

进化机器人学研究进展*

刘娟, 蔡自兴, 涂春鸣

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 如何提高机器人的自主性和适应性是目前人工智能领域的热点问题之一. 传统的集中式规划设计方法难以满足这些性能要求, 将进化机制引入自适应机器人的设计为解决这一问题开辟了新的思路. 系统地介绍了进化机器人学的研究背景、主要内容和现状, 将其与传统人工智能方法和基于行为的机器人学进行比较, 探讨了该领域研究中有待解决的问题, 并对今后工作进行了展望.

关键词: 进化机器人学; 进化计算; 神经网络; 机器学习; 自适应; 突现; 自组织

中图分类号: TP242.6; TP18

文献标识码: A

Survey on evolutionary robotics

LIU Juan, CAI Zi-xing, TU Chun-ming

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A review is given on the use of evolutionary techniques for the automatic design of adaptive robots, which blazes a new way in the field where traditional centralized planning method can not find effective solutions. This paper outlines the background, fundamentals, approaches and main results of evolutionary robotics(ER). Several open questions and the trend in ER are also discussed.

Key words: evolutionary robotics; evolutionary computation; neural networks; machine learning; self-adaptation; emergence; self-organization

1 引言(Introduction)

自主机器人应该具备在一般环境中完成给定任务的基本技能, 如导航、避障、目标识别、目标操纵等. 在实际应用中往往要求机器人能独立工作, 并适应环境变化. 尽管人们已经在机器人控制、计算机视觉、符号推理、传感器等领域获得了大量的成果, 但是仍有不少问题悬而未决, 还没有出现成功的实用系统^[1-4].

进化机器人学(evolutionary robotics, ER)将进化机制(evolutionism)融入联结机制(connectionism)或符号机制(symbolism)中, 使机器人在与环境的交互中自组织地突现(merge)出理想的控制系统^[5]. 与符号主义和行为主义相比, 进化方法在很大程度上减少了设计者主观因素的影响, 是一种将面向任务的有意识行为和基于传感器的反射式行为有机结合的自主机器人控制系统设计方法.

近年来, 进化机器人学吸引了人工智能、生命科学、认知学、社会学等不同领域的研究人员, 其内容和方法不断丰富充实. 本文对目前国内外进化机器人学的研究现状、有待解决的问题进行了简要综述, 并分析了这一方法与相关学科、理论的区别和联系, 指出其研究意义, 提出了对今后工作的展望, 以供国内该领域研究人员参考.

2 进化机器人学的研究背景和特点(Background and characteristics of ER)

2.1 进化机器人学提出的背景(Background of ER)

机器人在运行过程中与环境交互, 其状态受到环境因素和机器人过去行为的共同影响. 环境的不确定性、噪声干扰、传感和执行机构误差, 使其行为结果难以预测. 随着传感、执行部件的增加, 系统各部分的协调控制工作更加复杂. 设计自主机器人控制器的难度远远超出了人们最初的设想^[4].

传统人工智能方法将机器人控制问题分解为感知、规划、行动三步. 在假设现场不变、环境和机器人模型已知的情况下, 根据指定任务对机器人的行为进行规划^[6,7]. 这些自动规划方法多数基于符号表示和推理, 计算复杂, 在实时问题中不可行. 由于对先验知识的依赖性, 机器人只具有在受限环境中完成特定行为的能力, 自主性和适应性较差. 二十世纪八十年代末, 符号主义受到质疑.

在各种新方法中, Rodney Brooks 倡导的现场人工智能(situated AI)、行为主义和包容结构(subsumption architecture)最具代表性. 他将机器人的控制问题分解为简单行为, 通过各种行为之间、机器人与环境之间的交互作用实现目标, 突现出智能^[8-10]. 这种方法摒弃了抽象的符号表示和推理, 代

* 基金项目: 国家自然科学基金(69974043), 博士点基金(99053317)和湖南省自然科学基金(99JJY20062)资助项目.

收稿日期: 2000-10-08; 收修改稿日期: 2001-07-04.

之以环境直接表示和感知-行为模式,可以适应多变的环境,能够满足实时性要求.但是,这种反射式行为面向短期目标,显示出的智能程度不高.

因此许多学者倾向于采用混合式结构,将有意识的规划与反射式行为的优点相结合^[11-14].结合的方式多种多样,最常用的是分层结构.在这类系统中,各层之间、规划与反射行为之间的协调非常重要.如何有效消除两种方式的缺陷,充分发挥其优势,还有待进一步研究.

与此同时,人工神经网络研究的再度兴起和进化计算的广泛应用促进了机器人学领域新思想、新方法的诞生.1993年,“进化机器人学”这一术语首先由 Cliff, Harvey 和 Husbands 提出^[15].ER 方法通过人工进化的自动设计过程开发机器人及其传感-马达控制系统,这一思想可以追溯到八十年代末.1994 年前后出现了少数 ER 应用实例^[16-18].近年来,简单、小巧、灵活、模块化的新型机器人的出现为进化技术应用于机器人控制器的设计提供了便利的实验条件.进化机器人学尝试着从另一个角度来考虑全局目标和反射行为的结合问题,以提高系统的自主性和适应性.

2.2 进化机器人学的基本思想(Fundamentals of ER)

ER 的基本思想是:保持一个由不同染色体组成的种群,每个染色体是一种控制结构及其参数的编码,初始种群随机产生,然后将染色体所代表的控制器放入环境中接受传感输入,机器人按照控制器规律自主运动,依据目标适应度函数自动评估其完成特定任务的情况,性能越好,产生后代的可能性越大.复制出的新个体在遗传算子的作用下发生变化,形成新种群.经过一定进化代数后,种群的适应度值不断提高,满足性能要求的控制结构和参数也就自然产生了.

可见,ER 的思想主要来源于进化计算.自从 1975 年 Holland 提出遗传算法以来,进化计算在复杂问题寻优方面的能力和优势引起了极大关注,被广泛应用于许多领域^[19].当前进化计算主要包括遗传算法、进化策略和进化规划等,与之相关的技术还有分类器系统(classifier system)^[20]和遗传编程(genetic programming)^[21].在 ER 中,既不是将进化计算用于规划,也不采用样本集来训练控制器,而是让机器人在与环境的交互中尝试着解决问题,并获得由此产生的环境反馈,再根据反馈的适应度值调整解决问题的模型^[22],寻找最适合当前环境和任务的控制器,学习过程与问题求解紧密结合.这正是 Holland 研究遗传算法时的初衷——“设计和实现鲁棒的适应性系统,而不是仅仅用作函数优化”^[23].

在 ER 中,设计者的工作主要是决定进化框架(编码模式、进化算子、算法参数)和评估策略(适应度函数),机器人控制系统的实际设计过程则是自动进行的,设计工作量显著减少.编码模式中融入了设计者的先验知识和设计倾向,评估中所采用的适应度函数在很大程度上决定了系统的行为.这样,系统全局任务和所需的反射式行为,就自然地融合到传感-马达映射中了.由此可见,尽管设计过程不需人工干预,设计者仍然可以对进化过程和结果进行控制.

在传统设计方法中,设计者可以精确地控制机器人的每

一个行为,机器人的能力完全由设计者赋予,虽获得了一定的确定性,却失去了适应性和创造性.而对于用进化方法所设计的机器人,设计者可以确定的是它能够完成任务,至于如何完成,走什么样的路径,就无法精确预测了.然而,我们真正关心的是最终结果,对中间过程(如果不是任务的一部分)并不加以限制.在进化过程中,还可能意外地产生新颖有效的解决方案.

2.3 进化机器人学与相关研究领域的关系(Relationship with correlative research field)

进化机器人学与其他人工智能研究领域,如基于行为的机器人学、机器学习和人工生命等有着密切的联系^[24],但也有其自身特点.它们的研究目标和内容相互渗透,各有侧重.

2.3.1 基于行为的机器人学(Behavior-based robotics)

基于行为的机器人具有一些简单行为,由控制系统的不同模块实现,何时激活哪种行为是由环境和协调机制决定的.与 ER 相同的是,整个设计过程是一个试凑过程,机器人行为与感知直接耦合,不需要中间描述,环境的作用至关重要.需要进一步研究的问题也都包括如何利用全局信息,以及如何从经验中学习新知识,在运行阶段提高系统性能.

两者的不同之处是,在基于行为的方法中,由人来修改行为模块和协调机制,决定如何将期望行为分解为基本行为;在进化方法中,则是一个自组织的过程,在与环境的频繁交互中自适应地产生子模块.

分解全局行为是基于行为的设计方法所面临的难题,在众多与环境动态交互的基本行为中,很难说特定的一系列动作是由哪几种行为共同产生的.在行为的描述上有两种不同视点:远端描述(distal description)和近端描述(proximal description).远端描述从观察者的角度出发,基于高层语言和行为结果;近端描述则从机器人的角度出发,基于传感器输入空间和执行器输出空间的映射关系.行为由控制器与环境相互作用形成,与控制模块之间并不存在一一对应关系.例如:让一个只装有红外传感器的简单机器人完成避障和接近目标物体两种行为.尽管在远端看来,这两种行为差别很大;但对于机器人来说,却要对相似的传感器输出做出截然不同的反应.也就是说,从远端看来可以分解为一系列子行为的目标行为,并不一定能由实现这些子行为的各控制模块综合实现.这种先分解后集成的设计方法的有效性值得怀疑.

进化机器人学的优势在于把系统及其行为当成一个整体来进行设计,以全局行为来评价系统性能,设计者不必考虑如何分解行为,而由进化过程自组织地模块化,产生期望行为.进化出的控制系统不仅具有较强的适应性,而且反应速度很快.与基于反射式行为的机器人相比,进化机器人的行为更具目的性和全局性.

值得注意的是,行为主义的突现与进化机器人学的突现是不同的.行为主义是在系统运行阶段从观察者的角度发现突现的整体行为,控制结构、基本行为本身并无变化^[25].进化机器人则是在自动设计过程中突现出新的控制器结构或参数,更好地实现目标功能,而突现出何种行为、突现结果是

否能保存下来,都受到评估策略的制约.这种突现对控制系统的作用是实质性的、持久的,对于提高控制系统性能意义更为明显.

2.3.2 机器学习(Machine learning)

机器学习是指系统利用不完整的数据,依靠自身能力积累经验、发现规律、获取知识、适应环境的过程^[26].机器学习研究的进展可能使人工智能和知识工程中的瓶颈问题得以突破.因此,近年来该领域出现了新的研究高潮.人工进化就是众多学习方式之一.与其他方法相比,进化所需的监督条件较少,只需大致评价其工作好坏即可,不必给出期望输出,这一点与强化学习类似.另外 ER 不限制自组织过程(即学习适应过程)的对象,不仅控制系统的结构和参数由进化决定,传感器、执行器特性和机器人外形也可以加入进化进程^[27-29],使机器人在软件、硬件上都能更好地适应环境.

2.3.3 人工生命(Artificial life)

人工生命的研究目标是建造具有自然生命系统特征行为的人工系统,理解生命机理,对传统生物科学起互补作用^[30].人工生命采用自底向上的建模策略,将简单对象构成大集合,通过对象之间交互作用中的非线性得到类似生命的全局动力学特性^[31-33],提供了一个研究不同复杂程度的实体组织(分子、细胞、组织、器官、生命体、种群)之间相互作用及其自组织、自适应、自学习过程的框架.而 ER 的研究目的主要有两个:一是开发人工系统的控制方法;二是通过对机器人的研究,更好地理解生物系统.后者与人工生命的目标极为相似.ER 同样采用自底向上的数据驱动策略,强调智能体与环境的交互作用和突现现象.但由于进化对象是物理实体——机器人,不仅仅是仿真系统,所以必须考虑一些物理因素,如摩擦、惯性、噪声、传感器和执行器在精度上的限制等,而且只有实际环境中存在的数据才能用于进化设计,不能随意加入实验者提供的抽象信息.ER 旨在将生命现象所体现的自适应机理应用到人工系统的设计中.

3 进化机器人学的主要研究问题及现状(Main issues and state-of-the-art of ER)

近十年来,ER 引起了许多研究人员的关注,其中以欧洲和日本的研究机构最为活跃,如瑞士的 LAMI/EPFL 实验室、意大利的 GRAL 研究小组、英国 Sussex 大学进化研究中心、日本 SONY 公司等.1993 年以来,一年一次的进化机器人学研讨会(International symposium on evolutionary robotics)促进了该领域研究者之间的交流合作以及 ER 与生物学、神经生理学、人工生命等相关学科研究成果的融合.

目前,ER 应用研究还只限于小规模、较为简单的问题,所采用的机器人也大多是小型的,这样易于建立实验环境,便于能量供应和数据收集.典型的实验包括自主避障^[34]、趋光性研究^[35]、自充电行为^[36]、模拟收集垃圾行为^[37]、视觉目标定位^[38]等.迄今,用进化方法设计控制器的机器人中体积最大的是 Carnegie Mellon 大学的 NAVLAB 自主陆地车^[39].其它类型的研究对象还有小车型移动机器人、机器狗^[40]、六足机器昆虫^[28]等.

ER 研究的问题涉及系统的各个方面,包括控制器结构、编码策略^[41,42]、进化操作^[43]、适应度函数的选取^[36]、个体学习、协进化(co-evolution)^[44]、多足机器人^[40,45,46]、硬件进化^[47]、ER 方法论^[5]等,获得了不少有指导意义和应用前景的研究成果^[48].国内的 ER 研究还处于起步阶段,代表性成果不多,但在其相关领域已有研究基础^[11-14,22,26,30,49-59].

3.1 ER 采用的控制结构和进化方式(Control architecture and evolutionary approaches in ER)

在 ER 中,凡是能够被编码、复制和变异的控制结构都可以进化.遗传算法、进化策略、遗传编程、分类器系统等人工进化方式也都能用于 ER 研究.如:Cliff, Nolfi, Floreano 等用遗传算法选择人工神经网络结构和权值^[15,24,36];Koza 采用遗传编程技术进化 Lisp 或类 Lisp 程序^[60];Nordin 利用遗传编程直接操纵机器码,进化出实时控制程序^[61];Grefenstette 提出用分类器系统来进化控制规则集和策略^[62]等.

与其它控制方式相比,人工神经网络便于编码和进化操作、抗噪声能力强、适合获得与环境数据紧密耦合的行为映射,而且其生物学背景与 ER 的研究目标很契合,可以方便地与各种学习方法结合,有利于适应性行为的产生^[35,48,63].因此神经网络已成为进化机器人研究中最常用的控制方式.

3.2 编码策略和生长过程(Encoding strategy and development)

在人工进化过程中,表现型与基因型之间的映射关系是由编码策略决定的,直接影响进化搜索空间的大小和进化能力.好的编码模式应包含较多的表现型特性、具备紧凑的结构,而且易于在进化算子作用下产生适应度更高的个体^[38].常用的直接编码模式^[36]并不符合这些条件,因此人们提出了一些改进形式,如可变长编码、细胞编码^[64]、空间限定编码^[65]等.这些编码方式更加灵活、紧凑,规则也更复杂,还体现出一种新的趋势——个体生长过程逐渐开始受到重视.

生长(development)是从基因型到表现型的映射过程.在生物学中,这种映射是基因、环境共同作用的渐进过程,相同基因在这一过程中受到外界环境影响可能产生不同个体.而在人工进化中,生长过程通常被忽略了,基因型和表现型之间的映射一步到位,一一对应,基因型的存在似乎只是为了进化操作方便.然而生长是个体适应环境的重要一环.把生长过程纳入人工进化的范畴,有助于提高系统的进化和适应能力.理解人工系统中生长、基因与系统行为的关系,对生物系统中这类问题的研究也有积极作用.

已有的生长过程研究主要集中在生长神经网络^[66,67],但这些编码策略过于复杂,对系统性能的改进并不明显.该方向的研究仍有较大难度.将生长与个体学习融合,是解决问题的思路之一.

3.3 个体学习(Ontogenetic learning)

学习和进化是发生在不同时间和空间的生物适应模式.进化是在种群基础上的选择、复制、替代过程,反映了较长时间内环境的缓慢变化情况,作用对象是基因型;学习则是个体在其生存期间内为适应突变的环境而发生的变化,主要影响表现型.机器人的学习模块不断从环境中获得反馈信息,

对进化方式无法跟踪的快速环境变化进行处理,这对于适应复杂多变的动态环境是非常重要的.在线学习的方式很多,以神经网络系统为例,可以在运行中修改连接权值、在网络结构中加入学习神经元,或在编码策略中,以学习规则替代网络权值.此外,强化学习和分类器也是常用的个体适应方法.ER实验结果已经肯定了学习在帮助和引导人工进化方面的作用^[68],而且在某些情况下,学习能力本身也在进化.实现个体学习与群体进化的结合、分析复合系统中的学习、进化特性是这一方面的研究重点.

3.4 适应度函数的选取(Selection of fitness function)

适应度函数是评估个体性能、决定进化方向的关键因素.与函数优化不同的是,对机器人行为的评估一般是在机器人一个生命周期结束后才进行的,滞后较大,影响因素很多.如果适应度函数选得不合适,就无法得到期望行为.Floreano和Mondada认为,最好的判据可能就是自然界中的通用标准——适者生存^[36].Harvey, Husbands, Cliff则提出复杂行为应由一系列精心设计的适应度产生,系统行为随着判据难度的增加而逐渐复杂.这一过程被称为渐进进化(incremental evolution)^[35].他们在视觉目标定位实验中,成功地将前一步已经收敛的个体作为下一步进化的起点,比随机初始群体更快地找到最优解^[38].从工程应用角度上来说,渐进进化更为实际.

在ER中,如何设计适应度函数还没有可遵循的原则,目前只能采用试凑法,但这可能是一个漫长繁杂的过程.如果不能解决这一问题,ER的各种优点都很难体现出来.

3.5 协进化(Co-evolution)

在自然界中,各种生物都在不同程度上与其它物种有联系,不但要适应物理环境,还必须通过竞争与合作获得生存所需资源,这对生物来说是另一种进化压力.有鉴于此,人们在ER中引入了协进化机制,使两个或更多机器人共同进化、相互适应,如牧羊机器人放牧^[62]、追踪与躲避行为^[27,44,69]等.由于每个个体所面临的环境中包括了同样正在进化的竞争对手个体,环境在不断变化,即使适应度函数不变,适应性任务也会越来越复杂,实际上是在系统中自发产生渐进进化过程.协进化是增强系统进化能力、解决泛化问题和多智能体系统协调问题的可能途径,而且有助于理解生态系统,已成为进化系统研究的热点.尽管有一些比较成功的实例,然而实现这种进化系统并不如想象中的那么简单.实验表明^[44],在进化过程中可能产生循环,致使一些行为依次重复出现,而不是产生新的更好的行为.目前,协进化还缺乏比较通用的设计和分析方法,需要深入研究.

3.6 步行机器人(Walking robot)

由于机械上的复杂性,步行机器人的控制难度比轮式机器人.用基于机器人模型的传统几何方法设计控制器,计算很复杂.ER可以在没有数学模型的情况下,进化出足式机器人低层行走模式,并具有较好的鲁棒性^[28,40,45,46].

在已有的各种仿真和实际机器人步态研究中,一般采用分阶段进化方式.先进化一条腿的控制器,将其复制后,再进化运动协调控制器.这些控制系统很少利用传感信息,几乎

不考虑外界环境的影响,而且进化的步态大多是静态的.如何在线转换步态、控制方向、调节速度,如何处理快速变化的传感信息,对ER来说都是具有挑战性的研究课题.

3.7 硬件进化(Hardware evolution)

可进化硬件是指能用人工进化方式改变硬件结构的系统.这更接近于生物的进化.硬件进化可分为两类:一类是电子线路的进化,另一类是机器人本体的进化.由于目前技术条件的限制,只有前一种进化可以真正实现,即利用可编程逻辑器件(如FPGA)进化出机器人控制器的硬件电路,实现避障^[70]、跟踪目标行为^[71].而机器人本体(包括传感器、马达、机器人外形等)的进化还只能以仿真形式研究^[55],例如改变传感器数量、位置和特性等.有人认为,如果机器人的硬件配置可以改变,人工进化的适应能力就不再受到传统电路设计、程序语言和传感-马达系统的限制,可能突现出更简单的控制系统.这还有待进一步研究证实.

3.8 ER的研究方法问题(Methodology of ER)

ER中的问题求解顺序与传统方法不同,不是先有高层理解,然后编写算法,而是问题的解先突现出来,再分析其必然性.进化得到的结果并不完全基于设计者对问题的理解,具有一定的启发作用^[48].由于系统进化需要大规模种群和一定进化代数来产生期望行为,而各代群体中每个个体都要进行测试评估,如果进化过程都在机器人上完成,通常耗时几天或几个星期.倘若在此期间,机器人需要充电或机械、传感、执行部件发生故障,所花费的时间就更多了.

解决这个问题有两种思路:一种是利用多个机器人并行测试,以硬件的复制来节省时间.不过当机器人对象比较昂贵时,这种方法就不现实了.另一种方法是先在仿真中进化,再将最好的个体下载到机器人上继续进化.这样,在真实机器人上的进化代数就大大减少了,既节省了时间,又能保证最终结果满足要求^[5,18].这种方法还可以避免进化初期机器人可能产生的破坏性行为.

必须注意的是,仿真模型与实际系统之间存在一致性问题(correspondence problem).仿真回避了真实系统中的硬件问题、物理限制,依靠虚拟的传感器提供客观的环境信息.在仿真系统中工作良好的控制策略在噪声环境里很可能不适用^[72].所以ER实验中,下载到机器人上的个体性能会有所下降,有必要在后续的进化中加以调整和改进.但由于仿真运算速度快、易于收集和分析实验数据,因此在现有技术条件下,还是有其存在意义的.要提高仿真结果在真实世界中的适应度,可以从三个方面着手:

- 1) 仔细收集真实条件下的经验数据,建立仿真模型,并通过实际测试校准仿真系统;

- 2) 在仿真传感器的输入数据和执行器的输出中人为加入噪声^[63](但不可太多或有规律,以免进化得到的控制器将噪声信号作为必需的输入);

- 3) 利用Jaccobi提出的最小建模法^[38],在仿真中只对与期望行为突现有关的机器人-环境交互特性正确建模,而其它方面在进化过程中可变,使得进化结果能适应一定特性的

不同环境.

4 总结与展望(Conclusions and prospect)

将进化计算用于控制问题由来已久,多数是进行规划或参数寻优^[50-54].把进化作为机器人控制器的设计方法尚处于概念性研究阶段.进化机器人学以突现为主要技术手段之一,强调适应性行为和自组织过程.虽已取得了一些成果,但缺乏严格的定义和理论基础,在适应度函数选择、编码策略、个体学习、协进化等方面还有许多需要解决的问题.目前 ER 中的应用实例多为移动机器人,较少用于多自由度机械臂的控制器设计.如果进化方法被引入三维空间机器人的设计,可能会发现一些新问题,需要寻求新的分析和设计方法.研究表明,基于生物原型的控制模式和机械结构,尽管很简单,却可以显现出传统方法难以达到的智能程度^[73].ER 研究者虽然并不强调生物学约束的重要性,但很可能在生物学发现中寻找解决问题的线索.

作为一种新颖的设计方法和研究认知科学与生物系统的工具,进化机器人学已成为人工智能领域的一个新兴研究方向,具有重要的理论和现实意义.随着研究的深入和生物、电子、机械制造等学科的发展,进化机器人方法将逐步扩展到环境更复杂、智能水平要求更高的问题中去.

参考文献(References)

- [1] Zhang Bo. Ideal and reality of intelligent robot-theme and strategy discussion about intelligent robot [J]. Robot, 1992, 14(4): 50 - 52 (in Chinese)
- [2] Jiang Xinsong. Intelligence science and intelligent technology [J]. Information and Control, 1994, 23(1): 38 - 39 (in Chinese)
- [3] Tan Dalong. Several issues about intelligent robot research in China [J]. Robot, 1992, 14(4): 47 - 49 (in Chinese)
- [4] Salichs M A, Moreno L. Navigation of mobile robots: open questions [J]. Robotica, 2000, 18(3): 227 - 234
- [5] Nolfi S, Floreano D, Miglino O, et al. How to evolve autonomous robots: Different approaches in evolutionary robotics [A]. Brooks R, Maes P, ed. Proc. of the Artificial Life IV Conference [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1994, 190 - 197
- [6] Fikes R E, Nilsson N. STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem solving [J]. Artificial Intelligence, 1971, 5(2): 189 - 208
- [7] Wilkins D. Practical Planning: Extending the Classical AI Planning Paradigm [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1988
- [8] Brooks R A. A robust layered control system for a mobile robot [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(1): 14 - 23
- [9] Brooks R A. Intelligence without representation [J]. Artificial Intelligence, 1991, 47(1-3): 139 - 159
- [10] Brooks R A. Intelligence without reason [A]. Proc. of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. Sydney, Australia, 1991, 569 - 595
- [11] Zhou Xiang. Research on the theory of evolutionary control for navigation of autonomous mobile robot with development and application of its system platform [D]. Changsha: College of Information Science and Engineering, Central South University, 1999 (in Chinese)
- [12] Cai Zixing, Zhou Xiang, Li Meiyi, et al. Evolutionary control architecture for autonomous mobile robot based on function/behavior integration [J]. Robot, 2000, 22(3): 169 - 175 (in Chinese)
- [13] Cai Zixing, Zhou Xiang, Li Meiyi. A novel intelligent control method-evolutionary control [A]. Mao Jianqin, Cao Xiren, ed. Proc. of the 3rd World Congress on Intelligent Control & Automation [C]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2000, 387 - 390 (in Chinese)
- [14] Cai Zixing, Zhou Xiang, Lei Ming, et al. Evolutionary control: principles and advantages [A]. Proc. of the 3rd Asian Control Conference [C]. Shanghai, 2000, 213 - 215
- [15] Cliff D, Harvey I, Husbands P. Explorations in evolutionary robotics [J]. Adaptive Behavior, 1993, 2(1): 73 - 110
- [16] Harvey I, Husbands P, Cliff D. Seeing the light: Artificial evolution, real vision [A]. Cliff D, Husbands P, Meyer J A, Wilson S, ed. Proc. of the 3rd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1994, 3, 392 - 402
- [17] Floreano D, Mondada F. Automatic creation of an autonomous agent: Genetic evolution of a neural network driven robot [A]. Cliff D, Husbands P, Meyer J A, Wilson S, ed. Proc of the 3rd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1994, 3, 421 - 431
- [18] Miglino O, Lund H, Nolfi S. Evolving mobile robots in simulated and real environments [J]. Artificial Life, 1995, 2(4): 417 - 434
- [19] Yang Zhimin, Wang Xu, Zhuang Xianyi. Survey of genetic algorithm's application in field of automatic control [J]. Information and Control, 2000, 29(4): 331 - 339 (in Chinese)
- [20] Holland J. Adaptation in Natural and Artificial Systems [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975
- [21] Koza J. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection [M]. Cambridge: MIT Press, 1992
- [22] Zhao Kai, Wang Jue. Adaptive computation [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 13(4): 407 - 414 (in Chinese)
- [23] De Jong. Are Genetic Algorithms Function Optimizers [A]. Proc. of the Second Conference on Parallel Problem Solving from Nature [C]. Brussels, North-Holland, 1992, 3 - 13
- [24] Nolfi S. Evolutionary robotics: Exploiting the full power of self-organization [J]. Connection Science, 1998, 10(3,4): 167 - 183
- [25] Jennings N R, Sycara K, Wooldridge M. A roadmap of agent research and development [A]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998: 7 - 38
- [26] Shi Zhongzhi. Advanced Artificial Intelligence [M]. Beijing: Science Press, 1998, 271 - 282 (in Chinese)
- [27] Cliff D T, Miller G F. Co-evolution of pursuit and evasion II: simulation methods and results [A]. Maes P, Mataric M, Meyer J-A, Pollack J, Roitblat H, Wilson S, ed. From Animals to Animates IV: Proc. of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1996, 506 - 515

- [28] Kodjabachian J, Meyer J A. Evolution and development of modular control architectures for 1-D locomotion in six-legged animates [J]. *Connection Science*, 1998, 10(3,4):211 – 237
- [29] Lund H H, Hallam J, Lee W P. Evolving robot morphology [A]. In: *Proc. of IEEE 4th International Conference on Evolutionary Computation* [C]. New York: IEEE Press, 1997, 197 – 202
- [30] Liu Jianqin. *Artificial Life-Theory and Applications* [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1997, 1 – 27 (in Chinese)
- [31] Li Xia, Dai Ruwei. System science and complexity (I)[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(2): 200 – 206 (in Chinese)
- [32] Li Xia, Dai Ruwei. System science and complexity (II)[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(4): 476 – 483 (in Chinese)
- [33] Cristopher G L. Artificial life [A]. *Proc. of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems* [C]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1989, 1 – 48
- [34] Colombetti M, Dorigo M. Behavior analysis and training-a methodology for behavior engineering [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 1996, 26(3): 365 – 380
- [35] Meeden L. An incremental approach to developing intelligent neural network controllers for robots [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 1996, 26(3): 474 – 485
- [36] Floreano D, Mondada F. Evolution of homing navigation in a real mobile robot [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 1996, 26(3): 396 – 407
- [37] Nolfi S. Using emergent modularity to develop control systems for mobile robots [J]. *Adaptive Behavior*, 1997, 5(3,4): 343 – 363
- [38] Jakobi N. *Minimal simulation for evolutionary robotics* [D]. Brighton, UK: University of Sussex, 1998
- [39] Buluja S. Evolution of an artificial neural network based autonomous land vehicle controller [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 1996, 26(3): 450 – 463
- [40] Gomi T, Ide K. Emergence of gait of a legged robot by collaboration through evolution [A]. Simpson P K, ed. *IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'98)* [C]. New York: IEEE Press, 1998, 1, 159 – 164
- [41] Michel O, Bondi J. From the chromosome to the neural network [A]. Pearson D W, Steele N C, Albrecht R F, ed. *Proc. of the International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms* [C]. New York: Springer-Verlag, 1995, 80 – 83
- [42] Grauau F. Cellular encoding for interactive evolutionary robotics [A]. Husbands P, Harvey I, ed. *Proceedings of the Fourth International Conference on Artificial Life* [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1997, 368 – 377
- [43] Mitchell M. *An Introduction to Genetic Algorithms* [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1996
- [44] Floreano D, Nolfi S. Adaptive behavior in competitive co-evolutionary robotics [A]. Husbands P, Harvey I, ed. *Proc. of the 4th European Conference on Artificial Life* [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1997, 378 – 387
- [45] Hornby G S, Fujita M, Takamura S, et al. Autonomous evolution of gaits with the Sony quadruped robot [A]. Banzhaf W, Daida J, Eiben A E, Garzom M H, Honavar V, Jakiela M, Smith R E, ed. *Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference* [C]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1999, 1297 – 1304
- [46] Ijspeert A J, Hallam J, Willshaw D. Evolving swimming controllers for a simulated lamprey with inspiration from neurobiology [J]. *Adaptive Behavior*, 1999, 7(2): 247 – 269
- [47] Thompson A. Evolving electronic robot controllers that exploit hardware resources [A]. Moran F, Moreno A, Merelo J J, Chacon P, ed. *Advances in Artificial Life: Proc. of the Third European Conference on Artificial Life* [C]. Berlin: Springer Verlag, 1995, 640 – 656
- [48] Meeden Lisa A. Trends in evolutionary robotics [A]. Jain L C, Fukuda T, ed. *Soft Computing for Intelligent Robotic Systems* [M]. New York: Physical Verlag, 1998, 215 – 233
- [49] Yan Pingfan. Reinforcement learning-principle, algorithms and applications in intelligent control [J]. *Information and Control*, 1996, 25(1): 28 – 34 (in Chinese)
- [50] Mao Zongyuan, Yao Yinwu, Hu Shangxin. The variable structure neural network [J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(1): 16 – 20 (in Chinese)
- [51] Wang Chaojun, Liu Yanming. An optimization controller in milling compacting genetic algorithm with neural networks [J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(4): 607 – 610 (in Chinese)
- [52] Yang Zhimin, Wang Xu, Zhuang Xianyi. Survey of genetic algorithm's application in field of automatic control [J]. *Information and Control*, 2000, 29(4): 330 – 339 (in Chinese)
- [53] Chen Rong, Xu Yongmao, Lan Hongsen. Research on multi-layer forward network-genetic BP algorithm and architecture optimization strategy [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(1): 43 – 49 (in Chinese)
- [54] Liu Meiqin, Liao Xiaoqin, Chen Jida, et al. Controlling a double inverted pendulum using evolutionary radial basis function neural network [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(4): 593 – 596 (in Chinese)
- [55] Yang Jie, Wu Jianbing, Wu Yuehua, et al. An evolutionary computation approach to group behavior acquisition in autonomous robots [J]. *Robot*, 1999, 21(1): 34 – 39 (in Chinese)
- [56] Xue Hongtao, Ye Yuanyuan, Shen Lingcheng, et al. A roadmap of multi-agent system architecture and coordination research [J]. *Robot*, 2001, 23(1): 85 – 90 (in Chinese)
- [57] Chen Zonghai, Zhan Changhui. Review and prospect of intelligent analogue by perception-behavior mode [J]. *Robot*, 2001, 23(2): 187 – 192 (in Chinese)
- [58] Dong Cong, Guo Xiaohua. The research and advances on some focus questions in computation intelligence [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(5): 691 – 698 (in Chinese)
- [59] Zhang Rubo, Gu Guochang, Liu Zhaode, et al. Reinforcement learning theory, algorithms and its application [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(5): 637 – 642 (in Chinese)
- [60] Koza J, Rice J. Automatic programming of robots using genetic programming [A]. *Proc. of American Association of Artificial Intelligence (AAAI-92)* [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1992, 194 – 201

- [61] Nordin P, Banzhaf W. An on-line method to evolve behavior and to control a miniature robot in real time with genetic programming [J]. *Adaptive Behavior*, 1997, 5(2): 107 – 140
- [62] Grefenstette J J. The evolution of strategies for multi-agent environments [J]. *Adaptive Behavior*, 1992, 1(1): 65 – 89
- [63] Jakobi N, Husbands P, Harvey I. Noise and the reality gap: The use of simulation in evolutionary robotics [A]. Morran F, Moreno A, Merelo J, Chacon P, ed. *Advances in Artificial Life: Proc. of the 3rd European Conference on Artificial Life* [C]. Granada, Spain, 1995, 704 – 720
- [64] Gruau F. Automatic definition of modular neural networks [J]. *Adaptive Behavior*, 1995, 3(2): 151 – 184
- [65] Jakobi N. Evolutionary robotics and the radical envelope of noise hypothesis [J]. *Journal of Adaptive Behavior*, 1998, 6(2): 325 – 368
- [66] Channon A, Dampier R. Perpetuating evolutionary emergence [A]. Pfeifer R, Blumberg B, Meyer J A, Wilson S, eds. *From Animals to Animats 5, Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB98)* [C]. Zurich, Cambridge, MA: MIT Press, 1998, 534 – 539
- [67] Nolfi S, Miglino O, Parisi D. Phenotypic plasticity in evolving neural networks [A]. Nicoud J D, Gaussier P, ed. *Proc. of the Conference From Perception to Action* [C]. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1994, 146 – 157
- [68] Nolfi S, Elman J L and Parisi. Learning and evolution in neural networks [J]. *Adaptive Behavior*, 1994, 3(1): 5 – 28
- [69] Miller G F, Cliff D. Protean behavior in dynamic games: Arguments for the co-evolution of pursuit-evasion tactics [A]. Cliff D, Husbands P, Meyer J A, Pollack J, Wilson S W, ed. *From Animals to Animats 3, Proc. of the Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior* [C]. Cambridge, MA: MIT Press Bradford Books, 1994, 411 – 420
- [70] Thompson A. Artificial Evolution in the Physical World [A]. Gomi T, ed. *Evolutionary Robotics. From Intelligent Robots to Artificial Life* [M]. Ontario, Canada: AAI Books, 1997
- [71] Keymeulen D, Iwata M, Konaka K, et al. Off-line model-free and on-line model based evolution for tracking navigation using evolvable hardware [A]. Husbands P, Meyer J A, ed. *Evolutionary Robotics, First European Workshop* [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998
- [72] Mataric M, Cliff D. Challenges in evolving controllers for physical robots [J]. *Robot and Autonomous Systems*, 1996, 19(1): 67 – 83
- [73] Brooks R A, Stein L A. Building brains for bodies [J]. *Autonomous Robots*, 1994, 1(1): 7 – 25
- [74] Brooks R. Artificial life and real robots [A]. Varela F J, Bourgine P, ed. *Towards a Practice of Autonomous Systems: Proc. of the First European Conference on Artificial Life* [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1992, 3 – 10
- [75] Schults A, Greffenstette J. Using a genetic algorithm to learn behaviors for autonomous vehicles [A]. *Proc. of the American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation and Control Conference* [C]. Hilton Head SC, 1992, 739 – 749
- [76] Cai Zixing, Xu Guangyou. *Artificial Intelligence and Applications* [M]. Second Edition. Beijing: Press of Tsinghua University, 1996 (in Chinese)

本文作者简介

刘 娟 1975 年生. 现为中南大学信息科学与工程学院博士生. 研究方向为智能机器人, 计算智能, 机器视觉. Email: ljic@263.net

蔡自兴 1938 年生. 1962 年毕业于西安交通大学工业电气化与自动化专业. 现为中南大学教授, 博士生导师. 出版著作、教材 18 部, 在国内外发表论文 300 余篇. 目前研究方向为智能控制, 人工智能, 智能机器人等.

涂春鸣 1976 年生. 现为中南大学信息科学与工程学院博士生. 研究方向为智能控制, 电力系统自动化, 柔性交流输电系统.