

# 贝叶斯网络 在智能信息处理中的应用

肖秦琨 高 嵩 著



國防工業出版社  
National Defense Industry Press

# 贝叶斯网络在智能 信息处理中的应用

Application of Bayesian Network in  
Intelligent Information Processing

肖秦琨 · 高嵩 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

贝叶斯网络在智能信息处理中的应用/肖秦琨,高嵩著. —北京:国防工业出版社,2012.1

ISBN 978-7-118-07813-8

I. ①贝... II. ①肖... ②高... III. ①贝叶斯推断—应用—人工智能—信息处理 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 267588 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 9 1/4 字数 270 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 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

## 致 读 者

此书同时获得

### 总装备部国防科技图书出版基金资助

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术原理新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的书；立即结合国防现代化和武器装备现代化需要的尚新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和需要大开其使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域中尚并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着

记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

## 前 言

作为图模型范畴之一的贝叶斯网络,是人工智能中处理不确定性问题建模与分析的工具,其仅有十几年历史,但其发展与应用已取得了令人瞩目的成就。贝叶斯网络(Bayesian Network,简称BN)在人工智能、机器学习、自动控制、信息检索领域已经得到了越来越广泛的应用,并由此派生出许多人们从未涉及的有趣问题,标志着该研究方向的勃勃生机。BN理论是人工智能学科中处理不确定性问题的新兴分支,由于其在处理不确定性复杂问题方面的独特优点,其在机器学习领域的作用也越来越重要。国外早期的研究主要集中在基本的原理和推理算法,20世纪90年代中期以来,由于自主控制等领域的迫切需求,BN的研究热点已集中于各种高效的推理算法,从数据中进行结构及参数学习的各种方法、动态系统以及各种应用。

本书全面系统地介绍了动态贝叶斯网络的相关理论,重点介绍了贝叶斯网络及其动态系统的经典应用和国内外的新发展。全书共12章。其中,5.5节、6.5节及8.2节由高嵩撰写,其余章节由肖秦琨撰写。静态贝叶斯网络的理论及应用,包括第1章至第5章。动态贝叶斯网络的理论及应用,包括第6章至第11章。最后在附录中给出了与动态贝叶斯网络结构度量相关定理、性质的证明,为读者进一步研究和学习动态贝叶斯网络提供参考。

本书是作者近年来潜心学习和研究国内外不确定性算法理论、方法及应用成果的一个总结,其相关研究工作始于作者在攻读博士学位及在清华大学宽带网与数字媒体实验室从事博士后研究期间,在此特向辛勤培养自己的博士生导师高晓光教授及博士后导师戴琼海教授表示衷心的感谢。

西北工业大学自动化学院潘泉教授及西安交通大学信息控制学院曹建福教授在百忙之中为本书申报国防科技图书出版基金写了推荐意见,特向两位老师表示衷心的感谢。

本书的研究工作是在多项国家级研究项目资助下开展的,包括国家自然科学基金:“基于图模型的动态立体场景检索研究(60972095)”,中国博士后科学基金:“基于贝叶斯网络及 shock 图的光场检索机制研究(20080430410)”,国家自然科学基金重大研究计划:“基于图形模型的空天飞行器智能自主优化机制(90205019)”,国家杰出青年基金:“光场及立体视频研究(60525111)”,国家重点基础研究发展计划(973)项目:“复杂条件下飞行器进近可视导航的基础理论研究(2010CB731800)”。另外,本书的出版也同时得到了西安工业大学学术专著基金的资助,在此一并表示感谢。

由于涉及内容广泛及限于作者的学识水平,书中疏漏和不当之处在所难免,希望读者不吝赐教指正。

作者

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 图模型与贝叶斯网络 .....       | 1  |
| 1.1 图模型简介 .....             | 1  |
| 1.2 贝叶斯网络 .....             | 3  |
| 1.3 静态网络理论及应用 .....         | 5  |
| 1.3.1 静态网络理论基础 .....        | 5  |
| 1.3.2 静态网络应用研究 .....        | 8  |
| 1.4 动态网络理论及应用 .....         | 9  |
| 1.4.1 动态网络理论基础 .....        | 9  |
| 1.4.2 动态网络应用研究 .....        | 11 |
| 第 2 章 静态贝叶斯网络 .....         | 14 |
| 2.1 静态贝叶斯网络表达 .....         | 14 |
| 2.2 静态网络的推理 .....           | 17 |
| 第 3 章 贝叶斯网络与立体目标检索 .....    | 24 |
| 3.1 立体目标检索概述 .....          | 24 |
| 3.2 基于形状的目标检索的国内外研究现状 ..... | 25 |
| 3.3 立体目标检索的基本步骤 .....       | 26 |
| 3.4 基于贝叶斯网络的光场描述符 .....     | 28 |
| 3.4.1 相联系的工作概述 .....        | 29 |
| 3.4.2 三维目标混合描述符框架构建 .....   | 31 |
| 3.4.3 三维目标混合描述符特征提取 .....   | 32 |
| 3.5 目标距离度量 .....            | 38 |
| 3.5.1 颜色描述符距离度量 .....       | 38 |
| 3.5.2 形状描述符距离度量 .....       | 39 |
| 3.6 检索系统性能实验分析 .....        | 42 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第4章 基于贝叶斯网络和反馈学习的三维检索</b> | 49  |
| 4.1 引言                       | 49  |
| 4.2 基于分类器学习的检索算法             | 50  |
| 4.3 单特征检索实验分析                | 54  |
| 4.4 基于多特征相关反馈的三维对象检索方法       | 61  |
| 4.4.1 算法描述                   | 63  |
| 4.4.2 具体实施方式                 | 64  |
| 4.4.3 检索实验                   | 68  |
| <b>第5章 三维对象检索的新领域与新方法</b>    | 75  |
| 5.1 动态立体场景检索概述               | 75  |
| 5.2 动态立体场景检索的研究现状            | 77  |
| 5.2.1 基础环节研究现状               | 78  |
| 5.2.2 立体场景检索现状               | 81  |
| 5.3 动态立体场景检索研究内容及方法          | 82  |
| 5.3.1 研究内容                   | 82  |
| 5.3.2 研究方法                   | 84  |
| 5.4 图模型在多视角视频检索中的应用          | 93  |
| 5.4.1 多视角立体视频概述              | 93  |
| 5.4.2 多视角动态视频基于图模型的研究        | 95  |
| 5.5 图模型在CAD中的应用              | 101 |
| 5.5.1 CAD检索系统                | 101 |
| 5.5.2 CAD检索系统的研究内容           | 105 |
| <b>第6章 动态贝叶斯网络基础</b>         | 109 |
| 6.1 动态贝叶斯网络                  | 109 |
| 6.2 动态贝叶斯网络应用研究              | 111 |
| 6.2.1 动态时序数据分析与挖掘            | 111 |
| 6.2.2 无人机的态势感知与路径规划          | 112 |
| 6.2.3 进化算法与动态贝叶斯网络混合优化       | 113 |
| 6.3 从静态网络到动态网络               | 114 |
| 6.3.1 概述                     | 114 |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 6.3.2      | 推导 .....                   | 115        |
| 6.3.3      | 动态贝叶斯网络表达 .....            | 117        |
| 6.4        | 动态贝叶斯网络的研究内容 .....         | 121        |
| 6.4.1      | 动态贝叶斯网络推理 .....            | 121        |
| 6.4.2      | 动态贝叶斯网络学习 .....            | 124        |
| 6.5        | 动态贝叶斯网络相关理论 .....          | 130        |
| 6.5.1      | 序列信息处理 .....               | 130        |
| 6.5.2      | 优化技术 .....                 | 142        |
| <b>第7章</b> | <b>动态贝叶斯网络推理 .....</b>     | <b>152</b> |
| 7.1        | 隐变量离散动态网络推理 .....          | 152        |
| 7.1.1      | 模型数学描述 .....               | 152        |
| 7.1.2      | 隐马尔可夫的研究内容 .....           | 153        |
| 7.1.3      | 一般离散动态网络和隐马尔可夫关系 .....     | 157        |
| 7.2        | 隐变量连续动态网络推理 .....          | 158        |
| 7.2.1      | 模型数学描述 .....               | 158        |
| 7.2.2      | 卡尔曼滤波图模型推理 .....           | 159        |
| 7.3        | 混合隐状态动态贝叶斯网络 .....         | 161        |
| 7.3.1      | 模型数学描述 .....               | 161        |
| 7.3.2      | 混合动态贝叶斯网络推理 .....          | 164        |
| <b>第8章</b> | <b>动态贝叶斯网络结构学习算法 .....</b> | <b>168</b> |
| 8.1        | 动态贝叶斯网络结构度量体制 .....        | 168        |
| 8.1.1      | 概述 .....                   | 168        |
| 8.1.2      | 动态网络的贝叶斯信息度量 .....         | 170        |
| 8.1.3      | 动态贝叶斯网络 BD 度量 .....        | 172        |
| 8.2        | 构建动态网络结构寻优算法 .....         | 175        |
| <b>第9章</b> | <b>动态贝叶斯网络结构学习模型 .....</b> | <b>179</b> |
| 9.1        | 平稳系统动态网络结构学习模型设计 .....     | 179        |
| 9.1.1      | 模型设计 .....                 | 180        |
| 9.1.2      | 仿真试验 .....                 | 183        |
| 9.2        | 变结构动态网络自适应结构学习模型设计 .....   | 190        |

|               |                              |            |
|---------------|------------------------------|------------|
| 9.2.1         | 模糊自适应双尺度 .....               | 190        |
| 9.2.2         | 动态系统非平稳程度和平稳性的测量 .....       | 197        |
| <b>第 10 章</b> | <b>基于动态贝叶斯网络的自主控制 .....</b>  | <b>200</b> |
| 10.1          | 概述 .....                     | 200        |
| 10.2          | 快速构建决策网络结构方法 .....           | 201        |
| 10.2.1        | 链形决策网络模型的建立 .....            | 202        |
| 10.2.2        | 决策网络树形模型结构学习算法 .....         | 205        |
| 10.2.3        | 一般决策网络结构学习算法 .....           | 206        |
| 10.3          | 进化算法与动态网络混合优化 .....          | 207        |
| 10.3.1        | 算法基本思想 .....                 | 207        |
| 10.3.2        | 转移网络作用 .....                 | 209        |
| 10.3.3        | 混合优化自主控制算法描述 .....           | 210        |
| 10.3.4        | 混合优化自主控制算法软件实现 .....         | 211        |
| <b>第 11 章</b> | <b>无人机自主控制应用研究 .....</b>     | <b>222</b> |
| 11.1          | 基于动态贝叶斯网络的路径规划 .....         | 222        |
| 11.1.1        | 无人机平面静态路径规划 .....            | 222        |
| 11.1.2        | 无人机动态路径规划 .....              | 235        |
| 11.2          | 无人机自主路径规划实例 .....            | 244        |
| 11.2.1        | 基于混合优化的无人机路径重规划 .....        | 244        |
| 11.2.2        | 无人机攻击多目标路径规划 .....           | 257        |
| <b>附录</b>     | <b>贝叶斯网络局部结构度量数学基础 .....</b> | <b>271</b> |
| A.1           | 链形模型局部结构度量 .....             | 271        |
| A.2           | 树形模型局部结构度量 .....             | 274        |
| A.3           | 局部贝叶斯网络度量 .....              | 277        |
| <b>参考文献</b>   | <b>.....</b>                 | <b>282</b> |

# Contents

|                  |                                                       |           |
|------------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Chapter1</b>  | <b>Graph model and Bayesian Network</b>               | <b>1</b>  |
| 1.1              | Graph model introduction                              | 1         |
| 1.2              | Bayesian Network                                      | 3         |
| 1.3              | Static Bayesian Network theory and application        | 5         |
| 1.3.1            | The Basis of static Bayesian Network                  | 5         |
| 1.3.2            | Application of static Bayesian Network                | 8         |
| 1.4              | Dynamic Bayesian Network theory and application       | 9         |
| 1.4.1            | The basis of Dynamic Bayesian Network                 | 9         |
| 1.4.2            | Application of Dynamic Bayesian Network               | 11        |
| <b>Chapter 2</b> | <b>Static Bayesian Network</b>                        | <b>14</b> |
| 2.1              | Expression of static Bayesian Network                 | 14        |
| 2.2              | Inference of static Bayesian Network                  | 17        |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Bayesian Network and 3D object retrieval</b>       | <b>24</b> |
| 3.1              | Overview                                              | 24        |
| 3.2              | The object retrieval research based on the shape      | 25        |
| 3.3              | The basic steps of 3D object retrieval                | 26        |
| 3.4              | Light field descriptor based on Bayesian Network      | 28        |
| 3.4.1            | Overview                                              | 29        |
| 3.4.2            | Framework establishment of 3D object mixed descriptor | 31        |
| 3.4.3            | Feature extraction of 3D object mixed descriptors     | 32        |
| 3.5              | Target Distance metrics                               | 38        |
| 3.5.1            | Distance metrics of color descriptor                  | 38        |
| 3.5.2            | Distance metrics of shape descriptor                  | 39        |

|                 |                                                                               |           |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6             | Experiment analysis of retrieval system .....                                 | 42        |
| <b>Chapter4</b> | <b>3D retrieval based on Bayesian Network and<br/>feedback learning .....</b> | <b>49</b> |
| 4.1             | Overview .....                                                                | 49        |
| 4.2             | Retrieval Algorithm based on the classifier learning .....                    | 50        |
| 4.3             | Experimental analysis of one feature retrieval .....                          | 54        |
| 4.4             | 3D object retrieval based on multi – feature relevant<br>feedback .....       | 61        |
| 4.4.1           | Features and effects of the algorithm .....                                   | 63        |
| 4.4.2           | Means of specific implementation .....                                        | 64        |
| 4.4.3           | Retrieval experiments .....                                                   | 68        |
| <b>Chapter5</b> | <b>New subjects and methods of 3D object<br/>retrieval .....</b>              | <b>75</b> |
| 5.1             | Overview .....                                                                | 75        |
| 5.2             | The situation of Dynamic 3D scene retrieval research .....                    | 77        |
| 5.2.1           | Basic component research situation .....                                      | 78        |
| 5.2.2           | 3D scene retrieval research situation .....                                   | 81        |
| 5.3             | Dynamic 3D scenes retrieval research contents and<br>methods .....            | 82        |
| 5.3.1           | Research contents .....                                                       | 82        |
| 5.3.2           | Research methods .....                                                        | 84        |
| 5.4             | Application of graph model in the multi – view video<br>retrieval .....       | 93        |
| 5.4.1           | Overview .....                                                                | 93        |
| 5.4.2           | Multi – view dynamic video research'based on the graph<br>model .....         | 95        |
| 5.5             | Application of the graph model in CAD .....                                   | 101       |
| 5.5.1           | CAD retrieval system .....                                                    | 101       |
| 5.5.2           | Research content of CAD retrieval system .....                                | 105       |

|                 |                                                    |     |
|-----------------|----------------------------------------------------|-----|
| <b>Chapter6</b> | <b>The basis of Dynamic Bayesian network</b>       | 109 |
| 6.1             | Dynamic Bayesian network                           | 109 |
| 6.2             | Application of Dynamic Bayesian network            | 111 |
| 6.2.1           | Dynamic time – series data analysis and mining     | 111 |
| 6.2.2           | UAV environment perception and the path planning   | 112 |
| 6.2.3           | Evolutionary algorithm and DBN hybrid optimization | 113 |
| 6.3             | From static networks to dynamic networks           | 114 |
| 6.3.1           | Overview                                           | 114 |
| 6.3.2           | Derivation                                         | 115 |
| 6.3.3           | Expression of dynamic bayesian network             | 117 |
| 6.4             | Research contents of Dynamic Bayesian network      | 121 |
| 6.4.1           | Dynamic Bayesian network inference                 | 121 |
| 6.4.2           | Dynamic Bayesian network learning                  | 124 |
| 6.5             | Related theories of Dynamic Bayesian network       | 130 |
| 6.5.1           | Sequence information processing                    | 130 |
| 6.5.2           | Optimization technique                             | 142 |
| <b>Chapter7</b> | <b>Dynamic Bayesian Network inference</b>          | 152 |
| 7.1             | Inference of discrete Dynamic Bayesian Network     | 152 |
| 7.1.1           | Mathematical description of the model              | 152 |
| 7.1.2           | Research contents of HMM                           | 153 |
| 7.1.3           | The relationship between discrete DBN and HMM      | 157 |
| 7.2             | Inference of continuous Dynamic Bayesian Network   | 158 |
| 7.2.1           | Mathematics description of the model               | 158 |
| 7.2.2           | Inference of Kalman Filter Model                   | 159 |
| 7.3             | Mixed hidden state Dynamic Bayesian Network        | 161 |
| 7.3.1           | Mathematics description of the model               | 161 |
| 7.3.2           | Inference of mixed Dynamic Bayesian network        | 164 |

|                  |                                                        |     |
|------------------|--------------------------------------------------------|-----|
| <b>Chapter8</b>  | <b>Dynamic Bayesian Network structure learning</b>     |     |
|                  | <b>algorithm</b>                                       | 168 |
| 8.1              | Dynamic Bayesian Network structure metric              | 168 |
| 8.1.1            | Overview                                               | 168 |
| 8.1.2            | Dynamic Bayesian Network BIC metrics                   | 170 |
| 8.1.3            | Dynamic Bayesian network BD metrics                    | 172 |
| 8.2              | Dynamic Bayesian Network structure optimization        |     |
|                  | algorithm                                              | 175 |
| <b>Chapter9</b>  | <b>Dynamic Bayesian Network structure learning</b>     |     |
|                  | <b>model</b>                                           | 179 |
| 9.1              | Model design of DBN structure learning in stable       |     |
|                  | system                                                 | 179 |
| 9.1.1            | System design                                          | 180 |
| 9.1.2            | Experiments                                            | 183 |
| 9.2              | Model design of changing structure DBN                 | 190 |
| 9.2.1            | The fuzzy self – adaptive two scales method            | 190 |
| 9.2.2            | Non – stationary and stability measurement of dynamic  |     |
|                  | system                                                 | 197 |
| <b>Chapter10</b> | <b>Autonomous control based on Dynamic</b>             |     |
|                  | <b>Bayesian Network</b>                                | 200 |
| 10.1             | Overview                                               | 200 |
| 10.2             | Fast methods for decision network structure building   | 201 |
| 10.2.1           | Construction of chain decision network                 | 202 |
| 10.2.2           | Structure learning algorithms of tree decision network | 205 |
| 10.2.3           | Structure learning algorithm general decision network  | 206 |
| 10.3             | Evolutionary algorithm and the DBN hybrid              |     |
|                  | optimization                                           | 207 |
| 10.3.1           | Idea of the algorithm                                  | 207 |