

智慧城市中 QOE 感知服务组合策略的研究

杨文青, 刘广钟

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘要:无线传感器的发展和物联网技术的应用,配有物联网的设备正以一种全新的“智能终端服务”的形式进入人类生活,要想在复杂冗余的物联网环境中寻得满足不同用户需求的服务,需要考虑服务组合的概念。为此,在对传统服务组合研究方法深入分析的基础上,提出了智慧城市的服务组合选择策略。首先根据物联网应用服务的多样性,通过改进蚁群算法获得用户对服务的偏好顺序,然后使用层次化 QOE 评价模型量化客户体验质量,进而选出最优服务组合提供给用户。根据提出的服务组合策略,给出服务选择具体的实施流程,通过仿真模拟表明基于改进蚁群算法的服务组合策略在服务选择问题上具有一定的推广价值。

关键词:物联网服务;DCOP 模型;服务选择算法;QOE 评价模型

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2021)04-0176-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2021.04.030

Research on QOE Aware Service Composition Strategy in Smart City

YANG Wen-qing, LIU Guang-zhong

(School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The development of wireless sensors and the application of Internet of Things technology, devices equipped with the Internet of Things are entering human life in the form of a brand-new “intelligent terminal service”. In order to find services that meet the needs of different users in the complex and redundant Internet of Things environment, the concept of service composition needs to be considered. To this end, based on an in-depth analysis of traditional service composition research methods, we propose a service composition selection strategy of smart city. First, according to the diversity of IOT application services in smart cities, the user's preference order for services is obtained by improving the ant colony algorithm, and then a hierarchical QOE evaluation model is used to quantify the quality of customer experience, thus selecting the optimal service combination for users. According to the proposed service composition strategy, the specific implementation process of service selection is given. The simulation shows that the service combination strategy based on the improved ant colony algorithm has a certain promotion value on the service selection problem.

Key words: Internet of Things service; DCOP model; service selection algorithm; QOE evaluation model

0 引言

物联网是互联网通过传感器向物理世界的延伸,其目的是对物理世界实现智能化管理,一个城市只需要配置相应的物理设备和基本的运行参数,服务便可应用于每个城市^[1-2]。但是由于物联网服务的不断完善,服务数量指数增长,相同或相似功能的服务增加导致请求者对服务质量提出了要求^[3]。针对物联网服务在实际应用过程中存在的问题,研究人员通过研究不同侧重点的服务组合方法取得了不尽相同的研究成果。例如, Bidi S A H 等人提出了一种城市组合服务策略,用于提供日常城市任务调度的解决方案^[4]; Han

S N 等人提出了基于实时 web 协议的 IP 智能对象服务组合,以“智能家居”为例,实现从起床、吃饭到上下班、休息的全过程^[5]。文献[6]拟议了一个配有 RESTful 物联网的服务组合架构,使用该架构可以以最佳的方式接收城市服务商提供的城市交通信息。

蚁群算法自 1991 年被提出至今,成功解决了大量的服务选择问题,但是由于服务组合过程中的动态性、不稳定性、服务质量属性受限等问题^[7],很多学者选择对蚁群算法进行改进。王秀亭等将服务组合映射为选择起始服务到终止服务的最优路径选择,并将服务的非功能属性作为参数加入到 ACO 的启发函数计算中,

收稿日期:2020-05-17

修回日期:2020-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(61202370);上海市教委科研创新项目(14YZ110);中国博士后科学基金资助项目(2014M561512)

作者简介:杨文青(1995-),女,硕士研究生,研究方向为数据挖掘与传感器网络;刘广钟,教授,博导,CCF 高级会员(E200006996s),研究方向为分布式数据库、无线传感器网络等。

从而保证服务之间代价相等^[8];文献[9]对 ACO 中的信息素更新方式进行了改进,另外还将改进 ACO 与其他仿生优化算法融合,从而解决了 ACO 本身的停滞问题;为了克服传统 ACO 易陷入局部最优的问题,李东星等人分别从局部和全局寻优两个方面讨论了状态转移概率的计算方法,并在此基础上寻得全局最优服务链^[10]。

由于服务组合涉及大量影响因素建模问题,故相关学者普遍采用层次化的评分模型,将用户偏好与评分聚合到满意度函数中,从而提高用户体验质量^[11-12];文献[13]中建立了 QOE 多属性评价模型,并给出了该评价模型在四种常用的执行模式(分别是顺序、平行、选择和循环)下的计算公式,为服务组合优化问题提供了一定的理论支撑。

该文将提出的服务组合策略作为一种通用框架引入改进蚁群算法及 QOE 评价模型为用户选择最优服务组合。将服务组合问题映射到 DCOP 模型中,针对蚁群算法不足之处进行修缮,结合服务中的 QOE 属性改进状态转移概率公式和信息素更新方式,形成基于 QOE 影响因素的 HA-ACO 算法。该策略使全局搜索最优服务的能力增加,从而提高了寻得最优解的概率。

1 拟议的服务组合策略

1.1 基于 RESTful 物联网的服务选择模型

图1是基于 RESTful 物联网的服务选择模型,该模型由用户、服务提供商和中央智能城市控制器(central smart city controller, CSCC)三个元素组成。其工作原理是:物联网传感器不断感知和收集来自各

个服务供应商的服务和流量信息,所有的服务提供商使用 JSON 消息中的 RESTful Web 服务在 CSCC 中注册,注册之后可以将服务描述信息发布到注册中心。CSCC 以一定的方式存储和管理服务描述。该模型中以 JSON 格式响应初始请求,当接收到一组抽象服务 $AS = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, CSCC 会为每一个抽象服务 A_i 在智慧城市数据库中找到一组具体服务 CS,并返回一个解决方案 $CS = \{CS_1, CS_2, \dots, CS_n\}$ 。

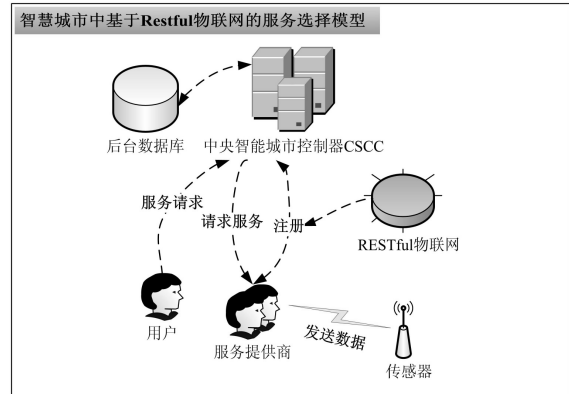


图1 基于 RESTful 物联网的服务选择模型

1.2 使用 DCOP 模型描述服务组合问题

抽象服务组合是由 N 个抽象服务组成,即: $AS = \{as_1, as_2, \dots, as_n\}$, 对于每一个抽象服务 $as_i \in AS$, 都有 m 个合理的候选服务(或称为具体服务)去实现它,表现为: $CS_i = \{CS_1^{as_i}, CS_2^{as_i}, \dots, CS_m^{as_i}\}$ 。为每一个抽象服务 as_i 选择一个具体服务 $CS_j^{as_i}$ 以优化整个复合服务的全局 QOS、提高客户的 QOE, 这是一个 DCOP 问题。表1是将服务组合问题映射到 DCOP 模型。

表1 服务选择问题与 DCOP

| DCOP 概念 | 物联网服务组合概念 |
|---|---|
| 分布变量集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ | 抽象服务集 $AS = \{as_1, as_2, \dots, as_n\}$ |
| Agent(代理)集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ | 服务供应商集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ |
| 变量 x_i 的域 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n, D \in R\}$ | $D(as_i) = \{cs_j^{as_i} / 1 \leq j \leq m\} = CS_i$ (每个 as_i 的值是 QOS 参数值的向量) |
| 对每一组变量 x_i, x_j , 局部成本函数: $C = \{c_{ij}; D_i \times D_j \rightarrow R^+, i, j = 1, 2, \dots, n \text{ 且 } i \neq j\}$ | 两个给定服务 i, j 的局部成本 c_{ij} 是通过组合方式(顺序、平行、循环)计算出来的 |

在 DCOP 框架中,为了收敛到最优解,代理之间必须相互通信,对于任意两个服务,局部变量的最优值导致全局变量的最优值,每两个变量的局部成本之和 c_{ij} 共享一个约束。

$$\varphi(Af) = \sum_{x_i, x_j \in X} c_{ij}(Af(x_i), Af(x_j)) \quad (1)$$

赋值变量 Af 将变量 x_i, x_j 映射到 $d_i \in D_i$ 中。

对于物联网中的服务组合问题,需要扩展 DCOP 以满足用户指定的全局约束,主要体现在 QOS 属性的约束上。QOS 属性的约束向量可以表示为: Bound

$= (\text{Bound}_1, \text{Bound}_2, \dots, \text{Bound}_L)$, L 表示约束的数量,同时定义如下布尔函数 $\text{CONSTRAINT}(V_r, \text{Bound}_r, \text{Op}_r)$ 来验证用户指定的第 r 次约束是否满足, V_r 表示在第 r 次获得一个可行的解决方案的值,通过如下表达式获得:

$$V_r = \sum_{a, b \in CS} \text{Agg}(q_r(a), q_r(b)) \quad (2)$$

其中, $q_r(a), q_r(b)$ 表示具体服务 a, b 在第 r 次得到的 QOS 属性值;运算符 Op_r 可以是 $>, <, \leq, \geq$ 。因此解决服务选择问题是要为抽象服务 as_i 选择一组具体服

务 $CS = \{CS_1, CS_2, \dots, CS_n\}$ 并且满足如下要求:

(1) 式(2)中定义的全局成本最小;

(2) 具体服务 CS 的全局质量的 QOS 属性值 (V_r) 必须满足用户约束 ($Bound_r$):

$$\bigcap_{r=1}^l \text{CONSTRAINT}(V_r, \text{Bound}_r, \text{OP}_r) = \text{true} \quad (3)$$

2 面向 QOE 约束的仿生学服务选择算法

使用 DCOP 模型描述完服务组合问题后, 需要结合用户约束来选择服务组合。智慧城市中的服务之间存在差异, QOE 属性目标之间没有统一的标准, 因此选择最优服务组合本质上就是 QOE 的多目标优化问题。同时, 物联网服务大多依附在移动设备上, 智能主体往往根据客观环境变化做出相应改变。鉴于上述问题, 借用群体仿生学优化算法可以巧妙地提出应对策略。故该文针对物联网服务的特点和现有服务选择方法的不足, 提出了改进的蚁群算法——HA-ACO。ACO 的主要任务是从大量的候选服务中选择符合用户偏好需求的组合序列, 旨在从一系列组合问题中找到最优解^[14]。HA-ACO 克服传统服务选择类算法只考虑单一服务属性的问题, 实现动态服务组合的最优 QOE。

2.1 HA-ACO 的信息素更新方式

与穷举搜索法、贪婪法相比, ACO 效率更高的原因在于该算法的信息素更新规则。而在选择服务时, 路径上残留的信息素浓度会随时间挥发而减少, 因此为了避免信息素浓度改变对路径选择造成影响, 需要更新信息素浓度。该文基于式(4)改进信息素更新方式:

$$c_{ij}(t+n) = (1-\rho)c_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta c_{ij}^k(t) \quad (4)$$

其中, $c_{ij}(t+n)$ 表示本次循环在服务 i 到服务 j 路径上的信息素浓度。 $\Delta c_{ij}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在服务 i 到服务 j 路径上的信息素增量, 如果蚂蚁没有途经路径 (i, j), 则 $\Delta c_{ij}^k(t) = 0$ 。 ρ 表示信息素的挥发系数, $1-\rho$ 表示信息残留因子, $\rho \in [0, 1]$ 。

具体改进方法如下: 设 S 为路径 (i, j) 的一个服务, 该服务共有 n 个 QOS 属性 Q_1, Q_2, \dots, Q_n , 这些属性对应的量化值转换函数为 $Q_1(S), Q_2(S), \dots, Q_n(S)$, 则算法中服务 S 的第 r 个 QOS 属性对应的信息素计算公式为:

$$c_{ij}(t) = -\log \frac{Q_r(s)}{\sum_{q=1}^n Q_q(s)} \quad (5)$$

其中, $\frac{Q_r(s)}{\sum_{q=1}^n Q_q(s)}$ 表示服务 S 的属性 Q 的量化值 $Q_r(s)$

相对于所有属性量化值的优势, 并且通过取对数来量化该优势, 由此得到的信息素浓度值与服务优越性正相关, 信息素浓度越大, 该服务被选中的概率越大, 这与选择服务集的动机一致。

2.2 HA-ACO 的状态转移概率公式

蚂蚁的移动过程是 ACO 解决服务选择问题的核心。根据 ACO 的觅食原理, 每当蚂蚁经过一个服务类, 都必须计算从当前服务到下一服务类的每一个服务的转移概率。这一过程确保了寻得最佳路径的有效概率和算法的多样性。状态转移概率公式如下:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[c_{ij}(t)]^a [\eta_{ij}(t)]^b}{\sum_{j \in a_k} [c_{ij}(t)]^a [\eta_{ij}(t)]^b}, & j \in a_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $c_{ij}(t)$ 为 (i, j) 边上的信息素浓度, $\eta_{ij}(t)$ 为服务 i 转移到服务 j 的启发式因子, a, b 分别为信息素和启发式因子的相对重要程度, a_k 为蚂蚁接下来可以访问的服务集。

在搜索过程中, 蚂蚁除了根据信息素浓度 $c_{ij}(t)$ 来确定状态转移概率外, 启发函数 $\eta_{ij}(t)$ 也会对算法的收敛速度和收敛性产生影响。因此在利用蚁群算法选择服务时, 为了满足客户的体验质量, 不能只考虑当前服务的选择, 而应侧重于整体的服务解集。故在 HA-ACO 算法中, 将后一服务的非功能属性值加入到启发函数 $\eta_{ij}(t)$ 中, 这样可以平衡当前服务到后面任一服务的代价。计算公式如式(7)所示:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{q=1}^n Q_{ij}^q(t)}} \quad (7)$$

$Q(t)$ 代表下一个服务 j 的响应时间、服务代价和服务的可行性等属性的综合值。要特别说明: 单个服务可行性以倒数的形式呈现, 这样在量化过程中, 服务的响应时间、服务代价越小, 可行性越大, 启发信息就越大, 在蚂蚁选择下一服务中的受重视程度也就越大。

2.3 HA-ACO 算法实现

基于 HA-ACO 算法选择最优服务组合流程如下:

(1) 初始化循环次数: $N=0$, 最大循环次数 N_{\max} , 本次循环蚂蚁走过的路径列表 L_k , 蚂蚁数量 $K=0$, 最大蚂蚁数量 K_{\max} , 单次循环最优组合列表 I , 最优服务组合列表 L 。

(2) $N=N+1$, 若循环次数 N 大于 N_{\max} , 转至步骤 7。

(3) $K=K+1$, 若蚂蚁数量 K 大于 K_{\max} , 转至步骤 6。

(4) 蚂蚁移动到下一节点的概率根据信息素浓度和启发式函数确立。再利用轮盘赌算法选出要走的路径, 并将相关的路径信息写入路径表和禁忌表。蚂蚁

移动至下一个服务类。

(5)判断蚂蚁所在的节点,如果它是末端节点,则将本次循环的服务路径与 I 中的信息素浓度比较,如果前者更优,则替换 I 中的服务类,执行下一步。否则转至步骤 4。

(6)计算本次循环路径表 L_k 中的信息素增量,更新所有路径信息素浓度。转至步骤 2。

(7)比较信息素浓度最高的服务路径和单次循环最优组合列表 I 中的路径,若相同,则输出 L 中信息素浓度最高的服务组合方案给用户;若不同,则输出 I 中结果。算法结束。

3 QOE 的预测和评价方法

使用 HA-ACO 选择服务组合后,中央智能城市控制器需要判断是否将该服务分配给用户,因此涉及到

QOE 的评价问题。起初,QOE 的概念主要用于衡量用户对网络层 QOS 的评价,而后 ITU-T 将 QOE 的衡量范围扩展到服务层面,强调用户对服务质量的整体感知^[15]。结合智慧城市中的应用服务丰富多样、评价指标各不相同的特点,该文选择具有可伸缩多层次的评价分析法来量化用户满意度。

图 2 是结合物联网服务的特点构建的三层评分模型,该模型将服务提供商提供的服务扩展到多个评分层次,由最上层的总评分向下延伸,每个层次包含多个评分小项。其中,第一层为用户对服务的满意程度,也是最高总评分,受下两层评分项的影响;第二层按影响因素细分为四个方面,分别是:服务商家的品牌、内容、可访问性、功能;第三层从 QOS 的角度又进一步细分出来更容易量化的评分项,比如将品牌展开为行业排名,可访问性展开为网络带宽等等。

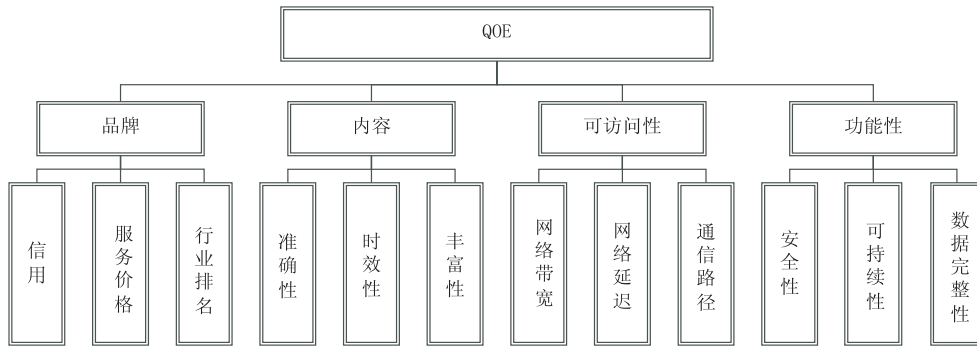


图 2 QOE 层次化评价模型

建立 QOE 评分层次体系结构之后,还需要确立与 QOE 相关的各个层次的评分权重,最后逐层向上追溯,便可确定最高层相较于底层的相对重要程度。

假设层次化模型有 n 层,第 i 层的评分项记为 h_i , $i \in [1, n]$ (n 一般取到 3);包含的 m 个子评分项记为 h_{i+1}^j , $j \in [1, m]$;则 h_i 和 h_{i+1}^j 之间的关系定义为:

$$h_i = \sum_{j=1}^m \theta_{i+1}^j h_{i+1}^j, \theta_{i+1}^j \geq 0 \quad (8)$$

其中, θ_{i+1}^j 为加权系数, $\sum \theta_{i+1}^j = 1$;需要指出的是,此处假设所有的评分取值均为整数,且界定在 $0 \sim G$ 之间(最小为 0,最大为 G)。

假设层次化模型的最底层有 n 个评分项,总评分为 S ,第 i 个评分项记为 l_i ,由于总评分和各子层之间存在线性关系,故总评分 S 可以写成与 l_i 的关系式,即:

$$S = \sum_{i=1}^n \beta_i l_i, \beta_i > 0 \quad (9)$$

其中, β_i 与各层加权系数有关, $\sum \beta_i = 1$ 。

层次化模型的最底层叶子节点给出的评分 l_i 来自用户的主观体验,研究领域的专家会为每一个影响因素指定一个客观的评分标准 p_i ,由此可以得出用户的

主观因素占基准评分的比例,用下式表示: $l_i/p_i = \eta_i$, η_i 为主观评价因子,代表用户的主观体验差异。

基于上述,可重写式(9)中的关系式:

$$S = \sum_{i=1}^n \beta_i \eta_i p_i \quad (10)$$

如果将主观评价因子和各层加权系数合并为 $\omega_i = \beta_i \eta_i$ 的表达式,则上式又可以重写为:

$$S = \sum_{i=1}^n \omega_i p_i, \omega_i > 0 \quad (11)$$

其中, ω_i 为用户对评分项 i 的偏好权重。

若采用矢量的形式表示 $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$,则式(11)可写成:

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{W}^T \quad (12)$$

式(12)称为 QOE 的量化评估函数。

通过 HA-ACO 获取到用户对这些服务的偏好顺序后,便可根据式(12)量化评估,最终确定特定服务提供给用户。

4 实验结果与分析

4.1 仿真实验设计

为了在智慧城市中高效选择满足用户需求的服务,该文提出了一种服务组合选择策略。服务组合策

略具体工作流程描述如下:

(1) 用户提出服务请求, CSCC 在用户数据库中查找用户的偏好。如果查找失败, 则后台初始化一个用户偏好;

(2) 利用改进的蚁群算法 HA-ACO 选择用户对所请求服务的偏好排序;

(3) CSCC 在第(2)步的基础上后台获取服务组合的基准评分, 基于式(12)中的满意度函数得到服务的 QOE 值; 选取最大 QOE 值的服务提供给用户;

(4) 获得用户对所使用服务的评价, 在数据库中更新用户的偏好以备下次进行服务匹配。

以上服务选择过程用 MATLAB 实现, 执行过程描述如下:

```
//为每个服务添加 QOE 属性值
if(E is not null)
{
    for(each e in E)
    {
        for (each service in service(e))
        {
            if( service_added is False)
            {
                Character_value = F( service );
                Service_added = True;
            }
        }
    }
}
//标注所有输入节点;
for (each si1 in si)
{
    if( tag( si1 ) = False)
    {
        tag( si1 ) = True;
    }
    else continue;
}
//求出满足用户需求的候选服务
for( each si1 -> si2 in kq)
{
    if ( si1 不可达 si2 )
        building new service ;
    else {
        if ( only one path satisfied si1 -> si2 and min( service( e ) ) )
            select service on this path;
        else
            利用 HA-ACO 算法求出所有 min( service( e ) ) 中的服务偏好
    }
}
```

```
}
//量化评估候选服务
if Ur-pref is not null
{
    get the basic service rates -> service_stat;
    QOE_value -> Ur_pref * service_stat;
    ID of the service with max QOE_value -> Svr_ID;
}
```

4.2 实验

本实验全部运行在一台 win10 64bit 操作系统、CPU 为 i5、内存为 8 GB 的计算机上, 使用 MATLAB 仿真实验。接入环境同时存在 WIFI 和 4G 网络。实验采用图 2 所示的三层评分体系结构, 第三层对应所需服务的各属性评分项, 评分标准参考文献 [12] 给出, 每一个模拟用户设置五种相应的偏好值, 有五个级别的评判标准, 即: $V = \{ \text{I 级, II 级, III 级, IV 级, V} \}$, 等级越高, 用户对服务越满意。

在服务选择问题求解过程中, 每一次算法的迭代时间太长都会造成服务组合问题求解速度慢的后果, 即使最后寻得最优解, 也会因无法满足实际问题需求而导致算法策略失效。为了验证提出的服务组合策略的有效性, 实验通过对比不同服务规模观察 CPU 的运行速度随迭代次数变化的情况。首先将服务种群规模设定为三种类型, 种群数量分别为 5、10、15, 借此来验证服务种群规模对算法运行时间的影响。其次, 设定算法的迭代次数分别为 10、20、30 和 40, 为了避免计算机稳定性对算法结果造成影响, 每种情况下分别运行 10 次, 取平均值, 如图 3 所示。

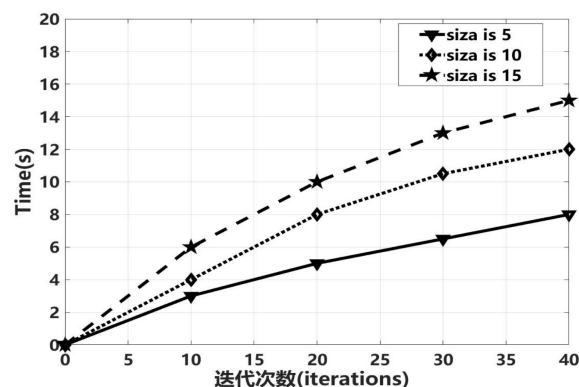


图 3 服务组合策略的平均执行时间

实验结果表明: 算法消耗的时间并没有随服务种群规模的增加而增大, 在种群规模为 10 时, 循环迭代 40 次所需要的时间仅 12 秒, 这个运算速度能够满足大多数用户在服务请求时的时间需求, 因此服务组合策略的有效性非常明显。

5 结束语

主要研究了求解智慧城市中服务组合选择问题以

及客户 QOE 量化评估问题,分别提出了相应的解决方案并应用于仿真实例中,取得了良好的结果。虽然该服务组合策略表现出较优的性能,但是仍存在许多不足之处,需要进一步改进和优化。实验仿真采用的数据是模拟真实的“服务请求→服务选择→服务分派”流程,虽然真实性很高,但是仍然缺乏现实物联网服务的大环境。下一步工作将应用服务组合选择策略到真实的服务数据中,以保证该方法在实际城市生活中的可行性和普适性。

参考文献:

- [1] PENG M, YAN S, ZHANG K, et al. Fog computing based radio access networks: issues and challenges[J]. IEEE Network, 2015, 30(4): 46-53.
- [2] LI Kun, JIANG Lili. The research of web services composition based on context in internet of things[C]//2012 IEEE international conference on computer science & automation engineering (CSAE). Zhangjiajie: IEEE, 2012: 160-163.
- [3] 柴晓路, 梁宇奇. Web Services 技术、架构和应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] BIDI S A H, MOVAHEDI Z, MOVAHEDI Z. QoE-aware service composition in smart cities using RESTful IoT[C]//2018 Iranian conference on electrical engineering (ICEE). Mashhad: IEEE, 2018: 1559-1564.
- [5] HAN S N, KHAN I, LEE G M, et al. Service composition for IP smart object using realtime Web protocols: concept and research challenges[J]. Computer Standards & Interfaces, 2016, 43(JAN.): 79-90.
- [6] ZENG L, BENATALLAH B, NGU A H H, et al. QoS-aware middleware for web services composition[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(5): 311-327.
- [7] SHARMA I, RAMKUMAR K R. A survey on ACO based multipath routing algorithms for ad hoc networks[J]. International Journal of Pervasive Computing and Communications, 2017, 13(4): 370-385.
- [8] 王秀亭, 马力. 基于蚁群算法的 Web 服务选择[J]. 现代电子技术, 2013, 36(12): 9-11.
- [9] 彭晓明, 何炎祥, 朱兵舰. 蚁群算法在 Web 服务组合中的应用[J]. 计算机工程, 2009, 35(10): 182-187.
- [10] 李东星, 陈喆, 钱双洋, 等. 改进蚁群算法及其在云服务组合优化中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(3): 13-20.
- [11] 李春林, 廖丹, 熊玲, 等. 一种基于 QoE 量化评估的服务选择算法[J]. 电子学报, 2015, 43(11): 2145-2150.
- [12] 熊润群, 罗军舟, 宋爱波, 等. 云计算环境下 QoS 偏好感知的副本选择策略[J]. 通信学报, 2011, 32(7): 93-102.
- [13] 高春鸣. 服务组合的形式化检验与 QoS 感知的服务组合方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [14] LIU Xuxun. Routing protocols based on ant colony optimization in wireless sensor networks: a survey[J]. IEEE Access, 2017, 5: 26303-26317.
- [15] MOOR K D, KETYKO I, JOSEPH W, et al. Proposed framework for evaluating quality of experience in a mobile, testbed-oriented living lab setting[J]. Mobile Networks & Applications, 2010, 15(3): 378-391.
- (上接第 175 页)
- vehicular cyber-physical systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(1): 263-284.
- [3] 樊娜, 朱光源, 康军, 等. 车联网环境下基于节点认知交互的路由算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(2): 518-522.
- [4] FLOREA A R, COSTEA I M. Analysis of improvements the urban transport conditions by using electronic intelligent transports systems case study: urban transportation[C]//Proceedings of the 2014 international conference on electronics, computers and artificial intelligence. Bucharest, Romania: IEEE, 2014: 73-78.
- [5] 李震. 智慧交通管理系统的设计与应用[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(5): 170-174.
- [6] 沈岑. 车联网通信安全与隐私防护机制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [7] KNORR F, BASELT D, SCHRECKENBERG M, et al. Reducing traffic jams via VANETs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(8): 3490-3498.
- [8] YUAN Quan, LIU Zhihan, LI Jinglin, et al. A traffic congestion detection and information dissemination scheme for urban expressways using vehicular networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 47(2): 114-127.
- [9] 王润民, 刘丁贝, 胡锦涛, 等. 车联网环境下基于模糊逻辑的交通拥堵检测方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(6): 1830-1834.
- [10] 孙扬, 杨贺. 无人驾驶车辆智能水平等级划分[J]. 科技导报, 2017, 35(17): 80-83.
- [11] 王智明, 徐雷, 陶冶. 5G 智能车联网安全研究初探[J]. 信息通信技术, 2019(6): 48-52.
- [12] 王丽君, 颜佳, 韩涛, 等. 车联网协作通信移动接入点选择算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(6): 41-45.
- [13] 王润民, 邓晓峰, 徐志刚, 等. 车联网仿真测试评价技术研究综述[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(7): 1921-1926.
- [14] 马小博, 彭嘉豪, 薛磊, 等. 5G 时代车联网信息物理融合系统综合安全研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(12): 1640-1658.
- [15] 冯安琪, 钱丽萍, 欧阳金源, 等. 车联网通过两级量化自适应卡尔曼滤波实现车辆状态预测[J]. 计算机科学, 2020, 47(5): 230-235.
- [16] 黄姝娟, 刘萍萍, 白小军, 等. 基于 STM32 的智能车控制系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(9): 185-188.