



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代信息融合技术在 组合导航中的应用

卞鸿巍 李 安 覃方君 许汪宁 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代信息融合技术 在组合导航中的应用

卞鸿巍 李安 覃方君 许江宁 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书重点研究的组合导航技术是一种研究活跃、应用广泛、典型的信息融合技术,主要内容有:信息融合和组合导航的基本概念、组合导航系统的数学基础和研究方法、线性离散系统最优估计方法、组合导航中各种卡尔曼滤波技术、非线性系统状态估计滤波方法、智能信息融合技术在组合导航中的应用方法、联邦卡尔曼滤波器的设计及应用等。本书可作为导航专业本科生和硕士研究生的课程教材,又可作为工程技术人员在组合导航系统科研中的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代信息融合技术在组合导航中的应用 / 卞鸿巍等
编著. —北京:国防工业出版社, 2010. 12
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-118-07152-8

I. ①现… II. ①卞… III. ①信息技术-应用-组合
导航-高等学校-教材 IV. ①TN967.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 206670 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 388 千字

2010 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书重点研究的组合导航技术是一种研究活跃、应用广泛、典型的信息融合技术。导航是人类的基本活动,其技术的发展决定了人类精确控制自身活动范围的能力,影响着人类的社会生活。随着技术的发展,人类可利用的导航系统信息资源越来越多。由于不同导航系统各具优劣,提高导航系统的整体性能的有效途径便是采用组合导航技术。可以说,组合导航技术是导航技术发展的必然结果。组合导航系统从诞生伊始,就将各种不同的导航传感器融合在一起,其独立发展起来的理论与技术有力地促进了信息融合技术的发展。特别是在信息融合研究和应用最为活跃的作战武器系统中,以组合导航系统为代表的导航系统是其最为重要的信息基础平台之一。

本书研究的基础来自于舰船组合导航领域的相关研究工作,以求系统地介绍组合导航信息融合方法的技术脉络和重点知识,概念上注重从技术发展的角度诠释导航与组合导航的内在本质,内容上则注重选取与组合导航信息融合技术相关的研究热点。在编排上本书分为8章,每章相对独立地构成一个大的主题。

第1章主要介绍信息融合和组合导航的基本概念,一方面指出组合导航与信息融合技术在理论方法上交互影响的客观联系,另一方面指出组合导航所具有的本质的信息融合特征。本章也可以看作是组合导航与信息融合的一种快照式的介绍,可以方便读者快速从宏观了解组合导航技术的全貌。

第2章主要介绍组合导航系统的数学基础和研究方法。本章除给出部分典型导航系统的数学模型外,也介绍了组合导航的一般研究方法。上述内容可以帮助初步从事组合导航研究的读者理解研究上的基本问题,同时也构成后续章节论述的基础。

第3章介绍线性离散系统最优估计方法,内容涵盖基于卡尔曼滤波技术的滤波、平滑、预测等内容。本章重点增加了卡尔曼滤波递推公式的贝叶斯推导方法,从递推贝叶斯估计的角度来重新认识信息融合中随机系统状态最优估计问题的本质。这不仅有利于我们理解以卡尔曼滤波为代表的线性系统最优估计理论,同时也会对后续其他非线性系统最优估计理论与智能信息融合技术建立更加统一的认识。通过本章选用的典型的组合导航问题的算例,读者可以掌握基本的组合导航卡尔曼滤波方法。

第4章介绍组合导航中自适应卡尔曼滤波(AKF)技术的内容。首先分析滤波器发散的原因,并在分析卡尔曼新息序列特征的基础上,从衰减记忆滤波、新息方差估计滤波和多模型估计自适应滤波等几条线索介绍目前自适应卡尔曼滤波技术的研究热点。上述内容可以帮助读者在实际组合导航系统中研究建立实用的自适应卡尔曼滤波算法。

第5章介绍非线性系统状态估计滤波方法。在传统的扩展卡尔曼滤波(EKF)的基础上,增加了无色卡尔曼滤波(UKF)、粒子滤波(PF)等内容,上述方法均为近年来本领域的

研究热点。读者可以通过本章的 GPS/DR 组合导航问题,掌握上述非线性滤波方法在应用中的基本特点。

第 6 章和第 7 章重点对目前智能信息融合技术在组合导航中的应用方法进行介绍。

第 6 章主要介绍模糊控制在组合导航信息融合应用的相关内容。本章在简要介绍模糊理论的概念、基本知识和模糊控制器基本设计方法的基础上,对组合导航系统模糊规则设计方法进行归纳分析,并给出具体的应用实例。

第 7 章重点介绍神经网络信息融合技术在组合导航中的应用方法。本章对典型的神经网络和学习方法进行宏观概要性的介绍,在此基础上,对在组合导航中应用神经网络技术的主要研究方法进行阐述,重点介绍神经网络自适应算法(NN-AKF)和神经网络模糊推理自适应算法(ANFIS-AKF)两种技术。

第 8 章介绍联邦卡尔曼滤波器的设计及应用。内容主要包括:在各子滤波器估计不相关和相关条件下的联邦滤波算法、联邦滤波器信息分配算法、数据时空关联以及容错设计等。同时,选取一个典型的组合导航联邦卡尔曼滤波算例进行介绍。

全书是我们本方向研究课题组多年科研实践的总结。在此向在本书编写过程中提供了大量帮助上海交通大学金志华教授、田蔚凤教授、王俊璞博士、张静博士,华南理工大学杨艳娟副教授,海军工程大学高启孝教授、边少锋教授、陈永冰教授、胡柏青教授、周永余副教授、朱涛副教授、王荣颖博士、范崧伟博士、高薪硕上、朱蕾硕士、信冠杰硕士和聂浩翔硕士一并表示感谢。

本书编写的初衷是尽量反映目前组合导航信息融合研究的主要问题,并针对不同问题结合应用需求,进行一定深度的阐述。本书可作为导航专业本科生和硕士研究生的课程教材,又可作为工程技术人员在组合导航系统科研中的参考用书,所提出的一些观点和思想希望能够对国内同行提供一定的帮助,供读者进一步的研究参考。由于时间仓促以及编者水平所限,书中难免存在错漏和不足之处,恳请读者批评指正。

最后,本书的出版用以纪念海军工程大学导航工程专业创始人之一汪人定教授,感谢他为航海导航专业的建设发展所做出的卓越贡献。

作者

2010 年 8 月

目 录

第 1 章 信息融合与组合导航	1
1.1 信息融合的基本概念	1
1.1.1 信息融合的由来	1
1.1.2 信息融合的定义	2
1.1.3 信息融合技术的应用	3
1.2 信息融合系统的功能与结构模型	4
1.2.1 信息融合系统的功能级别	4
1.2.2 信息融合系统的功能模型	5
1.2.3 信息融合系统的结构模型	7
1.2.4 信息融合理论的研究动向	11
1.3 导航系统的基本概念	12
1.3.1 导航的基本概念	12
1.3.2 导航系统在现代战争中的地位	13
1.3.3 主要导航系统概述	16
1.3.4 环境信息获取系统	24
1.3.5 信息支持与决策控制系统	26
1.4 组合导航系统的基本概念	28
1.4.1 组合导航的历史与发展	28
1.4.2 组合导航的基本概念	30
1.4.3 常见的组合导航系统	31
1.4.4 海军舰艇组合导航系统	33
1.5 组合导航理论的发展	35
1.5.1 组合导航与信息融合之间的关系	35
1.5.2 线性组合导航系统状态估计理论	36
1.5.3 非线性组合导航系统状态估计理论	37
本章小结	38
参考文献	39
第 2 章 组合导航数学基础与研究方法	40
2.1 组合导航数学基础	40
2.1.1 概率论基础知识	40
2.1.2 随机过程基础知识	43

2.2 具有随机干扰的线性动力学系统	48
2.2.1 随机线性连续系统的数学模型	48
2.2.2 随机线性离散系统的数学模型	49
2.2.3 随机线性连续系统的离散化	50
2.3 导航系统数学模型	53
2.3.1 惯性导航系统数学误差模型	53
2.3.2 卫星导航系统误差数学模型	54
2.4 最优估计方法	55
2.4.1 最小二乘估计	55
2.4.2 最小方差估计与线性最小方差估计	56
2.4.3 极大验后估计与极大似然估计	58
2.4.4 贝叶斯估计	59
2.4.5 几种最优估计比较	60
2.5 组合导航系统的研究方法	60
2.5.1 组合导航系统研究的一般过程	60
2.5.2 组合导航系统的设计模式	61
2.5.3 组合导航数学仿真方法	62
2.5.4 组合导航系统的测试	64
2.6 组合导航系统数字开发平台	64
2.6.1 组合导航系统数字开发平台架构	65
2.6.2 数字开发平台系统数学模型研究	67
2.6.3 组合导航系统数字开发平台功能	67
本章小结	68
参考文献	69
第3章 离散线性系统最优估计方法及其应用	70
3.1 卡尔曼滤波的基本概念	70
3.1.1 卡尔曼滤波的基本原理	70
3.1.2 最优滤波、预测与平滑的概念	72
3.2 随机线性离散系统的卡尔曼滤波方程	72
3.2.1 随机线性离散系统的卡尔曼滤波方程的直观推导	73
3.2.2 随机线性连续系统的卡尔曼滤波基本方程	75
3.3 线性系统卡尔曼滤波的贝叶斯推导	77
3.3.1 递推贝叶斯估计	77
3.3.2 随机线性离散系统的卡尔曼滤波方程的贝叶斯推导	80
3.4 卡尔曼滤波的稳定性	83
3.5 随机线性离散系统的最优预测	84
3.6 随机线性离散系统的最优平滑	86
3.6.1 平滑估计方法	86

3.6.2	固定区间平滑递推公式推导	88
3.7	基于 INS 的组合导航通用卡尔曼滤波模型	93
3.7.1	GINS 系统平台与姿态角误差变换矩阵	93
3.7.2	基于 INS 的组合导航通用卡尔曼滤波模型	95
3.7.3	不同外观测量下的组合子系统的可观测性分析	97
3.7.4	不同外观测量下的初始对准可观测度分析	98
3.8	卡尔曼滤波在组合导航中的应用算例	100
3.8.1	卡尔曼滤波器在 INS/GPS 组合导航中的应用	100
3.8.2	最优平滑滤波在 INS/GPS 组合导航中的算例	104
	本章小结	107
	参考文献	108
第 4 章	自适应卡尔曼滤波技术及其应用	109
4.1	卡尔曼滤波的发散问题	109
4.1.1	卡尔曼滤波发散的原因	109
4.1.2	卡尔曼滤波的发散现象举例	109
4.2	卡尔曼滤波的发散的抑制	112
4.2.1	衰减记忆滤波算法	112
4.2.2	限定记忆滤波算法	114
4.2.3	自适应滤波原理	115
4.3	卡尔曼滤波器新息序列	115
4.3.1	卡尔曼滤波器新息的概念	115
4.3.2	新息方式的卡尔曼滤波形式	116
4.3.3	滤波器理想稳态时新息序列	116
4.3.4	滤波器非理想状态时的新息序列	117
4.4	基于新息自适应估计 (IAE) 的卡尔曼滤波技术	117
4.4.1	新息调制方差匹配技术	117
4.4.2	新息自适应估计卡尔曼滤波算法	118
4.4.3	新息相关法自适应滤波	122
4.5	基于多模型自适应估计 (MMAE) 卡尔曼滤波技术	125
4.6	强跟踪自适应卡尔曼滤波器	127
4.7	GPS/INS 组合导航系统自适应滤波	129
4.7.1	IAE 自适应卡尔曼滤波数字验证	129
4.7.2	静态试验验证	131
	本章小结	133
	参考文献	133
第 5 章	非线性系统状态估计及其应用	135
5.1	非线性系统基本概念	135
5.2	扩展卡尔曼滤波	136

5.2.1	围绕标称状态线性化的卡尔曼滤波方程	136
5.2.2	围绕估计状态的线性化	140
5.2.3	实例分析	142
5.3	无迹卡尔曼滤波(UKF)	144
5.3.1	Unscented 变换	145
5.3.2	Unscented 卡尔曼滤波基本方程	148
5.3.3	实例分析	149
5.4	粒子滤波	150
5.4.1	粒子滤波的理论基础	151
5.4.2	重要性密度的选择	156
5.4.3	SIR 滤波器	157
5.4.4	粒子滤波应用实例	157
5.5	非线性滤波技术在 GPS/DR 组合定位系统中的应用	159
5.5.1	DR 系统定位原理	159
5.5.2	GPS/DR 组合系统的状态方程	160
5.5.3	GPS/DR 组合系统的量测方程	161
5.5.4	三种非线性滤波方法比较	161
5.6	基于 UKF/PF 的水下导航组合滤波器设计	164
5.6.1	DR/INS 滤波模型	164
5.6.2	UKF/PF 混合滤波算法	165
5.6.3	基于 UKF/PF 的组合滤波器仿真试验	166
	本章小结	168
	参考文献	169
第 6 章	模糊自适应状态估计及其应用	170
6.1	模糊理论概述	171
6.1.1	模糊现象存在的普遍性	171
6.1.2	模糊理论的基本概念	171
6.2	模糊理论基础知识	173
6.2.1	模糊集合	173
6.2.2	隶属函数	175
6.2.3	模糊关系和模糊矩阵	176
6.2.4	模糊规则与模糊推理	178
6.2.5	Mamdani 型推理与 sugeno 型推理	181
6.3	模糊控制器的设计方法	182
6.3.1	模糊逻辑控制过程	182
6.3.2	输入变量和输出变量的确定	182
6.3.3	论域的确定	183
6.3.4	模糊化方法	184

6.3.5 解模糊判决方法	185
6.4 组合导航系统模糊规则设计方法	187
6.4.1 模糊控制规则一般设计方法	187
6.4.2 基于系统工作状态的组合导航系统模糊规则设计方法	188
6.4.3 基于滤波器新息状态的组导系统模糊规则设计方法	191
6.5 模糊控制在车载 GPS/DR 组合导航系统中的应用	193
6.5.1 基于卡尔曼滤波器的车载 DR 系统	194
6.5.2 车载 GPS/DR 组合导航系统方案	196
6.5.3 基于模糊规则的 GPS/DR 融合算法	197
本章小结	199
参考文献	200
第 7 章 神经网络信息融合技术及其应用	201
7.1 神经网络基础知识	202
7.1.1 引言	202
7.1.2 神经网络的一般结构	204
7.1.3 神经网络的学习方法	206
7.1.4 神经网络工程应用的能力特点	207
7.2 典型神经网络及其学习算法	208
7.2.1 误差反向传播网络(BP 网络)	208
7.2.2 径向基函数神经网络(RBF 网络)	212
7.3 自适应神经网络模糊推理系统(ANFIS)	215
7.3.1 ANFIS 的结构	215
7.3.2 ANFIS 的学习算法	218
7.3.3 ANFIS 的总体评价	218
7.4 基于神经网络技术的状态估计	219
7.4.1 神经网络状态估计的特点	219
7.4.2 神经网络状态估计的关键问题	219
7.4.3 神经网络状态估计的主要方法	220
7.5 神经网络在组合导航信息融合的应用	223
7.5.1 组合导航神经网络信息融合的主要方法	223
7.5.2 基于 BP 神经网络的 GPS/INS 组合导航信息融合方法	224
7.5.3 基于 ANFIS 神经网络的 GPS/INS 组合导航信息融合方法	226
本章小结	230
参考文献	230
第 8 章 联邦卡尔曼滤波技术及其应用	231
8.1 各子滤波器估计不相关条件下的联邦滤波算法	231
8.2 各子滤波器估计相关条件下的联邦滤波算法	233
8.2.1 信息分配原则与全局最优估计	233

8.2.2	联邦滤波算法的时间更新	235
8.2.3	联邦滤波算法的观测更新	237
8.2.4	联邦卡尔曼滤波器设计步骤	238
8.3	联邦滤波器控制结构与信息分配	239
8.3.1	联邦卡尔曼滤波器控制结构	239
8.3.2	公共参考信息的分配原则	241
8.3.3	联邦滤波器信息分配算法	241
8.4	联邦滤波器设计数据时空关联	243
8.4.1	信息的同步处理	243
8.4.2	非等间隔时间关联问题	244
8.4.3	算法最优性证明	246
8.5	联邦滤波器容错设计算法	249
8.5.1	联邦系统故障检测与隔离算法	249
8.5.2	联邦系统重构与信息补偿方法	252
8.6	联邦卡尔曼滤波算法在舰艇组合导航系统中的应用	253
8.6.1	组合导航系统联邦卡尔曼滤波器设计	253
8.6.2	组合导航系统容错设计	258
8.6.3	数学仿真与结果分析	259
	本章小结	261
	参考文献	261

第 1 章 信息融合与组合导航

在经历了农业社会和工业社会之后,人类社会渐渐进入了信息化社会阶段。当今的人们已经认识到信息、能源与物质是人类社会赖以生存与发展的三大支柱。信息不同于物质和能量,是人类的第三资源。当前人们面对的“信息场”已经出现了两个重大的变化:一是信息的种类日益繁多,空间结构空前复杂;二是获取信息的手段和方法越来越多样化。实际上,人们已经不知不觉地进入多传感器信息融合时代。在此基础上,如何有效处理各种不确定、非线性、不明信号源的各类信息,构造更加有效的多传感器信息融合系统,实现高性能智能信息处理和控制在,这就是信息的获取、加工、处理和融合问题,是信息融合技术的研究对象和研究目标。根据人们当前的认识,信息融合的最终目的就是通过“集成”和“融合”的方式构造高性能智能化系统。

本书重点研究的组合导航技术是一种研究活跃、应用广泛、典型的信息融合技术。导航是人类的基本活动,其技术的发展决定了人类精确控制自身活动范围的能力,影响着人类的社会生活。随着技术的发展,人类可利用的导航系统信息资源越来越多。由于不同导航系统各具优劣,提高导航系统的整体性能的有效途径便是采用组合导航技术。可以说,组合导航技术是导航技术发展的必然结果。组合导航系统从诞生伊始,就将各种不同的导航传感器融合在一起,其独立发展起来的理论与技术有力地促进了信息融合技术的发展。特别是在信息融合研究和应用最为活跃的作战武器系统中,以组合导航系统为代表的导航系统是其最为重要的信息基础平台之一。在本章中,我们着重介绍信息融合、导航与组合导航的主要概念、联系和历史发展状况。

1.1 信息融合的基本概念

1.1.1 信息融合的由来

一门新技术、新学科的创立,不仅仅是理论研究的结果,更是来自于实际工程的需求。“信息融合”一词尽管目前已经十分频繁地被众多领域所引用,其最初的工程需求实际上主要来自于军事领域。

自从第二次世界大战前研究出第一代监视雷达以来,技术人员一直希望通过雷达组网获得整个空情画面,从而全面掌握情报,做出正确决策。于是在 70 多年前围绕着构成“Home Chain”雷达传感器,人们开始了最早的对空搜索雷达的组网方法研究。第二次世界大战结束后,人们开始根据以往的工作系统地定义雷达信息融合新概念,并开始解决数据融合时间对齐等一系列工程技术问题。

美国对军事 C³I(Command, Control, Communication and Information)系统建设的需求首次正式提出“信息融合”的概念。在军用 C³I 系统研究中,人们认识到只有把各传感器

的信息有效地组合起来,即获取、综合、滤波、估计、融合,才能实现自动化指挥。从那以后,随着军事 C³I 系统研究的推进,信息融合研究有了突破性进展。20 世纪 70 年代末,在公开出版的技术文献中开始出现基于多传感器信息综合集成意义上的“融合”一词。与此同时,在综合导航、工业控制、机器人、空交管制、海洋监视等领域,大量多传感器被用来收集信息,纷纷朝着多传感器信息融合方向迅速发展。

20 世纪 80 年代,传感器技术的飞速发展和传感器投资的大量增加,使得军事系统中的传感器数量剧增,仅实用的军用信息融合系统就已达几十个。超远程武器的出现和发展,从根本上改变了 C³I 系统的信息处理方式;军事指挥人员由于对敌我武器系统的超远程能力认识的加深,开阔了视野,因此需求更多的信息和数据,更加强调速度和实时性。为此,信息融合的研究工作成了军工生产和高技术开发等多方面所关心的问题,C³I 战场的信息融合技术也因此更加受到重视。1988 年,美国国防部把信息融合技术列为 20 世纪 90 年代最优先发展的 A 类重点研究开发的关键技术之一。特别是 90 年代,随着智能机器人及其控制、生产自动化、图像处理、计算机多媒体技术、新一代空中与海上交通管制等技术的发展,以及更加复杂的军事 C⁴ISKR(Command, Control, Communication, Computer, Information, Surveillance, Kill and Reconnaissance)系统和网络中心战的需求牵引,信息融合的研究有了新的突破,国内外关于信息融合的专著层出不穷。可以说,20 世纪 90 年代之后,在全球范围内真正迎来了信息融合研究的世界性热潮,并在理论和工程实践中都取得了重大突破,已发展成为新的研究领域。

1.1.2 信息融合的定义

多传感器信息融合(Multi-Sensor Data Fusion, MSDF)也称多源关联、多源合成、传感器混合或多传感器融合。由于所研究的内容十分广泛和多样,目前要给出信息融合的统一定义是非常困难的。这里给出信息融合的一般定义^[1,2,3]:

信息融合是指利用计算机技术对按时序获得的若干传感器的观测信息在一定准则下加以自动分析、优化综合以完成所需的决策和估计任务而进行的信息处理过程。

由这一定义可知,各种传感器是信息融合的基础,多源信息是信息融合的加工对象,协调优化和综合处理是信息融合的核心。

实际上,多传感器信息融合处理是人类和生物界信息处理的基本功能。从生物学的角度看,自然界中的生物基本都是通过其自身各种感觉器官来感知其外部生存空间的状况和环境变化,根据其所收集到的这些信息,进行“综合处理”,从而对外部环境做出反应。这里的“综合处理”便是信息的融合处理。人类本能地具有将身体上的眼、耳、鼻、四肢等各种功能器官所探测的信息(如景物、声音、气味和触觉等)与先验知识进行综合的能力,以便对周围的环境和发生的事件做出估计和反应。由于人类的感官具有不同度量特征,因而可测出不同空间范围内发生的各种物理现象。这一处理过程是复杂的,也是自适应的,可以将图像、声音、气味和物理形状或描述等各种信息转化成对环境有意义的解释。

对于多传感器信息融合理论和技术的研究实际上是对人脑综合处理复杂问题的一种功能模拟。在多传感器系统中,各种传感器提供的信息可能具有不同的特征。多传感器信息融合的基本原理就像人脑综合处理信息的过程,它充分地利用多个传感器资源,通过

对各种传感器及其观测信息的合理支配与使用,将各种传感器在空间和时间上的互补与冗余信息依据某种优化准则组合起来,产生对观测环境的一致性解释和描述。基于各传感器分离观测的信息,信息融合力图通过对信息的优化组合导出更多的有效信息,利用多个传感器共同或联合操作的优势,来提高整个传感器系统的有效性。

1.1.3 信息融合技术的应用

信息融合系统的应用差异很大,根据不同的应用环境和所处理问题的不同性质,可分成人为设计环境、现实温和环境和现实敌对环境3类^[4,5]。

(1) 人为设计环境的特点是:系统正常状态已知,具备可靠、精确的信息源、固定的数据库以及互相协作的系统要素等。如工业过程监视、机器人视觉和交通管制等。

(2) 现实温和环境的特点是:部分状态已知,具有可靠的信息源但覆盖范围较差,部分数据库可变同时系统不受人类感觉影响。如气象预报、金融系统和病人监护系统等。

(3) 现实敌对环境的特点是:不易确定正常状态,信息源可能不精确、不完整、不可靠并易受干扰,数据库高可变,人类的感覺可有效地影响系统,系统要素不相互协作。如各种军用C³I、陆海空警戒、目标指示、目标跟踪和导航系统等。

非军事信息融合和军事信息融合之间存在明显的差异。大部分非军事信息融合系统都是在“人为设计环境”和“温和现实环境”下,而大部分军事系统则必须在“敌对现实环境”中运行。

信息融合在非军事上的应用包括机器人技术、工业过程监视、医疗诊断、金融分析和法律执行等。如在比较典型的工业机器人应用领域,机器人采用离目标物理接触较近的传感器组合与观测目标较近的遥感传感器,通过融合来自多个传感器的信息,使用模式识别和推理技术来识别三维对象,确定不同对象的方位,避开障碍物,按照指令行动引导机器人处理这些对象。另一个重要的信息融合应用领域是工业过程监视,可以通过信息融合识别引起系统状态超出正常运行范围的故障条件,并据此触发各报警器,如核反应堆监视和石油工业中的平台监视等。在医院的病人照顾系统中,由于病人的状况随时变化,要根据传感器、病历、病史、气候、季节等各种数据源,决定病人护理、诊断和治疗方案,信息融合技术也可以用于有效综合处理这些数据。此外,在金融系统中,大公司、企业的金融系统或国家经济管理要利用众多信息源分析金融状况,都包含复杂的信息融合问题。

信息融合在军事上的应用包括在战术和战略上指挥、控制、通信和情报(C³I)任务的广阔领域。目前世界各主要军事大国竞相投入大量人力、物力和财力进行信息融合技术的研究,安排了大批研究项目,并已经取得大量结果,研制出上百种军用信息融合系统,覆盖了海上监视、空-空和地-空防御、战场情报、监视和获取目标以及战略预警和防御等多个领域。比较典型的有:TCAC——战术指挥控制,BETA——战场利用和目标截获系统,AMSVI——自动多传感器部队识别系统,TRWDS——目标获取和武器输送系统等。美、英等西方国家研制的典型海军用信息融合系统有:单舰作战武器指控系统,用于侦察、截获、跟踪和制导武器系统;海面监视信息融合专家系统(OSIF);舰艇编队多传感器信息融合系统(IKBS)等。

1.2 信息融合系统的功能与结构模型

信息融合系统的种类多,彼此之间差异很大。为了能够对不同的信息融合系统和理论进行系统的研究,人们往往从功能、结构和数学模型等几方面入手。其中的功能模型研究主要从融合过程出发,描述信息融合包括的主要功能、数据库,以及进行信息融合时系统各组成部分之间的相互作用过程。结构模型研究则主要从信息融合的拓扑组成出发,说明信息融合系统的软、硬件组成,相关数据流、系统与外部环境的人机界面等问题。数学模型则是重点研究信息融合算法和综合逻辑。本节对信息融合系统的功能与结构模型进行简要介绍,信息融合的主要理论算法将在后续章节陆续进行介绍。

1.2.1 信息融合系统的功能级别

在信息融合系统的功能级别划分中,最常见的分级方式是分为5级,即:检测级融合、位置级融合、属性级融合、态势评估和威胁评估,这主要是根据信息抽象的5个功能层次而来,5个级别融合的主要含义如下。

1. 检测级融合

也称为检测/判决级融合,直接在多传感器分布检测系统中信号的检测判决层上进行融合。在经典的多传感器检测中,所有的局部分传感器将检测到的最原始的观测信息全部直接传送给中心处理器,然后利用经典的统计推断理论与算法完成最优目标的检测任务。在多传感器分布检测系统中,每个传感器对所获得的观测先进行一定的预处理,然后将压缩的信息传给其他传感器,最后在某中心汇总和融合这些信息产生全局检测判决。融合主要目的是信号的准确检测和判决,是最初级的信息融合方式。

检测融合方式最初应用于军事指挥、控制和通信中,现在的应用已经拓宽至气象预报、医疗诊断和组织管理决策等众多领域。在多雷达系统中,检测级融合系统可以提高系统的反应速度和生存能力,增加覆盖区域和监视目标数量,并且提高系统在单个传感器情况下的可靠性。而在天气预报系统中,气象卫星将结合毫米波、微波、红外及可见光等传感器对大气层水蒸气、降雨量、云层、风暴轨迹、海况及风速等信息进行融合,最后得出温度和湿度的准确数据。

2. 位置级融合

也称为空间级融合或跟踪级融合,属于中间层次,是最重要的一级融合。需要说明的是,所谓“位置级”可以更广义地理解为待测物体的状态,因为物体空间运动状态是通常最需要了解的状态,所以狭义上也将“位置级”理解为物体空间运动状态。位置级融合直接在时间和空间上对传感器的测量点迹和状态估计进行融合。组合导航系统、红外和声纳等传感器多目标跟踪系统都属于这类性质的融合。区别在于,组合导航系统主要对载体本身的空间运动状态进行融合计算,红外、声纳、雷达等传感器目标跟踪系统则主要对目标的空间运动状态进行融合计算。

3. 属性级融合

属性级融合也称为目标识别级融合,或者身份估计。例如:当人看到一束花时,会通过眼睛和鼻子获取花的外形、颜色、香味等信息,并与人脑中的经验知识相结合,最终辨别

出花的种类。属性级融合实际上是对人的这种能力的仿生。属性级融合系统通过各种传感器获取不同的待测物体信息,通过分析实现对待测物体的定位、表征和识别。如利用雷达截面积数据确定实体是否为船只以及目标的类型。利用医学监视器对人的健康状况进行半自动监视,利用故障自动诊断系统对被测设备故障进行判断和定位等。

4. 态势评估

现代战争是信息化战争,敌对双方都将采取一系列手段用于破坏对方 C³I 系统的正常工作,以达到控制战场上兵力布局的目的。态势评估(Situation Assessment, SA)是对战场上战斗力量分配情况的评价过程。它通过综合敌对双方战斗力量分布与活动、战场环境、敌方作战意图和机动性能等因素,分析确定当前战场事件发生的深层原因,得到敌方兵力结构、作战方式和兵力意图,最终形成敌对双方战场综合态势图,包括己方态势的红色视图,敌方态势的蓝色视图,天气、地理等战场环境态势的白色视图,它们共同合成一幅战场综合态势图,并为威胁估计提供依据。

态势评估不仅给出具有实际意义的评估形式,还能够对抗敌方采取的诸如伪装、隐藏和欺骗在内的破坏手段,帮助指挥员做出正确的判断。理想的态势评估能够反映真实的战场态势,提供事件活动的预测,并能够提供有效管理战场多种信息获取传感器的依据。因此,态势评估在现代战争中起着十分重要的作用。

5. 威胁评估

态势评估是针对已发生和正在发生的战场区域内的事件。威胁评估(Threat Assessment, TA)是在态势评估的基础上,综合敌方破坏能力、机动能力、运动模式及行为企图的先验知识,得到敌方兵力的战术含义,估计出作战事件出现的程度和严重性,并对敌方作战意图做出判断、指示和告警。威胁评估的重点在于对敌方作战能力和己方兵力有效对抗敌方的能力进行有效的定量表示,估计出己方薄弱环节、敌方意图和风险与致命性评估。

需要指出的是,态势评估与威胁评估并没有统一的定义,在某些时候,也统一称为态势与威胁评估(Situation and Threat Assessment, STA)。它是敌对世界的战场中的高层次信息处理过程,是非常复杂的专家系统。

在上述功能模型描述中,前三个层次的信息融合适用于任意的多传感器信息融合系统,而后两个层次主要适用于军事应用信息融合系统。因此也有学者(如 Hall 和 Wallz 等人^[1,2,6])把多传感器信息融合分为三级,即前三个层次统一作为一级,称为位置属性级融合,是其他融合系统的基础。

1.2.2 信息融合系统的功能模型

图 1-1 是信息融合系统五级分级方法的功能框图。

第一级处理是信号处理级的信息融合,是一个分布检测问题。它通常是根椐所选择的检测准则形成最优化门限,以产生最终的检测输出。它需要根据观测时间、报告位置、传感器类型、信息的属性和特征来进行预滤波,分选归并数据以控制进入第二级处理的信息量,避免信息过载。同时采取数据采集管理控制融合的数据收集,包括传感器的选择、分配及传感器工作状态的优选和监视等。通过传感器任务分配要求预测动态目标的未来位置,计算传感器的指向角,规划观测和最佳资源利用。近几年的研究集中在:传感器向

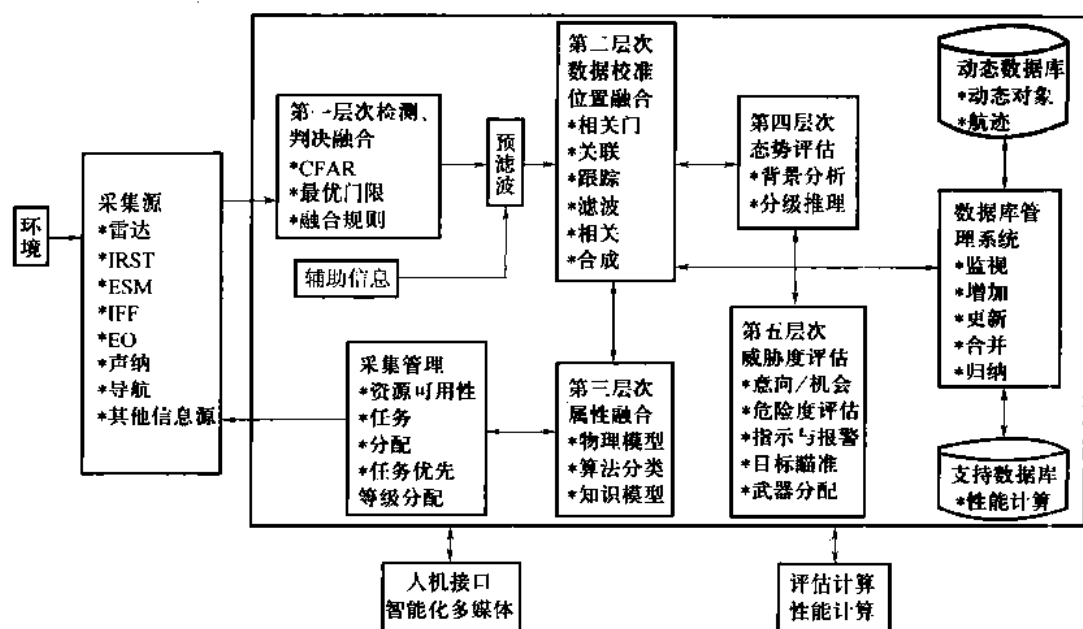


图 1-1 信息融合系统五级分级方法功能框图

融合中心传送经过某种处理的检测信号和背景杂波统计量,然后在融合中心直接进行分布式恒虚警(CFAR)检测等。

第二级处理是为了获得目标的位置、速度、姿态、时间等空间状态信息,通过综合来自多传感器的运动状态信息建立目标的航迹和数据库等。常见的融合包括数据校准、互联、跟踪、滤波、预测、航迹关联及航迹融合等。

第三级处理是属性信息融合,它是指对来自多个传感器的目标属性数据进行组合,以得到对目标身份的联合估计。用于目标识别融合的数据包括雷达横截面积(RCS)、脉冲宽度、重复频率、红外谱或光谱等。

第四级处理包括态势的提取与评估。前者是指由不完整的数据集合建立一般化的态势表示,从而对前几级处理产生的兵力分布情况有一个合理的解释;后者是通过对复杂战场环境的正确分析和表达,导出敌我双方兵力的分布推断,绘出意图、告警、行动计划与结果。

第五级是威胁程度处理。即从己方有力打击敌方的能力出发,估计敌方的杀伤力和危险性,同时还要估计己方的薄弱环节,并对敌方的意图给出提示和告警。

辅助功能包括数据库管理、人机接口与评估计算,它们也是融合系统的重要组成部分。

从处理对象的层次上看,第一级属于低级融合,它是经典信号检测理论的直接发展,是近十几年才开始研究的领域,目前绝大多数多传感器信息融合系统还不存在这一级,仍然保持集中式检测,而不是分布式检测,但是分布式检测是未来的发展方向。第二和第三级属于中间层次,是最重要的两级,它们是进行态势评估和威胁估计的前提和基础。实际上,融合本身主要发生在前三个级别上,而第四和第五级是决策级融合,即高级融合,态势评估和威胁估计只是在某种意义上与信息融合具有相似的含义^[1]。它们包括对全局态