

# 三维运动目标的数据 组织与管理

叶焕倬 著



湖北科学技术出版社

# 三维运动目标的数据组织与管理

叶焕倬 著

湖北科学技术出版社

## 摘 要

无线通讯、空间定位和测量等技术的发展,使得人们对空间目标的信息管理由静态逐渐扩展到动态。特别是活动于现实三维空间的运动目标越来越受到关注。智能交通、电子战场、物流管理、移动电子商务、旅行者服务以及其它各类 LBS 服务都离不开高效的运动目标信息管理机制。随着三维 GIS(地理信息系统)和虚拟现实技术的成熟,运动目标的信息管理也需要由原来的一维或二维扩展到三维。对运动目标的信息处理不仅涉及到空间属性,而且涉及到时间属性,因而相对复杂。然而,传统的数据库管理系统不能完全满足运动目标信息管理的需要。它们是为"静态"数据管理而设计的,数据的任何改变将导致数据库的显式更新,这与目标运动的空间状态持续变化特征不相符,而且,结构化查询语言 SQL 不是为处理时空数据而设计和优化的,在查询目标运动数据时有明显的不足。另一方面,目前时态数据库主要以变化相对缓慢的以统计为重要目的的数据作为管理和研究对象,它的实时性不强,而且对时间序列的管理较少涉及到空间属性。因此,有必要研究新的数据组织与处理方式来管理与运动目标相关的时空数据。本书研究的重点是三维运动目标的数据组织和管理,包括运动目标的表示和运动数据的索引技术。

对于运动目标信息管理的研究,目前普遍的方法是将运动目标抽象成空间移动的点,忽略目标的形状、大小、外观等因素,集中注意力研究目标空间状态及其变化,通过各种手段采集、传输、存储、索引、查询和处理目标的空间状态数据。在这种情况下,运动目标的表示也就简化成了目标的运动表示。现有的目标运动模型有多种,但可以归纳为点模型、时段模型、折线模型和函数模型四类。这四类模型各有特点,适于不同的应用需要,但它们多基于一维或二

维运动目标的管理,要处理三维运动目标,需要做一定的扩展,而且上述所有模型中没有一个模型考虑到目标的姿态,而运动目标的姿态在决定三维目标的空间状态中也是至关重要的。本书在分析了三维运动目标的时间特性、空间特性和运动特性的基础上,改进函数模型,特别是 MOST(Moving Object Spatio-Temporal)模型,消除其对运动函数所隐含的显式、增量式和分离式要求,设计了综合运动模型。并提出运动数据的细节层次概念,以不同精度和不同计算复杂度的数据及其相应的计算方法满足不同应用的需要。综合运动模型将运动数据和相关的处理用面向对象的方法进行封装,允许不同类型、不同结构的数据和不同种类的处理方式并存,适用于函数法与样本法的不同运动模型构造方式。针对多数应用系统中数据采集的方式和类型,从目标的运动位置、姿态、运动方向、速度、加速度、旋转速度、旋转加速度等各项指标及其相互关系出发,本书还提出了状态序列模型。该模型用离散的样本加上相应的插值方法,拟合目标运动的过程,对数据和处理过程进行封装,形成简洁的运动表示模型,弥补了现有模型对三维运动目标表达上的缺陷,同时还兼容对一维和二维运动目标的管理。本书还分类讨论了状态序列模型对不同运动目标的表示方式,分析了模型中所表达的信息,包括基本信息和导出信息。

在状态序列模型的基础上,本书提出了以  $2^n$  索引树为中心的多向多级运动数据索引机制。运动数据的索引依赖于所采用的运动模型,几乎每一类模型都提出了自己相应的索引方法。通过分析运动数据索引的需求发现,根据运动目标的特点和运动数据访问的需要,所采用的算法应该不仅能够对大量运动目标当前的运动状态建立索引,而且能够管理历史数据,按照运动数据模型所规定的方式提供对将来运动状态的预测。运动数据的追加是大量发生的,所以所建立的索引应该满足这种经常更新的需要,不至于频繁引起大范围或多级结点的大规模操作。运动数据的查询有多种形式,其中有快照式查询,也有连续查询。因此,所建立的索引机制应该兼顾到各种查询的方式。为了满足这些要求,本书采用空间分割的方法,扩展四叉树和八叉树,建立  $n$  维空间的  $2^n$  索引树。结合运动数

据及其处理过程的特点,给出了 $2^n$ 索引树的数据结构,以及树的建立、状态向量定位、添加、删除、滞后更新和树扩展等相关算法。为满足不同类型查询的需要,特别是连续查询对于相同目标连续一段时间内运动状态的查询要求,在建立运动数据索引时,需要将样本数据与 $2^n$ 索引树相分离,同时按照目标与样本时刻建立索引,从而形成多向多级的索引结构。本书探讨了这种混合索引方式,并给出了状态样本数据的具体存储形式。

在详细分析各种运动数据访问类型的基础上,本书讨论了各种查询方式,给出了基本状态查询和运动过程查询的方法,介绍了正向查询(目标-时刻查询)和反向查询(时间-状态查询)的不同检索程序和步骤,详细讨论了对相容区域和相交区域查询的不同处理方式。从运动数据在 $n$ 维空间的分布和数据访问过程出发,介绍了运动目标查询的准确性问题,探讨了准确找出所有满足条件的运动目标的不同方法,找出了前期处理法与扩展查询区域法在处理过程和效率上的不同,分析了一般查询与精确查询在查询步骤上的区别。通过分析目标与目标之间的相互关系,提出了目标关系查询的方法,并分别从指定目标的范围和相互关系的种类(绝对关系和相对关系)出发,分别讨论了不同种类目标关系查询的具体算法,介绍了通过预筛选方式提高相对关系查询效率的具体步骤。

为了提高运动数据索引与访问的效率,本书分析了 $2^n$ 索引树叶结点所包含索引对象的最大数量和各维度分割的最小单位,给出了保持较高索引效率所需要的取值范围;讨论了 $2^n$ 索引树结点的编号方式,以及线性 $2^n$ 树和层级 $2^n$ 树的不同组织形式,得出在数据量较大的情况下,层级表示优于线性表示的结论。在 $2^n$ 索引树叶结点中索引对象的存储方式上,采用时间编码的方式,可以节约70%以上的存储开销。对 $2^n$ 索引树的结点采用紧凑存储和松散存储不仅会影响到索引树的存储成本,而且直接决定着其数据访问效率,对不同类型的结点宜分别采取不同的存储方式,对当前时刻叶结点采用松散存储,其它叶结点以及所有非叶结点分别紧凑存储可以占用较少的存储空间,提高查询速度。通过一系列实验和分析,本书讨论了 $2^n$ 索引树的整体空间效率和时间效率,并且将 $2^n$ 索引

树与 R 树、时空格网、四叉树组等索引方式进行了比较,分析和比较的结果可以看出在状态序列模型中采用  $2^n$  树对样本数据建立索引是比较合适的。

最后,本书介绍了实验系统。三维运动目标管理组件是根据以上所讨论的数据组织与管理的方式而开发设计的,它以自动化组件组的形式提供对三维运动目标的运动数据、静态属性,包括几何形态数据进行管理。卫星信息管理和飞机信息管理是两个基于该组件的实验应用系统,它们分别实现综合运动模型和状态序列模型,并且使用多种数据集(包括真实的 NORAD Element Sets 和通过手动和自动分别生成的模拟运动数据集)对系统进行了验证。通过实验表明,综合运动模型、状态序列模型以及本书所讨论的运动数据组织和管理的方式在管理三维运动目标时是可行和适用的。

总之,在目前对一维和二维运动目标数据组织与管理的基础上,本书尝试着将其扩展到三维空间的运动目标,并且加入了目标姿态与运动特性的管理;引入了运动数据的细节层次概念;提出了使用综合状态模型和状态序列模型来表达复杂、多维的运动数据及其相应的处理方式;探讨了使用以  $2^n$  索引树为中心的多向多级运动数据索引结构管理大量的状态样本数据,以满足状态序列模型数据组织和管理的需要;分析了索引的空间效率和时间效率;讨论了提高数据存储效率和索引效率的多种方法;给出了数据组织与处理的具体算法;并通过实验分别使用真实和模拟的数据集,对模型及算法进行了验证。

关键词:三维运动目标、数据组织与管理、综合运动模型、状态序列模型、 $2^n$  树索引

## **Abstract**

With the development of wireless communication, positioning and photogrammetry, people are able to expand the information management of spatial objects from static to dynamic, and the moving objects in 3D real world are drawing more and more attentions. Many applications, such as ITS (Intelligent Transport System), digital battle field, logistics management, mobile e-commerce, traveler service and other LBS (Location Based Service) systems, need efficient MOIM (Moving Objects Information Management). And MOIM is expanding from 1D or 2D to 3D with the application of 3D GIS (Geographical Information System) and VR (Virtual Reality). The information process of moving objects is complicated as it deals with spatial attributes as well as temporal attributes. However, conventional DBMS (Database Management System) can not meet the needs of MOIM. It is designed for static data management, thus any data change will lead to explicit update in database. This is not fit for continuous spatial state change of moving objects. And SQL (Structural Query Language) is not designed and optimized for processing of spatio-temporal data. It is not good enough for moving objects data query. On the other hand, the current study of temporal database is focused on data which change slowly and to which statistic process is one of the important processes. It is not effective enough for real time process and it does not deal with spatial attributes. Therefore, it is necessary to study novel data organization and management algorithms to process the spatio-temporal data of moving objects. This paper is focused on the data organization and management of 3D moving objects, including representation of moving objects and index technique

of motion data.

The current study of MOIM is to regard the moving objects as the points in space, to pay no attention to the shape, size and appearance of the objects, and to study the objects' spatial states and their changes, to collect, transfer, store, index, query and process the spatial state data by different means. In this way, the representation of moving objects is simplified as the representation of objects' moving or objects' motion. There are various motion models developed. They can be classified into four categories, point model, time interval model, polyline model and function model. Each kind of model has its own advantage and fits for certain application. But most of the models are for 1D or 2D moving objects, and need further improvement before they can deal with 3D moving objects. And none of the existing models takes the orientation of objects into consideration, which is very important in spatial state of 3D objects. After analyzing the temporal attributes, spatial attributes and motion attributes, this paper improves function model, especially MOST (Moving Object Spatio-Temporal) model, eliminates the implicit requirement for explicitness, increment and separation of elements to motion function, and proposes GMM (General Motion Model). It also introduces LOD (Level of Details) to motion data and satisfies different application requirements by different accuracies and complexities for motion data and their processing. GMM encapsulates motion data and their processing according to object oriented method. It allows different processing methods and data with different types existing in same object, and is suitable for both function method and sampling method of motion model. In compliance with data collecting and types in most application systems, this paper proposes SSM (State Sequence Model) based on the position, orientation, moving direction, moving speed, moving acceleration, rotating speed, rotating acceleration and their relations of the moving objects. SSM restores objects' motion using discrete sample data with interpolation and extrapolation, and also encapsulates

---

data and their process. It is a concise model for representing moving objects, which is good for 3D objects as well as 1D and 2D objects. This paper also discusses the representation for different kinds of object using SSM, analyzes the information presented by SSM, including basic information and derived information.

This paper proposes MEMLI (Multi-Entry Multi-Level Index) based on  $2^n$  index tree for SSM. The index of motion data is dependent on motion model. Almost every model has its own index algorithm. By analyzing the requirement of motion data indexing, we find not only should the algorithm offer index to objects' current state, but also should it manage history data and provide motion state prediction based on motion model. The appending of motion data happens frequently, so the index algorithm should be used to such updates and avoid frequent data operation in large range and many levels. There are many kinds of queries, including snapshot query and continuous query. The index established should try to work well with all these kinds. In order to satisfy all these needs, we employ space partitioning, expand quadtree and octree, and establish  $2^n$  index tree in  $n$ -dimensional space. This paper introduces the data structure of  $2^n$  index tree and the algorithms, such as the establishing of index tree, motion vector locating, adding and deleting, late updating and index tree expanding. In order to work with different kinds of query, especially continuous query, which incessantly queries objects' motion states in a period, it is necessary to separate the sample data from  $2^n$  index tree, and establish another index according to objects and sampling time, thus forms MEMLI. This paper discusses this hybrid index, and suggests the storage method of sample state data.

This paper discusses various queries by analyzing different kinds of motion data access. It explains the algorithm of basic state query and motion query, introduces the procedure of forward query (query based on object and sampling time) and backward query (query based on time interval and state range), and shows different process for consist-

ent area and intersection area. Through analyzing the distribution of motion data in  $n$ -dimensional space and the process of motion data access, it introduces the accuracy of moving objects query, probes into algorithms to figure out all the objects searched, and finds out the difference of procedure and efficiency between preprocess method and expansion search area method., analyzes common search and accurate search. It also studies the relations among objects, proposes the way to process objects relation query, examines the objects range and the kind of relation query (absolute or relative), presents the algorithms of various objects relation queries, and introduces the way to improve search efficiency by prefiltering.

In order to improve the index and access efficiency of motion data, it is necessary to study the maximum number of indexed objects in leaf node of  $2^n$  index tree and the minimum partition unit of each dimension. This paper discusses the numbering of  $2^n$  index tree node and the organization of index tree by linear and layered methods. It finds out that layered representation is better than linear representation with big amount of motion data. If applied epoch coding in indexed objects storage, the storage cost will be reduced by 70%. The packed and unpacked storage of  $2^n$  index tree node not only decides the storage cost of the tree, but also affects the efficiency of data access. Different kinds of nodes should have different storage methods. The leaf node containing current epoch should be stored unpacked, all the other nodes should be stored packed. This paper also shows the space efficiency and time efficiency of  $2^n$  index tree by lots of experiments and analyzing. It compares  $2^n$  index tree with R tree, spatio-temporal grid and quadtree group, and finds out that  $2^n$  index tree works well with SSM.

3D MOIM module is developed based on data organization and management algorithm discussed above. It works as a group of automation module, providing information management of 3D moving objects' motion data and static information including geometry structure of ob-

jects. Satellite information management system and air plane information management system are two experiment systems applying 3D MOIM module. They implement GMM and SSM respectively. These systems are tested with different data sets, including real data, NORAD Element Sets, and synthetic data generated by controlled and automatic systems. The experiments show that GMM, SSM and the algorithms of motion data organization and management introduced by this paper is suitable to 3D MOIM.

To summarize, this paper tries to expand MOIM from previous 1D and 2D study to 3D. It adds objects' orientation and motion state management into MOIM, introduces the concept of LOD of motion data, proposes GMM and SSM to represent complex and multi-dimensional motion data together with their process algorithms, discusses MEMLI based on  $2^n$  index tree for SSM, analyzes space efficiency and time efficiency of the index, presents various methods to improve the storage and index efficiency of motion data, lists the data structure and algorithms of data processing, and tests the models and algorithms by experiments with real and synthetic data sets.

**Key words:** 3D moving objects, data organization and management, general motion model, state sequence model,  $2^n$  tree indexing

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 运动目标管理及其研究 .....	3
1.2.1 运动目标管理的内容 .....	3
1.2.2 从空间特性出发研究运动目标 .....	4
1.2.3 从时间特性出发研究运动目标 .....	5
1.2.4 从时间—空间特性出发研究运动目标 .....	7
1.2.5 运动目标管理的研究基础 .....	7
1.3 国内外研究现状 .....	8
1.3.1 目标运动的表示 .....	8
1.3.2 索引技术 .....	12
1.4 本书的研究内容和组织 .....	25
第二章 三维运动目标分析 .....	27
2.1 相关概念 .....	27
2.2 三维运动目标的特性及分析 .....	30
2.2.1 三维运动目标的特性 .....	30
2.2.2 三维运动目标特性分析 .....	41
2.3 获取目标运动数据的途径与方法 .....	45
2.4 研究目标运动的假定 .....	48
2.5 本章小结 .....	49
第三章 三维运动目标的静态模型 .....	50
3.1 三维运动目标模型分析 .....	50
3.1.1 外模型、概念模型与物理模型 .....	50
3.1.2 静态模型与动态模型 .....	51
3.1.3 个体模型与系统模型 .....	52

---

3.2 静态模型 .....	53
3.2.1 静态模型分析 .....	53
3.2.2 三维运动目标的形态特征 .....	54
3.2.3 静态概念模型 .....	60
3.2.4 静态物理模型 .....	60
<b>第四章 综合运动模型与状态序列模型 .....</b>	<b>70</b>
4.1 运动模型分析 .....	70
4.1.1 函数法与样本法 .....	70
4.1.2 内插和外推 .....	71
4.1.3 线性与非线性 .....	72
4.1.4 目标姿态管理 .....	73
4.1.5 匀速与非匀速 .....	74
4.1.6 一维、二维和三维 .....	75
4.1.7 精度和计算复杂度 .....	76
4.1.8 封装 .....	76
4.1.9 三维目标运动模型的需求 .....	77
4.2 综合运动模型 .....	78
4.2.1 MOST 模型分析 .....	78
4.2.2 综合运动模型 .....	80
4.3 状态序列模型 .....	83
4.3.1 样本法的优势 .....	83
4.3.2 状态序列模型描述 .....	83
4.3.3 状态序列模型对不同目标的表达 .....	85
4.3.4 状态序列模型信息分析 .....	89
4.3.5 与综合运动模型的关系 .....	93
4.4 本章小结 .....	95
<b>第五章 运动数据的组织 .....</b>	<b>96</b>
5.1 数据结构与类型 .....	96
5.2 运动数据编码 .....	101
5.2.1 运动数据的存储要求 .....	101
5.2.2 超矩形压缩算法 .....	102

---

5.2.3	差分超矩形压缩 .....	105
5.2.4	改进的差分超矩形压缩 .....	106
5.3	运动数据组织分析 .....	107
5.3.1	运动数据相关查询 .....	107
5.3.2	运动数据组织分析 .....	115
5.4	状态样本的 $2^n$ 树索引 .....	119
5.4.1	$2^n$ 树 .....	120
5.4.2	基于 $2^n$ 树的状态样本索引 .....	126
5.4.3	运动数据的查询过程 .....	143
5.5	本章小结 .....	151
<b>第六章</b>	<b><math>2^n</math>树索引效率 .....</b>	<b>152</b>
6.1	$2^n$ 索引树的存储 .....	152
6.1.1	$2^n$ 索引树的存储参数 .....	152
6.1.2	$2^n$ 树结点的编号和 $2^n$ 树结构的表示 .....	153
6.1.3	索引对象的存储 .....	155
6.1.4	$2^n$ 索引树结点的存储 .....	156
6.2	$2^n$ 索引树效率分析 .....	157
6.2.1	实验数据 .....	157
6.2.2	空间分析 .....	158
6.2.3	时间分析 .....	169
6.3	$2^n$ 树索引与其他索引方法的比较 .....	172
6.3.1	$2^n$ 树与R树比较 .....	172
6.3.2	$2^n$ 树与时空格网比较 .....	173
6.3.3	$2^n$ 树与四叉树组比较 .....	173
6.4	本章小结 .....	175
<b>第七章</b>	<b>实验系统 .....</b>	<b>176</b>
7.1	概述 .....	176
7.1.1	设计目的 .....	176
7.1.2	设计和运行环境 .....	176
7.1.3	运动模型 .....	177
7.1.4	运动数据 .....	177

---

7.2 三维运动目标管理组件 .....	177
7.2.1 组件概述 .....	177
7.2.2 静态属性模型 .....	179
7.3 实验应用系统 .....	211
7.3.1 卫星信息管理 .....	211
7.3.2 飞机信息管理 .....	246
7.4 实验结论 .....	251
<b>第八章 总结与展望 .....</b>	<b>252</b>
8.1 全书总结 .....	252
8.2 研究展望 .....	253
<b>参考文献 .....</b>	<b>255</b>
<b>附录 卫星运行轨道数据 .....</b>	<b>268</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

信息、通讯和空间定位等各种技术的不断发展,使得人们认识世界和管理世界的能力不断地增强。借助这些科技,人们不仅可以实现对静态目标的管理,而且正在不断提高对动态目标的认识和管理水平。各种应用(如医疗、军事、教学等)已经不再满足于静态目标的表现,而要求在一定精度条件下实时或准实时地处理动态目标。

虚拟战场是各种高科技技术在军事指挥和军事仿真等领域的综合应用。一个完整的虚拟战场系统不仅要提供静态地形、地物,如山川、公路、建筑物等信息,最重要的还在于需要提供战场上各种运动目标的静态和动态信息,包括目标的各种属性资料和任意时刻目标的位置、运动速度、运动方向等信息,进而表现任意时刻的整个战场态势以及任意时段的态势推演过程。战场态势瞬息万变、情况错综复杂,各种信息极其丰富、数据量非常庞大(徐享忠,2001),如果没有各种有效的静态和动态目标数据组织和管理技术,是无法实现的(S.Chamberlain,1994,1995)。通过各种途径获得的态势信息不仅可以用于战争过程的推演,更重要的是用于参战各方战略、战术的研究、当前战场形势的评估以及战争发展趋势的预测。这些都依赖于对各种类型目标的时空状态及运动过程的高效检索技术。

智能交通系统(ITS, Intelligent Transport System)的研究和应用在最近几年已经有很大的发展,它将先进的信息技术、传感器技术、数据通讯技术、自动控制技术、运筹学、图像分析技术、计算机网络和人工智能等有效地综合运用于整个交通管理体系,在系统工程综合集成思想指导下,建立起实时、准确、高效的交通运输综合体系。

对于智能交通系统来说,最重要、也是最关键的技术之一就是如何有效地利用信息并在交通运输系统中进行处理,其中包括从不同运输系统中最大限度地采集、组织和应用各种随着时间不断变化的信息(藤继涛,2003;马骥,2003;Braun,1997;[日]交通工程研究会,2000)。交通问题研究、车辆调度、动态最优路径、动态交通分配等问题都建立在对各种运动目标运动数据的组织、管理、分析和应用基础上(吴必军,2003;C.Shao,2003)。

移动商务将手机、传呼机、PDA(个人数字助理,Personal Digital Assistant)、便携式计算机等移动通讯设备与无线通讯网络、无线上网技术相结合形成一个电子商务体系,它消除了距离与地域的限制,能够实现在任何地方将电子商务能力提供给用户,真正做到 Anywhere & Anytime,即随时随地(叶兵,2002)。通过对移动目标时空信息的采集、记录和管理,移动商务系统能够给用户充分个性化的服务。

现代物流业开始于 20 世纪 60 年代,20 世纪 80 年代在西方国家得到大规模发展,由最初的成品配送发展为贯穿生产、仓储、搬运、配送以及流通的综合物流过程。到 90 年代更进一步发展为上、下游企业互相配合、互为影响的供应链管理。通过对企业各项物流活动的整合达到提高效率、节省时间和费用的效果。在美国和欧洲使用第三方物流的工商企业分别为 58% 和 76%(骆温平,2001)。剖析国外成功的现代物流型企业,可以发现现代物流所必须具有的基本条件是现代化信息管理网络。它是智能物流系统的基础,其技术基础包括移动信息技术、车辆定位技术、车辆识别技术、通讯与网络技术等(周立新,2002)。特别在物流配送和监控管理中,对运动目标的管理成为其核心内容,包括监测运输车辆位置及工作状态、按配送需求基于网络通讯系统迅速地发布配送和装载报告、最佳路径选择和车辆导航。从一定的角度来看,智能交通与现代物流在运动目标管理上有着相似的技术和应用基础(张飞舟,2003)。

另一方面,以研究空间信息和管理空间数据为主要内容的地理信息系统(GIS, Geographic Information System)出于应用和发展需要,也提出了对动态目标进行管理的要求。在传统的 GIS 中,空间