

无线传感器网络中误差等级融合算法*

钱菲菲, 秦宁宁, 何佩, 徐保国

(轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江南大学物联网工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 为消除基于虚拟节点的数据融合算法(VNB-DF)的局部误差过大现象,设计了一种误差分级(EG)的虚拟节点数据融合算法。该算法根据目标的精度要求,设定误差等级,通过多项式拟合系数来表示一定范围内的监测数据的分布状态,在内存中生成虚拟节点。实验表明,与簇内数据取均值和 VNB-DF 算法相比,该算法大大提高了数据采集精度,在多种类环境应用方面能够表现出良好的性能。

关键词: 误差分级; 虚拟节点; 数据融合; 无线传感器网络

中图分类号: TP309 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)03-1008-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.057

Error grade fusion algorithm in wireless sensor networks

QIAN Fei-fei, QIN Ning-ning, HE Pei, XU Bao-guo

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry Ministry of Education, School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to eliminate the phenomenon of the error is too large at local area brought by data fusion based on virtual node algorithm (VNB-DF), this paper designed a classification error (EG) the virtual node data fusion algorithm. The algorithm accorded to the target accuracy requirement, and set the error level, through the polynomial fitting coefficients to express the distribution state of monitoring data within a range, and then generated virtual node in the memory. Experimental results show that compared with the data obtained with the cluster mean and VNB-DF algorithm, the EG algorithm greatly improves the accuracy of data collection, can show a good performance in types of environment.

Key words: error grade; virtual node; data fusion; wireless sensor networks

0 引言

大规模的无线传感器网络中由于节点布置密集、分布范围较广等特点,相邻节点的监测数据往往具有很高的相关性^[1,2],更容易实现数据的融合。传感器节点间的数据融合问题属于“传感器—传感器”协作层,即当一个事件的传感器节点可以通过相互协作决定信息融合或信号传输由哪些节点参与,以达到节点能耗、信号传输时延等指标的最优,对于分簇型无线传感器网络,“传感器—传感器”协作层涉及的主要问题之一是:如何通过各个簇首节点和簇内成员节点的协作,较好地实现监测数据的融合。

一般而言,分簇型无线传感器网络,数据融合往往采用簇内数据取均值的方法^[3,4],方法简单易行,但融合结果与监测数据出入较大。文献[5]提出了一种基于虚拟节点的数据融合算法(VNB-DF),该算法的簇首节点通过多项式拟合给出簇内节点监测数据的最佳表达,并将拟合系数传输给基站或者其他簇首节点,根据簇首节点的平面坐标和拟合系数,在内存中生成若干虚拟节点,通过这些虚拟节点,基站或其他簇首可以再现此簇内的数据分布状态。相比于传统簇内数据均值法,该算法能更好地复现监测区域内数据分布情况,但由于该算法对

误差的设置比较笼统,缺乏一定的灵活性,极易导致局部区域误差偏大,而其余区域内的数据却能完美复现的不均衡现象。

本文提出的误差分级(EG)融合算法,以 VNB-DF 算法为基础,兼顾传输数据量和平均误差两种指标,提出有效误差概念,设定误差等级,利用有效误差计算出拟合多项式的幂数,从而确定出簇内多项式,使得在多种应用场景下,根据具体的目标环境,算法可灵活改变有效误差值,最大限度地消除 VNB-DF 算法所带来的局部误差过大现象。

1 虚拟节点

EG 融合算法包含三个环节。

1.1 簇内多项式的拟合^[6,7]

设簇内传感器节点 $s_i(x_i, y_i)$ 采集到的数值为 $z_i, i = 1, 2, \dots, N, f(x_i, y_i)$ 为可满足误差要求的某二元多项式,表示为

$$f(x_i, y_i) = X_i A Y_i \quad (1)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

收稿日期: 2011-07-30; 修回日期: 2011-09-01 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2009AA05Z203, 2007AA10Z241); 国家自然科学基金资助项目(2009AA05Z203); 高等学校博士点新教师基金资助项目(20100093120007); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(JUSRP11129)

作者简介: 钱菲菲(1987-), 女, 江苏高邮人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络(feifei0509iii@163.com); 秦宁宁(1980-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络; 何佩(1987-), 男, 安徽砀山人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络; 徐保国(1950-), 男, 江苏淮阴人, 教授, 博导, 主要研究方向为过程控制、现场总线及网络技术。

$$X_i = [1, x_i, x_i^2, \dots, x_i^{m-1}]$$

$$Y_i = [1, y_i, y_i^2, \dots, y_i^{n-1}]^T$$

一般情况下, $N > mn$, 使用所有簇内节点的监测值, 采用最小二乘法, 令

$$G = (g_{jk})_{m \times n} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{m1} & g_{m2} & \dots & g_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $g_{jk} = x_i^{j-1} y_i^{k-1}$; $j = 1, 2, \dots, m$; $k = 1, 2, \dots, n$ 。令

$$q_i = \tilde{G} = [g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1n}, g_{21}, g_{22}, \dots, g_{2n}, \dots, g_{m1}, g_{m2}, \dots, g_{mn}]$$

$$\theta^T = \tilde{A} = [a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n}, \dots, a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mn}]$$

\tilde{G}, \tilde{A} 分别表示矩阵 G 和矩阵 A 按行拉直而成的行向量。理想状态下 $z_i = f(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 可变形为

$$\hat{z}_i = q_i \theta \quad (3)$$

则由此可得

$$Z = Q\theta \quad (4)$$

其中 $Z = [\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_N]^T$, $Q = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T$

则

$$\theta = \arg \min_{\theta} \|Q\theta - Z\|^2 = (Q^T Q)^{-1} Q^T Z \quad (5)$$

由于网络规模较大, 可能会出现一块区域内节点采集到的监测值非常接近真实值, 而令一块区域出现监测数据的误差偏差大现象, 但仍然满足均方误差 $\sum_{i=1}^N (z_i - X_i A Y_i)^2$ 小于给定的误差上限。为了消除这一现象, 本文重新规定有效误差 ξ 。

所谓有效误差, 即因各种原因而产生的不可避免的细小误差 ξ 。对于 ξ 的设定, 本文约定如下: ξ 的取值主要与监测数据的平均误差 ε 以及系统预先设定的最大误差 λ 有关。其中, $\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{z}_i - X_i A Y_i|$, λ 的取值参照文献[5], 显然存在 $\max_{1 \leq i \leq N} |\hat{z}_i - X_i A Y_i| < \lambda$ 。

将 λ 平均分成 k 等分 $(0, \frac{1}{k}\lambda], (\frac{1}{k}\lambda, \frac{2}{k}\lambda], \dots, (\frac{k-1}{k}\lambda, \lambda]$, 当平均误差为

$$\varepsilon \in (\frac{i-1}{k}\lambda, \frac{i}{k}\lambda] \quad i = 1, 2, \dots, k$$

则有效误差定义为

$$\xi = \frac{i}{k} \ln(\lambda + 1) \quad (6)$$

令 $e_i = |\hat{z}_i - X_i A Y_i|$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。对于所有可能的 (m, n) 的取值, 若 $e_i > \xi$, $i = 1, 2, \dots, N$, 表示节点值的误差大于有效误差, 并记录此节点及其监测值, 令 $h_{m,n} = \sum_{i=1}^l |\hat{z}_i - X_i A Y_i|$, l 表示节点值大于有效误差的个数, 设 $\min h_{m,n} = h_{m_1, n_1}$, 则 (m_1, n_1) 即为所求的多项式系数的幂数。

1.2 虚拟节点的存在范围

簇首收集所有成员节点的值, 利用有效误差, 确定出拟合多项式的幂数 (m_1, n_1) , 从而确定出簇内多项式。由于簇首节点所控制的范围小于它的信号半径, 因此对于两个相邻的簇首节点, 它们的通信范围必有所重叠。

设簇首 O_1 的坐标为 (x_1, y_1) , 信号半径为 R_1 , 簇首 O_1 通信半径的范围可表示为

$$\{S_{O_1} | \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \leq R_1, \forall (x, y) \in S_{O_1}\} \quad (7)$$

存在与簇首 O_1 相邻的簇 O_2 , 其簇首 O_2 的坐标为 $(x_2,$

$y_2)$, 信号半径为 R_2 , 对于属于簇首 O_1 的通信范围, 但不属于簇首 O_1 控制范围, 落入邻居簇 O_2 的区域可表示为

若簇首 O_1 位于簇首 O_2 的上方, 即 $y_1 > y_2$,

$$\{\tilde{S}_{O_2} | (x, y) \in S_{O_1} \wedge y \leq -\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \left[x - \left(x_1 + \frac{R_1 x_2}{R_1 + R_2} \right) + \left(y_1 + \frac{R_1 y_2}{R_1 + R_2} \right), \forall (x, y) \in \tilde{S}_{O_2} \right] \quad (8)$$

若簇首 O_1 位于簇首 O_2 的下方, 即 $y_1 < y_2$, 则

$$\{\tilde{S}_{O_2} | (x, y) \in S_{O_1} \wedge y \geq -\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \left[x - \left(x_1 + \frac{R_1 x_2}{R_1 + R_2} \right) + \left(y_1 + \frac{R_1 y_2}{R_1 + R_2} \right), \forall (x, y) \in \tilde{S}_{O_2} \right] \quad (9)$$

若簇首 O_1 位于簇首 O_2 的左方, 即 $y_1 = y_2, x_1 \leq x_2$, 则

$$\{\tilde{S}_{O_2} | (x, y) \in S_{O_1} \wedge x \geq -\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left[y - \left(y_1 + \frac{R_1 y_2}{R_1 + R_2} \right) + \left(x_1 + \frac{R_1 x_2}{R_1 + R_2} \right), \forall (x, y) \in \tilde{S}_{O_2} \right] \quad (10)$$

若簇首 O_1 位于簇首 O_2 的右方, 即 $y_1 = y_2, x_1 \geq x_2$, 则

$$\{\tilde{S}_{O_2} | (x, y) \in S_{O_1} \wedge x \leq -\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left[y - \left(y_1 + \frac{R_1 y_2}{R_1 + R_2} \right) + \left(x_1 + \frac{R_1 x_2}{R_1 + R_2} \right), \forall (x, y) \in \tilde{S}_{O_2} \right] \quad (11)$$

如果簇首 O_1 有 M 个相邻簇首, 不失一般性设其分别为 O_2, O_3, \dots, O_{M+1} , 则属于簇首 O_1 的通信范围, 而不属于簇首 O_1 控制范围的区域为: $\tilde{S} = \bigcup_{i=2,3,\dots,M+1} \tilde{S}_{O_i}$, 对于簇首 O_1 , 生成虚拟节点的区域可表示为

$$S_1 = S_{O_1} - \tilde{S} \quad (12)$$

1.3 网络监测数据状态的复现

由于各簇的拟合范围仅限于簇内节点, 采用生成虚拟节点的方法来表示整个网络的数据分布状态, 可能在相邻簇的边界区域会出现数据的跳变现象, 可以采用移动曲面拟合法^[8]。如图 1 所示, 假设待求监测点 $P(x, y)$, 移动拟合半径为 R , 则以 $P(x, y)$ 为原点、半径为 R 范围内的 N' (显然 $N' < N$) 个虚拟节点为移动拟合的参与节点, 设这些虚拟节点的坐标和值分别为 $s'_i(x_i, y_i)$ 和 $Z_i = f(x_i, y_i)$ 。

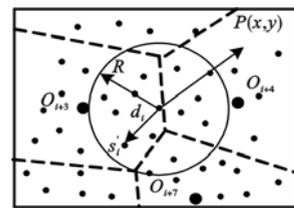


图1 移动拟合原理

设 $d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$, $i = 1, 2, \dots, N'$ 。利用式(1), 存在移动拟合多项式 $f'(x) = XAY$, 用影响因子矩阵 P 来反映 N' 个虚拟节点与待求点的相关程度 $P = \text{diag}(1/d_i^2)$, $i = 1, 2, \dots, N'$ 。由最小二乘原理^[9]可知, 待求点 $P(x, y)$ 的拟合系数为

$$\theta' = (Q^T P Q)^{-1} Q^T P Z' \quad (13)$$

可见, 采用移动拟合算法可以估算出各监测点的值, 了解整个监测区域的数据分布状态。

2 EG 数据融合

通过对虚拟节点的生成和误差等级的分析, EG 数据融合

算法可描述如下:

- a) 利用 LSC 算法^[10,11]将 N 个传感器节点分簇,共得到 $\text{Num} - T$ 个簇,其簇首 $O = O_1, O_2, \dots, O_{\text{Num} - T}$,如图 2(a)所示。
- b) 对任意处于事件区域的簇,簇首节点先查询其下级簇首节点。
- c) 若下级簇首的控制范围包含事件区域,跳入步骤 b)。
- d) 下级簇首的控制范围未包含事件区域,则利用本文算法融合本簇内数据,得到拟合结果,并将拟合系数传输给上级簇首节点。
- e) 若上级簇首已不包含事件区域,则直接拟合系数转发给它的上级簇首。
- f) 上级簇首包含事件区域,则上级簇首得到拟合结果后,先生成虚拟节点,并与本簇内节点的数据合并,再进行拟合,并将结果传输给上级簇首。
- g) 若数据已到达基站,即完成这次事件的汇报,否则返回步骤 e)。
- h) 实现了无线传感器网络的 EG 数据融合,退出算法。如图 2(b)所示。

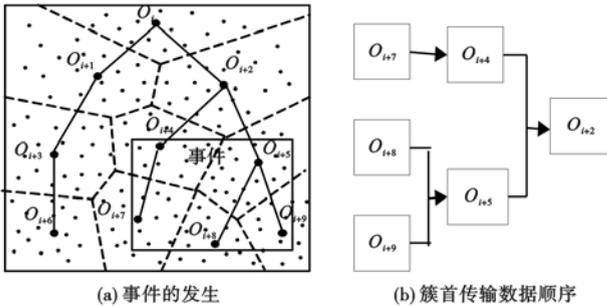


图2 EG数据融合步骤

3 仿真分析

仿真工具选用 MATLAB7.0,在一块 1000 m × 1000 m 的矩形区域内随机布撒 2 000 个温度传感器节点,利用 LSC 算法将节点组织成簇。

假设监测区域内的监测温度真实值为一个具有两个极值点的高斯曲面,即

$$f(x, y) = 10 + 3 \left[1 - \frac{x-500}{180} \right]^2 e^{-\left(\frac{x-500}{180}\right)^4 - \left(\frac{y-500}{180} + 1\right)^4} + 8 \left[\left(\frac{x-500}{180}\right)^4 + \left(\frac{y-500}{180}\right)^4 \right] e^{-\left(\frac{x-500}{180}\right)^2 - \left(\frac{y-500}{180}\right)^2} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (14)$$

本文从传输数据量和精度两方面对本文提出的算法进行评估和分析,簇首比例 p 以 0.01 的步长从 0.01 变化到 0.1,以测试簇的大小对计算结果的影响,仿真均运行 20 次,以降低簇随机性对仿真结果的影响。

3.1 温度分布

本场景中,设定 $p = 0.03, \alpha = 0.95$ 时,仿真的运行结果如图 3(a)所示,图 3(b)(c)分别是由 EG 数据融合算法和 VNB-DF 算法生成的温度分布,图中等高线上的数字代表温度值。三图对比可见:EG 数据融合算法能比较完美地复现监测区域的数据分布状态,所得到的曲线基本平滑;由 VNB-DF 算法生成的温度分布,大部分区域曲线相对平滑,但在坐标 (300, 800) 附近出现较大的数据偏差,图中表现为曲线的凹凸。其原因在于:EG 数据融合算法采用有效误差 ξ 概念,对误差进行等级划分,使得在满足平均误差最小的基础上最大限度地均衡各点误差。因此,EG 数据融合算法能在一定程度上消除 VNB-

DF 算法带来的局部误差过大的不均衡现象,使得拟合后的曲线图更加平滑,更能准确地反映监测区域内的数据分布状态。

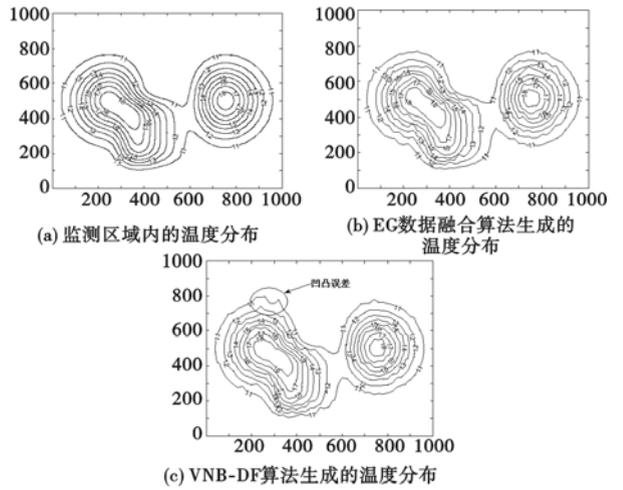


图3 原始数据分布和实际效果的比较

3.2 簇首比例对传输数据量的影响

簇首比例 p 的变化影响着拟合系数的个数,而拟合系数的个数直接代表算法执行过程中的数据传输量,实验将比较在同一背景下两种算法的传输数据量。仿真参数 $N = 2000, \alpha = 0.95$,簇首比例 p 以 0.01 的步长从 0.01 变化到 0.1,实验重复进行 20 次。由图 4 可见,按 EG 融合算法和 VNB-DF 算法所得系数的个数是一条向上弯曲的曲线,并且 EG 融合算法所得的曲线位于 VNB-DF 的下方。当簇首比例 p 较小,簇的控制范围较大,簇内传感器节点个数较多,且各传感器节点监测值差距较大,为了保证精度要求,需增加拟合多项式的次数,于是,当簇首比例 p 增加时,可用较小次数的多项式拟合。EG 数据融合算法拟合系数的个数要小于 VNB-DF 算法,可见在传输数据量上优于 VNB-DF 算法,相对于 VNB-DF 算法,EG 数据融合算法降低了网络通信开销,节省了能量,延长了网络的生存周期。

3.3 算法的误差分析

本实验考察簇首比例 p 的大小对融合误差的影响。仿真时,设定误差函数 error 为

$$\text{error} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N [f(x_i, y_i) - \hat{z}_i]^2} \quad (15)$$

本次实验中, $N = 2000, \alpha = 0.95$,簇首比例 p 以 0.01 的步长从 0.01 逐步升高至 0.1,仿真结果如图 5 所示。随着簇首比例 p 的增大,簇内数据取均值是条大幅下滑的曲线,而 VNB-DF 和 EG 算法的平均误差是一致的(为避免混淆,VNB-DF 曲线就不给出),都是随着簇首比例 p 的变化只出现了小幅变化,并且误差始终小于簇内数据均值法。可见本文算法在保证数据采集精度的前提下,自动调节拟合系数的数量,因此误差可以始终控制在一定范围内。而簇内均值法在簇首比例低(簇的范围较大)的情况下,所得结果的误差非常大。

4 结束语

本文针对无线传感器网络规模大的特点,提出了 EG 数据融合算法,该算法通过各个簇首节点和簇内成员节点的协作,高效率地实现监测数据的融合,不仅大大提高了数据采集精度,而且能够有效地消除基于虚拟节点的数据融合算法所带来的局部误差偏差现象,在环境监测应用方面能够表现出良好的性能^[12]。

时隙发送数据的链路过多,从而使网络中的干扰量增大,同样使网络中的吞吐量下降。因此,在实际的协议设计过程中,根据具体的网络规模需要合理地设计数据帧时隙数的取值。

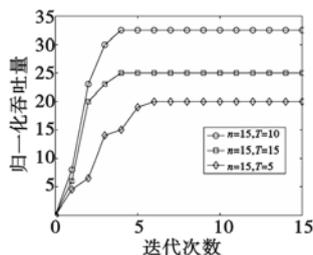


图3 数据帧时隙数对吞吐量的影响

6 结束语

本文考虑链路速率随着 SINR 动态变化的场景,在物理干扰模型下提出了基于位势博弈的传输调度方法。通过设计合理的位势函数、每个参与者的支付函数以及相应对策,构造了传输调度问题的位势博弈模型。在这个博弈中,每个参与者通过最小化自己的支付,使全局函数达到最优,即全网的干扰量达到最小,从而提高网络的吞吐量。仿真结果表明,此传输调度算法与最优算法的性能较为接近,并且有较快的收敛速度,具有较好的性能。

参考文献:

[1] 郑少仁,王海涛,赵志峰,等. Ad hoc 网络技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2005.

[2] MURTHY C, MANOJ B. Ad hoc wireless networks: architectures and protocols [M]. Upper Saddle River:Prentice Hall PTR, 2004.

[3] KUMAR S, RAGHAVAN V, DENG J. Medium access control protocols for Ad hoc wireless networks; a survey[J]. *Ad hoc Networks*, 2006, 4(3):326-358.

[4] TOH C. Ad hoc wireless networks: protocols and systems[M]. Upper Saddle River:Prentice Hall PTR, 2001.

[5] AKYILDIZ I, MCNAIR J, MARTORELL L, et al. Medium access control protocols for multimedia traffic in wireless networks [J]. *IEEE Trans on Network*, 1999, 13(4):39-47.

[6] BLOUGH D, RESTA G, SANTI P. Approximation algorithms for wireless link scheduling with SINR-based interference [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2010, 18(6):1701-1712.

[7] KARNIK A, IYER A, ROSENBERG C. Throughput-optimal configuration of fixed wireless networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2008, 16(5):1161-1174.

[8] AKYILDIZ I, WANG X, WANG W. Wireless mesh networks: a survey [J]. *Computer networks*, 2005, 47(4):445-487.

[9] GUPTA P, KUMAR P. The capacity of wireless networks [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2000, 46(2):388-404.

[10] KUMAR V, MARATHE M, PARTHASATHY S, et al. End-to-end packet-scheduling in wireless Ad hoc networks [C]// Proc of the 5th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. New York: ACM Press, 2004:1021-1030.

[11] MOSCIBRODA T, WATTENHOFER T. Coloring unstructured radio networks [C]//Proc of the 7th Annual ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures. New York: ACM Press, 2005:39-48.

[12] MAHESHWARI R, JAIN S, DAS S. A measurement study of interference modeling and scheduling in low-power wireless networks [C]//Proc of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems. New York:ACM Press, 2008:141-154.

[13] MONDERER D, SHAPLEY L. Potential games [J]. *Games and Economic Behavior*, 1996, 14(1):124-143.

[14] CHRISTODOULOU G, MIRROKNI V, SIDIROPOULOS A. Convergence and approximation in potential games [C]//Proc of the 23rd International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science. [S.l.]:Springer Press, 2006:349-360.

[15] MORRIS S, UI T. Best response equivalence [J]. *Games and Economic Behavior*, 2004, 49(2):260-287.

(上接第 1010 页)

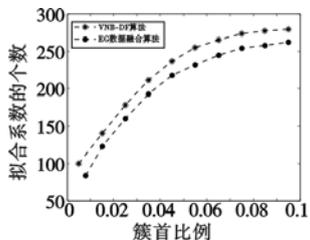


图4 拟合系数个数与簇首比例的关系

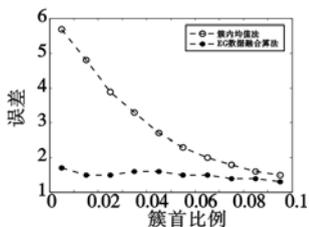


图5 误差与簇首比例的关系

参考文献:

[1] 马琦,张记龙,王志斌. 无线传感器网络簇内自适应融合算法研究 [J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(7):2502-2503, 2507.

[2] LING Qing, FU Yin-fei, TIAN Zhi. Localized sensor management for multi-target tracking in wireless sensor networks [J]. *Information Fusion*, 2011, 12(3):194-201.

[3] COLLETT M A, SALTER M J, ADAMSON D B. Data fusion for wireless sensor networks; an assisted living case-study [J]. *IET Digest*, 2009(12725):1-2.

[4] NAKAMURA E F, LOUREIRO A A F, FRERY A C. Information fusion for wireless sensor networks; methods, models, and classifications

[J]. *ACM Computing Surveys*, 2007, 39(3):1-55.

[5] 郭建全. 大规模无线传感器/执行器网络数据收集研究 [D]. 北京:清华大学, 2010.

[6] GUO Le-jiang, WANG Bing-wen, WANG Wei, et al. Energy function analysis and optimized computation based on hopfield neural network for wireless sensor network [J]. *Information Technology Journal*, 2011, 10(6):1208-1214.

[7] LI Feng-rong, ZHANG Bao-xian, ZHENG Jun. Geographic hole-by-passing forwarding protocol for wireless sensor networks [J]. *IET Commun*, 2011, 5(6):737-744.

[8] 曾清红, 卢德唐. 基于移动拟合最小二乘法的曲线曲面拟合 [J]. *工程图学学报*, 2004, 1(3):84-87.

[9] XU Jian, LI Jian-xun, XU Sheng. Analysis of quantization noise and state estimation with quantized measurements [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 9(1):66-75.

[10] 徐文君. 无线传感器网络跨层协议研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.

[11] 崔艳荣, 曹加恒, 何宁, 等. 无线传感器网络中数据查询处理算法研究 [J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(5):1511-1512.

[12] LI Xiao-fang, XU Li-zhong, WANG Hui-bin, et al. A differential evolution-based routing algorithm for environmental monitoring wireless sensor networks [J]. *Sensors*, 2010, 10(6):5425-5442.