

自主式移动机器人系统的体系结构

张友军 朱淼良 吴春明 胡晓敏

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 浙江大学人工智能研究所 310027)

摘要 本文在分析已有的几种多智能体协调模型的基础上,提出了一种用于自主式移动机器人系统的多智能体协调模型(离散)事件状态模型,用于组织协调自主式移动机器人系统中的传感器、规划、控制等智能体协调工作,确保自主式移动机器人在复杂、不断变化的环境中自主行驶,并在自主式移动机器人项目中较好地发挥了作用。

关键词 自主式移动机器人,智能体,多智能体系统,协调,智能调度

1 引言

自主式移动机器人系统是具有高度的自规划、自组织、自适应能力,适合于在复杂的非结构化的环境中工作的机器人,是一个高智能、多系统的复杂工程系统。内部系统包括多种硬件设施,有实时控制部件,多种信息处理部件,通讯部件等等;相应的包括有多个功能特性各异的功能模块,一般包括:二、三维视觉处理模块,信息融合模块,局部规划模块,车辆控制模块,路标识别模块,黑板调度模块。

可以看到,自主式移动机器人系统具有任务分析、规划、推理、决策等多种智能性很高的功能模块,要使它们组成一个性能良好的自主式移动机器人系统,需要多种功能模块以不同方式在不同层次的协调工作,而如何协调这些功能各异的模块能步调一致地朝着总体目标前进,这涉及到体系结构与系统建模的问题。目前,主要有采用智能控制中的分层递阶式结构^[1],及 R. BROOKS 提出的包容式结构模型^[2]。近几年来,分布式人工智能(DAI)技术有了长足的发展,它具有“智能分布”的特点,又具有统一协调机制,广泛地用于大型的智能信息处理系统,多智能体系统 MAS(Multiagent system)是分布式人工智能中的一个很活跃的领域,其中的智能体(Agent)是自治型的,它们可以完成各自的局部问题求解,又能通过协作求解单个或多个全局问题。一般的 MAS 协调协作模式有以下几种:

(1) Agent 之间不可能通讯的情况下高度自主、独立活动的 Agent 彼此竞争来完成目标的协调方式没有通讯的协调^[4]。

(2) 一个特殊的 Agent 作为管理员负责协调、作出决定的协调集中控制式通讯协调^[6,7]。

(3) 各 Agent 之间不存在必须解决的冲突,所以可以默契地协作完成公共任务的协调方式分散控制式通讯协调^[8]。

集中控制方式协调效率比较高,但系统有额外的开销。需要增加一个 Agent 来充当管理员;或者选择一个 Agent 兼任管理员,这个 Agent 的工作量就增加了。

纯粹的分散式控制可能会使没有一个 Agent 能了解整个系统的情况。如果存在一个全局目标则无法保证得到最优解;而且多边协商的效率是很低的。很多系统在平等的 Agent 进行

水平交互的同时加上垂直控制来有效地解决冲突,完成协调.本文试就 MAS 技术在自主式移动机器人系统中的具体应用作一定的探索.

2 基于 MAS 的自主式移动机器人系统

与 MAS 相比较,可以发现自主式移动机器人中的功能模块与 Agent 相仿,它们各自为相对独立的有一定自主能力的“问题求解器”,具有各自的输入、输出接口,内部有专门的处理过程,处理某些特定的信息(如摄像机获得的二维图象,激光雷达获取的距离图象),并将处理结果送到输出端口.整个自主移动机器人的行为是这些功能模块协同工作的结果,每个功能模块有下列特点:

- 1) 可以自主选择它的输入输出对象.
- 2) 可自主选择自身的不同功能.

上述第一个特点为我们提供“自组织形式”体系结构的可能,因为每个功能模块的输入输出一旦确定,也就确定了整个系统的信息/控制流结构,而不同选择的输入输出结构可构成多种多样的可变的体系结构.

第二个特征意味着整体有灵活可变的多种功能,因此,可设想假如存在一个全局信号,它可以影响各个功能模块的输入输出选择和功能的切换,那么该信号的变化意味着整个系统可以从结构组织和功能组合级别上产生不同的功能和整体行为,如果该信号是反映了整个系统环境变化的特征,那么该系统具有对环境变化作出自组织自适应的相当高的智能行为,这对自主式移动机器人系统来说是十分理想的工作模式,问题在于如何对环境变化进行评估、决策从而获得该全局信号.这是下一节讨论的总体协调模型问题,在此之前,还需要介绍一下功能模块的组织结构和运行环境,这是由一个称为 Robix 系统来实现的,它的思想简述如下:整个机器人的计算机系统是由多台工作站和 PC 机组成的多机系统,并用以太网联网,自主式移动机器人的每个功能模块(Agent)是运行在某台计算机上的一个或多个进程,Robix 是一个为各个功能模块提供与计算机物理分布无关的统一的运行环境,称为 Robix 连通域,它通过对整个分布式计算机网络资源和通讯加以统一管理来实现.各个 Agent 在这个连通域中通过 Robix 系统提供的通讯接口,可方便地实现点对点通讯与同步,并可共享网络的资源,为 Agent 间的协调提供了实现手段.整个机器人系统的 MAS 结构如图 1 所示.

其中公告板用来记录各个智能体共享性的信息.

Robix 系统提供的通讯接口用于把 Agent 的处理结果信息传送给其他 Agent 进行数据交换,也可以对公告板上的信息进行直接存取.

黑板调度器负责整个自主机器人系统的协调,它包括一个推理机和调度规则库,调度规则库存放协调整个机器人系统的规则.关于自主机器人当前形势的全局信号就由黑板调度器给出,并通过通讯接口发送到各个 Agent,协调整个机器人系统中的各个 Agent 工作,下面我们详细介绍协调模型及具体实现.

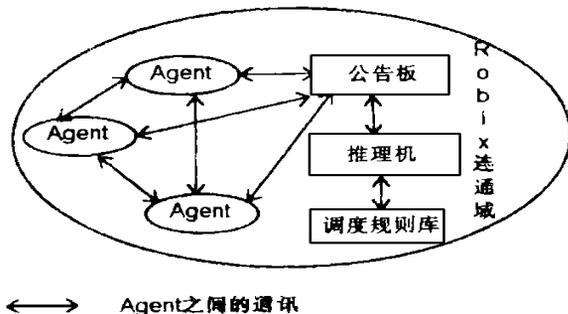


图 1 机器人系统的 MAS 结构图

3 自主式机器人系统的协调模型

3.1 事件状态协调模型

在综合集中控制式通讯协调模型和分散控制式通讯协调模型的基础上, 本文提出了一个用于自主式移动机器人的多智能体协调模型(离散)事件状态协调模型(DES_M), 将整个机器人的行为及 Agent 的行为, 用一个(离散)事件状态模型来协调, 下面对该模型作详细介绍.

在(离散)事件状态模型中, 各个状态和事件有不同的实际含义, 总体状态(简称状态)相当于上节提到的全局信号, 表示机器人工作中某一段时间整体所处的形势的一个描述, 它是对机器人当前所处环境、任务的一个综合性的描述, 事件信号是由各个 Agent 汇集过来的, 是从它们处理对象信息时抽象出来的结果描述, 这些事件数据表示了下列几类信息:

(1) 外界环境变化: 一般是由感知 Agent 汇报过来的, 它们从各个传感部件事件信号得到有关控制对象, 系统设备工作状态的数据加工而获得的, 它们又可分为正常工作情况下外界环境的变化以及突发事件两类.

(2) 内部各部分工作状况: 一般指各个 Agent 的工作情况, 包括正常的任务完成, 异常情况的出现或故障报告.

状态变化是由事件信号引起的, 系统的行为可以用状态的变化过程来描述, 自主式移动机器人完成一次任务的实际工作过程对应状态集合上的一个字符串, (离散)事件状态模型描述了自主式移动机器人系统状态变化的规律, 可以用一个自动机来表示它, (离散)事件状态模型可以看作如下一个五元组:

$$\text{DES}_M = (E, Q, \sigma, q_0, F).$$

其中: E : 为有限的事件集合 $\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$;

Q : 为状态集合 $\{q_0, q_1, \dots, q_k\}$;

σ : 为一个映射, $\sigma(q_n, E^1) = q_m \in Q$, 其中 q_n 是 Q 中元素, E^1 为 E 的一个子集, $q_n \in Q$, $E^1 \subset E$.

q_0 : 为初始状态, $q_0 \in Q$.

F : 为终止状态集合, $F \subset Q$.

该模型中 E 集合的事件就是上述的事件数据, Q 为总体状态的集合. 它的意义是当机器人当前处于某一个状态 q_n 的状况下, 若遇到事件集合 E^1 , 则总体状态由 q_n 变换成 q_m .

3.2 DES_M 执行机构

DES_M 的执行涉及到事件、状态的表达、存储和工作过程, σ 映射的执行机构和工作原理, 在 Robix 环境中, 事件、状态均用简单的符号(或编码)来表达的. 事件由各个功能模块生成并汇集到 Robix 系统中的公告板上, 状态亦存放在公告板上, σ 映射由黑板系统的推理机制加以执行的, 具体的技术上的实现可分述如下:

3.2.1 事件信号的表示

由于自主式移动机器人系统中 Agent 较多, 产生的事件信号也多, 不同的 Agent 可能产生相同的事件信号, 例如二维模块和三维模块都可能产生发现障碍的事件信号, 而它们对状态转换所起的作用不同, 必须区别对待. 所以每个事件信号中必须包含有产生该事件信号的 Agent 的名称, 以便于区分.

本系统是一个实时系统. 机器人所处的环境随其运动会不断发生变化, 机器人本身的内部

状态也会发生变化, 随时间变化产生不同的事件信号, 所以事件信号上还必须包括产生该事件信号的时间信息, 一般用系统的一个同步时钟表示。

综合以上两点, 我们可以将事件信号定义为一个三元组:

$EVENT = Src, Type, Time$

其中: Src 表示产生该事件信号的 Agent 的名称;

$Type$ 表示该事件信号的内容;

$Time$ 示该产生事件信号的系统时间。

具体实现时, Src 、 $Type$ 、 $Time$ 都只要用 1~2 个字节表示, 每个事件信号非常简短, 占用的通讯资源很少, 通讯接口可以及时将它送到公告板。

3.2.2 内部执行机构

上述 DESM 模型的运行到机器人各个功能模块相应的动作过程称为协调, 整个机器人系统的协调工作是由黑板调度器完成的, 黑板调度器内部有一个根据 DESM 模型设计的推理机, 公告板的事实触发推理机工作。如果当前状态为 q_n 并且公告板上的事件形成集合 E^1 , 推理机根据 DESM 模型进行推理, 得到新的状态 q_m , 新的状态通过公告板发给各个 Agent。

除了 DESM 模型中的状态变换功能之外, 在规则库中(图 1)还包含有不同状态下, 对系统功能模块进行重新组织协调的规则, 实现自主式机器人系统的“重新组织”。主要规则包括以下两种:

1) 根据当前的总体状态, 对各个 Agent 的输入输出进行重新组合, 并使各个 Agent 选择不同的处理方法。

2) 重新安排当前状态下各个 Agent 的工作节拍, 使 Agent 之间采取新的协调协作方式。

应当指出, 上述两部分的功能是在总体状态一旦确定的情况下如何进一步协调各个功能模块之间的数据、时序、同步等细节问题, 由流水线导航模型^[9]进行协调, 通过上述两个模型的控制结果, 各个功能模块有条不紊地协调工作产生出相应的动作改变系统的行为方式, 以适应环境的变化。

4 试验结果

DESM 协调模型在自主式移动机器人 ATB1 上得到应用, ATB1 是面向室外准结构化道路环境的移动机器人, ATB1 上共安装了两台 Sun Sparc Station 10, 六台 PC486, 两个彩色摄像头, 一套激光测距仪及一套定位装置。

ATB1 采用 DESM 协调模型控制系统中的 Agent 工作, 在道路网中各种路面状态的环境中运行, 经过了两个多月的调试和反复试验, 表现出了稳定、良好的性能。下面是其中一次实验: 实验的道路网如图 2 所示, 道路中设有两个障碍(图中阴影处), 分叉点右侧设有路标。(图中用箭头标出)。

机器人任务: 行驶路线如图 3 中用虚线所示: 从 P_0 处开始, 按图中虚线标识的方向行驶。先在外圈行驶一周, 然后在路标的指引下进入分叉。两个分叉行驶完毕, 从 P_0 处进入越野, 越野行驶到 P_1 , 再从 P_1 行驶到 P_2 , 然后遥控干预进入遥控行驶, 进行遥控试验。

我们详细介绍 ATB1 对障碍和分叉的处理情况:

三维模块发现障碍, 系统总体状态马上(0.1s 之内)切换到避障状态, 控制车辆减速, 准备避障, 融合模块给出有障碍的局部道路数据之后, 规划模块给出绕过障碍的规划, 由控制模块

控制车辆绕过障碍。

路标模块一旦检测到分叉,马上发出信号,黑板调度器将总体状态切换到分叉状态($0.1s$ 之内),控制模块会使机器人减速;然后依靠左(右)边进行轨道规划.根据全局路径规划的信息确定分叉方向,沿着左(或右)路边进行单边规划,规划出一条朝着分叉方向的路径.

如果看不到路边,一方面向黑板汇报,同时根据全局规划的知识给出一小段沿着分叉的方向的路径.如果较长时间看不到路边,黑板控制系统进入停车状态.

通过以上数据,我们可以看到 DESM 协调工作有以下特点:

状态切换非常迅速,各个 Agent 送来的事件信号满足一定的条件,总体状态立即发生转换,时间在 $0.1s$ 之内,使车辆能及时减速,准备下一步动作.

根据总体状态,系统进行“重新组织”,下面以融合为例,说明输入输出的重新组合.

在避障状态和分叉状态下,融合模块的输入重新组合,避障状态下,融合模块将二维模块和三维模块的处理结果作为输入.分叉状态下,融合模块将二维模块和路标模块的处理结果作为输入.

根据总体状态,各个模块都采取专门针对不同状态的算法进行处理.以融合为例,避障状态下,需要处理大量的三维数据,每次融合需要大约 $0.4s$;分叉状态下,融合模块不再处理三

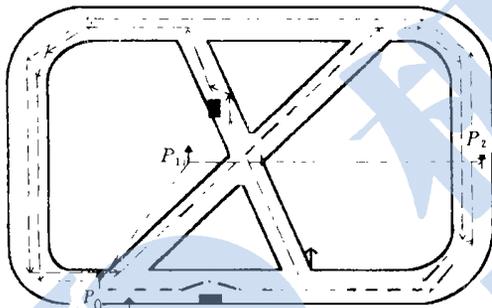


图2 实验道路网

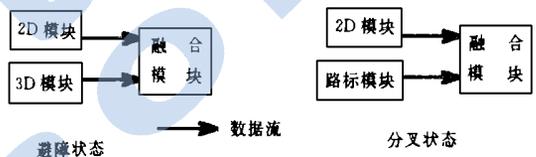


图3 不同状态下融合模块的输入组合

维数据,处理时间变短,由避障的 $0.4s$ 完成一次处理减少到 $0.2s$ 一次.

5 系统的评价

通过实验我们可以 DESM 模型在自主式移动机器人系统中的作用作一定的评估.由于实验时间、场地等条件的限制,我们没有对机器人所有可能的行为进行试验.从部分试验中可以看到 DESM 模型的一些主要特点:

· 智能性

黑板调度器是最高层的决策机构,它综合了机器人系统中各个子系统的信息,它给出的总体状态具有全面性和更高的可靠性.针对不同的总体状态,黑板调度器采取不同的规则调度各个 Agent,对系统进行重组织,使得自主式移动机器人具有复杂的行为方式,提高了系统的智能性.

· 适应性

试验中,自主式移动机器人遇到了平直道路,障碍,分叉,越野等多种情况,状态及时转换,根据不同的环境条件,采取不同的行为方式,机器人行驶良好,能适应不同的环境条件.自主式

移动机器人所处的环境是复杂的, 并且随着机器人的移动会不断发生变化, 使得机器人的导航更加复杂, Agent 之间的通讯可能更加频繁, 这可能影响机器人对环境变化的反应速度. DESM 模型中, Agent 之间的协调通过事件信号进行, 事件信号是对各个 Agent 处理结果的一个抽象的描述, 通讯速度很高, 可及时送到公告板上; 另外, DESM 模型中容许 Agent 之间的直接通讯, 提高系统对紧急突发事件的反应.

· 灵活性

DESM 模型对各个 Agent 的事件信号并不作过多的限制, 试验中, 我们对一些 Agent 的事件信号进行了局部的调整, 同时对黑板调度器的规则也作一些修改, 提高系统的适应性. 这些修改并不影响整个系统的组织和结构.

在不同的总体状态下, 各个 Agent 采用的算法、策略也不同. 在试验中可以很方便地实验各种不同的算法.

参 考 文 献

- 1 Charles E Thorpe, Steven A Shafer, Takeo Kanade. Vision and Navigation for the Carnegie Mellon Navlab, pp7~19, The Robotics Institute 1986 Annual Research Review, 1986: 7~19
- 2 Brooks R A. A Robust Layerd Control System for a Mobile Robots. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2
- 3 朱淼良, 陈纯, 傅永建. CREGS 用于智能控制的多专家系统. 自动化学报, 1991, 17(5)
- 4 Jeffrey S Rosenschein. Cooperation Without Communication. Proc of 1986 Conference of the American Association for Artificial Intelligence, 1986
- 5 Werkman K. Using Negotiation and Coordination Systems. IJCAI'91, 1991
- 6 Kreifelts T *et al*. A Design Tool for Autonomous Group Agent, Proc of EC- CSCW '89
- 7 Davis R, Smith R G. Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving, AI, 1983, 20(1)
- 8 Heiki Hammainen. Experience on Semi-Autonomous User Agents, Decentralized AI, 1989
- 9 朱淼良, 吴春明. 军用智能机器人体系结构. 中国 AI 学会 IR 专业委员会首届学术会议论文集, 中国成都, 1993, 7

ARCHITECTURE FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

ZHANG Youjun ZHU Miaoling WU Chunming HU Xiaomin

(AI Institute, Zhejiang University, Hangzhou)

Abstract In this paper, we present a coordinated model for multiagent system (discrete) event-state model. The model is used to coordinate the sensing, planning and control agents in autonomous mobile robot, and to guaranty the robot to operate autonomously in a complex and dynamic environment

Key words Autonomous mobile robot, agent, multiagent systems, coordinate, intelligent schedule

作者简介

张友军: 男, 27岁. 研究领域: 机器人体系结构、分布式系统、人工智能、机器人学.

朱淼良: 男, 50岁, 教授. 研究领域: 机器人体系结构、分布式系统、人工智能、机器人学.