

信号与信息处理丛书

多源信息融合

韩崇昭 朱洪艳 段战胜 等著

清华大学出版社

信号与信息处理丛书



多源信息融合

韩崇昭 朱洪艳 段战胜 等著

清华大学出版社

北京

《信号与信息处理丛书》编委会

主 编 李衍达

编 委(排名不分先后)

王宏禹 张贤达 李衍达 何振亚

迟惠生 保 铮 侯朝焕 袁保宗

阎平凡 谭铁牛

责任编辑 陈国新

丛书出版说明

信号与信息处理可以说是信息技术中的核心部分。随着信息科学与工程技术的飞速发展,随着信息技术深入到各个领域而得到广泛的应用,信号与信息处理也作为前沿技术而发生着重大的变化。编辑出版“信号与信息处理丛书”正是为了反映这种变化,为了加速培养这方面的人才,也为了进一步推动这一领域的发展。本丛书的内容力求能反映信号与信息处理技术的前沿内容,具有高的学术意义与应用价值。入选的书稿可以是创作的专著,也可以是高水平的译作。

这套丛书不仅适合于研究生教学,也可作为高校教师与有关领域研究人员学习与工作的参考书。

从历史来看,真正影响着生活的是不断增长的知识与技术的积累和经反复探索所形成的观念。相信这套丛书的出版,会增加正在成长中的信号与信息处理技术的积累,而它对生活的作用则是显而易见的。

李衍达

2004年8月24日



序

PREFACE

在经历了农业时代和工业时代之后,人类目前已经全面进入了信息时代。信息时代的显著特征之一是信息爆炸。为了应对这种局面,信息融合技术应运而生。简单地说,信息融合是指对多个载体内的信息进行综合、处理以达到某一目的。信息融合涉及面极为广泛。举例来说,归纳可以看作一个信息融合过程,其中一般性结论即由多个特殊事例经过综合、抽象后得到。因此,归纳推理与信息融合有本质联系,而归纳推理又是所有科学技术的源泉。近年来信息融合在众多领域内受到了极大的关注,信息融合技术发展神速。

本书由西安交通大学韩崇昭教授等人编撰,韩教授所领导的教研组的工作在国内颇负盛名。我与他相识多年,近年来曾多次互访并合作发表文章。

据我所知,在信息融合领域的各种中文书籍中,本书非常系统、全面,而且内容较为新颖。作者在如此短的时间内能写成本书给我留下了深刻的印象。这与祖国近二十年来经济的飞速增长是步调一致的。

本书还有几个非常重要和吸引人的特点。令我印象最为深刻之一的是它涵括了一大批数学工具的基础知识,其中包括随机集理论、粗糙集理论、粒子滤波、统计学习理论等。这些数学工具近年来开始广为流行,它们在信息融合领域大有前途。另一个特点是它对信息融合领域近年来的一些新进展做了介绍,这包括由我本人与合作者在过去几年中所建立的最优线性估计融合理论的部分结果。本书涵括了信息融合领域中许多重要而有代表性的内容,几乎所有这些内容都属于目前信息融合研究领域的主流。仅此即足以表明本书优于我所知道的大多数关于信息融合的中文书籍。总的来说,本书的内容安排合理,结构组织良好,选题平衡。尽管本书的深度不尽如意,但它仍比该领域大多中文书籍明显要好。

作为一个信息融合领域的研究人员,多年来我一直致力于推动祖国在该领域的科研工作。我很高兴地看到在过去几年中国内信息融合的研究和开发工作大有进展。当然,不足之处也很明显。总的来说,科研工作仍然缺乏广度和深度,尤其是在基础研究方面。就我所知,原创性和高质量的研究成果不多。我相信本书的出版为有志于从事信息融合的国内读者提供了入门基础,同时它也有助于国内的研究开发人员了解信息融合领域的新进展。鉴于此,本书的出版定将大受欢迎。

李晓榕(X. Rong Li)

2005年6月于美国新奥尔良



前言

FOREWORD

中国古代“瞎子摸象”的故事告知人们,单凭一种感官获得的感知信息,难以获得对客观事物的全面认识。世间万物在不断变化,而人类感知和认知事物的能力却受到许多限制。唐初谏议大夫魏征曾有一句名言:“兼听则明,偏听则暗”,说的是采纳各种不同的意见作决策往往是明智的,而偏信一家之言则难免有失偏颇。人类和动物在获得客观对象的感知信息时,不是使用一种感官,而是用各种不同的感官,包括视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉等感官获得不同的感知信息,经过大脑处理之后才形成一个完整的认知结果。同样,在社会和经济活动中,负责任的政府和企业 在决策时也要收集大量的情报资料,汇集不同的观点,才能制定出符合客观规律的决策。

随着信息科学技术的发展,在 20 世纪七八十年代产生了一个称为“数据融合”的全新概念。也就是说,把多种传感器获得的数据进行所谓“融合处理”,可以得到比任何单一传感器所获得数据更多的有用信息。后来,这一概念不断扩展,要处理的对象不仅是数据,也包括图像、音频、符号等,于是形成了一种共识的概念,谓之“多源信息融合”。这一领域的发展是惊人的,自 20 世纪 80 年代以来,世界各国都投入大量的人力、物力从事多源信息融合理论与应用的研究,其原因在于这一学术观点不仅符合客观的认知规律,而且被实践证明是一项广泛适用的新技术,包括军事和民用高科技的应用。

我们开展这个领域的研究好多年了,已经形成了一个专门从事多源信息融合基础理论研究的团队,而且得到国家 973 项目的支持,在理论研究和工程应用方面取得了重要的进展。但在研究工作中,我们深感多源信息融合理论体系的庞杂和繁复。幸好多年来我们一直与国际著名信息融合专家、美国新奥尔良大学李晓榕教授(Prof. X. Rong Li)进行合作研究,并多次邀请其他国际著名学者来华讲学,我们也多次到国外进行合作研究,同时近年来每年都参加国际信息融合大会,对该领域的最新进展比较了解。所以不揣冒昧,我们在 973 项目的支持下承担了撰写本书的使命。

我们的理念是希望更多地介绍促进多源信息融合赖以急速发展的理论基础和工程应用背景,以及各个理论分支形成的脉络和体系。希望本书在科学体系方面真正成为一本有价值的专著,而且也能够为广大读者提供比较详尽的参考资料。我们参阅了国内外大量的文献资料,汇集了我们近年来的研究成果,不避酷暑严寒,不辞辛苦,奋力笔耕,数易其稿,终于将本书呈献给广大读者。

全书共分为12章。第1章绪论介绍这个领域的基本概念,由朱洪艳执笔;第2章和第3章分别介绍多源信息融合理论赖以发展的基础理论:统计推断与估计理论基础,以及智能计算与识别理论基础,由韩崇昭执笔;第4章重点介绍多源信息融合的重要应用领域——目标跟踪,由朱洪艳和段战胜执笔;第5章专门介绍检测融合,由相明执笔;第6章介绍多源信息融合的一个核心内容——估计融合,由段战胜执笔;第7章是多源信息融合的另一核心内容——数据关联,由朱洪艳执笔;第8章介绍异步信息融合,由段战胜执笔;第9章介绍图像融合,由侯志强、康欣执笔;第10章介绍异类信息融合,由韩崇昭执笔;第11章是一个典型应用——智能交通与信息融合,由党宏社执笔;第12章简单介绍了态势评估与威胁估计,由于昕执笔。同时,郑林、左东广、韩红、孙亮、李辉、郭文艳、陈宇玺等也为本书提供了许多有价值的素材。最后,由韩崇昭对全书进行了仔细的统编和校核,并进行了统一编目。

本书初稿还承蒙李晓榕教授仔细审阅,并提出了许多有价值的修改意见,我们深表感谢。我们也感谢973首席科学家、复旦大学金亚秋教授一直鼓励和支持本书的编写。西安交通大学校长郑南宁院士对本书的出版一直表示关切,清华大学吴澄院士和萧德云教授也一直鼓励我们完成本书,在此一并致谢。同时我们也感谢所有关心本书出版的各位专家学者。

本书理论体系完整,材料取舍得当,适合从事多源信息融合理论研究和工程应用的专业技术人员参考,也可供对该领域感兴趣的大学本科高年级学生和研究生学习参考。

尽管我们做出了最大的努力,但由于该书内容浩瀚,错误和不妥之处在所难免。希望广大读者不吝赐教,我们将深表谢意。

作 者

2006年1月于西安交通大学

本书符号约定

k : 时间指标, k 时刻

x_k : k 时刻系统真实一维状态

\mathbf{x}_k : k 时刻系统真实多维状态

z_k : k 时刻对状态的一维量测

\mathbf{z}_k : k 时刻对状态的多维量测

u_k : k 时刻系统的控制输入

F_k : k 时刻线性系统状态转移矩阵

G_k : k 时刻线性系统过程噪声矩阵

Γ_k : k 时刻线性系统控制输入权矩阵

w_k : k 时刻线性系统过程噪声

Q_k : k 时刻线性系统过程噪声协方差矩阵

H_k : k 时刻线性系统量测矩阵

v_k : k 时刻线性系统量测噪声

R_k : k 时刻线性系统量测噪声协方差矩阵

Z^k : 直到 k 时刻的所有量测

$\hat{x}_{k|k}$: k 时刻系统状态估计值

$\tilde{x}_{k|k}$: k 时刻系统状态的估计误差

$P_{k|k}$: k 时刻系统状态估计误差的协方差阵

$\hat{x}_{k+1|k}$: k 时刻系统状态的提前一步预测

$P_{k+1|k}$: k 时刻系统状态提前一步预测误差的协方差阵

$\hat{z}_{k+1|k}$: k 时刻系统量测的提前一步预测

$\tilde{z}_{k+1|k} = z_{k+1} - \hat{z}_{k+1|k}$: k 时刻系统的量测新息

S_k : k 时刻系统新息的协方差阵

K_k : k 时刻系统的滤波增益

$P(x)$: 随机向量 x 的分布函数

$P(x|y)$: 给定 y 的条件下随机向量 x 的条件分布函数

$p(x)$: 随机向量 x 的概率函数

$p(x|y)$: 给定 y 的条件下随机向量 x 的条件概率密度函数

$p(x, y)$: 随机向量 x, y 的联合概率

$E(x)$: 随机向量 x 的期望

$E(x|y)$: 给定 y 的条件下随机向量 x 的条件期望

$\text{cov}(x)$: 随机向量 x 的协方差阵

$\text{cov}(x, y)$: 随机向量 x 与 y 的协方差阵

$\mathcal{N}(x; m, P)$: Gauss 随机向量 x 密度函数, 具有均值 m 和协方差阵 P

H_0, H_1 : 概率假设

T : 采样间隔

\emptyset : 空集

$\stackrel{\text{def}}{=}$: 定义为

\approx : 近似等于

χ_n^2 : 自由度为 n 的 chi-square 分布

$\delta(\cdot)$: Dirac delta 函数

Δ : 似然函数

P_D : 检测概率

P_{FA} : 虚警概率

\Leftrightarrow : 当且仅当

\vee : 逻辑“或”

\wedge : 逻辑“与”

\propto : 正比于

A^T : 矩阵转置

A^{-1} : 矩阵的逆

A^+ : 矩阵的伪逆

$A > 0$: 正定矩阵

$A \geq 0$: 半正定矩阵

$\text{tr}(A)$: 矩阵的迹

$|A|$: 矩阵的行列式

$x^* = \arg \max_x f(x)$: 使函数 $f(x)$ 极大化的宗量 x

$x^* = \arg \min_x f(x)$: 使函数 $f(x)$ 极小化的宗量 x

\exp : 指数函数

pdf: 概率密度函数

SMTT: 单机动目标跟踪

MMTT: 多机动目标跟踪

CV: 常速

CA: 常加速

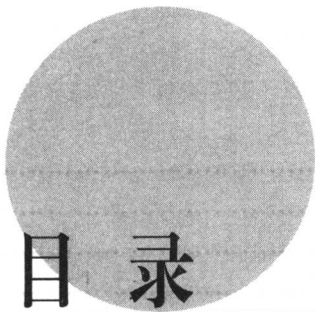
TWS: 边扫描边跟踪

KF: Kalman 滤波

EKF: 扩展 Kalman 滤波

IMM: 交互式多模型

PDA: 概率数据关联
JPDA: 联合概率数据关联
MHT: 多假设跟踪
EM: 期望极大化
MCMC: Markov 链 Monte-Carlo
i. i. d: 独立同分布
RMS: 均方根误差
MMSE: 最小均方误差
MAP: 最大后验概率
LS: 最小二乘
ML: 极大似然
MC: Monte-Carlo
FIM: Fisher 信息矩阵
GPB: 广义伪 Bayes
RLS: 递推最小二乘
WLS: 加权最小二乘
LMS: 最小均方



目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 多源信息融合的一般概念与定义	1
1.1.1 定义	1
1.1.2 多源信息融合的优势	2
1.1.3 应用领域	3
1.2 信息融合系统的模型和结构	4
1.2.1 功能模型	4
1.2.2 数据融合的级别	6
1.2.3 通用处理结构	8
1.3 多源信息融合的主要技术和方法	10
1.4 信息融合要解决的几个关键问题	11
1.5 发展起源、现状与未来	12
参考文献	13
第 2 章 统计推断与估计理论基础	16
2.1 点估计理论基础	16
2.1.1 一般概念	16
2.1.2 Bayes 点估计理论	17
2.1.3 BLUE 估计	19
2.1.4 WLS 估计	19
2.1.5 ML 估计	20
2.1.6 主成分估计	20
2.1.7 RLS 估计与 LMS 估计	23
2.2 期望极大化(EM)方法	25
2.2.1 概述	25
2.2.2 EM 算法描述	26
2.2.3 混合 Gauss 参数估计的 EM 算法实例	27
2.3 线性动态系统的滤波理论与算法	29
2.3.1 离散时间线性系统状态估计问题的一般描述	29
2.3.2 基本 Kalman 滤波器	31

2.3.3	信息滤波器	32
2.3.4	噪声相关的 Kalman 滤波器	33
2.4	非线性动态系统的滤波理论与算法	35
2.4.1	扩展 Kalman 滤波器(EKF)	35
2.4.2	UKF 滤波	38
2.4.3	Bayes 滤波	40
2.5	基于随机采样的过程估计理论与算法	41
2.5.1	传统 Bayes 估计面临的挑战与解决的新思路	41
2.5.2	Monte Carlo 仿真的随机采样	42
2.5.3	Markov chain Monte Carlo 采样	44
2.5.4	粒子滤波的一般方法	48
2.6	混合系统状态估计理论	55
2.6.1	一般描述	55
2.6.2	多模型方法简述	55
2.6.3	定结构多模型估计	57
2.6.4	交互式多模型算法	60
2.6.5	变结构多模型(VSMM)算法概述	62
2.7	小结	66
	参考文献	67

第3章 智能计算与识别理论基础 69

3.1	概述	69
3.1.1	模式识别的一般概念	69
3.1.2	智能学习与统计模式识别	70
3.2	粗糙集理论基础	71
3.2.1	信息系统的概念	71
3.2.2	决策系统的不可分辨性	72
3.2.3	集合近似	73
3.2.4	属性约简	75
3.2.5	粗糙隶属度	80
3.3	证据理论基础	82
3.3.1	概述	82
3.3.2	mass 函数、信任测度与似然测度	82
3.3.3	Dempster-Shafer 合成公式	86
3.3.4	证据推理	88
3.4	随机集理论基础	90
3.4.1	一般概念	90
3.4.2	概率模型	93
3.4.3	随机集的 mass 函数模型	95

3.5	统计学习理论与支持向量机基础	96
3.5.1	统计学习理论的一般概念	96
3.5.2	学习机的 VC 维与风险界	98
3.5.3	线性支持向量机	102
3.5.4	非线性支持向量机	105
3.5.5	用于孤立点发现的 One-class SVM 算法	108
3.5.6	最小二乘支持向量机	108
3.5.7	模糊支持向量机	109
3.5.8	小波支持向量机	110
3.5.9	核主成分分析	111
3.6	Bayes 网络基础	113
3.6.1	Bayes 网络的一般概念	113
3.6.2	独立性假设	114
3.6.3	一致性概率	116
3.6.4	Bayes 网络推断	118
3.7	小结	121
	参考文献	121
第 4 章	目标跟踪	124
4.1	基本概念与原理	124
4.2	跟踪门	126
4.2.1	滤波残差	126
4.2.2	矩形跟踪门	126
4.2.3	椭球跟踪门	127
4.2.4	其他跟踪门	127
4.3	目标动态模型	127
4.3.1	机动目标跟踪的数学模型	127
4.3.2	非机动目标动态模型	128
4.3.3	坐标不耦合的目标机动模型	129
4.3.4	二维水平运动模型	135
4.3.5	三维模型	137
4.4	量测模型	139
4.4.1	传感器坐标模型	139
4.4.2	在各种坐标系中的跟踪	140
4.4.3	混合坐标系的线性化模型	141
4.4.4	笛卡儿坐标系下的模型	144
4.5	雷达量测转换	145
4.5.1	二维去偏量测转换	145
4.5.2	三维去偏量测转换	147

4.5.3	无偏量测转换	149
4.5.4	修正的无偏量测转换	152
4.6	基于雷达量测和 BLUE 准则的目标跟踪	155
4.6.1	基于 BLUE 准则的二维量测转换	155
4.6.2	基于 BLUE 准则的三维量测转换	158
4.7	带 Doppler 量测的雷达目标跟踪	162
4.7.1	极坐标系中带 Doppler 量测的雷达目标跟踪	162
4.7.2	球坐标系中带 Doppler 量测的雷达目标跟踪	167
4.8	时间与空间配准	171
4.8.1	问题描述	171
4.8.2	时间配准算法	172
4.8.3	常用坐标系	173
4.8.4	坐标转换	173
4.8.5	空间配准算法概述	176
4.8.6	二维空间配准算法	177
4.8.7	精确极大似然空间配准算法	180
4.8.8	基于地心坐标系的空间配准算法	184
4.9	小结	188
	参考文献	188
第 5 章	检测融合	193
5.1	概论	193
5.2	并行结构融合系统的最优分布式检测融合算法	195
5.2.1	系统描述	195
5.2.2	最优分布式检测的必要条件	196
5.2.3	传感器观测独立条件下的最优分布式检测	198
5.2.4	实例计算	200
5.3	串行结构融合系统的最优分布式检测融合算法	201
5.3.1	系统描述	201
5.3.2	传感器观测独立条件下最优分布式检测的必要条件	202
5.3.3	传感器观测独立条件下的最优分布式检测	204
5.3.4	实例计算	207
5.4	树形结构融合系统的最优分布式检测融合算法	207
5.4.1	系统描述	208
5.4.2	结点观测独立条件下最优分布式检测的必要条件	209
5.4.3	结点观测独立条件下的最优分布式检测	210
5.4.4	实例计算	213
5.5	分布式量化检测系统	214
5.5.1	系统描述	214

5.5.2	最优分布式量化检测的必要条件	215
5.5.3	传感器观测独立条件下的最优分布式量化检测	217
5.5.4	实例计算	219
5.6	分布式 N-P 检测融合系统	221
5.6.1	最优分布式量化检测的必要条件	221
5.6.2	传感器观测独立条件下的最优分布式检测	223
5.6.3	传感器观测相关条件下的次优分布式检测	224
5.6.4	分布式硬决策 N-P 检测融合系统	226
5.6.5	实例计算	227
5.7	小结	228
	参考文献	229
第 6 章	估计融合	231
6.1	估计融合系统结构	231
6.2	集中式融合系统	233
6.2.1	并行滤波	234
6.2.2	序贯滤波	235
6.2.3	数据压缩滤波	235
6.3	分布式融合系统	238
6.3.1	分布式融合结构	238
6.3.2	航迹融合中各传感器局部估计误差相关的原因	239
6.3.3	简单凸组合融合算法	240
6.3.4	Bar Shalom-Campo 融合算法	241
6.3.5	不带反馈的最优分布式估计融合	245
6.3.6	带反馈的最优分布式估计融合	247
6.3.7	最大后验概率状态估计融合	251
6.3.8	最优的集中式估计的重构	254
6.4	协方差交叉法	257
6.4.1	问题描述	257
6.4.2	相关程度已知的相关估计量最优融合	258
6.4.3	相关程度未知的相关估计量最优融合	260
6.5	联邦滤波器	262
6.5.1	问题描述	263
6.5.2	方差上界技术	263
6.5.3	联邦滤波器的一般结构	266
6.5.4	联邦滤波器的工作流程	266
6.5.5	联邦滤波器的最优性证明	268
6.5.6	联邦滤波器的四种结构	270
6.5.7	联邦滤波器四种结构的比较	273

6.5.8	联邦滤波器的特点	273
6.5.9	联邦滤波器的两种简化形式	274
6.6	最优线性估计融合与统一融合规则	274
6.6.1	问题描述	274
6.6.2	统一线性数据模型	275
6.6.3	对于线性数据模型的统一最优融合规则	277
6.6.4	一般的最优的线性融合规则	284
6.7	小结	286
	参考文献	286
第7章	数据关联	290
7.1	引言	290
7.2	量测-航迹关联算法:经典方法	291
7.2.1	最近邻方法	291
7.2.2	概率数据关联	291
7.2.3	交互式多模型概率数据关联	294
7.2.4	联合概率数据关联	297
7.2.5	多传感联合概率数据关联	303
7.3	量测-航迹关联的其他方法	305
7.3.1	基于粒子滤波的联合概率数据关联	305
7.3.2	多假设方法	307
7.3.3	概率多假设方法	310
7.3.4	基于期望极大化算法的杂波环境下机动目标跟踪	316
7.4	集中式多传感多目标跟踪的广义S-维分配算法	318
7.5	多目标跟踪起始与跟踪终止算法	320
7.5.1	跟踪起始方法	321
7.5.2	跟踪终止方法	325
7.5.3	基于目标可感知性的决策方法	325
7.6	分布式航迹关联	329
7.6.1	基本符号	330
7.6.2	两个传感器之间的航迹关联	330
7.6.3	多传感器之间的航迹关联	332
7.7	小结	334
	参考文献	334
第8章	异步融合	338
8.1	异步融合的一般概念	338
8.2	顺序量测异步融合	338
8.2.1	问题描述	338