

基于中间轴的双线路由机制

刘 品, 黄廷磊

(桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 针对现有的基于虚拟坐标的路由协议不能本地感知、数据传输易受阻及能量消耗不均衡等缺点, 设计了一种基于中间轴的双线路由机制, 利用网络的中间轴为每个节点分配虚拟坐标, 并在该虚拟坐标上实施双线路由机制。用户节点可以在不知道源节点位置的情况下找到自己感兴趣的数据, 而且可以在复杂环境中确保数据的发送, 有效解决其他路由协议中空洞边界或公共节点的通信热点问题。通过实验, 对节点负载的规范化标准偏差及高负载节点数量进行计算, 结果表明, 设计的方法能获得较好的负载平衡, 避免网络热点产生。

关键词: 无线传感器网络; 虚拟坐标; 中间轴; 路由协议

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)11-4300-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.077

Medial axis and double ruling based routing in wireless sensor network

LIU Pin, HUANG Ting-lei

(School of Computer Science & Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: The existing virtual coordinate based routing protocol has some disadvantages, such as not local sensitive, data transmission is easily blocked and unbalanced energy consumption. Considering all the shortcomings above, this paper designed a medial axis and double ruling based routing protocol (MADR), in which gave each node a based on the medial axis, and implemented double ruling scheme on the virtual coordinate system. The consumers could find the interested data without any position information of the producers. It could guarantee delivery in complex environment, effectively avoided hot spots of the hole boundary nodes or public nodes in other routing protocols. By experiments, the normalized standard deviation of node load and number of high load node was calculated. The results show that the method can achieve good load balance and avoid hot spots in network.

Key words: wireless sensor network; virtual coordinate; medial axis; routing protocol

早期的传感器网络主要是数据获取系统, 信息被传感器节点收集并路由到一个中心基站, 但是在现在的传感器网络中, 随意的一个节点可能会需要收集其他节点的测量信息或事件; 另外, 它所需要的信息可能是很特殊的, 只有少部分节点的数据与其相关。同时, 在过去的十几年里, 传感器网络开始用于信息处理, 而不是简单的数据收集。从这一点考虑, 与信息本身相比, 拥有信息的传感器位置就不那么重要了。因此, 为了节约节点定位所带来的高成本, 人们开始研究以无须定位的路由机制。

GLIDER^[1]是一种基于虚拟坐标的路由机制, 作者首先选择若干个信标节点, 通过信标节点组成的泰森多边形, 将网络划分成小单元。各单元之间的连通性被描述为 CDT (组合 Delaunay 三角剖分)。数据源节点通过 CDT 将数据包经最短路径路由到目标节点。在该方法中, 信标的设置严重影响到算法的效率, 而作者没能找出一种有效的选择信标节点的方法。MAP^[2]在网络中构建一个中间轴图, 基于该中间轴图节点分配虚拟坐标并进行路由, 不需要选择信标。另外一种基于虚拟坐标的路由方案是 ABVCap^[3], 首先选取四个锚节点, 然后构建一条纬线和一系列经线, 根据这些经线和纬线为每个节点分配一个五元的虚拟坐标, 最后在该虚拟坐标系统中实施路由。MAP 和 ABVCap 在路由阶段需要用到分布式哈希表, 将

复制的数据哈希到汇聚节点供查询获取, 运用哈希表的缺点是它的数据检索机制不是本地感知的, 即使数据用户距离数据源节点很近, 它也可能需要去很远的公共节点查询数据; 另外公共节点被很多用户查询, 会造成通信瓶颈。

为了解决以上问题, 有人提出一种双线路由机制 (double ruling, DR)^[4-7], 将数据存储一条曲线上, 而不仅仅存储在多个或独立的节点上。数据用户沿着另外一条曲线检索, 该曲线要能保证与复制曲线相交。DR 路由机制是平面哈希机制的延伸, 它改进了查询的位置, 接近于数据产生节点的用户能更快地找到数据。它还构建了融合查询, 用户沿着一条路径能查询到所有感兴趣的数据。尽管 DR 路由机制有很多优点, 但是它很难在一个随意的通信图上被实现。现有的相关文献要么不能保证数据的成功传输, 要么就是没考虑空洞边界的负载问题。

本文设计一种基于中间轴的双线路由机制 (medial axis and double ruling based routing, MADR)。

1 预处理阶段

为了有效地实施 DR 路由协议, 需要先对网络进行预处理, 目的是为路由协议的实施提供一个合适的虚拟坐标系统。在文献[2]提出的 MAP 协议中, 作者利用中间轴上的节点构

收稿日期: 2012-02-19; 修回日期: 2012-03-29

作者简介: 刘品 (1985-), 女, 湖北钟祥人, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络路由协议 (pize12198@163.com); 黄廷磊 (1971-), 男, 安徽肥东人, 教授, 博士 (后), 主要研究方向为无线 Mesh 网络、无线传感器网络。

建最短路径树,根据节点在树上的位置为每个节点分配坐标,每个节点需要长期维护中间轴图,代价较高;而且该坐标系也不适用于 DR 协议,因此本文使用不同的方法来构建中间轴和分配虚拟坐标。预处理阶段可概括为如下几个步骤:a)检测传感器区域的边界;b)构建中间轴图,并将其广播给网络中的各个节点;c)为每个节点定义虚拟坐标。

1.1 检测传感器区域的边界

本文使用 Wang 等人^[8]提出的中间轴检测算法来识别网络的边界:首先找出一个包围所有空洞的最小的环 r 作为网络区域的粗略内边界(该步骤的详细描述见文献^[8]);然后从 r 开始洪泛整个网络,每个节点记录自己到 r 之间的最小跳数,这样可以检测出跳数值为局部最大的极值节点;最后将这些点连接起来,就构成了网络的边界。

1.2 构造中间轴

假设 R 是一个有限的区域, ∂R 是 R 的边界,中间轴 M 是由一系列特殊的点组成的曲线,这些点具有至少两个最近的 ∂R 上的点。换句话说,对于中间轴上的任意一个 a ,可以它为圆心画一个圆 $B_r(a)$ 与 ∂R 相切,这个圆在 ∂R 上有两个或两个以上切点,连接 a 与切点的线段称为 a 的弦^[2];中间轴上的端点或具有至少三个最近边界点的点称为中间顶点;中间轴上连接两个中间顶点的曲线为中间边。

首先通过局部的洪泛来选取候选中间节点,每个边界节点洪泛一个包含自己 ID 和初值为 1 的跳数值的消息,每个节点接收到该消息后记录其跳数值并将其加 1 继续传播。如果收到一个跳数值更小的消息时,则更新自己的记录。最后,每个节点都会记录自己最近的边界节点,如果数量为两个或两个以上则选为候选中间节点。

由于在离散网络中,中间轴容易受边界噪声的影响,因此上述方法构建的中间轴是不理想的,需要去掉那些最近边界节点在同一条边界上且离得比较近的中间节点。为了做到这一点,可以让每个边界节点在发送消息的同时发送一个 n 跳边界邻居表(本文中 n 取 10),来记录与自己在同一条边界上且相隔不远的边界节点的 ID。所有的候选中间节点观察自己最近的边界节点的 ID,如果在彼此的边界邻居表中,则不被选为中间节点。最后将剩余的中间节点连接起来,构成中间轴,每个中间节点计算出自己距离中间边的两个端点(即中间顶点)的跳数距离。

中间轴和所有的中间顶点的弦将区域 R 分割成一系列的子区域 $\{C_i\}$,每个子区域的外边界由两条弦、一条中间边和一段边界组成,每个中间边同属于两个子区域,一个中间顶点同属于多个相邻的子区域^[2],如图 1 所示。

1.3 分配虚拟坐标

为区域 R 中的每个点分配一个虚拟坐标。假设区域内的点为连续的,那么点 p 的虚拟坐标可以定义为 $N(p) = (x(p), y(p), x(p)_{\text{length}}, y(p)_{\text{length}}, d(p))$ 。其中: p 在弦 $x(p)$ 上; $x(p) \in M$,是点 p 对应的中间轴上的点, $y(p) \in \partial R \cup \{\perp\}$,表示点 p 对应的边界上的点, $\perp$ 表示无; $x(p)_{\text{length}}$ 和 $y(p)_{\text{length}}$ 分别表示点 p 距离中间轴和边界的距离; $d(p) = |px(p)|/|x(p)y(p)|$ 为点 p 的高度, $0 \leq d(p) \leq 1$ 。如果点 p 在 M 上,定义它的名称为 $(p, \perp, 0, |py(p)|, 0)$ 。

在无线传感器网络中,节点的分布是分散的,需要用节点间的跳数值来代替欧氏距离,以各点到中间轴及边界的最短路

径代替弦。为了构造该最短路径,分别从中间轴和边界节点开始,逐步计算每个传感器最近的中间轴节点及边界节点。由于在中间轴构建阶段,每个节点已经记录了自己最近的边界节点,所以现在每个节点只需要寻找自己最近的中间节点。首先,每个中间轴和边界上的节点发布一个消息,该消息包含自己的 ID 和一个初值为 0 的跳数值。每个节点收到该消息后,就将该跳数值加 1,作为自己距离中间轴的跳数距离,然后继续广播更新后的消息。如果该节点收到多于一个中间轴节点发出的消息,则取跳数值最小的消息,即取最近的中间节点的消息;如果跳数值相等,则只保留最先收到的消息,因为一般来说,先收到的消息,说明发出该消息的中间轴节点或边界节点距离自己比较近。每个节点记录自己到达中间轴或者边界的下一跳节点,例如将节点 x 值与自己相同且 x_{hop} 比自己小的节点定义为自己到达中间轴的下一跳节点。用同样的方式选择自己到达边界的下一跳节点。这样,每个节点就知道自己到达中间轴及边界的最短路径了。另外中间节点还在数据包中广播自己的位置信息,即自己所在的中间边(由两个端点的 ID 命名)及距离两个端点的跳数,每个节点记录自己最近的中间节点的同时还记录其位置信息($V_1 V_2, V_1_{\text{hop}}, V_2_{\text{hop}}$)。

将每个节点 p 的坐标定义为 $(x(p), y(p), x(p)_{\text{hop}}, y(p)_{\text{hop}}, d(p))$ 。其中: $x(p)$ 为 p 对应的中间轴节点的 ID, $y(p)$ 为 p 对应的边界节点 ID; $x(p)_{\text{hop}}, y(p)_{\text{hop}}$ 分别为自己距离 $x(p)$ 及 $y(p)$ 的距离; $d(p) = x(p)_{\text{hop}} / (x(p)_{\text{hop}} + y(p)_{\text{hop}})$ 。一个关于中间轴节点命名的例子如图 2 所示。

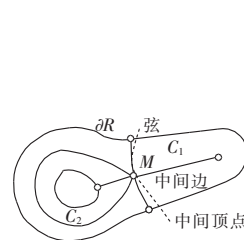


图 1 封闭区域 R 的中间轴

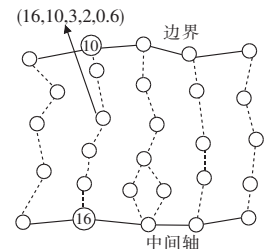


图 2 一个节点命名的例子

另外,每个中间顶点附近的节点还被定义为一个极坐标,其形式为 $(ID_V(p), V(p)_{\text{hop}}, D(p))$,分别表示自己对应的中间顶点 ID、距离中间顶点的跳数值和距离中间顶点的归一化距离($D(p) = V(p)_{\text{hop}}/r$, r 为中间顶点与边界之间的距离)。每个拥有极坐标的节点根据自己的 $D(p)$ 以最短路径连接成环,方法为:每个具有极坐标的节点通过洪泛发现附近的 $D(p)$ 值相同的节点,并用最小路径与其相连,彼此记录该路由表。

总的来说,在预处理阶段,构建一条中间轴和连接中间轴与边界的最短路径。每个节点只需存储自己的身份、自己一跳邻居的坐标、自己对应的中间节点的位置信息及边界节点的邻居表;每个极坐标上的节点还需保存自己所在极坐标环上的邻居坐标和到该邻居的小型路由表。

2 基于中间轴的双线路由机制

本文的路由协议通过执行双线路由机制来实现。一个基本的双线路由可描述为:数据或者线索沿着一条复制曲线存储在节点上,而数据查询沿着一条检索曲线行进,任意两条曲线相交,就能保证检索成功。图 3 描述的是一个简单的双线路由的例子。假定网络是一个二维的网格,而所有的节点都位于格点处,信息存储曲线沿着横线进行,信息检索曲线沿着竖线进

行,任意一条横线与任意一条竖线能保证相交。

在文献[6]提出的 RDRIB(图4)中,作者通过四个锚节点构造四条虚拟边界,数据沿着指向第一和第三条边界的路径复制,沿着指向第二和第四条边界的路径检索。但是由于该方法中的边界不是真实的,所以为了防止复制或检索曲线跑到边界外部,作者在路由阶段制定了一系列规则来限制下一跳节点的选举,但是这样却容易产生一个问题:某节点找不到满足要求的下一跳节点,从而导致路由失败;另外作者也没考虑到空洞边界的负载问题。

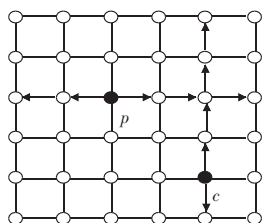


图3 网格上的双线路由机制

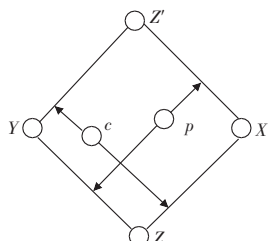


图4 RDRIB中的双线路由机制

本文使用的方法与 RDRIB 不同,将双线路由机制与基于中间轴的虚拟坐标系相结合,使用平行于中间轴的曲线和边界与中间轴之间的最短路径来构建数据存储与检索路径。

基于该思想,有两种方案可供选择:

a)数据沿着连接中间轴与边界的最短路径复制,沿着平行于中间轴的路径检索;

b)数据沿着平行于中间轴的路径存储,沿着中间轴与边界之间的最短路径检索。

如何在这两种方案中进行选择,需要考虑到应用的需求。由于空洞的出现,网络往往会被分割成一些狭长的区域,所以中间轴的长度通常大于弦的长度,因此在平行于中间轴的路径上进行路由会比在中间轴与边界之间的最短路径上路由代价高。如果网络中需要进行大量的数据存储,而只需少量的数据查询,那么选择第一种方案比较好,既可以节省数据存储的成本,又可以在数据检索中做到距离感知;如果网络只需进行少量的数据存储(如只关注数据大于某个阈值的信息),而需要较多的数据查询,那么选择第二种方案比较合适,不但能节省查询所消耗的能量,而且用户只需在自己附近就可以很快地查询到所有相关的数据。本文选择第二种方案来对 MADR 进行解释,如图5所示。

2.1 数据复制

一般来说,在传感器网络中会有多个数据产生节点,产生多种类型的数据;同样地,有多个数据用户寻找相关信息。假设一个节点 p 为数据产生节点,它发送一个复制信息,该信息中包含自己感知的数据类型,复制信息沿着平行于中间轴的路径传送。首先讨论连续区域中路由的操作。

假设中间轴被中间顶点 x_i 分割成若干条中间边 $x_i x_{i-1}$,假定数据源节点 p 在 C_0 内, $x_0 x_1$ 在 C_0 的边界上,路由路径沿着 $d(p)$ -latitude 曲线直到它到达 C_0 的边界上的一条弦。这时到达 C_1 , $x_1 x_2$ 在它的边界上, C_0 、 C_1 至少共有一个中间顶点 x_1 。如果它们共同拥有一条弦 $x_1 y_1$,那么 C_0 中的 $d(p)$ -latitude 曲线就会与 C_1 中的 $d(p)$ -latitude 曲线相连^[2];否则,在 x_1 周围用 $d(p)$ -angular 曲线从 C_0 传送到 C_1 ,通过 $d(p)$ -angular 曲线, $d(p)$ -latitude 曲线就会与 C_1 中的 $d(p)$ -latitude 曲线相连。重复这个过程,直到检索信息经过所有的最短路径。

在传感器网络中,查询消息的路由与连续区域中的步骤基本一致。不同的是,在传感器区域中,节点的高度值不是连续的。在这种情况下,每个节点在所有的邻居里选择高度值最接近 $d(p)$ 的节点作为自己的下一跳节点。

假设 $x(p)$ 在中间边 $x_i x_{i+1}$ 上, x_i 为一个中间顶点, p 分别以 x_i 和 x_{i+1} 两个方向为临时路由目标广播复制信息。以 x_i 方向为例,为了避免两次通过一个相同的节点,在任意点 v 处, v 选择下一跳节点 w 应遵循以下规则:

a)避免在同一条最短路径上进行路由,即 $x(w)$ 和 $y(w)$ 值与自己不相同;

b)避免路由给中间轴的另一边,这一点可以通过节点存储的边界邻居表来判断,因为中间轴两边的节点所对应的边界节点必定不在同一个边界邻居表内;

c)不能向后路由,即已经接收过复制信息的最短路径不再重新接收并广播该信息,这一点可以通过节点存储的中间节点位置信息来判断,如 V_1_hop 值或 V_2_hop 值逐次递减。

如果满足以上条件的节点 w 不存在,就进行一个小范围的洪泛(如4跳以内);如果发现满足条件的节点,就将消息转发给它,并增加一个备用路由表,记录自己到该节点的路径,下次再转发消息时,就可以在洪泛之前先查找该路由表;如果在4跳邻居里面仍然没有需要的节点,就路由给 u ,满足 $x(u) = x(v)$, $x(u)_hop = x(v)_hop - 1$,再在节点 u 处进行平行于中间轴的路由,该方法可以保证找到满足条件的节点,因为至少在中间轴上可以进行贪婪传递。

当一个数据包到达中间顶点附近的节点时,它会沿着围绕中间顶点的 $d(p)$ -angular 曲线环状的路由,以寻找下一子区域内的节点。如图6所示,沿着中间轴 D 路由的消息进入极坐标系后,首先路由到相应高度,然后沿着极坐标环路路由。在该过程中,每遇到一条中间边,就产生一条平行于该中间边的路径,进行消息的路由,同时继续沿着极坐标环路路由,直到经过除 D 以外所有的中间边。

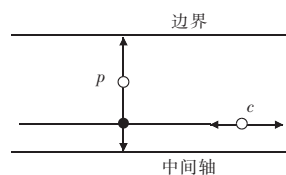


图5 MADR 的基本原理

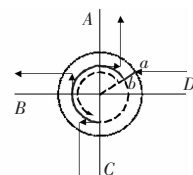


图6 极坐标区域的路由

2.2 数据检索

假设 c 为用户,它发送一个数据检索信息,该信息中包含自己感兴趣的信息类型和自己的坐标。假设 $N(c) = (x(c), y(c), x(c)_hop, y(c)_hop, d(c))$,如果 $x(c)$ 不是一个中间顶点,那么该检索消息沿着 $x(c)$ 所在的最短路径路由。首先检索消息分别向与自己 $x(c)$ 或 $y(c)$ 值相同,但是 $x(c)_hop$ 、 $y(c)_hop$ 比自己小1的节点路由,消息到达这两个节点后,继续以同样的方式分别朝着中间轴和边界路由,当检索信息到达中间轴时,就继续沿着中间轴另外一边的路径路由。如果在该过程中找到匹配的数据,则将其原路返回到 c 。如果 $x(c)$ 是一个中间顶点,那么它可能有多条最短路径。在这种情况下,检索信息首先沿着自己所在的最短路径传播,到达 $x(c)$ 后,再沿着 $x(c)$ 的其他最短路径进行检索。

该方法中,数据产生节点将自己的数据信息发送到整个网络,数据用户无须知道对方的地理位置就可以获取到自己需要

的信息。并且一条复制信息可以被多个查询获取,一条查询信息可以同时获取自己需要的多个数据信息。该方法是本地感知的,与 MAP 使用分布式哈希表不同,该方法中数据用户可以在附近获取自己需要的信息,而无须到很远的地方,所以在需要进行大量查询的网络中,能很好地节约查询成本。与 RDRIB 相比,该方法在复杂的网路中有较强的鲁棒性,由于数据包不会因为网络有空洞或是几何形状不规则而受到阻碍,所以发送成功率可以得到保证。

3 仿真

为了证明该协议的性能,用仿真软件模拟一个传感器网络区域(图 7),其边界是一个 $200\text{ m} \times 250\text{ m}$ 的矩形,其中随机分布 N 个($N=2\ 000$)节点,每个节点有 10 m 的覆盖半径。每个传感器使用单位原图模型,通信图的平均度为 12。将 MADR 与 MAP 和 RDRIB 相对比,来验证它们的负载平衡性。MAP 在执行路由时需要知道目标节点的地址,作者在文中使用分布式哈希表来获取地址,数据可以哈希到一个汇聚点供查询信息获取它。在这种情况下,源节点根据哈希函数的输出来获取目标节点的名称。

在传感器网络中,负载平衡是一个很重要的问题。如果某区域的传感器节点负载超重,那么它们的电池会很快耗尽,且多个节点公用同一个信道会造成通信热点,增加冲突和延时的可能性。为了比较 MADR 和 MAP 及 RDRIB 的负载平衡性,随机选取 n 对节点,每个节点既是数据生产者也是数据用户,它们感兴趣的数据为同一类型,每个节点都需要查找其他任何节点的数据。用经过一个节点的路径数目来表示该节点的负载。表 1 列出的是传感器上的负载规范化标准偏差。规范化标准偏差被定义为标准偏差与负载平均值之间的比值,可看出, MADR 普遍具有较低的偏差值。

表 1 节点负载规范化标准偏差

路由机制	$n=300$	$n=350$	$n=400$	$n=450$	$n=500$
MADR	1.296	1.325	1.387	1.461	1.532
MAP	1.549	1.643	1.815	1.932	1.976
RDRIB	2.325	2.426	2.621	2.643	2.734

为了验证高负载节点的情况,随机选取 500 对节点进行数数据交流,统计出通信负载高于某一特定值的节点数量。在本实验中,本文将高负载定义为平均负载值的 δ 倍, $\delta \geq 2$ 。图 8 显示了实验结果,其中横坐标为节点负载与平均值的比 δ ,纵坐标为超过相应负载值的节点数量。从图中可以看出,本文方法与其他方法相比,具有较少的高负载的节点。

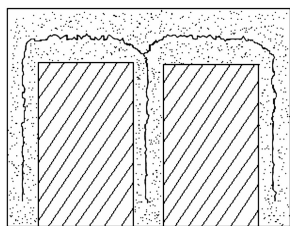


图 7 学生公寓示意图

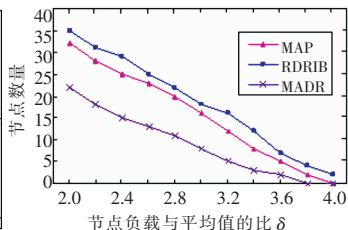


图 8 高负载的节点数的比较

由以上两个实验可以看出,与其他两个路由协议相比, MADR 具有较低的负载标准偏差,且具有较少的高负载节点。这是由于在 RDRIB 中,路由路径是朝着边界方向以贪婪方式进行的,它试图沿着直线路由,结果很容易遇到空洞,在遇到空洞时,路由会沿着空洞的边界进行,这种操作严重增加了边界附近节点的负载。而在 MAP 的路由策略中,虽然它考虑了空

洞边界的负载问题,但是它需要在路由阶段使用哈希表,将数据汇聚到公共节点,再供用户查询,这样就加重了公共节点附近的节点的负担,同样会造成负载的不平衡。MADR 则综合考虑了这些因素,一方面避免过多地使用空洞边界的节点进行数据路由,另一方面还避免使用汇聚节点,因此避免了重负载区域的产生。

4 结束语

本文设计一种基于中间轴的双线路由机制,该方法根据中间轴为每个节点定义一个虚拟坐标,而无须知道节点的地理位置。数据的路由使用双线路由机制,源节点产生的数据在平行于中间轴的路径上复制,而用户节点则沿着中间轴与边界之间的最短路径检索数据,在两条路径的交叉点处用户就能获取到自己感兴趣的数据。通过理论分析和仿真证明,该方法在复杂环境中也能取得较好的负载平衡,避免重负载区域的产生。但是该方法也有一定的局限性,例如它的传感器区域仅限于二维空间,如何将该方法扩展到三维空间还不清楚,这还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] FANG Qing, GAO Jie, GUIBAS L J, *et al.* GLIDER: gradient landmark-based distributed routing for sensor networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2005:339-350.
- [2] BRUCK J, GAO Jie, JIANG An-xiao. Map: medial axis based geometric routing in sensor networks[C]//Proc of ACM MobiCom. 2005:88-102.
- [3] TSAI M J, YANG H Y, HUANG Wen-qian. Axis-based virtual coordinate assignment protocol and delivery-guaranteed routing protocol in wireless sensor networks[C]//Proc of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. 2007:2234-2242.
- [4] FUNKE S, RAUF I. Information brokerage via location-free double rulings[C]//Proc of ADHOC-NOW. 2007:87-100.
- [5] SARKAR R, ZHU Xian-jin, GAO Jie. Double rulings for information brokerage in sensor networks[C]//Proc of MOBICOM. 2006:286-297.
- [6] LIN C H, KUO J J, TSAI M J. Reliable GPS-free double-ruling-based information brokerage in wireless sensor networks[C]//Proc of the 29th IEEE International Conference on Computer Communications. 2010:351-355.
- [7] FANG Qing, GAO Jie, GUIBAS L J. Landmark-based information storage and retrieval in sensor networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2006:1-12.
- [8] WANG Yue, GAO Jie, MITCHELL J S B. Boundary recognition in sensor networks by topological methods[C]//Proc of MOBICOM. 2006:122-133.
- [9] SHENKER S, RATNASAMY S, KARP B, *et al.* Data-centric storage in sensornets[J]. Proc of ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(1):137-142.
- [10] DINH T L. Topological boundary detection in wireless sensor networks[J]. Journal of Information Processing Systems, 2009, 5(3):145-150.
- [11] LIU Ke, ABU-GHAZALEH N. Virtual coordinates with backtracking for void traversal in geographic routing[C]//Proc of the 5th International Conference on Ad hoc, Mobile, and Wireless Networks. 2006:46-59.
- [12] GOU Hao-song, YOO Y. Distributed bottleneck node detection in wireless sensor network[C]//Proc of the 10th International Conference on Computer and Information Technology. 2010:218-224.
- [13] TSAI M J, WANG Fang-ru, YANG H Y, *et al.* VirtualFace: an algorithm to guarantee packet delivery of virtual-coordinate-based routing protocols in wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2009:1728-1736.