

模糊目标跟踪理论与方法

李良群 谢维信 李鹏飞◎著



科学出版社

模糊目标跟踪理论与方法

李良群 谢维信 李鹏飞 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍模糊数学理论在目标跟踪中的应用。本书针对目标跟踪各个环节中出现的重点难点问题,基于模糊信息处理,提出了具体有效的模糊解决方案。主要内容包括:目标跟踪的基本理论、模糊基础理论、模糊状态估计理论、模糊航迹起始、模糊机动目标跟踪、模糊数据关联、模糊联合概率数据关联滤波器和模糊航迹关联等。

本书适合智能信息处理、模糊信息处理、传感器网络、多源信息融合、模式识别、目标跟踪等领域的科技工作者阅读,也可作为相关专业高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模糊目标跟踪理论与方法/李良群,谢维信,李鹏飞著. —北京:科学出版社,2015.2

ISBN 978-7-03-043499-9

I. ①模… II. ①李…②谢…③李… III. ①模糊数学-目标跟踪-理论研究 IV. ①0159

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039284 号

责任编辑:张艳芬 高慧元 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:335 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目标跟踪技术作为信息融合理论的一个重要分支和关键难点问题,引起了大量学者的广泛关注。经过几十年的发展,目标跟踪技术取得了长足的进步,在军事和民用领域都得到了广泛的应用,并取得了卓有成效的研究成果。随着信息化程度的提高,目标监视手段越来越多样化,人们对空中、地面的监视安全要求也越来越高,对目标跟踪技术的发展不断提出新的要求,这必将进一步促进目标跟踪技术的快速发展。

目标跟踪过程就是估计目标在当前时刻和未来任一时刻状态的过程。目标数、观测、目标运动模型的不确定性决定了目标状态估计过程具有很大的不确定性,或称为模糊性。对于不确定性问题的研究,概率和统计学方法起了不可估量的作用,然而,概率统计处理方法也有其局限性。例如,专家经验、知识等语言信息在实际的目标跟踪中都是非常重要的,而对其用概率统计的方法并不能有效处理。由此,为处理此类模糊信息,1965年,著名控制论专家 Zadeh 在 *Information and Control* 上发表开创性的论文 *Fuzzy sets*,提出了模糊集的概念。由于模糊数学在处理复杂系统特别是有人干预的系统方面的简捷与有力,在某种程度上弥补了经典数学与统计数学的不足。几十年来,模糊数学在理论上进一步完善,已广泛应用于社会的各个领域。

本书紧密围绕目标跟踪技术的研究热点,系统地介绍了模糊理论在目标航迹起始、状态估计、机动目标跟踪、数据关联和航迹关联中的应用,提出了一系列实际可行的解决方法。全书共 8 章,主要内容安排如下:

第 1 章,简要介绍目标跟踪的基本理论,对目标跟踪技术的研究现状进行分析和总结;重点分析模糊目标跟踪方法的研究现状以及发展趋势,并对主要的模糊数据关联方法进行分类、性能对比和评价。

第 2 章,介绍模糊数学理论的一些基本概念、性质,包括模糊集合、模糊关系、模糊相似性度量、模糊逻辑与模糊推理、模糊综合评判以及模糊聚类分析等内容。

第 3 章,基于模糊推理技术,提出两种模糊 α - β 滤波算法和一种模糊卡尔曼滤波算法;基于 T-S 模型,提出一种并行的模糊卡尔曼滤波算法;针对非均匀稀疏采样环境下目标跟踪中的非线性滤波问题,提出一种模糊积分粒子滤波算法。

第 4 章,提出一种基于 Hough 变换与均值漂移的模糊航迹起始方法,定义模糊影响因子来设计均值漂移算法的核函数,并将该方法通过仿真实验进行验证。针对异类传感器航迹起始的特点,介绍一种基于量测合成的模糊航迹起始算法。

第5章,首先介绍五种典型的目标运动模型;针对非均匀稀疏采样环境下的被动机动目标跟踪问题,基于模糊逻辑推理,提出一种新的自适应 α - β 滤波算法;针对杂波环境中被动机动目标跟踪的实时性问题,提出交互多模型最大熵模糊概率数据关联滤波器;利用模糊聚类方法对观测数据的内在机制进行识别,提出一种在线数据驱动的模糊机动目标跟踪方法。

第6章,基于模糊聚类和模糊推理理论,提出多种模糊数据关联方法,分别包括:基于多模糊C均值聚类的数据关联算法和可能性模糊数据关联算法;一种航向信息辅助的模糊多目标数据关联滤波算法;一种被动传感器系统的模糊-概率双加权数据关联算法;光学观测数据的模糊综合关联方法;一种ADS-B数据与雷达航迹数据的直觉模糊数据关联方法。

第7章,对利用模糊数学来解决JPDAF中关联概率的计算问题进行研究,包括利用模糊聚类来近似计算JPDAF中关联概率问题,如全邻模糊JPDAF、混合模糊JPDAF、MEF-JPDAF、IF-JPDAF1和IF-JPDAF2;利用模糊推理技术来计算JPDAF中的关联概率,解决雷达/红外异类传感器的目标观测互联问题。

第8章,介绍一种基于模糊C均值聚类的航迹关联与融合方法;提出一种模糊快速航迹起始算法。

本书反映了模糊数学在目标跟踪研究领域的国内外最新动态,书中许多内容是作者及团队的最新研究成果,其中部分研究结果还没有正式发表。在本书出版之际,要特别感谢深圳大学ATR国防科技重点实验室的黄敬雄、喻建平、黄建军、裴继红、刘宗香等;特别感谢深圳大学曹文明、范恩、原泽峰、王永林、易正龙、侯超,防空兵学院王世军和魏冬峰等,正是由于他们的共同努力,本书才能够顺利出版。

本书得到了国家自然科学基金项目(61301074,61271107)、国家科技支撑计划项目(2011BAH24B12)、国防预研基金项目(9140C800501140C80340)、广东省自然科学基金项目(S2012010009417)、深圳市科技计划项目(JCYJ20130329105816574)等的资助,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

作者
2014年8月
于深圳大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目标跟踪基本理论	1
1.1.1 信息融合	1
1.1.2 目标跟踪基本原理	2
1.1.3 多目标跟踪问题的数学描述	3
1.2 目标跟踪技术的研究现状	5
1.2.1 信息融合技术的研究现状	5
1.2.2 航迹起始的研究现状	6
1.2.3 状态估计技术的研究现状	6
1.2.4 数据关联技术的研究现状	7
1.3 模糊目标跟踪方法及分类	8
1.3.1 模糊目标跟踪方法	8
1.3.2 模糊数据关联方法分类	10
1.4 小结	13
参考文献	13
第 2 章 模糊理论基础	18
2.1 引言	18
2.2 模糊集合理论	19
2.2.1 普通集合	19
2.2.2 模糊集合	21
2.2.3 模糊集合与普通集合之间的关系	25
2.2.4 凸模糊集与模糊数	27
2.3 模糊关系	29
2.3.1 模糊关系的概念	30
2.3.2 模糊关系的矩阵表示	32
2.3.3 扩展原理	33
2.3.4 模糊关系合成	33
2.3.5 模糊相似关系和等价关系	35
2.4 模糊相似性度量	36

2.4.1	模糊集之间的距离	37
2.4.2	贴近度	38
2.4.3	模糊相似度	40
2.5	模糊推理与语言变量	42
2.5.1	模糊命题及蕴涵式	42
2.5.2	模糊推理	45
2.5.3	语言变量	50
2.6	模糊综合评判	54
2.6.1	模糊综合评判的基本概念	54
2.6.2	一级模糊综合评判	55
2.6.3	多级模糊综合评判	58
2.7	模糊聚类分析	59
2.7.1	基于模糊等价关系的聚类方法	60
2.7.2	基于目标函数的模糊聚类方法	64
2.8	小结	67
	参考文献	68
第3章	模糊状态估计理论	69
3.1	参数估计理论基础	69
3.2	基本滤波器	72
3.2.1	α - β 滤波器	73
3.2.2	卡尔曼滤波器	75
3.2.3	无迹卡尔曼滤波器	80
3.2.4	粒子滤波器	82
3.3	模糊自适应 α - β 滤波器	84
3.3.1	稳定性分析及 α 参数选取规则	85
3.3.2	目标机动分析	86
3.3.3	基于模糊逻辑规则的 α 、 β 参数选取	87
3.3.4	实验结果及分析	90
3.4	模糊卡尔曼滤波器	92
3.4.1	卡尔曼滤波器稳定性分析	92
3.4.2	基于模糊逻辑规则的过程噪声协方差估计	93
3.4.3	实验结果及分析	95
3.5	基于 T-S 模糊模型的卡尔曼滤波器	96
3.5.1	T-S 模糊模型	97
3.5.2	基于 T-S 模糊模型的卡尔曼滤波	98

3.6 模糊积分粒子滤波器	99
3.6.1 系统模型	100
3.6.2 高斯-埃尔米特积分规则	101
3.6.3 模糊积分粒子滤波	101
3.6.4 算法讨论	106
3.6.5 实验结果及分析	107
3.7 小结	108
参考文献	109
第4章 模糊航迹起始	111
4.1 Hough 变换的基本理论	111
4.1.1 Hough 变换原理	111
4.1.2 Hough 变换的检测步骤	113
4.1.3 Hough 变换在航迹起始中的应用	114
4.2 基于 Hough 变换与均值漂移的模糊航迹起始	115
4.2.1 均值漂移算法的基本理论	116
4.2.2 模糊影响因子的选取	118
4.2.3 算法流程	121
4.2.4 仿真分析	121
4.3 异类传感器合成量测的模糊航迹起始方法	124
4.3.1 建立候选目标量测集	124
4.3.2 异类传感器的模糊航迹起始	126
4.3.3 仿真分析	128
4.4 小结	130
参考文献	131
第5章 模糊机动目标跟踪	133
5.1 目标运动模型	133
5.1.1 匀速和匀加速运动模型	133
5.1.2 Singer 运动模型	134
5.1.3 “当前”统计模型	136
5.1.4 转弯运动模型	137
5.2 基于模糊逻辑的自适应机动目标跟踪	137
5.2.1 模糊输入变量	138
5.2.2 模糊推理	139
5.2.3 自适应调整因子 ρ 的选取	141
5.2.4 实验结果及分析	142

5.3 被动传感器阵列基于模糊聚类的机动目标跟踪	144
5.3.1 问题描述	144
5.3.2 IMM-MEFPDAF	145
5.3.3 实验结果及分析	149
5.4 基于在线数据驱动的模糊机动目标跟踪	152
5.4.1 模糊聚类算法	152
5.4.2 模糊推理机制	154
5.4.3 模糊目标跟踪	155
5.5 小结	156
参考文献	156
第6章 模糊多目标量测-航迹数据关联	158
6.1 数据关联基础理论	158
6.1.1 时间对准	159
6.1.2 空间对准	161
6.1.3 关联波门	161
6.1.4 数据关联的一般步骤	163
6.2 基于模糊聚类的数据关联	163
6.2.1 模糊C均值聚类数据关联算法	163
6.2.2 多模糊C均值聚类数据关联算法	165
6.2.3 可能性模糊数据关联算法	167
6.3 航向信息辅助的模糊多目标数据关联	170
6.3.1 航向角的定义及求解	171
6.3.2 模糊逻辑推理的多目标数据关联	172
6.3.3 实验结果及分析	177
6.4 被动传感器系统模糊概率双加权数据关联算法	178
6.4.1 被动传感器的量测模型	178
6.4.2 模糊-概率双加权数据关联算法	179
6.4.3 算法讨论	183
6.4.4 实验结果及分析	184
6.5 光学观测数据的模糊综合关联算法	186
6.5.1 算法流程	186
6.5.2 关联预处理	187
6.5.3 模糊综合关联	189
6.6 ADS-B数据和雷达航迹的直觉模糊数据关联算法	191
6.6.1 直觉模糊集理论	192

6.6.2	关联预处理	192
6.6.3	模糊直觉指数的计算	195
6.6.4	各属性的模糊决策分数计算	196
6.6.5	多属性加权决策数据关联	198
6.7	小结	199
	参考文献	199
第 7 章	模糊联合概率数据关联滤波器	201
7.1	PDAF 和 JPDAF	201
7.1.1	PDAF	201
7.1.2	JPDAF	204
7.2	全邻模糊 JPDAF	211
7.2.1	模糊关联隶属度的计算	211
7.2.2	状态及协方差更新	212
7.3	基于模糊推理的 JPDAF	213
7.3.1	观测模型	213
7.3.2	模糊数据关联	213
7.3.3	雷达/红外串行融合估计	216
7.4	混合模糊 JPDAF	218
7.4.1	模糊 C 均值聚类算法	218
7.4.2	基于目标跟踪的模糊聚类方法	219
7.4.3	冲突情况的处理	222
7.4.4	混合模糊 JPDAF 算法	224
7.5	最大熵模糊 JPDAF	224
7.5.1	最大熵模糊聚类	225
7.5.2	单目标跟踪	225
7.5.3	多目标跟踪	226
7.5.4	差异因子的选择	228
7.5.5	实验结果及分析	230
7.6	直觉模糊联合概率数据关联滤波器	234
7.6.1	直觉模糊集的构造	234
7.6.2	基于直觉模糊点算子的关联度计算	235
7.6.3	IF-JPDAF1 和 IF-JPDAF2	238
7.6.4	实验结果及分析	241
7.7	小结	247
	参考文献	247

第 8 章 模糊航迹关联	249
8.1 航迹关联基础	249
8.1.1 航迹融合结构	249
8.1.2 统计关联方法	250
8.2 模糊航迹关联及融合方法	252
8.2.1 问题的提出	252
8.2.2 模糊航迹关联	253
8.2.3 航迹融合	256
8.2.4 实验结果及分析	257
8.3 模糊快速航迹关联算法	258
8.3.1 最小标准化距离最近邻分配策略	258
8.3.2 模糊数据关联	259
8.3.3 航迹融合	260
8.3.4 实验结果及分析	261
8.4 小结	266
参考文献	266

第 1 章 绪 论

1.1 目标跟踪基本理论

1.1.1 信息融合

近年来,信息融合在军事和民用领域都得到了广泛的重视,并取得了卓有成效的研究成果^[1-3]。在军事方面,信息融合的应用包括自动目标识别、自动武器制导、遥感、战场监视、对空侦察预警以及自动威胁识别和态势评估等。现在各国的军方、跨国公司、科研院所已经开发出许多极具军事价值的应用系统。例如,美国国防部(United States Department of Defense, DoD)及相关研究机构开发的海洋监视系统、支持海军舰艇编队作战行动的反潜系统以及舰载武器自动制导系统。上述系统所用的传感器包括雷达、声呐、电子情报系统、红外传感器和合成孔径雷达。另外,美军正在试验新型情报信息处理系统。该系统对信息源几乎没有任何限制,可接收来自无人机、E-8C 预警机、RC-135 等平台上光电、合成孔径雷达、信号情报侦察装置等各种传感器的实时信息,将它们处理成对作战官兵有用的信息,并以很快的速度和很高的精度发送给用户。美国阿拉巴马大学信息技术与系统中心研制的异类传感器组网防空预警系统将二值传感器、测角传感器和三坐标雷达进行组网,构成四层分级传感器网络,采用并行数据融合处理方式对空中目标进行探测、跟踪,实现了大范围、全天候、高精度的对空预警。

信息融合理论就是研究对传感器获取的不确定性信息进行综合处理及应用的理论和方法,它运用计算机技术对获得的传感器信息在一定准则下进行检测、关联、跟踪、估计和综合等处理,以更高的精度和对所关心目标更加完备的描述得到人们所需要的目标状态和身份估计,并为相关人员提供估计与决策信息。

信息融合系统按照信息抽象可以分为五个层次,即检测级融合、位置级融合、属性级融合、态势评估与威胁估计。位置层和属性层是两个最重要的基本层次,也是信息融合系统的关键和核心;而位置级融合又是属性级融合的前提和基础,它直接在传感器的观测报告或测量点迹和传感器的状态估计上进行融合,包括时间和空间上的融合,是跟踪级的融合。

信息融合的常用理论和方法有: k/n 规则、贝叶斯准则、证据推理方法、模糊积分融合方法、确定性理论、神经网络方法等^[4]。

1.1.2 目标跟踪基本原理

目标跟踪技术是信息融合理论的重要组成部分,也是信息融合理论中的一个难点问题。目标跟踪过程可以定义为估计目标在当前时刻(滤波)和未来(预测)任一时刻状态的过程。目标状态一般包括各种各样运动的或描述性的参数,通常,运动参数在目标跟踪中具有最重要的意义。要准确对目标运动参数进行估计,目标运动模型的不确定性和量测的不确定性是状态估计需要解决的两个难点问题。由于大多数有意义的目标通常是非协同目标,没有预定轨迹,而且其行为不能用绝对置信度建模,存在着目标建模的不确定性,一旦实际目标轨迹与假设运动模型不一致,就会产生很大的跟踪误差。量测不确定性存在的原因有:量测作用点不能总是正确地确定,而且量测含有噪声。

图 1.1.1 给出了目标跟踪基本原理图。可以看出多目标跟踪主要包括以下几个功能要素:数据关联、跟踪维持(机动识别、自适应滤波)、跟踪起始与终结、跟踪波门规则、目标状态估计等。

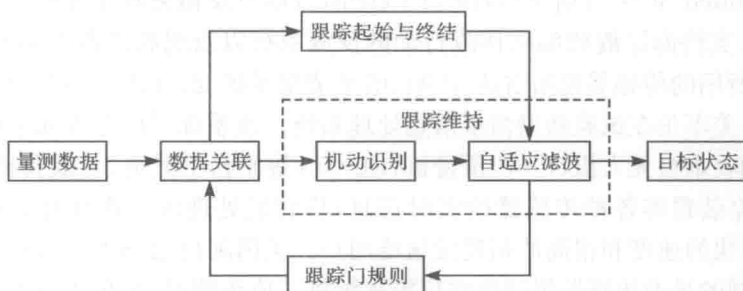


图 1.1.1 目标跟踪基本原理

1. 目标运动模型

目标运动模型是多目标跟踪技术研究的一个重要内容。近二十年来,不少学者对模型问题进行了深入的研究,典型的目标运动模型包括微分多项式模型、CV与CA(匀速与匀加速)模型、时间相关模型、半马尔可夫模型、Noval 统计模型以及机动目标当前统计模型等。然而,现在对于目标运动模型新方法的研究已经很少见。文献[5]~[9]对现有的目标运动模型进行了系统的归纳和总结,指出了各模型的优缺点以及它们的一些具体应用。

2. 跟踪起始及终结

多目标跟踪起始与终结是多目标跟踪理论中的两个重要组成部分,也是建立

新档案和消除多余目标档案必不可少的决策环节。一般地,跟踪起始包括假定轨迹初始化和轨迹确定两部分,跟踪终结即轨迹终结。传统的跟踪起始方法有序列概率比检验(SPRT)^[10]、贝叶斯轨迹确定方法(BTC)^[11]、 N 维分配法^[12]、极大似然法及模式匹配技术^[13]。序列概率比检验方法主要用于轨迹确定,属于最近邻(NN)相关方法;由于贝叶斯轨迹确定方法将检测历史和滤波残差信息引入统计决策中,贝叶斯轨迹确定方法优于序列概率比检验方法; N 维分配算法虽然是一种最优的方法,但实现复杂,计算量大。前三种方法一般只适用于稀疏回波环境,对于密集回波环境,必须采用能够同时处理轨迹初始化和轨迹确定的批处理算法,如极大似然法和模式匹配法。

对于跟踪终结方法主要有跟踪波门法、代价函数法和贝叶斯跟踪终结方法。需要注意的是,跟踪终结是跟踪起始问题的逆问题,跟踪起始的某些思想可为求解跟踪终结时所借鉴和采纳。

3. 跟踪波门技术

跟踪波门是跟踪空间中的一块子空间,其大小由接收正确回波的概率来确定。跟踪波门的形成既是限制不可能决策数目的关键环节,又是维持跟踪或保证目标轨迹更新的先决条件。现有的跟踪波门方法主要有矩形跟踪波门、椭圆跟踪波门、扇形跟踪波门等^[3]。

1.1.3 多目标跟踪问题的数学描述

多目标跟踪技术不同于单目标跟踪技术,主要差别在于状态空间模型的不同。在单目标跟踪中目标状态都是针对单个目标建模的,所以检测到的其他目标都被假设为虚警或杂波,这就使得算法在目标交叉或目标靠近时会出现误跟。而对于多目标跟踪算法,由于在观测关联过程中同时考虑了多个目标,在理论上多目标跟踪(MTT)算法能够跟踪近距离目标和交叉目标。通常,假设每一时刻每一观测都有唯一的源,且各目标相互独立。当然也可以松弛这些假设条件,这就可能要以更高的计算需求为代价。

一般来说,目标运动可用一个随机过程或一个确定性过程来模拟, $x(k)$ 为状态矢量, k 表示离散时间。例如,在被动声呐传感器系统中,目标的状态可能包括频率、频率变化率、方位角和方位角变化率,而对于主动雷达系统,目标的状态包括笛卡儿坐标系的位置坐标 (x, y, z) 及速度。对于确定性模型跟踪问题,起始状态一旦确定,目标运动就可完全确定。随机过程模型则要寻找一个描述目标状态的概率密度函数。传感器的观测模型表示观测 $y(k)$ 与目标状态 $x(k)$ 的关系以及观测噪声引起的模型误差。在许多应用中,目标跟踪系统可以认为是一个线性的、离散的高斯马尔可夫系统^[14],状态方程和观测方程可写为

$$x(k+1) = F(k)x(k) + v(k) \quad (1.1.1)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + w(k) \quad (1.1.2)$$

式中, $v(k)$ 和 $w(k)$ 为相互独立的均值为 0、方差分别为 $Q(k)$ 和 $R(k)$ 的高斯白噪声。在给定噪声观测序列 $Y^k = \{y(1), \dots, y(k)\}$ 的情况下, 不考虑数据关联的影响, 利用估计理论就可以得到状态的概率密度函数。当初始状态的均值和协方差都已知时, 就可以用迭代离散卡尔曼滤波求出最后的估计值。实际中, 可利用前几个时刻的观测数据和先验知识去确定目标的初始状态及协方差, 这一过程也就是常说的航迹起始。对于一些非线性系统, 可以用扩展卡尔曼滤波(EKF)或它的变形来对其进行滤波。

实际应用中, 由于虚警或杂波的存在, 所以观测的起源存在模糊性, 即并不清楚传感器接收的观测是否来源于真目标。当多个目标存在或传感器检测概率不为 1 时, 这个问题就显得更加突出。这些因素构成了整个数据关联的模糊性, 它是多目标跟踪中最关键的问题也是最困难的问题。

当存在数据关联的模糊性时, 必须对式(1.1.1)的模型进行修正。用每一时刻接收到的 M_k 个观测矢量 $Y(k) = \{y_1(k), \dots, y_{M_k}(k)\}$ 代替单个观测矢量, 这样观测累积集可定义为 $Y^k = \{Y(1), \dots, Y(k)\}$ 。为了得到状态后验概率密度函数 $p(x(k)/Y^k)$, 定义观测-目标的数据关联假设集 $\lambda_i(k)$ 及运动模型:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F(k)x(k) + v(k) \\ y(k) &= \begin{cases} H(k)x(k) + w(k), & \text{观测来自目标时} \\ \text{杂波}, & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

观测矩阵 $H(k)$ 应根据关联假设条件下检测到目标的实际情况进行修正。对于没有任何不确定性的观测, 关联假设可以有效地划分数数据集。假设先验概率服从高斯分布, 在可能的关联假设 $\lambda_i(k)$ 的条件下, 联合目标状态的后验概率密度函数也是高斯的。由于正确关联假设未知, 可以建立如下的混合高斯概率密度函数形式:

$$p(x(k) | Y^k) = \sum_{i=1}^{N_k} \beta_i N(x(k); \hat{x}_i(k|k), P_i(k|k)) \quad (1.1.4)$$

其中, N_k 为混合高斯模型中高斯函数的个数; $\beta_i(k) = \Pr(\lambda_i(k) | Y^k)$ 为在假设 i 下的关联概率; $N(x; m, P)$ 为多变量的高斯概率密度函数, m 为变量 x 的均值矢量, P 为协方差矩阵; $\hat{x}_i(k|k)$ 为卡尔曼滤波得到的状态估计; $\hat{P}_i(k|k)$ 为状态误差协方差。不幸的是, 用关联假设树来表示所有可能的观测-目标数据关联, 随着时间的增加, 关联假设数目 N_k 通常呈指数增长。因此, 多目标跟踪的最优估计通常是无法实现的, 由此出现了许多次优的方法。

1.2 目标跟踪技术的研究现状

1.2.1 信息融合技术的研究现状

国外的信息融合技术研究起步较早,其中,美国起步最早、发展也最快。1973年,美国就开展了声呐信号理解系统的研究。进入20世纪80年代初,信息融合技术逐渐受到军方的重视,以军事应用为主的信息融合技术研究蓬勃发展起来。现在已经研制出了上百种军事信息融合系统,例如,辅助空中作战命令分析专家系统(DAGR)、国家导弹防御系统(national missile defence, NMD)和区域导弹防御系统(territorial missile defence, TMD)等。在学术方面,从1987年起,美国军方每年召开 National Symposium on Sensor Fusion 学术会议,与此同时,IEEE 系统和控制论会议,IEEE 航空航天与电子系统会议,IEEE 自动控制会议,IEEE 指挥、控制、通信和信息管理系统(C³MIS)会议,国际军事运筹学会议,国际雷达、控制与判决、信号处理等会议,也不断地报道信息融合领域的最新研究和应用开发成果。为了推动信息融合技术的发展及学术交流,学术界在1998年成立了国际信息融合学会(ISIF),并每年举办一次国际学术会议,作为该领域研究成果的系列总结。在期刊方面,IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Signal Processing, IEEE Transactions on Automatic Control, IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, Journal of Information Science 上经常发表有关信息融合及目标跟踪的论文。自1985年以来,国外出版了10余部有关信息融合的学术专著。其中, Hall 和 Linas 编著的《多传感器信息融合手册》^[14]、Waltz 和 Linas 的《多传感器信息融合》^[15]以及 Hall 的《多传感器信息融合中的数学技术》^[16]等对信息融合研究的内容、应用进行了全面、系统的阐述。

国内在信息融合方面的研究相对较晚。20世纪80年代初,人们开始从事信息融合相关的研究,随后有关信息融合技术研究的成果逐年增多。三十多年来,我国信息融合理论及应用不断发展、不断创新,20世纪90年代开始出现信息融合系统的实际应用,随后逐步在军事和民用的众多领域得到推广。信息融合现已成为多学科、多部门、多领域所共同关心的高层次共性关键技术。国防科学技术大学、西安交通大学、西北工业大学、西安电子科技大学、清华大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、深圳大学、中国电子科技集团公司第十四研究所和第二十八研究所等众多科研院所在分布检测融合、机动目标跟踪、被动传感器目标定位、多传感器多目标跟踪、分布融合等领域积极开展理论及应用研究。学术方面,2009年,在烟台召开了全国首届信息融合学术年会。20世纪90年代

以来,周宏仁、敬忠良、杨万海、谢维信、何友、沈正康、韩崇昭等学者及其研究团队在信息融合领域做了大量的工作,且取得了一大批理论研究成果,并且出版了一批信息融合和目标跟踪领域的学术专著和译著,代表性的专著包括《信息融合理论及应用》^[2]、《多源信息融合》^[1]、《多传感器数据融合及其应用》^[3]、《数据融合理论与应用》^[17]、《数据融合技术及其应用》^[18]、《信息融合技术》^[19]、《机动目标跟踪》^[20]、《神经网络跟踪理论及应用》^[21]、《数据融合方法概论》^[22]、《多传感器数据融合手册》^[23]等。

1.2.2 航迹起始的研究现状

航迹起始是多目标跟踪系统需要解决的首要问题。航迹起始伴随着航迹处理的产生和发展。从直观法到逻辑法^[24]再到模拟退火方法^[25];从航迹起始理论方法研究到航迹起始方法的性能评估^[24];从主动传感器到被动传感器,大量学者对航迹起始进行了研究。概括起来,航迹起始算法主要分为顺序处理技术和批处理技术两大类。顺序处理技术适用于相对无杂波环境中的航迹起始,主要包括启发式规则和基于逻辑的方法。批处理技术适用于强杂波环境,主要包括 Hough 变换^[26]及其衍生出来的改进算法。Smith 和 Winter 首次将 Hough 变换用于目标的航迹起始;Carlson、Evans 和 Wilson 结合单搜索雷达这一具体应用背景,对 Hough 变换的航迹起始方法进行了较详细的论述^[27-29],然而经典的 Hough 变换计算量比较大,在实际应用中很难实现。为解决这个问题,四十余年来,许多学者致力于 Hough 变换算法的研究,将随机过程、模糊理论等应用于 Hough 变换,并将分层迭代、级联的思想引入 Hough 变换过程中,大大提高了 Hough 变换的效率。1998 年,Yankowich 等提出了基于 Hough 变换的多目标多传感器航迹起始融合算法^[30]。国内的程洪玮、孙仲康分析了 Hough 变换航迹起始中的两种不同累积方法以及检测概率和虚警概率^[31];王国宏^[32]提出了将 Hough 变换和逻辑相结合的航迹起始方法。

1.2.3 状态估计技术的研究现状

目标跟踪技术是数据融合中非常重要,也是成果颇多的领域。从跟踪目标数量上可以将目标跟踪分为单目标跟踪和多目标跟踪,从目标运动方面可以将目标跟踪分为机动目标跟踪和非机动目标跟踪。多目标跟踪事实上是单目标跟踪算法与数据关联算法相结合的产物,而由于实际跟踪的目标常常是机动目标,因此机动目标跟踪技术是人们研究的热点和重点。20 世纪 70 年代初期,机动目标跟踪理论就引起了人们的广泛关注。Bar-Shalom 和他的学生首次提出了交互多模型(IMM)算法^[33,34],该算法是在广义伪贝叶斯算法基础上发展起来的机动目标跟踪算法,算法假定有限多个目标模型存在,并利用马尔可夫链计算模型转移概率。