

# 移动作业助老助残服务机器人人机协作:认知建模及其应用<sup>①</sup>

屠大维<sup>②</sup> 江济良 许 烨 郭 帅 何永义 谈士力 方明伦

(上海大学机电工程与自动化学院,上海市机械自动化及机器人重点实验室 上海 200072)

**摘要** 进行了寻求移动作业助老助残服务机器人人机协作新途径的研究。与以往人机系统研究强调将人的定性判断决策智能与机器的定量计算推理智能相结合的人机任务分工不同,该研究提出了一种新的人机协作实现途径,即采用认知推理语义网络推动人机交互进程,借鉴理性思维适应性控制(ACT-R)认知架构进行人机协作认知建模,通过人、机器、感知、人机交互、人机耦合等功能模块的相互激励、联系与整体综合实现人机智能融合。试验表明,上述人机协作认知架构及技术路径具有可行性。本文研究虽以移动作业服务机器人为例,但对于智能康复床、智能轮椅、智能清洗设备等其它类型的服务机器人也具有普遍意义。

**关键词** 人机协作, 理性思维适应性控制(ACT-R)认知架构, 人机一体化, 人机交互, 服务机器人

## 0 引言

服务机器人是在非结构环境下为人类提供服务的多种高技术集成的智能系统。助老助残是服务机器人的重要应用领域之一。在典型的助老助残应用中,服务对象通常具有智能正常但行动不便的特点。针对这一特点,助老助残机器人研究不仅需要进一步提高机器人本身的功能及智能,而且需要着重解决机器、人(服务对象)、作业环境之间的关系问题,包括人机交互、人机一体化、人机协同和人机智能融合等。在人机交互方面,近十几年来国内外的研究重点主要集中在两个方面:一是基于简单、自然人机效应通道如“听觉-语音”<sup>[1]</sup>和“视觉-眼动”<sup>[2-4]</sup>人机双向效应通道的人机交互技术,二是以此为基础的多通道人机交互模式及其整合,国内外在模型、描述方法、整合算法及评估等方面已取得重要的基础性研究成果<sup>[5, 6]</sup>。近年来,研究人员将人机交互空间扩大到人们生活物理空间的普适计算模式<sup>[7-9]</sup>,使传统人机交互的性质发生了本质的变化。在人机智能和人机一体化方面,20世纪90年代初,著名学者钱学森、戴汝为、路甬祥、陈鹰等分别从思维(认知)科

学、人工智能、人机系统等不同角度提出了人机智能、人机一体化的概念,强调智能的“人”与智能的“机器”共同感知、共同决策、平等合作,产生新的更高形式的智能<sup>[10-15]</sup>。此后,有关人机结合智能系统的理论和实践取得了不同程度的进展<sup>[16-21]</sup>。总的来说,上述研究的重点主要集中在将人的定性判断决策智能与机器的定量计算推理智能相结合的人机任务分工和界面上。

近年来,认知科学研究人员在研究人类智能时,提出了不同的认知模型用以解释人类的思维活动,如理性思维适应性控制(adaptive control of thought-rational, ACT-R)模型、状态算子和结果(SOAR)模型和执行过程交互控制(EPIC)模型等。一些从事人机系统研究的学者将其作为研究人机合作、人机交互和人机界面的理论架构。Salvucci 通过 ACT-R 认知建模,评估了认知在驾驶任务中对危险情况的预测和规避作用<sup>[22, 23]</sup>, Ritter 等借助 ACT-R 认知架构提供了几种可实施的人与计算机、人与机器人交互的认知模型<sup>[24]</sup>, Kennedy 等将人与机器人当作一个团队,通过 ACT-R 认知建模提高了人机工作效率<sup>[25]</sup>。当我们面对有基本认知行为能力的行动不便老人、肢残疾人、运动和语障患者这类服务对象与服

① 863 计划(2007AA041604),国家自然科学基金(51075252)和上海大学科技创新基金(A.10-0109-11-003)资助项目。

② 男,1965 年生,博士,教授,研究方向:机器视觉及智能,人机一体化系统;联系人,E-mail: tdw@shu.edu.cn

(收稿日期:2011-11-22)

务机器人构成的人机系统时,需要重新思考人机界面和人机协作机制。本文从 ACT-R 认知架构基本思想出发,提出了一种针对移动作业助老助残服务机器人应用的人机交互和人机协作认知架构,并围绕具体的作业任务,构建了服务机器人人机一体化系统,以实现人机耦合协同作业、人机智能融合之目的。

## 1 ACT-R 认知架构

美国心理学家 Anderson 于 1976 年提出了理性思维适应性控制 (ACT-R) 架构,试图揭示人类组织知识、产生智能行为的思维运动规律,包括感知和注意力、学习和记忆、问题解决和做决定等。到目前为止,ACT-R 有多个版本发布,本文仅就 ACT-R 认知架构的基本特征作一简单介绍。

如图 1 所示,ACT-R 认知架构由基本模块、缓冲和模式匹配 3 种类型的部件组成,所有部件都与人脑的某个功能神经生理区域相对应<sup>[26]</sup>。

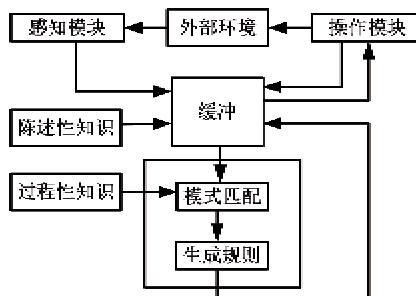


图 1 ACT-R 基本架构

基本模块包括感知/操作模块和记忆模块。感知/操作模块负责系统对外界的感知和操作,如看到桌子上有一只苹果,伸手拿过来。记忆模块是指存储在人大脑中的知识,包括陈述性知识和程序性知识。其中,陈述性知识由事实陈述构成,如上面例子中关于苹果的知识。程序性知识由生产过程组成,是关于怎么做事情的知识,如上面拿苹果的例子中先伸长手臂,再张开五指拿住苹果,最后缩回手臂等一系列动作。此外,人的大脑对知识的处理不是简单的储存,还涉及知识的表达(如语义网络、框架表示等)、推理、联想等一系列认知活动。

生成规则是 ACT-R 最基本的特征之一。其基本形式为:IF〈条件〉THEN〈结果〉,即当条件满足时相应的规则被触发。ACT-R 认知过程就是生成规则不断触发的过程。ACT-R 的另一个重要概念是

模式匹配。模式匹配是在知识库中搜索并触发与当前缓冲状态一致的生成规则。触发结果将修改缓冲状态,从而改变系统状态。可见,缓冲是实现生成规则与其他基本模块(除过程性知识模块外)交互的接口,其内容标识 ACT-R 当前的状态。

## 2 移动作业助老助残服务机器人人机协同认知建模

### 2.1 人机一体化系统设想

将“人”的因素纳入人机系统之中,需要从人工智能和认知科学的角度来构建系统工作机制。在人的知觉、意识、注意、记忆、联想等思维活动与机器人之间错综复杂的关系中,寻求一条双向通道,一方面整合机器感知的信息进入人的认知层面,影响人的思维活动;另一方面发挥人的认知智能对环境、对象、机器执行等进行控制。助老助残服务机器人人机一体化系统设想如图 2 所示。显然,在上述人机一体化系统中,除服务对象必须具有基本的认知智能外,还必须具备:(1)智能服务机器人单元,用于执行作业任务,并对服务机(上位机)开放通信和接口;(2)人机效应通道,用于人与机器人交流交互。

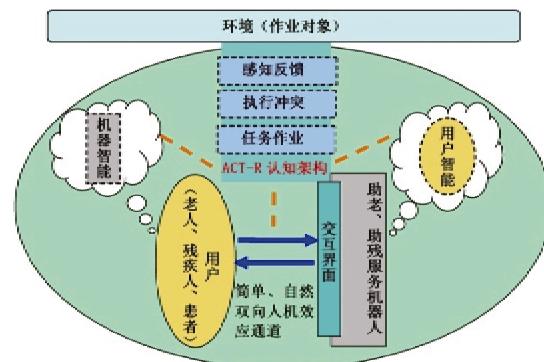


图 2 助老助残服务机器人人机一体化系统基本设想

本文研发的双臂移动作业服务机器人全身总自由度多达 22 个,双臂自由度各为 6 个;装载了 CCD 摄像机、激光雷达、双目立体视觉、电子罗盘、内部航迹推算编码器等传感器,可通过 C/S 结构的无线局域网与服务机通讯;在移动和作业中具有局部路径规划和避障功能,包括基于激光雷达的局部定位和地图构建(SLAM)、基于系统动力学模型的航位推算模块、数据融合模块、人机界面模块、路径规划模块和运动控制模块等功能模块,如图 3 所示。

对正常人而言,鼠标、键盘、触摸屏等是方便、常用的人机交互装置,但老年人、残疾人需要专门的人

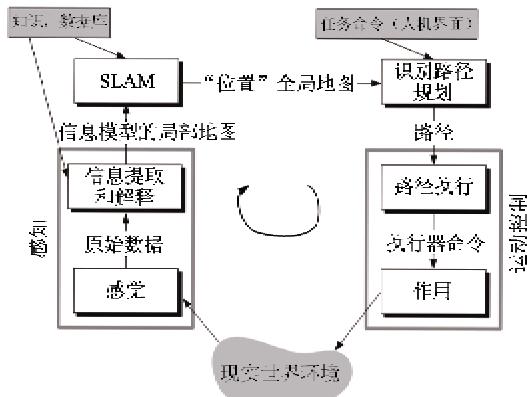


图3 机器人局部路径规划和避障功能

机效应通道和交互界面。本文开发了“视觉-眼动”、“听觉-语音”、接触式按钮等3种简单自然人机交互效应通道，并配有相应的输入/输出界面，如图4所示。输入菜单的每一格任务栏提示并引导用户输入命令或意愿，输出界面为文字、图形、视频等信息。其工作原理可参见文献[27, 28]，此处不再赘述。



图4 人机交互效应通道及其输入/输出人机界面

## 2.2 移动作业助老助残服务机器人人机协作基本任务

用户基本认知智能正常但有肢体行为障碍，只能坐或躺在房间1内（见图5），由服务机器人帮助其完成某些任务。因此，机器人需要在半结构化环境的房间和走廊内运动和作业，如移动到房间2，识别并抓取一只杯子，移动到饮水机旁，倒上水后，回

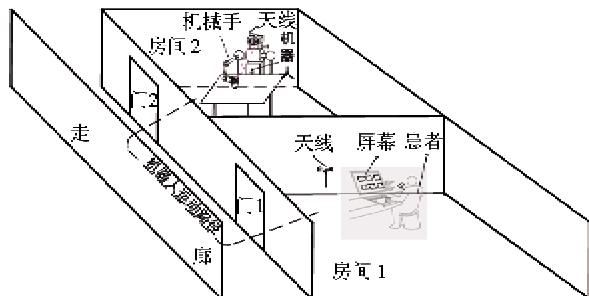


图5 助老助残服务机器人的移动作业任务

到用户身旁。显然，按照目前的机器智能水平，机器人在半结构化环境中自主完成上述一系列路径规划、避障、目标识别及倒水作业任务是困难的，因此需要以人机交互为基础的人机协同作业。

## 2.3 人机交互作业进程的认知推理及语义网络

围绕作业任务，用户与服务机器人之间通过认知推理构成的语义网络来推动交互进程。用户通过人机效应通道根据认知语义向机器人发出请求，机器人依据交互信息和作业进程，给出一个基于知识或上下文的语义提示，要求用户作出认知响应。进一步地，机器人根据用户反应或反馈信息发出有目的的提示语义，如要求用户确定一些参数，或对多种方案做出选择等。当机器智能不足以推动信息分析进程或认知进程时，机器又要寻求新的知识或重新分析上下文，要求用户反应，从而形成认知推理语义网络。图6是围绕用户感到“口渴”、想要“喝水”构成的语义网络，据此推动机器人完成进入房间2、取杯子、倒水等一系列交互和作业进程。语义网络还可分层，即根据作业进程形成下一级语义子网络。例如，围绕机器人“移动”这一语义概念，可以推理出“前进”、“后退”、“左转”、“右转”、“原地左转”、“原地右转”、“停”等不同的语义指令，形成“移动”子网络。又如，机器人进入房间2后，围绕“取物”，按照不同的认知推理，有走近“桌子”→取“杯子”→“白颜色的杯子”，走近“写字台”→拿“一本书”→“红颜色的书”，等等。

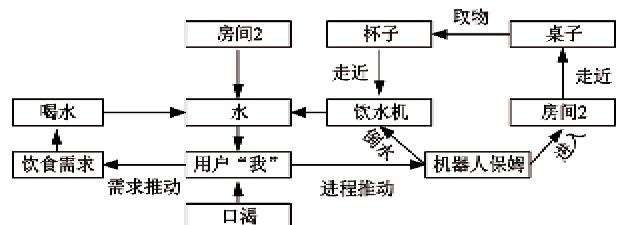


图6 人机交互和作业进程的认知推理及其语义网络

## 2.4 人机协同作业的认知描述和认知建模

图1所示ACT-R人类认知架构的各组成模块，特别是基于知识单元的条件响应生成规则，对于服务机器人一体化系统的构建以及人机协同、人机决策等方面的设计具有借鉴意义。图7是基于ACT-R认知架构设计的助老助残服务机器人人机协作模型框架，它描述了人机一体化系统的决策方式，其中：

(1) 机器感知模块：指机器人用于感知环境和作业对象的机载传感器。在本文2.1节所述移动作

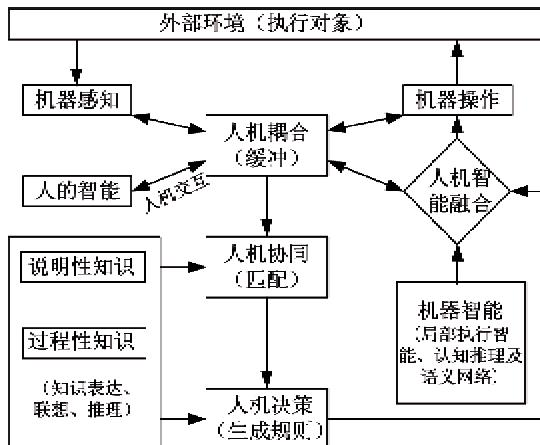


图 7 人机协作系统的 ACT-R 认知模型

业机器人中,包括 CCD 摄像机、激光雷达、双目立体视觉、电子罗盘和内部航迹推算编码器等。

(2) 机器操作模块：指机器人完成作业任务所需要的执行机构，在本文 2.1 节所述移动机器人中，包括有多关节双手臂、手抓、轮式行走机构等。

(3) 说明性知识模块：包括两部分内容，一是人的认知记忆，二是计算机存储的一些事实，如室内环境的电子地图、人机功效参数、系统标定等。说明性知识是构成人机协作认知推理及语义网络的基础。

(4) 过程性知识模块：体现在两个过程中，一是基于人的认知形成的机器执行规则，如当机器人在移动过程中检测到障碍物，人根据经验做出左转或右转的决策；二是机器人在局部自主执行中，依据符号操作规则形成的生成规则，如机器人采用人工势场法进行局部自主运动规划和避障时，将目标虚拟吸引方和障碍物虚拟排斥力的合力作为判别依据，决定其当前运动方式。

(5) 人机耦合:是联系感知、执行、人的智能、机器智能、人机协作等模块的接口,是各种信息的汇集界面,也是实现人机协作、人机决策,产生人机智能的媒介。

(6)人机协同:用户采取试探的、经验积累的方法去适应机器。人引发的交互通过图 4 所示简单、自然的效应通道来实现,人的智能体现在物体识别、文字辨识、目标和方向判断等形象思维和全局把握能力方面,机器人的自主执行智能体现在定量分析和计算方面。在最大限度发挥机器智能的同时,充分考虑人的认知因素。

(7) 人机决策生成规则:在路径规划、目标识别等方面以人的认知为主,在具体局部作业方面以机器智能为主。机器人在局部作业中对人的意愿和命

令以及机载传感器获得的局部环境和对象信息进行综合分析判断，以保证作业的最高安全性。

(8)人机智能：体现在系统中各模块分别发挥作用，模块之间的联系、激励和信息交互，以及各模块组成网络的整体综合效应等方面。这种智能实现方式既有符号主义特点，又有连接主义特点，也有行为主义特点。

### 3 人机耦合与人机协作试验

### 3.1 人机耦合试验

前文已述，人机耦合模块是系统各组成模块的接口和各种信息汇集的界面。因此，本试验的目的在于，检验人机耦合界面中模型的准确性以及基于人机耦合界面实施人机协作的可靠性。

第一步,建立室内环境和服务机器人的三维模型。利用 OpenGL 提供的三维物体图形库,按照室内地形真实尺寸建立室内环境的三维模型,需特别注意房间的长宽尺寸、门的位置、室内固定物的位置和尺寸;同时建立机器人的三维模型,需特别注意活动关节部位。所建模型如图 8 所示。

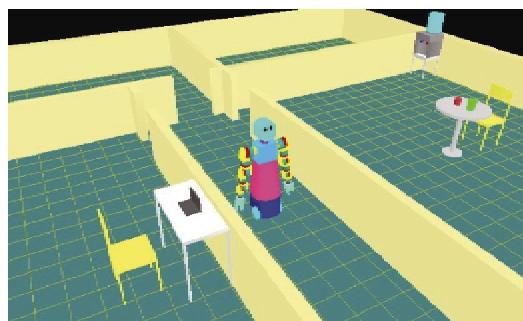


图8 室内环境和服务机器人的三维模型

第二步,利用服务机和客户机(机器人)之间的实时通信,实现模型的实时同步更新。利用实际机器人驱动轮左右电机编码器和机载数字罗盘获得机器人在环境中的实时位姿,并经机载激光雷达依据固定的墙和门框的位置实现自定位参数修正。将这些数据通过无线局域网传给服务机,则可以确定模型机器人在模型环境中的位姿,从而实现模型的实时同步更新。在图9中用实线和虚线分别表示实际机器人和模型机器人作直线运动时主动轮的位移-时间曲线,显然,两者的运动耦合误差近似为零。这说明,模型机器人在模型环境中的运动与实际机器人在实际环境中的运动同步一致。同样,实际机器

人腰部、头部、手臂、手腕等关节的转角数据传给服务器,也使模型机器人相应部位的姿态与实际机器人同步一致。由此,人可在系统回路中同步感受机器人的位置、姿态和作业进程,了解环境状况,获取机载传感器信息等。

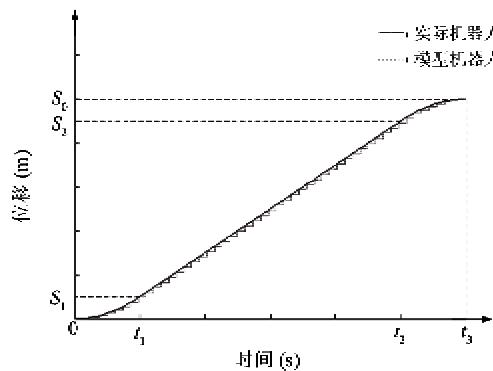


图9 实际机器人和模型机器人的主动轮位移-时间曲线

### 3.2 人机协作试验

本试验的目的在于,在完成图5所示移动作业任务的过程中,检验人机协作的有效性,人机协作认知架构下人机交互的自然性、精确性和充分性,以及机器执行的柔顺性和安全性。

图10显示机器人在从房间1通向房间2的走廊内检测到障碍物,在其自主智能无法解决避障问题的情况下,向人发出“左转”或“右转”的询问。用户根据机载CCD摄像机获得的现场视频图像,凭借自身的认知智能发出“右转”指令。在人机协作过程中,机器人若发现人的指令与现场传感器信息冲突,则将情况及时通报给人,以便人能及时采取补救措施。在人不能采取有效措施的情况下,机器人将自主实施控制。若调节不过来,则启动自动制动程序,终止任务进程,以保障最高安全性。如在上述情况下,若用户发出“左转”的错误指令,则机器人由于检测到墙体(障碍物)而在原地停止不动,等待人



图10 机器人移动过程中的人机协作界面

的进一步命令。图11中的曲线1和曲线2分别为用户发出“右转”和“左转”指令后,机器人的移动轨迹。

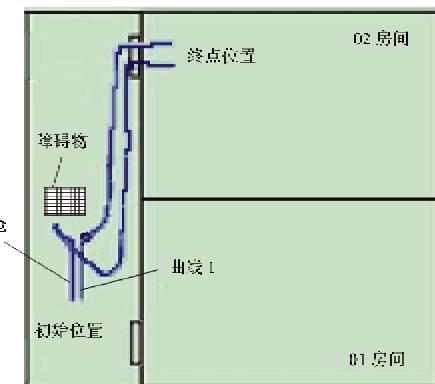


图11 机器人移动轨迹

当机器人进入房间2后,人的认知智能主要体现在,先引导机器人走到桌子边抓取杯子,再引导机器人走到饮水机边倒水,并通过人机界面发出相关指令。机器自主执行智能主要体现在,依据目标位置自主定位,根据逆运动原理进行手臂、手抓的运动规划并执行各关节的动作。图12所示为上述人机协作流程。

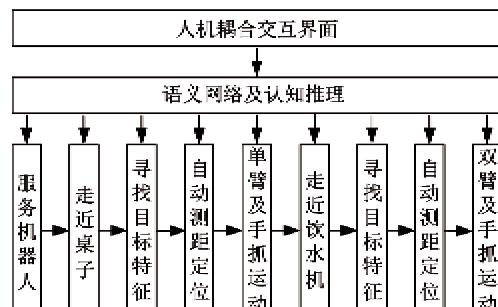


图12 倒水作业中的人机协作流程

## 4 结 论

(1)本文将服务机器人的服务对象(人)纳入到系统之中,与机器共同感知、共同决策、平等协作完成移动作业任务。与以往人机系统研究中将人的定性判断决策智能与机器的定量计算推理智能相结合的人机任务分工不同,本文采用认知推理语义网络推动人机交互进程,借鉴ACT-R认知架构开展人机协作认知建模,通过人、机器、感知、耦合、人机协作、人机决策等不同功能模块的相互激励、联系与整体综合实现人机智能融合。

(2) 从人机一体化系统实施的技术路径看, 系统中智能的人、智能的机器以及联系两者的人机交互效应通道是实现人机一体化智能系统所必须具备的技术单元。在这些单元技术基础上采取人机协作认知架构设计、人机协作交互进程推理及其语义网络、人机耦合等整体综合技术是实现人机智能融合的保障。

(3) 本文研究虽以移动作业服务机器人为例, 但单元化、模块化的软硬件实现途径使所开发的技术对于智能康复床、智能轮椅、智能清洗设备等其它类型的服务机器人也具有普遍意义。

有关人机协作交互进程的认知推理语义网络、机器人自主智能控制、人机参数选择、人机功效等内容将另文单独发表。

#### 参考文献

- [1] Su M C, Chung M T. Voice-controlled human-computer interface for the disabled. *Computer and Control Engineering Journal*, 2001, 12(5): 225-230
- [2] 厉大维, 赵其杰, 尹海荣. 自动适应用户头部位置变化的眼睛盯视输入系统. *仪器仪表学报*, 2004, 25(6): 828-831
- [3] 张闯, 迟健男, 张朝晖等. 视线追踪系统中眼睛跟踪方法研究. *自动化学报*, 2010, 36(8): 1051-1061
- [4] 黄莹, 王志良, 涂序等. 一种可适应自然头动的视线追踪系统的研制及应用. *电子学报*, 2009, 37(4): 764-770
- [5] 袁保宗, 阮秋琦, 王延江等. 新一代(第四代)人机交互的概念框架特征及关键技术. *电子学报*, 2003, 31(12A): 1945-1954
- [6] 林应明, 董士海. 多通道融合算法和软件平台的实现. *计算机学报*, 2000, 23(1): 90-94
- [7] 徐光桔, 陶霖密, 史元春等. 普适计算模式下的人机交互. *计算机学报*, 2007, 30(7): 1041-1052
- [8] 岳玮宁, 董士海, 王锐等. 普适计算的人机交互框架研究. *计算机学报*, 2004, 27(12): 1657-1663
- [9] 马翠霞, 任磊, 滕东兴等. 云制造环境下的普适人机交互技术. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(3): 504-510
- [10] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. *自然杂志*, 1990, 13(1): 3-10
- [11] 戴汝为. 人-机结合的智能科学和智能工程. *中国工程科学*, 2004, 6(5): 24-27
- [12] 戴汝为, 张雷鸣. 思维(认知)科学在中国的创新与发  
展. *自动化学报*, 2010, 36(2): 193-198
- [13] 路甬祥, 陈鹰. 人机一体化系统与技术——21世纪机械科学的重要发展方向. *机械工程学报*, 1994, 30(5): 1-7
- [14] 路甬祥, 陈鹰. 人机一体化系统与技术立论. *机械工程学报*, 1994, 30(6): 1-9
- [15] 路甬祥, 陈鹰. 人机一体化系统科学体系和关键技术. *机械工程学报*, 1995, 31(1): 1-7
- [16] 杨灿军, 陈鹰, 路甬祥. 人机一体化智能系统理论及应用研究探索. *机械工程学报*, 2000, 36(6): 42-47
- [17] 王挺, 王越超. 非结构环境下基于人机合作技术的抓取作业研究. *机器人*, 2008, 30(1): 7-12
- [18] 曾建军, 杨汝清, 张伟军. 有限人参与下的排爆机器人半自主抓取. *上海交通大学学报*, 2007, 41(8): 1238-1243
- [19] 高胜, 赵杰. 基于人机合作的遥操作机器人系统控制模型. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(4): 649-653
- [20] 黄志华, 厉大维, 赵其杰. 基于人机一体化的移动服务机器人导航系统. *机器人*, 2009, 31(3): 248-253
- [21] 滕弘飞, 王奕首, 史彦军. 人机结合的关键支持技术. *机械工程学报*, 2006, 42(11): 1-8
- [22] Salvucci D D. Modeling driver behavior in a cognitive architecture. *Human Factors*, 2006, 48(2): 362-380
- [23] Salvucci D D, Taatgen N A. Threaded cognition: An integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, 2008, 115(1): 101-130
- [24] Ritter F E, Van Rooy D, Amant R St, et al. Providing user models direct access to interfaces: an exploratory study of a simple interface with implications for HRI and HCI. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2006, 36(3): 592-601
- [25] Kennedy W G, Bugajska M D, Adams W, et al. Incorporating mental simulation for a more effective robotic teammate. In: Proceedings of the 23rd AAAI Conference on Artificial Intelligence and the 20th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference, Chicago, USA, 2008. 1300-1305
- [26] Chong H Q, Tan A H, Ng G W. Integrated cognitive architectures: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 2007, 28(2): 103-130
- [27] 赵其杰. 服务机器人多通道人机交互感知反馈工作机制及关键技术: [博士学位论文]. 上海: 上海大学机电工程与自动化学院, 2005 年
- [28] 赵其杰, 厉大维, 高达明等. 人机交互方法及装置. 中国, 发明专利, CN1584791. 2005-02-23

## **Human-robot collaboration of mobile robots for aged and disabled assistance: cognition modelling and application**

Tu Dawei, Jiang Jiliang, Xu Shuo, Guo Shuai, He Yongyi, Tan Shili, Fang Minglun

( Shanghai Key Laboratory of Manufacturing Automation and Robotics,

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072 )

### **Abstract**

The work aims to search for a new method of human-robot collaboration ( HRC ) for the application of aged and disabled assistance. Different from previous human-robot studies focusing on integrating the human decision-making intelligence by qualitative judgment with the robots' reasoning intelligence by quantitative calculation, this study gave a new philosophy for HRC, namely, adopting a semantic web of cognitive reasoning to promote human-robot interaction ( HRI ), constructing a cognitive HRC model by taking reference from the adaptive control of thought-rational ( ACT-R ) human cognitive architecture, and realizing the human-robot intelligence integration ( HRII ) by the mutual encouragement, connection and integration of the functional modules of human, robot, perception, HRI and human-robot coupling, etc. Its technical feasibility was validated by experiment. Although this study targets to mobile service robots, it can be extensively used in other types of service robots like smart rehabilitation beds, wheelchairs and cleaning equipments, etc.

**Key words:** human-robot collaboration, adaptive control of thought-rational ( ACT-R ) cognitive architecture, human-robot integration, human-robot interaction, service robot