移动机器人控制系统结构的研究与进展

李文锋　张　帆　闫新庆　杨小铸　杜　娟　韩　锐
武汉理工大学，武汉，430063

摘要：在分析移动机器人的特点与应用的基础上，从控制与自治技术研究角度回顾了移动机器人的研究进展，分析了移动机器人的控制模式和常见的一些控制系统，并讨论了各自的优缺点。指出了移动机器人控制框架研究的方向和特点，分析了现有的一些控制框架。结合传感器网络的发展，预测了移动机器人与传感器网络结合的发展趋势，分析了传感器网络环境下移动机器人控制框架所面临的挑战和策略，给出了一种可行的控制框架。

关键词：移动机器人；控制框架；传感器网络；动态特性
中图分类号：TP242.6　　**文章编号**：1004—132X(2008)01—0114—06

Study and Development of Mobile Robot's Control Framework

Li Wenfeng　Zhang Fan　Yan Xinqing　Yang Xiaozhu　Du Juan　Han Rui
Wuhan University of Technology, Wuhan, 430063

Abstract: Based on the discussion of features and applications of mobile robots, a survey of their researches was made from the viewpoint of the technologies of their control framework and autonomy. Then control modes and popular systems of mobile robots were discussed and the relative advantages and disadvantages were summarized. The characteristics of the control frameworks of mobile robots were concluded and a few of existing control frameworks were analyzed. According to the development of sensor networks, the combination and cooperation of mobile robots and sensor networks was predicted and the challenges that control frameworks of mobile robots must face to work with sensor networks were pointed out, and a new and reasonable one was put forward at the end.

Key words: mobile robot; control framework; sensor network; dynamic feature

0　引言

在计算机和传感器技术等快速发展的推动下，机器人已发展成为一种种类繁多、应用广泛的具有高度智能的机器设备，移动机器人是其中重要的一类。移动机器人的主要特征就是可以移动和自治，这使得机器人可以实现大范围活动，在工业上可以构成可重构的物流与制造系统。移动机器人还可以代替人类到达复杂有危险的地方，因而在航空航天、军事和反恐等领域有迫切的应用需求。2003年，火星生命探测使者美国"勇气"号、"机遇"号相继成功登陆火星，获取了大量有关火星的数据和图片，进一步向世界展示了移动机器人所具有的巨大应用潜力。如今，移动机器人和传感器网络相结合正成为一种发展必然趋势。传感器网络可延伸机器人的感知空间，通过信息融合来加强机器人的感知能力，为机器人(群)的智能开发、合作与协调开辟新空间。

移动机器人自治的实现，面临着不确定性、可靠性和实时响应等难题。而随着移动机器人应用领域的不断拓展，其结构、控制和功能也变得更为复杂，传统的程序开发手段已难以满足要求。因此，机器人体系结构研究一直是机器人领域的一个基础课题，已有30多年的历史并仍在不断发展中。而研究开发恰当的系统框架和工具，提高系统的跨平台性、开放性和可重构性，缩短应用系统开发周期，更是当前人们关注的热点[1-4]。

1　移动机器人控制模式

移动机器人的控制模式/策略可以分为推理型(deliberative)、反应型(reactive)、混合型(hybrid)、基于行为的控制(behavior－based control)[4-6]。

推理型控制模式采用自顶向下规划的控制策略。在机器人中枢构建了一个世界模型，用来验证传感器采集的信息，然后发出行动控制指令。早期的移动机器人多采用这种模式。这种控制策略具有较强的推理和思维能力，但实时响应能力低，适应性差，适用于结构化、可预期的场景。

反应型控制模式采用自底向上的控制策略，直接由传感信息来控制机器人的驱动。它不需要预先构建一个内部的世界模型，仅有少量的规则，依靠对具体场景的感应来产生相应的动作。这种控制模式实时性好，可以对非结构化的、变化的场

收稿日期：2006—12—19
基金项目：国家自然科学基金资助项目(60475031)；湖北省自然科学基金计划青年杰出人才基金资助项目(2005ABB021)

景作出反应。但因为没有信息储存，缺乏学习和规划能力，在运行时也缺乏灵活性。

混合型控制策略试图继承上述两种控制模式的优点。它由三部分组成，即反应层、规划层和协作层，因此也被称作为三层式结构。典型实例如美国 Georgia 工学院的 Akin 教授开发的 AuRA 系统和卡内基－梅隆大学（CMU）的 XAVIER 系统。

基于行为的控制策略介于推理型和反应型策略之间，可以看成是反应型控制策略的延伸。它是一种面向任务分解的控制形式。在接受到传感信息后，几个行为模块可以根据各自的具体任务并行处理，分工协作。在文献[5]中，Mataric 给出了一些基于行为的控制策略的实例。

2　常见的移动机器人控制系统

20 世纪 80 年代中期，在美国政府的资助下，NASA 推出了一种概念体系结构 NASREM，它是一种自顶向下的、分层式、推理型的控制结构，每一层都有任务分解、模型和传感器信息处理三部分，用于控制遥控机器人[7]。这种 NASREM 结构在实际中应用较少。后来又相继推出了一些新的移动机器人控制系统[8,9]。Oreback 等[9]对目前一些常用的移动机器人控制系统从以下几个关键特征进行了分析评价：①机器人硬件抽象；②可扩展性和延伸性；③所支持的操作系统；④有限的运行时开销；⑤驱动器控制方法；⑥软件特征；⑦提供的开发工具和方法；⑧完善的文档。

2.1　Saphira

Saphira 是 SRI 国际人工智能中心在 20 世纪 90 年代早期开发的机器人控制系统[10]。如今它是 ActiveMedia 公司提供的机器人的标准软件环境。它采用基于行为（behavior－ based）的控制模式，其核心是一个被称为本地感知空间（LPS）的共享内存/黑板，用作进程间通信/协调。

Saphira 已经商业化，同时支持 Unix 和 Windows 平台，采用 C 语言开发，占用系统资源少，提供的文档资料完整。但是，该系统的定位系统不够准确，而且系统不具有开放性，不支持分布式环境。

2.2　TeamBots

TeamBots 是一个基于 JAVA 的应用程序和 JAVA 包的集合，全部源代码公开，适用于单/多代理的多机器人研究[11]。目前主要运行在 Nomadic Technologies 公司的 Nomad 150 机器人上，并已被移植到多种机器人平台。

TeamBots 的 JAVA 特征使得它可以运行在各种操作系统如 Windows、Linux、MacOS 等上。

2.3　ISR

一些由实验室自行开发的典型机器人应用研究系统包括 Xavier、Dervish 和 RAP 等。ISR 是瑞典皇家工学院 CAS 研究中心开发的面向典型室内应用的移动机器人控制系统。它采用基于行为的控制模式，包括推理层、任务执行层、反应层。推理层负责依据系统的当前状态、机器人的目标和用户的指令进行决策和规划。执行层执行上层下达的规划指令并返回执行结果。反应层最接近硬件，由控制器、行为和资源组成。资源模块和硬件交互，对数据进行处理或过滤，然后送给行为模块，行为模块计算出一个响应指令，然后发送给合适的控制器。整个系统的通信通过自适配通信环境（ACE）来实现，运行在 Linux 操作系统上。但是，ISR 系统属于 CAS 中心内部独享，还没有发布。

2.4　国内研究状况

在国内，最早的机器人系统是沈阳自动化研究所研制的 OSMOR（an open system for mobile robot）系统[12]。OSMOR 系统为每个诸如车体运动、摄像机云台和作业手等分系统设计一个具有规划、运动学计算和伺服控制的三层结构。此外，OSMOR 系统在传感器的处理方面有自己的特点，它采用全局数据库，将传感器数据处理独立于体系结构之外，以避免传感器的多样性和数据处理的复杂性。OSMOR 是一个基于 Windows 操作系统的开放式体系结构。它基本属于一种实验室自主开发的机器人系统，其市场覆盖面不大，缺乏后续研究。

近年来，中南大学、浙江大学、南京理工大学等对移动机器人控制系统展开了研究[4,13-16]。中南大学蔡自兴等[16]研究了基于进化思想的机器人功能/行为集成控制体系结构，并开发了室外汽车的自主导航系统。浙江大学建立了一个基于混合控制模式的室内移动机器人原型 ZJMR[4]。南京理工大学则针对微小型多机器人系统展开了研究，提出了分布式多 Agent 系统[14]。总体来说，这些都是基于行为的控制模式。

另一个方面，针对足球机器人比赛的机器人系统研究与开发也取得了可喜的进展。根据比赛要求的不同，可以分为集控式和自主式两种不同的控制形式。东北大学人工智能与机器人研究所等开发了用于自主式足球机器人的底层控制系统[17]。河海大学等则对集控式足球机器人的工作方式展开了多样的研究。但是这些研究一般都

是针对具体的硬件载体展开的。而清华大学等研究机构则更多地从多机器人的协作等角度对足球机器人的控制展开了研究，分析了多机器人的决策、任务分配和动态联合结构等[18]，但未形成一个成熟的系统框架。

3 移动机器人控制框架研究

以上机器人控制体系结构，存在如下共同缺陷：①过多地依赖于具体的硬件和操作系统，跨平台移植性较差；②采用面向对象的编程技术，受编程语言的约束；③拘泥于某一种机器人控制模式。这种现象使得机器人不能像计算机一样具有模块化、标准化和开放性特征，制约了当前全球不同机器人研究机构/公司之间的合作与交流，使得机器人的研制难以博采众长，进行有效集成、通信和协作。因此，人们提出了一种新的研究策略，即机器人的控制框架研究。该策略通过提取面向具体应用的机器人控制体系的典型特征，构造具有共性的组件模块，如规范的通信、软硬件接口和控制模式(pattern)。机器人的控制框架应具有以下基本特性：①良好的开放性，便于扩展；②良好的模块化和组件特征；③资源管理可重构性能；④软硬件接口和结构标准化；⑤和具体的应用场景和控制策略无关。

3.1 TCA

TCA(the task control architecture)是美国卡内基－梅隆大学的 Simmons[19] 于 1988 年开发的一种不依赖于特定应用控制体系结构的通用控制框架。他已在美国航空航天和室内机器人的许多应用系统开发中得到应用。

TCA 支持机器人系统的模块化和集成。系统模块间通过消息来通信，进行数据交换和协调。它主要提供以下内容：①基于 TCP/IP 的进程内匿名套接字通信机制，支持消息发布/征订和客户机/服务器两种模式；②任务分解和子任务间时序约束；③资源分配和管理；④过程监控；⑤例外事件处理。

TCA 框架的主要缺点如下：①由于采用中央控制和消息映射机制，不利于分布式系统的开发；②存在命名重叠和交叉现象；③没有对外公开发布源码，缺乏开放性。

如今，卡内基－梅隆大学的机器人课题组根据机器人系统的发展需求，将 TCA 发展为两大模块，即进程内通信模块(IPC)和任务描述语言模块(TDL)。IPC 和 TCA 相似，但支持点对点通信，支持更多复杂的数据结构，包括列表和可变长度数组，因此具有更好的灵活性和效率。TDL 是C++语言的超集，支持任务的分解、同步、监控和例外事件处理。TDL 可以用于开发并行和自主系统，目前已经延伸到分布式多机器人系统。

3.2 OROCOS@KTH

OROCOS@KTH 是一种与具体应用无关的准实时移动机器人控制框架，是欧盟项目 open robot control software 的一部分[2,3]。其特点如下：①基于组件设计。底层的控制与通信等信息被封装抽象成为功能模块。开发者只需要根据具体的应用需求，利用这些模块建立相应的组件。②代码共享。框架不针对具体实验室的具体硬件，而且程序代码遵从 GPL 协议，用户可以轻松地将系统移植。③支持分布式计算。在分布异构的环境下，组件可以并行运行和通信。图 1 是该框架的概貌图。

在实现上，OROCOS@KTH 框架的所有组件都建立在 CORBA (the common object request broker architecture)之上，因此可以在异构分布的环境下工作. 组件间的通信通过一组封装好的通信模板来定制。通信模板所传输的对象/数据是由 CORBA 的 valuetype 类型构成的。可见，该框架具有很好的标准化特征。

为了独立于诸如机器人驱动器、声纳传感器、激光传感器等硬件，开发了一组容器来抽象硬件资源，如图 1 所示。具体的硬件信息可以编入运行时库，而在系统运行时再激活。

OROCOS@KTH 基本达到了其设计目标，即标准化、跨平台、分布式、可重用、二次开发代码少，而且该框架可以支持不同的机器人控制模式。但是，系统也存在一些缺点：系统占用内存太大，这使得它不能应用于一些资源紧缺的小型机器人系统和嵌入式系统；系统缺乏资源管理功能，目前还不能动态增加和删除资源，也不能动态监测系统资源；而且由于引入了 CORBA，使得基于该框架的应用开发的学习曲线陡峭。

3.3 Player

Player 是美国斯坦福大学机器人研究所和 USC 大学机器人与嵌入式系统研究中心开发的基于客户机/服务器模式的多线程机器人驱动服务器[20]，其目的是使控制者能灵活简洁地实现对移动机器人上的物理传感器和动力驱动装置的完全透明控制。Player 将对机器人的控制权完全交给客户/开发者，因而可以支持任一种控制策略，并且服务器灵活紧凑。图 2 所示为基于 Player 服务器的机器人总体结构。

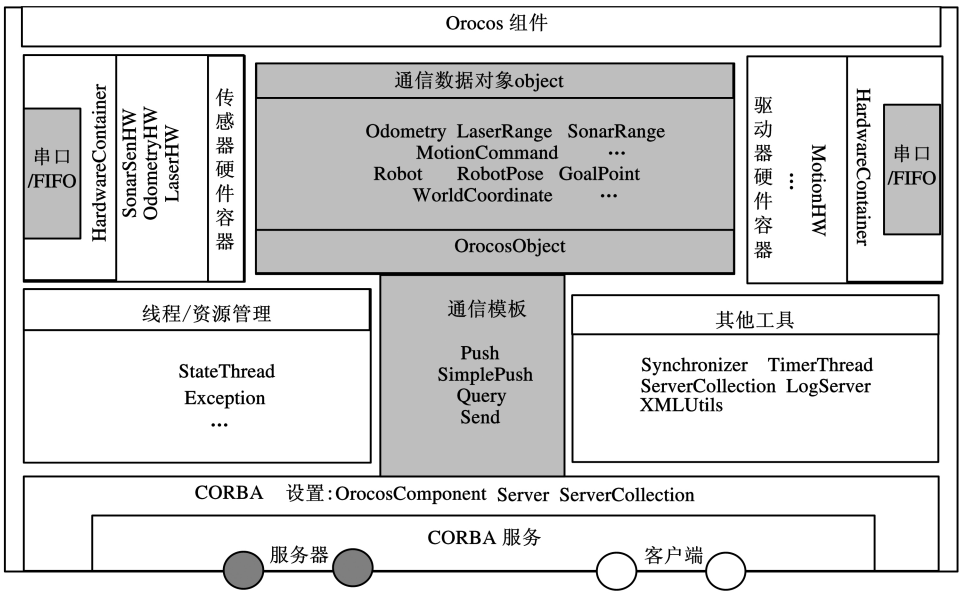


图 1　OROCOS@KTH 框架

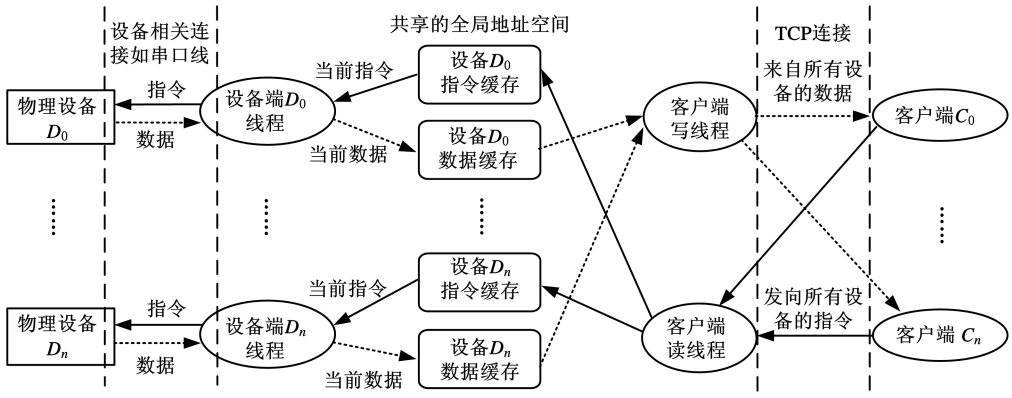


图 2　基于 Player 服务器的机器人总体结构

当 Player 运行在移动机器人上时，它通过标准的 TCP 套接字技术(socket)与客户端控制软件连接，实现通信。Player 实际上可以支持任意数量的客户端，一个机器人可以通过另一个机器人的“眼睛”看见所需要的场景，任何机器人客户端能够从另一个机器人的 Player 上获得传感器信息甚至对其发送控制指令，实现分布式传感与控制。

Player 的另一个优点是，它是一个开源系统，运行于 Linux 系统平台，依据 GNU Public License 发布，可以被任意修改。而且该系统开发不受语言的限制，可扩展性强。

Player 的第三个优点是，具有一个与之配套的机器人仿真系统 Stage。该仿真系统可以完全模拟真实机器人的行为。因此基于 Player 的开发完全可以在仿真环境中进行，代码不用修改即可移植到真实机器人平台上。

Player 的主要缺点是用户需要对机器人系统有比较全面的把握；不便于采用渐进式开发模式；缺乏资源管理开发工具。另外，运用 Player 系统，需要对 Linux 下的多线程等技术有较好的掌握。

4　发展与展望

移动机器人的可移动性和传感器网络(sensor networks)强大的感知能力受到各国学者的青睐。在 2003 年 10 月波兰举行的“GeoSensor Network Workshop”研讨会上，有关专家指出移动机器人和传感器网络结合，以低廉的价格得到性能卓越的混合系统，将在网络散布与维护、救援与反恐等领域广泛应用。2005 年国际智能机器人与系统学术年会(IROS2005)的主题就是：网络化传感器和机器人在生活质量改善中的应用。Intel 公司和 USC 的机器人与嵌入式系统研究中心等合作，尝试将移动机器人作为传感器网络的网关，参与传感器网络构建和维护，并研究机器人的开放平台和标准化问题。Batalin 等[21]研究了将移动机器人和传感器网络结合，完成传感器网

络的散布和维护问题，并研究了传感器网络的覆盖面和基于有向图的概率导航。但该研究着眼于传感器网络设计，且其传感器网络为井字形，数据层次单一。Peterson 等[22]介绍了一种用于和传感器网络通信的导航设备 Flashlight，用户（人、机器人等）通过该设备控制网络传感状态，获取感兴趣的数据，实现导航。Lee 等[23]给出了在一个以传感器网络构成的智能空间中移动机器人的定位与控制。

在传感器网络环境下，移动机器人的控制需求呈现新的特征。第一，以传感器网络为基础的传感资源具有结构变化、信息暂失和资源冲突等特征。这是因为：网络上传感器的性能分散，呈动态分布，而且和环境相关；传感器网络信息具有空间特征，且受到通信参数影响；传感器网络信息资源丰富，信息冗余度大，容易出现冲突。第二，移动机器人进入传感器网络后，将成为传感器网络的一个节点，参与网络通信，可能对网络信息产生耦合性干扰。第三，移动机器人需要与传感器网络通信，接口的标准化、通用性和稳定性直接影响机器人的信息采集与处理。

因此，机器人在传感器网络中的运用，提高了机器人的信息获取能力和智能水平，同时也大大地增加了机器人的动态不确定性。如何有效地调度和利用资源，提高机器人系统的通信与控制的鲁棒性和适应能力，是开发移动机器人的控制体系结构的一个重要方向。一方面，该控制框架需要满足上文描述的移动机器人控制框架的一般需求。另一方面，针对传感器网络的特点，该控制框架还需要满足以下要求：①网络通信接口可以有效封装网络设备，能透明地提取特定的网络传感信息；②网络通信协议标准化，具有开放性；③具有良好的鲁棒性，对于传感信息资源的动态变化、资源冲突和失效，可以快速进行资源重构；④控制框架应具有网格技术特征，在最大限度利用移动机器人强大的信息处理能力和控制能力的基础上，既要满足网络上传感器节点信息处理与传输的灵活性、紧凑性和节能性等要求，又要充分利用各传感器节点的信息和处理能力。

Moon 等[24]给出了一个传感器网络环境下移动机器人导航控制的体系结构。该体系结构以机器人为主体，将传感器网络作为传感资源，通过网络接口加到机器人系统中，系统满足了上述①、②的要求，但是没有考虑③、④的需要。张洪峰等[25]提出了一种传感器网络环境下移动机器人导航控制的体系结构，并运用 Zigbee 等开发了相应的传感器网络节点。但是对于如何有效调度和管理资源，还没有有效展开分析。

鉴于以上的分析，本文提出了一种无线传感器网络环境下基于嵌入式网关的移动机器人系统框架，如图 3 所示。

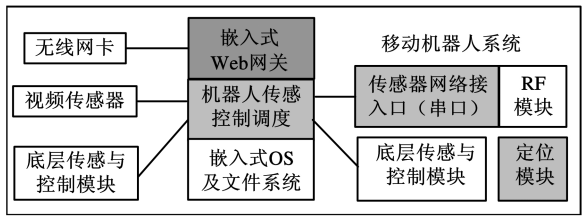


图 3　无线传感器网络环境下基于嵌入式网关的移动机器人系统框架

在该系统框架中，移动机器人系统具有一个建立在嵌入式操作系统（如嵌入式 Linux）的传感与控制中央调度系统。底层封装的传感与控制模块可以根据需要通过 CAN 总线接入。视频传感器通过 USB 接口接入。通过开发一个相应的网络接入口（串口或 CAN 口），机器人和传感器网络整体上集成。传感器网络的接入口通过 RF 通信模块（Mote）和其他的传感器网络节点或另一个移动机器人通信，并对其封装。而定位模块则是实现移动机器人在无线传感器网络环境下的定位的重要手段。嵌入式 Web 网关的建立，实现了移动机器人的网络服务功能，可以将机器人自身的传感能力和传感器网络的传感能力通过网络发到远端，也可将远端的控制指令发送到机器人的调度中心。嵌入式 Web 网关使得该移动机器人系统，包括无线传感器网络，成为 Internet 的一个资源，为通过 Web 或者网格技术的资源利用和共享创造了条件。目前已开发相应的基于该框架的原型系统，该原型系统满足了上述①～④的要求。

5　结论

移动机器人是机器人家族中重要的一类。各国学者从移动机器人的控制结构、可重构性等角度展开了卓有成效的研究。但是，本地有限的硬件资源限制了机器人的传感器数目和类型，而且传感器的感知能力和范围也有局限性。借助于传感器网络丰富的传感信息和组合处理能力，机器人的传感能力和范围得到了极大的延伸。同时，也使机器人资源呈动态分布，增强了系统的不确定性，给机器人的控制提出了挑战。本文在总结机器人控制理论与技术研究的历史与发展趋势的基础上，剖析了几种有影响的移动机器人控制框架系统。最后，提出了传感器网络中移动机器人

控制框架的研究设想和一种可行的控制框架。该研究设想正是当前移动机器人和传感器网络研究的热点。

参考文献：

[1] Coste－Manière E, Simmons R. Architecture, the Backbone of Robotic Systems[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA2000). San Francisco, CA, 2000:67-72.

[2] Li W, Christensen H, Orebäck A, et al. An Architecture for Indoor Navigation[C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004). New Drleans, USA, 2004: 1783-1788.

[3] Orebäck A. A Component Framework for Autonomous Mobile Robots[D]. Stockholm, Sweden: Center of Autonomous Systems, Royal Institute of Technology, 2004.

[4] 阮锋. 移动机器人控制系统研究[D]. 杭州：浙江大学，2004.

[5] Mataric M J. Behavior－Based Control: Examples from Navigation, Learning, and Group Behavior [J]. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 1997, 9(2/3): 323-336.

[6] Ronald C A. Behavior－based Robotics[M]. Cambridge, Landon: The MIT Press, 1998.

[7] Albus J, McCain H, Lumia R. Nasa/nbs Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture (Nasrem). Tech. Rep. NBS Technical Note 1235[R]. Gathersburgh, VA: Robot Systems Division, National Bureau of Standards, 1987.

[8] Lars P. A Framework for Integration of Processes in Autonomous Systems[D]. Stockholm, Sweden: Center of Autonomous Systems, Royal Institute of Technology, 2002.

[9] Oreback A, Christensen H. Evaluation of Architectures for Mobile Robotics[J]. Autonomous Robots, 2003, 14: 33-49.

[10] Konolige K, Myers K. The Saphira Architecture for Autonomous Mobile Robots[M]//Artifical Intelligence and Mobile Robots. Menlo Park, CA: AAAI Press, 2000: 211-242.

[11] Balch T. TeamBots[EB/OL]. (2000)[2006-12-18]. http://www.teambots.org.

[12] 王天然，朱枫，彭慧，等. 一个开放式移动机器人体系结构[J]. 机器人，1995，17(4)：193-199.

[13] 邓欣. 多机器人控制体系结构研究与实现[D]. 南京：南京理工大学，2004.

[14] 杨旦. 基于多智能体的微小型机器人体系结构研究与实现[D]. 南京：南京理工大学，2005.

[15] 田建创. 基于网络的移动机器人远程控制系统研究[D]. 南京：南京理工大学，2005.

[16] 蔡自兴，周翔，李枚毅，等. 基于功能/行为集成的自主式移动机器人进化控制体系结构[J]. 机器人，2000，22(3)：169-175.

[17] 戎海龙. 自主式足球机器人运动控制系统设计与完善[D]. 沈阳：东北大学，2005.

[18] 王磊. 动态对抗性环境下多机器人系统合作研究[D]. 北京：清华大学，2005.

[19] Simmons R. Structured Control for Autonomous Robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(1): 34-43.

[20] Player Project[EB/OL]. [2006-12-18]. http://playerstage.sourceforge.net/. index.php? src=player.

[21] Batalin M A, Sukhatme G S. Coverage, Exploration and Deployment by a Mobile Robot and Communication Network[C]//The 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Network. Palo Alto, 2003: 376-391.

[22] Peterson R, Rus D. Interacting with a Sensor Network[C]//Australasian Conference for Robotics and Automation, 2002

[23] Lee Joo－Ho, Hashimoto Hideki. Controlling Mobile Robots in Distributed Intelligent Sensor Network[J]. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 2003, 50(5): 890-902.

[24] Moon Tae－Kyung, Kuc Tae－Yong. An Integrated Intelligent Control Architecture for Mobile Robot Navigation within Sensor Network Environment[C]//Proceedings on 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004). Sendai, Japan, 2004: 565-570.

[25] 张洪峰，李文锋. 传感网络环境下移动机器人智能控制框架的研究[EB/OL]. http://www.paper.edu.cn

（编辑　郭　伟）

作者简介：李文锋：男，1966 年生。武汉理工大学物流工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为基于传感的控制和系统间协作、图像处理与机器视觉、物流仿真与虚拟现实。获省部级科技进步一等奖 1 项，二等奖 5 项，三等奖 1 项。出版专著 2 部。发表论文 60 余篇。**张　帆**，男，1982 年生。武汉理工大学物流工程学院硕士研究生。**闫新庆**，男，1967 年生。武汉理工大学物流工程学院博士研究生。**杨小铸**，男，1981 年生。武汉理工大学物流工程学院硕士研究生。**杜　娟**，女，1979 年生。武汉理工大学物流工程学院硕士研究生。**韩　锐**，男，1982 年生。武汉理工大学物流工程学院硕士研究生。