

用 Voronoi 多边形扩展的空间数据模型

严燕儿

(南京大学城市资源系, 南京 210093)

摘要 Voronoi 图是一种基本几何结构,也是解决相关几何问题的有效的工具. 为了有效地解决 GIS 中的空间目标间关系的动态构建、显示等问题,首先重点探讨了用 Voronoi 图扩展的空间数据模型,然后主要从空间数据建模语义的角度出发,在研究 GIS 面向对象的空间数据模型的基础上,提出了用 Voronoi 多边形来部分地代替面向对象的数据模型间的关系定义,并给出了一个基于 Voronoi 多边形的面向对象数据模型的框架. 该模型由于利用了 Voronoi 图具有的能良好地表示空间目标邻近关系的特性,并且由于通过空间目标的位置,能动态地获取和显示空间目标间的邻接关系,因而可以有效地弥补目前拓扑数据模型中,计算更新复杂及不能表示空间上邻近,而几何上不相接目标间的空间关系和栅格数据模型中不能有效地表达目标间拓扑关系的不足的问题,实践证明,这是一种较为理想的表示复杂空间关系的数据模型.

关键词 Voronoi 图 面向对象模型 邻近关系 等级结构

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)01-0115-06

The Research of The Voronoi-based Spatial Data Model

YAN Yan-er

(Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Voronoi diagram is one of the basic geometrical structures, an effective tool to solve the relatively geometrical problems. To meet the requirement of the dynamical construction and display of the relationship between spatial objects, the Voronoi-based spatial data model is put forward in this paper, which is developed on the basis of the generic object-oriental data model and can dynamically display the adjacency relations between spatial objects. In this model, voronoi polygons replace the part of the spatial relation definition in the object-oriental data model, and the frame of the Voronoi-based spatial data model is brought forward. This paper mainly focuses on the construction of the Voronoi-based spatial data model in the view of the semantic conception about spatial construction. The model is designed to make up the deficiency in the topological structure and the raster structure, and is a very effective data model to represent complicated spatial relations.

Keywords Voronoi diagrams, The object-oriental data structure, Adjacency relations, The hierarchical structure

0 引言

Voronoi 图是由俄国数学家 Voronoi 在 1908 年发现,并以他的名字命名的几何构造,如今在许多领域(尤其在计算机图形学、工程学等领域)均得到了广泛的应用. Voronoi 图是一种基本的几何结构,也是解决相关几何问题有效的工具,例如在二维空间中, Voronoi 多边形在求解最近的邻居、构造凸壳、构造最小生成树、求解最大空圆等问题中,均被

用作为计算优化的第 1 步骤^[1]. 最初 Voronoi 图的研究,集中于静态的 Voronoi 多边形的建模、维护、查询等方面,近来已逐渐向动态的 Voronoi 图的构建、空间关系的动态推算、可视化等方面发展. 它的理论和应用,在计算机图形文献中经常可以见到.

在地理学界中, Voronoi 图最早由 Thiessen 应用于气象观测站随机分布的研究,故 Voronoi 图又可叫做 Thiessen 图. 在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初, GIS 领域引进了 Voronoi 图,并将其用于空间邻近关系的描述和 GIS 中空间邻近关系的操作以

及空间目标查询等领域,目前 Voronoi 图作为一种辅助手段,解决了不少 GIS 中用传统方法无法解决的问题,如空间目标之间关系的判断。

由于 Voronoi 图具有矢量数据结构 and 栅格数据结构的双重特点,且更符合人类认识空间关系的思维方式,因此是一种在空间目标关系分析上更自然的数据模型,其不仅具有良好的表示地物之间的邻近关系及可以动态地建立空间目标间的拓扑关系等特点,也是 GIS 中,空间数据模型研究的一个方向,但目前关于 Voronoi 图在 GIS 中的研究,仅主要集中于空间关系的描述、表达与推断及 Voronoi 图的算法上,而对 Voronoi 图的数据结构及其与其他空间数据模型的结合上则研究甚少。本文试图在已有空间数据模型的基础上,通过扩展面向对象的数据模型来把 Voronoi 多边形镶嵌于面向对象的模型中,即基于 Voronoi 多边形扩展的空间数据模型,用以代替部分空间关系的描述。本文主要从空间数据建模的语义角度出发,提出一种空间数据模型的框架。

1 关于 Voronoi 图的基本概念

Voronoi 图是一种经典的数学对象,它可以转化为有效的数据结构而被广泛地应用于不同的领域。由于 Voronoi 图具有矢量数据结构中图形与空间对象一一对应以及栅格数据结构中对空间连续铺盖的双重特点,还具有良好的表示地物之间邻近关系的特点,并且不仅能使空间操作局部化,而且维护了整体拓扑关系的稳定性^[2],因而 Voronoi 图在空间数据结构和空间数据建模等 GIS 领域中得到了广泛的研究。

1.1 Voronoi 图

Voronoi 图由空间对象和与它们对应的 Voronoi 区域组成,Voronoi 区域表示了平面上一些到某对象的距离较到其他对象近的点的集合^[2]。

定义 1 设 S 为二维平面, p 为 S 上任意几何点, O 为 S 上离散对象 O_1, O_2, \dots, O_n 的集合, $n \geq 2$ 。区域 $V(O_i)$ 为满足条件(对除 O_i 以外的所有对象 O_j , 有 $d(p, O_i) \leq d(p, O_j)$)的点的集合,可表示为

$$V(O_i) = \{p \mid p \in S \text{ 且 } d(p, O_i) \leq d(p, O_j) \\ j \neq i, j = 1, 2, \dots, n\}$$

则称 $V(O_i)$ 为与对象 O_i 相关联的 Voronoi 区域, O_i 称为此区域的生长对象。若令 $V = \{V(O_1), V(O_2), \dots, V(O_n)\}$, 则称 V 为由 O 所生成的 S 平面上的 Voronoi 图(见图 1)。

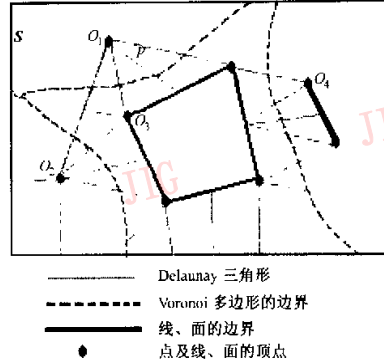


图 1 Voronoi 和 Delaunay 三角形

图 1 中,有 Voronoi 图的对偶图 Delaunay 三角网。一般情况下,Voronoi 多边形的一个顶点同时属于 3 个 Voronoi 多边形,在每个 Voronoi 多边形内有且仅有一个节点,连接与具有共同顶点的 3 个 Voronoi 多边形分别对应的节点,则形成一个 Delaunay 三角形,所有这样的三角形的集合就是著名的 Delaunay 三角剖分^[3]。Delaunay 三角形的每一条边都隐含着两个目标间的邻接关系。

上面是标准 Voronoi 图的定义,但针对不同条件下,有不同的 Voronoi 图的定义及其应用效果,于是提出了一种更广泛的 Voronoi 图,如最远点的 Voronoi 图、 k 阶 Voronoi 图、障碍 Voronoi 图、河流型 Voronoi 图等 12 种变式及 35 种的邻居操作,从而扩展了空间目标的邻近关系操作^[4]。

1.2 基于 Voronoi 图的邻近关系类型

由空间目标所生成的 Voronoi 图上可见,每个 Voronoi 多边形与其生成的空间目标一一对应,且这些 Voronoi 多边形互不重叠,并构成二维平面的一个划分。由此根据空间目标的 Voronoi 多边形是否邻接,就可以定义空间目标之间的邻近关系,即 Voronoi 图不仅表达了几何点与空间对象的邻近关系,也表达了空间对象之间的邻近关系,其具有代表性的邻近关系的类型^[2]如下:

(1) 立即邻近关系 表示两个空间目标间的邻近关系,即一生长对象周围有哪些生长对象相邻,如居民区附近有哪些商场。另外,由立即邻近关系还可推演出最近邻近关系。

(2) 侧向邻近关系 表示线目标与空间目标之间的关系,即一线状生长对象两侧有哪些生长对象相邻,如城市街道两侧有哪些建筑物进入视野。

(3) 位置邻近关系 表示平面上某一位置与空

间目标间的邻近关系,即一位置离哪个生长对象最近,如一个小学生按就近原则应该到哪个学校上学.

(4) 穿越邻近关系 表示线状目标与面状空间目标间的邻近关系,即哪些生长对象与指定线状对象相邻近,如一条公路穿过哪些市县.

(5) 连通关系 表示线状空间目标之间的邻近关系,即哪些线状生长对象与指定线状生长对象相接,如哪些边是多边形某条边的邻接边.

上面是 Voronoi 图关于空间目标间的基本邻近关系类型,但随 Voronoi 图条件的定义不同,还可以有其扩展的邻居关系:如二阶 Voronoi 图是探讨任何一点到某两个对象组合的距离比到其他组合近点的集合.由该 Voronoi 图可知,若离某一居民地最近的医院暂时关闭时,居民可到第 2 个近点的医院就医等位子求解问题;又如用河流型的 Voronoi 图,可以推算工厂污染物的扩散情况,即工厂污染的范围及对污染区最严重的位子确定等.

2 基于 Voronoi 图的空间数据模型

空间数据模型是描述空间数据内容和数据之间联系的工具.目前 GIS 中最常用的数据模型有层次模型、网络模型、关系模型及面向对象模型等.在这几儿采用面向对象模型来组织空间实体,就体现了 Voronoi 图在数据建模上的优点.

2.1 广义的面向对象的数据模型

面向对象模型是把真实世界的现象或物体抽象为一个一个的对象,由描述它的一组数据和表达其行为的一组操作组成.这种面向对象模型常将地理空间目标抽象为点、弧段上的内点、弧段、点状地物、线状地物、面状地物、复杂地物、无拓扑关系的条状或带状地物(如等高线)、地物类、专题层、工作区、工程等一系列对象,由于建立了各类对象的联系图,并将各类对象的属性与操作封装在一起,从而大大提高了空间关系的解算能力.

目前面向对象的数据模型大多建立在传统的空间概念模型的基础上,强调几何特征要素及其互相的关系,一般都把实体抽象成点、线、面等对象.本文则试用了广义的面向对象的数据模型,由于该模型允许不同尺度的目标间进行相互镶嵌,并可实现目标在空间上多尺度、多层次的表现,以及可进行不同尺度目标间的空间推理,因而能保持数据模型和概念模型间的一致性.它由空间层、实体层、要素层 3

个互相独立而又联系的层次组成^[5].下面简述之.

(1) 空间层 这里的空间是指空间实体集合,它是对真实世界现象的抽象和概括,在空间层中不出现具体的实体,是对所有实体的共性的描述,在此包涵了空间目标间的关系,如成员关系(member of),从属关系(is-a)等.它可用一序列 $\{U, \leq c, AAT, Ma\}$ 来描述,其中 U 是所有空间实体的抽象集合; $\leq c$ 是空间目标间的“属于”关系,如某一城市 A 是城市集的子集; AAT 是所有实体的属性类型集; Ma 是从空间层到实体层间的映射,并由它维持两层间的联系.

(2) 实体层 实体是指真实世界的现象,可以是简单的实体,也可以是复合体,由一系列的单实体组成.如某一城市 A ,可由城市区 E 和它下属的城镇组成.另外,实体层还允许实体间的镶嵌.在实体层中包涵了如下两种类型的关系:一是空间实体间的从属关系,二是空间目标间的拓扑关系,如相邻,包含,穿越等关系.它可用一序列 $\{S, \leq s, Rl, L\}$ 来描述,其中 S 是实体集合; $\leq s$ 表示复合实体与单实体间的关系,即一复合体由那些实体组成; Rl 表示空间目标间的拓扑关系,是 L 中的一种, L 是所有的拓扑关系的集合,如 $L = \{\text{相交, 包含, 相接, 穿越} \dots\}$.

(3) 特征要素层 特征要素主要指构成实体的形状的几何要素及其相关的属性要素.一般用点、线、面等几何要素来表示.它可用一序列 $\{V(S), \leq f\}$ 来描述,其中, $V(S)$ 是构成 S 的最小的图形要素集合,如点实体的图形集是点要素,线实体的图形要素集是线要素及其的两端点要素; $\leq f$ 表示一种包含关系,即指明该要素是复合要素,其由那些基本要素组成,如面要素可由一系列组成面域边界的线要素组成.

空间层、实体层及特征要素层的表示及其之间从下到上等级的关系的概念模型如图 2 所示.这里

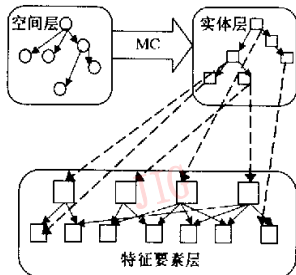


图 2 面向对象的概念模型

以某城市为例来说明面向对象的空间数据模型的组织(见图 3(a))。

该空间由 6 个空间实体{城市 A, 城镇 B, 城镇

C, 城区 E, 铁路 1, 公路 2} 组成。而城市 A 是个复合体, 由{城镇 B, 城镇 C, 城区 E} 组成。其相应的面向对象的空间数据模型见图 3(b)。

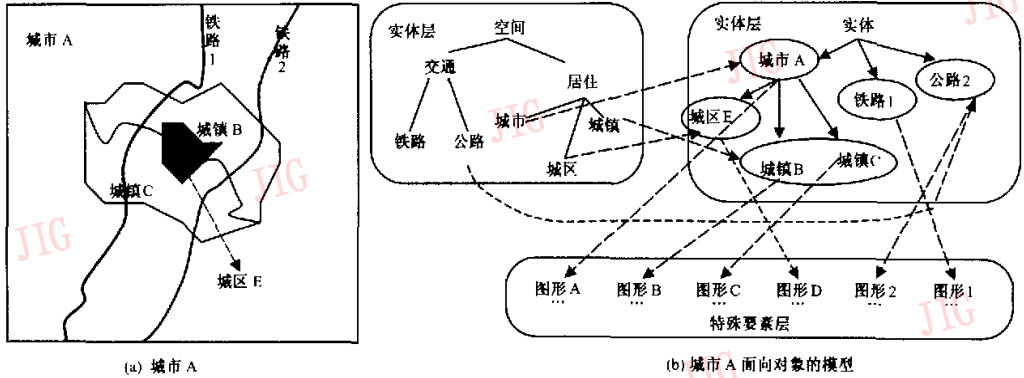


图 3 面向对象的空间数据模型

2.2 基于 Voronoi 图的空间数据模型

从上面广义面向对象的数据模型的分析来看, 该模型在各层次中都添加了空间关系的表示项, 并通过部分空间关系的储存来表达及动态地推断空间目标之间的关系, 以便克服传统关系表达无法推算几何上不相连, 而空间上相邻的目标间的空间关系的难题, 而本文则想用 Voronoi 多边形来部分地取代广义面

向对象的数据模型中的关系定义(见图 4)。

在空间数据模型中, 真实世界用对象类 Geo-object 表示, 它是所有点、线、面对象的父类, 它具有各自空间目标的特性, 并且每一个 Geo-object 对应于一个 Voronoi 多边形。因所有的对象类 Geo-object 被抽象成一个空间类 Geo-space, 并在此定义了关于空间目标的共同的属性, 故在该模型中,

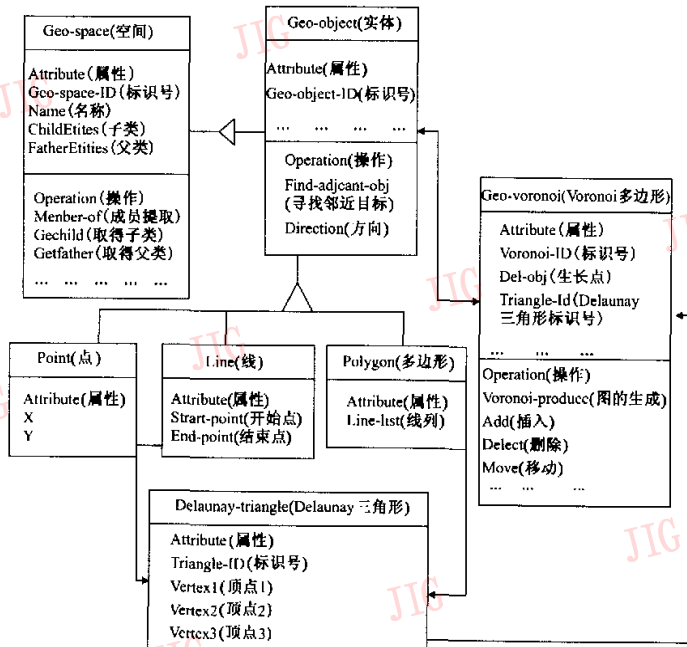


图 4 基于 Voronoi 多边形的面向对象数据模型

Voronoi 多边形层位于空间层与要素层之间, 与实体层相并列。由图 4 的空间数据模型框架来看, 在这里, Voronoi 多边形是由该多边形的对偶 Delaunay 三角网的形状决定, 由于每一个 Voronoi 多边形由一个以上的 Delaunay 三角形组成, 且 Delaunay 三角形储存了 3 个 Geo-object 的地址, 并作为 Delaunay 三角形的 3 个顶点, 于是 Delaunay 三角形的每一条边都显示了两个空间目标间的关系, 并享有 Voronoi 的邻近关系^[6-8], 其两者的数据结构见表 1、表 2 和图 5。

表 1 Voronoi 多边形的数据结构

Voronoi 编号	生长对象编号	三角形序列
1	P	1, 2, 3, 4
...
...

表 2 Delaunay 三角形数据结构

三角形编号	顶点 1	顶点 2	顶点 3
1	点 P	点 c	线 B
2	点 P	点 d	线 B
3	点 P	点 a	线 A
...

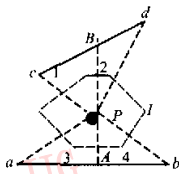


图 5 Voronoi 多边形及 Delaunay 三角形数据结构

操作功能的构建, 可以根据不同的用途来设计。一般来说, 空间类可以有成员关系函数, 提取父类或子类等功能。在实体类中, 可以有方向判断、距离计算、拓扑关系提取等基本操作功能, 其中方向, 距离是 Voronoi 多边形更改的两个重要参数。在 Voronoi 的层中可以含有拉伸、插入、删除 3 个基本的操作, 并可以含有根据复合实体的选择来动态地显示空间目标邻近关系的子模块等。

该模型由面向对象模型与 Voronoi 图两大部分融合而成, 因此具有两者如下一些特点: ①该模型具有栅格和矢量的双重性, 是一种更接近自然语言的数据模型, 有利于空间关系的动态变更; ②空间目标间的邻近关系操作更简单、方便, 如 Voronoi 多边形模块的拉伸、插入、删除等基本操作功能, 由于这些功能能通过空间关系的局部更新来实现, 从而维护

了空间关系的整体稳定性; ③可以通过不同距离的定义来生成不同的 Voronoi 图, 以适合不同空间操作的要求, 如可通过生成二阶 Voronoi 图来探讨任何一点到某两个对象组合的距离比到其他组合近的点的集合; ④该模型具有内涵(空间目标的属性和方法的定义)和外涵(实例及一系列的操作)两重语义, 由于它保存了实例间的相同结构和相同的操作途径, 从而实现了空间目标多尺度的表现, 也使数据整合、数据泛化更容易。

总之, 基于 Voronoi 图的空间数据模型, 其一个重要特点是: 实体间的邻近关系由搜索 Voronoi 图的邻近目标实现, 其他的关系可以由 Voronoi 图的邻近关系来动态地推算及建立, 另外, 由于空间目标间的空间关系的变更可以通过 Voronoi 多边形的局部操作来实现, 从而维护了整体空间拓扑关系的稳定性。

3 小结

本文主要从空间建模的语义上来探讨基于 Voronoi 图的空间数据模型的概念及其模型间的联系。Voronoi 图的空间数据模型是在面向对象的模型的基础上, 把 Voronoi 多边形作为一个空间实体对象镶嵌其中, 用其对偶 Delaunay 三角形来确定其的形状, 用 Voronoi 图中含有的空间目标间关系来替代原有的空间关系的存储, 从而减少数据模型中存储空间关系而占有的空间, 并可根据 Voronoi 图中的空间关系的动态推算来随时更新空间目标的相对位置及其关系。实践证明, 该模型虽可以弥补目前拓扑数据模型中, 计算更新复杂及不能表示空间上邻近, 而几何上不相接目标间的空间关系和栅格数据模型中不能有效地表达目标间拓扑关系的不足之处, 但由于其模型一般需要根据不同的用途来动态地建立空间关系, 故操作比较复杂, 且容易出现冗余度。

感谢: 本文得到了冯学智导师, 都金康老师等的指导, 在此特表示感谢!

参考文献

- 1 龚健雅. 地理信息系统基本教程[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 100~101.
- 2 陈平, 崔秉良. 用 Voronoi 方法为 Mapinfo 扩展拓扑功能[J]. 武汉测绘大学学报, 1997, 22(3): 195~200.
- 3 Shi Wen zhong, Matthew Yick Cheune Pang. Development of voronoi-based cellular automata - an integrated dynamic model

for geographical information systems [J]. Int. J. Geographical Information Science. 2000,14(5):455~474.

4 Okabe Aisuyuki, Boots Barry, Sugihara Kazuo. Nearest neighbourhood operations with generalized voronoi diagrams: A review [J]. Int. J. Geographical Information Science. 1994, 8 (1):43~71.

5 Leung Yee, Leung Kwong Sak. A generic concept-based geographical information system [J]. Int. J. Geographical Information Science. 1999,13(5):475~498.

6 Gordillo Silva, Balaguer Federico. Refining an object oriented GIS design model: topologies and field data [A]. In: Robert Laurini, Kia Makki, Niki Pissinou editors. Proc. of ACM-GIS'98 [C]. New York, N. Y.: Association for Computing Machinery, 1998;76~81.

7 Gahegan M, Lee I. Data structures and algorithms to support interactive spatial analysis using dynamic Voronoi diagrams [J]. Computers, Environment and Urban Systems. 2000,24:509~537.

8 Chen Jun, Li Cheng ming, Christopher Gold. A voronoi-based 3-intersectin model for spatial relations [J]. Int. J. Geographical Information Science. 2001,15(3):201~220.



严燕儿 1977年生,现为南京大学城市资源系地图学与地理信息系统专业硕士生. 研究兴趣为地理信息系统中的空间数据模型及在城市模型中的应用等.

2003 全国数字媒体与数字城市学术会议

征 文 通 知

2003年全国数字媒体与数字城市学术会议定于2003年5月24~26日在武汉大学召开. 由中国地理信息系统协会、中国图象图形学会虚拟现实专委会及中国测绘学会摄影测量与遥感专委会主办, 武汉大学城建学院、遥感信息工程学院、测绘遥感信息工程国家重点实验室联合承办. 会议将以“图象图形、3S及各种工程数字化设计的理论、应用及发展”, 开发广泛的交流和讨论, 会议将特邀国内外著名学者和专家就此领域的最新动态和热点问题作专题讲演和报告, 欢迎从事科研、教学、工程、开发及推广应用的广大地理信息、图象图形工作者积极投稿.

一、征文范围

- | | | | |
|-----------|--------------|---------------|-----------|
| 影像处理 | 智能虚拟环境 | GPS 理论及应用 | 数字水利 |
| 影像分析 | 图象图形理论及应用 | 数字化城市规划 | 数字电力 |
| 图象图形识别与理解 | 多媒体数据库及多媒体信息 | 数字化建筑设计 | 人工智能及专家系统 |
| 计算机仿真 | 遥感图象理论及应用 | 城市规划与建筑设计的新技术 | 互联网及网络技术 |
| 计算机可视化 | GIS 理论及应用 | 数字管网 | 数据管理技术 |
| 虚拟现实及虚拟技术 | | | |

二、征文要求及有关事项

- 稿件应反映图象图形、3S及各工程数字化设计的理论、技术或应用成果, 并未在其他会议及国内外公开刊物上发表过.
- 经会议程序委员会评审录用的论文将在《武汉大学学报》(信息版 No. 3)和(工科版 No. 3)及《测绘信息与工程》No. 3、No. 4 等核心期刊上正式发表, 部分文章将进入 EI 检索.

3. 文稿请按 Word 格式排版, 接受电子投稿和正式投稿(附软盘).

4. 重要日期:

征文截止日期:2003年2月20日;录用通知日期:2003年3月1日

5. 来稿请寄:

(1) tshang@public.wh.hb.cn(电子版)

(2) 武汉市东湖南路6号 武汉大学城建学院 尚涛, 孙宇宁, 詹平(打印文稿, 附软盘, 一式二份, 注明:2003 全国数字媒体与数字城市学术会议)

三、产品展示

会议期间将举办 3S 及图象图形产品展示会、新产品发布会和专题报告会. 欢迎有关厂家、公司报名参展. 请参展单位来函来人联系.

参展报名截止日期:2003年5月1日

联系人:尚涛 武汉市东湖南路8号武汉大学城市建设学院

电话:(027)67803312, 67802147 传真:(027)67803062, 67802147

邮编:430072 E-mail:tshang@public.wh.hb.cn