

# 三角形网格数据的边缘提取及网格自适应细分\*

王利生 谈正

(西安交通大学电信学院信息工程研究所, 西安 710049)

**摘要** 三角形网格数据是数值计算及实际测量中获得的一类主要的不规则网格数据, 数据量比较庞大, 结构复杂, 因而数据的可视化和分析存在许多困难。如果只将人们有兴趣的数据特征区域提取出来并单独处理(可视化、存储、后处理), 不仅可以减少可视化中的计算及存储需求, 而且可以为数据场中特征的高级表示、分析提供基础。因此本文讨论三角形网格数据中特征区域边缘的提取算法。我们在三角形网格中引入了邻域的定义, 并基于此定义给出网格数据中边缘网格点的检测算法。该算法被用于三角形网格的局部自适应加细。

**关键词** 三角形网格数据 特征区域 邻域 边缘提取

## 0 引言

网格数据是与图象不同的一类离散数据, 通过在给定的网格上采样(数值计算或测量)得到。在实际应用中, 许多数值仿真计算或测量得到的数据都是网格数据。例如, 气象数据及有限元数据等。对这些抽象数据的理解和解释是一件非常困难的事情。数据可视化是这方面的强有力工具, 但通常可视化处理的数据量非常庞大, 所以在数据的交互可视化、存储及后处理等许多方面存在不少困难。注意到人们有兴趣的只是数据中所包含的特征, 而且对应于特征的数据在许多情况下只是庞大数据中的一部分, 因此从庞大数据中只将人们有兴趣的数据特征区域提取出来并单独处理(可视化、存储、后处理)成为人们的一个研究重点<sup>[1,2]</sup>。

抽取等值线(面)是数据可视化的主要手段, 但在实际应用中, 有许多重要特征无法用抽取等值线(面)的方法提取。例如, 有许多特征区域的特点是其内部的数据相对于周围区域的数据有较大变化(存在较大的梯度), 区域的分布存在明显的边缘。显然, 用抽取等值线(面)的方法有时无法从数据场中提取这类特征, 而必须通过边缘检测。这里, 边缘指两边的数据发生较大变化的曲线或曲面。

从数据场中自动抽取特征区域边缘的处理方法

有许多重要应用, 例如: ①单独处理特征区域可以较大地减少数据量, 从而减少计算与存储需求; ②数据场中特征区域边缘的有效提取, 可以为数据场中特征的高级表示、分析提供基础; ③数据场中特征区域边缘的提取算法可应用于数值计算中的网格局部自适应加细。这里, 网格自适应加细指网格点的一种优化分布: 在数据变化小的区域, 生成较少的网格点; 在数据变化大的区域, 生成较多的网格点。

在数值计算及测量中, 可以得到各种类型的网格数据。简单的网格数据, 如笛卡儿网格数据、规整网格数据等, 它们的邻域结构整齐一致(4邻域或8邻域), 其特征区域提取算法的讨论相对简单<sup>[2,4]</sup>。而在实际应用中, 复杂区域的数值计算大多生成不规则网格数据, 这些数据的结构非常复杂。其中, 三角形网格数据是二维不规则网格数据中最为重要的一类。通常, 有限元剖分、散乱数据的Delaunay剖分得到这类数据, 而且许多二维网格数据可转化为三角形网格数据处理。三角形网格数据中的特征区域提取算法的研究结果知之甚少, 因此本文将讨论三角形网格数据中特征区域边缘的提取方法。边缘提取是一种局部运算, 为此, 我们首先在三角形网格中引入邻域的定义, 并基于该定义给出三角形网格数据中特征区域边缘网格点的检测算法。该算法是Kirsch算法在网格数据中的推广。作为应用, 我们将本文结果用于三角形网格的局部自适应加细。

\* 本文研究受华中理工大学图象信息处理与智能控制国家教委开放实验室资金资助(TKLJ9709)

收稿日期: 1998-08-27; 收到修改稿: 1998-11-24

## 1 三角形网格数据的基本特性分析

### 1.1 三角形网格数据的邻域结构分析

三角形网格将连续空间剖分为互不相交的三角形集合,数据采样(有限元计算或数据测量等)在所有三角形的顶点进行,见图1(a)。显然,三角形网格数据的采样频率很低,而且采样方式不规则,在每一网格点周围的网格点数可以不同,而且分布不均匀。由于三角形网格不存在规则结构网格所具有的整齐一致的邻域结构(4邻域或8邻域),为了对三角形网格数据进行局部分析与处理,首先引入三角形网格点的邻接点及邻域的定义,以及连通的定义。

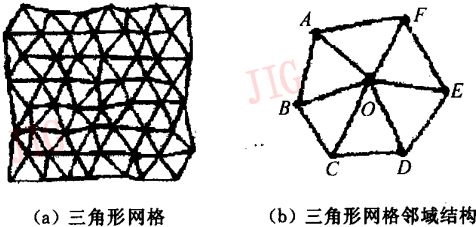


图1

**定义1** 如果三角形网格中2个网格点的连接线段构成某一三角形的边,则称这2点为邻接点。一个网格点的所有邻接点构成该点的邻域。以网格点为顶点的三角形称为该网格点的邻接三角形。

**定义2** 2个网格点  $x_0, x_n$  称为是连通的,如果在三角形网格中存在网格点列  $\{x_i\}, i=0, 1, 2, \dots, n$ , 使得  $x_i$  与  $x_{i+1}$  为邻接点。

连通的网格点可用三角形的边连接起来。三角形网格中,任2个网格点都连通的数据子集称为连通集。显然,如果特征在连续场中表现为场值分布于一定范围内的连通区域,则在三角形网格数据中,其仍表现为场值分布于一定范围内的连通集。

为了应用方便,我们将网格点邻域内的邻接点按逆(顺)时针方向顺序存储。例如,在图1(b)中,网格点“O”有“A、B、C、D、E、F”6个邻接点,并有ABO、BCO、CDO等6个邻接三角形。二维网格点的邻域结构可以用数据结构描述: `struct neighbor {float point[2]; int num; float point set[N][2]}`; 其中,数组 `point[2]` 存储给定网格点的  $x, y$  坐标,二维数组 `point set[N][2]` 按逆(顺)时针方向顺序存储所有邻接点的  $x, y$  坐标, `num` 存储邻接点个数, `N`

$= num$ 。任意三个邻接点 `point set[i]`、`point set[i+1]`、`point` 构成一邻接三角形,共有 `num` 个。

在有限元剖分生成的三角形网格中,所有网格点的坐标都显式保存,而且网格中每一三角形的顶点构成也被保存。利用下面算法可从中抽取所有网格点的邻域结构:

(1) 遍历三角形网格集合,可以得到所有网格点的邻接三角形集合及邻接点集合。

(2) 按逆(顺)时针方向排列所有网格点的邻接点。

① 任取一网格点 `point` 及任一整数,并令  $i=0$ 。

② 取 `point` 的一邻接三角形,记一项点为 `point set[i]`,另一顶点为 `point set[i+1]`。

③ 遍历 `point` 的邻接三角形集合,必存在邻接三角形,两个顶点中,一个等于 `point set[i+1]`,而另一个不等于 `point set[i]`,记后一顶点为 `point set[i+2]`。

④ 如果 `point set[i+2]` 不等于 `point set[0]`,令  $i=i+1$ ,并转向③;否则,令 `num=i+1`,并转向①。

得到网格点的邻域结构后,可以在三角形网格数据中进行中值滤波、边缘检测等局部处理。

### 1.2 三角形网格数据的孤立点噪声分析

三角形网格数据的可视化本质上是将离散的网格数据重构生成连续场后进行显示。因为连续,连续场中每一网格点的值与其周围插值点的值将非常接近,因此三角形网格数据中的孤立点噪声在连续场中将在周围扩散,形成一小的区域。引入网格点邻域的定义后,可以利用中值滤波消除三角形网格数据中的孤立点噪声,即在每一网格点的邻域内以所求中值代替网格点数据本身。实验结果表明在三角形网格数据中中值滤波也可以较好地抑制随机噪声。应注意,网格点邻域内的邻接点数可以为偶数(例如  $2n$ ),这时,将从大到小排序后的第  $n+1$  个值称为中值。

## 2 三角形网格数据的边缘检测算法及其应用

三角形网格数据是对连续场的一种离散采样。已知,当连续场中特征所在区域的场值明显不同于周围区域的场值时,该特征与相邻区域间存在明显的边缘,只要检测出边缘,边缘内部即为特征区域。连续场中特征的这一特点在离散采样数据中依

然存在,表现在三角形网格数据中为:只要把边缘网格点找到,则边缘网格点集合所围的区域便为特征区域。本节给出三角形网格数据中边缘网格点的检测算法。特征边缘的检测是网格数据中特征的高级表示及自动提取与分析不可缺少的一步。

### 2.1 三角形网格数据的边缘检测算法

设  $f(x, y)$  为连续场,  $(x_1, y_1)$  为一阶跃边缘点。取  $(x_1, y_1)$  的球形窗口(邻域),则窗口内包含了一边缘线。边缘线将窗口分为目标特征及背景两部分,二者的取值有较大的跳跃。离散采样后,在三角形网格中考察  $(x_1, y_1)$  的邻接点,则必然一部分位于背景中,另一部分位于目标特征中,而且这二部分邻接点场值依然相差较大。显然,通过考察网格点周围邻接点的灰度变化,可以判断阶跃边缘点。

设网格点  $(x_1, y_1)$  的邻接点数为  $num$  个,邻域结构为  $neighbor$ 。令  $i=0, 1, \dots, num-1$ , 并设  $S_i = f(\text{point set}[i]) + f(\text{point set}[i+1])$ ,  $M_i = \sum_{j=0}^{num-3} f(\text{point set}[i+2+j])$ 。这里,  $\text{point set}[k]$  与  $\text{point set}[k \% num]$  为同一点,  $\%$  表示取余数。 $S_i$  为二个相邻邻接点的场值的和,  $M_i$  为剩下的  $num-2$  个邻接点的场值的和。以网格点邻域中二个相邻邻接点的场值的加权和  $S_i$  减去剩下的邻接点的场值的加权和  $M_i$ , 而且令邻接点环绕  $(x_1, y_1)$  不断移位, 则得到  $num$  个差值:  $(num-2) \times S_i - 2M_i, i=0, 1, \dots, num-1$ 。取  $num$  个差值中的最大者作为边界检测算子的值, 则边界检测算子值定义为:

$$W((x_1, y_1) = \max\{ |(num-2) \times S_i - 2M_j| : i=0, 1, \dots, num-1 \} \quad (1)$$

取门限值  $TH$  做如下判断: 如果  $W(x_1, y_1) > TH$ , 则  $(x_1, y_1)$  为阶跃边缘点。

上述边缘网格点检测算子与方向无关, 利用该算子, 可以检测到场值在各个方向的阶跃变化, 而且检测到的边缘网格点为连通集合, 其所围的区域即数据中的特征区域。

算子(1)是图象处理中的 Kirsch 算子<sup>[5]</sup>在网格数据中的推广, 由于其基于场值的梯度变化检测边缘网格点, 因此与二维图象处理类似, 位于特征边缘线两侧的 2 个网格点会同时响应, 边缘网格点成双存在。见图 2(b), 边缘检测结果表现为在真实的边缘线两侧分别形成一条连通的边缘网格点曲线(点列)。与图象不同, 三角形网格数据的采样频率低, 真实的特征边缘线不一定通过网格点, 更多的是从两个邻接边缘网格点中间通过, 因此, 真实的边缘线穿行在邻接的三角形网格集合中。已知, 若一边缘线穿过一网格三角形, 则三角形的 3 个顶点均作为边缘网格点响应。分析可知, 算子(1)检测到的双响应边缘网格点恰恰是被边缘线穿过的网格三角形的顶点。因此利用公式(1)检测到边缘网格点后, 根据 3 顶点是否为边缘网格点, 可以将边缘线穿过的网格三角形集合(边缘网格)检测出, 见图 2(c)。需要指出, 当边缘线局部弯曲很大时, 尽管弯曲处一些三角形网格中无边穿过, 但其 3 个顶点仍可能是边缘网格点。可以根据三角形 3 个顶点值是否相近排除这一情形。

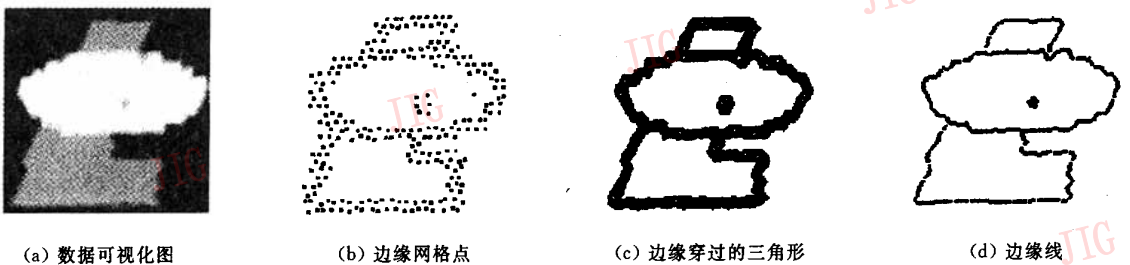


图 2

检测出包含特征边缘线的所有三角形网格单元(边缘网格集合)后, 对每一三角形, 计算其中包含的小段边缘曲线, 所有的小段边缘曲线最终构成完整的边缘。在边缘三角形中, 计算各边 2 个顶点的场值差, 差值较大的 2 边判定为真实边缘穿入及穿出的 2 边。为了计算简单, 可取网格单元中被边缘线穿过

的 2 条边的中点连线近似真实边缘线, 见图 2(d)。我们利用本文算法处理关于某海湾相对涡量分布的网格数据(见图 4(a)), 所检测到的边缘网格集合及边缘线见图 3(a)和(b)。易知, 边缘检测可以通过并行运算实现。

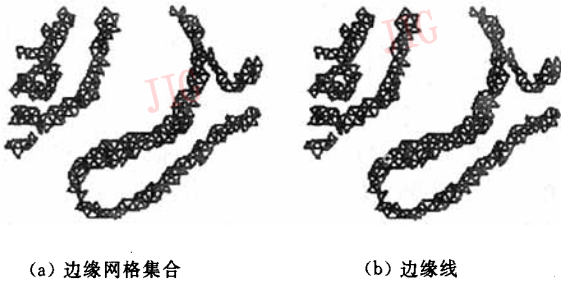
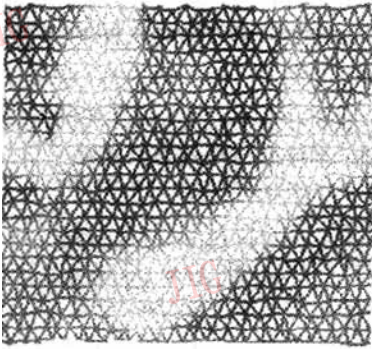
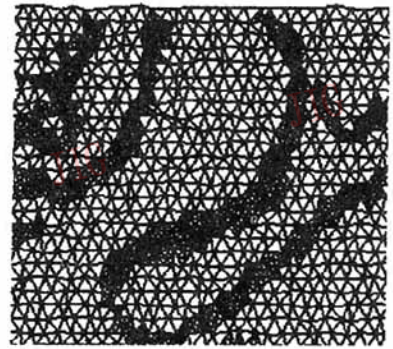


图3



(a) 三角形原始网格及数据



(b) 自适应细分后的三角形网格

图4

## 2.2 三角形网格的自适应细分

网格数据的一个主要来源是数值仿真计算,如流体力学计算,有限元分析等。数值仿真计算时,首先要将连续区域进行网格剖分,分割为互不相交的网格集合,然后数值计算在所有网格的顶点进行。因此,网格剖分生成的网格集合决定了网格数据的采样方式。因为人们一般只对网格数据中的一部分特征区域有兴趣,所以将所有网格较细的剖分后进行

计算,不仅增加了计算量,而且是一种浪费。一种可行的改进方法是:先在剖分较粗的网格中提取特征区域,然后单独将特征区域的网格加细,其他区域的网格保持不变。这样,既提高了特征区域的采样(计算)分辨率,计算量也不会增加很多。

上述方法是网格的一类自适应加细方法,也是网格数据的一种优化采样方法,关键是如何从已有的网格数据中抽取特征。在许多应用领域中<sup>[3]</sup>,人们主要关心数据有较大变化之处,即梯度较大之处。数据变化较大的区域我们前面定义为特征边缘线(面)。边缘线(面)分布在边缘网格集合中,可通过网格数据的边缘检测得到。对这些边缘网格分别细分,则实现了网格的自适应加细。三角形的细分主要有两种方法:

(1) 某一顶点与对边的中点相连,分为2个三角形;

(2) 三边的中点相连,分为4个三角形。本文采用后一种细分方法,实验结果见图4(b)。

致谢 审稿人提出了许多重要的修改意见,表示衷心的感谢。

## 参考文献

- 1 Moorhead R J, Zhu Z F. Signal processing aspects of scientific visualization. IEEE SP Magazine, September 1995, 20~41.
- 2 Samtaney R *et al.* Visualizing features and tracking their evolution. Computer, July 1994, 20~27.
- 3 Hagen H, Muller H. Focus on scientific visualization, Springer-Verlag, 1993.
- 4 梁训东,刘慎权. 基于特征的时间序列数据场的可视化方法. 软件学报, 1996, 7(9): 547~552.
- 5 Kirsch R. Computer determination of the constituent structure of biological images. Computer and Biomedical Research, 1971, 4(3): 315~328.



王利生 西安交通大学电信学院信息工程研究所博士,工程师。主要研究方向为数据可视化中的特征提取,几何建模,神经网络。



谈正 西安交通大学电信学院教授。主要研究方向为图象分析,计算机图形学。

## Edge Detection and Adaptive Subdivision of Triangular Mesh Data

Wang Lisheng, Tan Zheng

(School of Electrics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** Triangular mesh structure is an important irregular mesh in data visualization. An effective way for reducing computation and memory requirements is to extract feature regions from massive data set, and only process (visualize, store, transmit, etc.) the data in these regions. For this reason, we give an algorithm for detecting edge points from triangular mesh data. The algorithm can be applied to adaptive subdivision of triangular meshes.

**Keywords** Triangular mesh data, Edge detection, Adaptive subdivision of mesh

### 新书推荐

## 图象工程(上册)——图象处理和分析

清华大学出版社出版 章毓晋 编著

本书主要介绍了图象处理和分析的基本原理、典型方法和实用技术。考虑到图象技术的飞速发展和广泛应用,本书在讲解基本理论的同时还介绍了许多近年来国际上有关的最新研究成果和应用实例。

本书主要包括三大部分。第一部分(包含第 1, 2, 3 章)是图象基础,论述了图象工程的定义,图象技术整体概况和分类以及有关视觉和图象模型,数字图象采集、表达和象素关系,图象的各种基本变换技术等。第二部分(包含第 4, 5, 6 章)论述了图象处理的各重要分支,如图象增加,图象恢复,由投影重建图象和图象压缩编码等基础理论、技术和方法。第三部分(包含第 7, 8 章和附录 A)介绍了图象分析的基本原理和技术,如图象分割、目标表达和描述、特征测量、形态学方法等。书中还提供了大量例题与习题。

本书可作为信息和信号处理、通信与电子系统、模式识别、生物医学工程等学科大学本科和研究生专业基础课教材,也可供上述学科及信息工程、电子工程、计算机科学与技术、机器人自动化、遥感和军事侦察等领域的科技工作者和高等院校的师生参考。