第 38 卷 第 4 期
Vol.38 No.4

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2012 年 2 月
February 2012

• 网络与通信 •

文章编号：1000—3428(2012)04—0084—04 文献标识码：A 中图分类号：TP393

基于 Voronoi 图的无线传感器网络 K 覆盖算法

王 成，樊建席，王仁喜，李 硕

(苏州大学计算机科学与技术学院，江苏 苏州 215006)

摘 要：针对无线传感器网络(WSN)在随机高密度部署节点情况下的多重覆盖问题，提出一个基于 Voronoi 图的 K 覆盖算法。该算法利用邻居节点信息计算 Voronoi 覆盖邻居节点集，构建有向 Voronoi 覆盖关系图，通过调整关系图中的节点状态实现 K 覆盖。仿真结果表明，该算法能正确判断网络覆盖率，连通 K 覆盖的近似最小活动节点集数目少于 CCP 算法。

关键词：无线传感器网络；Voronoi 图；最小覆盖集；多重覆盖；Voronoi 覆盖邻居节点

K Coverage Algorithm in Wireless Sensor Network Based on Voronoi Diagram

WANG Cheng, FAN Jian-xi, WANG Ren-xi, LI Shuo

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

【Abstract】For the problem of multi-coverage under the case that the sensor nodes are high-density deployed in Wireless Sensor Network(WSN), this paper proposes a k-covering algorithm based on Voronoi diagram. This algorithm uses the information of neighbors nodes to establish the set called Voronoi Coverage Neighbor(VCN) node set, then builds a directed graph reflecting the relationship of the coverage. According to the requirement coverage of network, adjusts the state of nodes to achieve K coverage. Simulation results show that the algorithm can correctly determine the network coverage, and the number of approximate minimum active nodes is superior to Coverage Configuration Protocol(CCP) algorithm.

【Key words】Wireless Sensor Network(WSN); Voronoi diagram; minimum coverage set; multi-coverage; Voronoi Coverage Neighbor(VCN) node

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.028

1 概述

无线传感器网络是由大量微型传感器节点组成的，采用自组织、多跳、无线通信方式的大规模高密度网络系统，它广泛应用于军事、环境监测与预报系统、医疗卫生等领域。

拓扑控制是无线传感器网络中的重要基础问题，它是在满足网络要求的覆盖度和连通度的前提下，通过睡眠调度、功率控制和邻居节点选择等方法，形成一个优化的网络结构，为其他功能模块提供基础[1]。无线传感器网络节点一般采用随机高密度部署，大量的冗余节点会增加感知数据的冗余性和发生无线通信冲突与干扰的可能性。睡眠调度是解决上述问题的有效手段，它通过某种规则方法，选择尽可能少的节点作为活跃工作节点(最小连通覆盖集)提供可靠服务，其余的节点则转入低功耗的睡眠状态，降低网络的能量消耗，延长服务时间[2]。在实际应用中，不同的应用为满足监测的鲁棒性和服务质量(Quality of Service, QoS)需要不同的感知覆盖度，如分布式检测、分布式追踪等要求监测区域中的任一点应被至少 $k(k>1)$个节点覆盖；还有一些应用需要在特定情况下动态重新配置覆盖度，如在入侵检测中，一个入侵者在被发现后，其周围区域需要提高感知覆盖度以保证可靠性[3]。

目前，针对上述 2 个问题，已有许多深入的研究。文献[4]从近似最优的三角点阵排列的节点之间的距离关系考虑，给出随机部署策略下的近似最小连通覆盖集的节点选取原则。文献[5]利用计算几何理论的 Voronoi 图，证明目标区域被完全覆盖等价于网络中每个节点的感知圆盘都包含与其相关联的有界 Voronoi 多边形的全部顶点，并给出构造近似最小覆盖集的冗余节点判别规则和集中式算法。以上研究仅考虑 1 覆盖，对于目标区域的多重覆盖判断，文献[3,6]分别提出传感器节点的感知圆相交点 K 覆盖和相交圆周线的 K 覆盖检测方法，这 2 种方法都能有效保证 K 覆盖，但计算复杂度偏高。文献[7]利用计算几何理论的 K 阶最近邻点 Voronoi 图检查网络多重覆盖度。但是相对普通 Voronoi 图，K 阶最近邻点 Voronoi 图的构造方法是一个集中式算法，比较复杂。另外，文献[7]没有考虑冗余节点休眠问题。基于以上分析，本文在文献[5]的基础上，提出一个基于普通 Voronoi 图的多重覆盖判别方法和连通 K 覆盖集构造算法。

2 网络模型与相关定义

2.1 基本假设

本文工作基于如下基本模型假设：

(1)传感器节点采用布尔感知模型。传感节点集合 $S=\{S_1, S_2,\cdots,S_n\}$部署在一个二维矩形区域 A 内。所有传感器节点都具有相同的感知半径 R_s和通信半径 R_c。

(2)每个传感器节点都知道自己的地理位置坐标信息(如通过 GPS 或者定位算法)，且不存在 2 个节点的坐标完全相同。

(3)采用随机部署方式，在初始时，网络是完全覆盖和连

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60873047)；江苏省自然科学基金资助项目(BK2008154)

作者简介：王 成(1986－)，男，硕士研究生，主研方向：无线传感器网络；樊建席，教授、博士生导师；王仁喜、李 硕，硕士研究生

收稿日期：2011-06-03 **E-mail：**20094227009@suda.edu.cn

通的。

2.2　相关定义

定义 1(K 覆盖) 如果点 p 同时被 k 个不同的节点感知覆盖，则称点 p 是 K 覆盖的。如果区域 A 内的每个点都是 K 覆盖的，则称区域 A 是 K 覆盖的。

定义 2(连通) 给定区域 A 中 n 个节点组成的集合 S，如果对于任意的 2 个节点 $S_i,S_j \in S$，它们之间都存在至少 1 条内部不相交路径，则称网络是连通的。

本文是基于 Voronoi 图进行分析和讨论的，在此引入 Voronoi 图相关基本定义。

定义 3(Voronoi 图) 给定平面上 n 个互异点构成的集合 S，平面的一个子区域划分称为 Voronoi 图[8]，如果平面被划分为 n 个 Voronoi 单元，它们具有这样的性质：平面上任一点 p 位于点 S_i 所对应的单元中，当且仅当对于任何的 $S_j \in S, j \neq i$，都有 $d(p,S_i)<d(p,S_j)$。

将与集合 S 相对应的 Voronoi 图记作 $Vor(S)$，用 $Vor(S_i)$ 表示与节点 S_i 对应的 Voronoi 单元，把每个 $Vor(S_i)$的顶点称为 Voronoi 顶点，每个节点的 $Vor(S_i)$的顶点集记为 $V(S_i)$，其边称为 Voronoi 边。

在二维平面中，如果任意 2 个直接相邻节点的距离都是距离 $\sqrt{3}R_s$ 时，形成的 Voronoi 单元都是正六边形，且 Voronoi 单元覆盖面积最大。此时可以用最少的节点保证区域的完全覆盖，所需要的节点数(理想情况下)为：

$$n_{\text{optimal}} = \frac{S_A}{S_{\text{Voronoi}}} = \frac{S_A}{3\sqrt{3}R_s^2/2} \tag{1}$$

其中，S_A 为区域 A 的面积；S_{Voronoi} 是正六边形 Voronoi 单元的面积。

定义 4(Voronoi 覆盖邻居) 在集合 S 中任取两节点 S_i 和 S_j(可以相同)，如果对于节点 S_i 的顶点集合 $Vor(S_i)$中任意顶点 $v_i \in V(S_i)$满足 $d(v_i,S_j) \leqslant R_s$，则称节点 S_i 是节点 S_j 的 Voronoi 覆盖邻居节点(Voronoi Coverage Neighbor node, VCN)。

节点 S_i 的所有 Voronoi 覆盖邻居节点记为 $VCN(S_i)$，Voronoi 覆盖邻居节点中包含节点 S_i 的节点集记为 $BVCN(S_i)$。集合 $BVCN(S_i)$的数目也就是 S_i 的 Voronoi 多边形所能保证的最大覆盖度数，因此，节点集合 S 能保证整个监测区域的最大覆盖度：

$$K_{\max} = \min\{|BVCN(S_i)|\},\ i = 1,2,\cdots,n \tag{2}$$

图 1 是 80 个节点的 Voronoi 划分，2 个圆分别为节点 S_1、S_{17} 的感知圆周范围，对于节点 S_1，$VCN(S_1)=\{S_2,S_3,\cdots,S_{16}\}$。但要注意 S_1 属于 S_{17} 的 VCN 集，反之则不成立，即 Voronoi 覆盖邻居是不对称的。

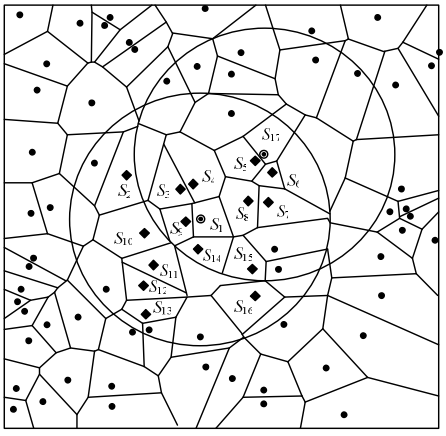


图 1　VCN 覆盖关系图

3　K 覆盖判定原理

引理 $Vor(S_i)$被 S_i 的感知圆盘完全覆盖等价于 $Vor(S_i)$的全部顶点都位于 S_i 的感知圆盘内[5]。

文献[5]提出一个冗余节点判别规则：如果去掉某节点后，其相邻 Voronoi 多边形二次划分形成的新 Voronoi 多边形仍然满足引理，那么该节点是冗余节点，即该节点的 Voronoi 多边形能被其 Voronoi 邻居节点共同覆盖。

对于给定目标区域，基于邻近点规则生成的 Voronoi 多边形的平均面积与部署节点的数目呈反比关系。在实际应用中，传感器节点高密度部署，一个传感器节点的感知范围覆盖多个(可能有几十个)Voronoi 多边形。如图 2 所示，当 R_s= 20 m、区域 A 的面积为 100 m×100 m，VCN 数随部署节点数的增多线性增长，当部署节点数为 900 个时，VCN 平均数达到 80 个，如果使用上述的冗余节点判别规则，将带来极大的计算开销。在多重覆盖问题中，考虑高密度部署时 Voronoi 图的变化，并简化判断的计算复杂性，结合定义 4 提出下面的冗余节点判别规则：节点 S_i 是冗余节点等价于：(1)1 覆盖时，至少存在一个节点完全覆盖 $Vor(S_i)$；(2)K 覆盖时，至少存在 k 个节点完全覆盖 $Vor(S_i)$。

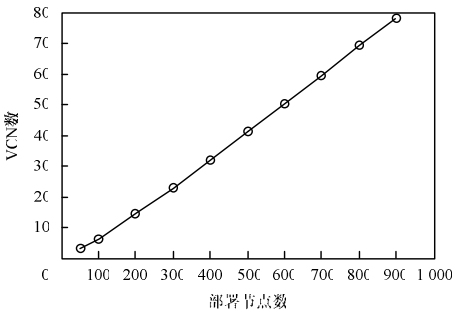


图 2　VCN 数与部署节点数的关系

至少存在 k 个节点完全覆盖 $Vor(S_i)$等价于$|BVCN(S_i)| \geqslant k$。基于以上分析，本文提出基于 VCN 的 K 覆盖判断方法。

定理 1(VCN K 覆盖判断) 多边形区域 A 被传感器节点集合 S 划分为 n 个 Voronoi 单元，如果对 S 中任意的节点 S_i，集合 $BVCN(S_i)$中节点个数至少有 k 个，则区域 A 是 K 覆盖的。

证明：用反证法证明。假设区域 A 不是 K 覆盖的，根据 K 覆盖的定义，那么必存在点 p(可能有多个点)，其覆盖度 $k_p<k$。由于 $Vor(S)=\bigcup Vor(S_i), i=1,2,\cdots,n$，因此点 p 必在某 Voronoi 多边形的内部或者边上。由定理假设条件可知，集合 $VCN(S_i)$中节点个数至少有 k 个，等价于任意的 Voronoi 多边形至少被 k 个节点感知圆完全覆盖，则点 p 的覆盖度至少为 k，即 $k_p \geqslant k$，这与前面的假设 $k_p<k$ 相矛盾。因此，区域 A 是 K 覆盖的。证毕。

4　基于 VCN 的分布式算法

为方便活动节点的选择，把节点的 Voronoi 覆盖邻居关系用一个有向图表示，称为 VCN 覆盖关系图。

定义 VCN 覆盖关系图 $G(S,E_V)$是一个有向图，其中，S 是所有传感器节点的集合。对于任意的节点 $S_i,S_j \in S$，有向边 $<S_i, S_j> \in EV$ 等价于节点 S_j 是 S_i 的 VCN 节点。以顶点 S_i 为终点的边的数目称为节点的入度，记为 $ID(S_i)$。

在实际应用中，根据冗余节点判别规则，得到的冗余节点几乎都是相对冗余的，即冗余节点的邻居节点也是冗余的。因此，依据规则确定冗余节点，并剔除节点和与之关联的链路，在高密度的多重覆盖网络中是不适用的。本文采用相反的策略：每个节点通过随机生成数与门限值的比较，选

择是否成为活动节点，每个节点的门限值 P_i 为：

$$P_i=\frac{k\times n_{\text{optimal}}}{n}\times\frac{E_i}{E_{\text{origin}}} \tag{3}$$

其中，k 表示覆盖度；n 表示节点总数；n_{optimal} 由式(1)确定；E_{origin} 表示节点的初始能量；E_i 表示节点当前的能量，E_i 大于完成一次数据的接收和发送的最小能量值，否则该节点不参与竞争活动节点；依据概率的方法选择出活动节点后，其 VCN 节点入度加 1；对于节点入度小于覆盖度 k 的节点，选择成为活动节点，如果其 *VCN* 节点中包含活动节点，而且包含这个活动节点的所有 *VCN* 节点，那么这个活动节点转入睡眠状态；最终得到的活动节点集保证所有节点的入度为覆盖度 k，那么剩余的节点则都是冗余节点，可以转入睡眠状态。

下面给出构造活动节点集的 VCN 算法：

输入 传感器节点集 $S=\{S_1,S_2,\cdots,S_n\}$和目标区域 A

输出 K 覆盖活动节点集 A_S

1. Sink 节点广播 k、$n_{optimal}$，节点与邻居节点交换信息，节点状态置为 listen，ID(S_i)=0；

2. 计算 VCN、BVCN、P_i

3. for each listen node $S_i\in S$

{if(random(0,1)≤P_i)&&(VCN(Si)含有 listen 状态节点)

{ active(Si); AS←S_i;

for each listen node $S_j\in VCN(S_i)$

ID(S_i)++;

If ID(S_i)==k

sleep(Si);message(my_id, BVCN(Si), sleep);

} }

4. for each listen node $S_i\in S$

{if(VCN(S_i)含有 listen 状态节点)||(VCN(Si)包含 VCN(S_a)，$S_a\in AS$)

active(Si);AS←S_i; AS←S_i/S_a;

for each listen node $S_j\in VCN(S_i)$

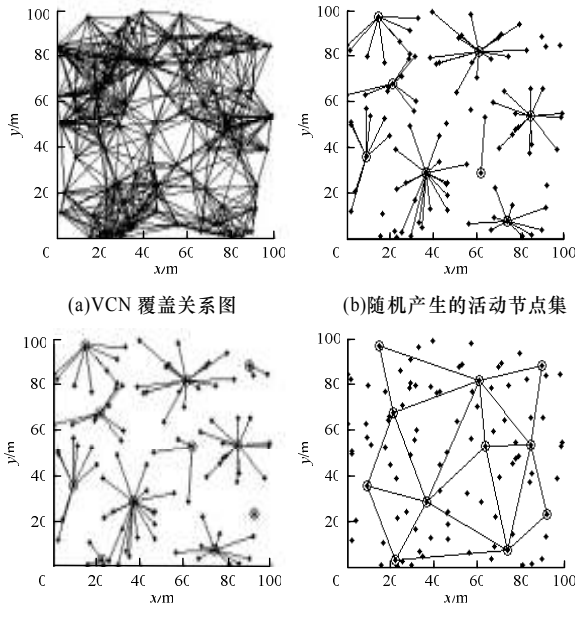
ID(S_i)++;

If ID(S_i)==k

sleep(Si);message(my_id, BVCN(S_i), sleep); }

5. return A_S

图 3 是 100 个节点，覆盖度为 1 的 VCN 算法执行过程实际(箭头未标注)。实际上，覆盖度为 1 时，活动节点集是 VCN 覆盖关系图的一个支配集。



(a)VCN 覆盖关系图 (b)随机产生的活动节点集

(c)最终活动节点集 (d)最终连通覆盖图

图 3 覆盖度为 1 的 VCN 算法执行实例

若需要计算监测区域 K 覆盖的覆盖率，在算法第 2 步计算出 BVCN 后，对每个节点若不能满足应用所需的覆盖度，则向 Sink 节点发送 no-satisfied 信息，满足则不需要发送。Sink 节点计算发送 no-satisfied 信息的节点数目与部署节点的数目的比值，即可得到监测区域 K 覆盖的近似覆盖率。

定理 2 当 $R_c\geqslant 2R_s$ 时，VCN 算法构造的活动节点集是连通 K 覆盖的。

证明：VCN 算法构造的活动节点集满足所有节点的入度等于覆盖度 k，等价于所有节点 BVCN 数为 k。根据定理 1，那么区域是 K 覆盖的。文献[4]证明对于给定凸区域 A，当 $R_c\geqslant 2R_s$ 时，如果区域 A 是 K 覆盖的，则该网络是 K 连通的。因此活动节点集是连通 K 覆盖的。证毕。

由于 Voronoi 顶点集的计算和近似最小活跃节点的选择仅依赖于 1 跳邻居节点，因此该算法是分布式算法。计算 Voronoi 顶点集时间复杂度是 $O(n\log n)$，构造 Voronoi 覆盖邻居节点的时间复杂度是 $O(n)$，选取近似最小活动节点集的时间复杂度是 $O(n)$，因此 VCN 算法的时间复杂度是 $O(n\log n)$。

5 仿真结果与分析

为评估算法性能，利用 Matlab 设计一个仿真程序。在实验中，假定 N 个传感器节点随机分布在 100 m×100 m 的监测区域内，节点感知半径 R_s=20 m，通信半径 R_c=40 m。分别对 VCN 算法中的覆盖率判断和近似连通覆盖活动节点集节点数目选取的有效性进行验证，每个仿真结果都是 10 次仿真实验的平均值。

5.1 覆盖性能

确定监测区域的覆盖度是评价网络服务质量的重要指标。图 4 是在传感器个数 N 为{50, 100, 150, 200, 300}时，覆盖度分别为 k={1,2,⋯,10}时，由 VCN 算法中覆盖率判断方法计算的近似覆盖率与真实覆盖率的比较。可以看出，VCN 计算得到的覆盖率偏低，这主要是由于 VCN 算法较严格的覆盖判定条件，使 VCN 算法存在一定的覆盖冗余。同时，随机部署下，在 n=200 时，两者都可以保证 5 覆盖 99%以上的覆盖率，在 n=300 时，10 覆盖仍能保证 99%以上的覆盖率，这可以为满足不同覆盖度需求和最低覆盖期望 η 所需部署节点的数目提供参考。

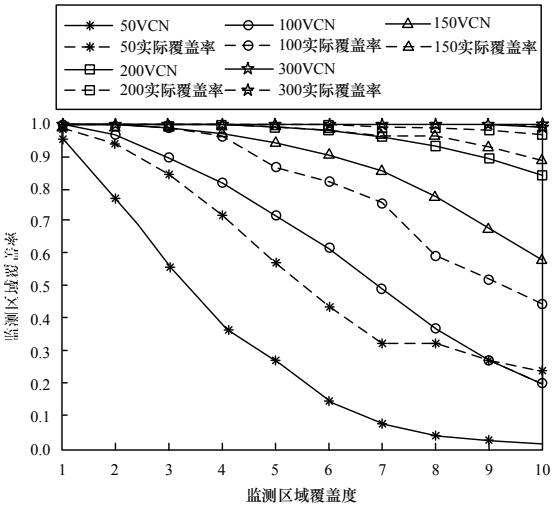


图 4 VCN 算法覆盖率与实际覆盖率比较

5.2 活跃节点数目

在保证覆盖和连通的情况下，保持尽可能少的节点在活动状态，可减少能耗，延长网络生存期。根据 5.1 节实验得

到的结论，K 覆盖实验节点数目选择为 300 个~900 个，并将结果与文献[4]的 CCP 算法进行比较。如图 5 所示，实验结果显示，VCN 算法得到的近似最小活动节点集与 CCP 算法一样相对稳定，但 VCN 算法节点数目明显优于 CCP 算法。

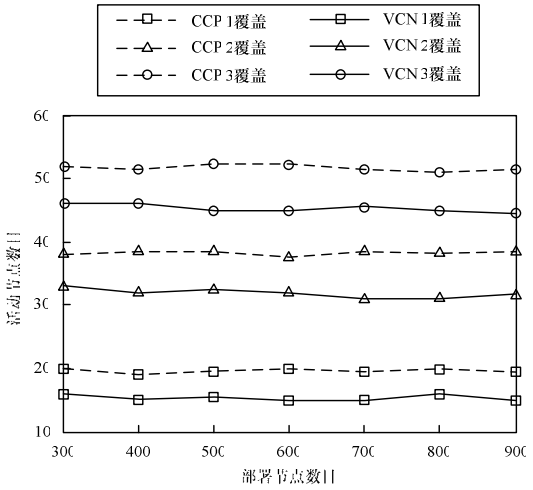


图 5 最小活动节点集数目比较

6 结束语

本文主要研究随机部署方式下的连通 K 覆盖问题中的监测区域覆盖率确定和连通 K 覆盖近似最小活动节点集等问题。结合 Voronoi 图提出基于 Voronoi 覆盖邻居节点的分布式算法，并通过仿真实验对其有效性进行验证。如何更有效地选择活动节点是今后研究工作的重点。

参考文献

[1] Zhang Guangquan, Zhang Zhaoliang, Fan Jianxi. A Locally-adjustable Planar Structure for Adaptive Topology Control in Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(10): 1387-1397.

[2] 孙泽宇, 邢萧飞, 魏 巍. 无线传感器网络中的目标关联覆盖算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(9): 138-140.

[3] Wang Xiaorui, Xing Guoliang, Zhang Yuanfang, et al. Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. [S. l.]: ACM Press, 2003: 28-39.

[4] 温 俊, 蒋 杰, 方 力, 等. 异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法[J]. 软件学报, 2010, 21(9): 2304-2319.

[5] 蒋 杰, 方 力, 张鹤颖, 等. 无线传感器网络最小连通覆盖集问题求解算法[J]. 软件学报, 2006, 17(2): 175-184.

[6] Huang Chi-Fu, Tseng Yu-Chee, Wu His-Ao. Distributed Protocols for Ensuring Both Coverage and Connectivity of a Wireless Sensor Network[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2007, 3(1): 1-22.

[7] Tang Shaojie, Mao Xufei, Li Xiangyang. Optimal K-support Coverage Paths in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of International Conference on Pervasive Computing and Communications. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 1-6.

[8] Berg M D. 计算几何: 算法与应用[M]. 邓俊辉, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009.

编辑 陆燕菲

(上接第 83 页)

纯型连续近邻链的部分实验比较结果。由图 2(a)可知，对于静态的数据集，当数据集规模较小时，SCNNC_V 和 SCNNC_R 查询效率较为接近，随着数据集规模增大，SCNNC_V 的效率较 SCNNC_R 效率高。但对于动态的数据集，SCNNC_V 的效率明显低于 SCNNC_R 的效率，数据集较大时，SCNNC_R 的优势非常明显。在图 2(b)中，横坐标表示所查询的单纯型连续近邻链包含的数据点的个数，纵坐标 ξ 表示 SCNNC_V 与 SCNNC_R 的查询效率的比率。曲线 cl_3 表示在大小为 42 000 的静态数据集中查询包含不同数量数据点的单纯型连续近邻链的部分实验比较结果。由图 2(b)可知，对于固定大小的数据集，当查询的连续近邻链包含的数据点较少时，SCNNC_V 和 SCNNC_R 的查询效率较为接近，但随着待查的连续近邻链规模增大，SCNNC_V 的效率较 SCNNC_R 的效率的优势明显增大。

5 结束语

已有处理最近邻查询及其变种问题的方法无法有效解决数据集中单纯型连续近邻链查询问题。为了弥补已有方法的不足，本文提出了基于 Voronoi 图的单纯型连续近邻链查询方法，并和传统的基于 R 树查询单纯型连续近邻链方法进行了比较。由理论研究和实验分析可知，基于 R 树索引结构的查询方法对动态数据集中的连续近邻链查询较为有效，但可扩展性有一定限制；利用 Voronoi 图进行查询方法较适合大静态数据集和包含数据点较多的连续近邻链的单纯型连续近邻链查询，具有较强的可扩展性，但对动态数据集的查询效率较低。根据实际的查询需求和查询条件，可选用不同的方法进行连续近邻链问题的处理。

参考文献

[1] Cheung K L, Fu A W. Enhanced Nearest Neighbour Search on the R-tree[J]. SIGMOD Record, 1998, 27(3): 16-21.

[2] Song Zhexuan, Roussopoulos N. K-Nearest Neighbor Search for Moving Query Point[C]//Proc. of the 7th International Symposium on Advances in Spatial and Temporal Databases. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001: 79-96.

[3] Yiu M L, Mamoulis N. Aggregate Nearest Neighbor Queries in Road Networks[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(6): 820-833.

[4] Leong H U, Mamoulis N, Yiu M L. Computation and Monitoring of Exclusive Closest Pairs[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2008, 20(12): 1641-1654.

[5] 李 松, 郝忠孝. 移动对象的动态反向最近邻查询技术[J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 40-42.

[6] 李 松, 郝忠孝. 基于 Voronoi 图的反向最近邻查询方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(3): 261-265.

[7] 张丽平, 李 松. 数据集中强邻近对的查询方法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(16): 4353-4355.

[8] 李 松, 郝忠孝. 球面上最近邻空间关系处理方法[J]. 计算机工程, 2010, 36(6): 91-93.

[9] 张丽平, 李 松, 郝晓红. 球面上的 k 最近邻查询算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 52-53.

[10] Sacl J R, Urrutia J. Handbook on Computational Geometry[M]. Ottawa, Canada: Elsevier Science, 2000.

编辑 任吉慧