

基于角色的无线传感网络中间件研究

罗娟, 顾传力, 李仁发

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 根据无线传感网络中节点扮演角色的多样性及角色职责的差异, 提出无线传感网络角色映射框架模型。在此角色映射框架基础上, 设计并实现基于角色的无线传感网络中间件 RobMSN。从语义和规约的形式化角度定义了角色映射的规则约束, 系统地解决了角色映射抽象的语义冲突问题, 使得角色映射的上下文充分地体现在中间件的角色规约中。利用 RobMSN 把应用程序映射为节点在网络中具体所承担的角色, 解决了无线传感网络中间件的跨平台要求和应用服务的动态性问题。最后, 以一个应用开发实例来说明 RobMSN 中间件的设计和开发流程。

关键词: 无线传感网络; 中间件; 角色映射; 形式化方法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)01-0079-08

Researches on role-based middleware in wireless sensor networks

LUO Juan, GU Chuan-li, LI Ren-fa

(School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: According to the diversity and difference of the role played by nodes in WSN, the role mapping framework model in WSN was proposed. A role-based middleware for wireless sensor networks(RobMSN) was designed based on that model. From the view of the formal semantics and specifications of the middleware, the role mapping specifications solve the problem of semantic conflicts in role mapping abstract, making the role mapping context fully reflected in the role specifications of middleware. Applications will be mapped as the specific roles of node which played in the wireless sensor networks using RobMSN, it can be cross-platform and implement dynamic application services. Finally, an application development example was used to illustrate the design and development process of RobMSN middleware.

Key words: wireless sensor networks; middleware; role mapping; formal methods

1 引言

无线传感网络由于其具有可快速部署、自组织、易隐蔽和容错性强等特点得到越来越多的应用。然而, 现有无线传感网络达到大规模应用还存在一定的不成熟性。首先, 现有的协议和应用都是基于底层的开发, 硬件平台差异很大, 使得在一个

具体硬件平台下开发的应用程序和提出的协议方案很难适应于其他的硬件平台。其次, 无线传感网络的应用是动态变化的, 随着场景和需求的不同需要提供动态的服务, 而网络本身不能预测未来的服务也无法自适应地满足未知服务的要求。中间件介于底层硬件和应用程序之间, 屏蔽底层细节, 向上层提供统一抽象的接口, 使用跨层设计的思想, 减

收稿日期: 2010-06-18; 修回日期: 2010-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903019); 湖南省科技计划重点基金资助项目(2009GK2008); 教育部博士点基金资助项目(200805321056); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60903019); Hunan Science and Technology Plans to Focus the Project (2009GK2008); The Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (200805321056); The Project Sponsored by SRF for ROCS, SEM

轻在分布式系统上构建应用程序的负担,同时也能满足应用的动态性,并达到应用服务的异构性需求。无线传感网络中间件的研究对无线传感网络的发展至关重要。

传统的无线传感网络中间件一般不能兼顾异构性、QoS 和能量管理等性能,如事件驱动中间件 DSWare^[1]虽有事件触发的优点,能量开销较小,但若节点失效,实时性难以保证。另外此类中间件难以把握应用的动态性和网络状态的变化,对异构性支持也不够。基于虚拟机设计方式的中间件 Maté^[2]虽然部分地解决了异构的问题,但是接口过于复杂,能量开销较大,也不能很好地支持 QoS。基于数据库的中间件 TinyDB^[3],使用类似 SQL 的查询命令获取所需的数据,虽然满足以数据为中心的特性,节约了能量开销,但是时空效率不高,更没有考虑通信链路失效造成的实时性影响,不能够支持 QoS,同时也不满足异构性要求。而自适应的中间件 Milan^[4]由于其重点关注了网络数据管理和自适应性,具有数据驱动和状态驱动的能力,能较好地支持 QoS,对能量的节省也很显著,但是其不能支持底层的编程范式,造成异构性不足。

而采用基于移动代理^[5]的编程范式,利用移动代理处理本地源数据达到降低传输带来的通信开销,对能量节省显著,能极大地提高网络性能^[6]。Agilla^[7]作为基于移动代理模型实现无线传感网络中间件的典范,由于其对底层程序封装成类似汇编的指令集,把应用构建成移动代理指令序列的集合。在节点间动态迁移代理并运行实现应用服务要求,效率高、延长了网络的生存期,能满足应用服务的动态性和网络异构性需求。但是其缺乏 QoS 的支持,代理指令表述性不强,用户不易掌握,难以满足用户的需要。

角色在无线传感网络被定义为节点在网络中应该承担的职责任或从事的任务,应用程序利用网络中角色的职能完成应用程序需要的服务,网络中节点所承担的角色(如感知、中继和聚合等)是由应用目标需求和自身属性来决定。例如,某时刻应用程序需要测量区域 A 的温度,那么可以将传感网络中区域 A 的部分节点按一定规则分配为温度感知角色和数据融合角色。温度感知角色承担感知温度的任务,数据融合角色承担将收集的传感数据汇聚处理后,提交给应用程序。目前,利用角色的特性来实现无线传感网络中的关键技

术可分为 3 类。

1) 利用角色实现拓扑控制。如 SPRING^[8]算法,针对移动传感器网络中拓扑变化快的特点,根据传感器位置与节点角色分配的依赖关系,使得节点所承担的角色能根据所处位置动态变化,保证感兴趣地区的数据能准确收集并尽力使网络优化,达到延长网络生存期的目的。文献[9]提出一种基于角色的分簇算法,通过递归找到连通域集来组织网络,连通域集节点被用来定义协调者(簇头)和路由角色,其余的节点作为感知角色(源节点)。簇头处理考虑了节点感知能力,因此簇头检测能力得到增强。

2) 利用角色实现数据融合。如 DFuse^[10]利用角色分配为数据融合提供了 2 个模块:融合模块(API)和角色分配模块。融合模块允许建立应用程序时使用数据流图,以具体化每个节点的角色。角色分配模块利用能量感知的角色分配算法将数据流图映射到网络,并按照指定的代价函数最优地分配和迁移角色。降低了数据融合时的开销,延长了网络的生存期,文献[11]通过评估邻居节点来逐步细化角色分配,提出了自适应和去中心的解决方案。其寻求利用角色分配使在网络中传输的数据量最小化。使用定期成本函数进行评估,节点以最低的代价进行角色迁移。

3) 利用角色实现网络安全。文献[12]中实现传感器网络中的安全模型 RBASH,其利用网络中节点承担角色的不同,分配不同级别密钥的方式实现多层次的安全。

这 3 类方法的共同点都是利用角色分配实现相关应用,降低网络开销,最大化网络生存期。而对于角色分配算法的问题, Frank 等人在文献[13]中系统地提出了一种通用的角色分配框架,允许用户具体化角色分配规则。该框架定义了 3 个核心要素。属性目录,用于定义节点能力和性能参数;角色规约,让角色分配遵循一定的规则;基于角色规约和节点属性的角色分配算法。其将角色分配看成程序的抽象,很好地解决了异构网节点角色分配算法的问题。但是网络的动态变化,节点的属性也随之改变,这种动态性使得网络中节点的角色伴随能量消耗、网络拓扑等需要动态地调整,文献[14]提出使用移动代理计算模型来解决无线传感网络簇头和普通节点的角色切换问题。通过将问题分解为簇内切换和簇间切换,分别建立簇内和簇间角色表,在簇内插入移动代理监视节点状态并维护角色

表，节点根据移动代理提供的知识，动态切换自己的角色和任务。

现有的基于角色的实现只是关注于在无线传感网络的特定应用本身，不具备异构性和可扩展性等要求，也没有提出一种嵌入式的中间件系统，普适性不强。此外，所有基于角色的实现都没有考虑角色映射模型和角色规约形式化 2 个关键问题，从而造成角色分配实现方式不统一，通用性不足。本文提出对高层抽象、对底层封装的基于角色的无线传感网络中间件，结合各类实际应用需求和无线传感网络状态对角色映射的框架进行建模，并进行语义抽象和形式化封装角色规约和规则，使得所设计的中间件具有充分支持 QoS、异构性、可扩展性等优点。

2 基于角色的无线传感网络中间件

2.1 中间件体系结构

为了在无线传感网络中利用基于角色的设计方法，设计无线传感网络中间件使得用户程序能很好地调用底层的实现，并尽力保证 QoS，本文提出基于角色的无线传感网络中间件(RobMSN, role-based middleware in sensor networks)体系结构，如图 1 所示。在 RobMSN 中间件框架结构内，应用层将不同应用 APP 抽象和建模成服务目标 Objective 及服务要求 Requirements，应用的 QoS 需求反映在抽象出的 Requirements 字段中。而中间件实现应用抽象到节点 Roles 的映射，Roles 由任务 (task) 和规约 (specifications) 组成，Specifications 不仅可以包括高层应用程序 Requirements，而且可以包括底层传感节点和网络的状态 (如能量、带宽等)，在网络状态和应用需求的 Requirements 之间权衡，尽力保证 QoS 等要求。

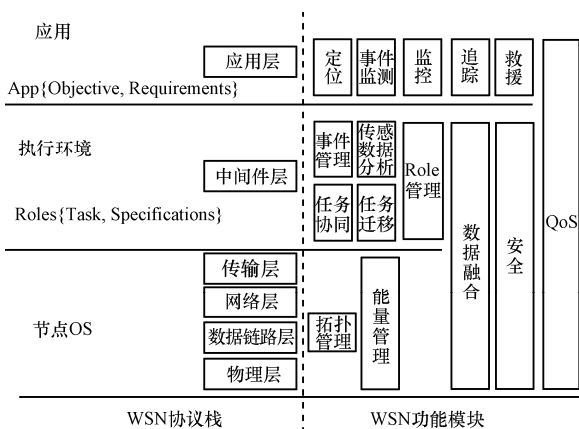


图 1 基于角色中间件体系结构

为了保证数据的透明传输与操作，基于角色的中间件体系结构，其中明确了各层的责任和功能，利用中间件执行环境来作为数据交换和应用操作的中介，为应用程序提供透明的操作接口。

在中间件层，应用程序 (如定位、事件检测、监控、目标跟踪和救援等) 直接通过中间件提供的接口，映射为相应的活动角色，通过具体的角色分配算法与节点相匹配，最终将激活的角色分配给满足条件的节点。通过中间件给感兴趣区域的节点分配活动角色，应用向角色发出操作或查询命令，节点也以角色方式向上层反馈处理后的数据，屏蔽了底层的实现细节，实现了透明操作。中间件的功能模块分为角色管理、数据分析、任务协同和任务迁移等。由此体系结构可分析出利用角色实现无线传感网络中间件的优势和功能模块的具体要求。

1) 借助角色规则来反映角色节点映射机制并约束具体的角色分配行为，利用角色作为数据交换的媒介，网络中节点的任务执行能及时反映应用服务的需求。

2) 角色行为的不同，安全权限也有区别。可将角色权限划分等级，利用将各种安全级别的密钥赋予不同级别的角色并绑定，实现角色访问控制的能力。随后在网络上下文条件下通过角色分配把角色赋予合适的网络节点。此时无线传感网络的各节点均具有不同级别的访问权限，故在网内得到了多级认证的访问控制，实现无线传感网络多层次的安全。

3) 由于网络状态和应用的动态变化，节点的角色也要随之改变，这就需要中间件的角色管理机制来保证角色的迁移，达到任务迁移目的。

4) 应用程序的服务要求不是单个节点就能实现，可能会被映射为多个角色并分配给不同的节点，此时中间件的角色管理就需要有角色协调的能力以实现任务间的协同，此外还可以在网内分配协调者角色给适当节点，来增强多角色间任务协同的目的。

5) 中间件收集了网络底层的节点状态，与应用需求权衡，从应用层、网络层和 MAC 层都尽力地保证 QoS，非常适合于具有实时性要求的大规模传感网。

通过这些功能模块，中间件可以实现应用程序的服务需求，封装了网络操作具体细节，并向应用提供接口，达到了异构性、通用性和灵活性的目的。

2.2 角色映射的框架模型

为了反映网络中角色映射的关系，设计无线传

感网络通用的角色映射模型来映射应用、角色和节点之间的关系，如图 2 所示。

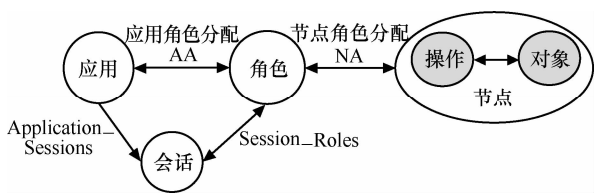


图 2 角色映射模型

应用程序属于主体的范畴，应用表示应用主体，通常能满足用户需求的应用程序；角色是网络中节点应该承担的行为方式或职能；因为应用和角色之间是多对多的关系，所以应用要通过会话来产生需要的角色(即应用角色分配 AA)，然后通过角色分配机制，将激活的角色分配给传感器网络节点(即节点角色分配 NA)。当节点承担一定的角色时，此角色就可调度该节点的资源。节点内的资源包括控制对象和相关操作，角色利用此资源可完成相应的职能任务，满足应用服务的要求。当然应用角色分配和节点角色分配及与会话的操作，必须满足一定的规则约束，此约束即是角色规则。此外 Application_Sessions 表示通过一个应用产生多个会话窗口，每个会话窗口接着使用 Session_Roles 关系来产生多个需要的活动角色。

为了利用无线传感网络通用的角色映射模型，具体应用程序 APP 与节点所承担的角色之间的对应关系，保证应用服务与角色的对应与执行。利用中间件完成角色映射，设计出中间件映射框架如图 3 所示，应用程序通过中间件接口提交所需服务 Objective 和 Requirements 给中间件，当中间件将应用映射为活动角色时，活动角色把应用 Objective 映射为任务 Task，把应用 Requirements 结合网络状态映射为角色规约 Specifications，中间件把整个角色映射模型的映射上下文条件视为角色规则，作为语义和约束存储于无线传感网络中间件中，在进行角色映射时查询匹配约束。角色规则在此中间件框架中可通过适当的接口使其具有可扩展性。中间件结合任务和规约查找角色规则然后映射为活动角色，通过角色代理插入到网络并进行合理迁移，当节点属性满足角色分配要求，就将此传感器网络节点映射为活动角色。节点执行角色任务后响应应用请求，反馈数据给应用程序。

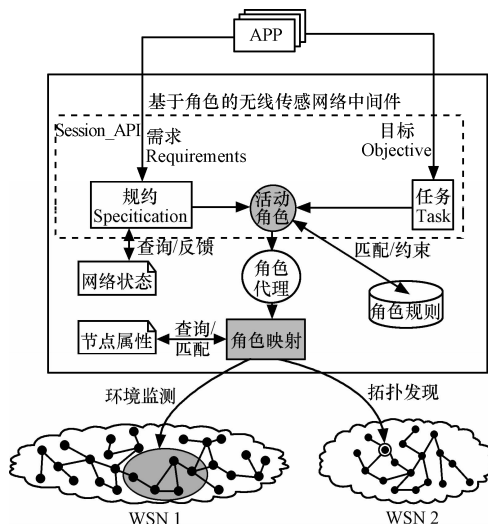


图 3 基于角色中间件映射框架

利用映射框架模型，将不同的应用建模为： $App\{Objective, Requirements\}$ ，通过会话接口 $Session\{App, Roles\}$ 并映射成不同的角色 $Roles\{Task, Specifications\}$ ，分配给网络节点。应用程序激活的角色由移动代理注入到网络执行环境之中，而无线传感网络中的节点通过与角色的映射，达到选择相应的 Roles 完成监控目标、采集数据的任务。另外中间件支持的服务质量 QoS 包括应用系统要求 Requirements 的 QoS 部分以及传感器节点在网络运行时的实时网络性能的要求，即 QoS 的采集通过跨层的过程实现，映射时在 Roles 的 Specifications 中给出明确的定义。

而对于网络节点来说，默认处于 OFF 角色，只有当用户的应用程序激活相应的角色并分配给节点后，节点才开始工作，并完成与此角色相对应的任务。没有分配角色的节点处于 OFF 角色，即休眠状态。节点角色映射关系初始状态的设计使得无线传感网络减少了不必要的能量消耗，延长了整个网络的生存期，并达到了数据驱动的目的。

此外引入事件驱动的思想，规约 Specifications 可要求当事件没有出现时节点处于监测状态。当监测的事件发生时，激活相应的角色，并利用角色之间的协调及激活机制自适应地完成相应任务，并从数据源向应用反馈数据。

3 无线传感网络中角色映射的形式化描述

在基于角色的无线传感网络中，由于网络状态的实时变化，应用服务和网内角色允许不同的应用语义描述不同的服务，为了角色映射的清晰和没有

歧义，方便地利用角色映射来设计无线传感网络中间件，必须语义抽象无线传感网络基于角色映射的框架模型和中间件接口，针对角色映射和中间件的设计给出如下形式化定义。

3.1 形式化定义角色映射模型

定义 1 角色映射的实体集有 4 个：应用集 A ，角色集 R ，节点集 N ，会话集 S 。

$$A = \{a \mid \bigcup_{i=1}^n \text{application}_i, \text{application}(S_i) \in S, i = 1, 2, \dots, n\}$$

(Applications, 应用集)

$$R = \{r \mid \bigcup_{i=1}^n \text{role}_i, \text{role}(S_i) \in S, i = 1, 2, \dots, n\}$$
 (Roles, 角色集)

$$S = \{s \mid \bigcup_{i=1}^n \text{session}_i, i = 1, 2, \dots, n\}$$
 (Sessions, 会话集)

$$N = \{n \mid \bigcup_{i=1}^n \text{node}_i, \text{node}(S_i) \in S, i = 1, 2, \dots, n\}$$
 (Nodes, 节点集)

定义 2 $NA \subseteq N \times R$ 为节点角色分配，即角色到节点的多对多的关系。 $AA \subseteq A \times R$ 为应用角色分配，即应用程序到角色的多对多的关系。

定义 3 角色映射框架模型同时分解了节点实体 N ，引入对象和操作 2 个资源实体。

$$O = \{o \mid \bigcup_{i=1}^n \text{object}_i, \text{object}(S_i) \in S, i = 1, 2, \dots, n\}$$
 (Objects, 实体集)

$$\text{Opt} = \{\text{opt} \mid \bigcup_{i=1}^n \text{operation}_i, \text{operation}(S_i) \in S, i = 1, 2, \dots, n\}$$
 (Operations, 操作集)

定义 4 一个活动角色中的任务可以再分割为若干子任务。

$$T_i = \{t_i \mid \bigcup_{i=1}^n \text{subtask}_i, \text{subtask}_i \in T_i, t_i \subset T_i\} \quad (n \text{ 不能超过一定约束范围})$$

子任务间可相互协作共同完成一项任务，并反馈数据给角色。

$\text{subtask}_i \subseteq O \times \text{Opt}$ ，一个子任务，其由节点内一组对象及相关操作组成。

3.2 形式化定义中间件角色映射接口

定义 5 每次映射的操作都在具体接口中加以定义：

$$\forall \text{map} \in \text{Mapping} \rightarrow \exists i \in \text{Interface}, \text{map} \triangleleft i$$

其中， $\text{map} \triangleleft i$ 表示映射 map 被定义为接口 i 。

定义 6 会话 Session 作为一种实体映射，被定义为一种应用层接口，其将角色映射的应用层实体映射为中间件实体：

$$\forall s (s \in \text{Session} \rightarrow s \in \text{Interface})$$

定义 7 应用 Application 被接口封装为服务要求 Requirements 和服务目标 Objective：

$$\forall a (a \in \text{Application} \leftrightarrow (\text{Requirements} \wedge \text{Objective}))$$

此处 $(\text{Requirements} \wedge \text{Objective})$ 表示应用服务要求 Requirements 和服务目标 Objective 的封装，Requirements 包括应用主体的 QoS 要求及应用服务的优先级需求等。

定义 8 角色 Role 被封装为任务 Task 和规约 Specifications：

$$\forall r (r \in \text{Role} \leftrightarrow (\text{Task} \wedge \text{Specifications}))$$

从定义 7 和定义 8 可看出，接口映射 AA 时，把应用的 Requirements 包含在角色的 Specifications 中，而且 Specifications 也包含网络的状态信息，以采集和支持多层次的 QoS。此外 Specifications 还应蕴含节点角色分配的规则，以实现角色分配的合理化。与此同时角色的另一项内容任务 Task 则蕴含应用服务目标 Objective，以正确地向应用提供所需的服务。

3.3 角色映射规则的形式化方法

为了保证基于角色的无线传感网络的中间件能满足跨平台、多应用的需要，形式化角色映射，以保证角色映射框架在角色映射时角色分配的健壮性和通用性，并满足适当的约束条件，使得扩展此中间件的角色规则有标准可循，可扩展性得到保证。

应用服务作为应用主体(subject)的体现，活动角色(active role)是一个主体通过 AA 映射得到的角色：

$$AR(su: \text{subject}) = \{\text{the active role for subject } su \text{ via } AA\}.$$

每个节点可以分配一个或多个角色，运行角色指通过 NA 映射分配后在节点内运行的角色。角色分配时，角色必需先获得节点的资源实体集：

$$RR(N) = \{\text{roles run in a node meeting the resource requirements via } NA\}$$

每个角色包含所承担的任务以完成应用主体的服务请求：

$$TA(r: \text{role}) = \{\text{task } T_i \text{ contained in role } r \text{ for service Objective request}\}$$

应用主体执行具体服务目标时，形式化谓词 $exec(s, t)$ 表示在当前时间能执行应用主体服务目标 Obj 时为真，否则为假：

$exec(su: subject, Obj: Objective) = true$ iff subject su can execute service Objective Obj

节点内操作是角色在满足上下文条件下对任务的执行：

$$r \in Role, t \in Task (\exists na(r, t) \in NA \leftrightarrow CC(na(r, t).context_cond) \rightarrow r \xrightarrow{cc} t)$$

$CC(na(r, t).context_cond)$ 表示目前的上下文满足规约条件， $r \xrightarrow{cc} t$ 代表角色在条件 cc 下可以执行任务 t 。

此规则保证角色分配给适当节点后，当满足条件时节点才能执行角色的任务。例如，对于某个角色需要发送数据，需要执行数据发送这个子任务，而基于竞争信道的数据访问而言，只有载波侦听发现有空闲信道时才能发送数据包，所以必须满足信道空闲这个上下文条件，此角色的任务才能被执行。

激活角色的 QoS 兴趣集为 F_A ，网络实际可使用节点集为 F_N ，则角色实际选用节点集为

$$F = F_A \cap F_N$$

兴趣集 F_A 中的元素是活动角色要求定制的数据源 QoS 等参数。根据抽象的应用需求参数，查询当前传感器节点的属性信息，例如传感器类型、节点状态、位置等，找到节点现实可用的传感器节点集 F_N ，取二者的交集 F ，使得适当应用主体的活动角色分配给满足条件的节点，既保证网络 QoS 及应用需求，又可使网络优化。

此外角色执行还需满足 3 个基本原则。

1) 应用主体执行 (subject implementation)：仅当应用主体所需角色已被激活时，才能执行某一个服务

$$\forall su: subject, Obj: Objective, (exec(su, Obj) \Rightarrow AR(s) \neq \emptyset)$$

所有应用主体的执行必须要有活动的角色。

2) 可实施的角色 (executable roles)：应用主体所需要的应用角色必须满足节点角色分配的要求，也就是说必须要有相应的节点来承担应用所需要的角色。

$$\forall su: subject, (AR(s) \subseteq RR(N))$$

结合原则 1)，此原则保证应用主体执行所需的角色，有适当的节点能够承担此角色分配，即保证角色分配时有满足条件的节点来立即执行应用主体。

3) 任务执行 (TASK execution)：只有通过角色映射，角色的任务才能分配给节点，活动角色的任务才能被执行。

$$\forall r_i: AR(su), t: task, (exec(r_i, t) \Rightarrow t \in TA(RR(s)))$$

此原则保证无线传感器网络节点任务的实施必须通过活动角色的激活，节省节点的能量消耗。同时应用主体也需要通过节点内运行的角色来完成所需服务任务。

这 3 个原则的实施，可保证在应用的活动角色执行时，避免中间件在角色调度和任务执行时出现资源死锁现象，使得设计的中间件更加的健壮，也解决了网络数据流量过大时造成的网络拥塞现象。让无线传感网络具有流量自适应的能力，网络的应用会更加的高效。控制了能耗，增加网络的生存时间。

证明 设资源死锁表示为 $RsDL(resource\ deadlock)$

假如 $\exists r_k \in AR(s)$ ，并且角色 r_k 的执行需要节点的资源对象 $O_j \in O$ ，现在其运行导致网络环境资源死锁，即 $exec(r_k, O_j) = true$ 且 $exec(r_k, O_j) \Rightarrow O_j \in RsDL$ 。而由 $RR(N)$ 的规则可知， $RR(N) = \emptyset$ ，根据约束 2 的包含关系可得， $AR(s) = \emptyset$ ，与约束 1 矛盾，故题设不成立，结论得证，资源死锁现象不存在。

4 基于角色的传感网络中间件 RobMSN 的设计与实现

为了在无线传感网络中更好地体现基于角色跨层设计的优势，在 TinyOS 1.x 下开发基于角色的无线传感网络中间件 RobMSN。并利用移动代理编程范式设计角色代理，并将其注入到无线传感网络节点中，其能根据网络上下文环境动态与网络节点映射。利用中间件平台向应用层提供的图形接口获知应用服务，再向底层硬件分配应用映射的活动角色完成高层的任务。方便了用户数据管理和动态应用的开发与实现，以多应用需求的无线传感器网络数据查询系统 RobMIS 作为范例来说明，如图 4 所示。

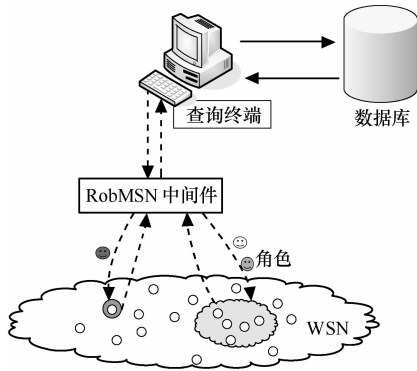


图 4 无线传感网络数据查询系统 RobMIS

RobMIS 数据处理流程如图 5 所示，RobMIS 系统将应用的 Objective 和 Requirements 与中间件的角色规则匹配映射，生成对应角色，插入网络，并根据网络现状构建角色图分发网络节点。节点承担角色，构建任务图，通过协调执行分布式任务，硬件节点完成操作处理，向角色提交处理状态或采集的数据，角色进行数据融合，将服务完成情况和数据反馈给应用，实现了数据查询。例如，当终端发出查询环境监测指令时，中间件 RobMSN 会通过角色映射将服务映射为角色 Sensor 和角色 Aggregator，验证角色规则，通过角色分配算法将这 2 种角色分配给所有网络内满足条件的节点。当节点被分配感知角色 Sensor 并开始实施时，会激发测量传感器进入工作，采集环境信息。当节点被分配数据融合角色 Aggregator 时，调用数据融合的算法，减少传输数据量。Aggregator 将融合处理后的环境信息提交给 RobMSN 中间件，中间件将其实时地反馈给查询终端，终端经过数据分析之后实时地将数据显示给用户，并将历史数据存入数据库中。当应用变更为定位服务时，中间件接收到变化的服务，将 Anchor 角色分配给具有定位功能的锚节点，撤销以前的角色。执行的映射操作与信息查询类似。

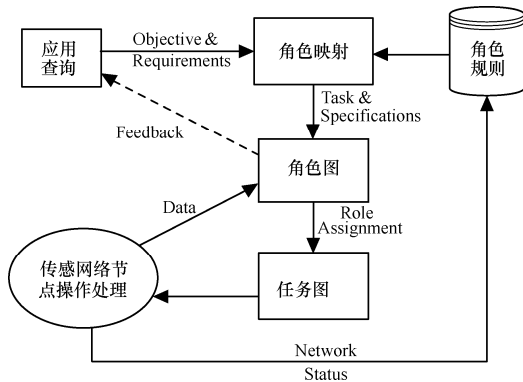


图 5 RobMIS 数据处理流程

若是增加新的应用，中间件与应用的会话进程继续存在，则会维持以前角色的存在，在网络中增加新应用映射的角色。

图 6 中各个节点根据应用需求，都被分配了相应的角色，以完成相应的任务。网内有定位用的锚节点角色 Anchor，路由功能的路由角色 Router，网关角色 Gateway，转发角色 Follower，数据融合角色 Aggregator，还有环境感知角色 Sensor，为延长网络生存期而保留备用的角色 Reserve 等。而网内的协调者角色 Sensing-collaborator 就是协调各个角色之间的关系，以达到网络优化的目的。当然有的节点可以承担多个应用服务的角色，这要由角色规则、网络状态及各个节点的能力所共同决定的。

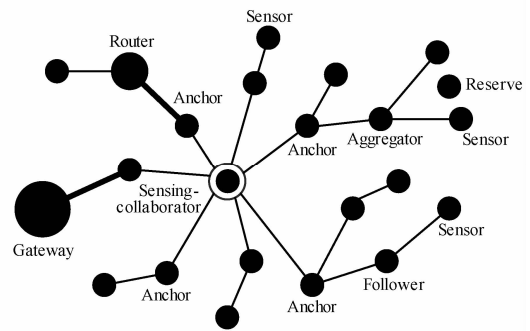


图 6 网内节点角色

图 7 为利用 Tossim 仿真平台的 TinyViz 工具，构建 20m×20m 多跳无线传感网络环境，取 25 个节点作为仿真对象。利用 PowerTossim 工具获知各节点能耗。把 TinyDB 作为传统无线传感网络中间件的典型与基于角色的无线传感网络中间件的网络节点平均能耗进行仿真比较。可见在网络空闲时基于角色中间件与传统中间件在能耗方面相比没有优势，当业务增加时，基于角色中间件的优势逐渐体现。这是由于应用执行时角色根据 QoS 和网络

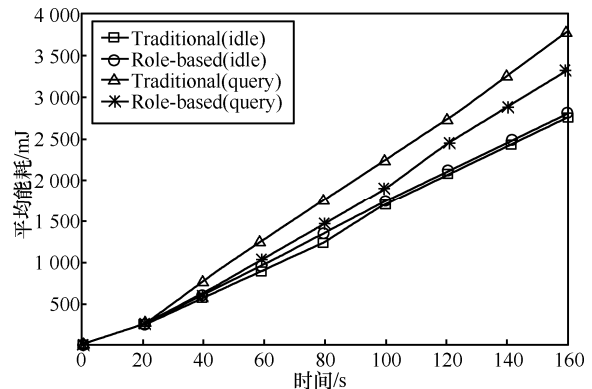


图 7 平均能耗比较

状况动态分配给节点。避免了由于网络感知数据冗余造成不必要的能量开销。此外基于角色的无线传感网络可以提供多种应用服务的查询，但在传统中间件中却不能具备多业务查询的能力。

5 结束语

本文利用角色进行跨层设计，提出一种能适应动态的应用和网络行为的基于角色的无线传感网络中间件 RobMSN。为了映射动态的应用服务，在异构传感器网络中能使用即插即用的角色，设计了通用的角色映射框架模型。充分考虑应用程序的需求和网络状态，从 MAC 层、网络层、应用层等多个层面设计中间件的 QoS 保障体系。利用面向服务的思想，把中间件管理下的各感知节点规约为活动角色的服务点，RobMSN 作为系统的中间适配层解决了节点异构性问题。下一步将利用此中间件的角色来具体地实现节能、高效的数据聚集和拓扑控制等算法，以达到更广泛的实用。

参考文献:

- [1] LI S, SON S, STANKOVIC J. Event detection services using data service middleware in distributed sensor networks[A]. IPSN 03[C]. Berlin, 2003.502-517.
- [2] LEVIS P, CULLER D. Mat : a tiny virtual machine for sensor networks[A]. Proc of the 10th Int'l Conf on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOSX)[C].New York, 2002.85-95.
- [3] MADDEN S R, FRANKLIN M J, HELLERSTEIN J M. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks[J]. ACM Trans on Database Systems,2005,30(1):122-173.
- [4] HEINZELMAN W B, MURPHY A L, CARVAHO H S, *et al.* Middleware to support sensor network applications[J]. IEEE Network, 2004, 18(1):6-14.
- [5] CHEN M, KWON T, YUAN Y, *et al.* Mobile agent based wireless sensor networks[J]. Journal of Computers, 2006, 1(1):14-21.
- [6] BAI L, FERRESE F, PLOSKINA K, *et al.* Performance analysis of mobile agent-based wireless sensor network[A]. Proc ICRMS 2009[C]. Chengdu, China, 2009.16-19.
- [7] FOK C L, ROMAN G C, LU C Y. Agilla: a mobile agent middleware for self-adaptive wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2009, 4(3):1-26.
- [8] DASGUPTA K, KUKREJA M, KALPAKIS K. Topology-aware placement and role assignment for energy-efficient information gathering in sensor networks[A]. Proceedings of the Eighth IEEE Symposium on Computers and Communications[C]. Antalya, Turkey, 2003. 341-348.
- [9] KOCHHAL M, SCHWIEBERT L, GUPTA S. Integrating sensing perspectives for better self organization of ad hoc wireless sensor networks[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2004, 20(3): 449-475.
- [10] KUMAR R, WOLENETZ M, AGARWALLA B, *et al.* Dfuse: A framework for distributed data fusion[A]. Proc of the Int'l Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. Los Angeles, USA, 2003. 114-125.
- [11] BONFILS B, BONNET. Adaptive and decentralized operator placement for in-network query processing[A]. Proc of the Information Processing Sensor Networks[C]. Berkeley, USA, 2003.389-409.
- [12] PANJA B, MADRIA S K, BHARGAVA B. A role based access in a hierarchical sensor network architecture to provide multilevel security[J]. Computer Communications, 2008, 31(4): 793-806.
- [13] FRANK C, ROMER K. Algorithms for generic role assignment in wireless sensor networks[A]. Proc of the Int'l Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. San Diego, USA, 2005.230-242.
- [14] HUA X, LEI B. A Mobile-agent-based role switching management mechanism in WSN[A]. Proc CiSE 2009[C]. Wuhan, China, 2009.1-4.

作者简介:



罗娟 (1974-), 女, 湖南株洲人, 湖南大学副教授, 主要研究方向为无线传感网络、无线嵌入式系统、无线通信等。

顾传力 (1982-), 男, 安徽合肥人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为无线传感网络。

李仁发 (1957-), 男, 湖南郴州人, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为嵌入式计算、无线网络、网络与数字媒体。