

地理信息系统中时空多维数据可视化技术研究^{*}

李红脊 崔伟宏

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 将科学可视化技术应用于地理信息系统之中,增强地理信息系统对时空多维数据的显示、处理功能,是当前的研究热点之一。通过对现有地理数据组织、显示简要概述的基础上,提出一种基于体素的时空多维数据组织方式。并通过二维、三维显示及动画形式的研究,从技术上对科学可视化与地理信息系统的结合进行初步的探索。最后,通过对时空多维数据可视化算法的研究与实现,为在地理信息系统中进一步将可视化技术走向实用提供基础。

关键词 地理信息系统, 多维数据可视化, 多维数据结构, 动画

1 引 言

由于空间技术的迅猛发展,特别是遥感技术的发展,大量有关地球空间环境的不同时相数据的收集,使地理信息系统的作用日渐突出,地理信息系统提供了存储、处理和分析地理数据的环境。当前的地理信息系统主要是处理数字式的地图,大部分是静态的二维地图。在环境科学研究中,用户不仅对传统的静态地图、电子地图感兴趣,更需要对地理现象的演化过程进行可视化和动态分析、动态模拟。复杂的静态地图,不管是印在纸上还是显示在屏幕上,都不能满足用户的要求,他们希望一个动态的、可视化的、交互的环境来处理、分析、显示他们的多种地理数据。

科学可视化技术(Visualization in Scientific Computing)使人能够在三维图形世界中直接对具有形态的信息进行操作。和计算机的直接交流,赋予人们对物体进行仿真并且实时交互的能力。这种技术把人和机器以一种直沉而自然的方式加以统一,这无疑将极大地提高人们的工作效率。可视化的另一项主要应用是动画技术。动画技术使得研究人员可以发挥自己的创造力进行模型的动作、景物的布置等设计。更令人激动的是虚拟现实(Virtual Reality)技术,它以三维图形为主,结合网络、多媒体、立体视觉、新型传感等技术创造一个让人身临其境的虚拟的数字世界与数字地球。

在地理信息系统界,随着科学可视化(VISC)的发展,促使研究人员将获得的大量地理数据,转化为所研究的地理对象、地理现象、地理事件生动的图像、声音、动画,通过对这些信息的分析理解,诱发出新的思想,以致做出新的发现。这一方面需要加强对数据组织的研究,将数据结构从二维向三维、静态向动态过渡;另一方面加强数据可视化的研究,包括对二维、2.5维、三维图形以及动画等形式的研究。

结合对国内外现有的地理数据可视化模型以及算法的研究,通过基于体素的数据场组织方法,将二维、三维、时态的地理数据有效地组织起来,推向更高维的组织表达,并且在微机环境上实现其可视化算法。

2 地理信息系统中可视化的发展

在地理信息系统中数据结构和表达方式经历了从二维到三维,从静态向动态的发展过程。

2.1 对地理数据的二维表达

在地理信息系统中,常用的数据模型有矢量、栅格模型,以及矢量-栅格混合模型。矢量模型是本世纪六、七十年代发展起来的面向点、线、多边形等地理特征(Feature)的数据模型,构成地理景观的各种物体的二维几何坐标位置通过数据链表(List)连接。栅格模型用二维离散的网格表示地理场景。表1分

别表示矢量、栅格两种数据模型以及图形可视化上的不同^[1]。

表 1 矢量与栅格在显示中的对比

Table 1 A comparison between vector and raster graphics in display

功 能	矢 量	栅 格
绘制效率	与场景和地物复杂程度关系密切	与场景和地物复杂程度关系不大
内存及处理速度	对内存和处理速度而言是可变的,这与场景和地物复杂程度有关	需要大量的内存空间和处理速度,与场景和地物复杂程度关系不大
屏幕空间失真	没有	经常
变换操作	连续的,只对物体的几何坐标操作	离散的,能对像素进行块(窗口)操作
布尔和块操作	困难	容易,能进行块操作、逐点运算
内部绘制	能通过边界填充	能进行彩色、纹理处理
数字图像采样	不能	十分容易
量测(如长度、面积)	量测结果是解析的、过程复杂	量测结果是离散近似的、过程简单

栅格数据一方面能够进行逐点处理和块操作,具有较强的空间分析和操作能力。另一方面,栅格能进行快速的浓淡绘制,因此,在规则二维格网(如矩形格网 Grid)和不规则格网(如三角格网 Tin)的基础上,人们实现了对地表的三维立体的显示。

2.2 对地理数据的三维表达

目前,地理信息系统中以及计算机辅助设计中,对真三维通常采用面模型(Surface Graphics)的方式,即由矢量边线构成物体,通过显示链、深度线索表达在光栅平面上,用消隐、浓淡技术表达若干面之间的

前后关系。任何对地理场景、视角、光线的变化,都需要重新计算深度链和在显示缓冲区中离散化^[1]。

与面模型相对应的是体模型(Volume Graphics),即应用三维立体格网来直接绘制地理场景,空间中的每一个格网对应某一个可测的属性值。三维立体格网单位视为体素(Voxel)。体素可以看作二维像素在三维空间的推广。我们把采集到的地理数据标量、矢量值分配给体素,其值通过体素的材质、颜色、纹理或透明度反映出来。表 2 反映了面、体模型在图形表达上的不同。

表 2 面和体模型对比

Table 2 A comparison between surface and volume graphics in display

功 能	面 模 型	体 模 型
绘制效率	与场景和地物复杂程度关系密切	与场景和地物复杂程度关系不大
内存及处理速度	对内存和处理速度而言是可变的,这与场景和地物复杂程度有关	需要大量的内存空间和处理速度,与场景和地物复杂程度关系不大
屏幕空间走样	没有	经常
变换操作	连续的,只对物体的几何坐标操作	离散的,能对体素块、体素子空间操作
布尔和块操作	困难	容易,能进行体素块(voxblt)操作、逐点操作
内部绘制	只能对表面操作	能对表面和内部操作
采样和内插	部分和间接	直接支持
量测(如长度、面积、体积、方法方向)	结果是解析的,并且过程复杂	结果是离散近似的,但过程简单
视点	当视点变化时,需要重新计算	可以事先计算并存储起来

点,在医学(如三维医学图像的重建)、流体力学(如流场的可视化)、有限元分析、生物(如生物医学图像显示)、CAD 实体造型等方面获得广泛的应用,它已成为科学可视化研究和开发的重要方向。

2.3 对地理数据的时态表达

地理数据的时态研究是地理信息系统界一个研究热点。Langran (1989)、Barrera (1990)、Donna J. Peuquet (1995)等分别提出和讨论了快照方式、复合方式和事件方式等来进行时态数据结构和数据库的设计。国内,陈军教授也对地理数据的时态关系进行了大量的研究和实践。在实践中,人们逐渐将2维数据、3维数据的定义延伸到4维,即把时间也看作一个坐标轴,及所谓的4维空间^[2,3]。

但时间轴与欧几里德空间中一维、二维、三维的坐标轴既有一定的联系,同时又有一定的区别。首先,它与其它轴有一定的共性,Pigot 和 Hazelton (1992)提出时间轴是连续的、线性排序的、对其它轴来说是正交的。虽然,在时间上可以进行前推、后推,但时间不能有分支。在数据模型中,包括时间在内的多种数据,我们可以看作新的维数轴,但在具体处理中我们应区别对待。

对时态的可视化问题,在地理信息系统界中研究较少,过去一般借助轨迹线等方法描述地理数据的时态部分特征。随着计算机技术和图形学的发展,现在借助动画技术表述地理数据时间维^[4]。即将按时间序列由地理数据或由地理模型生成的图像,中间缺少的帧由内插的方法补齐,通过单帧动画工具如 Macintosh Quicktime, MPEG-1 视屏记录工具, Silicon Graphics 和 Moviemaker 产生后处理的动画^[5-7]。

3 基于体素的时空多维数据可视化技术研究

通过对地理信息系统中现有二维、三维以及时态特征表达的分析,提出利用体素进行时空多维数据的组织,在体素数据结构基础上进行时空多维数据可视化的探讨。

3.1 基于体素的多维数据结构

数据的存储和组织无疑对数据的显示和操作起到决定性的作用。在研究中,首先,我们将分布于地理空间中的数据表示为一单值四维函数 $S=f(x,$

$y, z, t)$,前三维为空间信息,在体空间分别用行(Rows)、列(Columns)、高度层(Levels)表示,第四维为时间 t 。体素为立体体素(Cube),用立体堆(Cuberville)表示物体;体素也可以是四面体、六面体或其它任意拓扑结构的空子区域。数据分布于体元的顶点上,对于无效值的体素,采用特殊标记。时间采用双标记,一个为日期标记(date stamp),一个为时分秒标记(time stamp)来反映地理事件的发生时间。

在地理信息系统中,我们将地理实体定义为形体 $\{x, y, z\}$ 和有关属性 $\{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ 的集合,在实践中,我们逐渐认识到物体在地理空间的运动和变化是受到诸多因素的影响,如果只有二维、三维位置、时间,只能反映随时间 t 变化的地理形体 $\{x, y, z\}$ 的变化,而不能进一步反映地理形体属性 $\{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ 的变化,外界环境作用力以及地理信息场对地理实体作用。因此,对地理实体的时空特性存储表达采用五维或更高维 $S = \{f(x, y, z, t, p_0, p_1, \dots, p_n) \mid n \text{ 属于正整数}, p_n \text{ 表示第 } n \text{ 个地理对象的物理特性、化学特性参数}\}$ 。

因此,在数据库中,我们不但记录 x, y, z, t 空间、时间因子,同时记录各种相关数据变量以及它们的名称和属性标志。首先,数据按控制变量进行存储;其次按时间;最后按线性数组的方法存储 $x\gamma z$ 三维立体数据。在数据文件中,我们按数据段记录变量、时间、三维或二维数据。在程序中,以数据段为单位存入数据、读出数据,这样加快数据与内存的交换。数据段通过标记(Label)区分开。表3简要说明数据段的结构。表中数据的行列、体素的大小可以不同,这便于我们存储不同来源、不同尺度的数据。

除了记录地理实体外,基于体素的多维数据结构不可以对地理数据场进行记录。当控制参数是标量时,我们称之为标量场如温度、湿度、降雨量。当控制参数是矢量时,我们称之为矢量场如流水、风等流动(flow)对象。对矢量数据,一方面,需要考虑其沿 x, y, z 3个坐标轴的方向投影分量 u, v, w ;另一方面,又要考虑其大小。因此,在数据库中,我们将矢量数据拆成3个分量进行存储。这样,我们的数据库是即能存储标量数据场又能存储矢量数据场。

3.2 基于体素多维数据的操作

多维体的拓扑关系比较复杂,针对不同的维需要进行特殊的考虑。例如在由 $x\gamma z$ 三维立体中每个体素有26个相邻接的体素。6个体素与中心体

素共享面,12个体素与中心体素共享边,8个体素与中心体素共享结点。相对应,对与中心体素共享面的体素称为6邻接,对与中心体素共享边、结点的体素称为18邻接。第四维 t 时间与物体之间的拓扑关系,通常认为存在3种形式,即事件 A 在事件 B 出现之前发生,事件 A 与事件 B 同时出现,事件 A 在事件 B 出现之后发生。

表 3 数据段结构

Table 3 A structure of data block

Char VarsName ^[10]	变量名称
Int NumVars	变量编号
Int NumTimes	时间步长
Int Nr	行数
Int Nc	列数
Int N1	高度层数
Int TimeStamp	时分秒标记
Int DateStamp	日期标记
Float MinVal	最小变量值
Float MaxVal	最大变量值
Int VerticalSystem	垂直坐标系标记,表示垂直轴是否线性、等比
Int Projection	地图投影系统标记
.....
int CompressMode	压缩方式标记
int GridSize	数据段内数据量
float * data	数据

由于体素具有一定的形状和大小,在时间维上占据一定的位置,根据对上述多维体拓扑关系的分析,我们可以通过对体素、体素块在空间上和时间的并、交、差以及算术运算完成对实体的叠加操作。

如:

$$A_t U^* = r(A_t \cup B_t) \quad (1)$$

$$A_t = r(B_t - B_{t-1})$$

其中: A_t 表示 t 时刻的地理实体 A , B_t , B_{t-1} 表示 t , $t-1$ 时刻的地理实体 B , U^* 表示并运算, r 表示点集的正则化算子。

面对大量采集的不同来源、不同形式地理数据,在存储、高维叠加、投影变换时需要引起重视的一个问题是多维数据内插。通过对以上拓扑关系的研究,我们将二维栅格数据的插值方式向三维空间延伸。当网格划分比较密集并且体元足够小时,可以认为在一个体元内标量数据以及矢量数据在坐标轴

上的投影分量数值沿坐标轴方向均是线性变化的,对于拥有8个顶点的立方体体元,插值方法有邻近点插值、按距离加权的双线形、双三次插值和三线形内插。由于篇幅有限仅列三维立方体体元双线形插值公式如下:

$$s(x, y, z) = (1 - \Delta_x)(1 - \Delta_y)(1 - \Delta_z)c_{i, j, k} + (1 - \Delta_x)\Delta_y(1 - \Delta_z)c_{i, j+1, k} + (1 - \Delta_x)\Delta_y\Delta_z c_{i, j+1, k+1} + (1 - \Delta_x)(1 - \Delta_y)\Delta_z c_{i, j, k+1} + \Delta_x(1 - \Delta_y)(1 - \Delta_z)c_{i+1, j, k} + \Delta_x\Delta_y(1 - \Delta_z)c_{i+1, j+1, k} + \Delta_x(1 - \Delta_y)\Delta_z c_{i+1, j, k+1} + \Delta_x\Delta_y\Delta_z c_{i+1, j+1, k+1} \quad (2)$$

其中: $c_{i, j, k}$ 表示数据在 $x = i$, $y = j$, $z = k$ 的值, $c_{i+1, j+1, k+1}$ 表示数据在 $x = i+1$, $y = j+1$, $z = k+1$ 的值。 Δ_x , Δ_y , Δ_z 表示插值点相对于 $c_{i, j, k}$ 的在 x , y , z 坐标轴上的增量。对时间维、属性维的内插依据专业的需要,在城市扩展研究中,Penny Masuoka等采用线形内插的方法^[5],当然也可以采用诸如Kriging等方法^[2]。

3.3 基于体素地理数据的可视化

在研究中,我们采用MS VC4.2以OpenGL图形库为基础,在微机中文MS WindowNT4.0 WorkStation操作系统上开发多维地理数据的处理和可视化程序。对地理数据的可视化分为二维、三维方式,同时分别对二维、三维按时间序列进行实时处理,并以动画形式表达,以求全面地反映地理数据的可视化。整个程序包括一个时间顺序的显示链表,双缓冲区动画线程,以及同步运行的二维数据显示线程、三维数据显示线程和其它显示计算线程。利用线程的同步特性,实现一边计算,一边显示,同时用户进行实时交互的功能(图1)。

双缓冲区动画线程,即在显示图形的同时进行计算,计算后的地理数据经过消影、绘制,存入显示交换区,按当设定的时间序列的标志到来时,将显示交换区内的数据调入显示内存^[8]。也就是说,在显示缓冲区显示一帧画面时,后台的线程或进程正在显示交换区中计算、绘制下一帧画面;当绘制结束时,显示缓冲区与显示交换区交换画面。用户通过对带有时间标志的地理数据的选取,显示链中时间的设置来控制所要计算的地理数据,从而达到对数据及模型的实时控制。

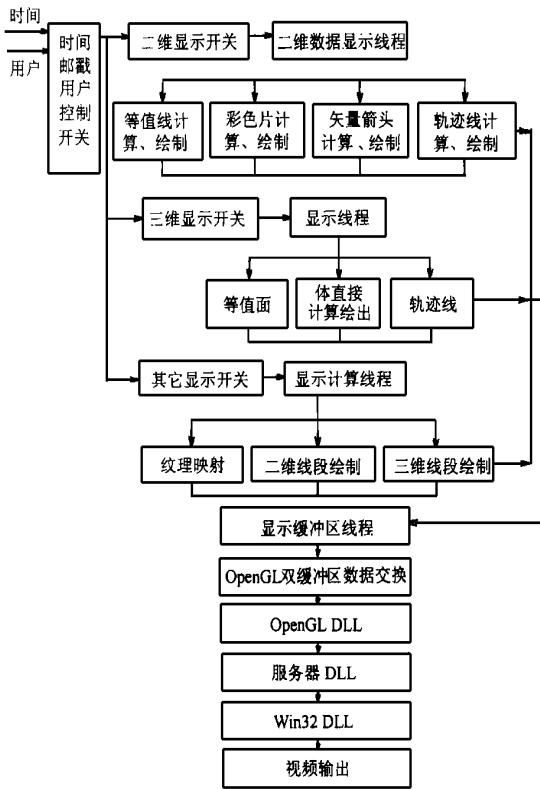


图 1 二维图形、三维图形以及动画主要算法流程

Fig. 1. Main steps and flow of two dimensional, three dimensional rendering and animation algorithm

二维要素的显示算法与实现

基于体素的多维数据结构能有效地进行二维要素绘制。绘制主要是利用切片技术进行等值线 (Contour)、彩色片 (Color Slice)、矢量箭头 (Quiver) 等方法绘制。切片技术是利用用户指定的平面如 xy, xz, yz 或者是任意平面与体空间相交, 或者是高维平面与更高维空间相交得到空间剖面的方法。在得到空间剖面后, 需要将邻近的体素值通过最近内插、双线性内插等方法, 构成剖面上的数据。在得到剖面数据后, 采用等值线、彩色片等方法绘制标量数据, 用箭头等方法绘制矢量数据。基于体素方法进行切片, 一方面简单易行, 无需增加太多的时间; 另一方面通过不同观察面的切片, 可以方便地观察内部结构。下面以等值线为例做简要介绍。

等值线图在地理、工程分析、计算领域具有广泛的应用。如等高线地图、等温图、有限元中效应力应变场的等值图等, 针对不同的应用产生的等值线的算法也不同。在基于体素的数据库上, 我们首先根据用户对指定的变量、指定的平面, 对多维体切片, 插值后形成新的规则离散平面。然后, 在新的离散平面上, 逐像素进行等值点的判断、等值线的跟踪、

等值线的连接。最后, 用彩色查找表, 在显示交换区绘制等值线 (图 2)。

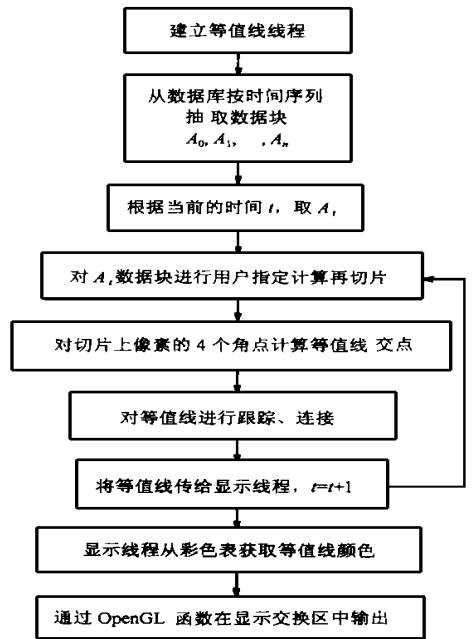


图 2 等值线算法流程图

Fig. 2. Flow chat of contour algorithm

三维立体要素的显示算法及实现

三维立体要素的显示是直观表示地理多维数据的核心。同样, 基于体素的多维数据结构能有效地进行三维要素绘制, 既可以采用面模型的方法, 如等值面, 又可以采用体模型直接绘制地理实体以及现象。

等值面可以看作二维空间的等值线在三维空间的延伸, 等值面的计算较为复杂。首先, 根据用户对指定的变量、指定的等值面阈值, 对每个立体的体素求相交平面, 记录交平面的交点。其次, 沿先后次序将交点连接起来, 如果数据较离散时, 需要进行插值。对由交点形成的离散面求法线。根据 Z 缓冲区算法 (Z-Buffer) 消除隐藏面, 用 Phong 光照模型对等值面进行绘制 (图 3)。

体模型直接绘制根据用户指定的变量从数据库中抽取 x, y, z, t 四维数据, 对数据预处理, 包括剔除冗余数据, 内插稀疏数据, 对数据值分类; 根据数据值赋予颜色、透明度; 在三维空间模拟传统的射线技术中, 对三维空间的每一体素均分配一个源强度及衰减系数, 当光线通过体数据空间时, 按每体素的源强度及光线沿距离的衰减分配一个亮度值投射到图像平面上即可形成三维图像, 体空间具有一定的透明度, 可由外部直接看到内部^[9] (图 4)。

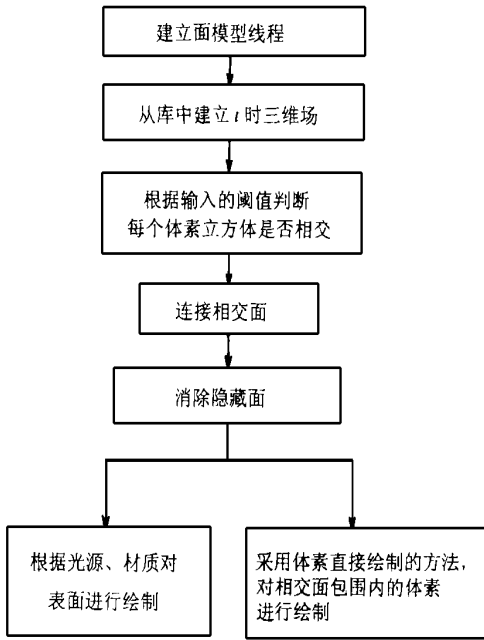


图 3 等值面绘制流程图

Fig. 3. Flow chat of isosurface algorithm

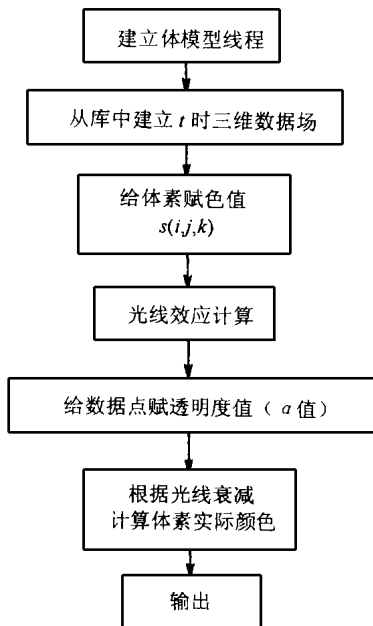


图 4 体素直接绘制流程图

Fig. 4. Flow chat of volume rendering

最后,需要指出的是,二维显示、三维立体显示以及动画算法并不是割裂开来的^[5]。在实践中,利用基于体素的多维数据结构能有效地将各种方法组织起来,更好地反映多维地理数据(图版 I 图 5)。由于体素和像素一样能进行块操作、逐点操作,这对将

基于栅格的空间分析向体空间延伸提供基础。文中提出的算法在 Pentium MMX 200, 内存为 32 兆的微机实现,能够进行二维显示、三维立体以及动画显示最后达到实时的效果,如果进一步采用并行算法,效率将会得到提高。

4 结束语

科学可视化技术在地理信息系统中对复杂的地理现象的理解起到越来越重要的作用。如何进一步将科学可视化技术与地理信息系统技术相结合,是一个十分复杂而又迫切需要解决的问题。地理信息系统,从技术角度看,需要对数据结构、显示技术等方面进行科学可视化的研究与讨论。同时,在应用中也需要走向可视化。

文中从技术上对科学可视化与地理信息系统的结合进行了初步的探讨。结合现有地理数据可视化模型,提出基于体素的地理数据组织方法,将二维、三维、时态的地理数据有效地组织起来,并且对时空多维数据库组织、数据拓扑以及时空数据内插进行讨论。在微机上实现了基于时空多维数据库的二维显示、三维立体显示以及动画等多种算法。

随着基于体素的时空多维地理数据模型的建立以及可视化研究的深入,为进一步加强对于多维体空间数据操作与处理的研究,最终走向应用奠定了基础。

参 考 文 献 (References)

- 1 Kaufman A., Cohen D., Yagel R. Volume Graphics. IEEE, 1993, 51-63.
- 2 Mason D. C., O'Connell M. A., Bell, S. B. M., Handling four-dimensional georeferenced data in environmental GIS. *International Journal of Geographical Information System*, 1994, 8(2): 191-215.
- 3 Eddy C. A., Looney B. Three-dimensional digital imaging of environmental data; selection of gridding parameters. *International Journal of Geographical Information System*, 1993, 7(2): 165-172.
- 4 Koussoulakou A., Kraak M. J., Spatio-temporal maps and cartographic communication. *The Cartographic Journal*, 1992, 28(12): 101-108.
- 5 Masuoka P., Acevedo W., Fifer S., Foresman T. Tuttle M. Techniques for visualizing urban growth using a temporal GIS database. Presentation at the ASPRS/ACSM Annual Convention and Exhibition, Baltimore, MD, 1996, April, 22-25.
- 6 FENG Jie-Qing, MA Li-Zhuang, PENG Qun-Sheng. Free-form deformation through embedding objects into the parametric domain of surface. *Journal of CAD & CG*, 1998, 10(3): 209-215. (In Chinese) [冯结青, 马利庄, 彭群生, 嵌入参数空间的曲面控制自由变形方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, 10(3): 209-215.]

- 7 Lao Zhi-Qiang, Pan Yun-He. A feature-based image deformation algorithm. *Journal of CAD & CG*, 1998, **10**(1): 1-6. (In Chinese) [劳志强, 潘云鹤. 一个基于特征的图象变形算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, **10**(1): 1-6]
- 8 Silicon Graphics, Inc. OpenGL Reference Manual. Addison Welsey, June, 1993.
- 9 Zhou Dongru. Representation and shading algorithms for 3D voxel-based graphics. *Journal of CAD & CG*, 1991, **3**(3): 29-34. (In Chinese)

[周洞汝. 三维体素图形的表达及浓淡算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 1991, **3**(3): 29-34]

作者简介

李红沓,男,1971年生。1993年毕业于武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业,获学士学位。1996年毕业于西南林学院,获硕士学位。主要研究方向为地理信息系统应用、GPS车辆导航、GPS车辆监控等。

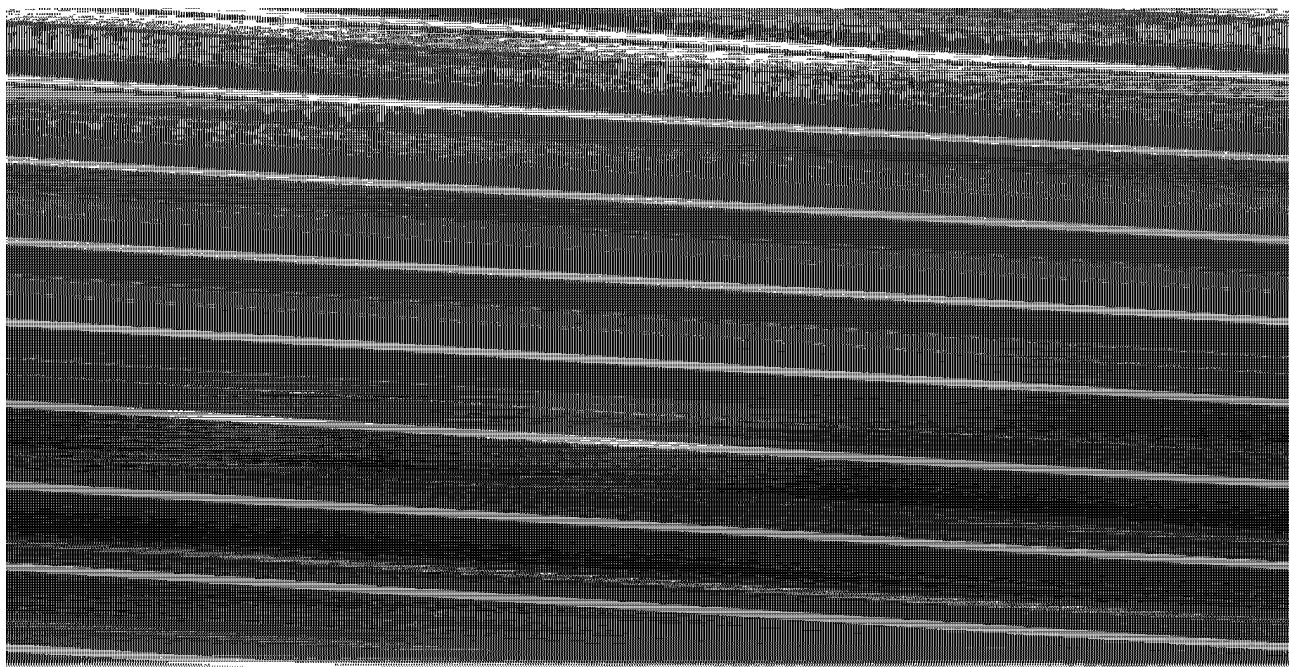
Visualization of Spatio-Temporal Multi-dimension Data in GIS

LI Hong-Ga CHUI Wei-Hong

(Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101)

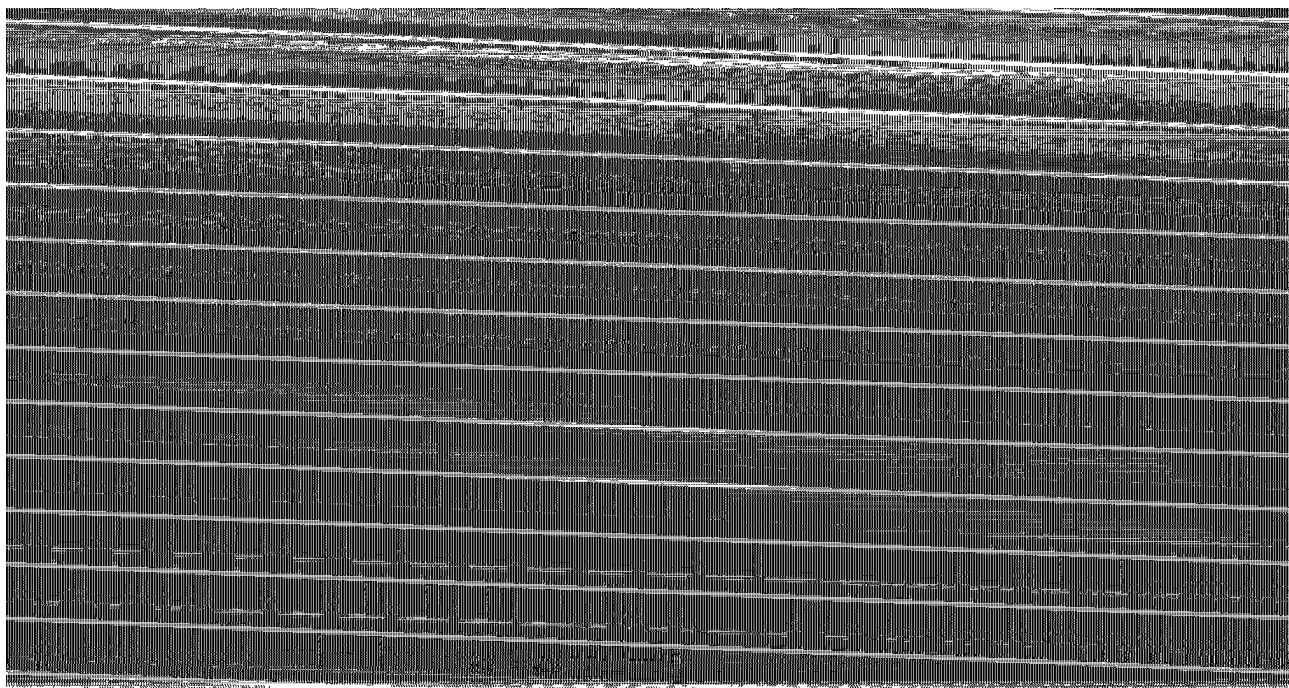
Abstract It is a hotspot for applying Visualization in Scientific Computing (VISC) to Geographic Information System (GIS). VISC is an effective and efficient method for promoting the capability of processing and visualizing the spatio-temporal geo-referenced data. In this paper, firstly, after reviewing the current data structure and visualization, we focus on volume graphics and provide a based-voxel spatio-temporal multi-dimension geo-referenced database. Secondly, by studying two dimensional rendering, three dimensional rendering and animation, we initially explore the method of integrating GIS and VISC. Finally, the results of the finished database and some methods of spatio-temporal visualization will be regarded as the base of the further application of VISC in GIS.

Key words GIS, VISC, Structure of multi-dimension data, Animation



(a) 1998-01-01 00:00

(b) 1998-01-01 12:00



(c) 1998-01-02 00:00

(d) 1998-01-02 12:00

图 5 基于体素的多维数据的可视化实例

图中含有二维、三维绘制以及动画，从上到下依次为等值线、等值面、DEM 表面、彩色切片、矢量箭头、切片，空间被淡蓝色体（绘制）包围。除地形高程数据，其它数据分别为温度和风速、风向等大气数据。