

一种能量高效的无线传感器网络等值线监测技术

安源^{1,2,3}, 孙利民³, 马彩文¹, 朱红松³, 方维维⁴

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所光电测控技术研究室, 710068, 西安; 2. 中国科学院研究生院, 100190, 北京; 3. 中国科学院软件所信息安全国家重点实验室, 100190, 北京;
4. 北京航空航天大学中德软件技术联合研究所, 100083, 北京)

摘要: 针对无线传感器网络环境监测应用中的能量受限问题, 提出一种基于 Bezier 曲线的无线传感器网络等值线监测方法——SENS-T. 利用等值线来表示环境监测值的分布信息, 即将等值线划分为若干 Bezier 曲线段, 每条曲线段的信息由一个代表节点负责传回汇聚中心, 汇聚中心再根据网络节点坐标与接收的曲线信息进行等值线还原. 汇聚节点的数量由划分的 Bezier 曲线段的段数决定, 从而改良了传统方法中等值线上所有节点都要进行汇聚的做法. 仿真表明, SENS-T 可有效节省网络能量和带宽, 与传统等值线监测方案相比, 在达到相同等值线绘制精度的同时, 可节省约 45% 的网络能量.

关键词: 无线传感器网络; 等值线; Bezier 曲线; 节能

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)02-0056-05

An Energy-Efficient Environment Monitoring Scheme for Wireless Sensor Networks Based on Contour Mapping

AN Yuan^{1,2,3}, SUN Limin³, MA Caiwen¹, ZHU Hongsong³, Fang Weiwei⁴

(1. Optical Directional and Pointing Technique Research Center, Xi'an Institute of Optics Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China; 2. School of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. State Key Laboratory of Information Security, Institute of Software of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A novel contour mapping scheme based on Bezier curves for wireless sensor networks, SENS-T, is presented to solve the problem of energy limits in using wireless sensor networks to monitor environments. The scheme uses contours to represent the distribution of environment attribute value, that is, the contour is divided into pieces of Bezier curves, the shape and the position information of each Bezier curve is collected to one deputy node and is reported to the sink; and the sink uses the nodes coordinates and the received curve information to rebuild the contour curve. The number of report nodes is determined by the number of Bezier curve segments so that the traditional method that reports the information of all nodes on the contour is reformed. Simulation results show that the energy and bandwidth of network are saved efficiently by SENS-T, and a comparison with the traditional method at the same accuracy of counter mapping shows that the SENS-T saves approximately 45% network energy.

Keywords: wireless sensor network; contour mapping; Bezier curve; energy saving

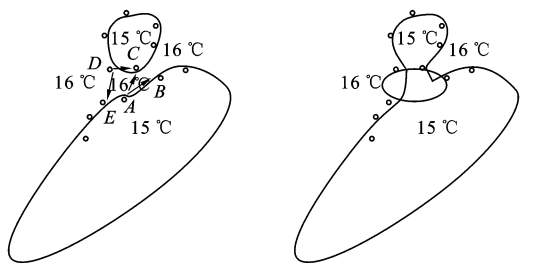
无线传感器网络(WSN)监测的环境信息往往 具有地理相关性, 如温度信息. 在这类监测应用中,

所有节点给网关节点(sink)发送位置信息和监测值是一种能效较低的方法,此方法的数据量及网络流量比较大,由此增加了发生网络拥塞的可能性.等值线方法^[1-3]被认为是类场景中的一种优秀的解决方案,它仅让监测到的等值线节点发送信息,因此减少了网络传输量,极大地节省了网络能量.

1 研究背景和动机

当地理上相邻的2个节点的测量值分属2个相邻值域(2个值域相差1个粒度)时,其中的一个节点就成为一个等值点,所有的同一值的等值点相连将产生一条等值线^[2].本文将代表等值点的节点定义为等值线节点,在WSN中的等值线监测方法^[3]通常仅传送等值线节点信息,以达到节能的效果.

当从汇聚的等值线节点信息中无法分辨节点间的连接关系时,等值线的绘制出现错误,如图1a所示,其中2个15℃的闭合区域处在温度为16℃的区域中间.若节点部署量不足,等值线节点A~D的位置信息在传回sink之后,sink则无法仅从节点A~D的位置信息中判别各节点间的连接关系,因此产生了图1b所示的错误.原本16℃的部分区域(图1b中灰色椭圆部分)被误认为属于15℃区域,从而造成2个15℃区域变为同一区域.文献[2]提出利用收集等值线周边节点的测量值来计算本地梯度的方法,可解决辨别节点间连接关系的问题.



(a)原始等值线 (b)绘制后的错误等值线

图1 等值线绘制错误

经过分析发现,图1中的错误出现在节点大量失效或节点稀疏部署的情况下.在实际应用中,为了达到一定的监测效果,节点将密集部署.在密集部署的网络中,只要任意2个相邻节点间的地域监测值变化不超过1个粒度(如温度监测中的1℃),sink就可辨别出各节点间的连接关系.若采用文献[2]的方法为每个节点计算本地梯度,将会额外增加通信量,降低网络生存期.

本文使用分段Bezier曲线来拟合指定的等值

线节点,并提出一种能量高效的监测方法SENS-T.在节点密集部署的情况下,无需采集节点邻居的监测值,通过汇聚描述Bezier曲线的控制点信息代替汇聚所有等值线节点的物理位置信息,从而大大减少了数据包的传递量,节省了网络监测能耗.

2 SENS-T方法

2.1 网络模型

假设任意2个相邻节点间地域监测值变化不超过1个粒度,又设网络启动后sink已知所有节点的分布信息,这些节点均匀部署在被监测区域之内.已有的WSN研究发现,将1b数据发送100m所消耗的能量相当于执行3000条指令.本文根据这一结论进行了假设,即在研究中主要考虑网络通信的能耗,忽略计算处理的能耗.各节点通过定位测量方法^[4]或装配GPS模块来获得节点位置坐标,并在节点收到查询请求后采用文献[2]方法确定等值线节点.

2.2 SENS-T方法设计

SENS-T监测方法中包含基于Bezier曲线的等值线节点选取方法和等值线节点集中式还原方法.

等值线节点选取方法包括:①利用Bezier曲线拟合方法(见图2a),在一定误差内将表征一条等值线的若干等值线节点拟合为几条Bezier曲线,每条曲线上最后一个能被拟合的等值线节点负责将其所在的Bezier曲线的绘制信息返回sink,这样整条等值线信息仅由少量等值线节点来发送;②部分符合拟合条件的非等值线节点(见图2b)将自身位置信息发送给sink,该信息在sink还原等值线节点时使用(此类节点为校准节点).对比图2a与图2c可以看出,由19个等值线节点组成的等值线被转化为3条Bezier曲线和3个校准节点.

等值线节点集中还原方法包括:①sink将收到的Bezier曲线绘制信息和校准节点在节点分布图上进行绘制(见图2d);②以曲线拟合时的误差为半径在分布图上为所有节点作圆,再在分布图中找出所有与Bezier曲线相交的圆,将校准节点所在圆(图2d中灰色圆)去除,余下圆的圆心位置便组成等值线节点(见图2e);③通过等值线绘制方法精确作图,结果如图2f所示.

3 等值线节点选取方法

等值线节点选取由Bezier初始化过程和拟合检验更新过程组成.在等值线节点选出之后,每条等

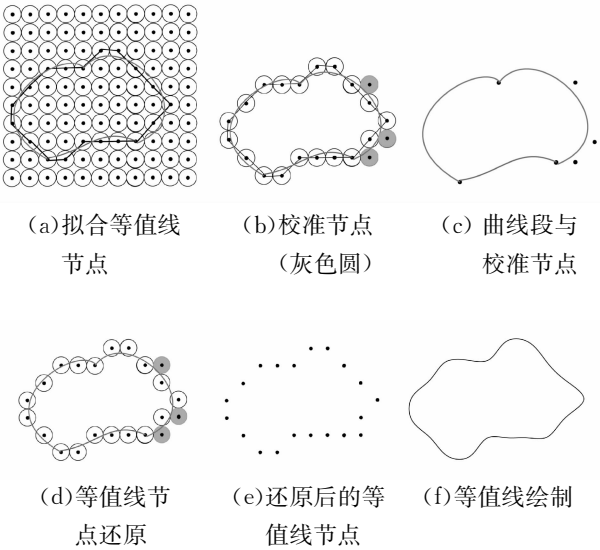


图2 SENS-T 监测方法

值线上将有一个随机挑选的等值线节点被作为 Bezier 初始节点,此节点向周围 1 跳内节点广播 Bezier 曲线初始化消息,内容为自身位置信息和等值线值.收到该消息的等值线上的节点将同样向 1 跳内转发初始化信息并广播自身位置信息,以此类推,直至第 4 个节点在收到 3 个广播信息后,通过简单的计算拟合出这 4 个节点的 Bezier 曲线绘制序列,至此完成 Bezier 初始化过程.

Bezier 曲线绘制序列将沿等温线方向在 1 跳内进行广播.收到该序列的节点若在一定的距离误差内被 Bezier 曲线拟合,绘制序列将在更新后继续沿等值线方向广播;否则,最后收到序列的节点被指派为绘制节点,负责向 sink 传送最终 Bezier 曲线绘制序列,并从此绘制节点开始,重复进行 Bezier 曲线初始化和拟合检验,直至在拟合检验更新过程中监测到一个已被拟合的节点为止.在拟合检验过程中,收到 Bezier 绘制序列的非等值线节点将计算其到 Bezier 曲线的距离误差,以判断能否被拟合.拟合者为校准节点,它会立即将节点自身坐标信息发送给 sink,以便在 sink 还原时使用,否则不做任何动作.

等值线节点的 Bezier 曲线转化如图 3 所示. P_0 为起始节点, P_0, P_3, P_6, P_9 为绘制节点,分别负责传送 $\{P_0, P_{11}, P_{10}, P_9\}, \{P_3, P_2, P_1, P_0\}, \{P_6, P_5, P_4, P_3\}, \{P_9, P_8, P_7, P_6\}$ 4 组 Bezier 曲线绘制序列,这样整条等值线被转化为 4 段 Bezier 曲线.

3.1 Bezier 初始化过程

Bezier 曲线初始化是利用 Bezier 反算拟合出一条 Bezier 曲线,分 2 种情况:①一个等值线节点被指派为 Bezier 初始节点;②在拟合等值线节点的过程

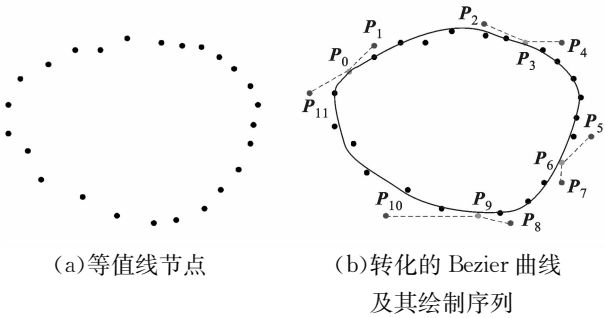


图3 等值线节点的 Bezier 曲线转化示意图

中遇到等值线节点不能被 Bezier 曲线拟合.三次 Bezier 曲线^[5-6]如图 4 所示,其表达式为

$$P(t) = \sum_{i=0}^3 P_i B_i \tag{1}$$

$$B_{i,3}(t) = \begin{bmatrix} 3 \\ t \end{bmatrix} t^i (1-t)^{3-i}, \quad t \in [0,1] \tag{2}$$

式(1)的矩阵表达式为

$$P(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: P_0, P_3 分别为 Bezier 曲线的起点和终点; P_1, P_2 为 2 个控制点. $\{P_0, P_1, P_2, P_3\}$ 唯一地确定一条 Bezier 曲线的形状.

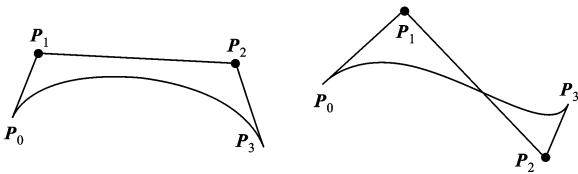


图4 三次 Bezier 曲线

由式(1)可知,Bezier 曲线上任意一点都有唯一的弦长比例参数 t (此点到 Bezier 曲线起始点的长度与 Bezier 曲线总长度的比值)与之对应, t 的精度决定了反算 Bezier 曲线的精度.在初始化过程中,假设 4 个等值线节点为 $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3\}$, $t_i (i \in [0,3])$ 为 Q 中 $q_0 \sim q_3$ 的弦长比例参数,则过 Q 中 4 点的 Bezier 曲线绘制序列为 $P = \{P_0, P_1, P_2, P_3\}$ 的估算式为

$$t_i = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ \frac{|q_0 q_1|}{|q_0 q_1| + |q_1 q_2| + |q_2 q_3|}, & i = 1 \\ \frac{|q_0 q_1| + |q_1 q_2|}{|q_0 q_1| + |q_1 q_2| + |q_2 q_3|}, & i = 2 \\ 1, & i = 3 \end{cases} \tag{4}$$

由式(4)可获得 Q 中元素的对应值,再由式(1)可推出

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{0,3}(t_0) & B_{1,3}(t_0) & B_{2,3}(t_0) & B_{3,3}(t_0) \\ B_{0,3}(t_1) & B_{1,3}(t_1) & B_{2,3}(t_1) & B_{3,3}(t_1) \\ B_{0,3}(t_2) & B_{1,3}(t_2) & B_{2,3}(t_2) & B_{3,3}(t_2) \\ B_{0,3}(t_3) & B_{1,3}(t_3) & B_{2,3}(t_3) & B_{3,3}(t_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因为 $q_0 = P_0, q_3 = P_3$, 所以由式(5)可推出

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{0,3}(t_1) & B_{1,3}(t_1) & B_{2,3}(t_1) & B_{3,3}(t_1) \\ B_{0,3}(t_2) & B_{1,3}(t_2) & B_{2,3}(t_2) & B_{3,3}(t_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(4)、式(2)代入式(6)可得

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{t_2 B_1 - t_1 B_2}{(1-t_1)t_2 - (1-t_2)t_1}; \\ P_2 &= \frac{(1-t_1)B_2 - (1-t_2)B_1}{(1-t_1)t_2 - (1-t_2)t_1} \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{q_1 - (1-t_1)^3 q_0 - t_1^3 q_3}{3t_1(1-t_1)} \\ B_2 &= \frac{q_2 - (1-t_2)^3 q_0 - t_2^3 q_3}{3t_2(1-t_2)} \end{aligned}$$

通过式(7)便可求得 P_1, P_2 , 从而求得 Bezier 曲线的绘制序列 $\{P_0, P_1, P_2, P_3\}$.

3.2 等值线节点拟合检验过程

在 Bezier 初始化过程完成之后, SENS-T 进入拟合检验过程. 在初始化过程中, 计算获得的 Bezier 绘制序列将被广播, 而收到绘制序列的节点将按以下准则检验 Bezier 曲线拟合的情况. 设将绘制序列代入式(3)得到的 Bezier 曲线为

$$P(t) = A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0 \quad (8)$$

又设 $P(t) = \{P_x(t), P_y(t)\}$, $A_i = [x_i \ y_i]$, $i \in [0, 3]$, 则式(8)可分解为

$$\begin{aligned} P_x(t) &= A_3[1 \ 0]t^3 + A_2[1 \ 0]t^2 + \\ &A_1[1 \ 0]t + A_0[1 \ 0] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_y(t) &= A_3[0 \ 1]t^3 + A_2[0 \ 1]t^2 + \\ &A_1[0 \ 1]t + A_0[0 \ 1] \end{aligned} \quad (10)$$

如果需拟合检验的节点坐标为 $S = \{S_x, S_y\}$, 可将 S_x 作为 $P_x(t)$ 代入式(9), 从而得到三元一次方程, 再利用判别式(如 Cardano)方法便可求得参数 t , 将 t 代入式(10)可求得 $P_y(t)$.

定义 1 $|P_y(t) - S_y| < \xi$ (11)

设 ξ 为给定拟合误差, 若式(11)成立, 认为被检验节点 S 可由式(8)表示的 Bezier 曲线来拟合.

3.3 Bezier 曲线控制点更新过程

设节点是经式(11)检验可被拟合的节点, 由于原 Bezier 曲线需加入节点, 所以原绘制序列要进行更新. 原 Bezier 曲线绘制序列为 $P = \{P_0, P_1, P_2, P_3\}$, 拟合后为 $P' = \{P'_0, P'_1, P'_2, P'_3\}$, 根据 Bezier 曲线性质, P 与 P' 之间存在以下转换关系

$$\left. \begin{aligned} P'_0 &= P_0 \\ P'_1 &= (P_1 - P_0)t + P_0 \\ P'_2 &= (P_2 - P_1)t + P_1 - ((P_1 - P_0)t + P_0) \\ &\quad + (P_1 - P_0)t + P_0 \\ P'_3 &= P_3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3.4 SENS-T 方法伪代码

SENS-T 方法伪代码如图 5 所示.

```

Input: contour-nodes  $N_i, i \in \zeta$ , a tolerance error  $\varepsilon$ 
Output: several control vertices sets  $P_j, j \in \zeta$ 
1: randomly chose a contour node to start
2: while ( $N_i \neq \emptyset, t \in \zeta$ ) do
3: Form_Bezier_Curve( $N_i, x \in t \rightarrow t+4$ )
4: while ( $N_i \neq \emptyset, s \in \zeta$ ) do
5:   Check_Nodes( $N_i, P_s, \varepsilon$ )
6:   if node can be fitted then
7:     if node is not a contour-node then
8:       send position back to sink
9:     if node is a contour-node then
10:      update Bezier curve control vertices set  $P_s$ , check
11:      the next contour-node  $N_i = N_i + 1$ 
12:     else send update Bezier curve control
13:       vertices set back to sink, and goto compute

```

Function Form_Bezier_Curve()

Input: 4 contour-nodes

Output: control vertices set P

1: use 4 contour-nodes to calculate a Bezier curve

2: control vertices set P by using formula (7)

Function Check_Nodes()

Input: a control vertices set P , a contour-node, and a tolerance error

Output: updated control vertices set P

1: if formula defined in (11) is true then

2: updated set P by using formula defined in (12)

else return false

图 5 SENS-T 方法伪代码

4 实验与性能分析

采用 NS2 模拟器对 SENS-T 方法进行了等温线仿真实验. 实验模型为: 在 800 m² 的模拟区域上均匀部署了 55×55 个节点, 节点通信半径为 15 m. 根据图 6 的温度分布建立温度数据库, 规则为: 区域温度为 [8 °C, 30 °C], 每个 100 cm² 区域的位置信

息与所代表的温度组成一个数据库元素,温度采集粒度为0.1℃.各节点根据其位置在数据库中查询对应温度.

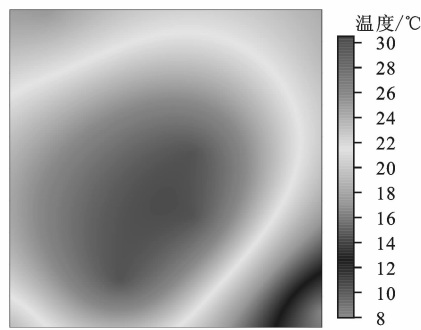


图 6 温度分布

实验中,sink 发出一个 25℃~30℃的、温度粒度为 2℃的查询信息.此次查询后生成 Bezier 曲线段以及 3 个符合 Bezier 曲线拟合条件的校准节点,如图 7 所示.

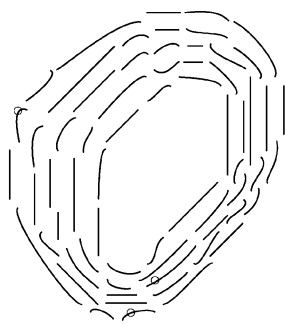


图 7 SENS-T 算法生成的等温线 Bezier 曲线段

表 1 给出了文献[2]中的 ISO-Map 方法与 SENS-T 方法应用于本实验的数据对比,从表中可看出,SENS-T 方法的数据发送量相比 ISO-Map 方法降低了约 47%.

表 1 SENS-T 与 ISO-Map 方法的数据对比

方法	ISO-Map	SENS-T
等温线节点数	382	382
上传节点数	382	68
单节点上传数据量/B	3	8
上传数据总量/B	1 146	544

实验根据返回的 Bezier 曲线绘制信息在节点分布图上绘制出 Bezier 曲线并剔除校准节点,还原出等温线节点,如图 8 所示,其中每个圆点的半径为拟合误差,圆心为节点所在位置.

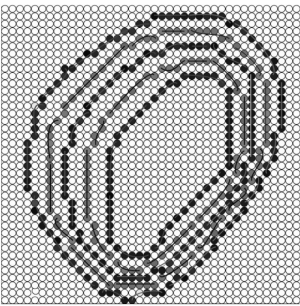


图 8 等温线节点还原结果

本文采用 Matlab 针对实验中的数据绘制了等温线基线,并与 SENS-T 方法的绘制效果进行叠加,结果如图 9 所示.从浅到深均匀连续的闭合曲线为等温线基线,基线周围的细线为 SENS-T 方法的绘制结果. SENS-T 方法汇聚的等值线节点信息并没有损失,因此其与传统方法绘制的等值线效果相当.

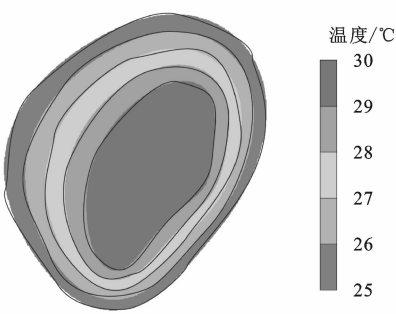


图 9 依据图 8 数据绘制出的等温线

最后,将 SENS-T 方法与 WSN 中几种经典的等值线监测方法(TinyDB^[1]、INLR^[3]、ISO-Map)在网络半径(跳数)与传输数据量方面进行了比较,结果如图 10 所示.从图 10 中可以看出,SENS-T 方法在返回相同等值线信息时,较其他方法的数据传输量小,因此应用 SENS-T 方法的传感器网络能够达到一定的节能效果.

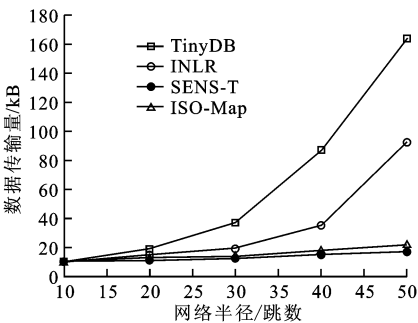


图 10 数据传输量比较

5 结束语

本文提出了一种基于 Bezier 曲线的能量高效的无线传感器网络等值线监测方法. 利用 Bezier 曲线且使用少数控制点信息来描述一条曲线特性,这样可有效降低等值线绘制过程中需要上报的节点数量. 实验表明,SENS-T 方法较传统方法在返回等量等值线信息的同时,可有效降低网络中的数据通信量,解决了节点能量有限的问题.

参考文献:

[1] HELLERSTEIN J M, WANG W, MADDEN S, et al. Beyond average: toward sophisticated sensing with queries [C]//Proceedings of Information Processing in Sensor Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 553-559.

[2] LIU Yunhao, LI Mo. Iso-Map: energy-efficient contour mapping in wireless sensor [C]//Proceedings of International Conference on Distributed Computing

Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 36-42.

[3] XUE W, LUO Q, CHEN L, et al. Contour map matching for event detection in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 2006 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York, USA: ACM, 2006: 157-168.

[4] 李善仓, 傅鹏, 张德运. 无线传感器网络中的分布式节点定位方法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(12): 1418-1422.

LI Shancang, FU Peng, ZHANG Deyun. Distributed nodes localization method in wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(12): 1418-1422.

[5] LOVELL B C, BISWAS S. Bézier and splines in image processing and machine vision [M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.

[6] 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 410-413.

(编辑 苗凌)