

基于势场模拟的温度传感器优化布置研究

汪小龙^{1,2}, 何正亚¹, 方潜生¹, 葛运建², 汪增福²

(1. 安徽建筑工业学院安徽省智能建筑重点实验室, 合肥 230022;

2. 中国科学院合肥智能机械研究所传感技术联合国家重点实验室, 合肥 230031)

摘要:以信息连续分布的智能空间内传感器优化布置为研究目标,以温度信息为例对智能空间进行势场模拟,在等势线上选取曲率较大、密集的点作为兴趣点(POI),提取 POI 初集;提出了一种基于质量阈值聚类的自适应二分法(简称 QT 算法)对兴 POI 初集进行优化;通过仿真和实测实验验证,在减少传感器数目的同时能够合理的规划区域中各被监测点,使得各传感器节点的效能得到很好的利用;所提出的方法同样适合智能空间中其它连续的信息场,如湿度、风速、电磁污染和 VOCs 等。

关键词:智能空间;势场模拟;兴趣点;传感器优化布置

Optimal temperature sensor placement based on potential simulation

Wang Xiaolong^{1,2}, He Zhengya¹, Fang Qiansheng¹, Ge Yunjian², Wang Zengfu²

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Intelligent - Building, Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China;

2. United National Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Intelligent - Machine, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: This paper addressed the sensor - optimization of continuously - distributed - information for smart space. Potential for temperature information was simulated, and POIs were selected in equipotential lines of large curvature or high density, thus the primary POI - Set was formed; A novel Quality - Threshold - Clustering - Recursive - Bisection algorithm (QT) was proposed for the Optimization of POI - Set; Simulations and experiments show that minimum sensors may give reasonable results for sensor utilization and information acquisition; Method proposed may similarly be used for other information fields, including humidity, wind field, electromagnetic pollution, VOCs and etc.

Keywords: Smart Space, Potential Simulation, POI, Optimal Sensor Placement

1 引言

传感器优化布置^[1-10]越来越成为国内外传感器及其应用领域研究热点,其总体研究目标是以更少的传感器数目,获取足够准确的目标信息。在结构健康监测中^[4-6],各种环境激励下监测对象本身的应力分布模型和动力学模型构建的准确性,决定了传感器布置的优化方向;在目标检测应用中^[1-3,8],目标检测概率和误警率是优化的主要约束指标;而在无线传感器网络性能研究中^[9],功耗则是传感器优化布置的重要目标。就应用领域^[1-7]来说,基于先验知识或(和)检测信息的目标模型是传感器优化布置的关键;对新

兴的智能空间^[10]应用来说,环境本身即是检测对象,其复杂度难以满足建立较准确的数学模型的要求,因此,本文尝试从势场^[11]模拟的角度研究智能空间传感器布置的优化问题。

2 问题描述及理论依据

选取某实验室内一个办公室作为实验对象,其几何模型图如图 1 所示。其中,房间有窗户一个,在 $x = 2.87\text{m}$ 处有一块透明的玻璃隔板,房间内人员数量为两名,电脑两台,照明灯 6 盏,房间空调送风方式为上送下回,送风温度为 18 度,室外环境温度为 36℃。

收稿日期:2011-11-30

基金项目:国家自然科学基金(61073161、60875026、重大国际合作 60910005)项目资助。

作者简介:汪小龙(1972-),男,博士(后)副教授,主要研究方向为无线传感网络、智能建筑。

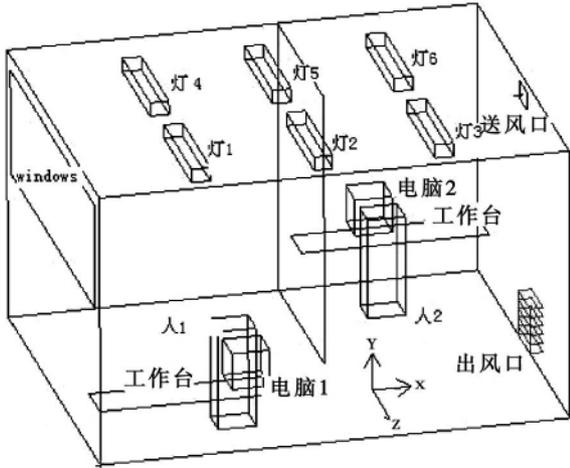


图 1 办公室几何模型图

Fig. 1 Geometry model of office

令智能空间为 Ω , 显然 Ω 是欧式空间 R^n 的开子空间。令 x 是 Ω 中的任意一点, x 点的温度值为 $u(x)$, 简称为温度信息 u ; $d\mu$ 为智能空间 Ω 上紧支博雷尔测度, $B(x; r)$ 是中心 x 半径 r 的开球; 为了从势场模拟的角度研究智能空间传感器布置的优化问题, 必须证明以下命题:

命题: 空间温度信息可以使用势场函数描述。

证明:

首先, 存在:

温度信息 u 在智能空间 Ω 中连续; (1)

其次, 任意空间其温度均值存在, 即 u 空间均值可测, 满足

$$\bar{u}(x) = A_r(x) = \frac{1}{V_n} \int_{B_n} f(x + ry) dm(y) = \frac{1}{V_n r^n} \int_{B(x; r)} f(y) dm(y) \quad (2)$$

对所有 $x \in \Omega$ 且 $r < d(x, \partial\Omega)$ 有效。

由 (1) 式、(2) 式可知:

温度信息 u 是智能空间 Ω 的调和函数。(3)

由 (2) 式可知: $U_h^{d\mu}(x) = \int_{R^n} h(x - y) d\mu(x)$,

$$x \in R^n \setminus \text{supp}(d\mu), \quad (4)$$

对所有 $x \in \Omega$, 且 $r < d(x, \partial\Omega)$ 有效。

由 (3) 式、(4) 式可知: $d\mu$ 满足 h -势场定义。

$$(5)$$

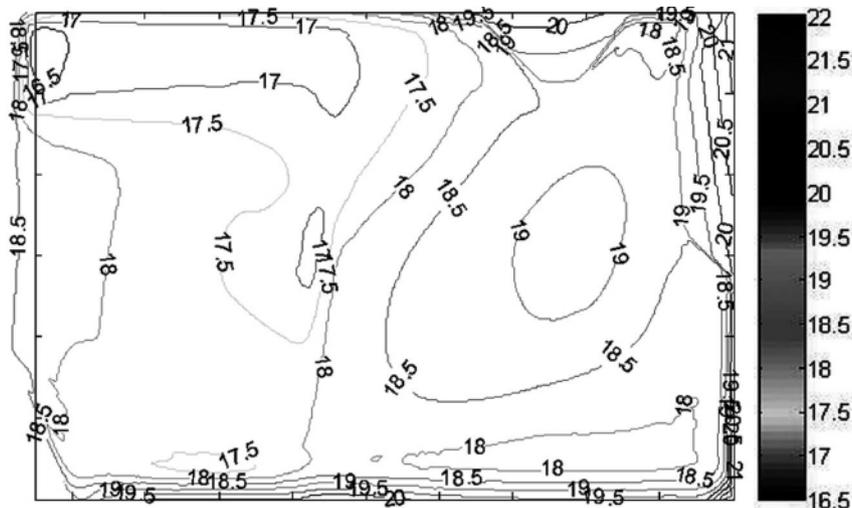
在时空温度场中 $h = 4 > 2$ (6)

由 (5) 式、(6) 式可知: 空间温度信息可以使用牛顿势场函数描述。证毕

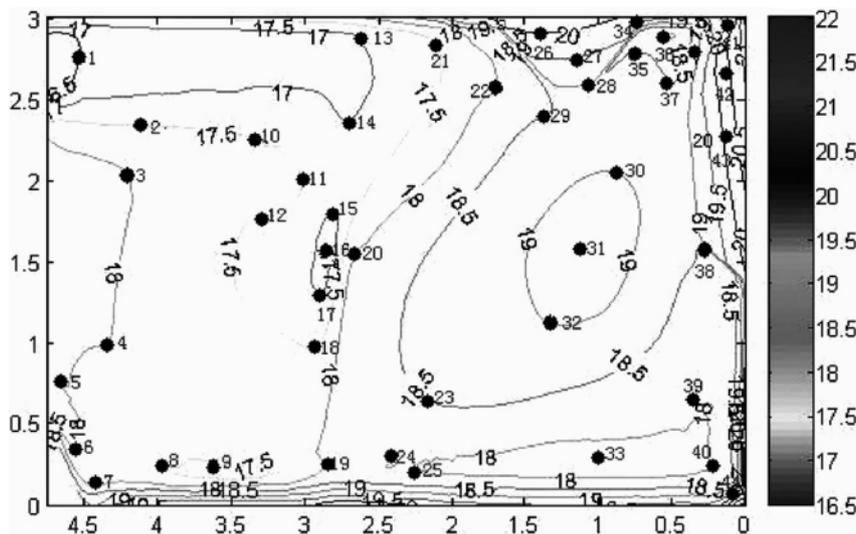
3 基于势场模拟的 POI 初集提取

以 AIRPAK2.1 软件模拟温度势场, 采用室内零方程紊流模型来模拟分析室内各流场特征。为了简化问题, 作如下的假设: 房间内空气假设为不可压缩且符合 Boussinesq 假设; 即流体中的粘性耗散可以忽略不计; 同时除密度外其它物理特性 (如 c_p) 均为常数; 对密度的考虑仅动量方程中与体积力的有关项, 其余各项密度均作为常数; 外部大空间的温度设定为 38°C , 那么边界条件就可以简化处理, 房间的地板、顶棚和四面墙的传热系数用热箱法测得, 房间内空气设为辐射透明介质。

采用多视角面测量和关键位置点测量的思路, 通过时空间插补和低精度后验修正的方法, 可以实现大尺度时空间粒度连续化, 从而能够准确



(a) 温度梯度场



(b) POI 分布

图 2 z = 1.85m 截面温度梯度场与 POI 分布图

Fig.2 Temperature gradient field (a) and POI Distribution; (b) for z = 1.85m

的获取空间内的温度分布情况 图 2 为 z = 1.85m 截面。

智能空间内各位置点的温度梯度场分布如图 2(a) 所示。以温度信息等势线上选取曲率较大、密集的点作为兴趣点(POI),提取 POI 初集,如图 2(b) 所示。

4 传感器优化布置

优化布置需要考虑两个问题,即确保覆盖和消除冗余。关于覆盖的内容不是本文的研究重点,此处仅考虑简单的 0-1 覆盖。当 POI 之间存在冗余时,保留势场梯度较大的点能够更加准确地反应智能空间的信息代表性和变化趋势。传感器优化分配问题的核心是,通过二分法快速获得欧式距离较近的 POI 子群,通过基于势场梯度的阈值聚类获得各 POI 子群最优 POI,在最优 POI 集合达到全覆盖之前算法进行多次迭代。鉴于调和函数的优良可积和平滑性,通常迭代次数不会超过 10 次。

基于阈值聚类的自适应二分法描述如下:

输入: $\Omega^0 = \Omega$, POI_Set = φ

- 1 依据智能空间 Ω^0 势场获得 POI0
- 2 $M = \text{Cardinality}(\text{POI0})$
- 3 for $i = 1$ to M
- 4 计算第 i 个 POI 的势场梯度 $\text{Grad}(i)$;

```

5   ( N , POIsub [ ] ) = Bisect( POI0)
//二分法获得欧式距离较近的 POI 子群
6   for i = 1 to N
7     POItemp = ThresholdClustering( POIsub
[i ] , Grad [ ] );
//基于势场梯度的 POI 子群阈值聚类
8     POI_Set = POI_Set + POItemp;
//聚类结果加入终集
9      $\Omega^x = \Omega^0 - \text{Coverage}(\text{POI\_Set})$ ;
//计算未覆盖区域
10    If  $\Omega^x \neq \varphi$ 
//迭代直至全覆盖
11      $\Omega^0 = \Omega^x$  Goto 1;
12    Endif
输出: POI_Set

```

5 实验验证

本文工作主要分为两个部分,即势场模拟和算法优化。

(1) 势场模拟实测验证

采用挪威 SENSIRION 公司生产的数字温度、湿度一体的传感器芯片 sht11(温度分辨率为 0.5℃,湿度精度为 3% RH) 进行实地监测。在 $Y = 0.6\text{m}$ 、 $Y = 1.6\text{m}$ 和 $Y = 2.6\text{m}$ 的横切面上各取 16 个监测点,分别对应于 X 方向等距离 4 个监测

点 Z 方向等距离 4 个监测点。各个监测点的仿真结果以及实测值之间的比较如表 1 所示,根据表 1 数据得出的各截面上监测点的仿真结果和监测值之间的对比如表 2 所示。

表 1 部分监测点的温度监测值与仿真值比较

Tab. 1 Comprison of tested values with simulated ones

仿真值	测量值	误差(%)
19.1	18.8	1.1
18.8	19.5	3.2
18.9	18.6	1.8
17.3	17.8	3.1
19.0	18.6	2.0
17.7	17.9	1.5
19.4	19.3	0.3
18.6	18.5	0.7
19.0	19.2	0.7
18.8	19.3	3.0
19.8	20.2	1.6
19.2	19.1	0.4
18.5	20.4	9.5
17.5	18.9	7.2
20.0	20.8	3.8
19.9	20.0	0.3
19.5	18.8	3.7
20.3	19.7	3.1
20.3	19.7	2.8
19.1	18.4	3.6
21.0	20.4	2.8
19.2	18.6	3.3
20.9	20.2	3.4
20.0	19.0	5.7

比较和分析现场测试和模拟理论结果可以看出,在误差允许范围内。

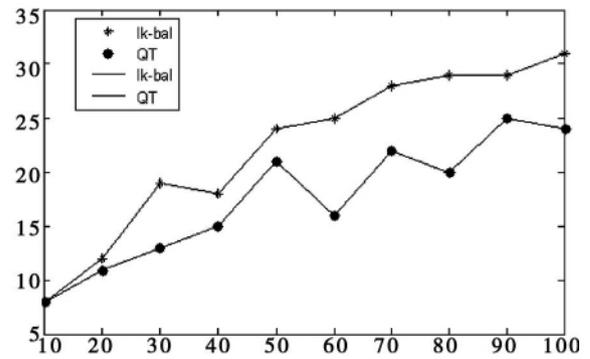
(2) 算法验证

本文算法对文献 [12] 的算法进行了改进,这里针对原算法和改进的算法进行对比分析,采用 matlabR2007b 来仿实现该方案。设定 POI 为随机产生,被检测区域范围 65×40 ,传感器的检测

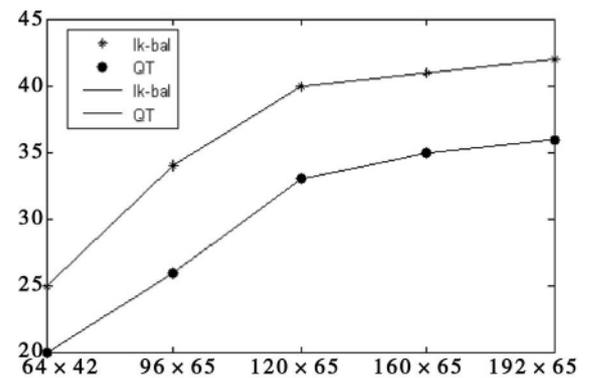
半径设定为 10,POI 数目设定为 70。

(a) 对于相同检测区域,POI 数目的变化对算法的影响很大,我们选取 POI 的数目从 10,20,30,……,100 递增,对比分析的仿真结果如图 3 (a) 所示,横坐标为 POI 数目,纵坐标为传感器数量。lk-bal 为最长矩形边二分法,QT 为本文采用的最少传感器优化布置策略。

(b) 对于相同数目的 POI,我们选取不同的检测区域范围来进行对比分析,这里选择智能空间典型单元结构尺寸: 64×42 , 96×65 , 120×65 , 160×65 , 192×65 。对比分析的仿真结果如图 3 (b) 所示,横坐标为建筑单元结构尺寸,纵坐标为传感器数量。lk-bal 为最长矩形边二分法,QT 为本文采用的最少传感器优化布置策略。



(a) 相同检测范围



(b) 相同 POI 数目

图 3 lk-bal 与 QT 算法对比分析

Fig. 3 Comparative analysis of algorithms lk-bal & QT

从图 3 我们可以看出,改进的最少传感器布置策略在相同的检测范围和相同的 POI 数目的情况下,在控制传感器检测节点的数量上都优于原算法。同时,由于采用聚类分析法对 POI 进行有效的聚类,所以能够平衡各检测点传感器的工作强度,能够使其有效的发挥效能。

6 结论

本文尝试从势场模拟的角度研究智能空间传感器布置的优化问题,证明了势场模拟的可行性,给出了基于质量阈值聚类的自适应二分法传感器优化布置策略和算法,并通过仿真和实实验证了其合理性。所提出的方法同样适合智能空间中其它连续的信息场,如湿度、风速、电磁污染和 VOCs 等,但对势场仿真的约束条件问题有待进一步研究和验证。

参考文献

- [1] Isaacs J T, Klein D J, Hespanha J P. Optimal sensor placement for time difference of arrival localization [C]. in 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2009, 7878 - 7884.
- [2] Chun Y, Kaplan L, Blasch E, et al. Optimal placement of heterogeneous sensors in target tracking [C]. in 14th In-

ternational Conference on Information Fusion (FUSION), 2011, 1 - 8.

- [3] Moreno - Salinas D, Pascoal A M, Aranda J. Optimal Sensor Placement for Multiple Underwater Target Localization with Acoustic Range Measurements [C]. in 18th IFAC World Congress, 2011, 12825 - 12832.
- [4] 李东升, 张莹, 任亮, 等. 结构健康监测中的传感器布置方法及评价准则 [J]. 力学进展, 2011, 41(1): 39 - 50.
- [5] 魏秀业, 潘宏侠, 黄晋英. 齿轮箱传感器优化布置研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1508 - 1513.
- [6] 李毅谦, 向志海, 周马生, 等. 基于模态的损伤识别过程中的传感器优化布置 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(02): 312 - 315.
- [7] 谢强, 薛松涛, 王远功. 利用线性模型估计的传感器优化布置算法 [J]. 固体力学学报, 2006, 27(1): 46 - 50.
- [8] 袁朝晖, 王高峰. 基于数据融合确保目标检测精度的传感器节点布置 [J]. 计算机科学, 2009, 36(9): 51 - 54, 134.

(上接 64 页)

糊 PID 温度控制超调量很小只有 8%, 稳定时间非常短, 稳态误差只有 0.3℃。

6 结论

对于温度控制, 与传统 PID 控制相比, 模糊 PID 控制非常适合于非线性控制, 且可以在线自整定 PID 参数, 并可以迅速消除系统误差, 保证了系统具有良好的动静态特性, 能达到较理想的控制效果; BP 网络 PID 控制具有较强的适应性和鲁棒性, 与改进前的 PID 算法相比, 响应过程平稳, 超调减小, 响应时间也较快, 性能良好。

参考文献

- [1] 廖理. 热学计量 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002, 343 - 351.
- [2] 张国良, 曾静. 模糊控制及其 Matlab 应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [3] 咎鹏, 颜国正, 于莲芝. 基于自适应模糊 PID 控制的气动微型机器人系统 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(9): 1543 - 1546.
- [4] 吴正顺, 姚建军, 岳东海. 模糊自整定 PID 控制器的设计及其应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11): 1578 - 1580.
- [5] 周黎英, 赵国树. 模糊 PID 控制算法在恒速升温系统中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2): 405 - 409.
- [6] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.