

基于贝塞尔曲线的 WSN 等值线绘制算法^①

安 源^② * ** *** 马彩文* 孙利民^③ *** 张晨伟**** 方维维*****

(* 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 西安 710068)

(** 中国科学院研究生院 北京 100190)

(*** 中国科学院软件所 北京 100190)

(**** 北京理工大学 北京 100081)

(***** 北京航空航天大学中德软件技术联合研究所 北京 100083)

摘 要 从无线传感器网络(WSN)环境数值监测应用的实际需求出发,提出了一种应用于该类场景中的等值线绘制(CMBC)算法。CMBC 算法基于图形学中常用的贝塞尔(Bezier)曲线理论,通过选择部分节点提供信息给网关节点绘制等值线。此方法有效解决了监测应用场景中对最终监测精度的需求与大量报告节点所引发的高流量负载和网络能耗之间的矛盾。仿真结果表明,CMBC 算法和已有研究工作相比能够使用更少的汇报节点完成高精度等值线的绘制,因此 CMBC 算法能够节省节点的能量,延长网络的生存期。

关键词 无线传感器网络(WSN), 节能, 等值线绘制, Bezier 曲线, 环境监测

0 引 言

在利用无线传感器网络(WSN)对有地理相关性的数据进行监测时,所有节点都发送位置信息和监测值回网关节点(sink)是一种能量低效的方法,此方法产生了很大的数据量及网络流量,消耗了节点有限的能量,增加了发生网络拥塞的可能性。因此数据融合或者抑制传输量被视为在 WSN 中实现节能的重要策略。在现有方法中,研究人员提出的等值线绘制(contour mapping)方法^[1-7]被认为是一种抑制传输量的优秀解决方案。Hellerstein 等人^[2]利用这种等值线绘制方法的梯度分布特性,在每次查询周期中仅让等值梯度带边界(等值线)上的节点汇报自己的感知值和位置信息。监测中心通过这些等值线上节点汇报的信息在地图上重构该物理参量的分布梯度和等值线图。这种等值线汇报的方法减少了网络中汇报信息的节点数,从而节省了网络能量。Xue 等^[5]和 Liu 等^[1]讨论了等值线汇聚方法存在的问题并提出相关的解决办法。

在研究中我们发现,这些传统的等值线方法仅仅利用了参量分布的“等值”特性,并没有利用等值

“曲线”的特性。根据图形学的知识,一条任意封闭曲线可以使用有限条贝塞尔(Bezier)曲线段进行拟合和近似表征。如果能够利用这种曲线特征,可以进一步减少汇聚节点的个数。

基于以上所述,本文提出了基于 Bezier 曲线的等值线绘制(contour mapping based on Bezier curves, CMBC)算法,该算法从无线传感器网络数值监测的实际需求出发,将三次 Bezier 曲线 4 个控制点表示一条曲线的特性应用在等值线绘制中,有效地降低了网络通信负载,延长了网络生存期。本文提出的 CMBC 算法适用于所有具有地理相关性(如温度、湿度、高度等)数据的数值监测应用。

1 研究背景和问题描述

当期望得到某区域环境温度时,等值线绘制技术是一种能够有效地延长网络生存期、降低网络通信开销的方法。实际应用中,等值线绘制准确度是衡量绘制效果的一项重要指标。绘制准确度主要取决于节点部署密度,若节点部署较多,则准确度会得到提高,但同时会增加网络通信拥塞的可能性,降低网络生存期;若节点部署较少,则可能产生绘制错

① 863 计划(2008AA01Z120),国家自然科学基金(60773055)和国家科技重大专项(2009ZX03006-001-01,2009ZX03006-004-01)资助项目。
② 男,1982 年生,博士生;研究方向:无线传感器网络,信号与信息处理;E-mail: any@opt.ac.cn
③ 通讯作者, E-mail: sunlimin@is.iscas.ac.cn
(收稿日期:2009-05-22)

误。

如图 1(a)所示为例,设两个 15℃ 的闭合区域处在温度为 16℃ 的区域中,若节点部署数量不足,节点 A、B、C、D 的位置信息传回 sink 后,sink 由于无法判别各点间的连接关系,会产生图 1(b)中所示的错误:原本 16℃ 的部分区域(图 1(b)中间深色椭圆部分)被误认为属于 15℃ 区域,造成原本两个 15℃ 区域变为同一区域。本文的研究目标在于解决实际应用中节点密集部署情况下(达到一定绘制准确度)如何降低通信量和延长网络生存期的问题。

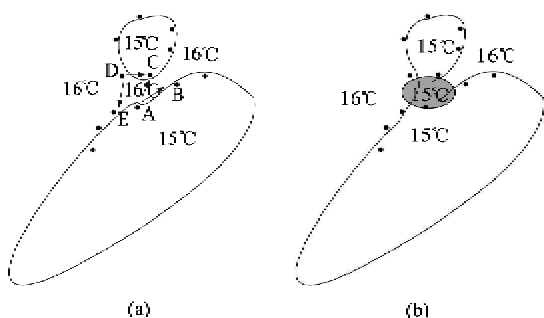


图 1 原始等值线分布情况(a)和等值线绘制错误(b)

Liu 等提出了一种高效节能的等值线绘制方法 ISO-map^[1],有效解决了节点数量较少环境下图 1 中 WSN 等值线绘制错误的问题。此方法首先从部署节点中选出标志等值线信息的等值线节点,随后为每个等值线节点计算本地梯度,sink 在得到梯度与节点位置信息后利用 Voronoi 图和文中等值线绘制规则进行绘制。当节点密集部署时 ISO-map 方法并不适用,原因是:(1)计算梯度信息增加了计算量和通信量,即使没有梯度信息,由于节点密集部署,等值线也可准确绘制,因此 ISO-map 中使用一跳或几跳邻居节点信息计算梯度的方法,增加了计算量和通信量;(2)基于 Voronoi 图构建等值线的方法并不简便。由于 sink 获得等值线节点信息后,仅用短直线或任意曲线拟合方法便可准确构建等值线图,因而使用文中基于 Voronoi 图的构建方法显得复杂。

本文提出了一种应用在 WSN 中的基于三次 Bezier 曲线的等值线绘制算法 CMBC 算法,CMBC 算法可在一定精度要求下将一条由若干节点表征的等值线转化为几段 Bezier 曲线。与 ISO-map 传送所有节点数据的方法不同,CMBC 算法需要发送数据的节点个数由转化的 Bezier 曲线条数决定。相比已有研究^[1-5],CMBC 算法在拟合曲线过程中无需周边一跳内节点的信息。此外,由于 CMBC 算法基于 Bezier

曲线理论,sink 可方便和快速地建立等值线图,从而降低了 sink 重建等值线的计算量和难度。

2 基于 Bezier 曲线的等值线绘制

2.1 网络模型

实际应用中,对等值线绘制准确度要求不同,则节点部署密度不同。当 WSN 中任意相邻 2 个节点间地域温度不会变化 1 个温度粒度(如 1℃)时,sink 完全可以分辨本文图 1 中 A、B、C、D 间的连接关系,不会产生图 1 所示的绘制错误,本文节点部署满足此条件。

CMBC 算法主要针对地理相关性的环境数值监测,它适用于任何 WSN 路由方案。所有节点均匀部署在被监测区域内,并且每个节点都有独立的用于数据发送和接收的时槽。所有节点有能力得到自身的位置坐标,此位置坐标可采用定位测量方法,或通过装配在节点上的 GPS 模块获得。当两个地理相邻节点的测量值不在同一值域内时,这两个节点间就会产生一个等值点,所有表示同一值的等值点相连,就会产生一条等值线,本文定义这些相邻节点为“等值线节点(contour-nodes)”。本文采用文献[1]中等值线节点的判断方法,节点收到查询请求后,可自行判断是否为等值线节点。

2.2 基本思想

当节点密集部署时,一条等值线通常由众多等值线节点构成,本文的目标是在此情况下设计一个智能等值线节点选取算法,使一条等值线由若干 Bezier 曲线表示,每条曲线上有一个节点将 Bezier 曲线绘制信息发回 sink。sink 收到信息后,可使用任何 Bezier 曲线绘制方法^[3]快速绘制出等值线图。这种发送 Bezier 曲线绘制信息的方法减少了通信量,降低了由节点数目增多引发通信拥塞的可能性,同时使得 sink 构建等值线图时更加简便、快捷。

3 CMBC 算法设计

CMBC 算法由初始化过程和拟合检验更新过程组成,可简要阐述如下:网络中等值线节点被选出后,随机挑选每条等值线上的一个等值线节点作为初始节点,此节点向周围一跳内节点广播 Bezier 曲线初始化消息,内容为位置信息和等值线值。收到初始化消息的此等值线上的等值线节点将同样向一跳内转发初始化信息和广播自身信息,依此类推,直

至第 4 个节点收到 3 个广播信息后,第四个节点通过简单的计算,拟合出过这 4 个点的 Bezier 曲线绘制参数序列,至此,初始化过程结束。在拟合检验更新过程中,初始化过程中计算的参数序列将一跳内广播传递给后续等值线上的等值线节点。若收到参数序列的等值线节点能够在一定误差内被 Bezier 曲线拟合,参数序列将在更新后继续广播传递,否则其将被指派为“绘制节点”负责向 sink 传送最终 Bezier 曲线绘制参数。从此“绘制节点”开始,重复上述工作直至拟合检验更新过程中监测到一个已被拟合的节点时算法结束。

图 2 是已被选出的等值线节点分布图,图 3 为 CMBC 算法的应用示意图。图 3 中 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 $\{P_0, P_{11}, P_{10}, P_9\}$ 、 $\{P_3, P_2, P_1, P_0\}$ 、 $\{P_6, P_5, P_4, P_3\}$ 、 $\{P_9, P_8, P_7, P_6\}$ 四组 Bezier 曲线绘制参数,图 3 中闭合曲线为拟合后的等值线效果图。

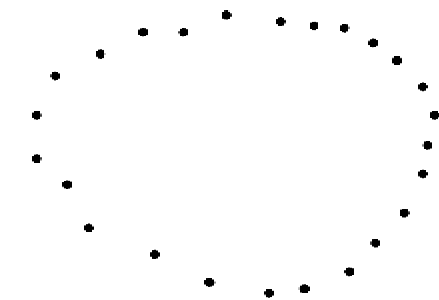


图 2 表征一条等值线的等值线节点

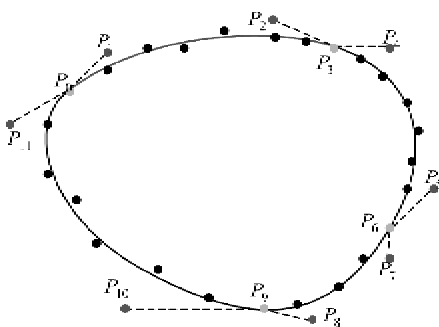


图 3 CMBC 算法示意图

3.1 Bezier 初始化过程

Bezier 曲线初始化过程的主要作用是利用 Bezier 反算用 4 个等值线上的点拟合成一条 Bezier 曲线,此过程会出现在两种情况中:(1)当一个等值线节点被指派为初始节点时,将触发此过程;(2)在拟合等值线节点过程中,遇到节点不能被 Bezier 曲线

拟合时,也将触发此过程。

三次 Bezier 曲线可表示为

$$P(t) = \sum_{i=0}^3 P_i B_{i,3}(t) \quad (1)$$

其中

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

式(1)可进一步推导为矩阵表达式及常数 (A_3, A_2, A_1, A_0) 表达式如下:

$$P(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0 \quad (3)$$

式(3)中, P_0, P_3 分别为 Bezier 曲线的起点和终点, P_1, P_2 为两个控制点。如图 4 所示, $\{P_0, P_1, P_2, P_3\}$ 唯一确定一条 Bezier 曲线的形状。此节讲述的 Bezier 初始化过程,将计算出这样一个参数序列,本文称此序列为 Bezier 曲线绘制参数序列。

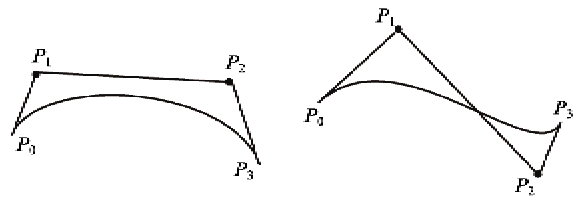


图 4 三次 Bezier 曲线与控制点间的关系

由式(1)可知,Bezier 曲线上任意一点都有唯一的参数 t 与其对应。反算 Bezier 曲线时, t 的精度决定了反算精度。若设初始化过程中 4 个等值线节点为 $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3\}$, 过此 4 点的 Bezier 曲线绘制参数表示为 $P = \{p_0, p_1, p_2, p_3\}$, 以下给出由 Q 向 P 转换的过程:

Q 中各点的参数 t 使用线段长度与线段长度总和的比例进行估算:

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

得到 Q 中元素对应的 t 值后,将 $q_0 = p_0, q_3 = p_3$ 代入式(1),进一步进行推导可得

$$p_1 = \frac{t_2 b_1 - t_1 b_2}{(1 - t_1)t_2 - (1 - t_2)t_1}$$

$$p_2 = \frac{(1-t_1)b_2 - (1-t_2)b_1}{(1-t_1)t_2 - (1-t_2)t_1} \quad (5)$$

其中

$$b_1 = \frac{q_1 - (1-t_1)^3 q_0 - t_1^3 q_3}{3t_1(1-t_1)}$$

$$b_2 = \frac{q_2 - (1-t_2)^3 q_0 - t_2^3 q_3}{3t_2(1-t_2)}$$

通过上式,便可求得 p_1, p_2 , 从而求得表征一条 Bezier 曲线的绘制参数 $\{p_0, p_1, p_2, p_3\}$ 。

3.2 等值线节点拟合检验过程

Bezier 曲线初始化后,进入拟合检验过程,一组 Bezier 绘制参数将广播传递,收到绘制参数的等值线节点将检验 Bezier 曲线是否能被此拟合。设将绘制参数带入式(2)后,得到的 Bezier 曲线表达式如下:

$$P(t) = A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0 \quad (6)$$

另设 $P(t) = \{P_x(t), P_y(t)\}$, 将 $P_x(t), P_y(t)$ 带入上式可得

$$P_x(t) = A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0 \quad (7)$$

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

若假设需拟合检验节点为 $S = \{S_x, S_y\}$, 将 S_x 作为 $P_x(t)$ 带入式(7)可得一个三元一次方程,利用判别式方法如 Cardano 方法^[10],可方便求到参数 t 。将 t 带入式(8)可求得 $P_y(t)$ 。

$$\text{定义 1} \quad |P_y(t) - S_y| < \xi \quad (9)$$

设 ξ 为给定拟合误差,当不等式(9)成立时,认为被检验节点 S 可被由式(6)表示的 Bezier 曲线拟合。

3.3 Bezier 曲线控制点更新过程

经过式(9)检验后,设节点 S 为能被拟合的节点,由于需要加入 S 节点,原绘制参数需要进行更新。设拟合前 Bezier 曲线绘制参数为 $P = \{P_0, P_1, P_2, P_3\}$, 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:

$$\begin{cases} p'_0 = p_0 \\ p'_1 = (p_1 - p_0)t + p_0 \\ p'_2 = ((p_2 - p_1)t + p_1 - ((p_1 - p_0)t + p_0))t + (p_1 - p_0)t + p_0 \\ p'_3 = S \end{cases} \quad (10)$$

其中参数 t 为 3.2 节中求得的 t 值。

3.4 CMBC 算法伪代码

前三节重点讲述了 CMBC 方法的 3 个必要过

程,CMBC 算法的伪代码如下所示:

Algorithm CMBC

Input: a series of contour-nodes, a tolerance error

Output: several control vertices sets.

```

1: Randomly chose a contour node to start.
2: while (1) do
3:   Form_Bezier_Curve( )
4:   While (1) do
5:     Check_nodes( )
6:     If (Check_nodes succeed) then
7:       check the next contour-node
8:     else send back "P" set to sink
9:   break
10: end while

```

Function Form_Bezier_Curve()

Input: 4 contour-nodes

Output: Control vertices set "P"

```

1: Use 4 contour-nodes to calculate a Bezier curve who
   has control vertices set "P" by using formula (5)

```

Function Check_nodes

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

Output: renewed control vertices set "P".

```

1: if (formula defined in (9) is true)
2:   then renew set "P" by using formula defined in (10)
3: else return false

```

4 实验与性能分析

本文使用 NS2 模拟器对 CMBC 算法进行了等温线试验仿真,在 800m^2 的模拟区域上均匀部署了 80×80 个节点,并根据图 5 模拟的等温线基线图建立温度数据库,规则为:区域温度为 $[10^\circ\text{C}, 15^\circ\text{C}]$ (图 5 中最内侧等温线包络的区域温度为 15°C ,整个等温线包络区域中由内向外每 10cm^2 温度变化 0.1°C),每个 10cm^2 区域的位置信息与所代表的温度组成一个数据库元素。各节点根据位置在数据库中查询自己所对应的温度。采用 ISO-map 和 CMBC 算法分别对模拟区域进行了等温线绘制,结果如

图 6 所示。

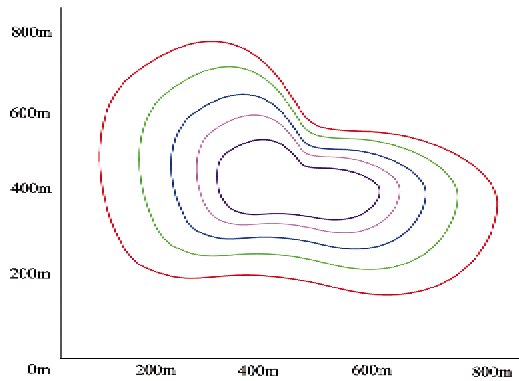


图 5 被测区域的等温线基线图

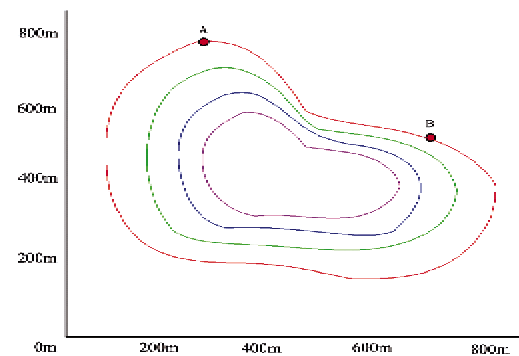
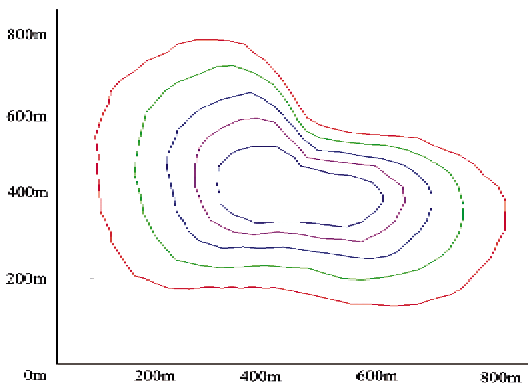


图 6 ISO-map 方法绘制的等温线图(a)和 CMBC 算法绘制的等温线图(b)

图 7 为两种方法在绘制图 6(b)所示 AB 区域时在绘制效果及使用节点数量上的对比,图中左下方的曲线群是将基线、ISO-map 和 CMBC 三种等温线进行叠加后的结果,用以对比近似度。从图 7 可以看出,CMBC 算法可在达到高相似度的同时,起到很好的抑制发送的效果(见表 1)。

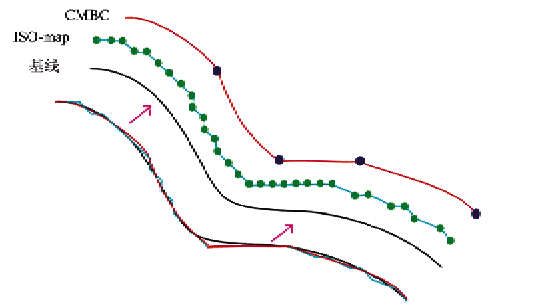


图 7 DABC 算法与 ISO-map 算法分别应用于 AB 段的对比

表 1 方法对比

方法	ISO-map	CMBC
区域	A-B 段	A-B 段
上传节点数	32	4
单节点上传数据大小	3 字节	8 字节
上传数据量	96 字节	32 字节

将节点以不同密度进行部署,选取节点通信半径为 25m,本文对比了 ISO-map 和 CMBC 算法完成同一条等温线绘制的通信量,如图 8 所示。由于 ISO-map 方法需要使用一跳内节点信息计算梯度,CMBC 算法在通信量上明显优于 ISO-map 方法。

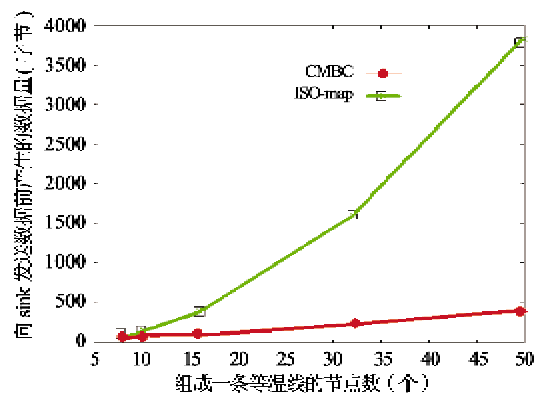


图 8 CMBC 算法与 ISO-map 算法通信量的比较

设 ξ 为拟合节点时的误差,在 800×800 的区域中部署 80×80 个节点的实验中,一个节点能感知的区域的直径为 10m,分别取拟合误差为感知区域直径的 0.5 倍和 1 倍数值为 ξ ,对比不同节点部署密度下等温线绘制近似度的结果,如图 9 所示。图 9 横坐标表示节点部署的密度,“1”表示部署了 80×80 个节点,2 表示部署了 160×160 个节点,可看出当任意两个节点间温度变化不超过 1 个温度粒度时,CMBC 能够获得与 ISO-map 可比的精度。

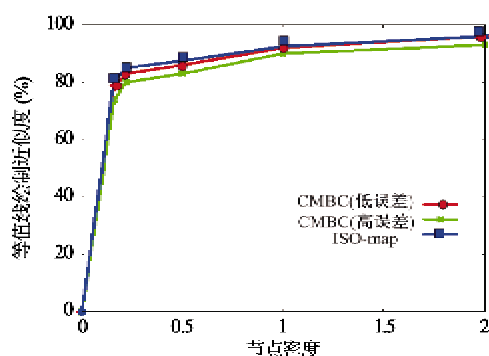


图9 CMBC与ISO-map的相似度比较

5 结论

本文提出了一种 WSN 中的等值线绘制算法——CMBC 算法。CMBC 算法适用于采集如环境湿度、温度等具有地理相关性数据的 WSN 监测。通过实验证明,此算法在有效保证温度感知精度的同时,降低了网络中传输的数据通信量,节省了节点有限的能量。此外,由于算法融合了 Bezier 曲线这种可快速生成的曲线,使得构建等值线的过程更加简便、快速。

参考文献

- [1] Liu Y H, Li M. Iso-Map: energy-efficient contour mapping in wireless sensor networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Toronto, Canada, 2007. 36-44
- [2] Hellerstein J M, Hong W, Madden S, et al. Beyond average: toward sophisticated sensing with queries. In: Proceedings of the Information Processing in Sensor Networks. California, USA, 2003. 63-79
- [3] Silberstein A, Braynard R, Yang J. Constraint chaining: on energy-efficient continuous monitoring in sensor networks. In: Proceedings of the 2006 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Chicago, USA, 2006. 157-168
- [4] Zhan J, Govindan R, Estrin D. Computing aggregates for monitoring wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, Alaska, USA, 2003. 139-145
- [5] Xue W, Luo Q, Chen L and Liu Y. Contour map matching for event detection in sensor networks. In: Proceedings of the ACM Special Interest Group on Management of Data (SIGMOD) International Conference on Management of Data, Illinois, USA, 2006. 145-156
- [6] Solis I, Obraczka K. Efficient continuous mapping in sensor networks using isolines. In: Proceedings of the MobiQuitous, California, USA, 2005. 325-332
- [7] Goldenberg D, Bihler P, Gao M, Fang J, Anderson B, et al. Localization in sparse networks using sweeps. In: Proceedings of ACM MobiCom, California, USA, 2006. 110-121
- [8] Lovell B C, Biswas S. Bézier and Splines in Image Processing and Machine Vision. London: Springer, 2008. 30-33
- [9] Bezier Curves Wiki. <http://en.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ziercurve>; Wikimedia Foundation, Inc, 2008
- [10] Cardano method Wiki. http://en.wikipedia.org/wiki/Cubic_equation#Cardano.27s_method; Wikimedia Foundation, Inc, 2008

A Bezier curve based contour mapping algorithm for wireless sensor networks

An Yuan^{* ** ***}, Ma Caiwen^{*}, Sun Limin^{***}, Zhang Chenwei^{****}, Fang Weiwei^{*****}

(^{*} Optical Directional and Pointing Technique Research Center, Xi'an Institute of Optics Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(^{**} Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{***} Institute of Software of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{****} Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(^{*****} Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract

From the perspective of actual environmental monitoring demand in wireless sensor networks (WSNs), the paper puts forward an algorithm for contour mapping based on Bezier curves (CMBC) in these scenarios. The CMBC algorithm is based on the theory of Bezier curves and is widely used in computer graphics. It selects part of nodes to send contour mapping information to sink. In monitoring scenarios, the CMBC algorithm effectively solves the conflicts between demand of precision and transmission restraint, high energy consumption caused by nodes increasing. The comprehensive simulation results show that the CMBC algorithm achieves a high fidelity of contour mapping by using much fewer nodes as data sources than existing works, so the algorithm can save the limited energy of nodes and extend network life.

Key words: wireless sensor network (WSN), energy saving, contour mapping, Bezier curve, environmental monitoring