



世界著名计算机教材精选

# 多维与度量 数据结构基础

Hanan Samet 著

周立柱 王宏  
邓俊辉 赵颖 等译



## FOUNDATIONS OF MULTIDIMENSIONAL AND METRIC DATA STRUCTURES



清华大学出版社

世界著名计算机教材精选

# Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures

## 多维与度量数据结构基础

Hanan Samet      著  
周立柱    王    宏      等译  
邓俊辉    赵    颖

清华大学出版社

北 京

Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures

Hanan Samet

ISBN: 9780123694461

Copyright © 2009 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier (Singapore) Pte Ltd Press and Tsinghua University.

ISBN: 9789812722317

Copyright © 2011 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and Tsinghua University Press. All rights reserved.

Published in China by Tsinghua University Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予清华大学出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）发行与销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记号 图字 01-2010-0587 号

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

多维与度量数据结构基础 / (美) 萨姆特 (Samet, H.) 著; 周立柱等译. —北京: 清华大学出版社, 2011.5

(世界著名计算机教材精选)

书名原文: Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures

ISBN 978-7-302-22784-7

I. ①多… II. ①萨… ②周… III. ①数据结构—教材 IV. ①TP311.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 090461 号

责任编辑: 龙啟铭

责任校对: 焦丽丽

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62795954, [jsjic@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:jsjic@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈: 010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者: 三河市春园印刷有限公司

发 行 者: 全国新华书店

开 本: 185×260

印 张: 57

字 数: 1388 千字

版 次: 2011 年 5 月第 1 版

印 次: 2011 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 129.00 元

产品编号: 029626-01

# 译者序

数据结构是计算机学科知识体系中重要的基础部分，是计算机专业本科与研究生教育必设的课程。近年来，计算机领域研究的持续深入和新研究方向的不断出现，给数据结构带来了崭新的内容。这些内容极大地丰富和发展了数据结构的内涵。美国马里兰大学 Hanan Samet 教授撰写的 *Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures* 一书则是对这些进展的一次可贵的总结和提升。该书系统地收集和整理了近年来地理数据库、多媒体技术、图像处理、数据挖掘与分析等领域里著名的数据结构和算法，无论是站在基础知识学习的角度，还是站在科学研究的角度看，它都是一本弥足珍贵的参考书。也正是出于对本书价值的以上认识，我们把它翻译成中文，即大家所看到的这本《多维与度量数据结构基础》。

在数据结构领域，Hanan Samet 教授是公认的集大成者和国际著名学者。他对前面提到的诸多研究领域的丰富成果进行汇集，把它们归纳为多维空间数据的表示、组织、索引及查找等重要研究方向，其涉及的问题源自于各种实际应用，并从理论的角度得以抽象和统一。他在书中对相关算法和数据结构性能优劣的分析，为纷繁复杂的实际应用问题的成功解决提供了十分有益的启迪。因此，本书不仅能为我们了解相关领域最新进展提供重要的参考，也必将为有志于相关研究的读者提供方向性的指导。此外，得益于其翔实而精辟的讲解、数量众多而形象生动的插图、要点突出且启发性与挑战性兼具的习题、全面而系统的参考索引，本书也是难得的绝佳教材。

译书的各章由以下教师承担和负责：第 1 章及其习题答案由周立柱完成，第 2 章及其习题答案由王宏完成，前言、序、第 3 章及其习题答案、附录及其习题答案由邓俊辉完成，第 4 章及其习题答案由赵颖完成。限于我们自身的水平，译稿难免存有一些错误和不当之处，敬请读者批评指正。

此项工作历时两载有余，其间我们曾多次和 Hanan Samet 教授交互并得到他的指点和帮助，清华大学出版社龙啟铭编辑出色的协调和组织使我们可以将精力集中于译稿本身，清华大学计算机系的研究生范举、杨凡和邵刚也分别参与了第 1、2 和 4 章的初稿翻译工作，在此一并向他们表示衷心感谢！

清华大学计算机科学与技术系

周立柱 王 宏

邓俊辉 赵 颖

# Preface to Chinese Translation

I am pleased to write this preface to the Chinese Language Translation of the book. I have been heartened by the overwhelmingly favorable response to the original English Language Version, in terms of both the individual reactions to it as well as the generous and kind reviews that it has garnered. It is also quite an honor to have it translated into Chinese so that it can now reach the largest potential audience in the world.

As we all know, we never cease to learn. Well, the same is true for authors of texts such as this one. This is why an author's job is never done and why once a book contract has been signed, a publisher wants to take the book away from the author lest s/he adds more and more material thereby causing interminable delays in its ultimate publication. Well, the publisher of the English Language Version of this book also had this problem, and thus true to form, decided to avoid this potential problem by not informing me of the translation. Nevertheless, once I learned of the translation, the temptation to add some new material was too great to resist, and thus once I was asked by Professor Zhou Lizhu, the head of the translation effort, to provide a preface to the Chinese Language Translation, I decided to at least use this opportunity to share with you my most recent thoughts about the contents of the book, thereby providing you an additional alternative perspective.

In particular, over the four years since the book was first published, I have given numerous lectures on the material contained in it and a common theme that emerged repeatedly is that of sorting. In fact, readers can view the book as being about sorting, where the difference between conventional treatments of the subject is that the underlying data is not restricted to one dimension. Moreover, the data, regardless of its dimensionality, also has extent (e.g., line segments in arbitrary dimensions, etc.). Sorting is analogous to ordering. However, since generally no ordering exists in dimensions greater than 1 without a transformation of the data to one dimension, the role of the sorting process becomes one of differentiating between the data, and what is usually done is to sort the spatial objects with respect to the space that they occupy. The resulting ordering is usually implicit rather than explicit so that the data need not be resorted when the queries change (e.g., the query reference objects). This analogy to sorting is a powerful one and readers may profit by bearing this in mind as they go through the book. For example, in the case of metric data (where the data need not be embedded in a vector space), the notion of sorting appears when we note that the methods that we describe differentiate between the objects on the basis of their distance from a set of reference objects or which of a set of reference objects is closest.

At this point, I leave you to enjoy the fruits of the translation. However, before parting, I want to say how pleased I have been with the care and diligence displayed by the translation

team that Professor Zhou Lizhu has assembled. We have interacted often which has led to the correction of a number of errors, both factual and typographical. It is clear to me that the team understood the text as many of their questions showed a deep understanding of the material. This is a good omen for readers as the translation process was not a purely mechanical one. Instead, a lot of effort went into it, which is also very satisfying for the author to know.

Hanan Samet  
College Park, Maryland USA  
April 12, 2010

# 序

本书的出版，终于令纷繁多样的空间与多维索引方法得以统一连贯起来。Hanan Samet 乃是“空间数据索引”领域的资深权威。其早先出版的另两本专著，在过去的 10 年内已成为重要的文献。本书则进一步整合了这些工作，并将此领域拓展至度量空间中的信息索引和查找。

本书内容综合全面，却又不失为一本系统讲解相关思路的好教材。点、物体、矩形等多维区间、高维数据等 4 大章，叙述简明翔实，各节配有习题，且在最后给出了详细解答。本书还附有对 B-树、线性散列、螺旋散列等的专题讲解，并给出了 2000 余条参考文献及作者索引，同时还通过网站（<http://www.cs.umd.edu/~hjs/quadtree/>）提供了演示程序及数据集。

通晓本书绝非一日之功——对于那些有志于驾驭空间数据、科学计算数据场、体查询等图形学和视觉问题、数据挖掘中常见的高维数据场的人们而言，此书无疑是无价之宝。

Jim Gray  
Microsoft Research

# 前言

多维数据的表示在许多领域都是重要的课题，比如数据管理系统（空间数据场、多媒体数据场等）、计算机图形学、游戏开发、计算机视觉、地理信息系统、模式识别、相似度查找、实体造型、计算机辅助设计、机器人学、图形处理、计算几何、有限元分析等。具体表示方法的选择，最终是为了便于进行查找之类的运算。也就是通过适当的表示方法对数据做某种排序，使之更加易于访问。实际上，“访问结构”或“索引”往往也可以作为“数据结构”的代名词，以强调其与排序之间的本质联系。

“多维数据”最通常的定义是“高（大于一）维空间中的一组点”，它们可以指代空间中的位置、物体或更具一般性的记录。对后一情况而言，记录的每一属性（也称作域）对应于一个维度，只有部分属性对应于实际的空间位置，甚至所有属性本身都不是指空间位置。作为非位置性点数据的一个实例，试考察雇员记录。其中，各属性对应于雇员的姓名、住址、性别、年龄、身高、体重以及社会保险号。出现于数据管理系统中的每一此类记录，均可视作七维空间中的点，每一维度分别对应于某一属性——尽管各维的类型不尽相同：姓名和住址是字符串，性别为比特型，而年龄、身高、体重及社会保险号是数字。我们也注意到，尽管住址通常表示为字符串，却也可以按定位的经纬度坐标，理解为空间的位置。

对应于空间位置的多维数据具有如下属性：借助于缩放变换，所有属性的单位可以变得相同。此时，可以引入距离属性，从而支持邻近性查询。例如，在各城市所在的二维空间中，可以查找距芝加哥最近的城市，也可以找出芝加哥周围方圆 50 英里以内的所有城市。然而，若各属性类型不一致，则此类查询将失去意义。当然，范围查询（range query）之类的查询也很常见（比如查找出生于 1940—1960 年间、体重介于 150~200 磅之间的所有人），无论各属性的具体性质如何，这种查询都是有意义的。

横贯连续物理空间（即包含无穷个位置的）多维数据更有意思。具体来说，此时我们不仅关心物体的空间位置，而且还关注它们所占据的空间范围。这种有一定空间范围的物体，可以是直线（道路、河流等）、区间（表示一段时间或空间的），也可以是形体及各种维度的区域（湖泊、乡镇、楼宇、庄稼地、多边形、多面体等），以及曲面。物体（非点的）可能互不相交，也可能有所重叠。

空间多维数据的维数通常相对不高，但在许多应用领域中，数据的维度也可能相当高，甚至不见得是空间的。多媒体、生物信息学等应用领域尤其如此，以此二者为例，其中的数据均为一组物体，而其高纬度的成因在于，人们希望通过能够刻画它们的一组特征（即所谓的特征向量）来描述它们。以图像数据为例，通常的特征有颜色、色矩、纹理、形状等信息，它们都可以表示为标量。尽管可以归入点数据，此类数据却也往往需要采用不同于传统点数据的表示方法。其原因常可归咎于所谓的维度灾难（curse of dimensionality, [159]），亦即，在支持按查询条件访问（高维）物体方面，索引方法将不再像处理低维数据时那么有效。

上述关于高维非空间数据的讨论均基于以下假设：假定描述物体的特征（及其所在空间）已确定。但事实上，这些特征往往不易确定，因此我们常常需要深入此类数据所属的应用领域，求助于有关专家。不过，即便是专家，也并不总是能够轻而易举地确定应该采用哪些特征。比如，有时只知道可反映数据库中各物体之间相似度（或不相似度）的距离函数，以及如何计算域中各物体之间的相似度。通常，距离函数  $d$  都应满足三角不等式，为非负、对称的——亦即所谓的度量（或距离度量）。此时，我们采用所谓基于度量或距离的表示形式。它与传统表示形式的差别在于，各物体按相对于若干（称作轴点（pivot）的）关键物体的距离排序，而不是相对于所谓的参考点（例如空间域的原点），后者本身不见得与某个物体关联。

本书讨论的就是上述数据的表示，共分 4 章。每一章都自成体系，其篇幅可能已超过一本书。第 1 章探讨维度通常较低的点数据的表示。掌握该章所介绍表示形式的关键之一，是要区分清楚它们究竟是将数据组织起来（例如成为二叉搜索树），还是将数据所嵌入的空间组织起来（例如成为键树）。另一值得关注的情况是，数据的规模可能大到内存无法容纳的地步，以至于必须依赖硬盘。此时，需要用到所谓的桶方法（bucket method），这也是数据库领域的研究热点之一。

第 2 章讨论物体的表示形式，集中于基于物体的和基于图像的表示形式。二者的差别，类似于计算机图形学中根据是对物体本身还是物体所在空间做划分，来区分处理（图形）物体的算法及分解方法。该章的主线在于，各种表示形式如何实现“哪里”、“哪些”之类查询的支持。即对任一物体，确定其位置；或者对于任意位置，确定属于其中的所有物体。借助一种表示形式高效率地响应这类查询，是计算机图形学及其相关领域中研究人员孜孜以求的目标，这方面涉及的领域还有计算机视觉、实体造型以及空间数据库等等。这在一定程度上导致了物体的层次表示法（如[791]中的 R 树）及其变种（多为数据库应用所采用），与空间层次化表示法（如金字塔及其变种，多为计算机视觉应用所采用）之间的差别。区分已有各种表示形式的另一角度，就是看物体是以其内域还是以其边界来表示。

第 3 章讨论区间以及小矩形的表示。其中介绍的表示形式可应用于一系列重要的领域。例如，在用于大规模集成电路设计时，其中的物体通常简化为一组矩形。此类矩形的数量极大，而其尺寸却要比起其所在的空间小上好几个数量级。制图类应用的情况恰好相反，各物体自身尺寸很大。这些表示形式也可应用于游戏开发（[475, 476, 1025, 1456, 1890]），此类应用中的物体需要做空间注册，以支持高效率的集合操作运算，同时又不致于像其他基于所在空间规则分解的层次化表示形式（例如区域四叉树）那样，对位置的变化敏感。涉及域数据的应用，同样也可以借助这里介绍的区间表示法，区间在此类应用中扮演重要角色（如[951]）。区间表示法还可以应用于描述运动物体，后者出现于时空域数据库（例如[21, 950, 1057, 1092, 1305, 2013]，以及 Gutting 和 Schneider 的专著[790]）。

第 4 章讨论高维数据的表示，这里的数据既非空间的，实际上的维数也是一个问题。难点在于数据的特征本身，描述这些特征的数值与标识并不总是明确的。比如来自多媒体等应用领域的的数据，只有在通过越来越多的特征的确可以便于区分不同物体时，才适合使用大量特征来描述各物体。也可以借助可反映相似度（或不相似度）的距离函数。为此，该章还介绍了若干基于距离的索引方法。

第 4 章的写作意图源自如下重要的相似度查找（similarity searching）问题：查找并取

出与某一个或某一组给定物体相似的物体。这一过程总是可以归结为查找最近的一个或  $k$  个邻居, 故该章对此类查询不惜笔墨, 介绍了如何在基于距离的方法和多维索引等方法中高效率地完成查询。这里也指出了以下现象: 对高维数据而言, 较之简单地顺序扫描数据, 多维索引法往往并不具有任何优势。究其原因, 既在于高维空间中距离的计算本身代价不菲, 也在于数据的分布, 以及相对于其维度而言数据实际占据的体积过小 (亦即维度灾难)。另一成因在于, 数据集自身的“固有维度”往往远低于所在空间的维度。由此也促进了某些技术的发展, 它们采用单值分解 (singular value decomposition, SVD) 等方法降低数据的维度。该章介绍的另一种方法, 采用收缩嵌入法将数据嵌入于低维空间, 再采用“过滤并精练”算法, 配合多维索引法, 排除无关的候选对象。

上述 4 章中用到的数据结构多为层次化的。它们或者基于递归剖分的原则 (类似于分之策略[27]), 或者反过来, 基于物体的聚集形成层次。层次化结构非常有用, 因为它们可将注意力集中到数据的某一子集。这一能力既可以保证表示形式的高效性, 也可以缩短运行时间。

本人此前的一本专著[1637]讨论过空间数据的层次化表示, 主要涉及 4 类基本类型的空间数据: 点、矩形、直线 (段) 和体。许多这类表示形式都属于基于四叉树或八叉树的变种。这些树已在很多领域中得到了应用。这里的“四叉树”是广义的, 指代一系列的表示形式, 基于空间递归剖分是它们共同的特征。其差异体现在以下方面:

1. 它们所表示的数据类型;
2. 剖分过程所遵循的原则;
3. (剖分的) 分辨率 (可变的还是固定的)

在[1637]的基础上, 本书做了大幅度的扩展, 二者重叠的部分仅占约 10%。然而, 仍有相当多[1637]中的内容 (如第 4、5 章) 未被本书涉及。[1637]的特色之一, 就是为若干数据结构的建立和更新算法提供了详细代码 (对于点、线和矩形等类型的空间数据, 均至少提供了一例)。本书虽然也提供了这些代码, 但却是以习题及解答的形式提供的。此外, 还提供了 Java 小程序集 VASCO (Visualization and Animation of Spatial Constructs and Operations, [243, 244, 245, 246], <http://www.cs.umd.edu/~hjs/quadtree/index.html>), 可用以讲解本书中大量数据结构的操作。若关注这些方面的实际应用, 可以从上述 URL 下载 SAND 互联网浏览器[1644], 通过它可以了解各方法在地理信息系统 (GIS) 中的应用。SAND 互联网浏览器来自一个更为复杂的系统, 后者已应用于 QUILT 四叉树 GIS[1732]、SAND 空间数据引擎[71, 73], 以及面向空间数据库应用的 SANDTel 脚本工具[568, 570]。

本书与[1637]的另一重要差别在于, 增加了关于高维数据的内容 (第 4 章), 这部分的篇幅约占全书的 1/3。此外, 第 2 章中关于基于物体、基于图像表示方法的内容, 几乎是全新的。有个现象饶有趣味, 这部分内容以及大多数物体表示形式的提出, 都是旨在加速对“哪些”和“哪里”之类查询的响应, 这事实上也是本书的写作动机。第 1 章有关基于点的表示形式的内容中, 部分也是新的, 重点放在桶方法上。有关线性散列、螺旋散列方法的讲解, 则分别挪至附录 B 和 C, 第 1 章仅讨论如何将 these 方法用于多维数据。对于这一章所介绍的各种桶方法, 以及第 2 章所介绍的 R-树等基于物体内域的层次化表示方法而言, B-树实际上都是基础, 因此附录 A 对 B-树做了总体性的讲解。之所以如此编排, 是借鉴了[1637]的经验: 读者对于 B-树的掌握程度, 与我们的估计不符。讨论区间和矩形集的第 3

章,也是对[1637]的更新与扩充,尽管其中也有不少新的表示形式。

本书的重点在于表示方法和索引方法,而不是如何利用它们执行具体的操作,后者乃是本人另一拙作——[1636]——的重点。尽管如此,还是对若干操作做了更为细致的讨论。比如,在第4.1和4.2节中,对k-最近邻查找运算有相当大篇幅的介绍。该章所讨论的大多数表示形式,也是在探索该运算在类似查找中如何运用的过程中提出来的。第2.1.3.2和2.1.3.3节对相关的点定位问题做了详尽的分析。第2.2.3.4节也较为详细地讨论了计算机图形学和可视化领域中的另一运算——曲面数据的简化。这里所讨论的表示形式和运算,均限于串行的计算环境,尽管人们已对它们在并行环境中的实现给予了极大的关注(比如[210, 213, 373, 470, 524, 532, 862, 898, 916, 997, 1182, 1719, 2006],以及其中列出的参考文献),并且开始使用图形处理器(GPU,比如[739, 1146, 1815])。

还有很多值得详细讨论的主题,限于篇幅不得不被割舍。有兴趣的读者,可以参考相关的文献。例如,第2.2节在介绍基于边界的表示形式时,讨论了曲面的表示。此即所谓的拓扑数据结构。这方面的研究成果颇丰,远非本书所能覆盖,相关的研究课参阅Rana汇编的论文集[1536]。第2章的内容涉及简化方法及其数据结构(第2.2.3.4节),以及基于表面的层次化边界表示形式(第2.2.2~2.2.4节)。简化方法亦称作LOD(Level of Detail)法,Luebke、Reddy、Cohen、Varshney、Watson和Huebner合著的[1212]对此有过翔实的论述。Bartels、Beatty与Barsky的[131],Mortenson的[1316],Goldman的[716],Farin的[596],以及Warren与Weimer的[1962],也从几何造型的角度做了进一步的研究。这里所探讨的主题,可以归入可视计算的范畴。本书特意压缩了另一相关领域——实时碰撞检测——的篇幅,在这一问题中计算速度至关重要,在游戏开发等领域尤其如此。近期van den Bergen的[198]和Ericson的[564]就此有过透彻的讲解。同样地,关于时空域数据及运动物体的表示,此处也只是一笔带过,有兴趣的读者可参阅之前提到的文献。

实体造型也是成果丰富的一个领域,但此处的讨论仅限于第2.2.1节的边界模型(BRep),该节同时还详细讨论了翼边(winged-edge)表示法的各个变种。这一主题及其相关内容的详细介绍,请参阅Mantyla的[1232]、Hoffmann的[870]以及Paoluzzi的[1457]等专著。而Requicha的[1555]、Srihari的[1798]以及Chen和Huang的[345]等稍早的综述性文章仍颇具影响力,依然值得一读。当然,尽管其与计算机图形学的渊源极深,本书也未能充分展示。本人另一拙作[1636]曾就其间的关联做过进一步深入的阐发,Overmars的[1442]、Samet和Webber的[1666, 1667]等早先的综述也论及了这一主题。

本书中的很多主题也与计算几何领域的研究工作有关,但书中仅在第3.1节的区间表示法、第3.2节的小矩形集表示法、第2.1.3.2和2.1.3.3节的点定位问题等处,对此有所涉及。关于这些主题及其相关专题的详尽介绍,不妨参阅Preparata和Shamos的[1511]、Edelsbrunner的[540]、Boissonnat和Yvince的[230],以及de Berg、van Kreveld、Overmars和Schwarzkopf的[196],还有Preparata的[1509]和Toussaint的[1884]等早先汇编的论文集。还可参阅Edelsbrunner的[539]、O'Rourke的[1423]以及Toussaint的[1885]等汇编的综述及问题集。Bentley和Friedman的[173]、Overmars的专著[1440]、Mehlhorn的专著[1282]等针对查找问题的早期研究成果,与上述工作密切相关,这些文献就多维查找问题做了统一的概括。Vitter的[1933]则针对外存和大规模数据的结合,详细分析了相似和相关的主题。

本书论及的很多数据结构,可在空间数据库、地理信息系统、多维数据库等领域派上

用场。近期的一些工作,已将空间数据库、地理信息系统等领域联接起来,显示出这些领域之间的紧密联系,这些工作包括 Laurini 和 Thompson 的[1113], Worboys 的[2023], Gunther 的[773], Rigau、Scholl 和 Voisard 的[1562], Shekhar 和 Chawla 的[1746], Guting 的综述[784], Voisard 和 David 的[1938], 以及 Shekhar、Chawla、Ravada、Fetterer、Liu 和 Lu 的[1747]。

Subrahmanian 的专著[1807]则从略微不同的视角来处理多维数据库。上述数据结构可发挥作用的另一相关领域是受限数据库, Revesz 新近的专著[1559]对此有过详细的论述。请注意,本书只介绍了许多领域中都会用到的最近邻查找运算,众多由本书所介绍数据结构支持的其他空间数据库运算,却并未做过分析。以空间联接([89, 262, 261, 772, 1072, 894, 934, 1195, 1207, 1223, 1415, 1474, 2076]以及新近的综述[935])为例,在此前已列出的文献中对此有过讨论。

沿类似方向还有一系列的综述性文章(例如 Gaede 和 Gunther 的[670]),讨论了本书中从数据库角度分析过的表示形式。而 Samet 的综述性文章[1642],则综合了计算机图形学/计算机视觉与数据库两个视角。更早的综述可参阅 Nagy 和 Wagle 的[1335]、Samet 和 Rosenfeld 的[1647]、Peuquet 的[1490]以及 Samet 的[1628, 1632]。此外, Chavez、Navarro、Baeza-Yates 和 Marroquin 的[334], Bohm、Berchtold 和 Keim 的[224], Hjaltason 和 Samet [854, 855], 以及 Clarkson 的[401]等,则是面向类似的查找应用。

本书的内容与图像处理、计算机视觉等领域也有很大的关联。比如第 2.1.5.1 节所介绍的历史悠久的金字塔思想,可以通过 Tanimoto 与 Klinger 合写的[1844]、Rosenfeld 的[1573]等论文汇编集加以了解。与模式识别的联系也很重要,这方面可参阅 Toussaint 的[1882]。Rosenfeld 与 Kak 合写的开创性专著[1574],很早就讨论过图象处理专题;可以同时与更新近 Klette 与 Rosenfeld 合著的[1034]相互补充,后者又与数字几何有关联。

面对如此宽广且仍在不断发展的领域,本人肯定遗漏了很多重要的概念和文献。此外,本人常常将精力过于集中在某些概念,因而忽视了其他的概念。这主要是出于讲解清晰性的考虑。比如,我可能认为读者应该对某些结构有更深入的了解,故而不能语焉不详地匆匆带过。您若认为这样不妥,本人十分遗憾,但依然希望您能容忍我的这一处理方式。

本人偏好于算法式的方法。只要可能,我都会试图针对算法中的关键步骤列举实例。这一做法源自我的一种强大信念:使读者体会到实现及使用各种表示方法的轻松性、重要性超乎一切。有些算法的讲解会借助于伪代码,以使读者体会算法思想的具体实现方式。我刻意没有依赖某一特定的程序语言,如此既可以保证不至过时,同时也可以关于“何种语言在何时更为适宜”的不同意见当中不偏不倚。使用伪代码的主要原因,是为了简洁地讲述算法。这里采用的算法式伪代码,属于 ALGOL 程序语言[1346]的变种,其数据结构支持指针与记录结构。我没有采用面向对象的思想,但这里使用的记录结构,与 SIMULA [437]和 FLEX [1008]中初具雏形的类在本质上类似,而此二者正是现代面向对象方法的鼻祖。这里大量使用了递归。该伪代码语言中可以看到 C[1017]、C++[1805]、Java (如[93])、PASCAL[952]、SAIL[1553]以及 ALGOL W[137]的影子。附录 D 介绍它的基本特性。不过,离开具体的代码并不意味着不能理解算法,首次阅读时不妨忽略它们。书中配有索引,可以帮助你确定各代码所在的页码。

许多情况下,我都会对不同数据结构及算法的空间及时间效率做一分析。此类分析通常本质上都是渐进的,亦即所谓的大 O 和大  $\Omega$  记号[1043]。大 O 记号表示上界。例如,要

是说某一算法的时间复杂度为  $O(\log_2 N)$ ，则意味着其最差的表现也不至于差过  $\log_2 N$ 。大  $\Omega$  记号表示下界。作为一个实例，我们来看看对  $N$  个数的排序问题。当我们说该问题的复杂度是  $\Omega(N \log_2 N)$  时，意思是说，对于任何的排序算法，总是存在输入的某一组共  $N$  个数，该算法处理该输入至少需要如此长的时间。

有时为了做一个比较，我也会介绍一些数据结构的实现。此时，常常会统计各记录中所含域的数目。不过，这些数仅仅是为了使讲解更加简洁，因而不能照其字面意义来理解——因为，无论哪个具体的应用，只要对其有足够深入的分析，总是可以有所改进和提高。

每一节都配有相当数量的习题。其中很多习题都是基于正文内容的拓展，以此检验读者的理解程度，同时也为他们指出进一步研修的方向。有些习题或其解答最初不是我给出的，此时我会在其开头位置标注上原作者的姓名。这里并未根据其难度，给各习题定级。通常，其解答所要求的数学技巧并不会超过本科生的水平。不过，尽管有些习题可以一目了然，有些则需要破费一些心思。针对相当多不涉及编程的习题，要么给出解答，要么会给出解答所源自的论文。当然，我还是建议读者尽可能尝试独立求解习题，而不应直接翻看解答。本书之所以给出习题解答，是因为本人坚信，通过自学我们可以学到更多（无论是学生，还是作者本人！）。自第一次拜读到 Knuth 关于数据结构的恢宏巨著[1044, 1045, 1046]那一刻起，我就开始有了这一感觉，这也成为了我在这一道路上不断前行的动力源泉。

本书提供的参考文献覆盖面广泛。不仅包括本书，还有其早先的两本姊妹篇[1636, 1637]。很多参考文献都注有一个或多个关键词，还有一系列的章节号，指明其在本书（加以 F 记号）或其姊妹篇（用记号 D 与 A 区分[1637]与[1636]）中的引用位置，包括在习题和解答中的引用位置。参考文献列表中的索引，并非都在书中被引用过。之所以保留它们，是为了使读者能够针对书中涉及的专题，尽可能全面地了解相关的文献体系。为了使此类文献与那些被直接引用的文献同样地发挥作用，本书还另外提供了一张关键词索引表，列出了涉及各关键词的那些文献索引。当然，该表不可能面面俱到。对于（“点”之类的）一些过于通用的关键词，往往还设有二级的索引项，以便于更加准确地查找相关的索引。另外，还配有一份人名及成果索引，其中的页码指示出这些人所做的工作分别在（正文、前言、附录、习题或者解答部分的）哪些页被引用或者被确认（即致谢认可）。

本书适用的读者并不仅限于某一特定类型。他们可能是对空间及多维数据感兴趣、同时又需要对相关问题有所了解的专业人士，本书将帮助他们在其应用领域作出正确的抉择。尽管这里关注执行时间和存储占用量，但仍然是以算法的形式而不是数学的形式进行讲解。然而这并不意味着，只有程序员或数学家才能够欣赏蕴含其中的概念。书中内容也绝不是只对计算机科学家才有用处。包括地理学、高能物理学、工程学、数学、博弈学、多媒体、生物信息学等在内的众多应用领域，只要其中需要关注定位及度量，就都可以从本书获得帮助。本书作为教材也适用于很多专题的课程，包括数据库、地理信息系统、计算机图形学、计算几何、模式识别等，在这些课程中，本书所介绍的数据结构要么可做为补充材料，要么甚至可直接作为课程的中心议题。本书还可服务于数据结构的进阶课程，此时其重点放在多维及度量数据结构方面。以下，将对如何在此类课程中组织有关材料做一介绍。

# 给教师的建议

本书作为教材适用的课程，应讲授多媒体数据库中多维及度量数据的表示方法，通常面向研究生开设。该课程应根据学生的兴趣，覆盖一系列的专题。通常在数据库的框架内讲授，此时的重点放在第1章的点数据表示，以及第4章的高维数据表示。特别地，要强调第1.1、1.7和1.8节的桶方法，第4.4节针对高维数据的多维索引法，以及第4.5节基于距离的索引法。此外，还要十分强调第2.1.5.2节中R-树等基于物体层次的表示形式。

本书也可用于计算机图形学、计算机视觉、实体造型方面的教学，或者部分用于游戏开发课程。在后一情况下，重点可放在第2、3章。此外，还应包括第1.1和1.4~1.6节中针对点数据的更为基本的表示形式。此类课程可作为计算机图形学、实体造型、计算几何、数据库管理系统（DBMS）、多维查找、图像处理以及VLSI设计应用等课程的先修课。更具体地，该课程还要包括针对第2.1.1~2.1.3节基于内域的图像数据表示、第2.2.2和2.2.3节基于边界的图像数据表示的探讨。第2.3.2节的链编码之类的二维区域表示法、第2.2.2节的多边形表示法以及第1.5.1.4节运用点方法聚焦霍夫变换（Hough Transform）等内容与图像处理相关，也应涵盖。

针对平面扫描算法及其数据结构（第3.1和3.2节的线段树、区间树、优先搜索树等）、点定位及其数据结构（第2.1.3.2和2.1.3.3节的K-结构、分层有向无环图等）的探讨，都与计算几何相关。此类相关的专题还有第2.2.1.4~2.2.1.7节的Voronoi图和Delaunay三角剖分（Delaunay triangulation）与四面体剖分，以及第4.4.5节的近似Voronoi图（AVD）。第2.2.1.1~2.2.1.3节所讨论的诸如翼边数据结构之类基于边界的表示方法，也与计算几何和实体造型相关。此外还请注意，第3章所讨论的矩形表示法、平面扫描法，可用于VLSI设计应用。

另外，先前的一句话值得重提：第1.7、1.8节介绍的线性散列、螺旋散列、格文件以及Excel之类的桶方法，加上第2.1.5.2节介绍的以R-树为典型代表的物体层次结构的多个变种，对于数据库管理系统的研究都至关重要。而第1.5节讨论的k-d树等主题、第1.2节的区域树、第1.3节的优先搜索树以及第3.3节基于点的矩形表示法，则都与多维度查找相关。

本书还可能用于关于空间数据表示的课程，该课程既可以面向地理行业的部门（属于地理系统专业的教学大纲），也可能面向计算机科学系的空间数据库方向。同样地，此时应当涵盖的内容，既有部分来自多媒体数据库类课程，也有部分来自计算机图形学、计算机视觉、实体造型以及游戏开发类课程。此时，第4章关于高维数据表示的一些材料可以跳过，但第4.1~4.3节中最近邻查找和近似最近邻查找等内容仍需保留。此外，还需特别强调第2.1节基于内域的物体表示方法，以及第2.2节基于边界的物体表示方法。

本书也可用作另一数据结构课程的教材。其重点将放在空间数据上。具体地，可重点讲授分治原理的应用。层次化数据结构是这一原理很好的实例。此时，教师可自行决定具

体专题的取舍,当然,也可以参照以下建议,从各章中选取简单一些的表达形式进行讲解:

第1章可选用以下有趣的专题:第1.1节的定网格法(fix-grid method)及其变种;第1.4.1节诸如点四叉树之类的四叉树变种;第1.4.2.2节的PR四叉树(PR Quadtree);第1.5节的kd树及其变种(第1.5.1.4;1.5.2.1及1.5.2.3节);第1.7.2.1节诸如格文件之类的桶方法;第1.7.2.2节的Excel;第1.7.2.3.1节与附录B的线性散列;第1.2节的区域树;第1.3节的点优先搜索树;以及第1.9节对一些结构的对比。

第2章可选用以下有趣的专题:该章及第2.1节引言开篇内容;第2.1.1节的单位单元(unit-size cell),但第2.1.1.1节关于单元外形和铺盖的讨论可以跳过;第2.1.2.1~2.1.2.9节的块(block);第2.1.3.1节的BSP树;第2.2.1.1和2.2.1.2节的翼边数据结构;第2.2.2.2节诸如MX四叉树和MX八叉树之类基于图像的边界表示形式;第2.2.2.6节的PM四叉树和第2.2.2.7节的PM八叉树;以及第2.1.5.2.1节诸如R树之类基于物体的层次化内域表示形式。

第3章可选用以下有趣的专题:第3.1.1节的平面扫面法及其数据结构;第3.1.2节的区间树;第3.1.3节针对矩形及区间的优先搜索树;以及第3.4.1节的MX-CIF四叉树。

第4章中最有趣的专题是第4.1.1~4.1.3节的增量式最近邻算法。可以扼要地介绍基于距离的索引法。这方面,最值得讲解的表达形式有:第4.5.2.1.1和4.5.2.1.1<sup>1</sup>节的vp树、第4.5.3.1节的gh树和第4.5.3.3节的mb树。

全书不仅强调最坏情况最优的方法,也很重视能在实践中运转良好的方法。这与我的如下观点一致:作为成熟的计算机科学家,应该在这两个方面同时精通。显而易见,本书的内容很多,单个学期不可能全部覆盖。因此,教师们必须按需取舍。例如,很多时候详细的例子都可以跳过,或者作为学期的大实验或编程作业。

提请注意:正如此前提到过的,无论您将本书用于哪一课程,都可以利用Java小程序集VASCO [243, 244, 245, 246] (参见<http://www.cs.umd.edu/~hjs/quadtree/index.html>),来演示书中介绍的许多数据结构的操作过程。以点数据为例,可演示点四叉树、k-d树(也称作点k-d树)、MX四叉树、PR四叉树、桶PR四叉树、PR k-d树、桶PR k-d树、PMR四叉树、PMR kd树、2d区域树(也称作二维区域树)、优先搜索树、R树以及P<sub>k</sub>树。线数据方面,可演示PM<sub>1</sub>四叉树、PM<sub>2</sub>四叉树、PM<sub>3</sub>四叉树、PMR四叉树、桶PM四叉树以及R树。而对于矩形,可演示M<sub>x</sub>-CIF树、矩形四叉树、桶矩形四叉树(也称作桶矩形PM四叉树)、PMR矩形四叉树(也称作PMR矩形四叉树<sup>2</sup>)、PMR矩形kd树以及R树。对于上述所有数据结构,学生们都可以观看到其逐步建立的过程,了解如何支持诸如删除、最近邻查找、交叠(其中包括更具一般性的范围查询、通道或缓冲查询)之类的查询。所有数据结构的操作都是递增式进行的。最后还提供了一个小程序,演示如何根据光栅和链码等区域表示构造区域四叉树,以及(反过来)如何由区域四叉树得到这些结构。

我们也准备了一整套PowerPoint和PDF格式讲义,详细讲解了本书中的概念,欢迎教师们使用。

1 原文如此,应为“4.5.2.1.2”之讹。——译者

2 原文如此。——译者

# 致 谢

持续多年的写作过程中，本人得到过许多人的帮助，在此深表谢意！我要因给予帮助和友谊而感谢 Gisli R. Hjaltason，在很长的一段时间内有幸天天与他讨论和交流，正是依靠其犀利的洞察力和批判的思维，原稿中的许多概念才得以澄清。本书所有 LaTeX 样式宏的设置均是由他完成的，这极大地方便了书稿的集成；书中穿插的许多插图以及原始胶片，也出自其手。对此本人感激不尽！我也要感谢 Houman Alborzi，我俩之间颇具批判性的讨论也使我获益匪浅，在最后的定稿过程中他也给予了慷慨的帮助。此外还有很多人给予过我巨大的帮助，包括 Jagan Sankaranarayanan，负责制作插图及相关技术问题的 Frantisek Brabec、Frank Morgan 和 William Cheng，以及负责制作与全文多处相伴的 PowerPoint 版胶片的 Brian Norberg。我要深深感谢负责各种日常后勤任务的 Janice Perrone 与她的助手 David Madoo。我要感谢慷慨为我提供办公场地、计算机、停车位的 Richard R. Muntz，在我多次造访 UCLA 期间，他做了大量的宣传工作。由 Ron Sivan 设置的系统，加上 Nazanin Poorfarhani、Sze-Kit Hsu、Rene McDonald 和 Astrid Hellmuth 的具体协助，使得浩若烟海的文献索引得以编目。Phil Bernstein、Per-Ake Larson 和 Carlo Zaniolo 慷慨地提供其个人的会议论文库给我使用，使我得以在最后再次核对书中的参考文献——当然，如果依然有错误之处，责任在于本人。

在此，我要再次感谢 Robert E. Webber、Markku Tamminen 和 Michael B. Dillencourt，本人前两本专著[1636, 1637]的写作之所以十分顺利，离不开他们的帮助。我也十分有幸，能够在过去的 30 年间一直与 Azriel Rosenfeld 共事。他的奉献精神与学术造诣，始终在激励着我。我深深珍惜我们之间的合作关系。最后，我也要感谢 Gary D. Knott 和 Charles R. Dyer，前者的一句“如何在点四叉树中做删除呢”引导我进入多维数据结构这一领域，而当我仍处于研究的初始阶段，精力集中于在计算机视觉中应用这些数据结构时，后者曾与我有过很多互动。

在本书的写作期间，我的部分研究工作得到了美国自然科学基金、能源部、住房及城市发展部下属政策开发和研究办公室、微软研究院的资助。其中尤其要感谢 Tom Barclay、Larry Brandt、Dan Fay、Robert Grafton、Jim Gray、Dan Hitchcock、Howard Moraff、Rita Rodriguez、Mukesh Singhal、Jonathan Sperling、Bhavani Thuraisingham、Kentaro Toyama 和 Maria Zemankova。我也要感谢美国自然科学基金、国防地图局、美国陆军工程制图实验室以及 Harry Diamond 实验室在前些年曾给予的资助。其中尤其要感谢 Richard T. Antony、Su-Shing Chen、Y. T. Chien、Hank Cook、Phil J. Emmerman、Fred Esch、Joe Rastatter、Alan Saalfeld 和 Larry Tokarcik。感谢所有这些人的帮助。

除了上述提到的人，在过去几年中我也从与其他很多人的讨论中受益，他们对书中各部分提出了自己的意见，他们包括 Chuan-Heng Ang、Walid G. Aref、Lars Arge、John Arras、Renato Barrera、S. K. Bhaskar、Pedja Bogdanovich、Kaushink Chakrabarti、William Cheng、

Larry S. Davis、Wiebren de Jonge、Daniel DeMenthon、Leila De Floriani、Michael B. Dillencourt、Sydney D'Silva、Claudio Esperanca、Hakan Ferhatosmanoglu、Andre Folkers、Guilherme Fonseca、Mike W. Freeston、B. Brent Gordon、Eric Haines、Andreas Henrich、Michael E. Houle、Glenn S. Iwerks、Edwin Jacox、Ibrahim Kamel、Laveen N. Kanal、Simon Kasif、Benjamin B. Kimia、Hans-Peter Kriegel、Sam Lamphier、Nati Linial、Paola Magillo、Maurizio Martelli、Songrit Maneewongvatana、Sharad Mehrotra、Preface Daniel P. Miranker、David M. Mount、Richard R. Muntz、Michael Murphy、Brad G. Nickerson、Helmut Noltemeier、Aris M. Ouksel、Valerio Pascucci、Franco P. Preparata、Ari Rappoport、Manjit Ray、Azriel Rosenfeld、Peter Scheuermann、Gunther F. Schrack、George Scott、Bernhard Seeger、Ben Shneiderman、Aya Soffer、Matti Tikkanen、Thatcher Ulrich、Amitabh Varshney、Robert E. Webber、Isaac Weiss、Peter Widmayer、Changjiang Yang 和 Kaizhong Zhang。

本书的最终稿是经以下各位审阅后完成的：Charles R. Dyer、Jim Gray、Dinesh Manocha、Peter Revesz、Peter Scheuermann、Claudio T. Silva 和 Bretton Wade。非常感谢他们给予的帮助与关心。同样地，我也十分有幸得以与 Morgan Kaufmann 出版社的 Diane Cerra 合作，非常感谢她——多年前我们就开始谈论这本书，但她一直非常有耐心，直到它最终出版。尤其感谢她的热情，经过她的努力，本书不仅技术与制作质量非凡，而且价格低廉，终使更多读者有机会阅读受益。在写作此书的几年中，我也从与其他几家出版社的代表的讨论中受益，感谢他们花费时间与我探讨此书。其中尤其要感谢 Peter Gordon、Alfred Hofmann、Ingeborg Mayer、David Pallai、Alice Peters、Simone Taylor 和 Hans Wossner。

很荣幸有 Ken Della Penta 做我的助手，负责编辑书稿。除了教会我 Chicago 风格，耐心回答我无数的问题，她从文稿中找出的错误之多令人惊叹。最终的组稿及排版，是由 Windfall 软件公司的 Paul C. Anagnostopoulos 精心完成的，他出色地将我们编写的 LaTeX 宏与脚本整合为一个系统，使得可以利用 ZzTEX 系统制作出本书的最终版本。他所提出的技术性意见极具价值，感谢他。在协调艺术室、作者、排版工方面，Darice Moore 显示出了极大的耐心，才使书中内容最终成型。成品阶段的协调工作由 Alan Rose 负责，正是在其巨大的努力下，工作才得以如期推进，大量与产品相关的细节问题才得以妥善解决。

本人所写的另两本书对本书内容的选材也有影响，在它们的写作过程中，以下各位也参与了讨论，在此一并致谢：James Arvo、Harvey H. Atkinson、Thor Bestul、Sharat Chandran、Chiun-Hong Chien、Jiang-Hsing Chu、Roger D. Eastman、Herbert Edelsbrunner、Christos Faloutsos、George (Gyuri) Fekete、Kikuo Fujimura、John Gannon、John Goldak、Erik G. Hoel、Liuqing Huang、Frederik W. Jansen、Ajay Kela、David Kirk、Per-Ake Larson、Dani Lischinski、Don Meagher、Randal C. Nelson、Glenn Pearson、Ron Sacks-Davis、Timos Sellis、Clifford A. Shaffer、Deepak Sherlekar、Li Tong、Brian Von Herzen 和 David S. Wise。

最后（但并非最不重要），我要表达对妻子 Leila 的感谢，感谢她在本书写作所历经的那么多年中的爱、鼓励、支持、信任和耐心。我也感谢父亲 Julius Samet、母亲 Lotte Samet、岳父 Ario De Floriani 和岳母 Dalma Paravagna，感谢他们的自持与信任；还有叔叔 Seev Berlinger，感谢他的启迪，他给我灌输的理念是“要使工作变得有趣，成为你的爱好”。我欠所有的人很多，唯有永记心间。