

## 第 3 章 部分可观测环境下迁移 workflow 服务导航方法

### 3.1 概述

在面向目标的迁移 workflow 方法中,每个工作位置上的服务主体可以作为导航主体对迁移实例提供导航服务。因为导航主体都只能为迁移实例提供自己基于局部 workflow 视图的帮助,相对于全局目标来说,它仅是一个部分可观测的环境,所以,单位置导航使得迁移实例可能得不到实现正确决策的充要信息,以至于造成迁移实例迷航或 workflow 中断。部分可观测环境中迁移实例的求解路径不偏离全局目标成为当前的技术难点之一。

在部分可观测的迁移 workflow 环境下,迁移 workflow 系统需要一种“主动”的机制保障迁移实例移动决策逼近全局目标。本章在第 2 章的研究基础上,通过导航主体在自己的业务熟人域内实现对迁移实例的导航,使迁移实例的每步移动决策都能逼近全局目标,又使产生的新工作位置具有可替代性。面向目标的迁移 workflow 服务导航方法,将显

式的全局性业务过程定义和 workflow 调度隐式地分布于由 workflow 参与者形成的业务熟人网络上。由于每个工作位置都是一个帮助迁移实例求解业务过程的知识源,因此,本质上也是一种基于分布式知识的工作流问题求解系统。基于分布式知识系统求解 workflow 问题,符合多 agent 系统特征,不仅可以有效降低对 workflow 设计者知识完备性的要求,而且可以增加 workflow 管理的柔性。

本章首先定义了部分可观测的迁移 workflow 环境,并建立了部分可观测环境下的服务导航模型;然后定义了通用的基于本体论(Ontology)的环境描述规范,用于解决部分可观测环境中不易描述的问题,使得导航主体可理解 workflow 环境的动态变化,并触发目标相关性评价;最后介绍了一个目标驱动的服务导航算法,促使导航主体为迁移实例提供满足寻航目标的服务,是实现面向目标的迁移 workflow 主动服务的有效方法。

### 3.2 部分可观测的迁移 workflow 环境

随着协同政务、协同商务、协同制造、协同诊疗、协同应急指挥等业务应用的不断深入,多机构、跨地域的大规模业务协作过程越来越多。囿于部门或机构分工及业务自治等原因,在多机构之间建立统一的工作流模型及中心化的 workflow 管理系统是困难的。虽然 WfMC 规范建议可

以通过不同 workflow 引擎之间的互操作,实现跨机构 workflow 管理系统之间的应用集成,但因为系统集成涉及任务分担模式、结果共享方式、数据转换格式、访问权限及访问路径设置等诸多因素,所以 workflow 设计者不仅要知晓完整的业务流程,而且要熟悉所有参与机构承担的业务及其应用接口功能。机构越多,业务协同范围越大,全局性知识就越复杂,就越难以掌握和完备,业务过程定义也就越难以完善。因此,workflow 设计者的知识难以完备、业务过程定义的完善性难以保证等问题,一直是制约 workflow 技术在跨机构大规模协同业务中推广应用的瓶颈。

在社会合作系统中,并非所有的工作流程都要在事前完整定义的前提下才能进行。例如,在行政许可联合审批工作流程中,申请者可能只知道与其申请相关的某个部门,不知或知之甚少需要联合审批的其他部门,以及其中的审批过程,申请者能做的就是直接去其知道的部门申请审批,表达自己的申请目标并听取该部门关于就地可以审批什么事项、下一步应该去何部门、审批什么事项的建议。其他审批部门还可以为申请人提供建议,所有审批部门的合理建议为申请者动态地定义了一个行政许可审批业务流程。

又如,在购物工作流程中,购物者可能只知道与其采购目标相关的某个商店或企业,对该商店或企业能否满足他的全部采购需求知之甚少,也不知道还有哪些商店或企

业可以为其提供采购服务,购物者能做的就是直接去其熟悉的商店或企业进行采购,表达自己的采购目标并听取该商店或企业关于就地可以采购什么物品、下一步应该去何商店或企业、采购什么物品的建议。其他的商店或企业还可以为申请人提供建议,所有商店或企业的合理建议为购物者动态地定义了一个购物业务流程。

上述的业务流程具有移动计算特征,可以采用移动 agent 计算模式进行管理。例如,许可申请人可以创建一个迁移实例,令其携带自己的审批文件和基础资料游走于各审批部门设置在网络上的许可审批受理结点之间,进行逐项事务审批。又如,购物人可以创建一个迁移实例,令其携带自己的购物清单和商务资料游走于各商店或企业设置在网络上的商务门户之间,进行比价采购。移动 agent 计算为 workflow 管理提供了对非中心化、松散耦合特性的支持,迁移 workflow 是其中的一个重要研究方向。现有的“让迁移实例清楚地知道做什么和需要什么”的设计思想,不仅要求事前建立 workflow 联盟,以便于为迁移实例规划工作位置或支持迁移实例服务发现;而且要求为移动迁移实例编写完整定义的业务过程说明,因此,同样会使 workflow 管理系统陷入机构越多,协同范围越大,设计难度就越高,也就越可能发生 workflow 例外的困境。

上面的分析表明:基于导航主体的工作位置推介和移动主体的迁移决策建立一种迁移 workflow 方法,允许工作

流在业务过程动态定义中执行,它将不再需要事前对业务过程进行完整的定义,也不需要事前建立完整的工作流联盟,因而不仅可以大大降低 workflow 计者的负担,而且会大大提高工作流的柔性,特别适用于那些多机构、大规模、全局业务过程定义困难并且具备移动计算特征的协同业务应用。

**定义 3-1** 服务导航是指当前工作位置向迁移实例推荐下一个合适的工作位置。

**定义 3-2** 部分可观测的迁移 workflow 环境 pomwe 是一个三元组  $(sg, wv, bad)$ , 其中,  $sg$  是迁移实例的寻航目标,  $wv$  是导航主体的业务熟人域;  $bad$  是导航主体的 workflow 视图。

本节提供一种基于本体论 (Ontology) 的环境描述规范,称为 workflow 环境描述规范 (Workflow Environment Description Criterion, WEDC)。图 3-1 显示了 WEDC 的基本结构。

在部分可观测环境中,业务熟人所在的工作位置能够提供的业务目标与寻航目标的关联度评价取决于导航主体对业务熟人的能力及相关细节的观测。对于导航主体而言,与寻航目标和导航结果相关的数据、信息以及 workflow 的当前状态属于局部信息。导航主体形成自己的业务熟人关系并触发导航行为,依赖对这些信息的观测与分析,另外也受到 workflow 全局目标的约束。WEDC 通过机器

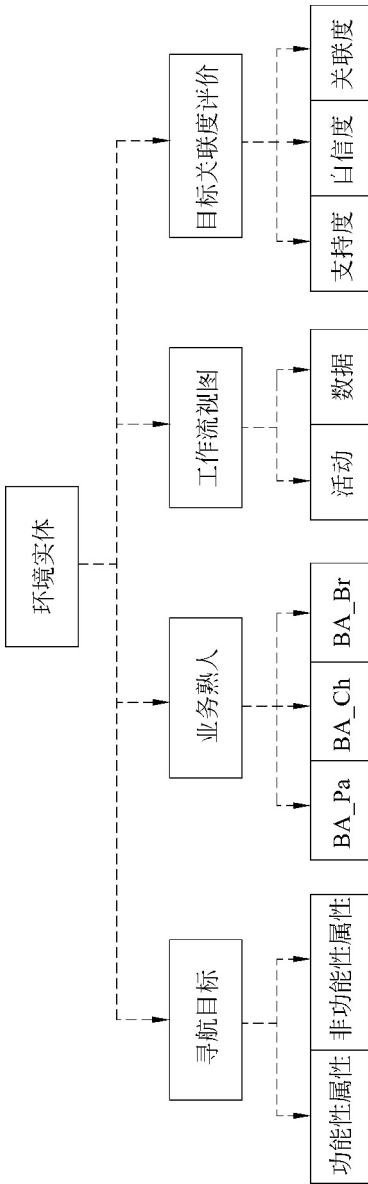


图 3-1 WEDC 的基本结构

可理解的方式,采用面向对象的方法描述观测结果。导航主体对于环境中可观测的每个实体都是环境实体的子类。WEDC 定义了 4 个直接继承于环境实体的子实体: 导航目标 (navigation requirement)、业务熟人 (business acquaintance)、工作流视图 (workflow view) 和目标关联度评价 (object relation appraisal)。

**定义 3-3** 导航目标  $sg$  是一个三元组  $(id, \{function\}, \{unfunction\})$ , 其中,  $id$  表示导航目标的标识;  $\{function\}$  表示导航目标的功能属性集合;  $\{unfunction\}$  表示导航目标的非功能属性集合。

导航目标表明了迁移实例的需求以及期望获得的服务或资源, 目的在于请求当前工作位置中的导航主体的导航建议。

工作流视图是对工作流流程的抽象, 用来支持工作流的部分可见性。

**定义 3-4** 工作流视图  $wv$  是一个二元组  $(activity, date)$ , 其中,  $activity$  表示活动的集合;  $date$  是由基本过程和活动得到的数据集合。

WEDC 为导航主体定义了 3 个子类的业务熟人:  $BA\_Pa$  用于表示业务目标与之为泛化关系的熟人;  $BA\_Ch$  指代业务目标与之为特殊化的熟人;  $BA\_Br$  指代业务目标与之为平级的熟人。

目标关联评价是指根据导航的需求, 导航主体通过业

务熟人的业务目标的支持度、能力自信度以及目标关联度三个方面对导航方案进行评价,作为服务导航的依据。

结合图 2-9 自助旅游服务系统的例子,给出 WEDC 定义的一个简单应用。以下自助旅游服务导航主体所收到的一个寻航请求:4 月 30 日到 5 月 3 日从北京出发,到济南旅游,费用不超过 3000 元。给出该导航主体所观测到环境实体的 WEDC 描述。

```
<navigation requirement>
  <requirement id>n1024</ requirement id>
  <name>self-help travel plan</name>
  <description>
    april 30th to may 3 i plan from beijing to
    jinan tourism.
  </description>
  <keyword list>
    <keyword>departures</keyword>
    <keyword>destination</keyword>
    <keyword>date</keyword>
    <keyword>costs</keyword>
  </keyword list>
  <restrictions>
    costs<=3000 元
  </restrictions>
  .....
</navigation requirement>

<workflow view>
```

```
<workflow description>
    self-help travel services system
</workflow description>
<workflow goal>
    provide self-help travel services
</workflow goal>

<documents>
    <sub document>ticket</sub document>
    <sub document>hotel</sub document>
    <sub document>insurance</sub document>
    ...
</documents>
...
</restrictions>

<business acquaintances>
    <acquaintance>
        <acquaintance id>ba1001</acquaintance id>
        <address>workstation ip</address>
        <business goal>ticket</business goal>
    <business relation>
        father-child
    </business relation>
    <keyword list>
        <keyword>departure time</keyword>
        <keyword>return time</keyword>
        <keyword>fares</keyword>
    </keyword list>
```

```
    </acquaintance>
  <acquaintance>
    <acquaintance id>ba1002</acquaintance id>
    <address>workstation ip</address >
    <business goal>hotel</business goal>
  <business relation>
    father-child
  </business relation>
  <keyword list>
    <keyword>check-in time</keyword>
    <keyword>check-out time</keyword>
    <keyword>accommodation costs</keyword>
  </keyword list>
</acquaintance>
...
</business acquaintances>

<object relation appraisalment>
  <user lists>
    <user>
      <requirement id>n1024</requirement id>
      <appraise data>
        <data>support</data>
        <data>self-confidence</data>
        <data>relation</data>
      </appraise data>
    </user>
    ...
  </navigation response>
```

### 3.3 部分可观测环境下的主动服务导航

人工智能领域中一项重要而长期的目标就是构造一个具有在复杂环境中能自动完成指定任务能力的 agent。人工智能规划正是可以达成这个目标的重要方法之一。它所研究的问题就是 agent 如何按照从环境中反馈回来的信息采取相应的行动。在这个规划框架下, agent 与其所处的环境是两个独立但又可以相互交互的部分。环境可以描述为一个状态的集合,在某一时刻, agent 可以通过执行某一动作而改变环境的状态。同时,环境的反馈提供了 agent 关于这种变化的信息。

决策论规划模型的核心就是所谓的马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP), 当一个规划问题用 MDP 来建模的时候, 问题的解就称为策略(policy)——行动到状态的映射, 即根据环境状态的反馈信息指出下一步的行动。在 MDP 中, 反馈信息实际上就是环境的状态。agent 所得到的是关于环境的精确信息, 换言之, MDP 是完全可观测(completely observable)的。

而部分可观测的马尔可夫决策过程(Partially Observable Markov Decision Processes, POMDP)则是 MDP 的推广。与 MDP 一样, 它假定行动的结果是非确定性的, 但与 MDP 不同的是, 它认为 agent 从环境得回的反

馈信息是不精确的,即只是部分可观测 (partially observable) 的。在部分观察的情况下,不再可以直接根据世界的状态选择行动,因此最多也就是根据观察知识来进行行为决策。部分 POMDP 为解决带有这种不确定性的规划问题提供了数学框架。众所周知,即使是对于简单的有限水平的 POMDP 问题,找到一个最优解也是 P-SPACE(Polynomial Space) 难题, POMDP 问题甚至比 NP 完全问题还要难以解决。POMDP 自从被提出以来,在人工智能和控制研究领域受到广泛关注,并且许多精确算法随之被提出。

在面向目标的迁移 workflow 系统中,工作位置中管理、执行服务导航的主体称为导航主体,它负责处理迁移实例的寻航请求,然后实时地向迁移实例推荐下一个工作位置,它所做的推介即称为导航策略。很自然地,导航系统可以被描述为一个状态机,导航的状态由一些状态变量构成,表示导航主体观察到的迁移实例的需求、推荐的结果以及导航的历史等,状态转移则由导航主体的导航策略来驱动。

面向目标的迁移 workflow 服务导航系统必须能在没有全局业务流程知识、全面了解其他工作位置能够提供的服务,以及不能准确理解迁移实例需求模型的情况下进行导航。在用 MDP 模型来描述导航系统时,导航主体要知道准确的系统状态,所以系统状态必须以导航主体的观察及

历史为基础,这就大大增加了建模的难度,而不确定性更会导致系统状态很难准确定义。如何在导航主体得不到准确的状态信息时寻找最优导航策略?部分可观测马尔可夫决策过程为此提供了一个理论框架,导航策略可被看作从某个观察到许多导航动作的概率分布的映射,同时还需要记住前面的动作和观察来帮助区分不同的状态。

### 3.3.1 部分可观测环境下的服务导航模型

在面向目标的迁移 workflow 系统中,导航主体负责预测迁移实例下一步的迁移决策,实时地向迁移实例推介业务熟人网的一个或多个服务主体。导航主体必须利用随机环境中部分观察到的信息、历史动作序列和立即报酬值来采用一种策略进行决策,为迁移实例进行导航。

**定义 3-5** 部分可观测环境的导航模型定义为六元组  $m = (s, a, z, r, t, o)$ , 其中:

$s$ : 表示 workflow 的状态集合,  $s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ;

$a$ : 导航主体的导航行动的集合,  $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ;

$z$ : 导航主体的观测集合,即迁移实例得到导航信息后反馈的有限集合以及熟人网络的变化;

$t: s * a \rightarrow s$ : 状态转移函数,当导航主体在某一状态  $s$  执行导航后,根据观察得到迁移实例和业务熟人网络的反馈,实现下一个状态  $s'$  概率分布,一般用  $t(s, a, z, s')$  来

表示；

$r: s * a \rightarrow r$ : 导航主体所获得的报酬函数, 是当前状态下采用导航动作时所获得的报酬值, 表示为  $r(s, a)$ ;

$o: s * a \rightarrow \text{PR}(o)$ : 表示导航主体采取导航行动  $a$  转移到状态  $s'$  时, 观测函数  $o$  确定其在可能观测上的概率分布, 一般用  $O(s', a, o)$  表示。

在面向目标的迁移 workflow 系统中, 导航主体不能得到完全的工作流状态信息, 所以使用信念状态表示导航主体所知道的工作流状态信息。

**定义 3-6** 信念状态表示的是导航主体对当前状态的一种信念, 是所有状态上的一个概率分布, 使用  $b: S \rightarrow [0, 1]$  来表示:  $b(s)$  表示处于状态  $s$  的概率, 满足  $\sum_{s \in S} b(s) = 1$ 。

在每个时间点, 导航主体都要更新自己的信念状态。根据 Bayes 原理, 新信念状态为

$$b(s') = O(s', a, o) \sum_{s \in S} T(s, a, z, s') b(s) / \text{Pr}(o | a, b) \quad (3-1)$$

其中,  $\text{Pr}(o | a, b)$  为归一因子。

评价函数为

$$\rho(b, a) = \sum_{s \in S} b(s) R(s, a) \quad (3-2)$$

有了信念状态, 导航主体的下一个信念状态和期望评价只与当前的信念状态和导航行为有关, 与历史导航动作

和观察无关,满足马尔可夫属性。图 3-2 给出了导航主体的部分可观测环境的导航模型,求解模型的方法转换为基于信念状态的马尔可夫决策过程。

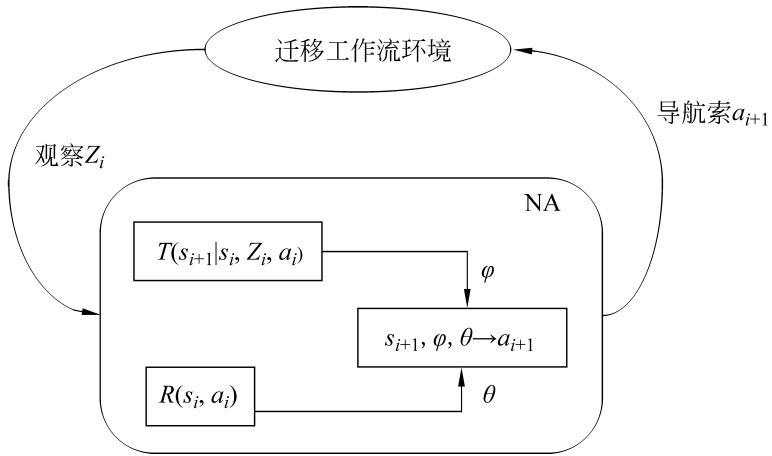


图 3-2 部分可观测环境的导航模型

用值迭代求解信念 MDP,可以采用近似算法 Fib,在当前时间点,部分可观测环境下的导航主体只能观测而不知道确切的状态信息,但是从下个时间点开始,导航主体将知道确切的状态信息,这样可以按照每个观察和每个状态信息来挑选最佳向量 $\alpha$ ,如式(3-3)所示,而不是根据每个观测和所有组合来挑选,其中 $\gamma$ 为折扣因子,目的是让期望值收敛。

$$\alpha_{i+1}^a(s) = R(s, a) + \gamma \sum_{o \in \mathbf{Z}} \max \sum_{s' \in \mathbf{S}} T(s, a, z, s')$$

$$O(s', a, o) \alpha_i^{a'}(s') \quad (3-3)$$

### 3.3.2 基于业务熟人网络的导航索生成

**定义 3-7** 导航索是指为迁移实例提供的一条迁移 workflow 执行路径,由满足迁移实例寻航目标的多个工作位置组成。

根据目标关联评价结果,导航主体可建立相应的导航索。在规划导航索时,导航主体计算其业务熟人关系范围内各工作位置的业务目标与寻航目标的关联度,故称为基于业务熟人网络的导航索生成机制。

导航主体对寻航目标  $sg = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  和业务目标  $bg = (p_1, p_2, \dots, p_m)$  ( $p_i$  为目标中所定义的属性)进行观测,计算目标支持度  $s$ 。

**定义 3-8** 目标支持度  $s$  :

$$s = \text{same}(sg, bg) / \text{diff}(sg, bg) - 1 \quad (3-4)$$

其中,  $\text{same}(sg, bg)$  表示两类目标中相同的属性个数;  $\text{diff}(sg, bg)$  表示属性中相异的属性个数。

设定一个阈值  $s$ ,对于目标关联支持度大于  $s$  的均可视为导航主体的业务熟人的业务目标对寻航目标具有一定的支持性,由此得到一个与寻航目标相关的推荐集合,结合导航主体对推介的业务熟人的能力自信度,进行目标关联度的计算公式如下:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(s_{ij} - sc_{ij})^2}{sc_{ij}} \quad (3-5)$$

其中,  $n$  表示寻航目标属性个数;  $m$  表示业务目标属性个数;  $s_{ij}$  是导航主体实际观测到的业务目标对寻航目标的支持度;  $sc_{ij}$  是导航主体关于其业务熟人能力自信度的计算, 在本书参考文献[47]中有详细的论述。该公式能够根据目标支持相关信息, 从当前的业务熟人网络得到较为准确的与寻航目标有关联关系的特定业务熟人。

下面给出目标驱动的服务导航算法  $odsn$ , 该算法实现了导航主体的业务熟人网络内的导航。

**算法 3-1** 目标驱动的服务导航( $odsn$ )。

**初始化阶段:**

```
do cbad(bg) //算法 2-2
生成业务熟人网络;
in 业务熟人网络
    按熟人能力自信度降序排序;
    设支持度阈值  $s$  和关联度阈值  $r$ ;
```

**运行阶段:**

```
导航索初始为 null;
{设置导航的期望状态为  $unsat$ ;
do
    {业务熟人网络内选取自信度最高的业务熟人;
    若多个业务熟人自信度相同则随机选取一个;
    计算  $s(sg, bg)$  //式 (3-4)
    if ( $s(sg, bg) < s$ ) //检测支持度是否小于阈值
        业务熟人移入  $fail\_list$ ;
```

```
        //失败列表中的业务熟人在当前服务导航中
        将不再被推介

    else
        {设置导航的期望状态为 sat;
        计算目标关联度  $r(sg, bg)$  ;           //式 (3-5)
        }
    if( $r(sg, bg) < r$ )           //检测关联度是否小于阈值
        {更新能力自信度;
        将满足条件的业务熟人插入的导航索中;
        }
    }while(导航的期望状态 == unsat or 熟人网络 != 失败列表);
if(导航的期望状态 == sat)
    return(导航索);
else
    return(null);
}
```

算法分为两个阶段：初始化阶段和运行阶段。初始化阶段待选业务熟人按能力自信度降序排序。初始阶段仅在系统部署的时候运行一次。运行阶段在每次接收到寻航请求时调用，以选择关联度最高的业务熟人参与导航索。该算法在最坏情况下的时间复杂度为  $O(n \times m)$  ( $n$  为候选业务熟人的数量； $m$  为寻航目标中的属性个数)，最坏情况是指没有满足需求业务熟人参与导航索。

## 3.4 验证与分析

为了验证本章所提出的目标驱动的服务导航算法能够有效保证面向目标迁移 workflow 主动服务的可靠性,实验以第2章建立的自助旅游服务系统为应用背景。本节设计了两个实验,对比参考文献[100]中的服务导航算法和目标驱动的服务导航算法 odsn 在部分可观测环境下迁移 workflow 执行的效果,主要以 workflow 服务导航成功率为性能指标进行验证。

在自助旅游服务系统中,旅游者寻航目标产生的同时从迁移 workflow 中“变化”相同数量的 workflow 视图子目标,变化的数量占总 workflow 视图数量的 10%。workflow 视图因主观因素或者客观原因不可完全观测,从图 3-3 可以看出在 workflow 子目标产生与消失比较频繁的情况下,本章提出的目标驱动的导航算法 odsn 具有较大优势,执行成功率比一般导航算法服务导航成功率高很多。

由图 3-4 所示,目标驱动的导航算法 odsn 刚开始运行时,由于业务熟人网络还未建立完善,基于业务熟人网络的服务导航的成功率并无优势,但是随着时间的推移,业务熟人网络逐步完善,服务导航的成功率也随之上升,而未考虑业务熟人关系的导航无此特性。

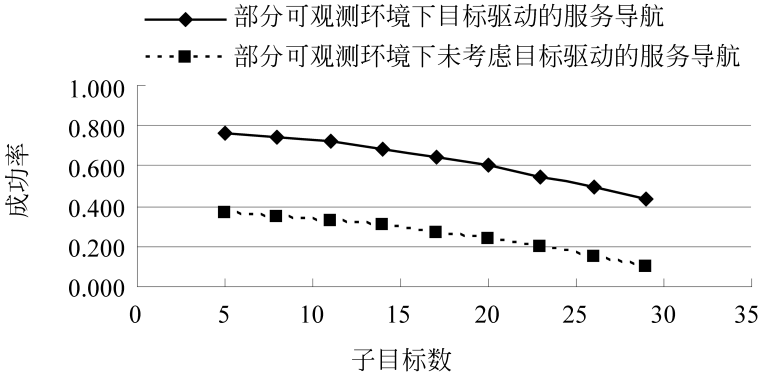


图 3-3 部分可观测环境下服务导航的成功率比较

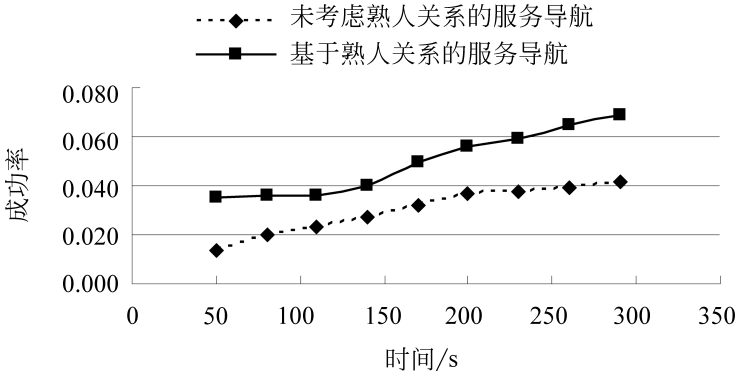


图 3-4 随时间变化的服务导航成功率比较