lawson 热力学模型^[1,5]通过借鉴气体体积压力的热力学定律, 描述了军事压力、环境状况、部队部署、作战效能和作战进度之间的关系; Rona 规范模型^[1,5]依据多维转换机构说明军事效果; Zracket 状态向量模型^[1,5]通过一个动态的状态方程来模拟战争过程; Wohl^[38,39]建立的 SHOR 模型提出了军事问题求解和判定的数据驱动或响应方法, 而不是目标驱动方法, 致力于处理军事判定处理中信息输入的不确定性以及行动结果的不确定性.

但是, 上述模型还远远不能满足实际应用的需要, 其原因在于: 态势威胁评估更多使用的是自然语言表述的知识, 而这种知识不容易被转化成为易被机器处理的数学表达式, 即使是现有的处理随机概率问题和非精确性推理的专家系统, 也难以保证逻辑和概率表示的一致性, 因此, 必须建立起面向自然语言中条件陈述的数学模型. 目前, 人工智能、控制决策论和认知心理研究等方法主要的解决手段. 其中, 具有代表性的有条件事件代数理论、规划识别理论和多值逻辑理论.

条件事件代数理论^[34]的基本思路是: 基于一个有限集建立了一个特殊的条件事件代数模型, 并应用它解决了数据融合专家系统中的循环规则问题. 该理论已被公认为在态势评估和威胁评估领域有重要的应用前景, 可用来解决不确定性、概率性和模糊性推理问题, 美国国防部将其列为数据融合公共基础理论研究项目. 该理论的研究非常活跃, 针对不同的

应用问题,人们建立起了各种条件事件代数的数学模型,但目前还没有找到一个无论从理论角度还是从应用角度来看都比较完满的模型。

规划识别^[35]理论表明:尽管在真实情况下规划识别问题不是逻辑完备的,但它是认知完备的,因而可是认识的,并可利用规划识别随机网络模型。在路径识别领域,可以通过与军事领域无关的路径规划模型和技术的研究,解决真实条件下的军用路径规划问题。

多值逻辑理论^[40]通过各种不确定计算的合取、析取和非操作,基于多值逻辑建立了一个不确定计算最小子集句法的理论框架,较好地解决了态势评估和威胁评估分析中的不定性的管理问题,把评估问题纳入到逻辑数学的处理范畴。

尽管目前已建立了一些态势威胁评估实验系统,并证明以上理论可支持态势威胁评估的任务要求,但同时我们也应该看到:真实环境远比实验环境更为复杂和丰富,新的问题和新的挑战会不断地出现在我们的面前。

3.5 应用

数据融合问题一经提出,就引起了西方各发达国家的高度重视。数据融合技术不仅成功地应用于战术武器系统中,而且在各类作战指挥自动化系统(如 C³I 和 C⁴ISR 等)中都充分地发挥着作用^[5,6,36]。

美空军的 F-22 飞机,美陆军的 Com man che 直升机、俄罗斯的 M ig-29 和 M ig-31 战斗机、法汤姆逊的 SAM 地空导弹和德国的“豹”II 坦克等都采用数据融合技术。特别指出的是,俄罗斯的 M ig-29 和 M ig-31 战斗机将来自机载相控阵雷达和红外测向仪的数据在战术态势显示器上合成,法汤姆逊的 SAM 地空导弹不仅有脉冲多普勒雷达,还有光电式传感器——红外系统和电视摄像头,明显改善了对机动目标的跟踪性能,大大减少了因目标机动而引起的脱靶量。

迄今为止,美已研制了几十个应用数据融合技术的情报收集和作战指挥系统,如战场管理和目标检测系统(BETA)、军用情报分析系统(TCAC)、多平台多传感器跟踪处理系统(INCA)、海军战争状态分析显示系统(TOP)、辅助空中作战命令分析专家系统(DAGR)空中目标确定和截击武器选择专家系统(TATR)、自动多传感器部队识别系统(AM-SUI)、目标获取与武器输送系统(TRWDS)、全源信息分析系统(PAAS)、陆空自动战术情报保障系统(LENSCE)以及敌我态势分析系统(ENSCS)等。目

前英国已开发并投入使用的信息融合系统有莱茵河英军机动指挥控制系统(WAVELL)、舰载多传感器信息融合系统(ZKBS)、飞机敌/我/中识别系统(ZFFF)以及炮兵智能信息融合示范系统(AIDD)等。另外,英国与西德等欧洲五国制订了联合开展“多传感器信号与知识融合系统(MSSKF)”研究计划,他们在空间/时间信息融合、数字/符号信息融合、环境和传感器模型等方面取得了重要进展。法国已将数据融合技术应用于“马尔萨”防空指挥系统中的师级或团级防空火力协调中心。

4 挑战与展望(Challenges and tendencies)

数据融合理论正大量应用于众多军用和民用领域,如 C³I 系统、工业控制、机器人和智能仪器、多源图像处理、空中交通管制、海洋监视和管理等领域。数据融合面临的挑战和发展方向有:

(1) 解决数据配准、数据预处理、数据库构建,数据库管理、人机接口、通用软件包开发等问题,利用成熟的的辅助支持技术,构造通用的数据融合支撑环境,便于快速形成面向具体应用需求的数据融合系统;

(2) 如何将人工智能技术,如神经网络、模糊推理、专家系统、遗传算法等,引入到数据融合领域,在探测、数据关联、目标跟踪、特征提取、目标分类、评估和管理等方面充分发挥其优越性;

(3) 多平台/单平台、异类/同类多传感器的应用背景下,计算复杂程度低,同时又能满足任务要求的数据处理模型和算法;

(4) 解决不确定性因素的表达和推理演算;

(5) 基于时空活动的行为和意图进行推理评估;

(6) 构建数据融合测试评估平台和多传感器管理体系。

参 考 文 献 (References)

- 1 Waltz E, Llinas J. Multisensor Data Fusion, Artech House, Boston, 1990
- 2 David L. Hall, Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion, Artech House, Boston, 1992
- 3 Alan N. Steinberg, Sensor and Data Fusion, SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1993
- 4 C S Burrus. Distributed Detection and Data Fusion, Springer Verlag, New York, 1997
- 5 康耀红. 信息融合理论与应用. 西安电子科技大学出版社, 西安, 1997
- 6 敬忠良, 徐 毅. 信息融合技术在综合航空电子系统中的应用研究. 研究报告, 西北工业大学, 西安, 1999

- 7 Intelligence Fusion Pushed, Aviation Week and Space Technology, Jan. 29, 1979, 205~ 211
- 8 Waltz E. L., Computational Considerations for Fusion in Target Identification Systems, IEEE Proc. NAECON, May 1981, 492 ~ 497
- 9 Evaluation of Defense Attempts to Manage Battlefield Intelligence Data, LCD-81-82. Comptroller General Report To Congress of the U. S., Feb. 24, 1981
- 10 White F, *et al.* A model for Data Fusion, SPIE Conference on Sensor Fusion, Orlando, April 1988
- 11 Reiner J. Application of Expert Systems to Sensor Fusion, Proc. IEEE National Aerospace Electron. 1985
- 12 Yannone R M. The role of Expert Systems to in the Advanced Tactical Fighter of the 1990s, Proc. IEEE National Aerospace Electron. 1985
- 13 Blackman S S. Multiple-Target Tracking with Radar Applications, Artech House, Dedham, MA, 1986
- 14 Pemberton W, *et al.* An Overview of ATR Fusion Techniques, Proc. 1987 TrirService data fusion Symp. Johns Hopkins University, Baltimore, June 1987
- 15 King JH, *et al.* A context Dependent Automatic Target Recognizer System, Proc. SPIE, May 1984, 485
- 16 Christopher L B, Gleason S. Internetted fighter sensor data association and state estimation approach comparison, Proceedings of Second National Symp. On Sensor Fusion, 1989, 2: 297 ~ 320
- 17 徐 毅, 金德琨. 数据融合体系结构的设计. 航空电子技术, 2001, 32(4)
- 18 Shalom Y B. Comparison of two-sensor tracking methods based on state vector fusion and measurement fusion, IEEE Trans. On AES, 1988, 24(4): 447~ 457
- 19 Houles A, Shalom Y B. Multisensor tracking of a maneuvering target in clutter, IEEE Trans. On AES, 1989, 25(2): 176 ~ 288
- 20 Hong L, Centralized and Distributed Multisensor Intergration with Uncertaonties in Communication networks, IEEE Trans. On AES, 1991, 27(2): 370~ 379
- 21 周 锐, 申功勋等. 多传感器融合目标跟踪. 航空学报, Sep 1998, 19(5): 536~ 540
- 22 常建平. 多雷达跟踪网数据融合算法的研究. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(5): 641~ 648
- 23 Romine J, Kamen E, Sastry C. Fusion of radar and imaging sensor data for target tracking, Signal and Data Processing of Small Targets, SPIE, 1994, 2235: 558~ 569
- 24 Blair W D, Rice T R, Alouani A T. Asynchronous data fusion for target tracking with multi-tasking radar and optical sensor. Acquisition, Tracking and Pointing, SPIE, 1991, 1482: 234~ 245
- 25 敬忠良. 神经网络跟踪理论及应用, 国防工业出版社, 1995
- 26 Iversen G R. Bayesian statistical inference, Sage publishing, Beverly Hills, California, 1984
- 27 Dillard R A. Tactical inferencing with Dempster-shafer theory of evidence, 17th Asilomar Conference of Circuits, systems, and computers, 1983, 312~ 316
- 28 Zadeh L, A Fuzzy Logic, IEEE Computer, April, 1988
- 29 Aldenderfer M S, Blashfield R K. Cluster Analysis, Sage publications, London, 1984
- 30 Dretskey F I. Knowledge and Flow of Information, MIT Press, Cambridge, MA, 1982
- 31 Stifik M. The organization of expert system: a tutorial, Artificial Intelligence, 1982, 18
- 32 Hall D L, Linn R J. Comments on the use of templating for multisensor data fusion, Proceedings of 1989 TrirService Data Fusion Symposium, May 1989
- 33 Brown D E, Pittard C L. Neural network implementations of data association algorithms for sensor fusion. Proceedings SPIE-The Internation Society for Optical Engineering, 1989, 126~ 135
- 34 Goodman I R, Nguyen H T. A theory of conditional information for probabilistic inference in intelligent systems, Information Sciences, 1993, 76: 13~ 42
- 35 Azarewicz J, Template-based multfragent plan recognition for tactical situation assessment, Proceedings of 5th conferences on Artificial Intelligence Applications, 1989
- 36 军事电子信息系统专题技术文选第三册, 多传感器、多目标跟踪与数据融合技术, 南京, 信息产业部第二十八所科技信息部, 1999
- 37 Gye R, Lew is T. Lanchester's Equations: Mathematics and the Art of War- A Historical Survey and Some New Results, Mathematical Science, 1976, 1
- 38 Wohl J G. Force Management Requirements for Air Force Tactical Command and Control, IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, 1981, SMC- 11: 618~ 639
- 39 Wohl J G, *et al.* Human Decision Processes in Military Command and Control, Advances in Man-Machine Systems Research, JAI Press, 1984, 1: 261~ 307
- 40 Yannone R M, Bonissone P P. Attribute fusion and situation assessment with a many-valued logic approach, Multitarget multisensor tracking: advanced application, Artech House, 1992
- 41 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪, 国防工业出版社, 1991
- 42 Henry Leung, Zhijian Hu. Martin Blanchette, Evaluation of Multiple radra Target Trackers in Stressful Environments, IEEE Trans. On AES, April 1999, 35(2): 663~ 674

作者简介

徐 毅(1972-), 男, 博士生. 研究领域为目标跟踪、智能信息融合与控制.

金德琨(1938-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域为信息融合、综合航空电子系统.

敬忠良(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 国家教育部“长江学者奖励计划特聘教授”. 研究领域为随机控制、目标跟踪、智能信息融合与控制.