



装备科技译著出版基金



高新科技译丛

Bayesian Estimation and Tracking
A practical Guide

贝叶斯估计与跟踪 实用指南

【美】 Anton J. Haug 著 王欣 于晓 译

WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

贝叶斯估计与跟踪实用指南

Bayesian Estimation and Tracking: A Practical Guide

[美] Anton J. Haug 著

王欣 于晓 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2013-200 号

图书在版编目(CIP)数据

贝叶斯估计与跟踪实用指南 / (美)豪格
(Hang, A. J.) 著;王欣,于晓译. —北京:国防工业
出版社,2014.5

(高新科技译丛)

书名原文:Bayesian estimation and tracking:a
practical guide

ISBN 978-7-118-09321-6

I. ①贝… II. ①豪… ②王… ③于… III. ①贝叶斯
估计-指南②贝叶斯估计-应用-目标跟踪-指南IV.
①0211.67-62②TN953-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第068301号

Authorized translation from the English language edition, entitled Bayesian Estimation and Tracking, ISBN 978-0-470-62170-7, by Anton J. Haug, published by John Wiley & Sons. Copyright © 2012 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

※

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 710×1000 1/16 印张 19¼ 字数 370 千字

2014年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

本书以基本原理为出发点,阐述了贝叶斯估计滤波器的完整的发展历程。书中研究了由高斯噪声和非高斯噪声驱动的线性、非线性动态系统。这里假设动态系统是连续的,因为只有在研究离散滤波器的时候,才会在离散时间对系统进行观测。本书的主要目标是给读者提供过去 60 年来所提出的大部分贝叶斯估计方法的一致性的全面描述,以表明每种以贝叶斯范式为基础的基本思想是如何与条件密度相关的。

学习本书内容需要的预备知识包括线性代数、贝叶斯概率理论以及有限差分 and 插值的数值方法。书中第 2 章介绍了所有这些主题以及掌握书中其它内容所需的基础知识。

书中涵盖的部分内容来自于马里兰大学帕克分校数学系的一门研究生课程。该门课程的主要目的是让学生自己开发目标跟踪算法的 MATLAB 工具箱。课后给学生们提出一些特定的跟踪问题,要求编写一个或多个 MATLAB 子程序来实现某些跟踪方法。一般来说,学生开发的子程序是独立的,并且可以应用于多种难度不大的跟踪问题(例如,纯方位跟踪)。本书不包含任何习题集,使用本书的读者可以根据需要来调整跟踪问题的作业。此外,本书包含 4 个相当复杂的实用案例,使用本书的老师可以选择其中之一作为编码作业的框架。第一个案例贯穿本书的第 II 和第 III 部分;其余的 3 个案例则被分成了单独的章节,构成了本书的第 IV 部分。

本书有两个鲜明特点:①运用大量的表格和图形,给出每种估计方法基本原理的详细推导过程;②每种方法都有非常详细的分步指导,使得跟踪滤波器的编码简单且易于理解。

递推贝叶斯估计可以求解转移函数或变换函数的加权条件密度积分。转移函数反映动态状态向量随时间变化的路径,变换函数将状态向量变换成观测向量。有多种求解积分的数值方法,每种都有不同的估计方法。本书第 II 部分和第 III 部分的每个章节都涵盖求解这些积分的一个或多个数值逼近方法,第 II 部分是高斯加权积分的卡尔曼滤波器方法,第 III 部分是未知密度的加权密度积分的粒子滤波器方法。

本书是作者在此领域多年研究的成果,希望能为贝叶斯估计和跟踪研究做出贡献。同时,也希望在研究改进这些方法并将其应用到新领域、解决新问题的基础上,本书能够开拓贝叶斯估计和跟踪研究的新方向。

Anton J. Haug

目 录

前言	III
----------	-----

第 I 部分 预备知识

第 1 章 简介	3
1.1 贝叶斯推理	4
1.2 贝叶斯层次估计法	4
1.3 本书研究范畴	5
1.3.1 目标	5
1.3.2 章节概述	6
1.4 用 MATLAB® 进行建模和仿真	7
参考文献	8
第 2 章 数学基础	9
2.1 矩阵线性代数简介	9
2.1.1 矢量与矩阵的约定与记法	9
2.1.2 和与乘积	10
2.1.3 矩阵的逆	11
2.1.4 分块矩阵的逆	11
2.1.5 矩阵的平方根	12
2.2 矢量点发生器	12
2.3 多参数多维非线性函数估计	15
2.3.1 标量非线性函数估计	15
2.3.2 多维非线性函数估计	18
2.4 多变量统计概述	23
2.4.1 一般定义	23
2.4.2 高斯密度	25
参考文献	31

第3章 贝叶斯估计的基本概念	33
3.1 贝叶斯估计	33
3.2 点估计式	34
3.3 基于概率密度函数的递推贝叶斯滤波器	36
3.4 基于状态均值和协方差的递推贝叶斯估计	38
3.4.1 状态矢量预测	39
3.4.2 状态矢量更新	40
3.5 一般估计方法讨论	42
参考文献	43

第4章 实用案例:初步探讨	44
4.1 仿真、估计与评价过程	44
4.2 利用 DIFAR 浮标场进行匀速运动目标跟踪的场景仿真	45
4.2.1 船舶动态模型	45
4.2.2 多浮标观测模型	46
4.2.3 场景属性	46
4.3 DIFAR 浮标信号处理	48
4.4 DIFAR 似然函数	53
参考文献	55

第Ⅱ部分 高斯假设:卡尔曼滤波估计器

第5章 高斯噪声:高斯加权分布的多维积分	59
5.1 第3章中重要结论总结	60
5.2 回顾卡尔曼滤波器校正(更新)方程的推导	61
5.3 贝叶斯点预测积分求解高斯密度	63
5.3.1 利用仿射变换来简化流程	64
5.3.2 求解高斯加权积分的一般方法	66
参考文献	68

第6章 线性卡尔曼滤波器	70
6.1 线性动态模型	70
6.2 线性观测模型	71
6.3 线性卡尔曼滤波器	71
6.4 LKF 在 DIFAR 浮标方位估计中的应用	72

参考文献	74
第 7 章 线性化卡尔曼滤波器:扩展卡尔曼滤波器	76
7.1 一维情况	76
7.1.1 一维状态预测	76
7.1.2 一维状态估计误差方差预测	77
7.1.3 一维观测预测方程	78
7.1.4 一维预测方程的变换	78
7.1.5 一维线性化 EKF 过程	79
7.2 多维情况	80
7.2.1 状态预测方程	81
7.2.2 状态协方差预测方程	81
7.2.3 观测预测方程	83
7.2.4 多维预测方程的变换	83
7.2.5 线性化多维扩展卡尔曼滤波器过程	85
7.2.6 二阶扩展卡尔曼滤波器	86
7.3 多维协方差预测方程的另一种推导	87
7.4 EKF 在 DIFAR 船舶跟踪的应用案例分析	88
7.4.1 船舶运动动态模型	88
7.4.2 DIFAR 浮标观测模型	88
7.4.3 初始化卡尔曼滤波器族中所有滤波器	90
7.4.4 选定加速度噪声参数	91
7.4.5 EKF 跟踪滤波器结果	91
参考文献	93
第 8 章 Sigma 点类别:有限差分卡尔曼滤波器	94
8.1 一维有限差分卡尔曼滤波器	94
8.1.1 一维有限差分状态预测	94
8.1.2 一维有限差分状态预测	96
8.1.3 一维有限差分观测预测方程	96
8.1.4 一维有限差分卡尔曼滤波器过程	96
8.1.5 简化的一维有限差分预测方程	97
8.2 多维有限差分卡尔曼滤波器	98
8.2.1 多维有限差分状态预测	98
8.2.2 多维有限差分状态协方差预测	100
8.2.3 多维有限差分观测预测方程	101

8.2.4 多维有限差分卡尔曼滤波器过程	102
8.3 多维有限差分协方差预测方程的另一种推导	103
参考文献	104
第9章 Sigma 点类别:无迹卡尔曼滤波器	105
9.1 单项式容积积分法	105
9.2 无迹卡尔曼滤波器	107
9.2.1 产生背景	107
9.2.2 无迹卡尔曼滤波器发展历程	108
9.2.3 无迹卡尔曼滤波器状态矢量预测方程	110
9.2.4 无迹卡尔曼滤波器状态矢量协方差预测方程	110
9.2.5 无迹卡尔曼滤波器观测值预测方程	110
9.2.6 无迹卡尔曼滤波器过程	111
9.2.7 无迹卡尔曼滤波器的另一个版本	111
9.3 UKF 在 DIFAR 船舶跟踪的应用案例分析	112
参考文献	113
第10章 Sigma 点类别:超球面单形卡尔曼滤波器	115
10.1 一维超球面单形 Sigma 点	115
10.2 二维超球面单形 Sigma 点	116
10.3 高维超球面单形 Sigma 点	118
10.4 超球面单形卡尔曼滤波器	119
10.5 超球面单形卡尔曼滤波器过程	119
10.6 SSKF 在 DIFAR 船舶跟踪的应用案例分析	120
参考文献	120
第11章 Sigma 点类别:高斯-厄米特卡尔曼滤波器	121
11.1 一维高斯-厄米特求积	121
11.2 一维高斯-厄米特卡尔曼滤波器	126
11.3 多维高斯-厄米特卡尔曼滤波器	127
11.4 高维/高阶多项式的稀疏网格逼近	131
11.5 GHKF 在 DIFAR 船舶跟踪的应用案例分析	132
参考文献	133
第12章 蒙特卡洛卡尔曼滤波器	134
12.1 蒙特卡洛卡尔曼滤波器	135

参考文献	136
第 13 章 高斯卡尔曼滤波器总结	137
13.1 解析卡尔曼滤波器	137
13.2 Sigma 点卡尔曼滤波器	138
13.3 一种更实用的运用卡尔曼滤波器族的方法	143
参考文献	144
第 14 章 卡尔曼滤波器族的性能度量	145
14.1 误差椭圆	145
14.1.1 正则椭圆	146
14.1.2 确定 $\mathbf{P}$ 的特征值	147
14.1.3 确定误差椭圆旋转角度	147
14.1.4 确定包含区域	148
14.1.5 误差椭圆参数化绘图	149
14.1.6 误差椭圆举例	150
14.2 均方根误差	150
14.3 发散轨迹	151
14.4 Cramer - Rao 下界	151
14.4.1 一维情况	152
14.4.2 多维情况	153
14.4.3 递归法求解 CRLB	154
14.4.4 高斯加性噪声的 Cramer - Rao 下界	157
14.4.5 零过程噪声的高斯 Cramer - Rao 下界	158
14.4.6 线性模型的高斯 Cramer - Rao 下界	158
14.5 卡尔曼类 DIFAR 轨迹估计器的性能	159
参考文献	161

第 III 部分 蒙特卡洛方法

第 15 章 蒙特卡洛方法概述	165
15.1 通过蒙特卡洛样本集估计密度	165
15.1.1 由二维高斯混合密度生成样本	165
15.1.2 利用多维直方图拟合密度	166
15.1.3 核密度估算	167
15.2 重要性采样的基本概念	172

15.3	总结	176
	参考文献	177
第 16 章	序贯重要性采样粒子滤波器	178
16.1	序贯重要性采样的基本概念	178
16.2	序贯重要性采样粒子滤波器的重采样和正则化	181
16.2.1	逆变换方法	182
16.2.2	带重采样的序贯重要性采样粒子滤波器	184
16.2.3	正则化	186
16.3	自举粒子滤波器	188
16.3.1	BPF 在 DIFAR 浮标跟踪中的应用	189
16.4	最优序贯重要性采样粒子滤波器	191
16.4.1	高斯最优序贯重要性采样粒子滤波器	192
16.4.2	局部线性化的高斯最优序贯重要性采样粒子滤波器	194
16.5	序贯重要性采样辅助粒子滤波器	195
16.5.1	APF 在 DIFAR 浮标跟踪中的应用	198
16.6	序贯重要性采样辅助粒子滤波器估计	199
16.6.1	扩展卡尔曼粒子滤波器	199
16.6.2	无迹粒子滤波器	200
16.7	利用 Rao - Blackwellization 理论降低计算负荷	201
	参考文献	202
第 17 章	广义蒙特卡洛粒子滤波器	204
17.1	高斯粒子滤波器	204
17.2	组合粒子滤波器	206
17.2.1	CPF - UKF 在 DIFAR 浮标跟踪中的应用	208
17.3	DIFAR 跟踪滤波器的性能对比	209
	参考文献	211

第 IV 部分 附加案例分析

第 18 章	用于三维目标跟踪的球坐标恒速度模型	215
18.1	笛卡儿坐标系下目标跟踪	217
18.1.1	目标动态运动模型	217
18.1.2	传感器数据模型	218

18.1.3	高斯跟踪算法计算笛卡儿状态矢量	219
18.2	球坐标系下目标跟踪	220
18.2.1	球坐标系下状态矢量的位置和速度分量	220
18.2.2	球坐标系状态矢量动态方程	222
18.2.3	球坐标系状态矢量观测方程	223
18.2.4	高斯跟踪算法计算球坐标状态矢量	224
18.3	笛卡儿坐标系和球坐标系下跟踪滤波器的实现	226
18.3.1	设置 q 值	226
18.3.2	雷达观测数据仿真	227
18.3.3	滤波器初始化	228
18.4	各种估计方法的性能对比	230
18.4.1	用于性能分析的轨迹特征	230
18.4.2	滤波器性能对比	233
18.5	观测数据与展望	242
附录 18. A	三维恒定角速率偏转运动动力学	243
18. A. 1	恒定角速率偏转运动速度分量	243
18. A. 2	恒定角速率偏转运动位置分量	246
18. A. 3	联合轨迹转移方程	247
18. A. 4	基于期望偏转加速度来设置偏转速度	247
附录 18. B	三维坐标变换	248
18. B. 1	笛卡儿坐标系变换为球坐标系	249
18. B. 2	球坐标系变换为笛卡儿坐标系	252
	参考文献	254
第 19 章	利用摄影测量法跟踪下落刚体	255
19.1	概述	255
19.2	刚体运动的过程模型	257
19.2.1	刚体平移运动的动态转移	257
19.2.2	刚体旋转运动的动态转移	259
19.2.3	组合动态过程模型	261
19.2.4	动态过程噪声模型	262
19.3	观测模型分量	263
19.4	估计方法	265
19.4.1	非线性最小平方估计法	265
19.4.2	无迹卡尔曼滤波器法	267
19.4.3	无迹组合粒子滤波器估计法	268

19.4.4	估计器初始化	269
19.5	生成模拟数据	271
19.5.1	模拟刚体特征点	271
19.5.2	模拟轨迹	271
19.5.3	模拟摄像机	275
19.5.4	模拟测量	275
19.6	性能对比分析	276
19.6.1	滤波器性能对比方法	278
19.6.2	滤波器对比结果	279
19.6.3	结论与展望	282
附录 19.A	四元数、轴角矢量与旋转	283
19.A.1	旋转表示之间的转换	283
19.A.2	方位与旋转的表示方法	284
19.A.3	点旋转与帧旋转	284
	参考文献	285
第 20 章	用摄影测量和惯性测量进行传感器融合	286
20.1	概述	286
20.2	刚体运动过程模型	287
20.3	传感器融合观测模型	288
20.3.1	观测模型的惯性测量装置元件	288
20.3.2	观测模型的摄影测量装置	289
20.3.3	组合传感器融合观测模型	290
20.4	生成模拟数据	290
20.4.1	模拟轨迹	291
20.4.2	模拟摄像机	291
20.4.3	模拟测量值	291
20.5	估值法	292
20.5.1	惯性测量装置数据初始化	292
20.6	性能对比分析	295
20.6.1	滤波器性能对比方法学	298
20.6.2	滤波器对比结果	298
20.7	结论	301
20.8	展望	301
	参考文献	302

BAYESIAN

第 I 部分

预备知识

- 第 1 章 简介
- 第 2 章 数学基础
- 第 3 章 贝叶斯估计的基本概念
- 第 4 章 实用案例:初步探讨

自统计数学出现以来,动态系统估计与跟踪已成为许多数学家的研究热点。过去 50 年中已提出许多估计方法,用于对线性和高斯分布动态系统进行统计推理(估计)。对于非线性高斯系统的应用,有些方法以增加计算复杂度为代价,也得了很好的估计结果。然而,现实世界的动态系统中,无论是线性的还是非线性的,通常有异常值过多的现象,并呈现为非高斯分布。已经证明,在处理这种真实世界数据的时候,常规的高斯估计方法不足以处理这些问题,会导致估计滤波器无法收敛。

随着高速桌面计算的出现,在过去的十年中,数学研究的重点已经转移到非高斯分布动态系统之上。但是,大部分的非高斯系统估计相关研究成果都是理论上的,那种普通工程人员无需太多学习就可以方便使用的方法基本没有。已提出的用于非线性系统估计的高斯方法,都缺少严密、有组织的推导。在概念上,高斯方法和非高斯方法仍然缺乏连续性。

本书致力于将最新的动态系统统计估计方法的研究成果全面地呈现给读者,包括线性、非线性系统和高斯、非高斯的系统等。利用贝叶斯框架,给出一个概念上紧密相关的路线图。首先,从基本原理开始介绍,进而引出一些目前广泛使用的高斯估计方法;然后,将这些概念推广到非高斯估计领域,并采用蒙特卡罗方法进行估计。虽然贝叶斯方法可求得统计密度估计,但多数情况下使用点估计方法,计算加权密度积分并得统计密度估计。因此,本书主要介绍在高斯、非高斯密度下的加权密度积分数值计算方法。

本书还为每种估计算法提供了伪代码和框图,供读者开发跟踪软件工具箱。为帮助读者理解书中所给出的算法,本书还将针对几个非常具体的实际问题,介绍一些开发仿真所需要的知识。书中将给出案例分析,并给出每种跟踪估计的结果。因为很难专门地去对跟踪方法进行比较,所以本书给出了多种评价方法,用

于评价各种跟踪滤波器的相对性能。

1.1 贝叶斯推理

推理方法是对一组参数估计出当前值的过程,这组参数基于一组观察值或测量值。估计过程一般遵循以下两个模型。第一个模型假定待估计参数(通常是不可观测的)是非随机的并且在观察窗中保持恒定,但是观测值含有噪声和随机分量;第二个模型假定参数是随机变量,具有一定先验概率,且观测含噪。利用第一个模型进行参数估计的过程被称为非贝叶斯估计或 Fisher 估计^[1],利用第二个模型进行参数估计被称为贝叶斯估计。

贝叶斯估计的概念非常简单,它基于一些初始先验信念。例如:“注意那艘船。它离海岸 914m(1000yd),向东北方向以 10n mile/h 的速度运动。”初始信念的陈述(包括最初猜测的船舶的位置和速度)是不确定或随机的,且基于某些先验的概率分布。基于初始信念,可以做出如下预测:由于船舶以恒定速度运动,它将在大约 10min 之后到达那个地方。这个声明包括船舶运动动力学概念模型以及一些不确定性。现在假设,一个人手上有一个小的便携式雷达,该雷达能够以一定的精度测量(观测)船舶视线范围内的距离和速度。给定适当的数学模型,可将笛卡儿坐标系下观测到的船舶位置和速度联系起来,当前的雷达测量值可以用来更新预测船舶状态(位置与速度)。

上面一段阐述了递归贝叶斯估计的实质:

- (1) 给出初始信念陈述;
- (2) 利用先验信念和动态模型进行预测;
- (3) 利用观测值和观测模型来得后验信念,更新预测值;
- (4) 将后验信念置成新的先验信念,返回步骤(2)。

递推估计的概念最初是在神甫托马斯·贝叶斯的一篇论文中首次提出的,而在贝叶斯去世数年之后(1763 年),由理查德·普莱斯投稿到皇家统计学会。在 Stephen Brooks^[2] 的论文中,可以读到与贝叶斯统计推理有关的历史和思想的精彩回顾。Brooks 的论文中还有一些值得关注的例子,例如进行了贝叶斯方法与所谓“频率论者”的统计推理方法之间的对比。因为本书致力于研究贝叶斯方法,不再深入探讨频率论的方法,感兴趣的读者可参考 Brooks 的论文。

1.2 贝叶斯层次估计法

如上所述,本书将对现代跟踪滤波器中一个子集进行严密有组织的推导。图 1-1 给出了本书提出的跟踪滤波器层次结构。

图 1-1 左边是高斯跟踪滤波器,右边是蒙特卡洛非高斯滤波器。在后续章