

文章编号: 1002-0446(2000)03-0169-07

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

蔡自兴 周翔 李枚毅 雷鸣

(中南工业大学信息工程学院 长沙 410083)

摘要: 本文针对自主式移动机器人控制体系结构中两类典型方法的不足, 提出了一种进化控制体系结构, 实现了基于 AI 模型的方法与基于行为的方法的优势互补. 文中阐述了进化控制的思想, 并应用于移动机器人控制结构的设计. 该结构使移动机器人具备良好的学习和适应能力、较快的响应速度, 同时拥有较好的理性和完成给定任务的能力.

关键词: 移动机器人; 进化控制; 体系结构

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

1 引言

自主式移动机器人的目标是在没有人的干预、无需对环境作任何规定和改变的条件下, 有目的地移动和完成相应的任务.

现有移动机器人存在的主要问题是缺乏灵活性和自主性. 典型的例子是大多数机器人均是在高度结构化的环境下执行预先规定的动作序列, 在新的环境下或遇到意外情况时, 不能很好地完成任务, 引发问题的主要原因是现实环境是非结构化的, 存在不确定性. 具体体现在: 关于环境的先验知识通常是不全面的, 不确定的和近似的; 感知器得到的信息通常是不可靠的, 存在着噪声和测量误差; 现实的环境通常具有复杂和不可预测的动态特性, 如物体的移动, 环境的改变等; 控制作用并非完全可靠, 如车轮打滑等等.

为了解决上述存在的问题, 传统的解决办法是精心设计机器人的机械的传感装置, 或对环境作详细的的规定和构造(如设置地标或磁信号等), 或兼而有之, 但带来的问题是提高了成本、降低了机器人的自主性, 难以适用于任意的环境.

因此, 移动机器人控制的研究重点目前已集中在设计一种良好的控制结构, 能克服环境的不确定性, 可靠地完成复杂任务, 且成本低, 鲁棒性好. 问题的关键在于这种结构应具有主动学习和自适应的能力.

2 两种体系结构

目前, 自主式移动机器人的控制体系结构研究中存在两种主要研究方法, 一是传统的基于认知模型的功能规划法和近来兴起的基于行为的方法.

传统的移动机器人控制体系结构源自基于认知的人工智能(AI)模型, 在 AI 模型中, 智能

基金项目: 本文为国家自然科学基金和湖南省科委科技专项基金资助项目.

收稿日期: 1999-05-10

任务由运行于符号模型之上的推理过程来实现,它强调带有环境模型或地图的中央规划器是机器人智能不可缺少的组成部份,而且该模型必须是准确的、一致的,因此,传感器信息的校验具有与模型本身同等的重要性.并且传统方法遵循的是一条从感知到动作的串行功能分解控制路线,是一种典型的自顶向下构建系统的方法,如图1所示.从这个意义上讲,动作不是传感器数据直接作用下的结果,而是经历一系列从感知、建模到规划等处理阶段之后产生的结果,这类系统的特点是具有完成用户明确描述的特定任务的能力.在给定目标和约束条件之后,规划模块根据环境的局部模型(根据当前传感数据构造)和已有全局环境模型决定下一步的行动,并依次完成整个任务.全局环境模型的建立部分根据用户对环境中已知对象模型的了解及其相互关系的推测,部分根据传感器模型自主构造.全局环境模型的表示具有一定的通用性,因此能适用于许多任务规划的场合.如果没有这样一个通用模型,系统就不能发现执行规划任务时所需要的一些重要特征.但通用世界模型过于理想化,对感知器提出了一些不切实际的要求,而且由于认知过程和符号化世界模型的建立过程中计算瓶颈的存在,使得从传感器到驱动机构的控制环路中存在着延时,因而缺乏实际运行所要求的实时性和灵活性.

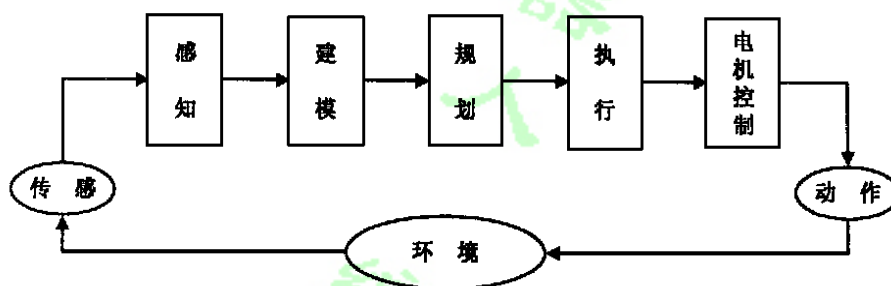


图1 自主式移动机器人的串行功能分解体系结构

针对传统方法的不足,研究人员模拟动物的反应式行为的特点,引入了一类基于行为的移动机器人控制体系结构. Brook^[1]提出的一种并行分布式层级体系结构(Subsumption Architecture,简称SA)是基于行为的控制结构的典型代表,如图2所示.基于行为的方法是一种自底向上的构建系统方法,它用行为封装了机器人控制中应具备的感知、探索、避障、规划和执行任务等能力.因此它能够产生一些有意义的动作,这些动作反过来可以组合成不同水平的能力.从物理结构上来说,即系统中存在着多个并行控制回路,构成各种基本行为,传感数据根据需求以一种并行方式给出,各种行为通过协调配合后作用于驱动装置,产生一些有目的的动作.由于许多行为仅设计成完成一个简单的特殊任务,且所占内存不大,因此基于行为的方法可以产生快速

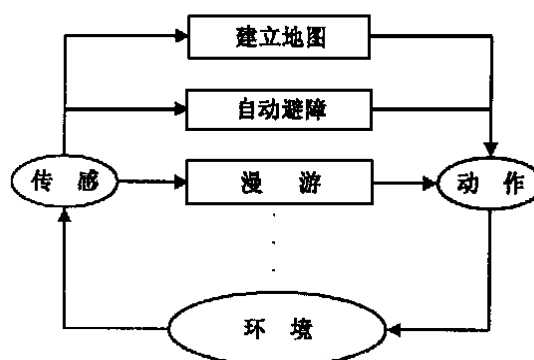


图2 基于行为的移动机器人控制体系结构

的响应. 而且整个系统的能力可以很方便灵活地从低层次的局部定位、到障碍回避、再到自由漫游逐步提高和扩展.

目前, 由于基于行为的控制结构, 特别是 Brook 的 SA 结构, 在实际控制中具有较快反应力而显得比传统方法更具智能, 因而成为移动机器人控制研究关注的焦点. 在基于行为的结构的基础上, 提出了许多新的思想和控制策略^[2,4]. 在这种结构中, 由于存在多个控制回路, 也导致了一些缺点. 它需要花更多的代价设计协调机制来解决各个回路对同一驱动装置争夺控制的冲突, 更重要的是各种行为必须相互协调以获得有意义的结果, 但获得一种富有成效的协调方法往往不易, 原因是随着任务复杂程度的增大, 各种行为之间的交互作用增加, 增大了预测一个系统的整体行为的难度. 因此, 难于规划有目的动作是这类系统的主要缺点.

3 基于功能/行为集成的进化控制体系结构

3.1 基于功能/行为集成的体系结构的思想基础

基于传统 AI 认知模型的移动机器人控制结构缺乏实用性和必要的灵活性与普适性; 以 Brooks 的 SA 结构为代表的基于行为的控制体系结构提高了系统的响应速度和自主性, 但同样存在着缺乏必要的理性和受到诸如设计者预见能力限制等缺点. 本文提出的基于功能/行为集成的进化控制体系结构的思想基础是实现这两类结构优势互补, 同时在结构中融入进化控制的思想, 使该结构既能提高系统的反应速度, 又使系统具备较高理性和学习适应能力.

3.2 进化控制思想

在科学与工程领域中, 很重要的一种方法是对自然界现象进行模拟与仿生研究. 在千百年的演化过程中, 大多数动物对其所处环境的变化均能作出准确与迅速的反应, 这里表现的最大特征是动物行为的适应性. 动物能通过感受环境的变化不断对自身进行调整, 以满足生存的需要, 表现出一种自主的学习与自适应能力. 在人工自主系统中, 学习与自适应能力同等重要. 因此, 采用合适的理论与方法赋予系统主动的学习与适应能力是人工自主系统研究与设计中的关键问题.

自主式移动机器人的实际应用环境必然是非常复杂、非结构化和时变的, 而且存在着通讯和反应时滞、信息不全等问题; 传统的基于结构化环境的量化、精确化的感知、规划和控制已不能满足实际应用的需要, 而传统的智能控制方法在实现机器人的自主性和学习能力等方面存在着一定的局限性, 因此有必要引入新的理论和工具.

将进化计算理论与反馈控制理论相结合, 形成了一个新的智能控制方法——进化控制, 它能很好地解决移动机器人的学习与适应能力方面的问题. 进化计算在求解复杂问题优化时具有独到的优越性, 它提供了使机器人在复杂的环境中寻找一种具有竞争力的优化结构和控制策略的方法, 使移动机器人根据环境的特点和自身的目标自主地产生各种行为能力模块, 并调整模块间的约束关系, 从而展现适应复杂环境的自主性. 进化控制的意义在于它在对待机器智能的问题上较传统智能控制方法实现了认识与思考方法上的飞跃. 传统意义上的机器智能是人赋予的, 但这种按预先固定的程式来解决问题的模式很难说机器是智能的, 这里体现的智能应归功于设计者; 进化控制则不然, 它的目标是要探索导致自主智能产生的机制和本质过程——一种真正意义上的机器智能. 在进化控制中, 进化计算已不仅仅局限于作为一种寻找优化的工具, 而已成为了一种探索自适应原理和开发智能系统的方法.

总之, 进化控制思想的提出是综合考察了几种典型智能控制方法的思想起源、组成结构、

实现方法和技术等方面之后提出来的,它模拟生物界演化的进化机制,将进化计算与反馈控制理论相结合,以提高系统在复杂环境下的自主性和学习能力.

3.3 控制体系结构

本文提出的功能/行为集成的自主式移动机器人进化控制体系结构如图3所示.整个体系结构包括进化规划与基于行为的控制两大模块.这种综合的体系结构的优点是既具有基于行为的系统的实时性,又保持了基于功能的系统的目标可控性.同时该体系结构具有自学习功能,能够根据先验知识、历史经验、对当前环境情况的判断和自身的状况,调整自己的目标、行为,以及相应的协调机制,以达到适应环境、完成任务的目的.在该体系结构中,机器人的一些基本能力如避障、保持平衡、漫游、前进、后退等,由系统中基于行为的模块提供,进化规划系统则完成一些需要较高智能的任务,如路径规划、生成协调器的结构与参数等.为了完成一些特定的任务,进化规划器只需将一些目标驱动行为的状态激活,并设置协调器相应的参数即可达到目的.同时系统中设有知识库和经验库以指导和提高进化规划的执行效率,为缓和系统中各种行为模块对驱动装置进行竞争的协调器的结构由基于行为的系统确定,其协调策略由进化规划器生成,这种“柔性”的协调策略能根据机器人所处的环境和执行的任务不同而发生改变,并能在一定的原则的基础上不断地完善和提高.

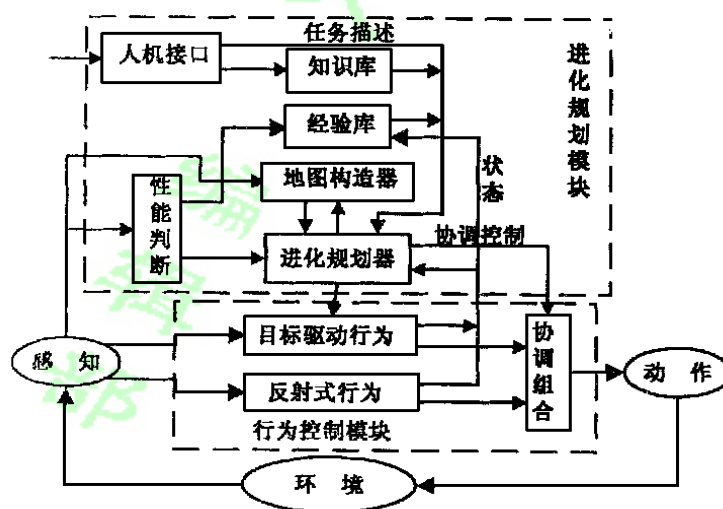


图3 规划/行为综合的进化控制体系结构

4 系统实现

系统实现包括逻辑设计与物理实现,逻辑设计中以进化规划器与各种反射行为的实现为核心.

4.1 进化规划器的结构与算法

在本系统中,进化规划器的结构如图4所示.具体运行过程是:离线进化算法模块根据先验知识对机器人运动路线作出离线规划,机器人根据规划路线移动,其运动姿态由运动规划模

块保障; 当遇到未预知的障碍物时, 反射式行为启动, 保障机器人避开障碍, 然后启动在线进化规划, 计算新的路径, 再由运动规划器保障实施, 以保持路径跟踪的鲁棒性.

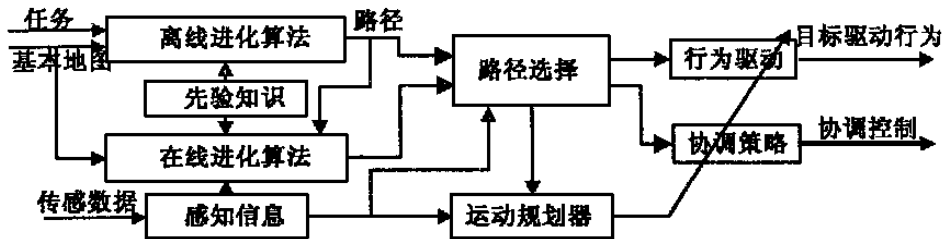


图 4 进化规划系统结构

离线与在线进化算法的实现形式描述如下:

编码方式: 机器人移动路径由起始节点至目标节点的线段连接而成, 一条路可以描述如图 5 所示, 其中: m_i 表示节点的坐标值, b_i 表示节点是否可行的状态.

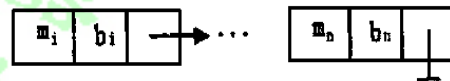


图 5 路径的基因表示

评估函数: 用 $eval_f$ 和 $eval_u$ 分别对可行路径与不可行路径进行评价, 表达式如下:

$$eval_f(p) = w_d \text{dist}(p) + w_s \text{smooth}(p) + w_c \text{clear}(p) \quad (1)$$

其中: w_d, w_s, w_c 分别代表路径长度、光滑度和安全度.

$$\text{dist}(p) = \sum_{i=1}^{n-1} d(m_i, m_{i+1}) \text{ 表示路径总长, } d(m_i, m_{i+1}) \text{ 表示两相邻节点 } m_i, m_{i+1} \text{ 的距离.}$$

$$\text{smooth}(p) = \max_{i=1}^n \frac{1}{2} S(m_i) \text{ 表示节点的最大曲率.}$$

$$\text{clear}(p) = \max_{i=1}^n \frac{1}{2} C_i, \text{ 其中 } C_i = \begin{cases} g_i - \tau & \text{if } g_i \geq \tau \\ e^{\alpha(\tau - g_i) - 1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

g_i 为线段 $m_i m_{i+1}$ 到所有检测到的障碍物的距离, τ 为定义安全距离的参数.

$$eval_u(q) = \mu + \eta \quad (2)$$

μ 代表整个路径与障碍物的相交次数, η 代表每条线段与障碍物的平均相交次数. 为了实现上的方便, 在总的路径排序时, 规定任何一条可行路径的适应值大于不可行路径的适应值.

进化操作: 根据问题的实际, 定义了几种交叉、变异、选择、节点的移动、删除、增加、平滑等操作. 图 6 给出了算法的仿真效果.

4.2 运动规划算法

运动规划器的目的在于给出具体的规划路径之后, 如何求得合适的速度控制量 u_r 和驾驶

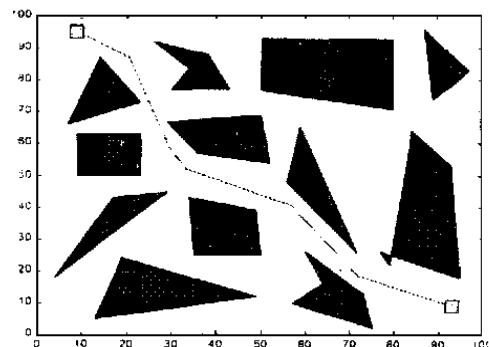


图 6 机器人路径进化规划(代数= 60)

角度控制 u_θ , 保持路径跟踪的鲁棒性, 系统中采用 x. kauayama^[3]提出的控制模型,

$$\begin{vmatrix} v \\ w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} v_r \cos \theta_e + K_x \theta_e \\ w_r + v_r (K_y Y_e + K_\theta \sin \theta_e) \end{vmatrix} \quad (3)$$

其中 v, w 为应施加的速度和角速度值, v_r, w_r 为当前的速度与角速度, θ_e, X_e, Y_e 分别为当前姿态与参考姿态偏差, k_x, k_y, k_θ 为正常数,

4.3 反射式行为的设计

在系统中, 反射式行为由模糊逻辑控制实现, 具体形式为(以自动避障为例):

IF X_i is true and ... X_n is true, then Y_u and Y_θ

其中 X_i 为各个方向传感器检测到的障碍物远近程度, Y_u, Y_θ 为应施加的速度控制量及角度控制量, 目标函数的选择为:

$$\Phi = k(v - v_g) + k_\theta(\theta - 90^\circ) + k_o(d - D) \quad (4)$$

其中 $v(0 \leq v \leq v_{\max})$ 为行驶速度, v_g 为理想速度, $\theta(0 < \theta < 180^\circ)$ 为驾驶角度, d 为障碍距离, D 为与障碍物保持的距离, k_v, k_θ, k_o 为常数, 控制规则及参数可通过离线仿真或在线训练方法得到.

4.4 系统的物理实现

整个系统由上下位机构成, 上位机实现进化规划系统, 以及整个系统的仿真与训练, 下位机由 87C196KC 单片机及外围电路构成控制器, 机器人本体采用 Hero-1, 上下位机通过 485 通讯. 上位机首先进行离线仿真, 以训练机器人部分的结构与参数, 然后将参数下载至机器人控制器. 在实时控制时, 通过机器人身上的超声波传感器采集到的障碍分布信息可以上传至上位机, 在界面上显示, 并作为在线进化规化的输入参数, 在线规划器下传信息, 以引导机器人进一步的行动. 目前系统已完成实验开发, 测试效果良好. 系统及实验环境如图 7 所示.

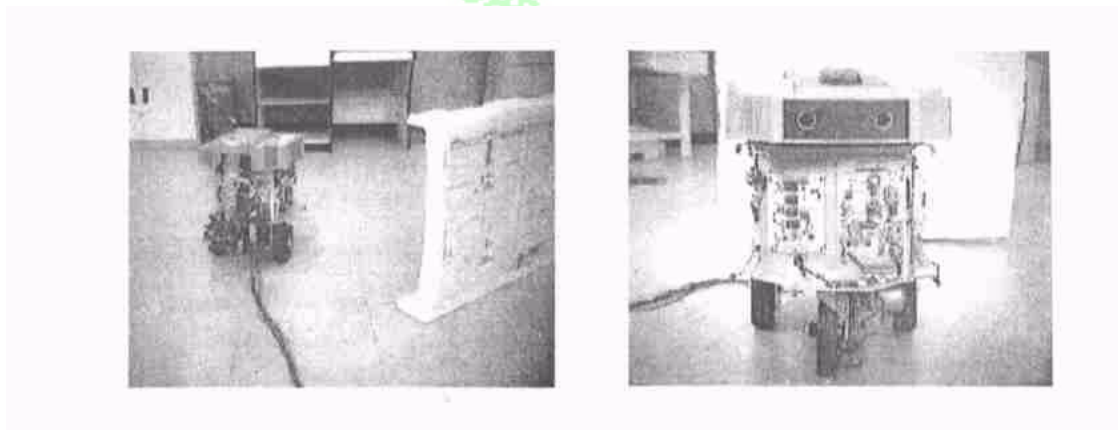


图 7 机器人外观实验运行

5 结束语

本文总结了现有的两种自主式机器人控制体系结构的特点. 传统的基于 AI 认知模型的功能分解规划法缺乏控制的实时性和必要的灵活性, 基于行为的方法虽然提高了系统的响应速度, 但缺乏必要的理性. 针对这些不足, 提出了一种综合二者优点的体系结构, 并在其中融入

了进化控制的思想. 将该体系结构用于实际移动机器人的控制, 效果比较理想.

参 考 文 献

- 1 Brook R A. A Robust Layered Control System for Mobile Robot. IEEE J Robotics and Automation, 1986, 2(1): 14- 23
- 2 Akram B G. Controlling Reactive Behavior with Consistent World Modeling and Reasoning. Application of Artificial Intelligence X: Machine Vision and Robotics, 1992, 1708: 701- 712
- 3 Kanayama Y, Kimura Y, etc. A Stable Tracking Control Method for An Autonomous Mobile robot. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation, 1990, 384- 389
- 4 Chung J, Byeong-Soon R, Hyun S Y. Integrated Control Architecture based on Behavior and Plan for Mobile Robot Navigation. Robotica, 1998, 98(16): 387- 399
- 5 Jin Xiao etc. Evolutionary Planner/Navigator: Operator Performance and Self-tuning. IEEE Conference on Evolutionary Computation, 1996, 366- 371
- 6 蔡自兴. 智能控制——基础与应用. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 7 周翔. 移动机器人自主导航的进化控制理论研究及其系统平台的开发与应用. 中南工业大学博士论文, 1999

EVOLUTIONARY CONTROL ARCHITECTURE FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOT BASED ON FUNCTION/BEHAVIOR INTEGRATION

CAI Zixing ZHOU Xiang LIMeryi LEI Ming

(Information Engineering College, Central South University of Technology, Changsha 410083)

Abstract: Aimed at the drawbacks, the two typical methods in autonomous mobile robot control architecture, an evolutionary control architecture is proposed in this paper which has the virtues of both AI-based and behavior-based methods. The idea of evolutionary control is also described and applied to the design of mobile robot control architecture. The architecture endows the robot with the ability of learning, adaptation, quick reactive speed and rationality, also with the ability of achieving given task.

Keywords: Mobile robot, evolutionary control, architecture

作者简介:

蔡自兴 (1939-), 博士生导师, 纽约科学院院士. 研究领域: 智能控制与人工智能.

周翔 (1968-), 博士. 研究领域: 自主式移动机器人控制, 复杂系统控制.