

面向智能家居/智慧生活的服务机器人技术与系统

刘景泰 张 森 孙 月

(南开大学机器人与信息自动化研究所 天津市智能机器人技术重点实验室 天津 300353)

摘 要 随着机器人技术的发展以及服务机器人形态的日益丰富,智能家居/智慧生活逐渐成为一种未来的生活方式。文章探索了智能家居和智慧生活的服务机器人技术与系统,在其众多的关键技术中,重点探讨了面向服务机器人的云端融合技术以及高用户体验度的人-机器人交互技术。并以家庭服务机器人为例,实现了基于微信和语音云的人-机器人交互方式,验证了基于云架构的家庭服务机器人体系结构的可行性。文章所提出的服务机器人技术与系统是智能家居、智慧生活的一种实现方式,为未来形形色色的服务机器人技术方案提供了一些思路。

关键词 服务机器人; 智能家居; 智慧生活; 云技术; 人-机器人交互技术
中图分类号 TG 156 **文献标志码** A

Technology and System of Service Robots for Smart Home and Intelligent Life

LIU Jingtai ZHANG Sen SUN Yue

(*Institute of Robotics and Automatic Information System and Tianjin Key Laboratory of Intelligent Robotics, Nankai University, Tianjin 300353, China*)

Abstract With the development of robot technology and the ever-increasing diversity in shapes of service robots, smart home and intelligent life gradually become a future way of life. The technology and system of service robots for smart home and intelligent life was proposed in this paper. Among many key technologies of the system, the cloud fusion technology for service robots and human-robot interaction technology with high degree of user experience were investigated in this paper. Take the home service robot as an example, the feasibility of the cloud-based architecture for the home service robotic system was verified with human-robot interaction experiments which are respectively based on WeChat and voice cloud. The proposed architecture for service robots is an implementation of smart home and smart living, and provides some valuable ideas for technical solutions of future service robots.

Keywords service robots; smart home; intelligent life; cloud computing; human-robot interaction technology

收稿日期: 2016-03-01 修回日期: 2016-03-16

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2012AA041403); 天津市自然科学基金资助项目(15JCZDJC31200); 天津市自然科学基金资助项目(14ZCDZGX00798)

作者简介: 刘景泰(通讯作者), 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为机器人技术、服务机器人、遥操作机器人及网络机器人, E-mail: liujt@nankai.edu.cn; 张森, 博士研究生, 研究方向为机器人技术、自主移动机器人; 孙月, 硕士研究生, 研究方向为机器人技术、服务机器人。

1 引言

随着现代生活节奏的加快和老龄化社会的到来, 服务机器人的市场需求日益增加, 机器人不仅在照顾老年人及残疾人方面扮演着重要的角色, 同时对普通人生活品质的持续提升也起到了积极的作用。得益于计算处理、人工智能、传感器、互联网等技术的快速发展, 服务机器人在近年已进入快速发展阶段。服务机器人技术作为缓解社会压力、推动民生科技的关键技术已成为科技发展的一个热点^[1,2]。随着诸如家庭服务机器人、酒店服务机器人等面向不同应用场所的服务机器人形态的日益丰富, 服务机器人作为一种集成多种机器人技术的产业化成果, 具有极其广阔的市场空间和实际应用价值^[3,4]。

随着服务机器人逐渐走进家庭, 成为了智能家居的一部分, 智能家居/智慧生活会成为一种未来的生活方式。利用计算机、通讯与网络、控制等技术, 将家庭中的电器、传感器等设备通过家庭网络联系在一起进行统一管理, 实现住宅智能化, 从而为用户提供安全舒适的家居环境。因此, 面向智能家居/智慧生活的服务机器人技术与系统不但逐渐变成了新技术挑战下的热点问题, 而且将是不可或缺的基本建设。

由于云技术在服务机器人领域应用的逐渐增加, 基于网络的智能机器人系统可以在一定程度上提升服务质量。Kim 等^[5]设计了一种基于网络的仿人机器人在家庭环境中提供服务的系统架构, 通过将人脸识别、语音识别、物体识别等与人类和环境交互相关的任务分配至不同服务器, 减轻机器人本体计算负担, 从而获得高效的任务执行能力和人类环境适应能力; Chen 等^[6]通过将服务机器人与智能家居系统相结合, 服务机器人根据分层任务网络执行操作任务, 使机器人可以根据用户的个人偏好为用户提供最适合的服务; Magyar 等^[7]基于谷歌云平台实现了仿人机器人

NAO 在教育方面的应用, 借助基于云数据库的教学方法开发机器人创造“寓教于乐”的教学环境, 从而提高教学质量和效率; Mouradian 等^[8]针对基础设施即服务 (Infrastructure as a Service) 问题, 提出了一种高效的云机器人架构, 利用云技术实现了对异地机器人的调用。利用云技术以及智能机器人系统可以将复杂的计算任务通过网络分配至服务器完成, 在提升机器人服务质量的同时, 降低对机器人本体的硬件配置需求。然而, 目前基于网络的服务机器人体系结构侧重于某一项服务功能的实现, 并未对服务机器人及相关环境信息数据形成统一有效的管理。同时, 在当前服务机器人体系结构下, 服务机器人所能实现的功能相对单一, 不能满足日趋复杂的服务需求。

在面向智能家居/智慧生活的服务机器人系统中, 首先要有能够保证实时地、通畅地进行通讯的网络环境。该网络涉及家庭/社区网络与外部云端的通信, 家庭/社区内部环境中信息中心与服务机器人本体、家居传感器系统、智能家电等设备的数据共享与管理, 以及服务机器人本体与传感器系统中内部数据的交互等方面内容。因此, 如何打通外部网络、信息中心、服务机器人及传感器网络的连接, 进而实现数据交互和大数据分析基础上的信息增值将是服务机器人系统开发中需要解决的重要问题之一。

综上所述, 基于云技术的服务机器人不仅具有上传计算密集型任务到云、大数据挖掘以及知识共享等能力, 还可以扩展服务机器人的功能性, 使机器人大幅度瘦身, 变得更加轻巧、廉价和智能。

本文面向智能家居和智慧生活的服务机器人技术与系统, 在其众多的关键技术中, 重点探讨了两方面技术: 一是面向服务机器人的云端融合技术, 二是高用户体验度的人-机器人交互技术。并把这两方面的技术集成在家庭服务机器人上, 实现了基于微信和语音云的人-机器人交互

方式,验证了基于云架构的家庭服务机器人体系结构的可行性。本文所提出的服务机器人技术与系统是智能家居、智慧生活的一种实现方式,为未来面向各类应用的服务机器人技术方案提供了一些思路。

2 面向服务机器人的云端融合技术

计算机与网络技术的深层次进化出现了以云计算、云存储为代表的云系列技术^[9-11]。针对不同服务需求,云技术可以为服务机器人提供共性技术的解决方案与平台。该方案既可以采用服务器端进行网络计算集中化的思路,体现“瘦客户端”理念,又可以平衡服务器和客户端集中化和泛在化合二为一的趋势。

2.1 基于云技术的服务机器人信息融合和服务技能部署

人类的反应速度主要取决于感受器(视、听觉等)的敏感程度、中枢神经系统效能和效应器(肌纤维)的兴奋性,最快在100 ms数量级。在人机共存的环境中,服务机器人的反应速度可考虑在10~1 000 ms的范围内,其中最制约机器人反应速度的因素是对应人中枢神经系统机能的信息处理与综合能力。基于机器学习、深度学习、人工智能、脑科学等相关研究的最新进展,可以将机器人信息处理与综合,如语言识别、图像识别、视频解读、任务协调、路径规划等服务机器人共性技术在云端融合,使其在速度上满足服务机器人的不同要求。

另一方面,服务机器人的关键是服务,服务的关键是服务技能。关于如何表达、进化和优化服务技能这个问题,可以利用互联网+在大数据技术的支持下取得阶段性成果,建立针对具体服务机器人的服务技能加载与升级体系。

2.2 家庭信息中心在云服务机器人系统中的应用

云技术与智能家居的融合归根到底是外部云

服务器与家庭内部网络的连接和数据交互问题。家庭信息中心可以在一定范围内支持服务机器人,是云服务器与内部网络的通信枢纽,负责本地任务及资源的上传及相关下载,管理和维护服务机器人本体数据以及家庭中各传感器、智能家电等设备的状态数据,可以对服务机器人本体的各项任务进行规划,从而进一步降低服务机器人本体的任务难度和硬件配置要求。因此,家庭信息中心将在面向智能家居/智慧生活的服务机器人系统中起到承上启下的关键作用。

2.3 机器人操作系统及开源社区——开发层的知识共享

机器人操作系统 Robot Operating System (ROS)^[12-14]是一种运行在GNU/Linux系统上的开源软件系统,具有分布式、模块化的特点。针对目前服务机器人面临的软件开发效率低、功能代码复用率低、代码可移植性差等诸多问题,采用ROS作为服务机器人的开发平台,对于实现代码复用、提高机器人软件系统的开发效率具有重要意义。同时,采用ROS作为机器人的开发平台可以形成标准、规范的文件系统,实现服务机器人软件系统模块化开发,有助于服务机器人本地功能算法的共享。利用ROS或者其他软件系统为基础的服务机器人软件系统解决方案目前基本上是个性的,在可预测的将来,服务机器人的软件系统仍将是最需要创新的部分之一。

2.4 基于云架构的服务机器人智慧社区构建——应用层的知识共享

随着智慧社区的出现,通过云服务器进行数据共享日益迫切。云技术和基于云的大数据、机器学习等技术在服务机器人领域具有关键性作用^[15-17]。基于云的大数据、机器学习等技术有助于突破服务机器人的技术瓶颈。借助云计算,通过将复杂的、软硬件配置要求较高的任务上移,有助于进一步降低本地机器人的软硬件配置要求和开发成本。与此同时,终端用

户形成的面向服务机器人具体应用程序通过海量的云存储空间和快捷的上传、下载机制有助于实现“应用包”资源共享, 从而形成庞大的服务机器人智慧社区, 共同推动服务机器人的发展。因此, 基于云架构的服务机器人系统不仅有助于服务机器人“瘦客户端”的形成, 还有助于服务机器人智慧社区的商业化运作。

3 高用户体验度的人-机器人交互技术

用户体验是一种以用户认可程度为标准的对服务的评价方法^[18]。人-机器人交互过程中的用户体验度是指用户在与机器人交互的过程中, 用户在一定的客观环境中对服务认可的程度。例如交互方式的有用性和易用性, 交互过程中用户的享受美感性以及用户的情感反应和情感结果等因素, 均会在一定程度上影响用户体验度。高用户体验度, 或者称之为用户体验度高, 则希望在人-机器人交互过程中尽可能达到人机交互的便捷, 从而创建人-机器人的和谐友好共存环境。

3.1 人-机器人交互模式

人-机器人交互模式的丰富与否也是衡量服务机器人用户体验度的重要指标之一。若服务机器人的典型用户为老人、儿童、残疾人等无法正常自理的群体, 高用户体验度的人-机器人交互技术就是其成败的关键。

实际应用中, 人与服务机器人的交互主要包括用户对服务机器人的主动控制以及服务机器人与用户之间的信息交互两方面内容。在用户对服务机器人的主动控制方面, 利用基于移动智能终端^[19-21]、人体脑电信号^[22-25]、Kinect/LeapMotion 传感器^[26,27]、力触觉设备^[28]以及虚拟现实设备等的新一代人-机器人交互模式, 将确保服务机器人能够完成各类人群的控制和任务指令, 真正成为可以理解用户的有效帮手。在服务机器人与用户的信息交互方面, 服务机器人通过体感外设以

及可穿戴传感器等设备检测用户状态, 从而完成对用户的健康状态评估、跌倒检测等看护功能。在基于体感外设和可穿戴传感器的人体特征识别与定位技术的基础上, 建立基于通用硬件和软件模块的低成本移动机器人系统, 实现在家庭、社区、大型养老服务机构等环境中的自主巡视、动态建图、用户跟踪、云端通讯等功能。

3.2 移动终端在人-机器人交互技术中的应用

智能手机、平板电脑等移动终端借助各类应用 APP 逐渐成为了人们日常生活不可分割的一部分。作为一种便携性强、友好度高的交互载体, 智能移动终端将在服务机器人中扮演更加重要的角色, 其在实时监控、服务机器人控制、智能家电设备控制等方面均有典型应用。

3.2.1 移动终端客户端

用户通过智能手机、平板电脑不仅可以调用室内监控摄像头, 获取家居传感器数据, 实现对服务环境的实时监控, 还可以实现对服务机器人的直接遥控操作、任务编辑, 以及对智能家电等设备的指令控制。因此, 如何实现智能移动终端与智能家居的网络连接, 以及开发功能完善的面向智能家居/智慧生活的应用 APP, 从而将服务机器人与智能家电设备在移动终端进行统一管理, 将成为智能手机、平板电脑等移动终端在智能家居中应用的重要问题。

3.2.2 微信

随着智能手机的普及, 微信成为了一种新兴的交流方式。利用已经相对成熟且方便快捷的微信作为人-机器人交互的手段不仅便于软件的快速开发, 还可以为用户提供较高的用户体验度。以安装在智能手机上的微信 APP 为基础, 在微信公众平台开发后台程序, 设计基于微信平台的人-机器人交互系统。基于微信平台的交互模式可以使用户通过微信这种日常生活中熟悉、便捷的应用实现对服务机器人的管理以及环境状态的监控和信息获取, 从而使用户享受到智能家居、

智慧生活所带来的便捷。

3.2.3 语音云

在云架构的支持下，我们可以方便地利用云端资源，如使用科大讯飞等语音云平台基于云技术提供的语音合成、语音识别以及语音听写等智能语音交互服务，用户不必在本地维护庞大的语音识别库，因此能极大地扩展服务机器人系统的能力。采用基于语音云的语音识别方法，不仅可以提升语音识别的准确性和识别效率，降低对机器人本体的硬件配置要求，还可以提升人-机器人交互过程中的用户体验度，使机器人与人的交互更加自然化和人性化。

3.3 人-机器人交互模式中的安全保障机制

随着人与机器人越来越多地共享工作空间，对于以“人为中心”的服务机器人而言，人-机器人交互过程中对人类的安全保障尤为关键。机器人安全性是指机器人无论在正常作业还是异常情况下，都不能直接或间接对其工作空间内的人造成伤害。如何实现安全可靠的人机交互功能，并把提高机器人安全性的理念贯穿于机器人设计的各个环节对于维护人-机器人和谐友好共存环境十分必要^[29,30]。

3.3.1 机器人主动安全技术

机器人主动安全技术即事前控制，就是在撞击发生之前评估产生撞击的严重性，并采取措施避免撞击的发生。通过设计轻型机械手臂以及新型的柔顺关节，并在硬件机构设计的基础上采取主动力顺应控制、变刚度机构控制等方法，既可以保证机器人系统的性能，又可以使机器人具有友好的交互安全性。

3.3.2 机器人被动安全技术

机器人被动安全技术即事后控制，就是在撞击时严格限制撞击力，避免对人造成真正的伤害。通过设计机器人被动柔顺结构或者在连杆上包裹黏弹性材料来达到抑制或缓冲人机交互碰撞冲击力的目的。开发被动机器人系统，例如设计

如图 1 所示的可变形臂作为服务机器人的操作手臂，可以在保证操作手臂系统功能的基础上完成安全可靠的交互任务。

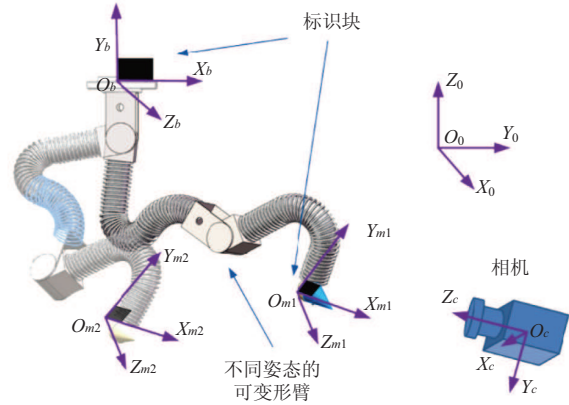


图 1 可变形臂

Fig. 1 The deformable arm

3.3.3 多层次人机安全保障机制

安全性作为人机交互作业中必备的本质属性，涉及人工智能、信息融合、控制方法、机械设计等多学科多领域相关理论和技术，如何在综合多种安全技术的基础上设计和实现多层次人-机器人安全保障机制对于解决人机和谐共存问题至关重要。在服务机器人系统功能实现中主要涉及机器人实时避碰行为优化与控制、机器人运动结果预测与环境预警、环境状态信息监控等关键问题。单一的轨迹规划和控制方法无法完全解决人机交互的安全问题，因此，应与其他安全策略结合，提高人机交互的安全性能。

4 家庭服务机器人的一个实例研究

家庭服务机器人“小南”是在国家“863 计划”支持下完成的样机^[31]，如图 2 所示。本文以“小南”为实验平台设计了基于云架构的家庭服务机器人体系结构以及基于 ROS 的家庭服务机器人系统软件架构，实现了基于微信和语音云的人-机器人交互方式，验证了面向家庭服务的机器人体系结构的可行性，也进一步对本文所提出



图 2 家庭服务机器人样机“小南”

Fig. 2 The home service robot prototype - Xiaonan

的面向服务机器人的云端融合技术以及高用户体验度的人-机器人交互技术的实现提供了可能性。

4.1 基于云架构的面向家庭服务的机器人体系结构

以家庭信息中心在家庭服务机器人小南系统中的应用为例, 基于云架构设计的家服机器人体系结构如图 3 所示, 以移动互联网思路开拓了全新的家庭服务机器人产品模式。通过将云计算与机器人相结合, 利用普适云基础设施提供的弹性资源来克服传统机器人局限性, 使

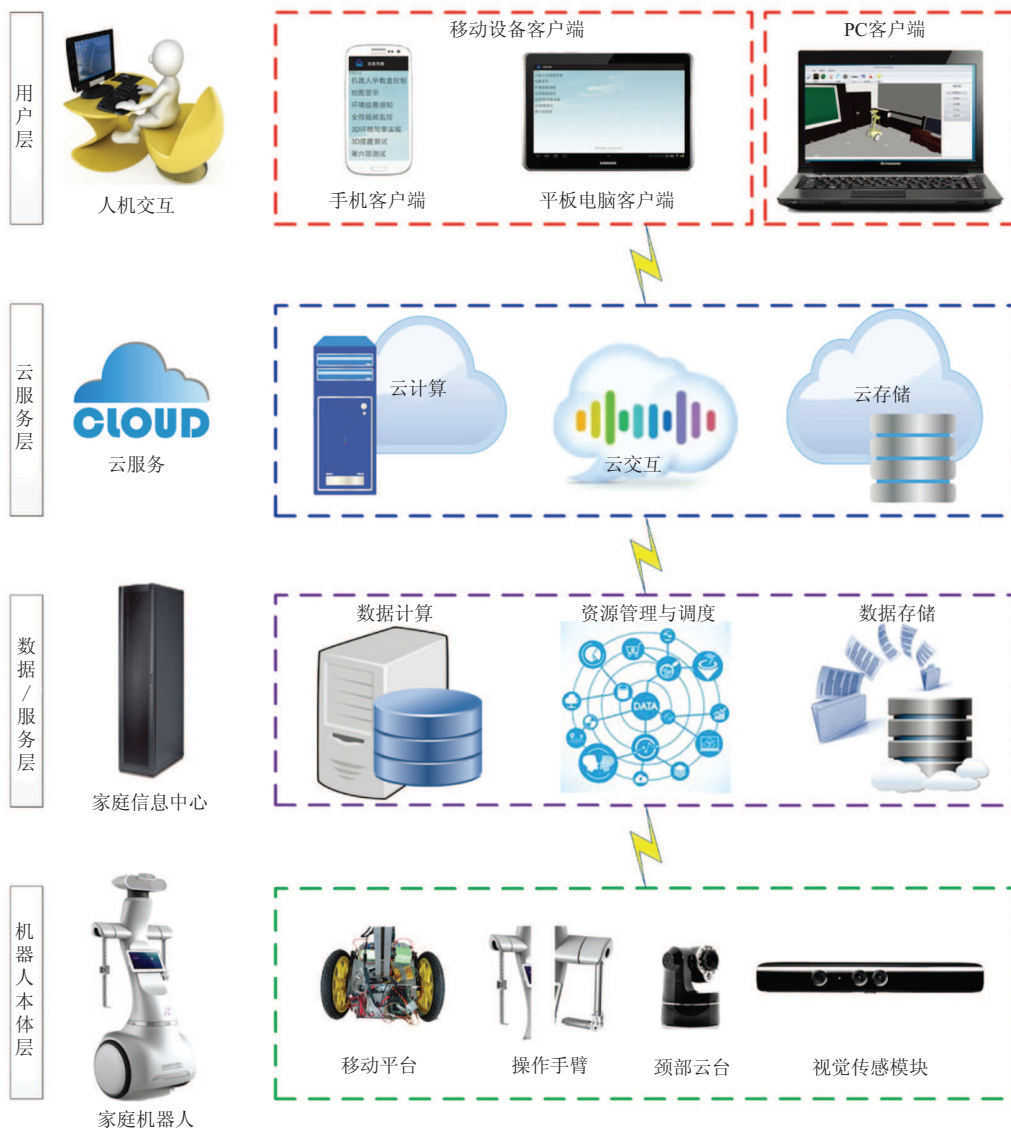


图 3 基于云架构的家庭服务机器人体系结构

Fig. 3 The cloud-based architecture for the home service robotic system

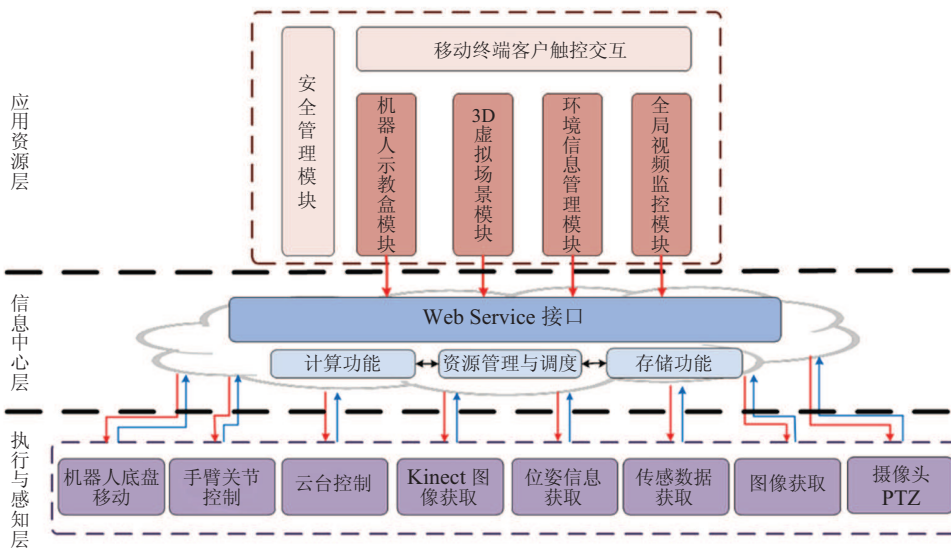


图4 基于云架构的人机交互终端系统架构

Fig. 4 The cloud-based architecture for the human-robot interaction terminal system

家庭服务机器人的大幅度瘦身成为可能。该系统基于机器人是一种服务 (Robot as a Service, RaaS) 的设计思想^[32], 一方面能将机器人本地资源配置成云服务供用户调用, 另一方面也能利用云端资源为机器人服务。

4.2 高用户体验度的人-机器人交互设计

4.2.1 移动终端客户端设计

基于 RaaS 模式的云架构设计的人机交互终端系统架构如图 4 所示。人-机器人的交互过程分为三个步骤: 通过基于移动终端客户端的触控交互识别用户意图; 将用户意图分解为若干有先后顺序关系的服务请求, 分别调用“信息中心层”提供的 Web Service 接口发起服务请求; “执行与感知层”的设备响应服务请求, 返回人机交互终端响应结果, 并将交互结果通过可视化的 3D 虚拟仿真场景显示给用户。

4.2.2 微信的引入

微信是非常普及的移动客户端应用, 也可以作为人机交互的合适平台。基于微信公众平台的人-机器人交互结构如图 5 所示, 该系统包含了四个部分, 即用户终端、云端、信息中心和命令执行端。用户首先需要关注“灵杰家服机器

人”微信公众平台账号(图 6)并对其发送交互指令, 腾讯服务器将该指令发送到云端并由云端进行文本关键字识别和筛选, 进一步将用户指令发送至家庭信息中心。通过信息中心端与命令执行端之间的特定接口功能, 家庭信息中心将用户指令发送到命令执行端, 命令执行端则将指令执行结果反馈至家庭信息中心, 再通过文字与图像的形式回复给用户。

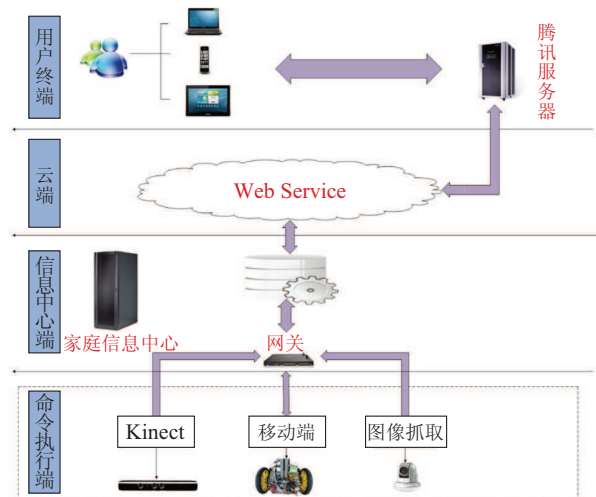


图5 基于微信公众平台的人-机器人交互结构

Fig. 5 Human-robot interaction design based on WeChat public platform



图 6 微信公众平台界面

Fig. 6 WeChat public platform interface

4.2.3 借助语音云的人机对话实现

在云技术的支持下,以科大讯飞语音云平台为基础,通过将本地语音识别与在线语音识别相结合,实现了对家庭服务机器人的语音控制。在语音指令识别的过程中,首先采用本地语音识别的方式。用户只需在移动终端建立满足需要的字库,并将该字库上传至语音云平台。语音云平台根据用户上传的字库从语音库中挑选出匹配的语音段组成本地语音库,并下载至移动终端。在进行本地语音识别时,移动终端通过将采集到的语音段与本地语音库中的语音段进行匹配便可以输出语音识别结果。若本地语音识别不成功,移动终端便将采集到的语音段上传至语音云平台,与语音库进行匹配,并返回语音识别结果。家庭信息中心在获取识别结果后首先对接收到的字符串进行解析,并通过 Web Service 接口函数调用相应的执行设备,从而实现对机器人的语音控制。

5 结 论

随着服务机器人走进家庭和智能家居/智慧生活逐渐成为一种未来生活方式,如何自上而下

建立面向智能家居/智慧生活的服务机器人体系架构,体现云服务、瘦终端理念;以及如何自底向上地梳理服务机器人的产品形态,以应用驱动集成与整合各类技术,培育可持续发展的技术链和产业链成为当前发展服务机器人的重要问题。

本文所设计的面向智能家居/智慧生活的服务机器人体系结构具有可扩展性强以及便于用户间共享的特点,体现了机器人瘦客户端的设计理念,为未来酒店服务机器人、银行服务机器人等面向各类应用场景的服务机器人体系结构提供了一种参考模式,既可以展示智能家居和引领智慧生活,又为启发出有市场需求的服务机器人产品形态提供一些思路。

参 考 文 献

- [1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展 [J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.
- [2] 王田苗,陶永,陈阳. 服务机器人技术研究现状与发展趋势 [J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(9): 1049-1066.
- [3] 蔡鹤皋. 对我国机器人产业发展的思考 [J]. 集成技术, 2015, 4(5): 1-4.
- [4] 宋章军. 服务机器人的研究现状与发展趋势 [J]. 集成技术, 2012, 1(3): 1-9.

- [5] Kim KG, Cha YS, Park JM, et al. Providing services using network-based humanoids in a home environment [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(4): 1628-1636.
- [6] Chen CH, Liu A, Zhou PC. Controlling a service robot in a smart home with behavior planning and learning [C] // *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2014: 2821-2826.
- [7] Magyar G, Cadrik T, Vircikova M, et al. Towards adaptive cloud-based platform for robotic assistants in education [C] // *IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMi)*, 2014: 285-289.
- [8] Mouradian C, Errounda FZ, Belqasmi F, et al. An infrastructure for robotic applications as cloud computing services [C] // *IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2014: 377-382.
- [9] 张建勋, 古志民, 郑超. 云计算研究进展综述 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(2): 429-433.
- [10] 陈康, 郑纬民. 云计算: 系统实例与研究现状 [J]. *软件学报*, 2009, 20(5): 1337-1348.
- [11] 陈全, 邓倩妮. 云计算及其关键技术 [J]. *计算机应用*, 2009, 29(9): 2562-2567.
- [12] Marzinotto A, Colledanchise M, Smith C, et al. Towards a unified behavior trees framework for robot control [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014: 5420-5427.
- [13] Kerr J, Nickels K. Robot operating systems: bridging the gap between human and robot [C] // *2012 44th Southeastern Symposium on System Theory (SSST)*, 2012: 99-104.
- [14] Dalla Libera F, Ishiguro H. ROSlink: interfacing legacy systems with ROS [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013: 475-481.
- [15] Guizzo E. Robots with their heads in the clouds [J]. *IEEE Spectrum*, 2011, 48(3): 16-18.
- [16] Lorencik D, Sincak P. Cloud robotics: current trends and possible use as a service [C] // *IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMi)*, 2013: 85-88.
- [17] Arumugam R, Enti VR, Bingbing L, et al. DAVinCi: a cloud computing framework for service robots [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2010: 3084-3089.
- [18] 林闯, 胡杰, 孔祥震. 用户体验质量 (QoE) 的模型与评价方法综述 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(1): 1-15.
- [19] 高胜男, 孔令富, 吴培良. 面向室内智能机器人的中文服务指令自主处理方法 [J]. *机器人*, 2015, 37(4): 424-434.
- [20] 骆家伟, 牟琳, 靳泰戈. 智能家庭服务机器人语音系统实现 [J]. *计算机应用*, 2010, 30(S2): 322-325.
- [21] 谷学静, 王志良, 贺杰, 等. 面向老年人的智能家居多模态交互系统研究 [J]. *计算机科学*, 2011, 38(11): 216-219.
- [22] 伏云发, 王越超, 李洪谊, 等. 直接脑控机器人接口技术 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(8): 1229-1246.
- [23] 张浩, 李远清, 张瑞, 等. 室内环境中脑控轮椅的路径跟踪控制 [J]. *计算机测量与控制*, 2015, 23(1): 93-95.
- [24] 徐宝国, 彭思, 宋爱国. 基于运动想象脑电的上肢康复机器人 [J]. *机器人*, 2011, 33(3): 307-313.
- [25] 邓志东, 李修全, 郑宽浩, 等. 一种基于 SSVEP 的仿人机器人异步脑机接口控制系统 [J]. *机器人*, 2011, 33(2): 129-135.
- [26] 林海波, 王浩, 张毅. 基于 Kinect 的无标定人机交互控制系统设计 [J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(2): 551-555.
- [27] 罗元, 谢彧, 张毅. 基于 Kinect 传感器的智能轮椅手势控制系统的设计与实现 [J]. *机器人*, 2012, 34(1): 110-113.
- [28] 胡进, 侯增广, 陈翼雄, 等. 下肢康复机器人及其交互控制方法 [J]. *自动化学报*, 2014, 40(11): 2377-2390.
- [29] 熊根良, 陈海初, 梁发云, 等. 物理性人-机器人交互研究与发展现状 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 356-370.
- [30] 吴海彬, 杨剑鸣. 机器人在人机交互过程中的安全性研究进展 [J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(11): 79-86.
- [31] Zhang S, Sun L, Chen ZL, et al. A ROS-based smooth motion planning scheme for a home service robot [C] // *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, 2015: 5119-5124.
- [32] Li GF, Wang HP, Ying X, et al. A proxy-based cloud infrastructure for home service robots [C] // *2015 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2015: 5718-5723.