第 31 卷第 7 期
2014 年 7 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 31 No. 7
Jul. 2014

DOI: 10.7641/CTA.2014.31386

# 智能空间下基于分层任务网络的服务机器人任务规划

宋沐民, 路 飞†, 陆 娜, 田国会

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要**: 针对在复杂、动态的家庭环境下, 如何让机器人获取足够多的环境信息并根据环境信息进行自主的任务规划, 提出了智能空间技术支持下基于分层任务网络的服务机器人任务规划方案. 利用智能空间技术为机器人提供充足的环境上下文信息, 用基于分层任务网络设计的JSHOP2规划器执行机器人任务规划. 为了提高机器人任务规划的自主性和智能性, 在规划领域文件中加入不同的模板信息, 使机器人具有根据环境的不同自动对任务进行调整的能力. 仿真实验结果表明利用该方法能够有效地提高机器人任务规划的性能.

**关键词**: 智能空间; 分层任务网络; 任务规划; JSHOP2规划器; 上下文信息

**中图分类号**: TP242 **文献标识码**: A

# Task planning for service robot with hierarchical task network in intelligent space

SONG Mu-min, LU Fei†, LU Na, TIAN Guo-hui

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

**Abstract:** To deal with the problem of how to collect sufficient environment information and make autonomous task planning for service robot in complicated and dynamic home service environment, we propose a task planning method based on hierarchical task network with the support of intelligent space technology. The context information in the environment is provided for the robot through intelligent space and the robot task planning is executed by the JSHOP2 planner. In order to improve the autonomous and intelligent ability of the task planning, we add different template information to the planning domain file. With this help, the robot can adjust the task automatically depending on the environment. Simulation experiment demonstrates that the proposed method is feasible and can improve the performance of robot task planning.

**Key words:** intelligent space; hierarchical task network; task planning; JSHOP2 planning; context information

## 1 引言(Introduction)

随着机器人技术的发展, 服务机器人已经逐渐走进家庭、办公等场所, 为人类提供服务, 成为提高人类生活质量的一种新型工具、帮手. 面向服务任务的服务机器人的任务规划问题引起了学者的广泛关注, 服务机器人的工作环境多为医院、家庭、办公室, 这类环境具有高度的动态性和不确定性, 因此就增加了服务机器人任务规划的难度. 近年来, 众多学者针对家庭服务机器人的任务规划进行了大量研究[1–6], Yuchul Jung等提出了基于认知情况的服务机器人规划框架[7], 机器人的任务完成大多基于人－机交互, 即任务的执行需要人的指导. 尤其是在环境发生变化时, 机器人缺乏对环境和任务变化的感知、认识的主动性, 需要主人不断和机器人交互, 对机器人进行指导. Yong-Hwi Kim研究了以最小化执行时间为目标的多个医院服务机器人任务规划[8], Marcello Cirillo 研究了感知人类的移动机器人任务规划[9], Jun Zhang, Yi Zeng提出了基于记忆库的信息获取和任务规划模式[10–11], 当环境信息不充足的时候, 通过记忆库推理获取所需要的环境信息. 但是此算法有运行复杂、执行所需的时间较长等不足.

任务规划在一定程度上标志着机器人的智能水平, 是进行规划与决策的关键. 要想使机器人真正走入家庭, 在人机共存的环境下成为人们日常生活中的“ubiquitous”部分, 实现与人和谐相处, 提供智能型的服务, 机器人必须具备“类人的智能”, 能够模仿人的任务规划方式来进行自主的任务规划: 在动态环境中根据场景状态将任务规划、任务执行整合进行. 而机器人要想模仿人进行任务规划的思维方式, 在复杂环境下动态地在线进行任务的规划与执行, 机器人对环境信息的感知和处理能力是实现上述目的的基础.

收稿日期: 2013－12－31; 录用日期: 2014－02－26.
†通信作者. E-mail: lawyerlf@sdu.edu.cn; Tel.: +86 13606373537.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61305122); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2011FM011); 山东大学自主创新基金资助项目(2012TS077).

近年来, 虽然机器人技术、高端传感器技术得到了长足的发展, 但是面对非结构化环境中大量的处理数据和各种动态因素的干扰, 已有的研究成果往往在具体实现的过程中难以达到良好的效果或者难以实施. 随着计算机、通讯技术的发展, 基于成本相对较低的智能空间(intelligent space)技术的服务机器人模式已经成必然趋势. 通过智能空间"无所不在"(ubiquitous)的环境智能来提高机器人对环境的感知、处理能力已经成为未来机器人应用的重要支撑手段. 基于机器人与智能空间交互和协调机制的复杂动态环境下的机器人任务规划是提高机器人任务执行能力和服务质量、促进服务机器人真正实用化的必然之路.

本文提出了在智能空间技术支持下基于分层任务网络的服务机器人任务规划方案. 首先基于分层任务网络设计家庭环境下的各种机器人任务, 生成领域描述文件; 其次利用智能空间中各种智能设备和传感器提供的环境信息, 在数据处理与融合之后, 通过有线或无线网络传递给机器人规划系统, 并结合用户的请求生成问题文件. 最后将上述两种文件作为智能规划器JSHOP2的输入, 在规划器中经过问题解析和规划即可生成机器人服务任务规划列表. 在领域文件中加入不同的模板信息, 使机器人具有根据环境的变化自动对任务进行调整的能力, 无需进行人机交互, 提高机器人自主性和用户满意度. 经过仿真平台验证, 该系统能够有效地对用户请求的任务进行智能规划.

## 2 智能空间技术(Intelligent space technology)

智能空间技术是一个刚刚兴起的前沿方向, 它集信息化、智能化、理解和决策控制为一体, 能使一个独立个体在非确定结构环境下, 迅速理解和适应未知环境, 实现高效的工作以完成预期目标. 1996年日本东京大学的Hashimoto实验室提出了"智能空间"的概念[12–13], 它是在某一空间中适当布置感应装置, 如电荷耦合器件(CCD)摄像机、麦克风、显示器等设备, 通过有线或无线网络连接到一起, 实时感知空间中发生的事件并做出相应的处理决策: 智能空间的概念可涵盖办公大楼、办公室、家庭居室、医院、敬老院、车间甚至野外空间等, 在该区域中安放的各种传感器(如: 分布式视觉、超声、激光、温度、湿度、光照、声音、气体等传感器)通过计算机和网络设备构成无缝网络, 利用硬件和软件集成使之成为智能空间, 从而能够为用户提供无缝的信息服务[14].

近年来国际上对智能空间的研究开展地较为广泛, 如麻省理工学院人工智能实验室(MIT AI Lab)的Intelligent Room[15]、斯坦福(Stanford)大学的Interactive Workspace、佐治亚技术理工学院(GIT)的Aware Home、微软研究院(Microsoft Research)的Easy Living[16]、德国信息技术国家研究中心(GMD)的iLand等. 目前, 国内各高校对智能空间技术以及该技术在机器人领域的应用展开了广泛的研究. 例如清华大学在Smart Classroom[17]、北京航天大学在家庭服务机器人混合定位[18]、吉林大学在多摄像头的标定技术[19]、东南大学在智能环境的服务构件及机器人定位[20]、燕山大学在智能空间辅助机器人定位[21]、西北工大在场景识别[22]、哈尔滨工业大学在基于智能空间的机器人3D运动规划[23]、南京大学在智能空间的资源管理[24]、山东大学在智能空间的位置感知、多目标跟踪、地图构建、人工地标、物标的设计与理论研究、基于QR Code的多种类物体识别与抓取和异构网络的构建[25–30]等方面进行了大量的前期基础研究, 并取得一些初步的研究成果.

由于在智能空间下可以大大降低对机器人本身硬件和软件设备的要求, 而且智能空间技术可以为机器人提供完备的环境信息, 所以应用智能空间技术可以有效地解决传统任务规划中环境信息获取不完整问题, 避免了重新获取环境信息的过程. 智能空间技术为机器人服务任务规划提供了信息支持, 能够有效地提高机器人任务规划的准确性和快速性.

## 3 智能空间下基于 HTN 的机器人任务规划 (Robot task planning based on HTN in intelligent space)

### 3.1 分层任务网络规划和JSHOP2规划器(Hierarchical task network planning and JSHOP2 planner)

分层任务网络(hierarchical task network, HTN)规划是基于知识的分布式规划技术, 属于智能规划的一种. 该方法通过将某个任务分解成一些子任务(subtask), 继而分解出可以直接执行的规划动作, 即原子任务. 与经典的智能规划类似, 分层任务网络用一个原子任务(atoms)集合来表示系统状态, 动作对应于确定的状态转换, 其目标是产生一个完成某个任务的动作序列[31].

本文选取的规划引擎是JSHOP2, 它是SHOP2的Java版本, SHOP2是一个基于分层任务网络的与领域无关的智能规划器[32–33]. SHOP2的特点是从初始状态向前规划, 规划和执行顺序相同, 即边规划边执行. 所以在规划过程中的每个点上, SHOP2已经知道在这个点之前所执行的操作, 故SHOP2了解当前状态, 这种技术使得SHOP2的预处理估计机制相当强大. JSHOP2规划器的输入文件包括规划领域和规划问题两种.

1) 规划领域.

规划领域由一系列的操作(operators)、方法(methods)组成.

① 任务.

一个任务就表示一个要执行的动作, 规划领域文件中的一个任务由任务名和紧随其后的任务参数表组成. 任务既可以是原子任务, 也可以是非原子任务. 原子任务可以直接被执行, 而非原子任务则需要通过方法将其分解成可以执行的原子任务.

② 操作.

操作规定了一个原子任务将如何被执行, JSHOP2中的操作定义为以下格式:

(:operator head Pre Del Add)

其中:

:operator: 关键字, 表示这是一个操作;

head: 包含操作的名称和参数列表;

Pre: 表明了执行该操作必须满足的前提条件;

Del和Add: 申明执行操作后对系统产生的影响.

操作的影响是通过申明删除列表(delete list)和添加列表(add list)来实现的.

③ 方法.

方法指明了如何将一个非原子任务拆分成一系列的子任务. 子任务可以是原子任务, 也可以是非原子任务. 在JSHOP2中, 方法的定义如下:

(:method head $\mathrm{Pre}_1$ $\mathrm{subtask}_1$ $\mathrm{Pre}_2$ $\mathrm{subtask}_2$ $\cdots$)

其中:

:method: 关键字, 表明这是一个方法;

head: 包含方法的名称和参数列表;

$\mathrm{Pre}_i$: 前置条件表达式, 指明执行该方法需要的前提条件;

$\mathrm{subtask}_i$: 当前方法将任务拆分成的子服务列表.

方法的执行类似于程序设计中的if-then-else结构. 如果$\mathrm{Pre}_1$满足, 那么子任务$\mathrm{subtask}_1$被执行, 否则, 如果$\mathrm{Pre}_1$不满足, $\mathrm{Pre}_2$满足, 那么$\mathrm{subtask}_2$被执行, 以此类推.

图1给出了JSHOP2领域文件的操作和方法的例子.

```
(:operator   (!drop  ?a)
             ((have  ?a))
             ((have  ?a))
             ()
)

(:method (swap  ?x  ?y)
     ((have  ?x)  (not(have  ?y)))
     ((!drop  ?x)  (!pickup  ?y))
     ((have  ?y)  (not (have  ?x)))
     ((!drop  ?y)  (!pickup  ?x)))
```

图 1 领域文件的操作和方法示意图

Fig. 1 The operator and method of domain file

2) 规划问题.

规划问题可以用一个三元组$(S, T, D)$表示: $S$是初始状态; $T$是任务表; $D$是规划领域描述. 通过把这个三元组作为JSHOP2规划器的输入, JSHOP2将返回一个规划列表P.

3) JSHOP2规划实例.

图 2 给出了基于HTN设计的JSHOP2规划器分解和规划的实例解析图. 白底框表示的是非原子任务, 浅灰底框表示的是原子任务, 深灰底框表示的是规划所需的前提条件和规划执行时状态的变化. 从图中可以看出当前提条件(have ?x)和(not(have ?y))同时满足时, (swap ?x ?y) 任务就被分解成了(!drop ?x) 和(!pickup ?y)两个原子任务. 粗箭头表示任务的执行顺序, 即这两个原子任务只能按照(!drop ?x)→(!pickup ?y)的顺序执行. 左下角深灰底框中的Pre: (have ?x), Del: (have ?x)表示执行原子任务(!drop ?x)需要满足前提条件(have ?x), 并且该任务执行完以后需要删除的列表是(have ?x). 右下角深灰底框表示执行原子任务(!pickup ?y)需要满足前提条件(not(have ?x)), 并且该任务执行完以后需要增加的列表是(have ?y). 即如果机器人被要求执行交换?x和?y的任务, 如果机器人现在拥有?x, 没有拥有?y, 那么机器人应该先把?x丢掉, 然后再去取?y. 而当机器人执行(!drop ?x)以后, 机器人就不拥有?x了, 所以此时要把(have ?x)列表项删除. 同理当执行完(!pickup ?y)以后, 机器人就拥有了?y, 所以此时要添加(have ?y)列表项. 这就是JSHOP2的任务分解和规划原理.

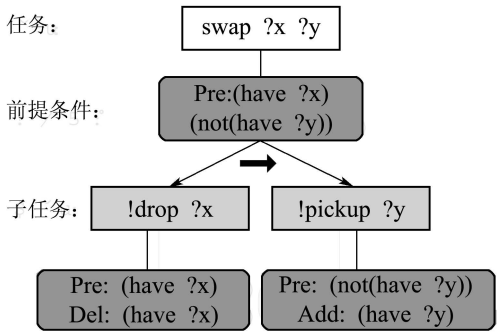



图 2 基于HTN的JSHOP2规划实例

Fig. 2 The example of JSHOP2 planning based on HTN

### 3.2 智能空间下基于 HTN 的机器人任务规划 (Robot task planning based on HTN in intelligent space)

#### 3.2.1 系统结构(The system structure)

智能空间下基于HTN的机器人任务规划系统结构如图3所示. 该系统主要分为3部分: 规划领域、规划问题和JSHOP2规划.

1) 规划领域.

由于JSHOP2是一个与领域无关的规划器, 所以本文的规划领域部分可以在家庭服务任务和机器人执

行能力背景下人为制定, 例如行走、物品抓取等行为. 如前面第3.1部分所述, 可以在方法中制定任务的拆分方式, 将家庭服务任务分解成许多子任务, 直到分解为可以被机器人直接执行的原子任务为止, 也就是在操作中定义的具体动作.

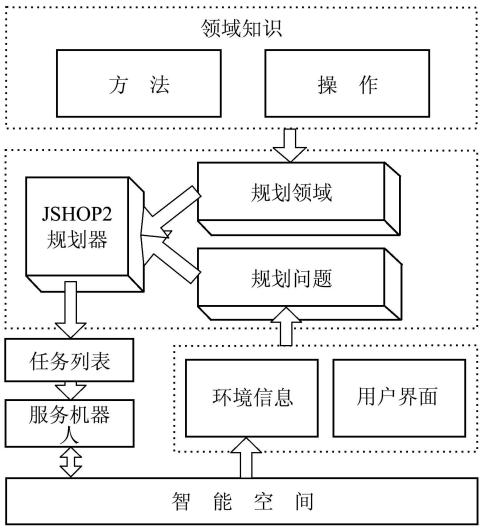



图 3 系统结构图

Fig. 3 System structure

2) 规划问题.

与规划领域不同, 规划问题描述随着环境信息和用户请求的变化而变化. 每次任务规划之前, 系统会根据智能空间返回的当前环境信息和用户界面返回用户请求自动生成规划问题描述文件. 借助智能空间中的各种传感器设备和信息融合数据处理等技术, 利用有线或无线网络, 智能空间可以向规划器传送规划中所需要的足够的环境信息, 比如用户和物品的位置信息、状态信息等.

3) JSHOP2规划器.

规划领域文件定义好以后, 结合实时生成的规划问题描述文件, 将这两个文件通过JSHOP2规划器编译执行即可生成原子任务列表, 机器人根据任务列表中的执行顺序执行. 执行过程中机器人可以与智能空间进行信息交互, 实现任务执行状态反馈和信息更新.

### 3.2.2 基于HTN的机器人任务规划实例(The example of robot task planning based on HTN)

考虑在家庭环境下, 机器人被请求送水的过程. 在此任务规划过程中所需的前提条件即环境信息由智能空间提供. 图4给出了send_water任务的分解和规划流程. 图中: 深灰底节点代表用户请求的任务, 浅灰底节点代表分解成的一系列子任务, 白底节点代表原子任务, 即机器人可以直接执行的任务. 图中水平的粗箭头表示该层任务执行的顺序. 图4最上端的节点send_water(person1)说明用户person1请求送水, 规划器将根据在规划领域文件中定义的分解方法将该任务分解为gopick (cup table1), pourwater 和 handto (person1 bed-room)3个子任务. gopick(cup table1)节点表明第1个子任务是拿杯子. 拿杯子的过程又可以分解为两个子过程: !moveto(table1 room1) 和 !pick (cup table1). 感叹号表示该任务为原子任务, 只要条件充足, 机器人可以直接执行该过程, 不需要再进行任务分解.

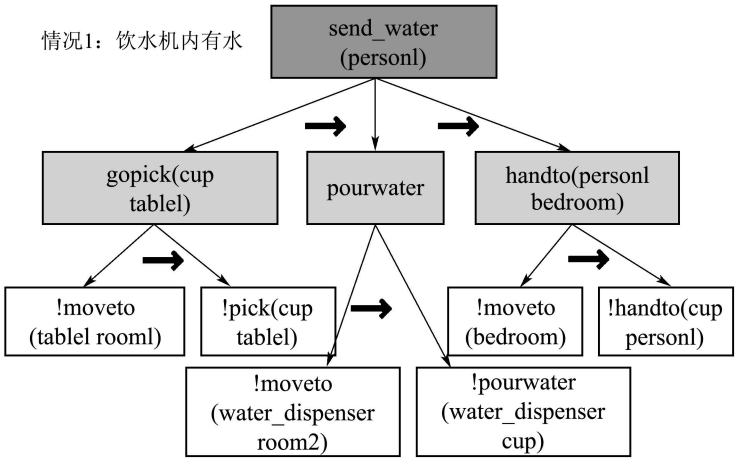



图 4 send_water任务的分解和规划流程图(情况1)

Fig. 4 The decomposition and planning flowchart of send_water(Case1)

通过智能空间提供的信息, 可以得到cup的位置在table1上, 而table1在room1房间内. 因此机器人应该先移动到room1内, 即!moveto(table1 room1), 然后执行拿杯子的过程, 即!pick(cup table1). 机器人拿到杯子以后, 继续执行下一步, 去饮水机处倒水的过程. 该过程与上述过程类似, 不再一一赘述.

为了提高机器人的自主性, 本文提出在规划领域中加入不同的模板信息, 使机器人可以根据环境

的不同采取不同的执行方案. 考虑以下情况, 机器人在去饮水机处倒水的过程中, 如果饮水机中没有水, 那么执行此过程将会出现错误. 此时机器人可以终止任务或者借助人机交互系统向用户寻求帮助, 但是过多的人机交互降低了机器人的智能性. 对于这种情况, 笔者加入了饮水机有水和饮水机没有水两种不同情况的模板.

由于规划领域文件人为制定, 因此可以在方法中任意添加模板信息. 对于饮水机有水和没水两种信息, 可以将其添加到图4中的子任务pourwater的方法描述中. 但是如果机器人取完杯子以后发现饮水机中没有水, 然后转向冰箱拿饮料. 那么之前执行的拿杯子过程就属于无效的执行, 因为已经用不到杯子了, 而且机器人还要把杯子放回原处. 这样就使机器人执行了不必要的操作而且浪费了时间. 为了优化该过程, 可以把判断饮水机中有没有水的过程添加到取杯子之前, 如果饮水机内没有水, 则无需取杯子, 直接执行去冰箱拿饮料的过程. 既节省了时间, 提高了用户的满意度, 又避免了不必要的执行, 提高了机器人自主性. 该过程的规划领域代码如图5所示.

```
(:method (send_water ?p)
  Casel;dispenser has water
   ((haswater ?water_dispenser))
   ((gopick ?cup ?cup_pos)
      (pourwater ?water_dispenser ?cup)
      (handto ?p ?person_pos ?cup))

  Case2;dispenser has no water
   ((not (haswater ?water_dispenser)))
   ((!warning_there_is_no_water_in_water_dispenser)
      (getdrink ?drink ?refrigerator)
      (handto ?p ?person_pos ?drink))
)
```

图 5 规划领域的不同模板表示

Fig. 5 Different template description of planning domain

图4表示的是当饮水机有水时的任务分解与规划情况, 当饮水机中没有水时, 具体规划如图6所示.

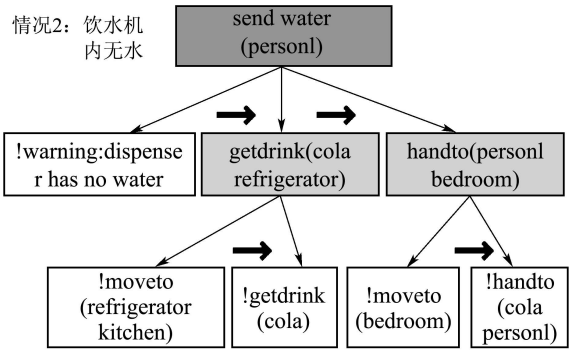
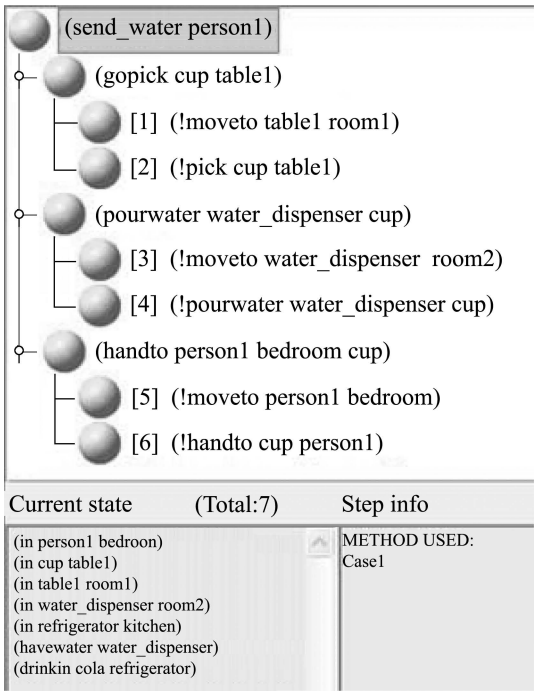



图 6 send_water任务的分解和规划流程图(情况2)

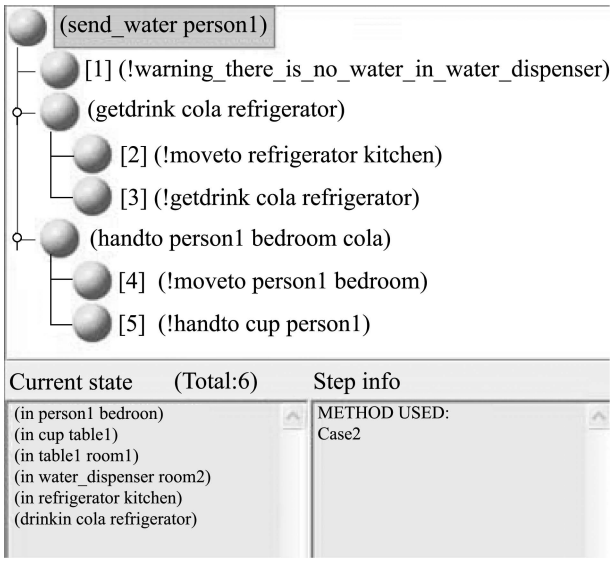
Fig. 6 The decomposition and planning flowchart of send_water(Case2)

## 4 仿真结果(Simulation results)

对于上文中提到的例子, 本文进行了实例仿真. 图7(a)给出了在饮水机有水时机器人任务规划列表, 图7(b)给出了在饮水机没有水时的任务规划列表.




(a) 饮水机内有水




(b) 饮水机内无水

图 7 不同情况下的仿真结果

Fig. 7 Results of planning in different conditions

有数字标记的任务是原子任务, 可以由机器人直接执行. 数字表示了任务执行的顺序. 两幅图片的左下角Current state框列出了当前环境信息列表, 是由智能空间获取的信息经过数据融合和处理转换成的列表形式. 例如: (in person1 bedroom) 表示用户person1当前的位置是在房间bedroom内. 图的右

下角Step Info框表示机器人每执行一个任务后的机器人或环境状态变化情况. 仿真结果显示该系统完成一次基本机器人任务规划的时间不足1 ms, 证明该系统能够根据用户请求实现任务规划. 而且加入了不同的模板信息后, 系统能够根据环境的不同改变执行策略, 提高了机器人自主性. 而且该系统与传统的借助机器人自身传感器获取环境信息的规划相比, 借助智能空间技术可以有效地为机器人提供充足的环境信息, 提高了规划效率, 大大缩减了机器人任务规划和执行的时间.

## 5 结论(Conclusions)

本文主要研究了智能空间下家庭服务机器人的任务规划问题. 借助于智能空间技术的支持, 利用智能空间中各种传感器设备和数据融合与处理, 通过有线或无线网络传递给机器人规划系统, 能够实时、快速、准确地为机器人提供充分的环境信息. 应用基于分层任务网络设计的JSHOP2规划器, 向规划器中输入规划领域文件和规划问题文件, 经过问题解析和规划即可生成规划列表. 在领域文件中加入不同的模板信息, 使机器人具有根据环境的变化自动对任务进行调整的能力, 提高机器人自主性和用户满意度. 经过仿真平台验证, 该系统能够快速有效地对用户请求的任务进行智能规划. 但是本文只在规划的最初阶段获取了环境信息, 并没有考虑到规划过程中环境信息的变化, 具有一定的局限性. 下一步将考虑在规划过程中环境信息变化时的任务规划, 加入重规划过程, 进一步提高智能空间下机器人规划的智能性.

## 参考文献(References):


[1] JI Z, QIU R X, LI D Y, et al. Towards automated task planning for service robots using semantic knowledge representation [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Informatics*. Beijing: IEEE, 2012: 1194 – 1201.

[2] JO H W, AHN J H, PARK J S, et al. Task planning for service robots with optimal supervisory control [C] //*Proceedings of IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics*. Singapore: IEEE, 2010: 303 – 308.

[3] KANG D, CHOI H J. Robot task planning for mixed-initiative human robot interaction in home service robot [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Computer and Information Technology Workshops*. Sydney, QLD: IEEE, 2008: 49 – 54.

[4] HEYER T, GRASER A. Semi-autonomous initial monitoring for context-aware task planning [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Budapest: IEEE, 2011: 667 – 672.

[5] 陈卫东, 席裕庚, 顾冬雷, 等. 一个面向复杂任务的多机器人分布式协调系统 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 505 – 510.
(CHEN Weidong, XI Yugend, GU Donglei, et al. Complex task oriented multi-robot distributed coordination system [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 505 – 510.)

[6] 路飞, 宋沐民, 田国会, 等. 基于事件的设计与控制技术及其在机器人系统中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2007, 23(5): 756 – 762.
(LU Fei, SONG Mumin, TIAN Guohui, et al. Event-based planning and control technology and the application in robotic system [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 23(5): 756 – 762.)

[7] JUNG Y, PARK H, CHOI H J, et al. Designing a cognitive case-based planning framework for home service robots [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication*. Jeju: IEEE, 2007: 827 – 832.

[8] KIM Y H, KIM B K. A multi-robot task planning system minimizing the total execution time for hospital service [C] //*Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems*. Gyeonggi-do: IEEE, 2010: 379 – 384.

[9] CIRILLO M, KARLSSON L, SAFFIOTTI A. Human-aware task planning for mobile robots [C] //*Proceedings of International Conference on Advanced Robotics*. Munich: IEEE, 2009: 1 – 7.

[10] ZHANG J, ZHANG L, LI X Y, et al. Integrating HTN planner in cleaning-security robot: Handling planning with memory and problem template [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*. Hong Kong and Macau: IEEE, 2010: 55 – 60.

[11] ZENG Y, ZHANG J, LU W W, et al. Memory-based hierarchical task and motion planning [C] //*Proceedings of International Conference on Information and Automation*. Shenyang: IEEE, 2012: 412 – 417.

[12] LEE J H, ANDO N, HASHIMOTO H. Design policy of intelligent space [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Tokyo: IEEE, 1999: 1077 – 1082.

[13] LEE J H, HASHIMOTO H. Intelligent space [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Takamatsu: IEEE, 2000: 1358 – 1363.

[14] HASHIMOTO H. Intelligent interactive spaces-integration of IT and robotics [C] //*IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Inpacts*. Nagoya, Japan: IEEE, 2005: 85 – 90.

[15] BROOKS R A. The intelligent room project [C] //*Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Technology*. Aizu-Wakamatsu: IEEE, 1997: 271 – 278.

[16] BRUMITT B, MEYERS B, KRUMM J, et al. Easyliving: technologies for intelligent environments [C] //*Handheld and Ubiquitous Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 12 – 29.

[17] SHI Y C, XIE W K, XU G Y. The smart classroom: merging technologies for seamless tele-education [J]. *IEEE Transactions on Pervasive Computing*, 2003, 2(2): 47 – 55.

[18] 王田苗, 陶永, 魏洪兴, 等. 基于智能空间的家庭服务机器人混合定位方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 231 – 235.
(WANG Tianmiao, TAO Yong, WEI Hongxing, et al. Hybird location method for home service robot based on intelligent space [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(2): 231 – 235.)

[19] 卢韶芳, 刘大维, 陈秉聪. 自主式移动机器人分布视觉组合导航多摄像机标定方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(3): 387 – 393.
(LU Shaofang, LIU Dawei, CHEN Bingcong. Muti-camera calibration used in distributed vision composite navigation of autonomous mobile robot [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2006, 36(3): 387 – 393.)

[20] 梁志伟, 金欣, 朱松豪. 面向服务机器人的智能环境服务构件开发方法 [J]. 机器人, 2012, 34(3): 337 – 343.
(LIANG Zhiwei, JIN Xin, ZHU Songhao. Development approaches of smart space service components for service robots [J]. *Robot*, 2012, 34(3): 337 – 343.)

[21] 杨学永, 孔令富, 吴培良. 智能空间辅助家庭服务机器人的定位方法 [J]. 计算机仿真, 2011, 28(10): 165 – 167.
(YANG Xueyong, KONG Lingfu, WU Peiliang. Smart space support family services robot positioning [J]. *Computer Simulator*, 2011, 28(10): 165 – 167.)

[22] 何彦斌, 杨志义, 马荟, 等. 一种基于HMM的场景识别方法 [J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 254 – 256.
(HE Yanbin, YANG Zhiyi, MA Hui, et al. Method of situation recognition based on hidden markov method [J]. *Computer Science*, 2011, 38(4): 254 – 256.)

[23] 赵杰, 庞明, 樊继壮. 基于智能空间的三肢体仿生机器人3D运动规划 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 311 – 315.
(ZHAO Jie, PANG Ming, FAN Jizhuang. 3D motion planning of a three-limbed robot for intelligent space [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(3): 311 – 315.)

[24] 张璟璟, 汪亮, 陶先平, 等. 智能空间的资源管理及其应用研究 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(1): 77 – 84.
(ZHANG Jingjing, WANG Liang, TAO Xianping, et al. Research on the resource management in smart space and its application [J]. *Journal of Nanjing University (Nature Sciences)*, 2010, 46(1): 77 – 84.)

[25] 黄彬, 田国会, 李晓磊. 利用轮廓特征识别人的日常行为 [J]. 光电子 · 激光, 2008, 19(12): 1686 – 1689.
(HUANG Bin, TIAN Guohui, LI Xiaolei. Human daily action recognition using image contour [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(12): 1686 – 1689.)

[26] 田国会, 李晓磊, 卜范骞, 等. 基于智能空间的家庭服务机器人SLAM [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36: 189 – 192.
(TIAN Guohui, LI Xiaolei, BU Fanqian, et al. SLAM of home service robot based on intelligent space [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 36: 189 – 192.)

[27] LU F, TIAN G H. Building an intelligent home environment for service robot based on multi-pattern information model and wireless sensor networks [J]. *Journal of Information Control and Automation*, 2012, 3(1): 24 – 28.

[28] LU F, TIAN G H. The zigbee based wireless sensor and actor network in intelligent space oriented to home service robot [J]. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2012, 5(5): 280 – 285.

[29] LU F, WANG X R, TIAN G H. The structure and application of intelligent space system oriented to home service robot [C] //*Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation*. Shenyang: IEEE, 2012: 289 – 294.

[30] 田国会, 吉艳青, 李晓磊. 智能空间下基于场景的行为理解 [J]. 智能系统学报, 2010, 5(1): 57 – 62.
(TIAN Guohui, JI Yanqing, LI Xiaolei. Human behaviors understanding based on scene knowledge in home intelligent space [J]. *CAAI Transaction on Intelligent Systems*, 2010, 5(1): 57 – 62.)

[31] NAU D S, AU T C, ILGHAMI O, et al. SHOP2: an HTN planning system [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2013, 20(1): 379 – 404.

[32] ILGHAMI O. *Documentation for JSHOP2* [R]. Park: Department of Computer Science, University of Maryland, 2006.

[33] WESER M, OFF D, ZHANG J. HTN robot planning in partially observable dynamic environments [C] //*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*. Anchorage, AK: IEEE, 2010: 1505 – 1510.

## 作者简介:

**宋沐民** (1968–), 男, 第5届(1998年)《关肇直奖》获奖论文作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人、智能控制等, E-mail: mumin_song@ ansontrust.com;

**路 飞** (1973–), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能空间技术、服务机器人、智能控制, E-mail: lawyerlf@sdu.edu.cn;

**陆 娜** (1988–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为智能空间技术、机器人, E-mail: luna5848w@163.com;

**田国会** (1969–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能空间技术、服务机器人、智能控制, E-mail: g.h.tian@sdu.edu.cn.