

智能体 Petri 网融合的多机器人-多任务协调框架

李勇¹ 李坤成¹ 孙柏青¹ 张秋豪¹ 王义娜¹ 杨俊友¹

摘要 为解决异构的服务机器人团队为多位老人服务时的协调问题以及在此过程中如何最大化老人的总体满意度,提出了一种服务于多人的多机器人-多任务协调框架. 首先,结合时延 Petri 网和颜色 Petri 网提出了可扩展时延-颜色 Petri 网 (Scalable timed-colored Petri net, STdCPN) 对养老院情境下服务机器人照顾老人的过程进行建模. 然后,将老人的感受和情绪作为机器人照顾老人时的重要指标,构建了服务对象满意度模型. 最后,设计智能体来实现该协调框架的调度,该智能体通过考虑老人“个人因素”和机器人的实时状态、位置等信息来对任务进行合理的规划调度,使机器人帮助老人完成任务的同时,最大化老人总体满意度.

关键词 多机器人协调, 满意度, Petri 网, 智能体

引用格式 李勇, 李坤成, 孙柏青, 张秋豪, 王义娜, 杨俊友. 智能体 Petri 网融合的多机器人-多任务协调框架. 自动化学报, 2021, 47(8): 2029-2049

DOI 10.16383/j.aas.c190400

Multi-robot-multi-task Coordination Framework Based on the Integration of Intelligent Agent and Petri Net

LI Yong¹ LI Kun-Cheng¹ SUN Bai-Qing¹ ZHANG Qiu-Hao¹ WANG Yi-Na¹ YANG Jun-You¹

Abstract In order to solve the coordination problem of heterogeneous service robot team serving multiple elderly people meanwhile to maximize the overall satisfaction of the elders, a multi-robot-multi-task coordination framework for multi-person is proposed. Firstly, scalable timed-colored Petri net (STdCPN) is proposed based on timed Petri net and colored Petri net to model the process of service robots caring for the elders in the context of nursing home. Then the satisfaction model of service object is constructed taking the elders' feelings and emotions as important indicators. Finally, an agent is designed to schedule the coordination framework. The agent can plan and schedule tasks reasonably by considering the "personal factors" of the elders and the real-time status and location of the robots, so that the robots can help elders to complete the tasks while maximizing the overall satisfaction.

Key words Multi-robot coordination, satisfaction, Petri net, agent

Citation Li Yong, Li Kun-Cheng, Sun Bai-Qing, Zhang Qiu-Hao, Wang Yi-Na, Yang Jun-You. Multi-robot-multi-task coordination framework based on the integration of intelligent agent and Petri net. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(8): 2029-2049

在照顾失能老人时需要花费大量的人力,像养老院这样的场所,需要大量的人力资源来完成这项工作.随着老龄化的发展^[1]以及人工成本的不断上涨,这个问题会愈加凸显.机器人技术的发展使得一些服务型机器人已经能够在一定程度上帮助人们完成对老人日常生活起居和康复训练等活动的照

顾.因此,使用服务型机器人来对老人进行照顾将会成为一个必然趋势.而面对一定数量的、功能不尽相同的服务型机器人,如何让它们能够协同起来帮助老人完成任务并保证该过程中老人的满意度就成为了一个必须要解决的问题.

Petri 网^[2]是一种离散并行系统的数学描述方法,于 20 世纪 60 年代由卡尔·A·佩特里提出.它既有严格的数学表述方式,也有直观的图形表达形式,因其便于描述系统中进程或部件的顺序、并发、冲突以及同步等关系, Petri 网在多机器人系统的研究中一直占有一席之地.文献 [3] 提出了一个机器人软件系统的编程框架,使用信号解释 Petri 网来描述任务并将其存储在 XML 文件中,调度器加载这些文件并根据需要执行不同的 Petri 网.文献 [4] 提出了一种基于 Petri 网的新型表示框架,用于描

收稿日期 2019-05-22 录用日期 2019-10-21
Manuscript received May 22, 2019; accepted October 21, 2019
国家自然科学基金 (61906125), 辽宁省自然科学基金 (2019-ZD-0205, 20180550596), 辽宁基金资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61906125), Natural Science Foundation of Liaoning Province (2019-ZD-0205, 20180550596), Natural Science of Liaoning Province
本文责任编辑 刘艳军
Recommended by Associate Editor LIU Yan-Jun
1. 沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870
1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870

述单机器人和多机器人行为,该框架形式上允许对编程认知机器人所必需的复杂动作交互进行高级描述.以上两篇文献均使用 Petri 网对机器人的任务过程以及动作交互进行建模,由于机器人的操作对象与本文不同,二者仅对系统中机器人的状态以及动作进行描述,缺少被操作对象的状态以及机器人与被操作对象之间的交互过程,机器人相当于脱离了整个系统独自进行任务.

本文意在协调异构的服务机器人团队为老人服务,因此本文所建立的模型中既包含机器人的状态以及动作流程,也包含被操作对象的状态以及机器人与被操作对象之间的交互过程.由于养老院情境的特殊性,为了清晰地描述系统状态,需要使用含有时间因素的 Petri 网以及颜色 Petri 网来对系统进行建模.例如,时延 Petri 网所提供的信息可对系统的状态进行时间上的预测,比如计算老人完成任务需要的大致时间、判断机器人何时回到空闲状态等;颜色 Petri 网可以对系统中不同的“资源”进行分类,即实现对网系统的折叠,从而更清晰地描述多个机器人和多位老人情况下的协调过程.即便如此,在使用 Petri 网对养老院情境进行建模时仍无法解决“老人们各行其道互不干扰”以及“随时调整老人对任务的执行权限”等问题.因此,为解决以上问题,本文结合时延 Petri 网和颜色 Petri 网提出了一种改进的 Petri 网—可扩展时延-颜色 Petri 网 (STdCPN) 对养老院情境下机器人照顾老人的过程进行建模.但本文的研究内容不限于此,构建的 STdCPN 模型将作为多机器人-多任务协调框架的基础,而如何在任务过程中提高被服务对象的满意度是本文的另一个重点.

目前,针对多机器人协调的研究主要集中在解决多机器人的任务分配^[5-7]、路径规划^[8-9]、编队控制^[10]、勘探制图^[11-13]等问题上,该领域中绝大部分的研究都不涉及“人的因素”,也不需要考虑协调过程中人的感受和情绪.在机器人领域中,有少量研究涉及到了最基本的人的安全性.文献^[14]从减少焊接过程中重型零件的手动操作密度的角度来提高人的安全性.文献^[15-16]从保证机器人与人之间适当的距离的角度来提高人的安全性.文献^[17]通过调节机器人与人潜在碰撞期间内的冲击力因素的方法来提高人的安全性.而机器人领域中进一步考虑人的满意度的研究甚少.文献^[18]为最大化团队效率和人类成员与机器人成员的合作意愿,将任务分配的权利交给工人,结果表明工人宁愿将控制权交给机器人,他们宁愿成为高效团队中的一员,而不是在调度过程中发挥作用.文献^[19]为将人与机器人之间的相互作用系统化,以减少人的工作量并最

大化用户满意度,开发了几种认知模型,这些模型可以根据任务来管理和启动交互,并通过使用交互结果修改机器人的活动.以上两篇文献分别从赋予人机混合团队中人一定的决策权和调整人机交互中人的工作量的角度来提高人的满意度.而本文完全将人类作为被服务的对象,从服务对象的角度出发,提出了服务对象满意度模型.将老人的满意度作为任务执行情况的一个重要指标,在协调多个机器人为多位老人服务的基础上,通过调整机器人在任务执行过程中的各项参数以及多个任务冲突时的任务执行顺序来最大化老人的总体满意度.

由于养老院中环境复杂,其中老人的身体情况、个人偏好、床位位置等都各不相同,需要根据老人的“个人因素”(即性格急躁程度、被机器人拉起时的舒适速度、被机器人运载时的舒适速度、当前所处位置、自提出需求后的已等待时间以及所执行任务的优先级等)来对任务进行个性化的规划,同时需要根据各个机器人的实时状态、位置等信息来合理地分配系统资源.面对这些灵活的决策,智能体是一个合适的选择.文献^[20]提出了一种自动建议智能体,该智能体通过分析系统当前状态,对系统接下来所有可执行动作的“回报”进行预测,然后找出“回报”最大的一种决策提供给人类操作员,从而提高系统效率并减轻人类操作员的工作负荷.但该文中机器人的操作对象是货架,并不涉及人的满意度,且使用该方法将带来巨大的计算负荷,因此一般情况下该智能体仅考虑系统接下来 3 步之内的状态来计算得出当前时刻的最佳决策.

而养老院情境中虽然任务种类繁多,但每个任务的流程是大致固定的,因此对系统中任意时刻所有机器人可执行的每个动作的“回报”进行预测是不必要的,且在执行如“送老人去卫生间”这样比较紧急的任务时,仅能预测系统接下来几步的状态是不能接受的.相反,在该情境下更加需要的是对机器人的任务执行过程有一个宏观的规划,这正是 Petri 网的优势所在.因此本文使用 STdCPN 对系统底层的运行情况进行建模,智能体只在必要时给出决策,这样就同时发挥了 Petri 网的宏观规划能力和智能体的灵活决策能力,在协调多个机器人为多位老人服务的基础上,保持了系统的实时性.

本文结合时延 Petri 网和颜色 Petri 网提出了可扩展时延-颜色 Petri 网 (STdCPN) 并对养老院情境下服务机器人团队照顾老人的过程进行建模.为提高该过程中老人即机器人所服务对象的满意度,提出了服务对象满意度模型,将老人的满意度作为任务完成情况的重要指标.设计了智能体对该协调框架进行调度,该智能体对老人的任务进行个

性化的规划, 合理分配系统资源, 最大化老人总体满意度.

本文内容安排如下: 第 1 节介绍了 STdCPN 子模型, 并以此模型为例对改进的 Petri 网—STd-CPN 进行详细阐述; 第 2 节建立了服务对象满意度模型; 第 3 节提出了基于智能体的协调框架; 第 4 节对不同情况下智能体的决策进行仿真与分析; 第 5 节为结论.

1 养老院情境下基于 STdCPN 的任务建模

要完成养老院情境下多个服务型机器人照顾多位老人的协调, 对机器人照顾老人的过程进行建模是基础. 由于养老院中任务复杂多样, 因此应先对其中一个或相联系的几个任务进行子模型构建, 之后便可根据该子模型推演出其他子模型, 并根据实际需要将它们组合成完整的模型. 现以机器人送老人去卫生间以及送回这两个相联系的任务为例, 进行 STdCPN 子模型搭建, 并以此模型为例对 STdCPN 进行阐述. 为说明该模型在多机器人多人情况下模拟能力的同时方便描述, 令该模型中包含老人 4 位、步行支援机器人 2 台 (记为 SR, 如图 1 (a) 所示, 其主要功能是搀扶老人站起、坐下和移动)、智能轮椅机器人 2 台 (记为 CR, 如图 1 (b) 所示, 其主要功能是运载老人从起始点到达目的地), 构建的 STdCPN 子模型如图 2 所示.

该模型中 p_1 到 p_{16} 为 SR 与 CR 协同将老人从床位送到卫生间的过程, p_{16} 到 p_1 为 SR 与 CR 协同将老人从卫生间送回到床位的任务, 这两个过程是不同的任务, 即老人被送到卫生间后任务结束, 经过不定长的时间后, 当老人想要返回时, 需要再

次提出需求. 该 STdCPN 模型的具体数学表达式及运行过程见附录 A. 模型中库所的含义如表 1 所示, 变迁的含义如表 2 所示.

可扩展时延 - 颜色 Petri 网是一个七元组, $STdCPN = (P, T; F, D, C, W, M_0)$, 其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 是库所的有限集, 表示系统的资源、操作或状态等, 当库所 p 内含有令牌时, 库所 p 代表的意义生效; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是变迁的有限集, 代表系统状态间的转换, 当变迁 t 的每个输入库所中的令牌量都大于等于该库所与变迁 t 间的权重时, 变迁 t 可以触发, t 的触发会从每个输入库所中移除对应权重的令牌量, 并在每个输出库所中生成对应权重的令牌量; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是有向弧的有限集, 连接库所与变迁; D 是时延 Petri 网中的概念, 是定义在库所集 P 上的时间函数, 即当令牌进入某一库所后, 需要停留该库所时延量的时间才可以离开该库所; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 是颜色 Petri



(a) 步行支援机器人 (b) 智能轮椅机器人
(a) Walking support robot (b) Intelligent wheelchair robot

图 1 送老人去卫生间及送回过程中使用的机器人
Fig.1 Robots for send the elderly to the toilet and return

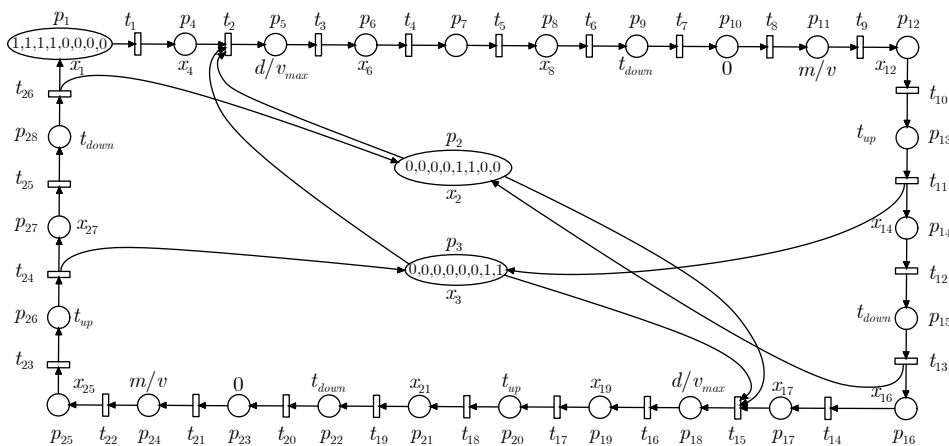


图 2 SR 和 CR 协同送老人去卫生间及送回 STdCPN 模型

Fig.2 STdCPN model for SR and CR work together to send the elderly to the toilet and return

表 1 送老人去卫生间及送回 STdCPN 模型中库所含义
Table 1 The mean of spaces in the STdCPN model of send the elderly to the toilet and return

库所	含义
p_1	老人在自己的床位上
p_2	SR 处于空闲状态
p_3	CR 处于空闲状态
p_4	老人在虚拟的“等待区”内等待,智能体进行任务规划和资源分配
p_5	老人等待 SR 和 CR 到来
p_6	老人被拉起前的准备过程
p_7	老人在 SR 帮助下的站起过程
p_8	SR 与 CR 的对接过程
p_9	老人在 SR 帮助下的下坐过程
p_{10}	老人坐在 CR 上
p_{11}	CR 载着老人前往卫生间
p_{12}	老人被拉起前的准备过程
p_{13}	老人在 SR 帮助下的站起过程
p_{14}	SR 与马桶的对接过程
p_{15}	老人在 SR 帮助下的下坐过程
p_{16}	老人坐在卫生间内的马桶上
p_{17}	老人在虚拟的“等待区”内等待,智能体进行任务规划和资源分配
p_{18}	老人等待 SR 和 CR 到来
p_{19}	老人被拉起前的准备过程
p_{20}	老人在 SR 帮助下的站起过程
p_{21}	SR 与 CR 的对接过程
p_{22}	老人在 SR 帮助下的下坐过程
p_{23}	老人坐在 CR 上
p_{24}	CR 载着老人前往老人的床位
p_{25}	老人被拉起前的准备过程
p_{26}	老人在 SR 帮助下的站起过程
p_{27}	SR 与床位的对接过程
p_{28}	老人在 SR 帮助下的下坐过程

网中的概念,是颜色的有限集,表示系统中资源的种类,当颜色集的维度改变后,系统中的令牌和权重等的维度都需要相应的改变; W 是映射在有向弧集上的权函数,控制着变迁的发生规则; M_0 是映射在库所集上的初始标识,表示系统的初始状态.

STdCPN 模型利用库所上的时延量对系统状态进行时间上的预测,STdCPN 的时延量 D 不同于传统的附着于变迁上的时延量,而是附着于库所之上.如果将时延量附着于变迁之上,由于标识 M 映射在库所上,当变迁正在发生时,它的前集中的令牌会消失,而后集中的令牌需要等到变迁结束后才会出现,因此系统此刻的状态无法明确表示,而将时延量附着于库所之上,使所有变迁的时延量为零,则可以准确地通过标识描述系统任意时刻所处状态.

在该模型的时延因素 D 中, d 为由传感器实时

表 2 送老人去卫生间及送回 STdCPN 模型中变迁含义
Table 2 The mean of transitions in the STdCPN model of send the elderly to the toilet and return

变迁	含义
t_1	老人提出去卫生间的请求
t_2	SR 和 CR 开始前往老人的床位
t_3	SR 和 CR 到达老人的床位
t_4	老人已做好站起准备
t_5	老人站起动作完成
t_6	SR 与 CR 对接完成
t_7	老人下坐动作完成
t_8	CR 开始运载老人前往卫生间
t_9	CR 载着老人到达卫生间
t_{10}	老人已做好站起准备
t_{11}	老人站起动作完成
t_{12}	SR 与马桶对接完成
t_{13}	老人下坐动作完成
t_{14}	老人提出返回床位的需求
t_{15}	SR 和 CR 开始前往老人所在位置
t_{16}	SR 和 CR 到达老人所在位置
t_{17}	老人已做好站起准备
t_{18}	老人站起动作完成
t_{19}	SR 与 CR 对接完成
t_{20}	老人下坐动作完成
t_{21}	CR 开始运载老人前往老人的床位
t_{22}	CR 载着老人到达老人的床位
t_{23}	老人已做好站起准备
t_{24}	老人站起动作完成
t_{25}	SR 与床位对接完成
t_{26}	老人下坐动作完成

采回的机器人位置信息计算得出的机器人与老人床位间的路径长度,若任务所需机器人数量大于 1,则 d 取其中最大值, v_{max} 为机器人的最大移动速度, v 为老人被分配的 CR 运载速度, t_{up} 为预设的机器人以老人舒适速度搀扶老人站起所用时间, t_{down} 为预设的机器人以老人舒适速度搀扶老人坐下所用时间, m 为老人床位与卫生间内马桶之间的路径长度,含有以上量的各项时延量均是确定的.含有“ x ”的时延量代表该时间具有不确定性, x_1 为老人在床位上停留的时间, x_{16} 为老人如厕的时间,这 2 项时间取决于老人的实际需求. x_2 为 SR 保持“空闲状态”的时间, x_3 为 CR 保持“空闲状态”的时间,这 2 项时间取决于实际情况下机器人的使用情况. x_4 和 x_{17} 为从老人呼叫后至机器人响应请求的用时,这 2 项时间取决于实际情况下机器人的使用情况以及智能体对机器人资源的分配情况.以上 6 项时延量对应的 6 个库所均处于任务开始之前,因此

该 6 项具有不确定性的时延量对系统状态的预测没有影响. x_6 、 x_{12} 、 x_{19} 和 x_{25} 为 SR 拉起老人之前老人的准备时间, x_8 和 x_{21} 为 SR 与 CR 对接的时间, x_{14} 为 SR 与马桶的对接时间, x_{27} 为 SR 与床位的对接时间, 这 8 项时延量会受到老人个人情况的影响, 但在实际应用中可以测出一个大致的值. 这些时延量将仅做预测使用, 实际以机器人每次完成动作后传回的信号为准, 机器人每完成一个动作 STdCPN 模型即可向前运行一步并为机器人指明下一步动作, 同时刷新预测时间, 这样就可以利用时延量对系统的状态进行预测. 例如在老人出发后, 可以预测老人距某一状态的大致时间, 也可以预测大致多久后老人可以完成任务以及机器人何时可以回到空闲状态等. 这些时间信息可以提供给智能体, 作为多机器人-多任务规划的依据.

可灵活地对系统规模和系统中相同种类资源的数量进行扩展而不影响已搭建好的模型结构是 Petri 网具备的特点. 由于养老院这一系统的特殊性, 其内所有任务的运行均是以被服务对象即老人为中心展开的, 且各对象之间互不干扰, 同时由于养老院的人员流动性以及不同养老院的机器人数量可能不同, 因此构建的模型要能够随时调整资源种类, 适应于不同的老人与机器人的组合. 因此可扩展时延-颜色 Petri 网的“可扩展”指的是通过对权函数中各项权重的“矩阵化”使得模型可以在不改变其结构的基础上任意增减资源种类, 随时改变各资源对各子模型的执行权限.

使用传统的颜色 Petri 网对系统建模时, 会将系统中的“资源”进行分类, 以该 STdCPN 模型为例, 系统中有 4 位老人, 2 台 SR 和 2 台 CR, 这 8 个“资源”会被分为 3 类, 即颜色集 $C = \{MAN, SR, CR\}$, 令牌、权函数 W 的每项以及标识 M 的每项都为 1 个三维向量. 当需要增减老人或机器人时, 仅需改变令牌向量相应位的大小; 当变迁的规则变化时, 权函数的改变会影响一整类“资源”的权限. 而在养老院情境中, 不能将老人和机器人视为如同“待加工的零部件”那样进行分类, 因为每位老人和每台机器人都携带着他们的“个人信息”, 老人所携带的如床位所在位置、性格急躁程度、被机器人拉起时的舒适速度、被机器人运载时的舒适速度、当前所处位置、已等待时间以及所要执行任务种类等信息会影响智能体对该老人任务执行过程的规划, 机器人携带的如是否处于“空闲”状态、当前所处位置以及该机器人种类等信息会影响智能体对该机器人的任务规划. 因此在养老院情境下, 不能将这些“资源”进行如上的分类, 而是要将每位老人和每台机器人都区分开, 因此需令颜色集 $C = \{MAN1,$

$MAN2, MAM3, MAM4, SR1, SR2, CR1, CR2\}$, 即每个“资源”都是一类独特的“资源”, 因此该模型中令牌的每一位只能是 0 或者 1, 当增减老人和机器人时, 实际上都是在增加或者减少“资源”的种类, 即令牌的维度. 同时也需要权函数有能力为增加(减少)的“资源”提供(解除)权限, 因此本文在结合时延 Petri 网和颜色 Petri 网的基础上, 改进了权函数的形式并调整了网络的运行规则. 改进后的权函数映射到有向弧上的每一位权重可以是向量也可以是矩阵, 当权函数的某位权重为矩阵时, 意味着该权重的每一行都为变迁的发生提供了一种可能. 附录 A 中给出的权函数 W 基于的条件是 4 位老人均可以执行该任务且可以使用任意的 SR 与 CR 的组合.

使用改进权函数的 STdCPN 运行规则: 1) 当变迁具有 1 个输入库所和 1 个输出库所时, 若变迁输入库所中的令牌不少于输入库所到变迁间权重的某一行, 则变迁有发生权. 变迁发生后, 输入库所中的令牌减去该行权重生成新令牌, 输出库所中的令牌加上变迁到输出库所间权重对应的同一行, 生成新的令牌. 2) 当变迁具有多个输入库所和 1 个输出库所时, 如果每个输入库所中的令牌都不少于该输入库所与变迁间权重中的某一行, 则变迁有发生权. 变迁发生后, 这些行权重相加的结果等于变迁与输出库所间权重的哪一行, 则输出库所内的令牌加上哪一行. 3) 当变迁具有 1 个输入库所和多个输出库所时, 如果输入库所满足条件则变迁可以发生, 变迁到多个输出库所的权重中, 每个权重选出一行对它们求和, 哪几行相加的结果等于输入库所减去的那一行权重, 则在变迁发生后将这几行权重分别加到对应输出库所的令牌上.

需要强调的是: 1) 由于 STdCPN 的权重为变迁的发生提供了多种可能, 若变迁具有多个输入库所和多个输出库所, 会造成变迁发生时权重选择混乱, 因此在使用 STdCPN 建模时应避免这种情况的发生, 可以通过如增加中间库所等方式实现. 2) 为了使标识可以明确地表示系统当前状态以及防止老人之间相互影响, 当多块令牌处于同一库所内时, 除任务开始前 (p_1 、 p_4) 和结束后 (p_{16}) 以及存储机器人的库所 (p_2 、 p_3) 内的令牌可以叠加外, 在任务执行过程中, 令牌均不可以叠加, 而是按照各自的进度前进.

该 STdCPN 子模型建立后, 模型的运行会指示 SR 和 CR 需要完成的动作以及它们之间动作的顺序, 从而协调 2 台异构的服务机器人帮助老人完成任务. 通过该 STdCPN 子模型可以清楚地了解任意时刻系统中每位老人与每台机器人所处的状态

以及他们间的联系,即可以清楚地知道哪一(几)台机器人正在为哪一位老人服务到哪一个阶段,这样就可以对整个系统有一个精准的把控,并可对系统状态进行时间上的预测,这些信息都将作为智能体进行任务规划时的依据.且STdCPN模型的“可扩展性”能够满足实际应用中老人和机器人数量的扩展以及对他们权限的限制,由于STdCPN运行过程中并不涉及似矩阵求逆般耗时的计算,因此由老人和机器人数量扩展导致的模型中向量和矩阵维度的增加对模型的运行不会造成很大的影响.可以组合多个STdCPN子模型来构成完整的养老院运行模型,作为养老院情境下多机器人-多任务协调的基础.

2 服务对象满意度建模

当STdCPN模型搭建完成后,在机器人资源充足时,老人们均可以按照自己的需求随时进行各种任务.但在现实情况中难免会有短时间内多位老人接连提出需求甚至同时提出需求的情况,按此情形配置机器人数量会造成大量冗余.但如果机器人资源不够充足,系统将陷入僵局.由于每位老人的身体状况不同,所执行的任务紧急程度也不同,盲目地按照老人提出需求的顺序来执行任务可能会造成一些不良后果.同时由于该过程服务于人,那么应该从人的角度出发考虑,找出能够让老人们整体更满意的解决方案.因此通过对养老院情境的模拟以及该情境下老人心理的分析,提出了如下服务对象满意度模型.在该模型中,将任务分为不同的优先级,并将老人的性格急躁程度分为不同等级.假设在机器人帮助老人完成一项任务后,老人会根据此次任务的执行情况得出一个他心中的满意度.认为在该情境下,任务的优先级、老人的性格急躁程度、老人呼叫后的等待时间以及机器人运载老人的速度与老人的舒适速度之差都会对老人的满意度造成影响.建立的满意度模型如式(1)所示:

$$Satf_{X,e_x,k,n} = \alpha_0 Prior_{e_x} - \alpha_1 Impat_X \cdot e^{\alpha_2 t_{wait,X,e_x,k,n}} - \alpha_3 e^{\alpha_4 (v_{X,e_x,k,n} - v_x^*)} \quad (1)$$

式(1)中 $Satf$ 为老人的满意度, X 代表老人, e_x 代表该老人要做的事件是事件 x , k 代表在当前队列中该老人排在第 k 位, n 代表共有 n 位老人在队列中. $Prior$ 代表事件优先级,这里将所有事件分成五个等级, $Prior \in \{0,1,2,3,4\}$,其中“4”为优先级最高的等级. $Impat$ 代表老人性格急躁系数,由于目前无法对性格急躁程度进行定量测量,假设性格急躁程度最低的人急躁系数为“1.0”,该系数随着老人急躁程度的提升而增加,暂定为五个等级, $Impat \in \{1.0,1.1,1.2,1.3,1.4\}$, t_{wait} 为老人从提出

需求开始直至机器人到达老人所在位置之间的总等待时间, v 为老人被分配的运载速度, v^* 为老人预设的舒适运载速度.

对于式1中第1项,假设高优先级的任务在完成时会得到更大的满意度;对于式1中第2项,假设性格急躁系数 $Impat$ 会被总等待时间 t_{wait} 以指数的形式影响,从而降低老人满意度;对于式1中第3项,假设机器人运载老人的速度 v 与老人舒适速度 v^* 之差会以指数的形式对老人的满意度造成负面影响.

其中总等待时间 t_{wait} 由式(2)求得,由预计等待时间 t_{ew} 和已经等待时间 t_{aw} 两部分构成(t_{aw} 产生原因是:当多位老人的任务产生冲突时,智能体会给出老人的任务执行顺序,当按照某种顺序执行后,在完成所有的任务之前若有新的老人加入队列或有任意种类机器人重回空闲状态,则需要重新计算得出基于当前时刻的任务执行顺序,因此需要一个已经等待时间来描述老人的真实等待时间).

$$t_{wait,X,e_x,k,n} = t_{ew,X,e_x,k,n} + t_{aw,X} \quad (2)$$

预计等待时间 t_{ew} 由式(3)求得.当 $k=1$ 时,预计等待时间 t_{ew} 等于所派出机器人距离老人的初始距离中的最大值 d 与机器人最大行驶速度 v_{max} 的商;当 $1 < k \leq n$ 时,预计等待时间 t_{ew} 等于排在该老人前面一位的老人的预计等待时间 $t_{ew,k-1}$ 加上前一位老人的任务执行时间(包括以老人预设的舒适方式将老人拉起的用时 t_{up}^* 与拉起次数 n_{up} 的乘积、以老人预设的舒适方式将老人放下的用时 t_{down}^* 与放下次数 n_{down} 的乘积以及任务路程 m 与机器人运载老人速度 v 的商)再加上机器人到达所需用时 d_k/v_{max} .

运载速度 v 由式(4)求得,它等于老人的最舒适速度 v^* 加上该老人的加速系数 a 在加速系数变化范围($a_{max} - a_{min}$)内所占比例与该老人运载速度最大变化范围($v_{max} - v^*$)的乘积.

加速系数 a 由式(5)求得.当 $1 \leq k < n$ 时,该老人的加速系数 a 等于该老人所执行任务的优先级的平方根加上排在该老人之后所有老人的任务优先级总和的平方根;当 $k=n$ 时,加速系数 a 等于该老人所执行任务的优先级的平方根.

式(6)中 $Satf_m$ 为队列中所有老人的总体满意度,包括所有老人的个人满意度之和以及一个表示“优先级高的任务被先执行”程度的量 $f(prior_1, prior_2, \dots, prior_n)$,其值为每一项分别减去其后各项再对所有正的结果求和.这样做的目的是适当提高优先级高的任务被先执行时的总体满意度,因为现实情况中高优先级的任务往往更紧急,需要优先被执行.

$$t_{ew,X,e_x,k,n} = \begin{cases} \frac{d_k}{v_{max}}, & k = 1 \\ t_{ew,X,e_x,k-1,n} + t_{up,X,k-1,n}^* \cdot n_{up,e_x,k-1,n} + t_{down,X,k-1,n}^* \cdot n_{down,e_x,k-1,n} + \\ \frac{m_{X,e_x,k-1,n}}{v_{X,e_x,k-1,n}} + \frac{d_k}{v_{max}}, & 1 < k \leq n \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{X,e_x,k,n} = v_X^* + \frac{a_{X,e_x,k,n} - a_{min}}{a_{max} - a_{min}} \cdot \beta(v_{max} - v_X^*) \quad (4)$$

$$a_{X,e_x,k,n} = \begin{cases} \gamma_0 \sqrt{Prior_{e_x}} + \gamma_1 \sqrt{\sum_{x=k+1}^n Prior_x}, & 1 \leq k < n \\ \gamma_2 \sqrt{Prior_{e_x}}, & k = n \end{cases} \quad (5)$$

$$Satf_m = \sum_{k=1}^n Satf_{X,e_x,k,n} + \delta \cdot f(Prior_1, Prior_2, \dots, Prior_n) \quad (6)$$

该满意度模型建立后, 智能体对系统中的任务进行规划时除了考虑老人和机器人的实时信息外, 还会考虑老人的满意程度, 将满意程度的高低作为衡量任务完成情况的一个指标, 在协调多个机器人为多位老人服务的基础上最大化老人的总体满意程度。

3 基于智能体的考虑人的因素的协调框架

该协调框架由 STdCPN 模型和智能体两部分组成, STdCPN 模型作为该协调框架的基础, 指示机器人如何协同完成任务, 智能体作为该协调框架的“调度者”, 对系统资源进行分配, 并根据老人的“个人因素”对机器人的任务执行过程进行规划, 其结构如图 3 所示。

当老人提出任务需求后, STdCPN 模型的标识会产生对应变化, 智能体根据 STdCPN 模型提供的老人任务信息结合老人的个人信息以及满意度模型对老人的任务过程进行规划, 并根据实时环境信息和 STdCPN 模型提供的机器人实时状态信息派出合适的机器人, 将此方案作为最佳方案输入到 STdCPN 模型中, 使机器人依据该方案按照 STdCPN 模型执行任务; 当多位老人的任务发生冲突且机器人资源不足时, 智能体通过调整老人的任务执行顺序得出多个任务执行方案, 并将这些任务执行方案输入到 STdCPN 模型内进行模拟运行, 从而得出计算满意度所需的时间信息, 再通过满意度模型计算得出使得总体满意度最大的任务执行方案 (由于目前系统规模较小, 这里暂且使用穷举法, 当老人、机器人和任务大量增加后, 需要使用快速优化方法进行求解), 然后将该方案作为最佳方案输入到 STdCPN 模型中, 使机器人依据该方案执行任务。

以上文搭建的 STdCPN 子模型 (图 2) 为例, 在不限制老人和机器人的数量、状态的情况下给出

该协调框架的算法流程图, 如图 4 所示。图 4 相当于智能体的“思维方式”智能体通过该“思维方式”决定当前系统中的任务能否同时执行, 如果不能, 那么哪 (几) 个任务应该先被执行, 如果执行应该派出哪 (几) 个机器人前往, 在拉起和放下该老人时应该以什么样的速度, 在运载该老人时应该以什么样的速度等问题。

下面对该协调框架的算法流程图做一些解释: 1) 由于“等待区”内新增老人和在“等待区”非空的前提下任意种类机器人重回空闲状态这两种情况都可能造成有新的具备出发条件的老人产生, 所以每当这两种情况发生, 智能体对当前时刻系统所处状态进行判断。2) “等待区”内存在多位老人可能

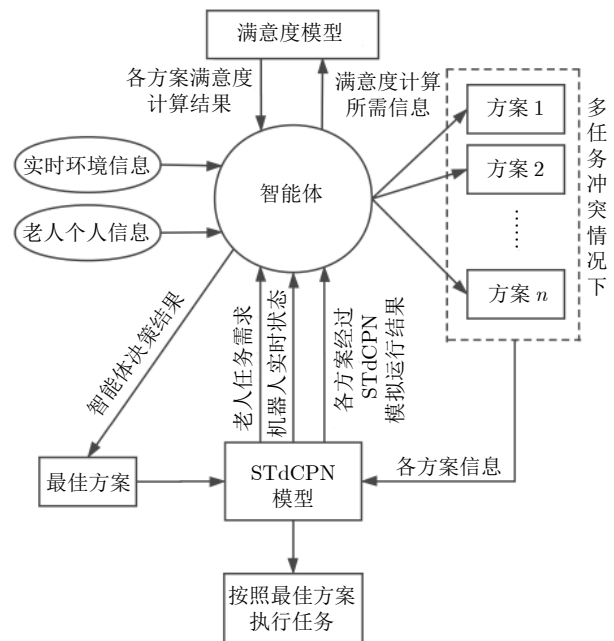


图 3 基于智能体的考虑人的因素的协调框架结构示意图
Fig. 3 Diagram of coordination framework considering human factors based on intelligent agent

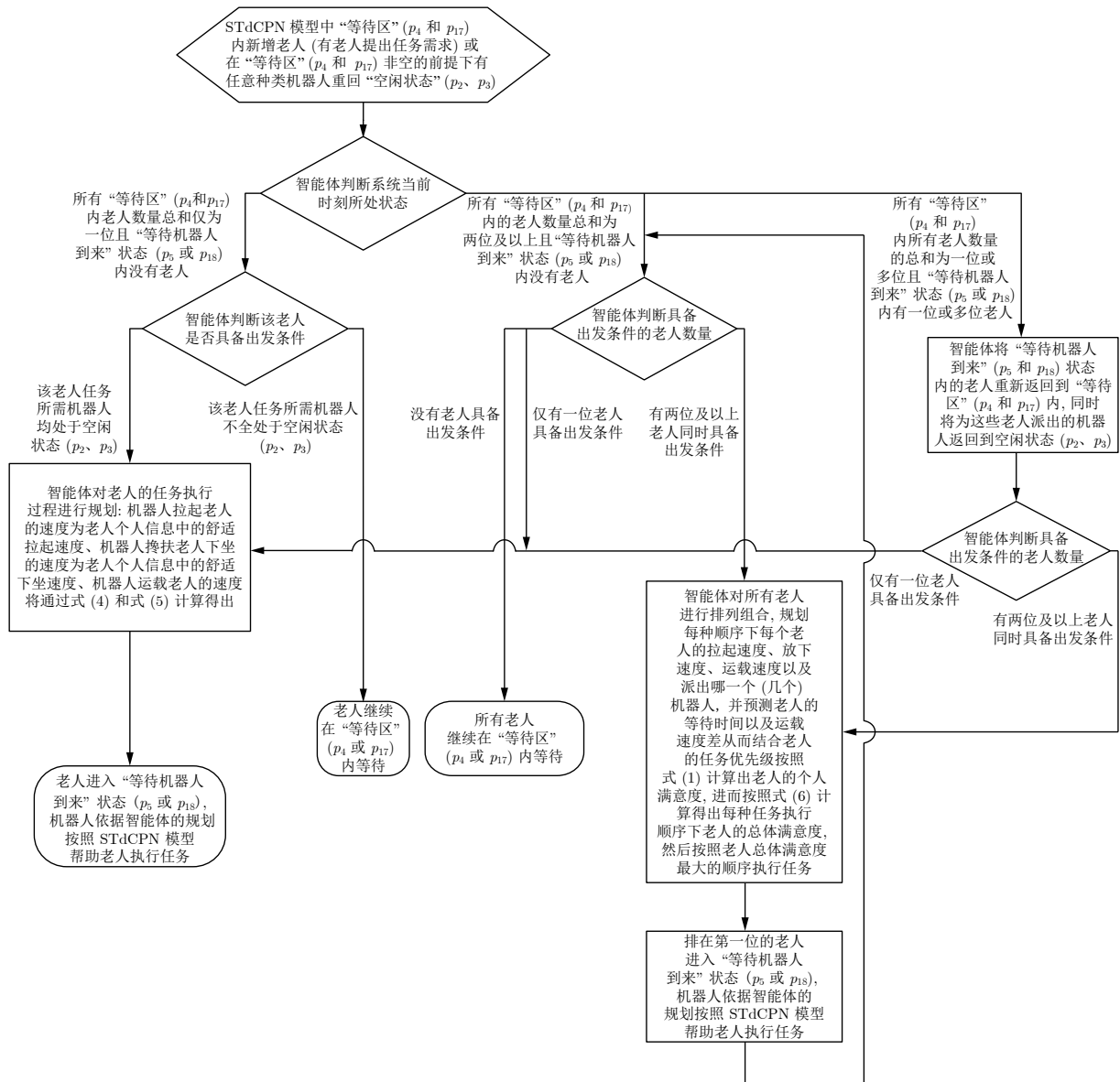


图 4 基于智能体的考虑人的因素的协调框架算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart of coordination framework considering human factors based on intelligent agent

是由于先提出需求的老人不具备出发条件而随时间推移不断有新的老人加入从而堆积造成的, 也有可能是多位老人在同一瞬间提出需求造成的. 3) 当排在第 1 位的老人被转移到“等待机器人到来”状态 (p_5 或 p_{18}) 内之后, 智能体重新判断剩下的老人是否具备出发条件, 然后再次对其中具备出发条件的老人进行排列组合, 选出能够得到最大总体满意度的出发顺序执行. 这样做的原因是: 虽然最初多位老人都具备出发条件, 但不同的任务需要的机器人种类和数量可能不同, 所以当前机器人的种类和数量可能满足一位老人出发, 也可能满足多位老人同时出发, 因此当排在第 1 位的老人进入下一状态后, 排在第 2 位的老人是否依然具备出发条件不明, 同

时也存在排在第 2 位的老人不具备出发条件而排在第 3 位的老人具备出发条件等多种可能, 因此智能体需要重新判断. 4) 将“等待机器人到来”状态内的老人返回“等待区”并将对应机器人返回“空闲状态”是因为“等待机器人到来”状态内的老人虽然任务已被规划但还未出发, 而此时可能有新的具备出发条件的老人产生, 因此需要根据这些老人的任务优先级、个人信息、机器人的实时状态、位置等信息重新规划任务方案. 5) 将“等待机器人到来”状态内的老人返回“等待区”后, 不存在没有老人具备出发条件这种情况的原因是: 被返回的老人正是因为具备出发条件才会存在于“等待机器人到来”状态 (p_5 或 p_{18}) 内.

4 仿真与分析

对该协调框架进行了仿真, 现对多位老人任务冲突且机器人资源不充足的情况下智能体给出的决策进行分析.

图 5 是一个模拟的养老院场景平面图, 从北至南分别是卫生间、A、B、C、D 4 位老人的房间以及餐厅. 为方便计算, 令相邻房间的门间距离为 3 m, 由房间的门口到老人床边的距离为 3 m. 该养老院拥有 2 台 SR (图 5 中三角形) 和 2 台 CR (图 5 中矩形), 它们可以将老人拉起、放下以及运载老人到达目的地, 行驶最大速度 v_{max} 为 1.2 m/s. 假设该养老院当前有 3 种任务: 从床位去卫生间、从床位去餐厅和在机器人的帮助下站起. 表 3 为任务信息.

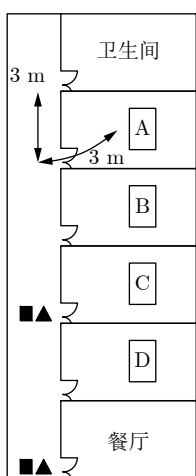


图 5 养老院模拟场景平面图

Fig. 5 Nursing home simulation scene plan

表 3 任务信息
Table 3 Task information

任务	优先级	拉起次数	放下次数	所需机器人
去卫生间	4	2	2	1 台 SR, 1 台 CR
去餐厅	2	2	2	1 台 SR, 1 台 CR
站起	1	1	0	1 台 SR

4.1 不同个人信息情况下仿真与分析

考虑第 1 种情况, 多位老人在机器人资源不充足的情况下想要完成同一任务. 如图 6 所示, 假设当前时刻老人 D 占用了 1 台 SR 和 1 台 CR 正在执行“去餐厅”任务(图中未表示), 仅剩 1 台 SR 和 1 台 CR 处于空闲状态且它们停在老人 C 的房间门前, 此时 A、B、C 3 位老人同时想去卫生间, 图 7 为这一时刻的 STdCPN 模型.

图 7 中, p_1 到 p_{41} 为 SR 和 CR 帮助老人从床

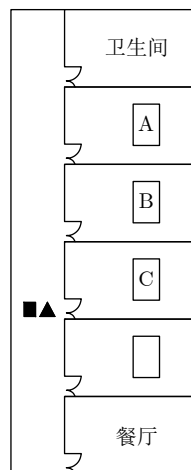


图 6 机器人初始位置

Fig. 6 Initial position of the robots

位去餐厅的过程, p_{41} 到 p_1 为 SR 和 CR 帮助老人从餐厅回到床位的过程, p_1 到 p_{16} 为 SR 和 CR 帮助老人从床位去卫生间的过程, p_{16} 到 p_1 为 SR 和 CR 帮助老人从卫生间回到床位的过程, p_1 到 p_{58} 为 SR 帮助老人从坐到站的过程, p_{58} 到 p_1 为 SR 帮助老人从站到坐的过程. 库所 p_{36} 代表 CR 运载老人从床位去餐厅的过程, 其中的令牌 $[0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1]$ 代表该状态中涉及到老人 D、第 2 台 SR 和第 2 台 CR. 库所 p_4 为从床位去卫生间任务的“等待区”, 其中的令牌 $[1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0]$ 代表 A、B、C 3 位老人都有去卫生间的请求. 库所 p_2 和 p_3 中的令牌分别代表第 1 台 SR 和第 1 台 CR 处于空闲状态.

现保持机器人初始位置和老人所执行任务种类不变, 通过改变 3 位老人的个人信息如表 4, 5, 6 所示, 来观察在个人信息不同时智能体给出的任务执行顺序.

案例 1 中, 图 8 为不同任务执行顺序下智能体预测的 3 位老人的个人满意度, 图 9 为不同任务执行顺序下智能体预测的 3 位老人的总体满意度. 图 10, 12 为案例 2, 3 老人的个体满意度. 图 11, 13 为案例 2, 3 老人的总体满意度. 如图 9 所示, 以 CAB 的顺序帮助老人完成任务将会得到最大的总体满意度.

如表 4 所示, 在案例 1 中, 3 位老人的个人信息是相同的, 这种情况下智能体给出的任务执行顺序将完全基于 3 位老人和机器人的位置信息. 当机器人经过 C 的房间时帮助 C 是顺路的, 如果不帮助 C, 之后需要返回, 这样会增加总路程, 导致老人们的总体等待时间增加, 因此它选择了先帮助 C. 帮助完 C 之后, 此时先帮助 A 再帮助 B 和先帮助 B 再帮助 A 的总路程是相同的, 但先帮助 A 可以更

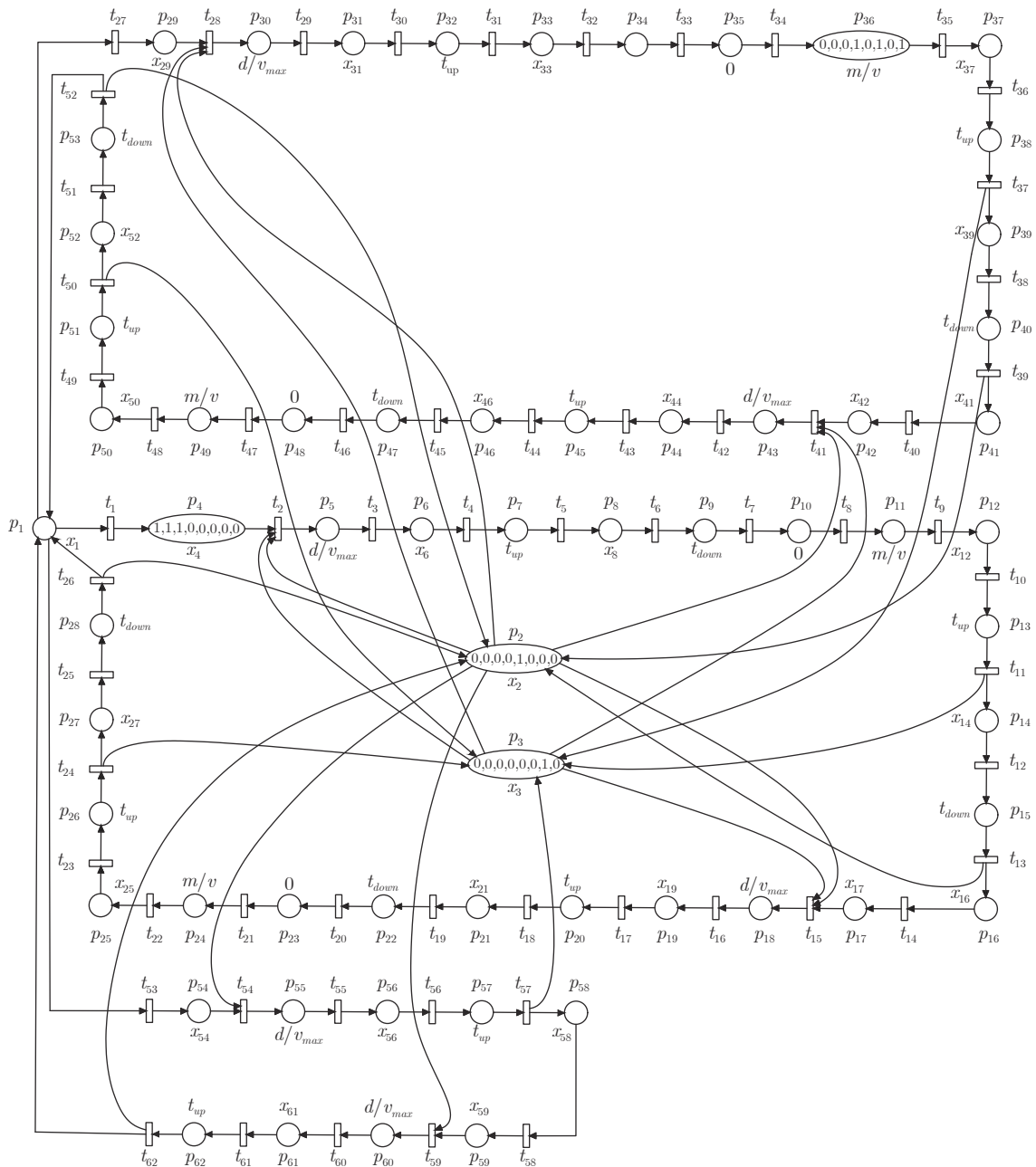


图 7 养老院运行情况 STdCPN 模型

Fig.7 STdCPN model of nursing home situation

表 4 案例 1 中老人的个人信息

Table 4 Personal information of the elders in case 1

人员	性格急躁程度	舒适运载速度 (m/s)	舒适拉起时间 (s)	舒适下坐时间 (s)	已等待时间 (s)
老人 A	1.1	0.5	3	3	0
老人 B	1.1	0.5	3	3	0
老人 C	1.1	0.5	3	3	0

表 5 案例 2 中老人的个人信息

Table 5 Personal information of the elders in case 2

人员	性格急躁程度	舒适运载速度 (m/s)	舒适拉起时间 (s)	舒适下坐时间 (s)	已等待时间 (s)
老人 A	1.1	0.5	3	3	0
老人 B	1.1	0.9	3	3	0
老人 C	1.1	0.5	3	3	0

快地将 1 位老人送入卫生间, 从而减少 A 的等待时间以及 A 和 B 的总等待时间, 因此智能体决定以

CAB 的顺序执行任务.

案例 2 中, 如图 11 所示, 以 BAC 的顺序帮助

表 6 案例 3 中老人的个人信息

Table 6 Personal information of the elders in case 3

人员	性格急躁程度	舒适运载速度 (m/s)	舒适拉起时间 (s)	舒适下坐时间 (s)	已等待时间 (s)
老人 A	1.4	1.2	1	1	15
老人 B	1.1	0.9	3	3	0
老人 C	1.1	0.5	3	3	0

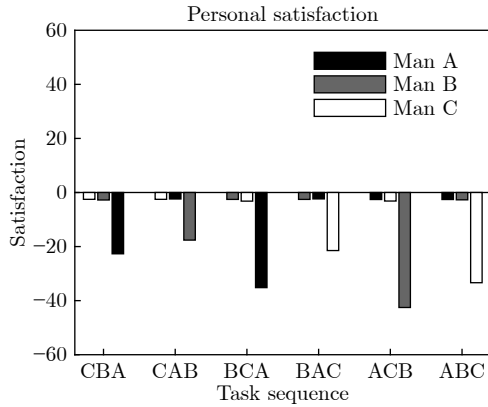


图 8 案例 1 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度

Fig.8 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 1

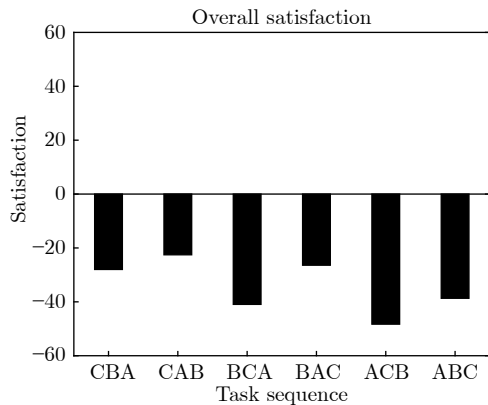


图 9 案例 1 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度

Fig.9 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 1

老人完成任务将会得到最大的总体满意度. 在案例 2 中, 通过提高 B 的舒适运载速度使 B 成为了第 1 位. 因为 B 具有较高的舒适运载速度, 在被分配更高的速度时, 由于速度差造成的不适相比于其他人会更小, 且由于 B 的舒适速度较高, 其被分配的运载速度也会较高, 因此先帮助 B 进行任务可以适当减小后面 2 位老人的等待时间. 以上的优势已经大于机器人需要返回 C 的房间所造成的劣势, 因此智能体决定以 BAC 的顺序执行任务.

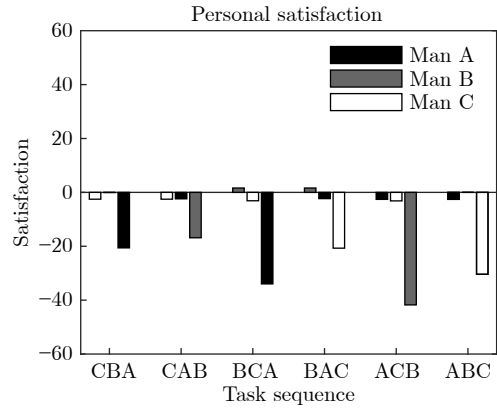


图 10 案例 2 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度

Fig.10 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 2

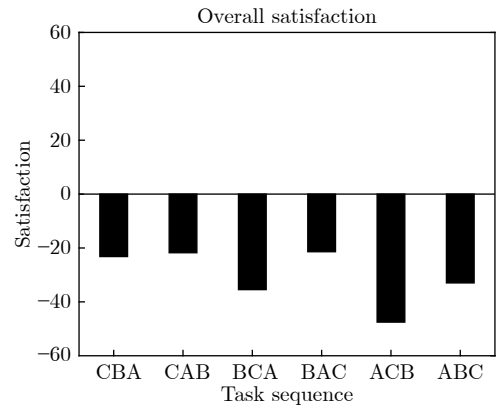


图 11 案例 2 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度

Fig.11 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 2

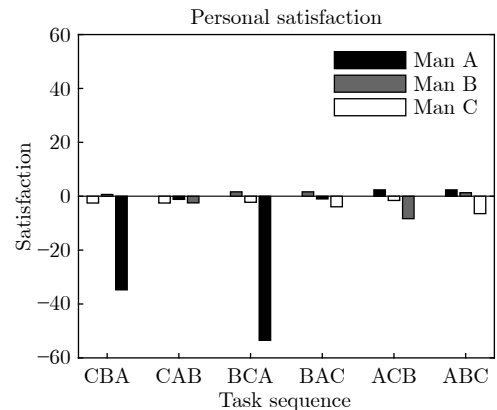


图 12 案例 3 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度

Fig.12 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 3

案例 3 中, 如图 13 所示, 以 ABC 的顺序帮助老人完成任务将会得到最大的总体满意度. 在案例

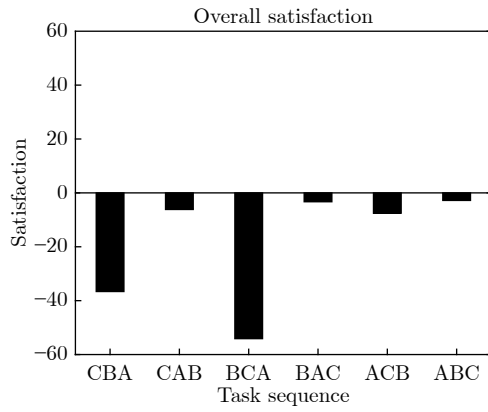


图 13 案例 3 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度
Fig.13 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 3

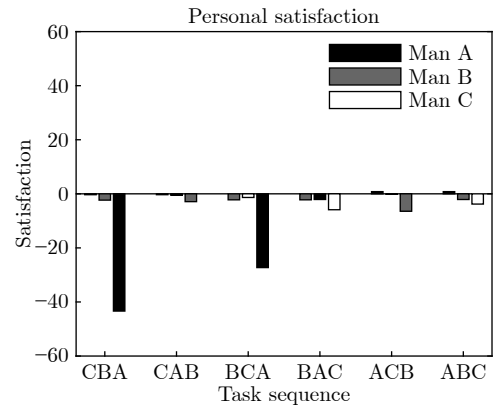


图 14 案例 4 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度
Fig.14 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 4

3 中, 提高了 A 的性格急躁程度、舒适运载速度和已等待时间, 并降低了其舒适拉起时间和舒适下坐时间, 智能体选择接受总路程和总体等待时间的增加而先帮助了 A. 由于 B 距离卫生间较近且舒适运载速度较高, 智能体决定以 ABC 的顺序执行任务.

4.2 不同任务种类情况下仿真与分析

现保持机器人初始位置不变 (如图 6)、人员信息不变 (如表 4), 改变老人所要执行任务种类, 观察智能体给出的决策.

如表 7 所示, 在案例 4 中, 老人 A 想执行“站起”任务, 老人 B 想执行“去餐厅”任务, 老人 C 想执行“去卫生间”任务. 图 14, 15 分别为案例 4 中老人的个体与总体满意度, 图 15 表明以 CAB 的顺序帮助老人执行任务会得到最大的回报. 因为 C 的任务优先级最高, 需要更快地被执行, 且机器人距离 C 最近, 先帮助 C 可以更快地到达其中一位老人的床边, 通过减少 C 的等待时间来减少 3 位老人的总等待时间. 当机器人将 C 送到卫生间之后, 先帮助 A 是顺路的, 可以减少 A 的等待时间以及 A 和 B 的总等待时间, 且 A 所执行的任务用时很短, 能够很快地完成, 不会让下一位老人有很长的等待时间. 若先帮助 B, 由于 B 的任务终点是餐厅, 再返回帮助 A 的话会造成路程的大量增加. 因此智能体给出的任务执行顺序是 CAB.

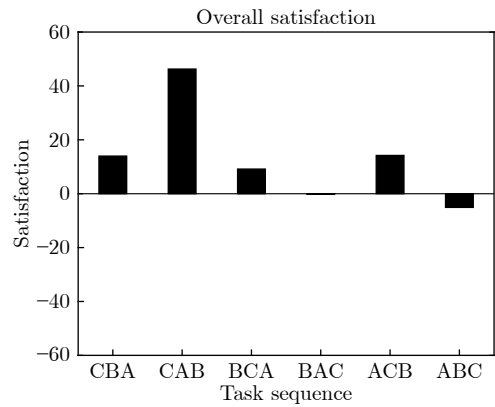


图 15 案例 4 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度
Fig.15 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 4

表 8 为案例 5 中老人的任务需求, 图 16, 17 分别为案例 5 中老人的个体与总体满意度, 图 17 表明以 BCA 的顺序帮助老人执行任务可以得到最大的回报. 因为 B 所要执行任务优先级最高, 先帮助 B 再返回帮助 C 所造成的劣势小于先帮助 B 所造成的优势. 当机器人将 B 送到卫生间后, 由于 C 的任务用时远小于 A 的任务用时, 先帮助 C 再帮助 A 造成的总体等待时间减少的优势大于了先帮助任务优先级更高的 A 所造成的优势, 因此智能体决定以 BCA 的顺序执行任务.

表 7 案例 4 中老人的任务信息
Table 7 Task information of the elders in case 4

人员	所执行任务
老人 A	站起
老人 B	去餐厅
老人 C	去卫生间

表 8 案例 5 中老人的任务信息
Table 8 Task information of the elders in case 5

人员	所执行任务
老人 A	去餐厅
老人 B	去卫生间
老人 C	站起

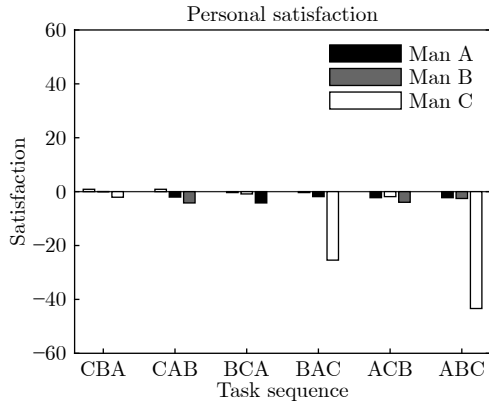


图 16 案例 5 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度
Fig. 16 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 5

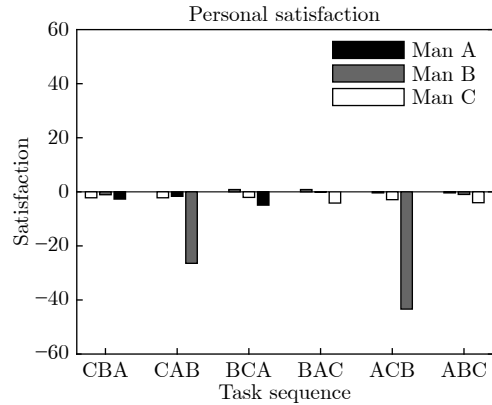


图 18 案例 6 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度
Fig. 18 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 6

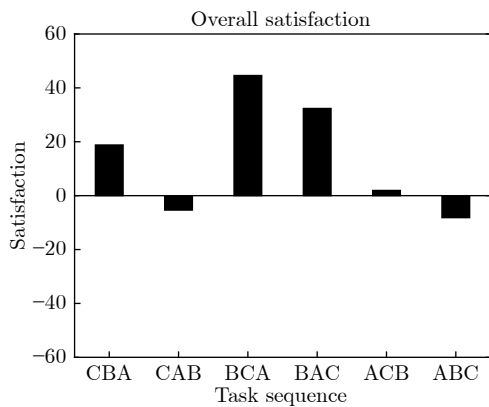


图 17 案例 5 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度
Fig. 17 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 5

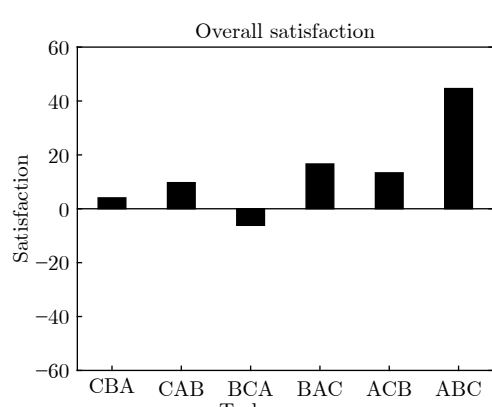


图 19 案例 6 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度
Fig. 19 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 6

表 9 为案例 6 中老人的任务需求, 图 18, 19 分别为案例 6 中老人的个体与总体满意度, 图 19 表明以 ABC 的顺序帮助老人执行任务可以得到最大的回报. 从案例 4、5、6 的结果可以看出: 当其他条件不变时, 优先级高的任务往往能被更早地执行, 在真实情况中, 这样的结果也是较为合理的.

表 9 案例 6 中老人的任务信息

Table 9 Task information of the elders in case 6

人员	所执行任务
老人 A	去卫生间
老人 B	站起
老人 C	去餐厅

4.3 随机情况下仿真与分析

现随意改变机器人初始位置信息、老人所执行的任务种类以及老人的个人信息来观察智能体给出

的决策.

案例 7 中, 机器人的初始位置如图 20 所示, 老人的个人信息如表 10 所示, 老人的任务需求如表 11 所示, 图 21, 22 分别为案例 7 中老人的个体与总体满意度. 图 22 表明以 CAB 的顺序帮助老人执行任务可以得到最大的回报. 由于 A 和 C 的任务紧急程度都为最高级别, C 的性格急躁程度和已等待时间均高于 A, 再加之 C 的舒适运载速度与舒适拉起和下坐时间均比 A 更具优势, 这些优势战胜了先帮助 C 所造成的总体等待时间增加的劣势, 因此智能体选择先帮助 C. 另一方面, 当机器人将 C 送入卫生间后, A 在任务优先级、地理位置、任务执行所需时间以及舒适运载速度这些方面均具有优势, B 的性格急躁程度较高, 但不足以战胜 A, 因此智能体给出的任务执行顺序是 CAB.

案例 8 中, 机器人的初始位置如图 23 所示, 老人的个人信息如表 12 所示, 老人的任务需求如表 13

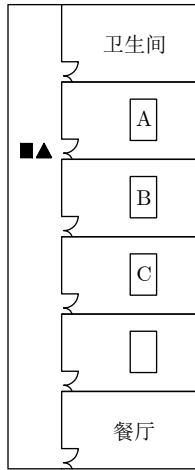


图 20 案例 7 中机器人初始位置

Fig.20 Initial position of the robots in case 7

表 10 案例 7 中老人的个人信息
Table 10 Personal information of the elders in case 7

人员	性格急躁程度	舒适运载速度 (m/s)	舒适拉起时间 (s)	舒适下坐时间 (s)	已等待时间 (s)
老人 A	1.0	0.4	2.5	3.5	0
老人 B	1.3	0.3	2.3	2.6	0
老人 C	1.1	0.5	1.7	1.7	2

表 11 案例 7 中老人的任务信息
Table 11 Task information of the elders in case 7

人员	所执行任务
老人 A	去卫生间
老人 B	去餐厅
老人 C	去卫生间

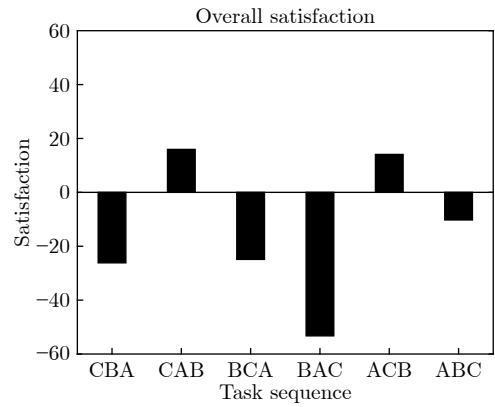


图 22 案例 7 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度

Fig.22 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 7

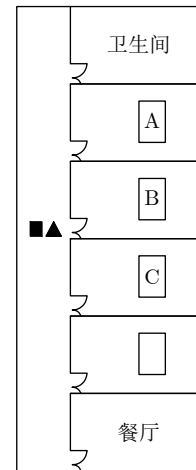


图 23 案例 8 中机器人初始位置

Fig.23 Initial position of the robots in case 8

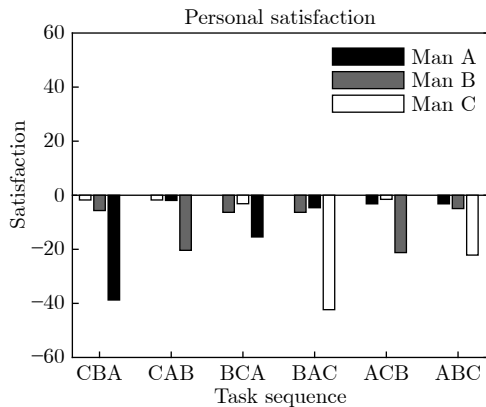


图 21 案例 7 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度

Fig.21 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 7

表 12 案例 8 中老人的个人信息
Table 12 Personal information of the elders in case 8

人员	性格急躁程度	舒适运载速度 (m/s)	舒适拉起时间 (s)	舒适下坐时间 (s)	已等待时间 (s)
老人 A	1.1	0.25	2.4	3.5	7
老人 B	1.0	0.38	2.0	2.3	3
老人 C	1.2	0.42	3.1	2.5	0

表 13 案例 8 中老人的任务信息
Table 13 Task information of the elders in case 8

人员	所执行任务
老人 A	去餐厅
老人 B	站起
老人 C	去卫生间

所示, 图 24, 25 分别为案例 8 中老人的个体与总体满意度. 图 25 表明以 CBA 的顺序帮助老人执行任务可以得到最大的回报. 在该案例中, C 的任务优先级、性格急躁程度以及舒适运载速度均具有很大优势, 因此 C 成为了第 1 名. B 的舒适运载速度、舒适拉起时间以及任务执行所需时间均具有优势, 这些优势战胜了 A 的已等待时间所造成的满意度下降, 且 A 的任务地点较远, 若先帮助 A 会增加老人们的总体等待时间, 因此智能体给出的任务执行顺序是 CBA.

案例 9 中, 机器人的初始位置如图 26 所示, 老人的个人信息如表 14 所示, 老人的任务需求如表 15 所示, 图 27, 28 分别为案例 9 中老人的个体与总体满意度. 图 28 表明以 ABC 的顺序帮助老人执行任务可以得到最大的回报. 在该案例中, A 的任务优先级最高, 且 A 在任务很紧急的情况下有着较长的

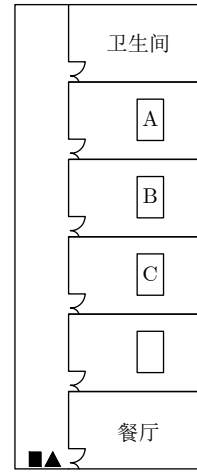


图 26 案例 9 中机器人初始位置

Fig. 26 Initial position of the robots in case 9

表 14 案例 9 中老人的个人信息

Table 14 Personal information of the elders in case 9

人员	性格急躁程度	舒适运载速度 (m/s)	舒适拉起时间 (s)	舒适下坐时间 (s)	已等待时间 (s)
老人 A	1.0	0.65	5.2	4.6	15
老人 B	1.3	0.88	4.8	3.0	0
老人 C	1.2	0.51	4.3	4.4	10

表 15 案例 9 中老人的任务信息

Table 15 Task information of the elders in case 9

人员	所执行任务
老人 A	去卫生间
老人 B	站起
老人 C	去餐厅

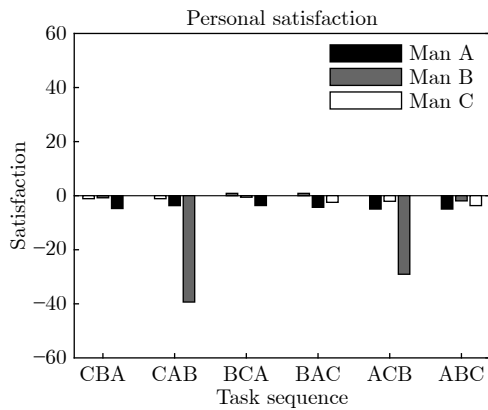


图 24 案例 8 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度

Fig. 24 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 8

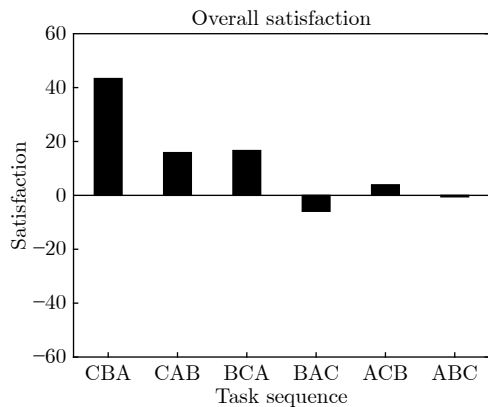


图 25 案例 8 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度

Fig. 25 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 8

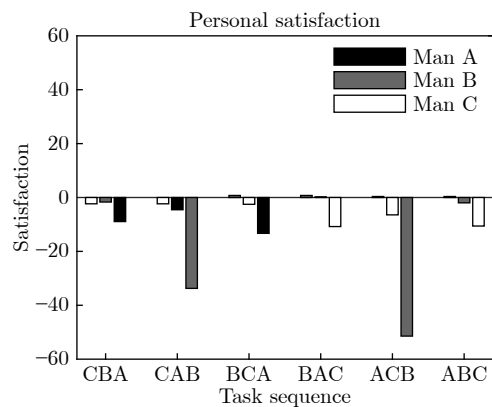


图 27 案例 9 中不同任务执行顺序下老人的个人满意度

Fig. 27 Personal satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 9

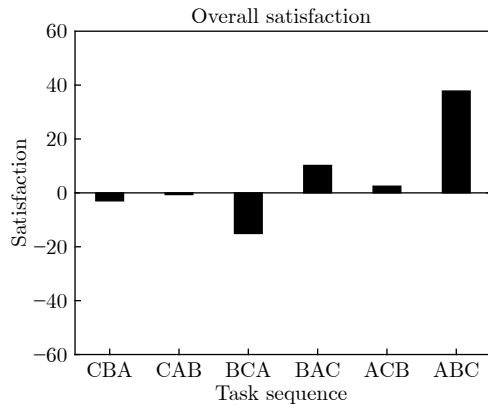


图 28 案例 9 中不同任务执行顺序下老人的总体满意度

Fig. 28 Overall satisfaction of the elderly under different task execution sequences in case 9

已等待时间,这是智能体最不能接受的情况,因此智能体选择让机器人先帮助 A.对于 B 和 C,机器人将 A 送到卫生间后,先帮助 B 再帮助 C 是顺路的,且 B 在性格急躁程度、舒适运载速度以及任务所需时间这些方面都具有优势,加之 C 所要执行的“去餐厅”任务受等待时间影响所造成的满意度下降不是非常明显,因此智能体给出的任务执行顺序是 ABC.

在案例 1、2、3 中,使 3 位老人同时执行“去卫生间”任务,保持机器人初始位置不变,改变老人们的个人信息来观察智能体给出的决策.案例 1 中,由于 3 位老人的个人信息相同,因此智能体根据 3 位老人的地理位置给出了最优的任务执行顺序 CAB.案例 2 中,B 的舒适运载速度增加了 0.4 m/s,这导致 B 可以以更快的速度执行任务、减少总体等待时间以及减少速度差造成的满意度下降,这些优势大于了需要返回帮助 C 造成的路程增加和总体等待时间增加,因此智能体给出的任务执行顺序是 BAC.案例 3 中,为使 A 成为第 1 名,需要大幅度增加 A 的优势,因为先帮助 A 将造成很多路程和总体等待时间的增加.因此在 A 的性格急躁程度增加 0.3、舒适运载速度增加 0.7 m/s、舒适拉起时间减少 2 s、舒适下坐时间减少 2 s、已等待时间增加 15 s 后,智能体终于将 A 排到了第 1 名.这是在 A 的优势已经远远大于其他人之后智能体不得不做出的决定.可以看出,在案例 1、2、3 中智能体给出的决策是较为合理的.在案例 4、5、6 中,保持机器人初始位置和老人个人信息不变,通过改变老人所要执行任务种类来观察智能体给出的决策.案例 4 中,C 执行“去卫生间”任务,由于该任务优先级最高且机器人距离 C 最近,因此 C 被排在的第 1 名. A 与 B 的任务优先级均较低,虽然 B 的任务“去餐厅”

的优先级较 A 的任务“站起”高 1 级,但 A 的地理位置较好且任务耗时较短,因此智能体在权衡后给出了 CAB 的任务执行顺序.案例 5 中,B 执行“去卫生间”任务,虽然 C 距离机器人最近且其任务“站起”耗时较短,但由于 B 的任务紧急,因此 B 被排在第 1 名. A 的任务“去餐厅”的优先级略高于 C,但 C 具有较短的任务执行时间,智能体经过权衡后给出了 BCA 的任务执行顺序.案例 6 中,虽然 A 距离机器人最远,但由于 A “去卫生间”的任务具有最高的优先级,智能体选择冒着增加总路程和总等待时间的风险将 A 排在第 1 名.机器人将 A 送入卫生间后,由于先帮助 B 是顺路的且 B 的“站起”任务耗时非常短,因此智能体给出的任务执行顺序是 ABC.由案例 4、5、6 可以看出,在面对非常紧急的任务时,智能体不会被其他较小的优势所影响,而是坚持先帮助任务优先级有绝对优势的老人.案例 7、8、9 中,同时改变机器人初始位置信息、老人所执行的任务种类以及老人的个人信息来观察智能体给出的决策.由于这 3 个案例中的变量较多,智能体给出的决策是否是最合理的,以人的主观意识无法准确判断.需要通过实验对象的满意度反馈不断地调整满意度模型中的各项参数,从而使智能体的决策越来越合理,最终达到能够满足绝大部分人需求的程度.

真实情况中,往往不会有如此多的冲突出现.一般情况下,老人提出需求后,智能体结合老人的个人信息对其任务进行规划并派出合适的机器人,然后机器人便可依据该规划按照 STdCPN 模型帮助老人完成任务.当多个任务冲突时,智能体会给出当前时刻最佳的任务执行顺序,并按照该顺序执行老人的任务.而在这些任务按照该顺序完成之前,有极大的可能会有其他机器人重新回到空闲状态,也有可能会有新的老人加入到队列中,此时智能体会根据新的系统状态来重新规划系统中的任务.

5 结论

本文为解决养老院情境下多个异构服务机器人照顾多位老人的建模问题,结合时延 Petri 网与颜色 Petri 网并加以改进提出了一种可扩展时延-颜色 Petri 网 (STdCPN),并使用 STdCPN 对养老院情境下多个异构服务机器人照顾多位老人的过程进行建模. STdCPN 的特点是在不改变网络结构的基础上随时调整系统中资源的种类(不仅限于数量),应用于养老院情境中,既可以增减老人和机器人的数量(该情境中,由于老人和机器人都携带着各自的信息,因此数量的增加即是种类的增加)也可以对老人的任务执行权限加以限制.为保证任务

过程中老人的满意度, 提出了基于养老院情境的服务对象满意度模型. 该模型考虑老人的性格急躁程度、已等待时间、机器人运载速度与老人舒适速度之差以及老人所要执行任务种类等因素来评估老人的满意度, 该满意度将作为系统中任务完成情况的重要指标. 设计了智能体作为该协调框架的“调度者”. 当老人提出任务需求后, 智能体根据机器人的实时状态、位置等信息派出合适的机器人执行任务, 并根据老人的“个人因素”结合满意度模型对老人的任务过程进行个性化的规划, 机器人将按照该规划以及对应的 STdCPN 模型执行任务. 当多个任务冲突时, 智能体会对所有的任务执行方案进行预测, 选出能够使得老人总体满意度最大的任务执行方案来执行. 对该协调框架进行了仿真. 通过仿真结果可以看出, 在仅改变老人个人信息和仅改变老人任务种类这两种情况下, 智能体均能给出较为合理的决策. 在同时改变老人个人信息、老人任务种类以及机器人初始位置的情况下, 智能体的决策仍具有其合理性. 本文接下来的工作, 将搭建基于 VR 虚拟场景和生理信号采集的满意度获取系统. 通过实验对象的满意度反馈不断地调整满意度模型中的各项参数, 从而使智能体的决策更加合理, 使该协调框架更好的应用于养老院情境.

附录

$$STdCPN = (P, T, F, D, C, W, M_0) \quad (A1)$$

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}, m = 28 \quad (A2)$$

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, n = 26 \quad (A3)$$

$$F = \{(p_1, t_1), (p_2, t_2), (p_2, t_{15}), (p_3, t_2), (p_3, t_{15}), (p_4, t_2), (p_5, t_3), (p_6, t_4), (p_7, t_5), (p_8, t_6), (p_9, t_7), (p_{10}, t_8), (p_{11}, t_9), (p_{12}, t_{10}), (p_{13}, t_{11}), (p_{14}, t_{12}), (p_{15}, t_{13}), (p_{16}, t_{14}), (p_{17}, t_{15}), (p_{18}, t_{16}), (p_{19}, t_{17}), (p_{20}, t_{18}), (p_{21}, t_{19}), (p_{22}, t_{20}), (p_{23}, t_{21}), (p_{24}, t_{22}), (p_{25}, t_{23}), (p_{26}, t_{24}), (p_{27}, t_{25}), (p_{28}, t_{26}), (t_1, p_4), (t_2, p_5), (t_3, p_6), (t_4, p_7), (t_5, p_8), (t_6, p_9), (t_7, p_{10}), (t_8, p_{11}), (t_9, p_{12}), (t_{10}, p_{13}), (t_{11}, p_3), (t_{11}, p_{14}), (t_{12}, p_{15}), (t_{13}, p_2), (t_{13}, p_{16}), (t_{14}, p_{17}), (t_{15}, p_{18}), (t_{16}, p_{19}), (t_{17}, p_{20}), (t_{18}, p_{21}), (t_{19}, p_{22}), (t_{20}, p_{23}), (t_{21}, p_{24}), (t_{22}, p_{25}), (t_{23}, p_{26}), (t_{24}, p_3), (t_{24}, p_{27}), (t_{25}, p_{28}), (t_{26}, p_1), (t_{26}, p_2)\} \quad (A4)$$

$$D : P \rightarrow \{x_1, x_2, x_3, x_4, d/v_{max}, x_6, t_{up}, x_8, t_{down}, 0, m/v, x_{12}, t_{up}, x_{14}, t_{down}, x_{16}, x_{17}, d/v_{max}, x_{19}, t_{up}, x_{21}, t_{down}, 0, m/v, x_{25}, t_{up}, x_{27}, t_{down}\} \quad (A5)$$

$$C = \{MAN1, MAN2, MAN3, MAN4, SR1, SR2, CR1, CR2\} \quad (A6)$$

$$M_0 : P \rightarrow \{[1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1], 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\} \quad (A7)$$

在 STdCPN 中, 由于映射在有向弧 F 上的权重可以是矩阵, 且该模型中含有多达 60 个有向弧, 同时权重只由“0”或“1”组成, 因此, 为方便表示, 现用一种简化的方式来描述权重. 每项权重由两部分组成, 第 1 部分为权重的“行数 \times 列数”, 第 2 部分为该权重中所有“1”的坐标, 其余未标出的坐标均为“0”. 例如, $[4 \times 8, ((1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4))]$ 与

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对应. 则权函数 W 如式 (A8) 所示.

该 STCPN 子模型的运行过程如下: 当库所 p_1 内的老人产生去卫生间的需求时, 他会向机器人进行呼叫 (通过遥控器或语音控制等方式, 即变迁 t_1 触发), 随即该老人进入一个虚拟的“等待区” (p_4). 这时系统判断该任务所需机器人是否处于空闲状态 (p_2 和 p_3). 如果该任务对应的机器人 (一个或多个) 不全处于空闲状态 (即变迁 t_2 的触发条件不满足, 无法触发), 则老人继续在“等待区”内等候, 直到有所需机器人重回空闲状态; 如果有对应机器人处于空闲状态, 则派出对应机器人 (变迁 t_2 触发), SR 和 CR 赶往老人的床位, p_2 内的 SR 和 p_3 内的 CR 随即消失 (退出“空闲”状态), 同时老人由在“等待区”内等待的状态 (p_4) 进入到“等待机器人到来”的状态 (p_5). 机器人就位的瞬间, 变迁 t_3 触发, 系统进入“老人准备”状态 (p_6). 待老人准备好之后, 变迁 (t_4) 触发, 步行支援机开始将老人拉起, 系统进入“老人正在被拉起”的状态 (p_7). 在拉起动作结束的瞬间 t_5 触发, 系统进入到 SR 与 CR 对接的状态 (p_8). 对接完成后 t_6 触发, SR 开始搀扶老人下坐到 CR 上, 系统进入“老人正在下坐”的状态 (p_9). 动作完成后 t_7 触发, 老人坐在 CR 上 (p_{10}). 随即变迁 t_8 触发, CR 载着老人进入行驶状态 (p_{11}), 此时 SR 需跟随 CR 以帮助老人完成之后的动作, 当该状态结束时, CR 已载着老人到达目的地且两机器人已调整好位姿. 随即变迁 t_9 触发, 系统进入“老人准备”的状态 (p_{12}), 老人准备好之后变迁 t_{10} 触发, SR 再次对老人进行拉起 (p_{13}), 该动作完成后 t_{11} 触发, SR 带着老人调整位姿 (p_{14}), 同时本次任务中 CR 的所有动作已完成, CR 回到空闲状态 (p_3), 重新在 p_3 中出现. 老人的任务继续进行, SR 调整好位姿后 t_{12} 触发, SR 搀扶老人坐到马桶上 (p_{15}). 该动作完成后 t_{13} 触发, 老人坐在马桶上 (p_{16}), 同时 SR 的所有动作完成, 回到“空闲”状态 (p_2). 此时“去卫生间”任务完成, 当老人需要返回床位时, 他将再次提出需求, 重新进入到虚拟的“等待区” (p_{17}).

2), (4, 6), (5, 3), (5, 5), (6, 3), (6, 6), (7, 4), (7, 5), (8, 4), (8, 6)], [8×8, ((1, 1), (1, 5), (2, 1), (2, 6), (3, 2), (3, 5)), (4, 2), (4, 6), (5, 3), (5, 5), (6, 3), (6, 6), (7, 4), (7, 5), (8, 4), (8, 6)], [2×8, ((1, 7), (2, 8))], [4×8, ((1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4))], [16×8, ((1, 1), (1, 5), (1, 7), (2, 1), (2, 5), (2, 8), (3, 1), (3, 6), (3, 7), (4, 1), (4, 6), (4, 8), (5, 2), (5, 5), (5, 7), (6, 2), (6, 5), (6, 8), (7, 2), (7, 6), (7, 7), (8, 2), (8, 6), (8, 8), (9, 3), (9, 5), (9, 7), (10, 3), (10, 5), (10, 8), (11, 3), (11, 6), (11, 7), (12, 3), (12, 6), (12, 8), (13, 4), (13, 5), (13, 7), (14, 4), (14, 5), (14, 8), (15, 4), (15, 6), (15, 7), (16, 4), (16, 6), (16, 8))], [16×8, ((1, 1), (1, 5), (1, 7), (2, 1), (2, 5), (2, 8), (3, 1), (3, 6), (3, 7), (4, 1), (4, 6), (4, 8), (5, 2), (5, 5), (5, 7), (6, 2), (6, 5), (6, 8), (7, 2), (7, 6), (7, 7), (8, 2), (8, 6), (8, 8), (9, 3), (9, 5), (9, 7), (10, 3), (10, 5), (10, 8), (11, 3), (11, 6), (11, 7), (12, 3), (12, 6), (12, 8), (13, 4), (13, 5), (13, 7), (14, 4), (14, 5), (14, 8), (15, 4), (15, 6), (15, 7), (16, 4), (16, 6), (16, 8))], [16×8, ((1, 1), (1, 5), (1, 7), (2, 1), (2, 5), (2, 8), (3, 1), (3, 6), (3, 7), (4, 1), (4, 6), (4, 8), (5, 2), (5, 5), (5, 7), (6, 2), (6, 5), (6, 8), (7, 2), (7, 6), (7, 7), (8, 2), (8, 6), (8, 8), (9, 3), (9, 5), (9, 7), (10, 3), (10, 5), (10, 8), (11, 3), (11, 6), (11, 7), (12, 3), (12, 6), (12, 8), (13, 4), (13, 5), (13, 7), (14, 4), (14, 5), (14, 8), (15, 4), (15, 6), (15, 7), (16, 4), (16, 6), (16, 8))], [16×8, ((1, 1), (1, 5), (1, 7), (2, 1), (2, 5), (2, 8), (3, 1), (3, 6), (3, 7), (4, 1), (4, 6), (4, 8), (5, 2), (5, 5), (5, 7), (6, 2), (6, 5), (6, 8), (7, 2), (7, 6), (7, 7), (8, 2), (8, 6), (8, 8), (9, 3), (9, 5), (9, 7), (10, 3), (10, 5), (10, 8), (11, 3), (11, 6), (11, 7), (12, 3), (12, 6), (12, 8), (13, 4), (13, 5), (13, 7), (14, 4), (14, 5), (14, 8), (15, 4), (15, 6), (15, 7), (16, 4), (16, 6), (16, 8))], [16×8, ((1, 1), (1, 5), (1, 7), (2, 1), (2, 5), (2, 8), (3, 1), (3, 6), (3, 7), (4, 1), (4, 6), (4, 8), (5, 2), (5, 5), (5, 7), (6, 2), (6, 5), (6, 8), (7, 2), (7, 6), (7, 7), (8, 2), (8, 6), (8, 8), (9, 3), (9, 5), (9, 7), (10, 3), (10, 5), (10, 8), (11, 3), (11, 6), (11, 7), (12, 3), (12, 6), (12, 8), (13, 4), (13, 5), (13, 7), (14, 4), (14, 5), (14, 8), (15, 4), (15, 6), (15, 7), (16, 4), (16, 6), (16, 8))], [2×8, ((1, 7), (2, 8))], [8×8, ((1, 1), (1, 5), (2, 1), (2, 6), (3, 2), (3, 5)), (4, 2), (4, 6), (5, 3), (5, 5), (6, 3), (6, 6), (7, 4), (7, 5), (8, 4), (8, 6)], [8×8, ((1, 1), (1, 5), (2, 1), (2, 6), (3, 2), (3, 5)), (4, 2), (4, 6), (5, 3), (5, 5), (6, 3), (6, 6), (7, 4), (7, 5), (8, 4), (8, 6)], [4×8, ((1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4))], [2×8, ((1, 5), (2, 6))]] (A8)

References

- Bloom D E, Canning D, Lubet A. Global population aging: Facts, challenges, solutions & perspectives. *Daedalus*, 2015, **144**(2): 80–92
- Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 1989, **77**(4): 541–580
- Joaquin López, Diego Pérez, Zalama E. A framework for building mobile single and multi-robot applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, **59**(3–4): 151–162
- Ziparo V A, Iocchi L, Lima P U, Nardi D, Palamara P F. Petri net plans. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2011, **23**(3): 344–383
- Maza I, Caballero F, Capitán J, Martínez-de-Dios J R, Ollero A. Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2011, **61**(1–4): 563–585
- Farinelli A, Nicoló Boscolo, Zanotto E, Pagello E. Advanced approaches for multi-robot coordination in logistic scenarios. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, **90**: 34–44
- Öztürk S, Kuzucuoğlu A E. A multi-robot coordination approach for autonomous runway foreign object debris (FOD) clearance. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, **75**: 244–259
- Jones E G, Dias M B, Stentz A. Time-extended multi-robot coordination for domains with intra-path constraints. *Autonomous Robots*, 2011, **30**(1): 41–56
- Kala R. Multi-robot path planning using co-evolutionary genetic programming. *Expert Systems with Applications*, 2012, **39**(3): 3817–3831
- Haghighi R, Cheah C C. Multi-group coordination control for robot swarms. *Automatica*, 2012, **48**(10): 2526–2534
- Puig D, García M A, Wu L. A new global optimization strategy for coordinated multi-robot exploration: Development and comparative evaluation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011,

59(9): 635–653

- 12 Nieto-Granda C, Rogers III J G, Christensen H I. Coordination strategies for multi-robot exploration and mapping. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, **33**(4): 519–533
- 13 Wu Pei-Liang, Kong Ling-Fu, Kong Liang. A solution to simultaneous localization, calibration and mapping of ubiquitous robot system. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 618–631 (吴培良, 孔令富, 孔亮. 一种普适机器人系统同时定位、标定与建图方法. *自动化学报*, 2012, **38**(4): 618–631)
- 14 Thomas C, Busch F, Kuhlenkoetter B, Deuse J. Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 464–470
- 15 Nokata M, Ikuta K, Ishii H. Safety-optimizing method of human-care robot design and control. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC, USA: IEEE, 2002. **2**: 1991–1996
- 16 Lu Y, Zeng L, Bone G M. Multisensor system for safer human-robot interaction. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, FL, USA: IEEE, 2005. 1767–1772
- 17 Kulić D, Croft E A. Real-time safety for human-robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, **54**(1): 1–12
- 18 Gombolay M C, Gutierrez R A, Clarke S G, Sturla G F, Shah J A. Decision-making authority, team efficiency and human worker satisfaction in mixed human-robot teams. *Autonomous Robots*, 2015, **39**(3): 293–312
- 19 Kim Y C, Yoon W C, Kwon H T, Yoon Y S, Kim H J. A cognitive approach to enhancing human-robot interaction for service robots. In: Proceedings of Symposium on Human Interface and the Management of Information. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 858–867
- 20 Rosenfeld A, Agmon N, Maksimov O, Kraus S. Intelligent agent supporting human-multi-robot team collaboration. *Artificial Intelligence*, 2017, **252**: 211–231



李勇 沈阳工业大学电气工程学院副教授。2010 年获得东北大学控制理论与控制工程博士学位。主要研究方向为系统建模与多目标优化和机器学习。

E-mail: liyong@sut.edu.cn

(**LI Yong** Associate professor at the School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology. He received his Ph. D. degree in control theory and control engineering from Northeastern University in 2010. His research interest covers system modeling and multi-objective optimization, machine learning.)



李坤成 沈阳工业大学电气工程学院硕士研究生。主要研究方向为多机器人-多任务协调。

E-mail: likuncheng94@aliyun.com

(**LI Kun-Cheng** Master student at the School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology.

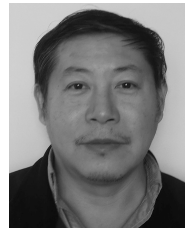
His main research interest is multi-robot-multi-task coordination.)



孙柏青 沈阳工业大学电气工程学院副教授。2006 年获得日本高知工业大学智能机械系统工程专业工学博士学位。主要研究方向为智能康复机器人和人机交互。本文通信作者。

E-mail: sunbaiqing@sut.edu.cn

(**SUN Bai-Qing** Associate professor at the School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology. He received his Ph. D. degree in intelligent mechanical system engineering from Kochi University of Technology, Japan, in 2006. His research interest covers intelligent rehabilitation robots and human-robot interaction. Corresponding author of this paper.)



张秋豪 沈阳工业大学电气工程学院副教授。2005 年获得北京邮电大学信号与信息处理博士学位。主要研究方向为康复机器人。

E-mail: zhangqhao@sina.com

(**ZHANG Qiu-Hao** Associate professor at the School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology. He received his Ph. D. degree in signal and information processing from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2005. His research interest covers rehabilitation robots.)



王义娜 沈阳工业大学电气工程学院副教授。2014 年获得日本高知工业大学基础工学系博士学位。主要研究方向为智能康复机器人, 运动控制, 智能算法。

E-mail: wang.yina@sut.edu.cn

(**WANG Yi-Na** Associate professor at the School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology. She received her Ph. D. degree in engineering from Kochi University of Technology, Japan, in 2014. Her research interest covers intelligent rehabilitation robots, motion control, intelligent algorithm.)



杨俊友 沈阳工业大学电气工程学院教授。1993 年获得哈尔滨工业大学电气工程博士学位。主要研究方向为智能福祉机器人, 智能电网, 特种电机及其控制。

E-mail: junyouyang@sut.edu.cn

(**YANG Jun-You** Professor at the School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology. He received his Ph. D. degree in electrical engineering from Harbin Institute of Technology in 1993. His research interest covers intelligent welfare robot, smart grid, special motors and their control.)