

文章编号: 1002-0446(2001)05-0450-05

多移动机器人系统个体控制体系结构*

曹志强 张斌 谭民

(中国科学院自动化研究所复杂系统工程开放实验室 北京 100080)

摘要: 本文面向多移动机器人系统, 提出了一种适合于移动机器人个体的分层式体系结构, 包括系统监控层、协作规划层和行为控制层三个层次。其中系统监控层主要实现人对系统的实时监控功能; 协作规划层在与其它机器人相应层的交互过程中建立系统的分层式组织形式, 合理快速地完成任务的分解和分配, 实现了机器人之间的任务级协作; 行为控制层主要采用基于行为的方法实现具体的运动控制。该结构满足了移动机器人渐趋复杂的应用环境和日益增大的系统规模的要求。

关键词: 多移动机器人系统; 分层式体系结构; 任务级协作; 基于行为

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

INDIVIDUAL CONTROL ARCHITECTURE FOR MULTIPLE MOBILE ROBOT SYSTEM

CAO Zhiqiang ZHANG Bin TAN Min

(Laboratory of Engineering Sciences for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 100080)

Abstract The paper proposes a layered architecture for individual robot in multiple mobile robot system. The architecture is composed of three layers: system-monitoring, cooperation-planning, and behavior-control layers. System-monitoring layer is to provide operators the real-time way to monitor the system; cooperation-planning layer is used to establish the layered organization, reasonably and rapidly decompose and allocate the task, thus achieve the task-level cooperation during the interaction with the counterpart of other robots; behavior-control layer mainly adopts the behavior-based approach to implement the motion control. The architecture meets the needs of more and more complex applications and increasing system scales.

Keywords: multiple mobile robots system, layered architecture, task-level cooperation, behavior-based

1 引言(Introduction)

随着机器人应用领域的不断扩展, 多机器人系统以其单个机器人无法比拟的优越性已经引起普遍重视。目前多移动机器人系统的研究已经成为机器人领域的热点之一。构造多移动机器人系统一个重要的因素是体系结构的设计, 系统性能的优劣很大程度上取决于结构是否合理。作为多移动机器人系统的基本组成单位, 个体机器人的控制体系结构是一个很重要的研究方面。

Noreils 提出一种适合协作、自主移动机器人的体系结构^[1]。该结构分为三层: 规划层、控制层和功能

层。规划层实现协调协议的管理、任务的分解与分配以及局部规划功能; 控制层执行任务同时监控机器人是否正常; 功能层实现传感数据的处理、动作执行和突发事件的检测与处理功能。该结构具有模块化、鲁棒性和柔性等特性。范永等^[2]针对多机器人协作系统(MRCS)中协作和协调的关系, 考虑到机器人自主性和协作性的要求以及 MRCS 系统的开放性、动态组织的特点, 设计了一种分层式机器人控制体系结构, 包括协作规划层、协调规划层和行为控制层三个层次。该结构满足了多机器人协作执行任务的要求。赵忆文等^[3]分析了合作多移动机器人系统对单机控制体系结构的要求, 在比较两种典型的智能机器人

* 基金项目: 国家自然科学基金(编号: 69975022)和 863 智能机器人主题(编号: 9935-02)资助项目。

收稿日期: 2000-12-20

体系结构基础上,提出了一种混合分层的体系结构.该结构也分为三个层次,监控与管理层、行为层和行综合层.满足了复杂动态的工作环境的要求.本文面向多移动机器人系统,提出了一种适合各种规模机器人系统任务级协作、各类环境尤其是非结构化、动态环境的移动机器人个体控制体系结构,分为三个层次:系统监控层、协作规划层和行为控制层.

2 任务级协作过程的实现 (Realization of task-level cooperation)

当一个任务下达到一个多移动机器人系统后,系统首先面临的问题是如何有效的将任务分解并合理的分配到个体机器人上,这时需要解决的是多机器人之间的任务级协作问题.在任务分配时,常用有两种分配机制:熟人网(acquaintance network)和合同网(contract net).熟人网是机器人通过查询熟人表(包括所了解的机器人名称及它们所具有的技能)实现任务的分配,虽然分配速度较快,但缺乏动态性;合同网采用类似招标?投标?中标的机制实现任务的动态分配,但机器人之间的信息交换量较大^[4].这两种机制比较适合于小型的多机器人系统.为了使这两种机制适应于中型或大型机器人群体系统中,系统必须具有一定的组织形式.本文采用自下而上方式创建了一种分层式组织形式.分层式组织形式的创建过程描述如下:对于一个多机器人系统,根据机器人所具有的技能等因素将其分解为数目相等或相近的若干小组,同时各个小组选出自己的管理者作为系统最底层的管理成员,并且各个小组管理者建立自己小组的熟人表;对各小组管理者继续分组、选出各个新组的管理者并建立下属表(一种简单的熟人表,只包含下属机器人的名称),如此循环往复直至创建系统最高层管理者,并建立下属表为止.当某些机器人加入、离开系统以及接受了一定任务或完成任务后返回系统时,系统做出局部改变,必要时系统重组,实现了对机器人群体的有机管理.根据分层式组织形式,系统任务级协作过程经历以下两个阶段.

(1) 查询阶段:当系统第 i 层第 j 个管理者 R_{ij} 接收到任务招标(该任务可以是系统所要完成的任务,也可以是上层任务分解后的子任务)时,它向其组内所有下属发出招标信息,直到收到所有下属的任务投标信息后结合自身的情况做出关于任务完成情况(包括能否完成以及完成所付出的代价)的评价.如果能够完成任务,则从中选出最佳标值向上级投标;

否则它进行任务分解,重新向组内所有下属招标,根据各成员的重新投标情况向它的上级投标(任务能够完成)或者继续进行任务分解.如果确实难以完成则通知上级任务不能完成,即投标值为 0.如果 R_{ij} 为系统最底层管理者,则通过查询熟人表及自己当前的状态判断任务的完成情况直接向它的上级投标(若不能完成则投标值为 0).如果 R_{ij} 所在层为系统最高层,它接收操作人员下达的任务向其下属招标,在获得任务完成情况的评价后通知操作人员而不投标,如果它认为任务能够完成,协作即进入第二阶段?中标确认阶段.

(2) 中标确认阶段:根据标值从最高层开始逐层往下确认各层的任务执行者并通知它们中标的消息直到最底层管理者,收到中标消息的最底层管理成员根据熟人表通知有关机器人需要执行任务及任务的内容.任务级协作过程结束.

系统采用分层式组织形式以及熟人网和合同网相结合的任务分配机制,可以有效的缩减通讯量,高效、快速的实现任务分配,适合于各种规模的机器人系统.

3 多移动机器人系统个体控制体系结构的设计 (Design of individual control architecture of multiple mobile robots system)

机器人个体是系统赖以存在的基础,决定着整个系统的性能.移动机器人个体控制体系结构的设计应能使个体表现出较强的协作性和相应于环境所做出的自主性.一般说来,个体体系结构设计时应考虑使机器人具备以下一些功能:感知能力、通讯能力、任务分解能力、任务分配能力、局部规划与决策能力和学习能力^[5].

移动机器人个体典型的控制体系结构可分为:分层递阶结构、基于行为的结构以及这两种结构结合在一起形成的混合结构.分层递阶结构一般按功能要求划分系统模块,模块之间以分层递阶方式相联系.每层只能与其相邻的上下层交换信息,下层要等待上层的规划,上层要等待下层任务的完成.其优点是系统的功能和层次分明,易于实现,且能满足一些复杂任务的要求.但是该结构由于采用串行处理使得对外部事件的反应时间变长,任何环境的变化都有可能重新规划的发生,从而大大降低了任务完成的效率^[3].随着多机器人应用环境越来越复杂,在许多情况下机器人面对的是动态、复杂、非结构化环境,考虑到实时环境适应特性,机器人采用基

于行为的控制体系结构. 该结构建立了机器人传感器与执行器的直接联系, 直接把传感器的数据与机器人的运动结合起来, 实现了对环境变化的快速响应. 其最具代表性的例子有 Brooks 提出的包容式结构^[6](Subsumption Architecture)和 Arkin 提出的基于 Motor Schema 的结构^[7]. 但是这类结构由于缺乏整体的管理, 很难适应于各种情况. 为了充分发挥以上两类结构的特点, 许多机器人研究人员把它们结合起来从而形成更加鲁棒的混合式结构, 本文提出的结构就属于这种混合结构.

本文根据机器人系统任务级协作的实现过程, 移动机器人应当具备的能力, 结合分层递阶和基于行为的控制体系结构的特点, 设计了一种分层式移动机器人个体控制体系结构. 图 1 所示为多移动机器人系统框架结构. 从图中可以得到机器人个体控制体系结构包括系统监控层、协作规划层和行为控制层三个层次. 通讯是协作的机器人个体之间交互的基本手段, 机器人之间相互交换的信息包括任务、有关的内部状态和一些运动数据等.

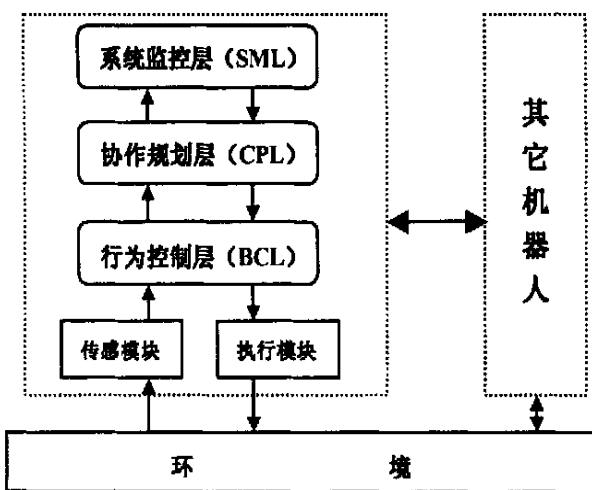


图 1 多移动机器人系统的框架结构

Fig. 1 The architecture of multiple mobile robots system

3.1 系统监控层

随着系统规模的扩大、任务难度的增大和工作环境复杂性的增加, 在目前机器人还不能完全自主的约束下, 人对整个系统的运行情况进行实时监控是必要的^[3]. 该层不参与具体的任务、运动规划, 除了给操作人员提供运动状态信息外, 当系统发生不可预见的情况使得协作规划层和行为控制层都无法解决时, 由系统监控层通知操作人员处理这些异常、冲

突和死锁, 比如改变任务的执行状态(挂起、终止还是执行)、人为改变机器人的运动方向等. 另外, 在某些情况下操作人员可以通过系统监控层直接对任务或者运动规划进行干预, 其目的是使任务更有利于执行、运动更加合理.

3.2 协作规划层

协作规划层主要功能是建立机器人之间分层式的组织形式关系, 根据任务的要求创建和组织合适的机器人群体, 解决多机器人之间的任务级协作问题. 另外, 它还承担处理行为控制层发生的异常和无法解决的冲突、死锁, 同时作为系统监控层和行为控制层信息传递的媒介. 其功能结构框图如图 2 所示. 下面具体介绍一下各功能模块.

- 任务评估模块: 当接收到一个任务时, 该模块根据自身的能力评估任务完成情况. 如果能够完成, 则按照一定的评价标准产生完成任务需付出的代价.

- 任务分解模块: 任务分解模块的目标是对于给定的任务, 根据任务的类型和任务的难易程度等产生子任务的逻辑关系网, 它描述了子任务的串/并联关系, 同时在分解过程中应考虑留有一定的裕量.

- 任务分配模块: 按照机器人在分层式组织形式中的地位不同, 采用合同网或者熟人网进行任务的分配.

- 熟人模块: 根据任务级协作过程的实现需要和机器人地位的不同, 该模块保存熟人表或下属表.

- 知识库: 包含了机器人所需要的各种知识.

- 通讯模块: 它主要是实现在机器人之间传递任务级的有关信息.

- 协作模块: 协作模块是协作规划层的核心控制部件. 它在与其它机器人相应模块的交互过程中建立机器人之间分层式的组织形式; 按照任务级协作的实现步骤, 协调任务评估、任务分配、任务分解模块之间的关系, 实现任务合理快速的分解和分配. 另外, 它还传递行为控制层的运动状态信息给系统监控层, 传达系统监控层的命令给行为控制层以及处理行为控制层发生的异常情况和无法解决的冲突、死锁. 如果仍然不能解决, 则求助于系统监控层.

- 任务队列模块: 按照所执行任务的先后顺序形成待执行任务队列.

3.3 行为控制层

该层主要是采用基于行为的方法, 根据当前的任务状态, 综合感知模块检测到的环境信息、通过通讯获得的相关信息及来自上层的有关命令, 结合对

工作环境的了解进行决策, 为机器人规划出具体的运动方向和运动速度, 实现具体的运动控制. 其结构

框图如图 3 所示, 由 7 个模块组成. 各模块及其主要功能如下所述.

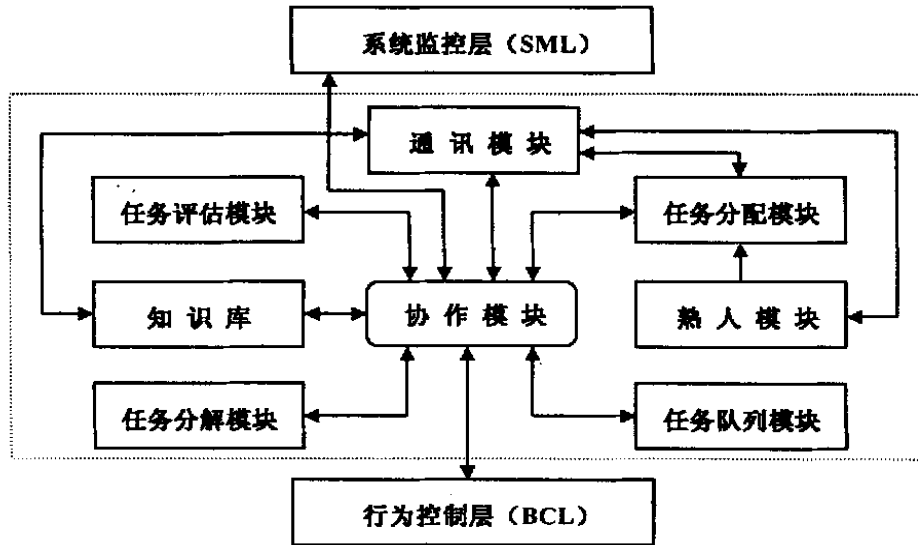


图 2 协作规划层结构框图

Fig. 2 The architecture of cooperation-planning layer

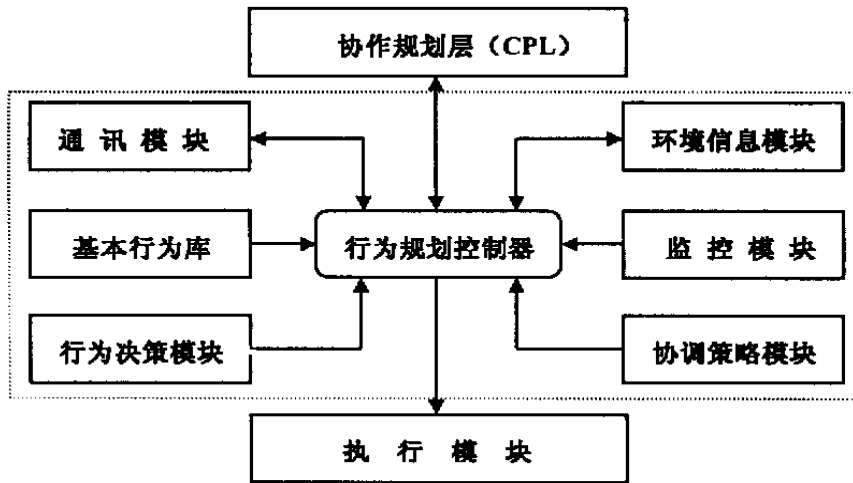


图 3 行为控制层结构框图

Fig. 3 The architecture of behavior-control layer

- 基本行为库: 存放完成任务所需要的各种行为.
- 行为决策模块: 当对于一个任务指定一系列的行为后, 如何实现各激活行为之间有机的结合变成亟需解决的问题, 即如何选取合适的行为综合机制. 本模块提供的综合机制主要有以下几种:

- 基于优先级的行为综合机制, 包括固定优先级和可变优先级两种. 在该机制中, 高优先级的行为可以抑制低优先级的行为的发生.
- 矢量加权求和机制. 其中包括权系数固定和根据环境的变化实时进行自调节两种.
- 其它机制. 例如由以上几种机制结合而成的

混合机制等。

- 通讯模块: 主要实现机器人之间运动信息的传递。

- 协调策略模块: 虽然在行为设计中已考虑过可能发生的冲突、死锁, 但对于某些任务来说, 在目前行为设计尚不够完善的情况下, 仍然可能会出现冲突和死锁现象。因此, 必须采取一定的策略协调机器人之间的运动, 同时这也是更好完成任务的需要。

- 环境信息模块: 机器人的工作环境分为已知、部分已知和完全未知三种类型。如果在前两种类型下, 该模块可提供对工作环境的全部或部分描述, 从而为行为的设计提供指导, 提高了系统的工作效率。

- 监控模块: 监控机器人的状态是否异常。如果机器人在任务执行过程中出现异常, 无法继续完成, 应立即停止该任务的执行, 通知行为规划控制器。

- 行为规划控制器: 它是行为控制层的核心控制部件, 根据当前的任务状态、产生的行为描述采用合适的行为综合机制进行基于行为的实时运动规划, 并且对于发生的异常、冲突或死锁如果不能解决, 则请求协作规划层的参与。除此之外, 它还将运动状态信息传递给协作规划层。

行为控制层规划算法描述如下:

Step 1: 当该层接收到所要执行的任务后, 采用 temporal sequencing 方法将任务分解成一系列离散的状态^[8], 结合 perceptual cues^[9]和通讯的有关信息(某些情况下)实现状态之间的转换。如果任务不能被分解, 则认为只有一个状态。

Step 2: 判断是否出现异常。如果出现异常, 将异常情况反馈到协作规划层。

Step 3: 根据周围环境、通讯信息及上层的命令确定当前的任务状态并设计合适的行为集合及选择恰当的行为综合策略进行基于行为的实时运动规划, 产生机器人的运动方向和运动速度。

Step 4: 规划完成后, 向其它机器人发布运动规划信息。

Step 5: 根据收到的其它机器人的规划信息结合自己当前的情况进行判断, 如果出现冲突或死锁, 采用一定的协调策略进行处理, 如果能够处理, 转 Step 3, 如果不能处理, 将信息反馈到协作规划层。

Step 6: 确定机器人的运动方向和运动速度, 送

到执行模块中实现具体的运动。

Step 7: 循环 Step 2~ Step 6, 直至任务完成为止。

5 结论(Conclusion)

随着移动机器人应用环境复杂性的增加和系统规模的扩大, 对机器人提出了更高的要求, 结构的设计是首先需要考虑的问题之一。本文首先介绍了机器人系统任务级协作的实现过程, 在此基础上, 综合了分层递阶和基于行为的体系结构的特点, 移动机器人应当具备的能力, 提出了一种分层式体系结构。该体系结构包括系统监控层、协作规划层和行为控制层, 根据各层所实现的功能, 它具有鲁棒性、容错性和模块化等优点, 是一种适合移动机器人的个体控制体系结构。

参考文献 (References)

- 1 Noreils F R. Toward a robot architecture integrating cooperation between mobile robots: application to indoor environment. *The International Journal of Robotics Research*, 1993, 12(1): 79- 98
- 2 范永, 谭民. MRCS 中机器人控制体系框架结构. *控制与决策*, 2000, 15(3): 325- 328
- 3 赵忆文, 谈大龙. 多移动机器人合作系统中的单机控制体系结构研究. *机器人*, 1999, 21(6): 421- 425
- 4 Ferber J. *Multiagent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley, 1998
- 5 谭民. 机器人群体协作与控制的研究. *自动控制领域发展战略研讨会论文集*, 北京, 1999, 185- 190
- 6 Brooks R A. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1986, RA- 2(1): 14 - 23
- 7 Arkin R C. Motor schema-based mobile robot navigation. *The International Journal of Robotics Research*, 1989, 8(4): 92- 112
- 8 Mackenzie D C, Arkin R C, Cameron J M. Multiagent mission specification and execution. *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 29 - 52
- 9 Kube C R, Zhang H. Task modelling in collective robotics. *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 53- 72

作者简介:

曹志强 (1974-), 男, 博士研究生. 研究领域: 多机器人系统。

张 斌 (1976-), 男, 硕士研究生. 研究领域: 多机器人系统。

谭 民 (1962-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制, 多机器人系统, 系统可靠性等。