

文章编号:1001-9081(2014)09-2747-05

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.09.2747

基于信息融合的多 Agent 智能家居系统

王良周^{*}, 于卫红, 黄广超

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

(*通信作者电子邮箱 qjyzw@126.com)

摘要:绿色智能的家居控制需要复杂的系统和多源的信息。为了进一步提高家居系统的协同性,充分利用多源的决策信息,设计了一种基于多源信息融合的多 Agent 智能家居系统。研究了系统的框架和各个 Agent 的功能和交互机制;提出了一个基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS)的多源信息融合模型,使用 ANFIS 算法对家居环境进行特征提取和用户行为学习;利用 Android 的轻量级嵌入式 Jade Agent 平台和 Matlab 对模型进行仿真。理论分析和仿真实验表明,该模型能够提高家居系统的协同交互性,提高家居系统多源数据融合的有效性。

关键词:智能家居;多 Agent 系统;多源信息融合;自适应神经模糊推理系统;采光控制

中图分类号: TP273 文献标志码:A

Multi-Agent system with information fusion for smart home

WANG Liangzhou^{*}, YU Weihong, HUANG Guangchao

(College of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: A smart and green home is a dynamic large-scale system with high complexity and a huge amount of information. In order to further improve coordination between subsystems and make the best of multi-source information for the smart home, a multi-Agent intelligent home system based on multi-source information fusion was designed. The framework and interaction mechanisms of Agent were introduced and a multi-source information fusion model based on Adaptive Neural-network-based Fuzzy Interference System (ANFIS) was put forward to conduct the feature extraction and learn occupant's personal behavior. A simulation platform using lightweight embedded Jade Agent on Android and Matlab on personal computer was developed to control the natural lighting system in smart home. The theoretical analysis and the simulation results show that the model can improve synergistic interaction of home systems, and finally enhance the efficiency of multi-source information fusion in decision making process.

Key words: smart home; multi-Agent system; multi-source information fusion; Adaptive Neural-network-based Fuzzy Interference System (ANFIS); daylight control

0 引言

物联网时代的智能家居,应该以用户为中心,协调智能家居的各个子系统,通过对多模态信息的整合,提高系统协同性和交互性,实现用户舒适度最大化、能源消耗最小化,控制方式多样化。基于多源数据融合的多 Agent 系统(Multi-Agent System, MAS)为智能家居的分布式智能控制提供了有效的工具。MAS 由分布在不同的主机或者平台上的多个智能 Agent 组成,具有个体行为独立自制、个体信息不完全、能力有限、无全局控制、数据分散化和计算异步等特点。基于多源信息融合的 MAS 就是将 MAS 作为智能家居系统交互信息的中间媒介,利用多源信息的融合模型,构造一套具有智能性的家居系统。

MAS 和多源信息融合在智能家居中的运用是物联网研究领域的热点。文献[1]提出了一套 MAS 智能家居系统,用于家居环境的能源管理;文献[2]具体描述了 MAS 在家居系

统的布设方法和原理,设计了一套量测室内舒适度和能源的数据融合模型;文献[3]对智能家居控制系统中的智能化方法和技术作了综述;文献[4]提出一个多传感器融合的家居占用检测模型;文献[5-6]利用模糊推理系统对家居环境进行智能控制;文献[7]实现了 MAS 家居照明系统的控制。这些研究从不同角度研究了智能家居实现的关键因素,但以上文献要么侧重于 MAS 技术的实现,要么侧重于多源信息的融合,将二者结合起来的研究较少。

本文结合当前的研究及国内外 MAS 在智能家居中的应用理念,设计了一套基于多源信息融合的 MAS 智能家居系统。该系统信息融合和决策过程借鉴了多源信息融合中经典 Omnibus 模型的基本原理;使用 MAS 作为实现信息融合和智能控制的系统框架;在信息融合的实现中采用了自适应神经模糊推理系统(Adaptive Neural-network-based Fuzzy Interference System, ANFIS)算法提取环境模式和学习用户行为。这些方法的使用,使系统的决策过程具有了统一性、自适

收稿日期:2014-04-04;修回日期:2014-05-20。

作者简介:王良周(1989-),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要研究方向:多 Agent 系统、信息融合、智能家居; 于卫红(1972-),女,辽宁大连人,副教授,博士,主要研究方向:多 Agent 系统、Android 开发、无线传感器网络; 黄广超(1993-),男,江苏南京人,主要研究方向:面向对象设计模式、电子商务。

应性和反馈性。

1 智能家居 MAS 网络层次架构

智能家居系统中,影响人的舒服度的因素主要有气候舒服度因素(包括温度、湿度、空气质量、制热、通风等),视听舒服度因素(主要指光照水平、辐射水平、光污染与噪声污染水平),安保舒适度因素(安保门禁、火灾警报、有毒气体检测等),体验舒服度因素(设备控制智能化、需求实现的多样化)等。本文设计考虑了以上这些舒服度因素,并希望尽量节约能源。图 1 是基于 MAS 智能家居系统的网络层次架构。

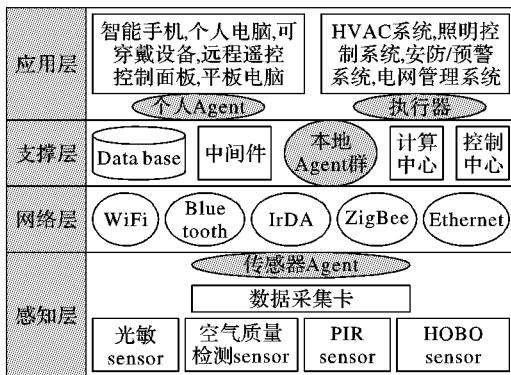


图 1 智能家居 MAS 网络层次架构

在图 1 中,智能家居 MAS 可以抽象为四个层次的网络模型,从底层到顶层依次是:感知层、网络层、支撑层和应用层。

1) 感知层。感知层位于系统的底层,由多种无线智能传感器和数据采集卡组成。智能传感器具有感知环境的能力,并且可以直接将电信号转化为计算机可以处理的数字信号,通过无线网络将数字信号发送给局部节点的传感器 Agent。智能家居系统需要通过传感器采集的数据主要有三类:一是室内室外的气候数据;二是视听数据;三是安保或占用类数据。感知层就像系统的神经末梢,采集家居环境的各种信息。

2) 网络层。网络层负责其他层组件信息的传输,以无线网络通信技术为主,有线网络为辅。无线传输技术包括无线 WiFi、蓝牙(Blue Tooth)和 ZigBee 等,有线网络主要指局域网、USB 数据线等。传感器子节点与传感器 Agent、智能移动设备与中心控制主机之间的近距离通信以无线网络传输为主;设备执行器、中心控制器、本地 Agent 之间的数据传输则以有线局域网为主。

3) 支撑层。支撑层主要指智能中控主机,它是智能家居其他功能的计算中心、控制中心、中间件部分,由本地 Agent、中心 Agent 和中心服务器、数据库、云平台等组件构成。在智能家居控制系统中,控制中心的控制方式有两种:一种是通过传感器和外界的信息,自动控制各个子系统;另一种是接收人的指令,人为控制子系统,以满足不同使用者的多样需求。支撑层是一个平台级别的层次,它就像人的大脑,有强大的计算和分析能力,甚至是云端计算技术的支持,就像大脑控制各个器官一样控制各个子系统。

4) 应用层。应用层包括操作终端和执行器终端,它们分别是人工决策的发出者和决策的最终执行者。操作终端主要指具有控制界面的移动设备和电脑。操作终端控制设备的方式可以有很多种,既可以通过终端的电子指令,也可以通过具有语音功能的手机语音控制,或者直接通过普通的电源开关

控制。如果设备具有处理自然语言和声音指令的功能,还能通过语音控制设备的状态,实现类似于“芝麻开门”的效果。个人 Agent 部署在操作终端上,作为信息的传递者沟通操作终端和本地 Agent。执行器是决策的直接执行节点,位于需要控制的设备之上,例如各种电器的开关。

基于 MAS 的智能家居架构是一般物联网架构的具体化,具有一般物联网架构的开放性,适合对系统的扩充。另外,因为采用了多 Agent 的交互机制,使系统的协同性得到了提高。

2 智能家居 MAS 设计与交互机制

图 2 展示了智能家居 MAS 的交互机制。智能家居 MAS 包括四类 Agent:个人 Agent、本地 Agent、传感器 Agent 和中心 Agent。它们有各自的功能和特点,同时又协作为系统平台提供服务。

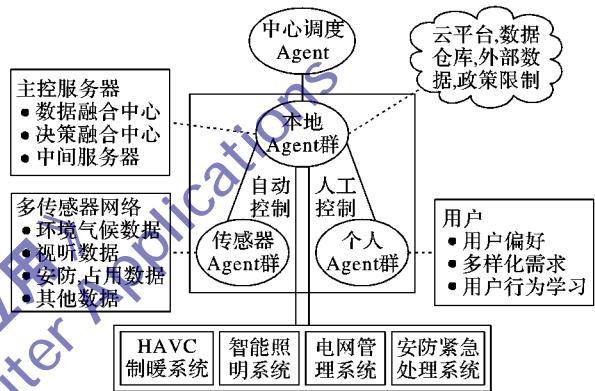


图 2 智能家居 MAS 交互机制

1) 个人 Agent。为了实现以用户为中心的智能控制,必须使用本地 Agent 将环境与用户联系起来。个人 Agent 在智能家居管理系统中扮演了一个助手的角色,它管理用户的信息,发送用户的命令,显示其他 Agent 的反馈信息。个人 Agent 位于系统的控制终端上,如个人电脑、智能手机、可穿戴设备等。个人 Agent 具有很强的智能性。一方面,它能记住或者主动学习用户的偏好,通过智能算法对用户行为模式进行模拟。例如,如果一个用户对当前的环境满意,个人 Agent 会假设周围的环境属性值可以被用户接受,它就更新学习规则,计算用户偏好值。另一方面,如果周围环境改变,或者用户的照明设置改变了,个人 Agent 又能将本地 Agent 的反馈呈现给用户,并且将用户的个人设置和指令传输到控制中心,实现人为控制。

2) 本地 Agent。本地 Agent 在智能家居 MAS 中扮演了重要的角色。它位于控制中心的服务器上,接收传感器 Agent 的环境数据,将数据传输到数据融合中心进行分析和处理。本地 Agent 还与个人 Agent 进行交互,接收个人 Agent 的信息与指令。本地 Agent 是智能家居后台服务器、数据库、计算中心与控制中心的直接接口。

3) 传感器 Agent。多个传感器感知到的环境数据存在大量的冗余,直接传输影响网络的通信性能。传感器 Agent 用来对传感器的原始数据进行预处理。多个同类传感器的数据经过它的滤波和数据级融合后,减小了冗余性,提高了准确性,使数据更能反映真实的环境属性。

传感器 Agent 可以部署在与传感器较近的计算机设备上。目前,随着智能手机的发展,许多智能手机和可穿戴设备

支持大量传感器,所以传感器 Agent 也能部署在这些设备上,与个人 Agent 一起,实现感知端与控制端的融合。

4) 中心 Agent。中心 Agent 有两个作用:配置其他 Agent,协调其他本地 Agent。任何一个本地 Agent 都是智能家居 MAS 的一个子系统,有许多这样的子系统,中心 Agent 就负责这些本地 Agent 的管理、配置、协调工作。它允许管理员开启或者停止一个 Agent,增加或者删除一个 Agent。另外,它也为本地 Agent 提供一个联系的协调的平台,实现多个本地 Agent 的交互^[3]。

基于 MAS 的智能家居系统中,个人 Agent 与本地 Agent 直接联系。它一方面将用户的偏好、初始化设置、命令等信息传送给本地 Agent,再由本地 Agent 将信息传递给中心控制器或者各个执行器;另一方面接收环境的改变信息,将人与环境,通过控制系统连接起来。传感器 Agent 是传感器数据采集的中介,它接收数据采集卡中的传感器数据,通过无线网络,负责与本地 Agent 通信,将数据传到中心服务器。在智能家居系统中,有各种本地 Agent,每种 Agent 负责一种子系统的控制。每一个单独的 Agent 都是多 Agent 管理系统的一个子决策系统,所有本地 Agent 都由中心 Agent 统一协调管理。中心 Agent 负责本地 Agent 的配置、通信等工作。

这种基于四种 Agent 的布局结构提高了系统的协调性和交互性。同时为了提高系统的开放性,只对各个 Agent 的功能作简单介绍,详细的设计根据具体的使用场景会有不同。

3 基于 ANFIS 算法的智能家居多源信息融合

3.1 智能家居多源信息融合模型

MAS 提高了智能家居系统的交互性和智能性,为智能家居的多目标决策提供了技术支持。但利用 MAS 的最终目的是获得家居系统控制的多源多模态数据,为决策提供信息支持。传感器 Agent 收集的传感器数据,个人 Agent 采集的用户行为数据都汇总到本地 Agent 所在的融合中心,进行融合后形成决策指令传递给执行器。这个过程和 Omnibus 多源信息融合模型的观测、定向、决策、控制过程非常吻合。Omnibus 是数据融合模型中比较经典的一种,它可以分成观测、定向、决策、行动四个阶段。观测阶段包括环境感知和信号处理,定向阶段包括模式匹配和特征提取,决策阶段包括决策制定和上下文处理,执行阶段包括控制与资源分配。从观测到定向是传感器数据融合过程,从定向到决策是软决策融合过程,从决策到执行是硬决策融合过程,执行后,又要通过反馈进行传感器管理,从而形成一个闭环。传感器数据融合阶段以数据级融合为主,提高数据的准确性,减小数据冗余。软决策是关于观测数据的多个假设判定,并且带有对每个假设的信任度或不确定性的量化度量;硬决策是传感器向融合中心报告的关于观测数据的唯一确定的假设判定。执行决策后,环境状况可能改变,因此需要重新管理传感器,给出反馈^[8]。

参照 Omnibus 闭环融合过程,建立了一个基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS)的智能家居多源信息融合模型,其结构如图 3 所示。观测阶段,气候、视听、室内事件等传感器数据被实时地采集到传感器 Agent 中,经过传感器 Agent 的数据预处理、时空匹配、数据级融合后,传输到中心服务器进行特征级融合,也就是模型中的定向阶段。定向阶段包括环境状况评估、占用估计、环境检测等特征提取和模式匹配。定向

阶段和决策过程在控制过程中紧密结合,有很多自适应的控制方法可以进行闭环控制。本文采用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)作为主要的控制算法,对室内系统进行模糊决策。在最终决策和执行阶段,再利用模糊逻辑推理(Fuzzy Inference System, FIS)的方法形成最终的决策行为。

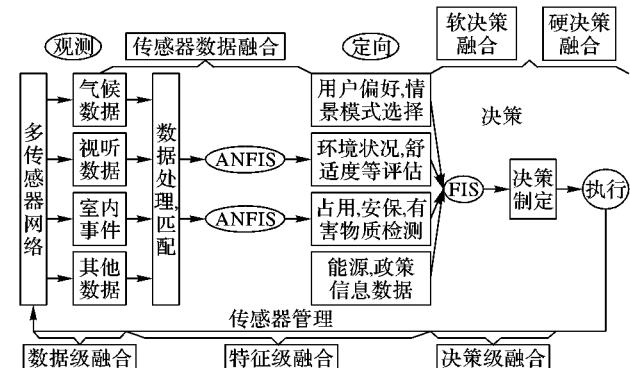


图 3 智能家居多源信息融合模型

该模型采用 Omnibus 模型的基本框架,但在细节上有一些改动。一方面,Omnibus 模型主要针对多传感器数据融合,而智能家居系统需要考虑很多非传感器数据。例如,在决策过程中,引入用户偏好、能源数据、政策信息等非传感器数据。另一方面,作为一个整体的系统,其决策过程分为很多子决策过程和阶段决策过程,不可能完全按照原来的融合过程。例如,在对照明进行控制时,可能要优先考虑政策限制,考虑室内占用情况,然后才是根据光照和辐射信息控制窗帘的打开程度和灯具的功率水平。因此,本文的模型中,软决策过程与硬决策过程是一个交替循环决策的过程。

3.2 基于 ANFIS 算法的特征提取和用户行为学习

ANFIS 是一种将模糊逻辑和神经元网络有机结合的模糊推理系统结构。它采用反向传播算法和最小二乘法的混合算法调整前提参数和结论参数,并能自动产生 if-then 规则。应用 ANFIS 方法可以方便地进行非线性系统的建模^[9-10]。

使用 ANFIS 算法,首先要为推理系统拟定一系列 if-then 推理规则,常用的模糊推理模型为 Takagi-Sugeno 模型,其典型推理规则为:

$$\text{if } x \in A \wedge y \in B, \text{ then } z = f_i(x, y)$$

其中: A 和 B 作为前提的模糊集合, $z = f_i(x, y)$ 为结论中的精确数。

例如,在智能家居照明系统的模糊控制中,可以制定这样的推理规则:

Rule1: if 光照强度很强, 并且室内有人, then 灯泡亮度 $z = value1$;

Rule2: if 光照强度很弱, 并且室内有人, then 灯泡亮度 $z = value2$;

ANFIS 算法由五层构成,每一层都由相同功能节点构成。其中第一层和第四层节点用方框表示,表示这两层具有自适应性。算法学习的过程就是在调整这两层的参数,使均方根误差达到最小。

设系统有 m 个输入量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$, 单输出量可由 n 条模糊规则得到。则 ANFIS 的五层结构分别为:

第一层: 变量模糊化层。通过语义将每个变量模糊分类, 输入的信号按照隶属度模糊化。节点 i 的输出:

$$O_{1,j} = \mu_{AI}^k(x_i) \quad (1)$$

其中: $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 是节点输入值; $k = 1, 2, \dots, n$; $j = m \times n$; $\mu_{AI}^k(x_i)$ 是隶属度函数, 通常为具有最大值 1, 最小值 0 的钟形函数:

$$\mu_{AI}^k(x_i) = \left[1 + \left(\frac{x_i - c_i^k}{a_i^k} \right)^{2b_i^k} \right]^{-1} \quad (2)$$

其中 $\{a_i^k, b_i^k, c_i^k\}$ 为需要模型调整的前提参数。

第二层: 规则层。将输入信号进行“AND”运算。输出值为规则 i 的激发值:

$$O_{2,k} = w_k = \prod_{i=1}^m \mu_{AI}^k(x_i) \quad (3)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, n$ 。

第三层: 归一化层。将规则 i 的激发值进行归一化。节点的输出值为:

$$O_{3,k} = \bar{w}_k = w_k / \sum_{i=1}^n w_i \quad (4)$$

其中 n 为规则总数。

第四层: 去模糊化层。该层的输出值为:

$$O_{4,k} = \bar{w}_k f_k = \bar{w}_k (d_0^k + d_1^k x_1 + d_2^k x_2 + \dots + d_m^k x_m) \quad (5)$$

其中 $\{d_0^k, d_1^k, d_2^k, \dots, d_m^k\}$ 为需要学习的结论参数。

第五层: 结果输出层。该层输出 ANFIS 的最终结果:

$$O_5 = \sum_{k=1}^n \bar{w}_k f_k = \sum_{k=1}^n w_k f_k / \sum_{k=1}^n w_k \quad (6)$$

在本文的融合模型中, 主要采用 ANFIS 算法进行家居环境的特征提取、变量预测和用户行为的自主学习。例如, 在智能家居的照明控制系统中, 可以将环境的光照强度、太阳辐射值等作为输入, 将灯光的亮度调节值作为输出, 使用这种算法学习个人的灯光使用模式; 再例如, 在对居室进行占用估计时, 可以利用红外线接近传感器的数据与摄像机的数据作为输入变量, 估计室内的占用情况。

4 仿真实验与分析

4.1 仿真平台搭建

文献[8]实现了轻量级嵌入式 Agent 在 Android 上的实现, 利用其所述的原理, 在计算机与 Android 手机之间搭建一个简单的 MAS 平台。仿真平台软硬件为: 一个太阳辐射仪, 两台 Android 手机, 一台计算机, 计算机装有 Jade Agent 插件、仿真工具 Matlab 和 Java 开发平台。在一台 Android 手机上部署传感器 Agent, 作为采集传感器数据的 Agent, 模拟家居系统中传感器系统。在计算机上部署本地 Agent, 用于接收传感器数据, 并将接收到的数据保存到本地文件中; 计算机上的 Matlab 作为后台的分析工具, 模拟智能家居控制中心。在另一台手机上部署个人 Agent, 用于接收本地 Agent 传来的数据。

4.2 智能家居数据融合仿真

利用太阳辐射仪和 Android 传感器每 5 min 采集 7:00 到 16:55 共 120 组光照强度和太阳辐射量数据, 其时间序列图如图 4 所示。

先对输入变量模糊分类, 将室内光照强度模糊分类为: 强 (LS)、中 (LM)、弱 (LW), 将太阳辐射量模糊分类为: 高 (RH)、适合 (RM)、低 (RL)。根据人的经验得出分块百叶窗打开的程度, 作为输出变量。制定 9 个 if-then 推理规则, 选取

钟形函数作为隶属度函数。将数据分成训练组 (80 个样本) 和测试组 (40 个样本), 先对数据归一化处理后, 通过 Matlab 模糊推理工具箱中的 ANFIS 算法对自然采光控制进行仿真, 其 ANFIS 结构如图 5 所示。

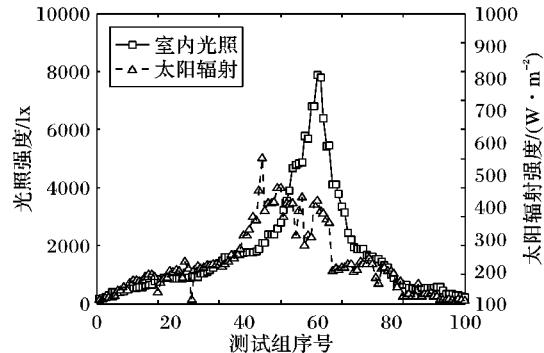


图 4 光照强度和太阳辐射时间序列

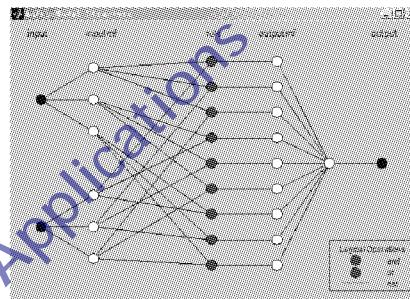


图 5 自然采光控制 ANFIS 结构

经过 80 组样本数据训练后, 系统第一层和第四层的参数确定。现在, 只需要向系统中输入太阳辐射值和光照强度值, 就可以估计出自动窗帘应该打开的比例值。使用所有采集的 120 组数据对系统做了测试。从图 6 的对比效果可以看出: 前 80 组数据误差较小, 后 40 组误差较大, 但总体误差仍然可以在可以控制的范围。

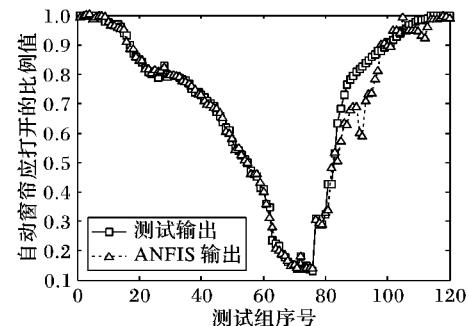


图 6 训练数据域 ANFIS 输出数据对比效果

从这个控制自然采光的仿真实验中可以看出, 基于 ANFIS 的数据融合模型在智能家居控制中具有可行性, 但要使模型真正使用在家居系统中, 还需要进一步研究。

5 结语

本文将多 Agent 系统引入智能家居, 为家居系统设计了多 Agent 的交互机制。这种交互机制具有一定的开放性, 适用于家居环境的任何子系统, 在 Android 平台和计算机上搭建了这样的平台, 证明了它的可行性。为了真正利用多源数据决策, 本文设计了一套完整的智能家居融合模型, 采用 ANFIS 进行环境状态评估和用户行为学习。仿真实验中以自然采光控制

为例,真正实现了多源数据的融合决策。未来的研究会完善MAS在家居系统的平台搭建,并考虑影响家居环境的更多实际因素,将本文提出的模型真正应用到家居控制中。

参考文献:

- [1] WANG Z, WANG L, DOUNIS A I, et al. Multi-Agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings [J]. *Applied Energy*, 2012, 99(2012): 247–254.
- [2] YANG R, WANG L. Development of multi-Agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 56: 1–7.
- [3] DOUNIS A I, CARAISCOS C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13 (6/7): 1246–1261.
- [4] EKWEVUGBE T, BROWN N, FAN D. A design model for building occupancy detection using sensor fusion[C]// DEST 2012: Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems Technologies. Piscataway: IEEE, 2012: 1–6.
- [5] BUDYAL V R, MANVI S S. ANFIS and Agent based bandwidth and delay aware anycast routing in mobile Ad Hoc networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications* 2014, 39: 140–151.
- [6] TROBEC LAH M, ZUPANCIC B, PETERNELJ J, et al. Daylight illuminance control with fuzzy logic[J]. *Solar Energy*, 2006, 80 (3): 307–321.
- [7] KRISTL Ž, KOŠIR M, TROBEC LAH M, et al. Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(4): 694–702.
- [8] RAOL J R. Multi-sensor data fusion with Matlab? [M]. [S. l.]: CRC Press, 2009.
- [9] ZHANG H, YU Y. Modeling and simulation applying Adaptive Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS) [J]. *Computer Simulation*, 2002, 19(4): 47–49. (张浩炯, 余岳峰. 应用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)进行建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2002, 19(4): 47–49)
- [10] JIANG J, MENG X, LI H, et al. Study on application of subtractive clustering and adaptive network-based fuzzy inference system in network fault diagnosis [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(8): 76–78. (蒋静芝, 孟相如, 李欢, 等. 减法聚类-ANFIS在网络故障诊断的应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(8): 76–78.)
- [11] YU W, CHEN Y. Implementation of lightweight embedded Agent on Android platform[J], *Computer Engineering*, 2013, 39(7): 298–301. (于卫红, 陈燕. 轻量级嵌入式Agent在Android平台上的实现[J]. 计算机工程, 2013, 39(7): 298–301)
- [12] JIANG L, LIU C, GUO X, et al. The design of intelligent lighting system in college classroom[J]. *Energy Procedia*, 2012, 17 (Part A): 90–95.
- [13] ASIF ul HAQ M, HASSAN M Y, ABDULLAH H, et al. A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 268–279.
- [14] ZHANG J, QIAO G, SONG G, et al. Group decision making based autonomous control system for street lighting [J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 108–116.
- [15] BHAVANI R G, KHAN M A. An intelligent simulation model for blind position control in daylighting schemes in buildings [J]. *Building Simulation*, 2009, 2(4): 253–262.

(上接第2737页)

参考文献:

- [1] MIRONOVSKII L A, SLAEV V A. General problems of metrology and measurement technique: the stirp method of transforming signals containing redundancy [J]. *Measurement Techniques*, 2011, 49 (7): 631–630
- [2] ASHRAFI M Z, TANIAR D, SMITH K. A new approach of eliminating redundant association rules [C]// DEXA 2008: Proceedings of the 15th International Conference on Database and Expert Systems Applications, LNCS 3180. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 465–474.
- [3] LANKA R, ODA K, YOSHIDA T. Active fault-tolerant system for open distributed computing [C]// ATC 2006: Proceedings of the Third International Conference on Autonomic and Trusted Computing, LNCS 4158. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 581–590.
- [4] LAMPORT L. Using time instead of time out for fault-tolerant distributed systems [J]. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 1984, 6(2): 254–280.
- [5] MANIVAXINAN D, ROBERT H B, SINGHAL M. Finding consistent global check points in a distributed computation [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1997, 8(6): 623–627.
- [6] WANG Y. Consistent global check points that contain a given set of local check points [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2007, 46 (4): 456–468
- [7] JIANG Q, LUO Y, MANIVANNAN D. An optimistic checkpointing and message logging approach for consistent global checkpoint collection in distributed systems [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2008, 68(12): 1575–1589.
- [8] BOURAS C, GKAMAS A, KARALIOTAS A, et al. Architecture and performance evaluation for redundant multicast transmission supporting adaptive QoS [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2009, 25(1): 85–110.
- [9] GRAHAM R L. Approaches for parallel applications fault tolerance [C]// PVM/MPI 2006: Proceedings of the 13th European PVM/MPI User's Group Meeting, Recent Advances in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface, LNCS 4192. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 215–237.
- [10] KANG H G, SUNG T. An analysis of safety-critical digital systems for risk-informed design [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 78(3): 307–314.
- [11] KELLNER A, KOLINOWITZ H-J, URBAN G. A novel approach to fault tolerant computing in space systems [C]// Proceedings of the 2010 IEEE Aerospace Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010, 3: 1127–1131.
- [12] SHUAI J, HUANG X, MA J, et al. Research on transient fault recovery of USB OTG communication [J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(14): 246–249. (帅金荣, 黄雄峰, 马杰, 等. USB OTG通信的瞬时故障恢复研究[J]. 计算机工程, 2012, 38 (14): 246–249.)
- [13] LAI X, FENG D, CHU J. Research on distributed network fault detection and recovery technique [J]. *Computer Engineering*, 2010, 46(24): 73–76. (来晓, 冯冬芹, 褚健. 分布式网络故障检测及恢复技术研究[J]. 计算机工程, 2010, 36(24): 73–76.)