

发育机器人研究综述

于化龙,朱长明,刘海波,顾国昌,沈 晶

(哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:发育机器人是国际上近年兴起的一个研究热点,但在国内相关研究工作尚未全面起步.较为全面地介绍了发育机器人的基本概念、核心思想和发展历程,重点剖析了几种典型的发育模型和学习方法.针对该领域目前存在的学术争论,如组成结构、研究目的和性能评价等,做了详细的探讨.本文最后从理论研究和应用两方面展望了发育机器人的发展趋势,并指出了需要进一步研究解决的问题.

关键词:发育机器人;外成机器人;发育模型;发育学习

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2007)04-0034-06

A survey on developmental robotics

YU Hua-long, ZHU Chang-ming, LIU Hai-bo, GU Guo-chang, SHEN Jing

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract :Developmental robotics is one of the most popular research interests for many foreign researchers in recent years. However, the related studies haven't been done systematically in China. The paper presented the basic conception, main idea and history of the developmental robotics. Especially several representative developmental models and learning methods were described in detail. Some controversial topics in this field, such as constitution, research purpose, performance estimation and so on, are discussed detailedly. At last, it prospects the developmental trend of the developmental robotics in the future from two aspects: theoretical research and application, and indicates the issues needed to be researched deeply.

Key words :developmental robotics, epigenetic robotics, developmental model, developmental learning

发育机器人,又称外成机器人(epigenetic robotics),是目前机器人研究领域的研究热点之一.1996年J. Weng最早提出了机器人自主心智发育的思想^[1],并且在机器人上进行了一系列卓有成效的实验.2001年,他在Science杂志上详细地阐述了发育机器人的思想框架与可实现的算法模型,从而掀起了发育机器人的研究热潮.自主心智发育是建立在一个类似大脑的自然系统或人工嵌入式系统之上的,这种系统在其内在发育程序的控制下通过使用自己的传感器和执行器与环境(包括自己的内部环境和组件)进行自主实时的交流来发展心智能力^[2].基于这种思想的机器人被称为发育机器人,其主要借鉴发展心理学的思想与研究成果,融合了发

展心理学、人知心理学、机器人学、人工智能、神经生理学、生物学等多个学科领域,目的在于促进相关学科的发展,尤其是机器人学与发展心理学的发展^[3].

发育机器人与传统机器人的不同之处在于:首先,发育机器人是任务独立的,因此,不用针对特定任务进行编程,只需要为机器人预先编制一套发育程序,便可使它通过后天的自主学习来获得各种能力.其次,人类在机器人发育的过程中不再充当程序员的角色,而是作为环境的一部分出现,作为教师或者机器人保姆来影响机器人的学习内容与学习进程.另外,不同于传统的机器人,发育机器人的学习是一个自组织与累积学习的过程,即高级智能的发展依赖于低层基本技能的获得.

目前,发育机器人方面的研究在国外开展的较好,也产生了一系列卓有成效的研究成果.一年一度的外成机器人国际研讨会(International Workshop

收稿日期:2007-01-25.

基金项目:哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目(HEUFT05021, HEUFT05068).

on Epigenetic Robotics) 以及 IEEE 发育与学习国际会议 (IEEE International Conference on Development and Learning) 为这一领域的研究人员提供了成果发布与交流的机会。另外,在 2005 年美国人工智能学会 (AAAI) 的春季讨论会上,也单独以发育机器人为题进行了一次研讨会^[4],由此可见发育机器人正在逐渐成为机器人领域新的研究热点。

相比之下,我国在这一领域的研究开展得较晚。目前,只有复旦大学肢体化智能实验室在做相关的研究,主要在视觉发育方面进行了一定的探索^[5]。另外,复旦大学研制的“复旦一号”发育机器人也填补了中国在这一领域的空白。

由于发育机器人的思想提出的时间不长,因此很多研究还仅仅停留在理论上,并且不是很成熟。在应用领域,只有为数不多的探索,且也主要是为理论研究服务的,如 Pierre 对 Sony 机器狗的改进^[6], Duquette 与 Kozima 等人应用开发的发育玩具机器人来促进患有孤独症儿童的交际能力^[7-8]等等。

1 发育模型

发育机器人模仿的是人脑及人心理发育的过程,需要机器人在实际的环境中自主地学习可用于完成各种任务的知识,并将这些知识有机地组织于记忆系统当中。因此,发育机器人研究者所面临的主要问题有:是否需要对环境建立具体的世界模型;能否对知识进行确定的表示;记忆系统如何组织以使记忆的提取能符合实时性的要求;机器人是否需要像生物一样,具有一些先天的条件反射机制;低层与高层的知识以何种方式进行组织,高层决策如何进行;多个传感器的数据如何进行融合(是否用到注意机制)以及采用何种学习方式等等。根据对以上问题回答的不同,研究者们提出了很多不同的发育模型,其中比较典型的有以下3种:J. Weng 提出的 CCIPCA + HDR 树模型^[9];分层模型^[10]以及 Schema 模型^[11]。下面将详细介绍以上几种模型的特点,并对其各自的优缺点进行比较分析。

1.1 CCIPCA + HDR 树模型

CCIPCA + HDR 树模型^[9]是由 J. Weng 提出的,这种发育模型可以很好地用于机器人的实时发育与自主增量学习。其主要包括2个基本的算法:即增量的主成分分析算法(CCIPCA)与分级回归树算法(HDR),前者的输出作为后者的输入,可以实时对环境改变做出相应的反应。

主成份分析法(principle component analysis, PCA)作为一种特征提取的方法,已经广泛应用于图像识别、聚类分析、数据挖掘等领域。这种算法主

要是对一系列输入的观察向量进行分析,找出最能表达这一向量组的少量正交基,实际上起到的就是对高维数据进行降维的作用,这样既可以保证不缺失原始特征,又可以有效降低运算的复杂度,这对实时性要求较高的发育机器人来说尤为重要。但是一般的 PCA 方法需要对输入数据进行批处理,难以适应增量数据的要求,在这样的情况下,J. Weng 提出了增量的 PCA 方法,即 CCIPCA 方法,它能够对依次输入的样本增量地计算主元,通过迭代的方法可以逐步收敛到待求的特征向量,其收敛性已从数学上得到了证明^[12]。

HDR 算法则是一种针对高维向量空间的识别与匹配算法。它采用了双重聚类的方法,可以自动区分输入样本,并根据其特征进行分类,将输入空间映射到输出空间,起到感知与动作匹配的作用。这种映射或者匹配对机器人而言,就是它们所学习到的知识。由于发育机器人实时在环境中进行增量的学习,因此 HDR 树也是增量地建立的,随着 HDR 树规模的壮大,发育机器人也在不断的成长,具备更为细致的判别与区分的能力(详见文献[9])。

CCIPCA + HDR 树模型如图1所示,首先将传感器接收到的数据在 CCIPCA 算法下进行降维,提取的特征数据随后作为 HDR 算法的输入,或通过计算生成新的叶子结点进行存储,或通过识别产生动作。



图1 CCIPCA + HDR 树模型

Fig. 1 CCIPCA + HDR model

由于以上模型是基于判定树结构实现的,因此算法的时间复杂度为对数复杂度,满足了实时性的要求。同时与传统机器人相比,这一模型还具有较强的鲁棒性,可以适应有少量噪音的环境。该模型已经在密歇根州立大学的 SAIL 机器人平台上进行了导航、避碰、物体识别与语音识别等一系列实验,取得了较好的效果。但是这一模型缺乏高层决策与任务判别的能力,很难完成较为复杂的任务。

另外,随着学习复杂程度的提高,存储量与计算量会大大增加,这对机器人的实时性与进一步发育都会是一个不小的挑战。鉴于以上原因,K. C. Tan 等人在这—模型的基础上提出了面向任务发育学习(TODL)的模型^[13],该模型针对任务进行学习,可以使机器人同时具备处理多个任务的能力,性能大大提高。

1.2 分层模型

分层的发育模型在发育机器人中采用得也比较普遍,这种模型模仿了人类大脑皮层的工作机理,同时与 Brooks 的包容结构也非常相似.它将知识由低到高,由简单到复杂地组织在一个分层的结构当中,高层的知识建立于低层的知识之上.一些简单的底层控制由较低的层次来完成,这正如人类对熟悉的刺激所建立的条件反射一样,而对复杂烦琐的任务则要由高层的决策来实现.

Blank 等提出了一种基于提取与预测机制的分层发育模型^[10],其中提取机制由自组织映射网络(SOM)来实现,而预测机制则采用简单的回归网络(SRN).模型如图2所示,其中图2(a)表示的是一个单层结构,从图中可以看出首先要对输入信号提取主要特征,随后根据这些主要特征来进行决策,而预测机制会根据上一步的决策对接下来的输入信号进行预测,预测准确率的高低代表了机器人对环境与任务的熟悉程度.图2(b)将(a)中独立的结构组织在了一个分层的模型当中,上层的提取模块会以下层模块提取的特征作为输入,每一层都能产生输出信号,这些信号被整合在一个包容结构当中,高层的决策优于低层的输出.这种模型既可以保证机器人对实时性的要求,又可以根据机器人的经历动态地改变其知识结构,体现了行为主义思想与发育思想的融合.

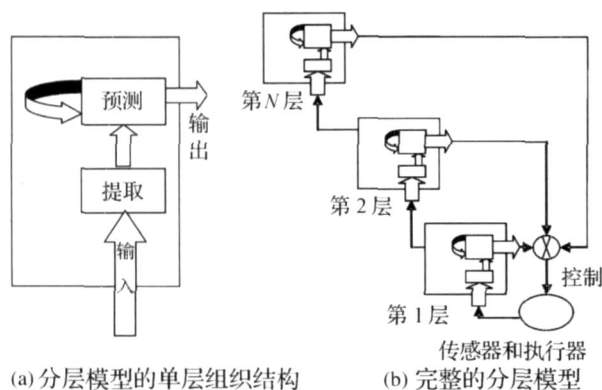


图2 基于提取与预测机制的分层模型

Fig.2 Hierarchical model based on abstraction and anticipation

分层模型具有良好的自适应性,从功能与结构上较好地模拟了人类的认知发育过程.这种模型存在的主要不足是结构复杂,高层决策的运算量过大,缺少对特定目标与任务的规划能力等等. Driancourt 提出了一种基于分层结构的感知识别与分类算法^[14],Kozma 等人采用分层模型实现了动态记忆以及传感器数据分类等功能^[15].

1.3 Schema 模型

Schema 模型是由 Stojanov 提出的一种发育模型^[11],其思想主要来源于 20 世纪最伟大的发展心理学家 Piaget 的发生认识理论.发生认识论将人的认知发育划分为以下 3 个阶段^[16]:1)通过遗传,具备先天的认知反应模式序列;2)通过学习,可以修改原有的模式序列,并生成新的可以更好适应环境的模式序列;3)使自身逐渐适应这些新模式.下面简要地介绍一下这种模型的结构与算法.

在 Schema 模型中,首先要定义机器人的基本动作集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 与基本感知集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_j\}$,其中 a_i 代表机器人所能采取的基本动作,而 p_i 则代表机器人拥有的感知能力.随后要定义 schema, schema 实质上代表 Agent 有能力执行的一个基本的动作序列,如可以表示为 $s = a_1 a_2 a_3 a_2 a_7 a_3$,它根据长度与动作种类的不同而有所区别.初始阶段,会自动生成基本的 schema,在学习的过程当中,机器人试图执行这些基本的 schema,但由于感知到环境的不同,相应的 schema 会进化为一个新的动作序列以适应环境与任务的需要.如机器人的基本动作集为 $A = \{f, b, l, r\}$,其中 f, b, l, r 分别代表向前运动、向后运动、左转与右转,假设一个初始的 schema = fffllffr,那么当机器人在走廊中向前行进时,这一 schema 会退化为 fffff 以适应环境的要求.

Schema 模型将改进的动作序列与相对应的感知序列相结合,并存储于如下形式的连接当中:Link ($A_1 P_1, A_2 P_2, D$),其中 $A_i P_i$ 代表与感知序列相对应的动作序列,而 $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 则代表了与各种目标的距离.在执行的阶段,机器人会根据其对环境的感知自主选择左侧的 $A P$ 对,然后通过计算与目标的距离,选出最小的 d_i ,并选取与之相匹配的右侧的 $A P$ 对执行.其存储结构如图3所示.

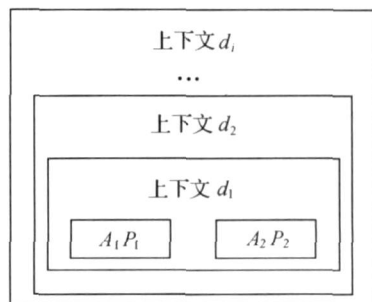


图3 基本的 Schema 模型

Fig.3 Elementary schema model

Schema 模型已经在 Petitage 机器人上进行了导航方面的实验,取得了较好的效果.这个模型的特

点是很好地模仿了人类认知的发育过程,具有较强的鲁棒性与自适应性,但是当感知的状态过多时,会极大地增加计算的时间复杂度,并影响到算法收敛的速度.文献[17]提出了一种基于 Schema 的感知系统模型(PSS),可用于感知信号的分类、预测与提取.一种双 Schema 模型在文献[18]中被提出,其具有较强的环境适应能力,同时通过这种模型可以更好地了解机器人的学习进程.

除了以上3种典型的模型之外,还有一些其他的发育模型,如多模块模型^[19]、基于神经网络的发育模型^[20]、基于行为的知识模型^[21]等等.各个模型都有其各自的优势与缺陷,不同的发育模型,适用于不同的环境与任务.到目前为止还没有出现一种可以像人一样能够很好地完成各种基本任务的通用的发育结构,这也是本研究领域未来研究的重要课题之一.

2 发育学习方法

需要考虑的另一个问题是:发育与学习有怎样的联系与区别.神经生理学家认为发育是一种神经的活动行为,学习只是导致了神经活动的改变.而 J. Weng 则从发展心理学的角度阐述了发育的概念,他认为发育是通过感受器与执行器在实时的环境中学习多种任务的过程^[2].相比之下,Nagai 等对发育的定义更为宽泛,他们将人工神经网络训练过程中权值的改变也视为发育^[22].总的说来,发育的过程就是通过学习来增加功能或改善系统性能的过程,学习只是手段,而发育才是目的.现有的发育学习方法主要有监督学习(supervised learning)、强化学习(reinforcement learning)和沟通学习(commun-icative learning),另外还有可逆学习(reversibility learning)和涌现学习(ongoing emergence learning)等.这几种方法应用最多的是强化学习和沟通学习.

2.1 监督学习

监督学习(也称有教师学习)是指有明确结果的一种学习方法.由于在机器人发育的初期没有确定的评价标准或缺乏先验知识,所以监督学习是一种必要的手段.另外,监督学习的学习速度快也是其一大优势,在使用其他学习方法的同时,监督学习可以起到很好的辅助作用.例如在 SAIL 系统中就用到了监督学习和强化学习相结合的办法.但是也应该注意到监督学习缺乏自主性这一缺点,使用这种方法可能会限制机器人的继续发育,文献[23]提出了一种自监督的学习方法,这种方法是监督学习和完全非监督学习的一种折中,其在贝叶斯条件下得到了应用.

2.2 强化学习

强化学习(reinforcement learning, RL)通过试错(trial-and-error)与环境交互获得策略的改进,其自学习和在线学习的特点使之成为发育算法的一个重要分支.强化学习在发育算法中的应用主要体现在文[24-28],其中文[24-25]主要强调了内部的强化信号.虽然强化学习在发育算法中得到了广泛应用但其本身所带来的“维数灾”(curse of dimensionality)问题和收敛慢等问题至今仍困扰着进一步的研究.

2.3 沟通学习

发育机器人的一个主要特点就是后天习得,即通过与环境的交互来不断发展,从而使沟通学习成为一种必不可少的学习方法.为了能和环境尤其是人进行沟通和交流,机器人必须具有一些基本的技能如共同注意(joint attention)、模仿和同步等.有鉴于此,某些学者开始致力于这些基本技能的研究,为机器人以后的进一步发育打下基础.文献[29]就研究并初步实现了共同注意,文献[30]对模仿学习进行了初步的探讨.在沟通学习中还有一个不可避免的问题就是同步,如果交流双方不能同步则交流起来会很困难,文献[31]主要研究了交流同步的问题.对沟通学习的研究才刚刚起步,很多技能需要完善,如语音识别、图像识别等问题.

2.4 其他学习方法

前面已提到,强化学习通过试错与环境交互来获得策略的改进.然而强化学习的一个致命的缺点就是可能使机器人处于险境,因为它是通过试错来取得策略改进的.为了使机器人避免陷入险境,文献[32]提出了一种新的学习策略即可逆学习.这种策略主要通过压制那些不可逆的动作来实现可逆的行为,即可以使机器人回到前一个安全的状态.这一策略为发育机器人的安全问题提供了一个新的方法.但其缺点与强化学习是等同的,即收敛速度慢.

另外一种学习方法为涌现学习,这种方法主要通过已在学知识的基础上对知识进行类比和归纳,即使机器人具有对知识举一反三的能力.文献[33]就是基于这种思想来研究发育算法的.这种学习方法的优点在于能实现快速学习,但会产生大量的冗余信息,从而增加了发育算法的时空复杂度.

3 争论与展望

目前,发育机器人的研究才刚刚起步,因此在这一领域不可避免地存在着很多的争论.从发育机器人的组成结构,研究目的到性能评价等多个方面,研究者们都存在着不同的看法.

首先,发育机器人是否需要理解时空的概念,如果需要,时间的概念又来自何处呢?目前常用的方法是利用上下文结构来表达时间的次序,但问题是机器人本身并不能理解时间的含义^[15]。另外,应该采取一个什么样的标准来评价发育机器人的性能呢?是根据知识表示的复杂性、真实性、心理学模仿的相似性,还是机器人在完成任务时所体现出的能力?Marshall认为表示的复杂性并不能体现出发育机器人性能的优劣,应像图灵测试那样来测试行为的复杂性^[24]。不同领域的研究者研究发育机器人的目的与评价其性能的标准各不相同,如在工程领域,希望开发的模型可用来完成更多的任务,而在生命科学领域,则更关心模型对心理学发展的促进作用有多大。

众所周知,影响人类个体发展的主要因素除了智力以外,还有情感。而人工情感也是目前人工智能研究的热点之一,能否将机器人心智发育的思想应用到机器人情感的发育方面将是未来研究的一个重要课题。另外,社会交流也是发育机器人必备的能力之一,这就提醒人们:能否用多个具备发育能力的Agent组成多Agent系统,通过交流学习来实现多Agent系统的协作与协调。除此之外,目前在实现发育算法时使用的各种学习方法都不是很有效,是否可以借鉴新的学习方法或有效地综合已有的学习方法在未来还是值得深入研究的。

在应用领域,可以预见到,最早的基于发育思想的产品将会是玩具机器人,它们与Sony的机器狗将非常相似,但功能却要强大得多。大型的发育机器人在经过严格的培训之后,既可以进入医院去照顾病人,又可以进入家庭打扫卫生,还可以代替人类去做那些危险或者枯燥的工作。另外,“发育软件人”也许是一个不错的设想,通过在互联网上进行增量的学习,它可以逐渐完善自身的功能,并为网络用户提供各种实时的服务。近年来发育机器人研究领域正呈现出如下一些新的特点^[34]:1)更多新的学者加入到这一领域;2)研究者中心理学家、神经生理学家以及生物学专家所占比例不断升高;3)研究方向趋于多样化;4)研究人员所处地理位置的分布更为广泛。

可以看出,发育机器人正吸引着越来越多的研究者的目光。其未来的发展不仅需要机器人专家的努力,而且需要神经生理学家与心理学家的协作,新的心智发育计算原则的出现将成为发育机器人发展的推动力,发育机器人的发展同时也为人类认识自己提供了基础。

参考文献:

[1] WENG J. Learning in image analysis and beyond: devel-

opment [A]. Visual Communication and Image Processing[C]. New York, 1998.

[2] WENG J, MCCLELLAND J, PENTLAND A, et al. Autonomous mental development by robots and animals [J]. Science, 2001, 291: 599 - 600.

[3] ZLATEV J, BAL KENIUS C. Introduction: why “epigenetic robotics”? [A]. Proceedings of the First International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Lund, 2001.

[4] DANGAUTHIER P. Developmental robotics [A]. Proceedings of the AAAI Spring Symposium Workshop on Developmental Robotics [C]. Stanford, California, 2005.

[5] 高颖, 陈东岳, 张立明. 一种带有实时视觉特征学习的自主发育机器人探索 [J]. 复旦大学学报(自然科学版), 2005, 44(6): 964 - 970.

GAO Ying, CHEN Dong yue, ZHANG Li ming. An exploration of autonomous developing robot with real time vision learning [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2005, 44(6): 964 - 970.

[6] OUDEYER P Y, KAPLAN F, Hafner V. The playground experiment: task-independent development of a curious robot [A]. Proceedings of the AAAI Spring Symposium Workshop on Developmental Robotics [C]. Stanford, California, 2005.

[7] KOZIMA H, NAKAGAWA C, YASUDA Y. Wowing together: what facilitates social interactions in children with autistic spectrum disorders [A]. Proceedings of the sixth International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Paris, 2006.

[8] DUQUETTE A, MERCIER H, MICHAUD F. Investigating the use of a mobile robotic toy as an imitation Agent for children with autism [A]. Proceedings of the sixth International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Paris, 2006.

[9] WENG J. Developmental robotics: theory and experiments [J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2004, 1(2): 199 - 236.

[10] BLANK D, KUMAR D, MEEDEN L, et al. Bringing up robot: fundamental mechanisms for creating a self-motivated, self-organizing architecture [J]. Cybernetics and Systems, 2005, 36(2): 125 - 150.

[11] STOJANOV G. Petitag é a case study in developmental robotics [A]. Proceedings of the First International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Lund, 2001.

[12] WENG J, ZHANG Y, HWANG W S. Candid covariance-free incremental principal component analysis [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8): 1034 - 1040.

[13] TAN K C, CHEN Y J, TAN K K, et al. Task-oriented developmental learning for humanoid robots [J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2005, 52(3): 906 - 914.

[14] DRIANCOURT R. Learning perceptual organization

- with a developmental robot[A]. Proceedings of the 2004 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop[C]. Washington, DC, 2004.
- [15] KOZMA R, FREEMAN WJ. Encoding and recall of noisy data as chaotic spatio-temporal memory patterns in the style of the brains[A]. Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks[C]. Como, Italy, 2000.
- [16] PIA GETJ. The principles of genetic epistemology[M]. New York: Basic Books, 1972.
- [17] PEZZULO G, CALVI G. Toward a perceptual symbol system [A]. Proceedings of the Sixth International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Paris, 2006.
- [18] TANIGUCHI T, SAWARAGI T. Incremental acquisition of compositional schemata based on behavioral learning [A]. Proceedings of the Sixth International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Paris, 2006.
- [19] PAQUIER W, HUUN D, CHATILA R. A unified model for developmental Robotics [A]. Proceedings of the 3rd International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Boston, 2003.
- [20] OGATA T, HATTORI Y, KOZIMA H, et al. Generation of robot motions from environmental sounds using inter-modality mapping by RNNPB [A]. Proceedings of the Sixth International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Paris, 2006.
- [21] GERSHENSON C. Behaviour-based knowledge systems: an epigenetic path from behaviour to knowledge [A]. Proceedings of the 2nd Workshop on Epigenetic Robotics[C]. Edinburgh, 2002.
- [22] NAGAI Y, ASADA M, HOSODA K. A developmental approach accelerates learning of joint attention[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Development and Learning[C]. Cambridge, Massachusetts, 2002.
- [23] DANGAUTHIER P, BESSIERE P, SPALANZANI A. Auto-supervised learning in the Bayesian programming framework[A]. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]. Barcelona (ES), 2005.
- [24] MARSHALL J, BLANK D, MEEDEN L. An emergent framework for self-motivation in developmental robotics[A]. Proceedings of the Third International Conference on Development and Learning (ICDL 2004) [C]. La Jolla, California 2004.
- [25] STOUT A, KONIDARIS G, BARTO A. Intrinsically motivated reinforcement learning: a promising framework for developmental robot learning [A]. Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Developmental Robotics[C]. Stanford, CA, 2005.
- [26] MAHADEVAN S. Proto-value functions: developmental reinforcement learning[A]. Proceedings of the International Conference on Machine Learning [C]. Bonn, Germany, 2005.
- [27] UCHIBE E, DOYA K. Reinforcement learning with multiple heterogeneous modules: a framework for developmental robot learning[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Development and Learning [C]. Kobe, Japan, 2005.
- [28] BARTO A. Intrinsic motivation, cumulative learning, and computational reinforcement learning [A]. Proceedings of the Sixth International Workshop on Epigenetic [C]. Paris, 2006.
- [29] NAGAI Y. Understanding the development of joint attention from a viewpoint of cognitive developmental robotics[D]. Osaka University, 2004.
- [30] BLANCHARD A, AMERO L. Developing affect-modulated behaviors: stability, exploration, exploitation, or imitation? [A]. Proceedings of the Sixth International Workshop on Epigenetic[C]. Paris, 2006.
- [31] ANDRY P, REVEL A. Modeling synchrony for perception-action systems coupling[A]. Proceedings of the Sixth International Workshop on Epigenetic[C]. Paris, 2006.
- [32] KRUUSMAA M. Obstacle avoidance as a consequence of suppressing irreversible actions [A]. Proceedings of the Sixth International Workshop on Epigenetic [C]. Paris, 2006.
- [33] PRINCE C G, HELDER N A, HOLLIICH GJ. Ongoing emergence: a core concept in epigenetic robotics[A]. Proceedings of the fifth International Workshop on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems[C]. Nara, Japan, 2005.
- [34] KAPLAN F, OUDEYER P Y. Trends in epigenetic robotics: atlas[A]. Proceedings of the sixth International Workshop on Epigenetic Robotics [C]. Paris, 2006.

作者简介:



于化龙,男,1982年生,博士研究生,主要研究方向为智能机器人,发表学术论文1篇。

E-mail: yuhualong@hrbeu.edu.cn.



朱长明,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为智能机器人,发表学术论文1篇。



刘海波,男,1976年生,博士,副教授,IEEE 计算机学会专业会员,中国计算机学会会员,黑龙江省计算机学会智能人机交互专委会委员,主要研究方向为智能机器人体系结构,发表学术论文50余篇,出版编著3部,译著2部。