

文章编号: 1002-0446(2001)02-0123-04

移动机器人条件反射能力的实现*

顾冬雷 陈卫东 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所 200030)

摘要: Brooks 的包容体系结构中, 移动机器人控制器各个行为之间的关系是固定不变的, 可以看作实现了机器人的非条件反射能力, 因此控制系统没有适应性. 本文提出了条件反射能力的实现方法, 该方法能够和包容体系结构紧密结合, 增强移动机器人的适应能力. 实验证明该方法是可行的.

关键词: 移动机器人; 自主; 包容体系结构; 条件反射

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

REALIZATION OF THE CONDITION REFLEX ABILITY FOR A MOBILE ROBOT

GU Dong-lei CHEN Weidong XI Yu-geng

(Automation Institute of Shanghai Jiaotong University 200030)

Abstract In Brooks' subsumption architecture, the relationship between various behaviors is fixed, and could be regarded as noncondition reflex, so the control system is lack of adaptive ability. In this paper, a new method to realize the condition reflex is proposed. It could be integrated into subsumption architecture tightly, and offers the mobile robot some adaptive ability. Experiments show that this method is feasible.

Keywords: mobile robot, autonomous, subsumption architecture, condition reflex

1 引言(Introduction)

Brooks 提出的基于行为的包容体系结构对移动机器人控制系统的设计有着革命性的影响^[1]. 他采用分布决策模式来取代传统的中心决策模式设计控制器, 大大提高了移动机器人的机动能力和鲁棒性, 取得了一系列有深远影响的成果. 但是他指出, 虽然设计出来的机器人在许多环境中都具有良好的鲁棒性, 但并不具有适应能力.

为了提高机器人的适应能力和智能水平, 存在两条研究路径. 其一是自上而下地采用各种传统的算法来增强机器人的智能, 如各种学习算法的利用^[4,5]. 其二是自下而上地改进机器人的控制体系结构使其具有适应性, 代表性的有 Maes 的 Action Selection^[2]以及 Arkin 的 Motor Schema^[3]等. 和包容结构一样, 这些体系结构中各个行为之间的联系是固定不变的, 只相当于实现了机器人的非条件反射,

并没有实现机器人的条件反射. 这是他们的一个共同的缺点. 本文以包容结构为例, 设计了拥有条件反射能力的控制系统, 从这个角度增强了机器人的适应能力.

2 非条件反射结构 (Noncondition reflex structure)

图 1 所示的移动机器人控制系统采用了五个行为模块: “漫游行为”、“趋光行为”、“避障行为”、“避碰行为”和“报警行为”. 每个行为模块只获取相应的部分的传感信息, 完成部分的工作. 整体目标, 即在保护自身的前提下寻找光源, 依赖各个行为模块之间的相互作用. 行为模块之间的关系称作包容关系.

图 2 给出了包容结构的示意图, 图中 X_1 是优先级低的行为的输出, X_2 是优先级高的行为的输出. X_{out} 是实际输出到执行机构的值. 当 X_2 存在有意义

* 基金项目: 本项目获 863 资助 (863-512-9805-18).

收稿日期: 2000-04-17

的输出,即优先级高的行为处于激活状态时,即使 x_1 也处于激活状态,它也将抑制 x_1 的输出,此时的实际输出值等于 x_2 , x_1 不起作用.只有当优先级高的行为不在激活状态时,优先级低的行为才取得控制权,实际输出才等于 x_1 .

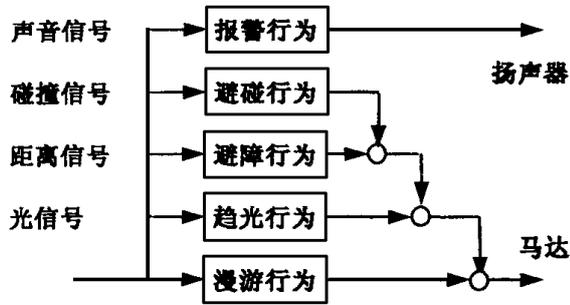


图1 机器人趋光控制系统的包容体系结构示意图
Fig.1 Subsumption structure of light seeking system

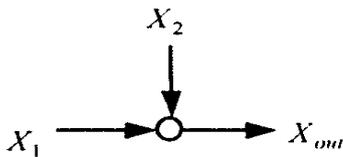


图2 包容关系示意图
Fig.2 Relation of subsumption

按照包容关系,图1中漫游行为是最基本的行为,当系统处在没有任何外部事件的时候,移动机器人将作无目标的随机的漫游行为.当探测到光源的存在时,机器人将产生趋光行为,这个行为抑制了漫游行为,接管了对马达的控制.当有对机器人更为急迫的事情比如有障碍物在前方,机器人和别的物体发生了碰撞等等发生时,它们抑制了当前执行的任务,取得了执行机构的控制权.当它们完成后或条件不存在之后,解除了对低优先级任务的抑制,于是低优先级任务得以执行.报警行为中机器人听到响声后发出特定旋律的声音报警.它是和上述一组行为并行的行为,相互之间没有任何显式的联系,是机器人另一个需独立完成的目标.

以上的控制系统由于采用了包容结构,只利用很简单的硬件,以及少量的代码就很容易实现.而这采用传统的先集中采集传感器数据,然后建立环境模型,根据模型规划出机器人每一步的动作并加以执行的模式加以实现是十分困难的.这充分体现了包容结构的优越性.

然而在本控制系统中的各个模块之间的交互关

系是固定的,不可变更的.无论控制系统如何鲁棒,它不具有适应性.假如紧接着响亮的拍手声音后去碰撞移动机器人,它不会在几次经验之后一听到拍手声音就自动地在被碰撞之前产生避障的行为,而这种能力对于动物的生存是至关重要的.包容体系结构只相当于赋予了机器人一组最低层次的无条件反射本能,以上所说的那种能力属于条件反射能力,是动物更高层次的本能,包容结构未加以实现.

3 条件反射结构 (Structure of condition reflex)

仔细考察动物的条件反射行为,本文认为它是动物体的固有的一种本能,即认为两个总是相继发生的事件之间是有因果关系的,前者是因,后者是果.当然实际世界中许多情况未必有因果,但这种简单的因果假定本能对于动物的意义是不言而喻的,可以说是其他一切高层次智能行为的基础.本文基于这个假定,实现了条件反射结构,它和 Brooks 的包容结构紧密结合,赋予了移动机器人某种水平的适应性.控制结构如图3所示.

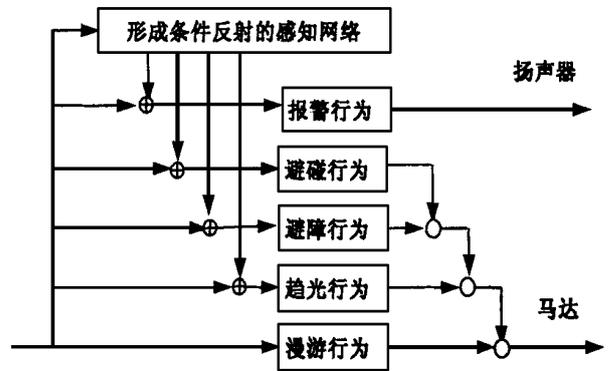


图3 增加了条件反射能力的控制系统包容体系结构图
Fig.3 Subsumption architecture with condition reflex ability

图3所示,本文在包容结构之上增加了一个感知层.行为的“传感信号——相应动作”模块中的传感信号和感知层的输出进行了“或”操作,使行为模块不仅对实际的传感信号作出响应,而且对感知层产生的由因果关系预测出来的信号进行响应,获取条件反射能力,同时保留了包容结构的优异性能.

4 感知层的设计 (Design of the perception layer)

由于上述所有传感信号均为逻辑信号,如果把

检测到某个传感信号当作发生了某事件, 则可以将上面的控制系统看作是事件驱动的系统. 假设原系统有 N 个“S-A”组合(“事件—相应动作”), 则将它们分别对应编码成 $S_i, i=1, \dots, N, A_i, i=1 \dots N$. 设置一个数组 $E_{n \times n}$, 其中每一个元素 $E_{i,j}, i \neq j$ 中的 i 对应着事件 S_i, j 对应着事件 S_j , 它的值就是两个事件之间的关联强度. 如果事件 S_i 发生后的一小段特定的时间 $\Delta\tau$ 内, S_j 总是紧接着发生, 说明它们之间有一定的因果联系, 强度值不断增加, 反之则不断减小. σ_1 是形成条件反射的阈值, σ_2 是条件反射消退的阈值.

感知层不停地检测各个事件发生的时间关系. 如果两个尚未形成条件反射关系的事件 S_i 与 S_j 总是接连发生, 时间间隔小于 $\Delta\tau$, 则 $E_{i,j}$ 值按照(1)式不断增长, 直到 $E_{i,j} > \sigma_1$ 时, 事件 S_i 与 S_j 之间便建立了条件反射关系. 如果两个已经建立了条件反射关系的事件 S_i 与 S_j, S_i 发生 $\Delta\tau$ 后, S_j 尚未发生, $E_{i,j}$ 不断减少, 直到 $E_{i,j} < \sigma_2$, 这两个事件之间的条件反射关系就消失了. σ_1 和 σ_2 满足 $E_{LowLimit} < \sigma_2 < \sigma_1 < E_{UpLimit}$, 目的是形成一个缓冲区域, 避免造成在单一阈值附近条件反射形成和消退两种行为的振荡.

$$E_{i,j} = \begin{cases} E_{i,j} + \Delta E_+; & (E_{i,j} \leq E_{UpLimit}) \\ E_{UpLimit}, & (\text{Otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{i,j} = \begin{cases} E_{i,j} + \Delta E_-; & (E_{i,j} > E_{LowLimit}) \\ E_{LowLimit}, & (\text{Otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

在(1)与(2)式中, $\Delta E_+ > \Delta E_- > 0$, 说明条件反射形成的速度比条件反射消退的速度快.

引入函数:

$$f(x, \sigma) = \begin{cases} 1, & x \geq \sigma \\ 0, & x < \sigma \end{cases} \quad (3)$$

因为 S_j 对应着 A_j , 所以 A_j 的由条件反射得来的预测事件状态在尚未形成条件反射的情形之下由下面公式获取:

$$S'_j = OR(f(E_{1,j}, \sigma_1), \dots, f(E_{i,j}, \sigma_1), \dots, f(E_{N,j}, \sigma_1)), \quad i = 1 \dots N, i \neq j \quad (4)$$

当已经形成了条件反射, 并未消退至条件反射不存在时, 则由以下公式获得预测的事件状态:

$$S'_j = OR(f(E_{1,j}, \sigma_2), \dots, f(E_{i,j}, \sigma_2), \dots, f(E_{N,j}, \sigma_2)), \quad i = 1 \dots N, i \neq j \quad (5)$$

原来的“事件—动作”之中的事件改写成 $S_j \odot S'_j$, 表明决定行为输出的事件是两种事件信号的“或”.

5 实验系统 (Experiment system)

本文参考了 MIT Media Lab 的设计^[6,7], 制作了小型移动机器人, 并采用 New ton Lab 实验室的 Interactive C 语言^[8]实现了控制系统. 机器人采用的传感器有声音传感器(小话筒), 碰触传感器(碰撞开关), 红外距离感知传感器(红外发射与接收元件)以及光敏传感器(光敏电阻). 执行机构是机器人的两个马达, 一个小扬声器. 为了实验的简化, 所有的传感信号均采用了逻辑信号, 红外距离传感器只检测在一定距离内有无物体的存在, 不检测具体的距离值. 声音传感器只检测有没有超过一定声强的声音存在. 同样地, 光敏传感器也只检测有无超过一定强度的光线存在. 实验首先实现了图 1 所示的无条件反射控制系统, 然后实现了图 3 所示的增加了条件反射能力的控制系统.

5.1 基本行为模块的设计

系统实现了以下各个行为模块, 见表 1.

表 1 各个行为模块 (Table1 Modules of various behaviors)

行为模块	传感器	执行机构	控制策略
报警行为	声音传感器	扬声器	如检测到有很响的声音, 则发出特定旋律的声音.
避碰行为	碰撞传感器	马达	左前方被碰撞, 则后退一段距离然后向右转. 右前方被碰撞, 则后退一段距离然后向左转. 左前方右前方被碰撞, 则后退一段距离然后随机转一定角度. 如果后方被碰撞, 则前进一段距离然后随机转一定角度. 如果前后左右都被碰, 则停止行动.
避障行为	距离传感器	马达	如果左前方检测到有物体, 则向右转. 如果右前方检测到有物体, 则向左转. 如果左前右前都检测到有物体, 则后退.
趋光行为	光敏传感器	马达	如前方有较强的光亮, 则转向光源并前进.
漫游行为	无	马达	随机转动某一个角度, 并前进一段时间.

各个行为模块之间的相互作用由图 1 所示的包容关系决定. 可以将避碰行为、避障行为、趋光行为和漫游行为看成机器人的一个行为网络, 它的任务是在保护机器人本身的生存不受侵害的情形之下寻找光源. 而将报警行为看作另一个并行的行为网络. 不同的行为网络对应着机器人不同的具体的目的性行为. 感知层的设计方法参见第 4 节.

5.2 实验结果与讨论

系统设计完毕后进行了以下五组实验:

(1) 快速从左前方的红外传感器侧接近并碰撞左前方的碰撞传感器.

实验结果: 经过多次反复刺激后, 当从左前方接近机器人尚未碰到碰撞传感器时, 机器人产生的动作是避碰行为, 即先后退, 然后向右转, 而不是原先在这个情况下的简单的向右转动的避障行为.

(2) 在拍手后马上碰撞左侧传感器.

实验结果: 经过多次反复刺激后, 当只拍手而不碰触机器人时机器人不仅执行报警行为, 同时也执行避碰行为.

(3) 在用手碰撞机器人后马上拍手.

实验结果: 经过多次反复刺激后, 只碰撞机器人而不拍手时, 机器人不仅执行避碰行为, 同时也执行报警行为.

(4) 照射机器人的光敏传感器后立即碰触机器人左前方的碰撞传感器.

实验结果: 经过多次反复刺激后, 只进行光照而不碰触机器人, 机器人只执行避碰动作.

(5) 碰触机器人左前方的碰撞传感器后立即用某角度的光照射机器人的光敏传感器.

实验结果: 机器人只执行避碰动作.

实验(1)说明在同一个行为网络中, 能建立条件反射行为, 高优先级的行为模块中的动作和低优先级行为模块中的事件联系起来, 抑制并取代了低优先级的行为.

实验(2)和(3)说明在不同的行为网络之间, 能建立条件反射行为, 这种跨网络的反射行为的建立并不抑制原有的基本行为.

实验(4)和(5)表明不合理的反射关系由系统原有的包容性的特点加以克服. 比如, 由于红外传感器的探测距离比碰撞传感器远, 所以前面所述的实验(1)那种情形的条件反射形成是比较合理的, 而反过来先接触到碰触传感器, 然后再被红外发觉, 建立这种情形之下的条件反射对于原有系统是不可能发生的事, 由原有的系统结构加以否决了. 实验(4)和(5)

表明, 如果建立优先级高的行为比如避碰行为到优先级低的行为比如趋光行为的条件反射, 即使建立起来了, 由于原系统的包容性, 这个反射也永远得不到实施, 对系统不起作用. 这说明了这个方法建立起来的反射的合理性是有保障的.

以上实验结果表明, 条件反射结构能和原有的包容体系结构很好地结合在一起, 使原来的非条件反射的系统行为有了对外界环境基本适应能力的反射功能.

6 结论(Conclusion)

赋予移动机器人学习能力是当今机器人领域中的一个研究热点. 不管是强化学习还是遗传算法、神经网络学习方法, 都是从优化的角度考虑问题的, 以找到状态空间和行为空间的最优匹配为目标. 本文从建构的角度考虑问题, 力图从底向上逐渐赋予机器人动物的一些基本能力, 在拥有了基本能力的基础上进一步发展机器人高层次的智能. 条件反射能力是动物适应环境最基本的的能力, 值得作为移动机器人的一项基本要素加以实现. 如果在考虑到机器人有这个基本能力的基础上开发更高一层的学习方法, 将会赋予机器人更高水平的适应能力. 这也是本文下一步的工作.

参考文献 (References)

- 1 Brooks R A. A Robust Layered Control System For A Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics and Automation RA-2, 1986, 14- 23
- 2 Pattie Maes. The Dynamics of Action Selection. IJCAI-89, Detroit, MI, 1989, 991- 997
- 3 Arkin R C. Motor Schema-Based Mobile Robot Navigation. International Journal of Robotics Research, 1989, 8(4): 92- 112
- 4 Mahadevan S, Connell J. Automation Programming of Behavior-based Robots Using Reinforcement Learning. Artificial Intelligence, 1992, 311- 365
- 5 Pattie Maes, Brooks R A. Learning to Coordinate Behaviours. Proceeding AAAI-90, Boston, MA, 796- 802
- 6 Lcs www. media. mit. edu/groups/el/Projects/handy-board/misc/link/index. html
- 7 Joseph Jones, Anita Flynn. Mobile Robot. MIT press, 1995
- 8 Interactive C user's Manual. Newton Lab, www. newtonlab.com.

作者简介:

顾冬雷 (1972-), 男, 博士生. 研究领域: 智能机器人, 多机器人协调控制.

陈卫东 (1968-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 机器人, 多智能体协调控制.

席裕庚 (1945-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 预测控制, 多智能体协调控制等.