

移动点 Voronoi 图拓扑维护策略的研究

王 淼¹, 郝忠孝^{1,2}

WANG Miao¹, HAO Zhong-xiao^{1,2}

1. 哈尔滨理工大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150080

2. 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001

1. College of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

2. College of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

E-mail: wmscan@tom.com

WANG Miao, HAO Zhong-xiao. Research on strategies of maintaining Voronoi diagrams of moving points. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(31): 173-177.

Abstract: Nearest neighbors inquiry based on Voronoi diagrams must realize maintaining Voronoi diagrams of moving points which changes continuously over time in mobile environment. This paper employs a collection of discrete and limit topological events which simulates topological changes of Delaunay diagrams, the dual graph of Voronoi diagrams, to realize maintaining Voronoi diagrams of moving points. This paper takes Kinetic Data Structure (KDS) which has an event driven mechanism as mobile model of moving points, proposes concrete strategies maintaining Delaunay diagrams. The authors also study maintaining Voronoi diagrams of moving points when a point is added or deleted after. At last this paper offers a realization model of nearest neighbors inquiry based on Voronoi diagrams in database

Key words: Voronoi diagrams; Delaunay diagrams; Kinetic Data Structure (KDS)

摘 要: 移动环境下基于 Voronoi 图的最近邻查询必须要解决随时间不断改变的移动点 Voronoi 图的拓扑结构的维护问题。通过一组离散的, 有限的事件序列对其对偶图 Delaunay 图拓扑改变过程的模拟来实现对移动点 Voronoi 图拓扑结构的维护。把带有事件驱动机制的移动数据结构 (Kinetic Data Structure, KDS) 模型作为移动点的运动模型, 给出了 KDS 模型对其对偶图 Delaunay 图拓扑结构改变维护的具体策略, 并对移动环境下动态插入或删除移动点时 Voronoi 图的拓扑维护问题进行了研究。最后给出了移动环境下基于 Voronoi 图的近邻查询的数据库实现模型。

关键词: Voronoi 图; Delaunay 图; 移动数据结构

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.31.050 文章编号: 1002-8331(2008)31-0173-05 文献标识码: A 中图分类号: TP311.131

1 引言

在以往基于 Voronoi 图的近邻查询研究中, 都是针对静态环境下的查询。随着移动通信和位置服务技术的不断发展, 移动环境下的近邻及反向近邻查询等问题已经成为研究的热点和难点。然而, 实现移动环境下基于 Voronoi 图的最近邻查询必须要解决的问题是如何维护随时间不断改变的移动点 Voronoi 图的拓扑结构。就作者所知, 目前尚没有相关文献对移动点 Voronoi 图的拓扑维护问题进行过研究。文献[1-3]曾提到了移动点的 Voronoi 图和基于移动点 Voronoi 图的查询等概念, 其中文献[1-2]只是根据其其对偶图 Delaunay 图性质指出了在何种情形下将发生拓扑结构的改变和应该作出何种相应的拓扑修改, 但并没有给出对移动点的 Voronoi 图拓扑结构改变过程模拟的具体方法; 文献[3]只是提到移动点的 Voronoi 图这一概念, 把它作为移动环境下的近邻查询的重要工具, 并没有就如何利用 Voronoi 图实现移动环境下的近邻查询进行研究。本文对移动点 Voronoi 图的拓扑维护问题进行了深入的研究,

深入地分析了移动点 Voronoi 图拓扑结构改变过程, 构建了一套完整的拓扑维护体系并给出了该体系的具体实现策略。实现了对随时间不断变化的移动点 Voronoi 图拓扑结构的维护, 并给出了基于该体系的移动环境下基于 Voronoi 图的近邻查询的数据库实现模型, 以期实现移动环境下基于 Voronoi 图的最近邻查询。

对于二维欧氏空间 n 个点的集合 P 中的每个点沿着给定的轨迹运动, 在每一时刻 t 点集 P 都定义了一个 Voronoi 图 $VD(P(t))$ 。在点运动的同时 Voronoi 图也在不断地改变, 随着时间的推移 Voronoi 图将发生两种类型的改变: 第一种类型, Voronoi 图不断改变形状, 但其拓扑结构不发生改变; 第二种类型, 某时刻有 Voronoi 边的加入和删除, 这时拓扑结构将发生改变。把 KDS 数据模型^[3]作为移动点的运动模型, 通过维护其对偶图 Delaunay 图, 构建了一套维护移动点 Voronoi 图拓扑改变的完整的框架体系并给出了该体系的具体实现, 并对这些具体实现策略的正确性进行了证明。对于第一种改变由运动数据结

作者简介: 王淼(1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为空间及时空数据库; 郝忠孝(1940-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数据库系统与理论。

收稿日期: 2007-12-10 **修回日期:** 2008-04-07

构(KDS)本身所依附的具体的数据结构的属性(速度,位置等)去维护,第二种类型的改变是通过KDS的事件驱动机制实现对具体的数据结构的修改去实现对移动点Voronoi图的保持的。KDS是一个事件驱动型数据结构,每当一个拓扑事件到来时KDS调用事件驱动机制对其对偶图Delaunay图的拓扑结构进行修改。要实现KDS对移动点Voronoi图拓扑改变过程的模拟必须要解决两大问题:(1)潜在的拓扑驱动事件序列的初始化问题;(2)拓扑驱动事件序列的修改问题。初始化驱动事件序列的关键环节就是要计算拓扑事件到来的时刻。事实上点在运动的,拓扑事件到来时刻的确定是很复杂的,需要一套完整的策略来解决这个问题。那么在这方面做了一些研究,深入分析了拓扑结构改变前后拓扑结构的特征提出了临界时刻这一概念,指出在事件的临界时刻需要对拓扑结构进行修改。给出了KDS模型下计算事件临界时刻的具体方法并证明了这种方法的正确性。从而解决了事件队列初始化问题。KDS在事件到来时,在修改拓扑结构的同时,并要修改拓扑事件队列,指出了是那些事件将要删除,又是那些事件将要插到驱动事件队列,从而解决了事件队列事件的修改问题。在深入研究了静态环境下动态插入生成Delaunay图算法^[7]的基础上,对在移动Voronoi图中动态地插入删除一些点时拓扑结构改变时KDS机制是如何对拓扑结构和事件队列进行修改的,进行了研究。

2 预备知识

2.1 Voronoi图

定义1(Voronoi图)^[6] 给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$, 其中 $2 < n < \infty$, 且当 $(i \neq j)$ 时, $p_i \neq p_j$ 。其中, $i, j \in I_n = \{1, \dots, n\}$ 。Voronoi区域由以下公式给出: $VP(p_i) = \{p \mid d(p, p_i) \leq d(p, p_j)\}$ 。其中 $j \neq i, j \in I_n, d(p, p_i)$ 为 p 与 p_i 之间的最小距离(欧氏空间里点 p 和 p_i 之间的直线距离)。由 p_i 所决定的区域称为Voronoi多边形。由 $VD(P) = \{VP(p_1), \dots, VP(p_n)\}$ 所定义的图形被称为Voronoi图。共享相同的棱的Voronoi多边形被称为邻接多边形,它们的生成点被称为邻接生成点。图1实线部分给出了部分Voronoi图。

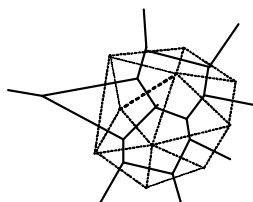


图1 Voronoi图及其对偶图Delaunay图

2.2 Delaunay图

定义2(Delaunay图)^[6] 给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$, 其中 $2 < n < \infty$, 及其Voronoi图, 令线段集合 $E=\{pp_i \mid p_i \in P, i \neq j\}$, 并且在 $VD(P)$ 中 p_i, p_j 所决定的区域有公共边, 则称图 $DT=(P, E)$ 为Delaunay图。它是Voronoi图的对偶图。图1虚线部分给出了部分Delaunay图。

定理1^[6] 对于平面上给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$ (其中 $2 < n < \infty$), 任何4点不共圆, 生成的Delaunay图是唯一的, 存在4点共圆时不唯一。

定义3^[6](空圆) 平面上内部没有顶点的圆(圆上可以有顶点)。

定义4(Delaunay边)^[6] 对于平面上给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$ (其中 $2 < n < \infty$), 生成的任意三角系 T , 若存在一个空圆过 T 中一条边的两个顶点, 那么称这条边为Delaunay边。

定义5(Delaunay三角形)^[6] 对于平面上给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$ (其中 $2 < n < \infty$), 生成的任意三角系 T , 对于 T 中一三角形 t 若其外接圆为空圆, 则称三角形 t 为Delaunay三角形。

定理2^[6] 若 T 是给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$ (其中 $2 < n < \infty$) 生成的三角形若 T 是Delaunay图, 当且仅当 T 中所有三角形的外接圆为空圆。即 T 中所有三角形为Delaunay三角形。

定理3^[6] T 是给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$, 其中 $2 < n < \infty$, 生成的三角系。如果 T 中所有的三角形是Delaunay三角形, 那么 T 中所有的边是Delaunay边。反之亦成立。

定理4^[6] $abcd$ 是一四边形, 且4点不共圆, 则有 c 在 abd 的外接圆内并且 a 在 bcd 的外接圆内或 c 在 $\triangle abd$ 的外接圆外并且 a 在 $\triangle bcd$ 的外接圆外。

定理5^[6] $abcd$ 是一四边形, 且4点不共圆, 若 c 在 $\triangle abd$ 的外接圆内则 bd 不是Delaunay边, 若 c 在 $\triangle abd$ 的外接圆外则 bd 是Delaunay边。

定义6(flip操作)^[6] 有公共边的三角形, 将其看作一个四边形, 公共边看作一条对角线, 则当另一条对角线于该边交于边上(顶点不算), 则可擦去这条对角线换成另一条, 使原来的三角形对变成另一个三角形对。上述过程称为flip操作

定理6^[6] $abcd$ 是一四边形, 且四点不共圆, 若 c 在 $\triangle abd$ 的外接圆内, bd 不是Delaunay边时flip操作所得到的边 ac 为Delaunay边。

定理7^[6] 对于平面上给定一组生成点 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2$ (其中 $2 < n < \infty$), 生成的任意三角系 T , 经过最多 $O(n^2)$ 次的flip操作可得到关于 P 的Delaunay图。

3 移动点的Voronoi图

3.1 移动点Voronoi图拓扑变化过程的分析

Voronoi图是一种很重要的近邻查询工具, 如果要把它应用于移动环境下的近邻查询必须要解决随着时间不断变化的移动点Voronoi图的拓扑结构维护问题。对移动点Voronoi图变化过程进行分析, 从 $t=0$ 开始, 一开始Voronoi图的变化仅限于Voronoi点的位置, 及Voronoi边的长短发生变化, 而Voronoi图的拓扑结构仍然保持不变。在这个过程中它的对偶图Delaunay图的拓扑结构也不发生变化。在一个足够长的时间后这时将出现Voronoi边的消失和新的Voronoi边的产生, 从而导致Voronoi图拓扑结构的改变, 那么其对偶图Delaunay图的拓扑结构也将发生相应的改变。在此之后在一段足够长的时间内Voronoi图及其对偶图Delaunay图的拓扑结构保持不变直到下一个拓扑事件到来。因此在整个运动过程中Voronoi图及其对偶图只发生两种类型的改变: 第一种类型, 形状不断改变, 但其拓扑结构不发生改变; 第二种类型, 拓扑结构发生改变。移动点Voronoi图及其对偶图无时无刻不经历着由拓扑保持到拓扑改变这一循环运动往复的过程。

3.2 移动点Voronoi图的拓扑保持策略

从上节分析知KDS模型是能够有效地模拟移动Voronoi图及其对偶图Delaunay图在运动过程所经历的由拓扑保持到

拓扑改变这种循环运动的过程。把 KDS 模型作为移动点所依赖的运动模型,建立了对移动 Voronoi 图拓扑保持的基本框架体系。在 KDS 模型中对于第一种类型改变由运动数据结构(KDS)本身所依附的具体的数据结构的属性去维护(速度,位置等),第二种类型的改变是通过 KDS 的事件驱动机制实现对具体的数据结构的修改去实现对移动点 Voronoi 图的保持的。对移动点的 Voronoi 图的拓扑维护是通过其对偶图 Delaunay 图来实现的,因为在 Delaunay 图中移动点间是直接相连的,因此维护它的拓扑比直接维护 Voronoi 图容易的多。

对于一移动点集 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2(2 < n < \infty)$ 的 Delaunay 图,当 $t=0$ 时,由定理 2 知此时图中的所有三角形的外接圆为空洞,在此之后 Delaunay 图发生着第一种类型的改变,直到某点 $p \in P$ 运动到某个三角形的外接圆内时将发生拓扑结构的改变。对于处于拓扑保持阶段的 Delaunay 图下一个拓扑事件只能是由于某个 $\triangle bcd$ 的非公共顶点 d 进入与其有公共边 bc 的 $\triangle abc$ 的外接圆内导致的。当该事件发生后对于四边形 $abcd$,由定理 5 知 bc 不是 Delaunay 边,由定理 3 知 Delaunay 图中的所有边必须为 Delaunay 边故 bc 边的存在是不合法的,这时的图是只包含了一个如图 2 四边形 $abcd$,其它三角形均为 Delaunay 三角形(也就是只有一条非法边 bc)的三角系,由定理 7 知可以对其进行有限次 flip 操作得到 Delaunay 图。那么为了维持整个图为 Delaunay 图这时需对 $abcd$ 执行 flip 操作,删除 bc 边,加入 ad 边,由定理 6 知 ad 为 Delaunay 边。这时由于四边形 $abcd$ 拓扑的改变可能导致四边形 $abcd$ 的各边非法,那么继续对这些非法边执行 flip 操作直到图中所有边为 Delaunay 边,这是一个递归执行的过程。

3.3 KDS 模型在移动点 Voronoi 图拓扑保持中的工作原理和具体实现

移动点集合 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2(2 < n < \infty)$,假设每一点的运动轨迹为 $p_i(t)=q_i+v_i t, i=1, \dots, n$,其中 q_i 为 p_i 在 $t=0$ 时刻的位置, v_i 为 p_i 的运动速度, $p_i(t)$ 为 p_i 在时刻 t 的位置。由上分析可知,KDS 模型在保持移动点 Voronoi 图拓扑结构时事件可定义为:

定义 7(事件) $DT(P(t))$ 为一移动点集合 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2(2 < n < \infty)$ 的 Delaunay 图,如果对图中一有公共边的三角形对 $\triangle abd, \triangle bcd$,当 a 进入 $\triangle bcd$ 的外接圆,或 c 进入 $\triangle abd$ 的外接圆那么称 KDS 模型的一个事件发生。

定义 8(临界时刻) $DT(P(t))$ 为一移动点集合 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2(2 < n < \infty)$ 的 Delaunay 图,如果有一四边形 $abcd$,对于任意给定的正数 Δt (不论它多么小),总存在时刻 t ,在 $t-\Delta t$ 时刻 d 在 abc 的外接圆外, t 时刻 d 在 abc 的外接圆上, $t+\Delta t$ 时刻 d 在 abc 的外接圆外,显然这时有一事件发生,那么称时刻 t 为该事件发生的临界时刻。

定理 8 对于一有公共边的三角形对,两非公共顶点分居公共边两侧,那么这两个公共顶点各自进入其异侧三角形外接圆的两事件是同时发生的。即这两个事件的临界时刻相同。

证明 假设两个公共顶点各自进入其异侧三角形外接圆的两事件是不同时发生的,则会在某时刻某点进入了其异侧三角形外接圆,而其异侧的点在其所在三角形外接圆外,这与由定理 4 矛盾。故假设错误原命题成立。事实上这两事件在 4 点共圆同时发生。

定理 9 $DT(P(t))$ 为一移动点集合 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2(2 < n < \infty)$ 的 Delaunay 图,在某事件的临界时刻 t ,将有一个 4 点共

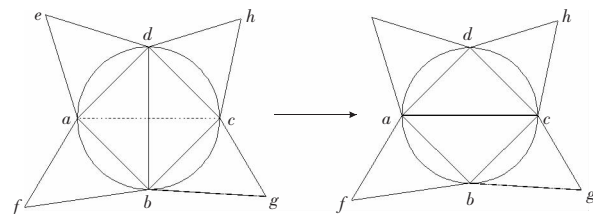


图 2 flip 操作的过程及 Delaunay 图拓扑的改变

圆的四边形,对这个四边形执行 flip 操作后得到的图仍为 Delaunay 图。

证明 如图 2, c 落在了 $\triangle abc$ 的外接圆上,这时为临界时刻,对四边形 $abcd$ 执行 flip 操作后那么原图中以四边形 $abcd$ 四条边为公共边的四个三角对将消失,被新的分别以四边形 $abcd$ 四条边为公共边的三角形对替代,图中其余的三角形对没有发生任何改变,故除四边形 $abcd$ 外的所有边仍为 Delaunay 边。以 ad 为公共边的三角对 $\triangle ead, \triangle abd$,被新的三角对 $\triangle ead, \triangle adc$ 代替为例,在临界时刻 e 显然在 $\triangle abd$ 的外接圆外(因为 e 进入 $\triangle abd$ 的外接圆显然是发生在当前事件之后),又由于此刻 $abcd$ 共圆,因此 $\triangle abd$ 与 $\triangle adc$ 的外接圆相同,故 e 在 $\triangle adc$ 外接圆外故由定理 5 知 ad 为 Delaunay 边,同理可证 ab, bc, cd ,均为 Delaunay 边,又由定理 6 知 flip 操作所得到的边 ac 为 Delaunay 边。于是 flip 操作后图中所有的边均为 Delaunay 边,那么由定理 3 得该图为 Delaunay 图。证毕。

由定理 9 可得每当一事件到来时只须对该事件对应的三角对执行一次 flip 操作即可实现对移动点 Voronoi 图拓扑的维护。那么如何得到当前时刻的下一事件,它是通过 KDS 模型的带有反馈机制的事件队列来实现的。那么基于 KDS 模型移动点 Voronoi 图拓扑维护算法如下:

步骤 1 计算 $t=0$ 时刻 移动点集 $P=\{p_1, \dots, p_n\} \subset R^2(2 < n < \infty)$ 的 Delaunay 图。

步骤 2 根据各点的运动轨迹,计算 $t=0$ 时刻 Delaunay 图中每一对有公共边的三角形对可能发生事件的临界时刻。

步骤 3 把步骤 2 得到的事件依照它们的临界时刻的先后顺序存放在事件队列中。

步骤 4 当事件队列队头的事件到来时,在该事件的临界时刻执行 flip 操作。

步骤 5 更新事件队列,继续执行步骤 4 中操作。

拓朴事件发生的临界时刻的计算方法:对四边形 $abcd$,当 d 进入 abc 的外界圆时拓朴事件发生,这个拓朴事件发生的临界时刻可以这样计算,构造一函数 $f(t)$,令 $f(t)$ 为 d 到 $\triangle abc$ 外心的距离减去 $\triangle abc$ 外接圆半径关于 t 的函数。由于本文假设各点运动轨迹为 $p_i(t)=q_i+v_i t$,故 $f(t)$ 是多项式,多项式是连续可导的。令 $f(t)=0$ 且对 t 的导函数 $df(t)/dt < 0$ 时求得 t 的最小值即为该事件发生的临界时刻。

定理 10 上述求拓朴事件发生的临界时刻的方法是正确的。

证明 $f(t)$ 为 d 到 $\triangle abc$ 外心的距离减去 $\triangle abc$ 外接圆半径关于 t 的函数,那么若 $f(t_1)=0$,则 t_1 时刻 d 在 $\triangle abc$ 的外接圆上,且 $df(t_1)/dt < 0$ 即 $\lim_{t \rightarrow t_1} \frac{f(t)-f(t_1)}{t-t_1} < 0$,那么由极限的定义知在 t_1 的某一去心邻域 $(t_1-\Delta t, t_1+\Delta t)$ 内 $\frac{f(t)-f(t_1)}{t-t_1} < 0$,又 $f(t_1)=0$ 故当

$t \in (t_1-\Delta t, t_1)$ 时 $f(t) > 0$ 即此时 d 在 $\triangle abc$ 的外接圆外,当 $t(t_1, t_1+\Delta t)$ 时 $f(t) < 0$ 即此时 d 在 $\triangle abc$ 的外接圆内。那么 t_1 是满足

定义 7 对临界时刻的定义的。故上述求事件发生的临界时刻的方法是正确的方法。

拓扑事件队列的初始化方法:每一对有公共边的三角形计算可能的对应着两个事件的发生,由定理 8 知这两个可能的事件同时发生且执行同样的操作,故对每一个有公共边的三角形对只须计算其中的一个事件可能发生的临界时刻,这样可减少一半的计算。那么按照求事件发生的临界时刻的方法对每一个有公共边的三角形对进行一次计算,把那些能够求得临界时刻的三角形对对应的事件,按临界时刻的先后存放在事件队列中。

更新事件队列的方法:(1)当一个拓扑事件发生时,则在该事件的临界时刻对该事件所涉及的四边形执行 flip 操作那么这时将导致 Delaunay 图拓扑结构的局部变化,因此可能导致事件队列中已有的某些事件的消失和新事件的产生。那么需要对队列中的某些记录进行修改,下面以图 2 来具体说明队列中哪些记录需要被修改, $abcd$ 共圆,此时为 c 进入 $\triangle abd$ 的外接圆且 a 进入 $\triangle bcd$ 的外接圆的临界时刻,执行 flip 操作后,那么原图中以四边形 $abcd$ 四条边为公共边的四个三角对将消失,被新的以这四条边为公共边的三角形对,例如以 ad 为公共边的三角形对 $\triangle ead, \triangle abd$, 将被新的三角形对 $\triangle ead, \triangle adc$ 代替,那么若三角对 $\triangle ead, \triangle abd$ 在事件队列中有相应的记录则删除,然后根据给出的求事件临界时刻的方法,求新的三角形对 $\triangle ead, \triangle adc$ 对应事件发生的临界时刻,若该时刻存在,按其值将该事件插入到事件队列的正确的位置。对 cd, bc, ab 边分别做同样的操作。以上的过程就完成了对一个拓扑事件到来时, KDS 机制对事件序列的修改。(2)当某时刻 t ,点 p 的运动轨迹发生变化,这时以 p 为顶点三角形对对应的事件的临界时刻可能发生改变,那么需要对队列作如下修改:①删除 t 时刻事件队列中所有以 p 为顶点的角对对应的事件记录;②计算 t 时刻拓扑下所有以 p 为顶点的角对对应的事件临界时刻并按其值将该时间插入到队列合适的位置。

基于 KDS 模型移动点 Voronoi 图拓扑保持算法的正确性分析:由上面事件队列更新的方法知,队列始终是在当前拓扑下对未来事件的预测,由于在当前时刻的下一事件的临界时刻将执行 flip 操作将导致 Delaunay 图拓扑结构的局部变化,因此可能导致当前事件队列中已有的某些事件的消失和新事件的产生,因此当前队列中可能存在着对未来事件的不正确预测,但队头事件始终是当前时刻的下一事件的正确预测。故本文的 KDS 机制能够正确地预测整个运动过程所有的事件的发生的临界时刻。故该算法能在正确的时刻执行 flip 操作,又由定理 9 知在事件发生的临界时刻执行 flip 操作的得到的图为 Delaunay 图,故在算法执行的过程中,图始终为 Delaunay 图。故该算法正确的实现了对移动点 Voronoi 图拓扑结构变化过程的模拟。

4 移动点 Voronoi 图动态插入、删除点时的拓扑保持

定理 11^[7] 在 Delaunay 图加入一个新的节点,找出图中所有外接圆包含新加入节点的三角形,并将这些三角形删除,形成一个空的凸壳。将空的节点与新加入的节点连接,形成的图为 Delaunay 图。

若在某一时刻 t 加入一移动点 $p(t)$,这是会导致 Delaunay 图拓扑结构的局部改变,因此可能会导致时刻 t 时事件队列中

一些事件的消失和新事件的出现。定理 11 表明,以图中所有外接圆包含新加入节点的三角形的边为公共边的三角对将消失,那么若 t 时刻的事件队列中有这些三角对对应的事件,则将该事件从队列删除。并且生成以新插入点和空腔生成的三角形的边为公共边的新的三角形对。如果这些新的三角对能按照求临界时刻的方法求出临界时刻,则把其对应的事件插入事件队列。上述方法实现了在动态插入一个点时对事件队列的修改,使得事件序列始终是在当前拓扑下对潜在事件的预测。由以上分析给出移动点 Voronoi 图动态插入移动点时的拓扑保持算法如下:

步骤 1 加入一个新的节点,找出当前时刻所有外接圆包含新加入节点的三角形,将这些三角形删除,形成一个空的凸壳。并将以被删除三角形的边为公共边的三角对所对应的事件从事件队列中删除。

步骤 2 将空的凸壳的节点与新加入的节点连接,形成新的 Delaunay 图。

步骤 3 调整数据结构,新生成的三角形的数据填充被删除三角形的数据,余者添加在数组的尾部。

步骤 4 对每个以新生成的三角形的边为公共边的三角对执行求临界时刻的操作若有解则将对应的事件根据临界时刻插入到事件队列中合适的位置。

若在某一时刻 t 删除一移动点,也会导致拓扑结构的变化,那么对此刻的 Delaunay 图执行文献[8]中的算法实现删除点对拓扑结构的修改,对比删除前后拓扑结构的变化,修改拓扑事件队列。修改的过程与插入时类似不再介绍。

5 基于移动点 Voronoi 图的近邻查询的数据库实现模型的研究

移动环境下基于 Voronoi 图的近邻查询,要求数据库系统能查询到任意时刻 Voronoi 图的拓扑结构。提出方法只是模拟 Voronoi 图的拓扑结构改变的过程,那么如何在数据库系统中记录下这一模拟过程。最简单的办法是每当拓扑结构发生变化,创建一个存储拓扑结构的记录存储在数据库中。由于 Voronoi 图极其复杂,这种方法需要的存储空间太大,实际中是不可行的。仅在数据库中存储一个事件表 Eventtable 和起始时刻 Delaunay 图的拓扑结构。在执行移动点 Voronoi 图拓扑保持算法的过程中每当一拓扑修改发生时,对拓扑结构的修改的说明以文件的形式存放在 Eventtable 中,并且该说明中包含了拓扑修改的发生时间。Eventtable 中包括 3 种类型的记录:(1) KDS 事件型拓扑修改的说明即 flip 操作;(2)某时刻插入点对拓扑结构的修改的说明;(3)某时刻删除点对拓扑结构修改的说明点。那么对于 t 时刻点 q 的近邻查询,首先根据时刻 t ,在 Eventtable 中找到已发生的拓扑修改,按照 Eventtable 表的说明对初始时刻的拓扑相应的修改便得到 t 时刻的拓扑结构,利用已有的静态环境下的近邻查询算法便可得到 t 时刻点 q 的近邻,近邻查询在数据库中的具体实现过程如图 3 所示。

6 结论

把 KDS 数据模型作为移动点的运动模型,通过维护其对偶图 Delaunay 图,构建了一套完整的拓扑维护体系并给出了该体系的具体实现策略。实现了对随时间不断变化的移动点 Voronoi 图拓扑结构的维护。并给出了基于该体系的移动环境

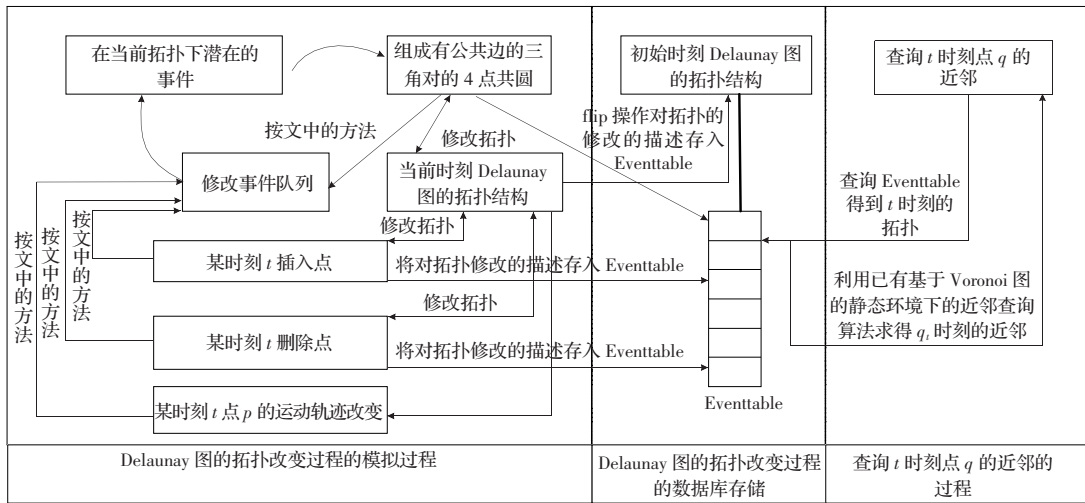


图3 基于移动点 Voronoi 图的近邻查询的数据库实现模型

下基于 Voronoi 图的近邻查询的数据库实现模型。那么如何将文中提出的移动点 Voronoi 图拓扑维护方法和现有的静态环境下基于 Voronoi 图的近邻查询算法结合起来实现移动环境下的近邻查询将成为未来研究的重点。

参考文献:

- [1] Fu J J, Lee R C T. Voronoi diagrams of moving points in the plane[J]. Internat J Comput Geom Appl, 1991, 1(1): 23-32.
- [2] Guibas L, Mitchell J S B, Roos T. Voronoi diagrams of moving points in the plane[C]//LNCS 570: 17th Internat Workshop Graph-Theoret. [S.l.]: Springer-Verlag, 1991.
- [3] Devillers O, Golin M J. Dog bites postman: point location in the

moving Voronoi diagram and related problems[C]//Proceedings of the 1st European Symposium on Algorithms, 1993: 1-32.

- [4] Roos T. Voronoi diagrams over dynamic scenes[C]//Proc 2nd Canad Conf Comput Geom, 1990: 209-213.
- [5] Basch J, Guibas L J, Hershberger J. Data structures for mobile data[J]. Journal of Algorithms, 1999, 31(1): 1-28.
- [6] Shewchuk J R. Delaunay refinement mesh generation [D]. USA: Carnegie Mellon University, 1997.
- [7] Guibas L J, Knuth D E, Sharir M. Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams[J]. Algorithmica, 1992, 7: 381-413.
- [8] Devillers O. On deletion in Delaunay triangulations[C]//15th Annual ACM Symposium on Computational Geometry, 1999: 181-188.

(上接 168 页)

$w=0.5$, 查询模式 $q=(0.05, 3)$ 。

利用算法 1, 查询结果为 $[221:224]=(0.05, 3)$, 与 q 的距离为 0。通过与实际数据比较, 查询结果是正确的。

5 结论

本文提出了一种新的线性模式 KL 相似性度量, 利用 Voronoi 图的基本原理, 给出了线性模式最近邻近查询的最优算法。对于线性模式的 k -最近邻近查询, 所有最近邻近查询、最远查询和最近点对等其它查询方式, 利用上述原理同样可以实现, 而且算法在时间上也是最优的。

利用 Voronoi 图也可以实现时间序列线性模式的异常检测^[1], 改进现有的基于密度异常检测算法的性能, 将另文讨论。

参考文献:

- [1] Mörchen F. Time series knowledge mining [D]. Germany: Philipps-University Marburg, 2006.
- [2] Zhou M, Wong M H, Chu K W. A geometrical solution to time series searching invariant to shifting and scaling[J]. Knowledge and Information Systems, 2006, 9(2): 202-229.
- [3] Moon Y S, Kim J. A single index approach for time-series subse-

quence matching that supports moving average transform of arbitrary order[C]//Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, 10th Pacific-Asia Conference, PAKDD, Singapore, 2006: 739-749.

- [4] 王国仁, 葛健, 徐恒宇, 等. 基于二阶频率变换的序列相似性查询处理技术[J]. 软件学报, 2006, 17(2): 232-241.
- [5] Hetland M. A survey of recent methods for efficient retrieval of similar time sequences[C]//Data Mining in Time Series Databases, London, 2004: 23-42.
- [6] Keogh E, Kasetty S. On the need for time series data mining benchmarks: a survey and empirical demonstration[C]//the 8th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Edmonton, Alberta, Canada, 2002: 102-111.
- [7] Pratt K B, Fink E. Search for patterns in compressed time series[J]. International Journal of Image and Graphics, 2002, 2(1): 89-106.
- [8] 肖辉. 时间序列的相似性查询与异常检测[D]. 上海: 复旦大学, 2005.
- [9] 闫相斌, 李一军, 崔广斌. 事件预测的时间序列数据挖掘方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(5): 29-31.
- [10] Prerata F P, Shamos M I. Computational geometry—an introduction[M]. New York: Springer-Verlag, 1985.
- [11] 曲吉林. 时间序列挖掘中索引与查询技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.