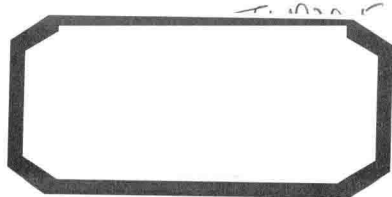


复杂环境下的移动 k 近邻 查询处理技术研究

李传文 著



复杂环境下的移动 k 近邻 查询处理技术研究

李传文 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 李传文 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂环境下的移动 k 近邻查询处理技术研究 / 李传文著. —沈阳: 东北大学出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5517-1339-9

I. ①复… II. ①李… III. ①互联网络—应用 ②智能技术—应用
IV. ①TP393.4 ②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 158963 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务部)

传真: 024-83680180(市场部) 83687332(社务部)

E-mail: neuph@neupress.com

<http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×240mm

印 张: 9

字 数: 198 千字

出版时间: 2016 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 7 月第 1 次印刷

组稿编辑: 王 宁

责任编辑: 刘 莹

封面设计: 刘江旻

责任校对: 辛 思

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1339-9

定 价: 28.00 元

前言

随着移动定位技术和空间索引技术的不断发展,基于位置的服务也在越来越广泛的领域内得到了应用,如在户外运动、旅游、物流运输甚至电子游戏等方面。基于位置服务的快速发展未来必然对人们的生产生活带来巨大的变革。如何响应移动中的用户对自己附近信息的查询,是基于位置服务领域的基础服务之一。如何高效、准确地处理这种查询,是决定基于位置服务应用前景的关键问题,得到了学术界和产业界的广泛关注。用户可以通过GPS、移动网络定位、RFID标签等方式获取自身位置的信息。用户感兴趣的目标对象则以空间数据的形式存储在数据库中。针对不同的查询类型,可以通过事先预处理的方式,对数据库里的数据事先进行索引,以提高对应类型查询的处理速度。然而,查询类型多种多样、目标对象所处空间也各不相同,如何针对各种受限空间中不同种类的查询进行建模、预处理及实时处理,是目前基于位置服务领域中亟待解决的热点问题。移动 k 近邻查询作为基于位置服务中的一种基础查询,更有必要进行深入的研究。

本书对各种受限空间中的特点和性质进行了归纳与总结,并对受限空间中移动 k 近邻的研究现状进行了分析和综述。针对多种不同类型的受限空间,提出了相应的解决方案。在数据预处理、实时查询处理等方面,提出了新的模型和解决方法,建立了一套有特色的处理框架。这些技术可以有效地提高移动 k 近邻的实时处理效率和准确度,从而支持受限空间中的移动 k 近邻查询应用。

具体的,本书对多种不同类型的受限空间中的移动 k 近邻查询进行了深入研究。这些空间包括障碍空间、存在不确定对象的障碍空间、权重空间等。同时,在对象点移动 k 近邻研究基础上,将研究内容扩展到移动中路径近邻查询。本书的主要内容包括以下几个方面。

①研究了障碍空间移动 k 近邻查询。对移动中进行 k 近邻查询的特点进行了分析,提出了一种有效地计算移动查询点的安全区域的方法,并将其扩展到障碍空间中。在对障碍空间的特点进行研究的基础上,提出并证明了几个关于障碍空间中安全区域的实用性质。不同于之前的只能处理理想欧氏空间的查询,该方法可以高效地处理障碍空间的移动查询问题。

② 研究了存在不确定对象的障碍空间移动 k 近邻查询。在存在障碍的空间中,对不确定对象移动最近邻查询的处理方法进行了研究。建立了空间障碍物及不确定对象的理论数据模型,提出障碍空间中不确定对象最近邻查询问题。在运用一种剪枝技术来提高性能的基础上,设计了一种高效的基于不确定空间距离的算法来进行查询处理。基于不确定对象分割区域,设计出一种有效的安全区域生成方法。

③ 研究了权重空间移动 k 近邻查询。在权重空间中,讨论了 $MkNN$ 问题的独特性质。基于联接区域的概念,设计了一种高效的名为 Weighted Indexing Map(WIM)的数据索引结构,以大量减少需要实时 $MkNN$ 处理的时间。还设计了一种名为 wNeighbors 的基于 WIM 的 $WkNN$ 查询算法。

④ 研究了移动中对象路径近邻查询的处理方法。对不同受限空间中的距离函数,根据各种空间形式的不同特点进行了抽象。研究了一种基于高效剪枝技术的可以应用抽象距离函数的算法。以对象路径最近邻为基础,提出扫描圆和瓣边的概念,并设计了一种有效的安全区域生成方法。

总之,本书从受限空间中移动 k 近邻的典型特征和挑战出发,针对受限空间中移动 k 近邻的关键技术展开研究,如预处理技术、实时查询处理技术和安全区域划分技术等,从而提供高效健壮的受限空间中移动 k 近邻查询处理方法,支持实时的移动近邻查询。本书的研究提升了用户对自己周围信息的了解能力,为基于位置的服务应用提供了有力的支持。

作者

2016 年 4 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 基础概念	1
1.1.1 基于位置服务技术	1
1.1.2 空间数据库特点	3
1.1.3 空间索引技术	4
1.1.4 k 近邻查询技术	9
1.2 受限空间介绍	13
1.2.1 障碍空间	13
1.2.2 权重空间	14
1.2.3 室内空间	15
1.2.4 地表空间	16
1.3 本书的研究内容和特色	18
第 2 章 障碍空间移动 k 近邻查询	20
2.1 研究背景	20
2.2 相关工作	21
2.2.1 k 近邻查询	21
2.2.2 障碍处理算法	22
2.3 预备知识	22
2.3.1 可见图	22
2.3.2 两点间分界线	23
2.3.3 V^* 图	24
2.4 单对象安全区域	25
2.4.1 单对象安全区域定义	25
2.4.2 安全区域性质研究	27
2.4.3 单对象安全区域创建方法	30

2.5	障碍敏感的安全区域	31
2.5.1	有序区域格	31
2.5.2	障碍敏感安全区域	32
2.6	实验分析	34
2.6.1	实验设置	34
2.6.2	结果分析	36
2.7	本章小结	40
第3章	障碍空间内不确定对象 k 近邻查询	41
3.1	研究背景	41
3.2	问题定义	42
3.3	障碍空间中不确定对象最近邻查询	44
3.4	最近邻查询结果的安全区域	46
3.4.1	不确定对象的区域分割	46
3.4.2	安全区域生成	50
3.4.3	安全区域索引	51
3.5	不规则不确定区域及不确定查询点	52
3.6	实验测试	52
3.6.1	实验设计	52
3.6.2	实验结果与分析	53
3.7	本章小结	56
第4章	权重空间移动 k 近邻查询	57
4.1	研究背景	57
4.2	相关工作	58
4.3	预备知识	59
4.3.1	问题定义	59
4.3.2	基本概念	60
4.4	wNeighbors 算法	61
4.4.1	最短权重路径的性质	62
4.4.2	数据结构	64
4.4.3	wNeighbors 算法及在移动查询中的扩展	65
4.5	实验测试	67
4.5.1	实验设计	67
4.5.2	wNeighbors 算法与其他方法的对比	67

4.5.3 不同参数和工作量下的 wNeighbors 算法	68
4.6 本章小结	69
第5章 移动 k 路径近邻查询	70
5.1 研究背景	70
5.2 问题定义	71
5.3 路径近邻查询算法	72
5.4 生成安全区域	75
5.4.1 对象支配区域	75
5.4.2 创建安全区域	76
5.5 实验测试	77
5.5.1 实验设计	77
5.5.2 结果分析	77
5.6 本章小结	83
第6章 关键字移动 k 近邻查询并行处理方法	84
6.1 研究背景	84
6.2 问题定义	86
6.3 PMkSK 算法	89
6.3.1 算法描述	89
6.3.2 代价分析	91
6.4 实验结果	91
6.5 本章小结	92
第7章 QGrid——一种空间移动对象并行索引结构	93
7.1 研究背景	93
7.2 QGrid 索引	94
7.2.1 问题定义	94
7.2.2 索引结构	95
7.3 QGrid 算法	96
7.3.1 空间对象更新算法	96
7.3.2 空间对象查询算法	97
7.4 仿真实验与结果分析	98
7.5 本章小结	101

第 8 章 一种基于 HMM 的近邻事件分析模型	102
8.1 研究背景	102
8.2 基于扩展 HMM 的状态识别	103
8.2.1 隐马尔可夫模型	103
8.2.2 仿真状态建模	104
8.3 节点复杂事件识别	106
8.4 仿真实验及实验分析	108
8.4.1 仿真系统	108
8.4.2 实验结果分析	109
8.5 本章小结	112
第 9 章 移动近邻仿真平台的研究与实现	113
9.1 研究背景	113
9.2 执行原理	113
9.3 体系结构	114
9.4 仿真平台的设计	116
9.4.1 系统核心层的设计	116
9.4.2 系统执行层的设计	117
9.4.3 系统编译层的设计	118
9.4.4 系统用户层	120
9.5 仿真实验	121
9.6 本章小结	122
第 10 章 结 论	123
10.1 本书的主要贡献与结论	123
10.2 进一步的工作	124
参考文献	126

第1章 绪 论

1.1 基础概念

1.1.1 基于位置服务技术

近年来,基于位置的服务(location based services, LBS)获得了越来越多的关注,并在生产生活中得到了越来越广泛的应用^[1-2]。实现 LBS 应用,首先要确定移动设备或用户所在的地理位置;然后,在此基础上,提供与位置相关的各类信息服务。可以通过移动设备的 GPS 信息、移动蜂窝网或北斗卫星定位等方式获得用户地理位置信息。在得到了用户位置信息之后, LBS 可以提供丰富的应用。以现实生活中的服务为例:用户可以查找离自己最近的宾馆、饭店、加油站等,还可以规划出行路径、在浏览过程中获得周边信息等。在电子地图平台支持下, LBS 成为为用户提供服务的一种越来越受欢迎的增值业务^[3]。LBS 的示意图如图 1.1 所示。

研究结果显示,位置信息占据了日常生活中总信息量的 80%。移动位置服务有着巨大的市场规模和良好的盈利前景,在商用领域扩展迅速。以目前的趋势看, LBS 产业链正在不断完善,移动位置服务正在占据越来越大的市场份额。随着无线网络及各种定位技术(如 GPS)的普及应用,用户完成定位和服务两大功能的技术障碍逐渐消失^[4-5]。当今,经济飞速发展,城市化进程不断加快,为 LBS 的应用提供了更加广阔的舞台。研究开发针对移动位置服务的搜索和索引技术,可为政府部门决策提供多要素、多层次、多时态的社会服务动态信息,使其能更好、更有效地实现城市空间管治目标,也可为个人用户提供实时、有效的动态信息,使其更快、更好地得到与其生活、娱乐密切相关的各种人性化服务。

LBS 的网络架构包括如下内容^[6]。

① LDP。定位操作平台。对用户进行定位。

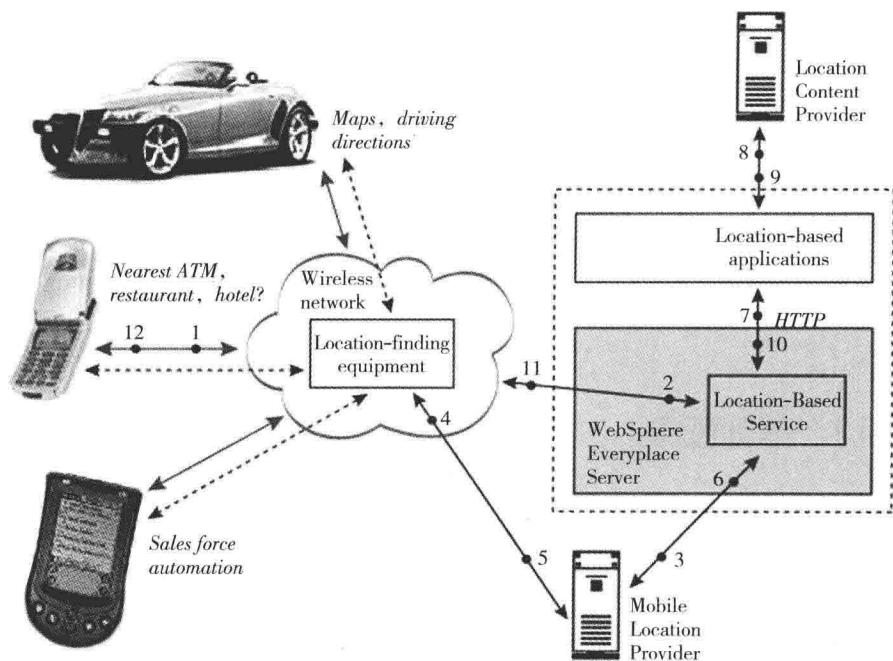


图 1.1 基于位置的服务(LBS)示意图^[3]

② LCS。承接 SP 与 LDP 和 GIS 系统，完成辅助工作(如计费、管理等功能)的中间件。

③ GIS。地理信息系统(如 ArcGIS 套件)，提供地理信息数据。

④ SP。对用户 LBS 服务的交互界面。

⑤ CP。在 GIS 层之上，提供电子地图数据、POI(兴趣点)信息的内容提供商。

⑥ Terminal。终端机，与用户直接打交道的设备，如手持设备、车载 LBS 终端等。

本书主要研究了当用户位置信息已经获得并且已经存在 GIS 数据的背景下，对不同种类的空间中用户位置附近的 k 近邻进行查询的技术，以及为了加速 k 近邻查询而进行的预计算等索引技术。本书的研究以查询为基础，根据用户的当前位置数据为用户提供各种有用的信息，例如，最近的自动提款机在哪儿、附近有哪些饭店等。LBS 包括多种查询类型及处理方法，如最近邻、 k NN、Skyline、反 k NN 等。在这些查询中，最近邻查询是最常用的一种查询方式。

1.1.2 空间数据库特点

近年来,随着计算机处理速度的不断提升和硬件价格的不断下调,以GIS, RS, GPS(简称“3S”技术)为代表的空间信息技术在各领域中得到广泛应用。现代社会是一个信息社会,而空间位置信息在社会总信息量中占据了主导地位。随着移动定位技术和地理信息系统的不断发展,基于空间位置信息的各种应用得到了广泛关注。空间数据库技术作为组织、存储、管理空间位置信息的基础技术,其重要性也日益显现。

(1) 空间数据

与空间位置和空间关系相关的数据都可称为空间数据^[7-9]。空间数据不同于一般数据之处在于其中包含大量的几何属性。它具有以下基本特征^[10-12]。

① 数据量大。作为一个复杂的地理信息综合体,空间数据库需要用数据来描述各种复杂的地理要素。仅要素的空间位置一项,就将产生庞大的数据量。

② 结构复杂多样。空间数据不仅包含了地理要素的属性特征,而且需要描述地理要素的空间分布位置,并且地理要素的空间特征和属性特征之间往往具有内在联系。

③ 自相关。每个地理要素与其他要素往往具有相关性。邻近要素间的相关性往往比距离较远的要素间要大得多。

(2) 空间数据库

数据库技术是计算机领域中最重要技术之一,也是整个计算机领域的基石之一。截至目前,数据库技术仍是数据存储、管理、分析的基本技术。数据管理从最早的程序管理阶段,到后来的文件管理阶段,再到目前的数据库管理阶段,计算机对数据的管理逐渐变得专业化、高效化。数据库通过各种范式,使存入其中的数据保持某种程度的一致性,并使之易于添加、删除、更新、查询。关系数据库是现代数据库技术中得到最广泛应用的一种数据库模式^[13-16]。

作为传统数据库在空间数据管理领域的一个扩展,空间数据库主要存储了某一区域内一定地理要素特征的数据集合,以及与这些特征相关的属性信息^[17]。空间数据库最大限度地保存了与真实空间相对应的位置信息,可以看作真实地理环境的数字对应体^[18-19]。空间数据库由于继承了传统数据库的各种先进思想和技术,因而在数据存储、管理、分析等方面,可以做到较高的执行效率。而由于空间数据复杂的空间几何特征,以及空间数据之间复杂的联系,空间数据库又具有不同于传统数据库的特点^[20]。

空间数据库最大的特点是数据量巨大。不难想象,客观世界中所涉及的地球表面信息、地图信息、地质信息、大气信息等极其复杂的现象和信息都需要

由空间数据库进行存储,描述这些信息的数据量通常达到太字节甚至拍字节级。不仅如此,实际应用需要的不仅仅是对空间数据信息进行存储,而且是在存储数据的基础上,对这些空间数据进行检索和分析。这就要求空间数据库具有高效访问大量数据的能力。空间数据库不仅存储数据量巨大,而且其数据类型也并不单一。与地理相关的数据类型都将被存储在空间数据库中,这些数据类型主要可以分为以下3类^[21-22]。

① 属性数据。描述地理元素的各种属性,包括数字、文本、日期类型等。

② 图形图像数据。与通用数据库不同,空间数据库系统中大量的数据需要借助图形图像来描述(类似于 Google 街景中的照片信息)。

③ 空间关系数据。地理元素间的拓扑关系。

(3) 空间数据存储方式

用一个例子来考虑对空间数据存储的需要。如对空间数据执行 k -NN 搜索。最直观的想法就是将有用的地理元素进行组合,形成有向图,并采用邻接表的方式存储该有向图^[24],然后用 Dijkstra 算法^[23],在该图上进行单源最短路径查询。这种方式虽然能够解决问题,但具有以下缺点。首先,由于空间数据库数据量巨大,最终生成的有向图可能非常庞大,其遍历性能将会非常低。其次,这种方式假定了地理元素是固定不变的。如果地理元素发生改变,那么需要对已经生成的有向图进行更改,其更改代价很高。然而,对某些应用来说,地理元素固定不变的假设是不成立的^[25-26]。因此,简单地采用邻接表存储有向图的方式并不适用于数据量巨大且经常改变的空间数据存储。

当前空间数据库对地理元素的空间信息存储采用较多的方式是通过将网络边的最小包围矩形(minimum bounding rectangle, MBR)储存在 R-树或其变体中进行高效存储。如果采用将兴趣点与地理元素进行分别对待的方式,如将超市、加油站等兴趣元素视为公路元素(线)上的点,那么可以将地理元素拓扑网络的每个边用一棵 B+-树来索引,在该索引上,存储该边上兴趣点的相对位置。这种方法仍需要额外的部分来储存地理元素网的连接属性,而这部分连接属性则可使用邻接表来表示。

1.1.3 空间索引技术

传统关系数据库技术并不能被直接应用于存储空间数据,因为传统技术并没有对大数据量、拓扑相关的地理元素进行优化,致使传统数据库中存储的地理信息很难被高效地管理、检索和分析。20 世纪 70 年代,科研人员为了利用卫星遥感资源迅速绘制出各种经济专题地图,提出了对高性能的面向空间数据信息的数据库管理系统的需求,进而诞生了空间数据库的雏形^[29-30]。近年来,随着地理信息系统(GIS)、计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)、机器人、多

媒体系统、数字地球、移动通信及定位服务等应用领域的发展,空间数据库得到了学术界和商业界越来越多的重视。

空间数据库最重要的功能就是要有效地对空间数据进行存储,以便其能被高效地检索。所谓空间数据,是指对象的空间位置信息,该信息可能是二维、三维或者更高维的位置数据,有的对象不仅需要记录 (x, y, z) 位置,还要记录其仰角、旋转角度等数据,物体的形状、大小和分布特征等信息往往也需要记录^[31-32]。为了高效地存储和检索信息,需要对空间数据进行索引。传统数据库的索引是针对一维数据进行的,如B-树等。这些技术的特点导致其无法被简单地推广到二维及高维空间,而目前也不存在从二维或高维空间向一维数据的映射,使其满足二维或高维空间中相邻的对象在被映射的一维数据中也是相邻的。因此,无法使用传统的数据库索引技术对空间数据库进行有效索引。这就提出了能适应多维特性的空间索引方式的需求。如何高效地对空间数据进行索引,也就成为空间数据库能否适用于现代空间查询等应用的关键。近年来,空间索引技术研究一直是空间数据库研究领域中的一个热点^[35-36]。目前,比较流行的空间索引技术主要是R-树及其变体。

1.1.3.1 空间索引方法分类

目前,研究人员提出的空间索引技术中,最常用的方法都是基于树结构的。根据这些结构不同,这些索引技术分别对点查询、范围查询、最近邻域查询等查询方式进行了优化,从而对某种或者某几种查询提供了较好的支持。空间索引技术可以按照空间目标映射方法,大致分为两大类^[37-38]。

(1) 以空间目标排序为基础的索引方法

该方法的核心是通过将二维或高维空间数据映射到一维,从而采用传统的数据库技术进行索引。具体做法是按照某种策略将空间细分为许多格子,然后依次对这些网格分配编号。通过编号的方式将二维或高维的空间对象转换为一维数字,并利用传统数据库的索引技术对这些数字信息进行索引。Peano曲线^[39]、位置键^[40]、Z-排序^[41]等方法是一种以空间目标排序为基础的索引方法的代表。这种索引方法的弊端在于不能将原来相邻的对象索引到一维数据的相邻位置,因此,无法有效地支持近邻查询。

(2) 专用空间索引方法

与以空间目标排序为基础的索引方法不同,专用空间索引方法在索引过程中引入了外部的数据结构对索引过程进行辅助。根据是否允许空间重叠,该方法主要可分为两大类。

① 空间不重叠的索引法。顾名思义,这种方法将空间分成不同的部分。与前述空间目标排序的索引方法不同的是,这种划分空间的方法不要求所有分区大小一致。相反,本方法将二维或高维的空间数据按照特定的划分方法分成

不同形状的分区,以获得最佳的索引效率。常见的划分方法有二叉树划分、四叉树划分、格网划分等。这些分区信息分别被存储在对应的磁盘页或数据桶中。空间不重叠的索引方法主要包括 k -d 树^[42]、 R^+ -树^[43]等。

② 空间可以重叠的索引法。与空间不重叠的方法相反,这种方法允许划分的分区之间有重叠部分。空间可以重叠的方法往往可以比不重叠的方法具有更高的索引的生成、修改效率。这是因为,在索引生成过程中,不需要严格地将分区边界划清。然而,重叠的存在使存储在索引中的空间对象被查询的时候,有可能被重复查找。为了降低这种额外的查询代价,这种索引方法的一个重要优化思想就是尽量减少分区重叠^[45-47]。这种方法的主要代表是 R -树及其变体等。

在所有的空间索引方法中,最常见的是 R -树系列空间索引。 R -树最早是由 A. Guttman 在 1984 年提出来的,其后又有了许多变体。目前, R -树系列索引方法包括由 R -树、 R^* -树等多种。 R -树系列的索引结构依赖于空间对象最小边界矩形 MBR (Minimum Bounding Rectangle) 的分布。MBR 是对空间对象的一种近似表示,其矩形的概念仅存在于二维空间中;在三维空间中,该矩形扩展为一个长方体;而更高维空间中的 MBR 将作为一个超矩形存在。

图 1.2 给出了常见的索引结构^[44]。

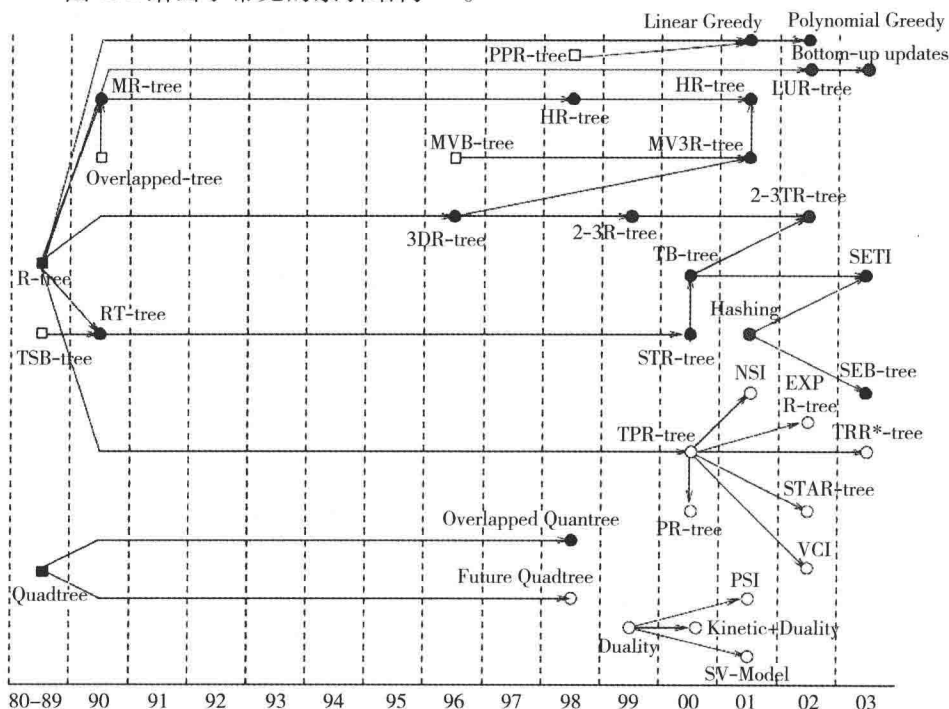


图 1.2 常见索引结构^[44]

1.1.3.2 常见索引结构介绍

本小节介绍空间驱动的索引方法的主要代表：网格文件、k-d 树、四叉树、R-树以及它们各自的扩展。

① 网格文件(grid file)^[48]。它的索引采用散列的方式将空间数据映射到一系列的数据桶中。每个数据桶包含一个或多个相邻的单元网格目录，而每个单元网格目录只能对应一个数据桶。数据桶和单元网络目录是一对多的关系。数据桶的大小由外存磁盘页的容量来定义，即每个磁盘页恰好容纳一个数据桶的数据。这样做的优点在于，可以有效地将数据桶中的数据在内外存之间交换。在划分空间数据的过程中，用一系列被称为刻度的数组对应相应的网格。

查询时，先通过刻度定位相应的数据桶和单元网格目录。根据该数据桶是否存在于内存中，决定是否需要将外存的磁盘页调入内存。再由内存中的单元网格目录确定查询结果所在的页面，并将其调入内存进行后续处理。范围查询也与之类似，只是需要检查所有与要查询的区域相交的单元。图 1.3 给出了网格文件的示例。

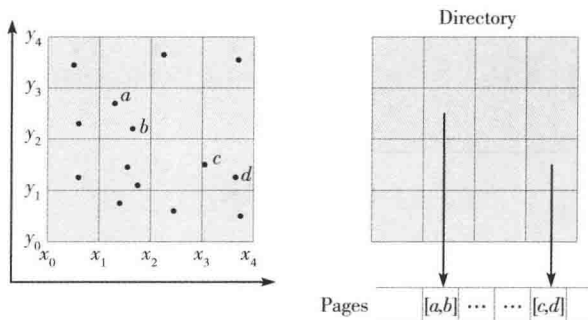


图 1.3 网格文件

② k-d 树。作为一维二叉搜索树在高维的扩展，k-d 树^[49]主要存储的是点数据。在创建索引的过程中，k-d 树通过不断地在各个方向上用 k-1 维的超平面将空间分为两部分来对点数据进行存储。分隔的过程需要满足每个超平面都至少要包含空间中的一个数据点。超平面划分不断进行，直到空间中每个点都被超平面包含为止。图 1.4 是一个 k-d 树的例子。

③ 四叉树(quadtree)^[50-51]。它对空间的划分方法与 k-d 树类似，即采用超平面划分的方法，将整个空间进行分割索引。四叉树与 k-d 树的不同之处在于：四叉树中代表空间点数据的每个节点对应于二维空间中的一个正方形区域或三维空间中的立方体，而对于更高维的空间索引，四叉树中的节点则对应于一个超立方体。四叉树示例如图 1.5 所示。

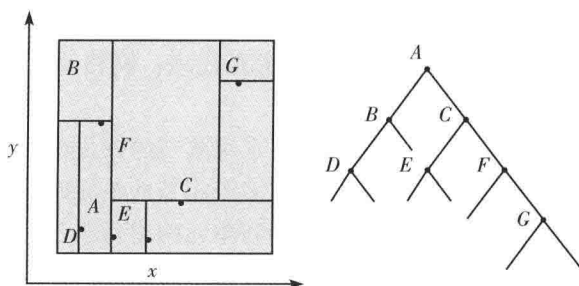


图 1.4 2-d 树及对应的点对象

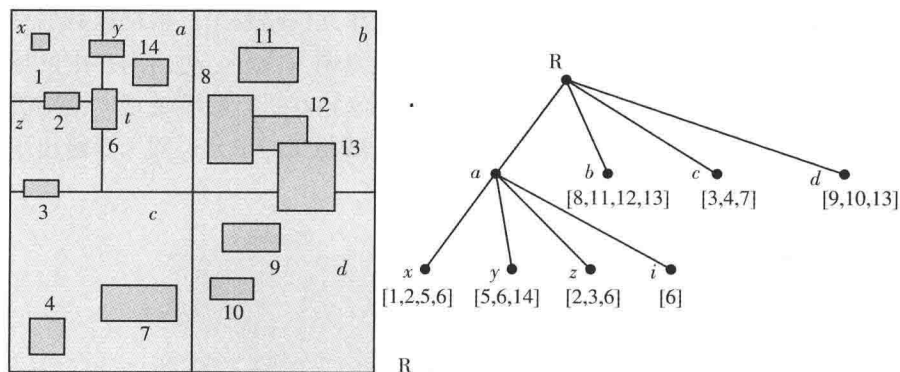


图 1.5 四叉树

④ R-树。R-树系列方法一直是应用最广泛的空间索引方法。R^{*}-树和 R⁺-树等都是 R-树的常见变体，其不同之处在于这些变体在插入和分裂的方式上，对基本 R-树进行了某些改进。

R-树^[43]是由 A. Guttman 在 1984 年提出的。作为平衡树的一种，R-树的索引概念与 B-树相似，其结构也类似于 B-树，因此，B 树的一些性质在 R-树中也能找到对应。由于 R-树良好的性能和适用性，自从 R-树被提出之后，研究人员就从没有停止过对其的研究和改进，提出了以 R⁺-树、R^{*}-树等为代表的 R-树变体。R-树及其变化的基础结构是包含空间对象的 MBR。MBR 相当于包含某些空间对象点的最小框，它是一个矩形(二维空间)、长方体(三维空间)或超矩形(更高维空间)。

顾名思义，R-树的索引也采用树形结构。包括空间所有对象点的最大的 MBR 作为根节点。在根节点以下，按照不同的分割策略，将根节点的 MBR 分成一系列下一层的 MBR。如此一层层地分割，得到了整棵 R-树。R-树中唯一的层次是叶子节点层，R-树的叶子节点代表的是空间对象。如图 1.6 给出了一个 R-树的实例。