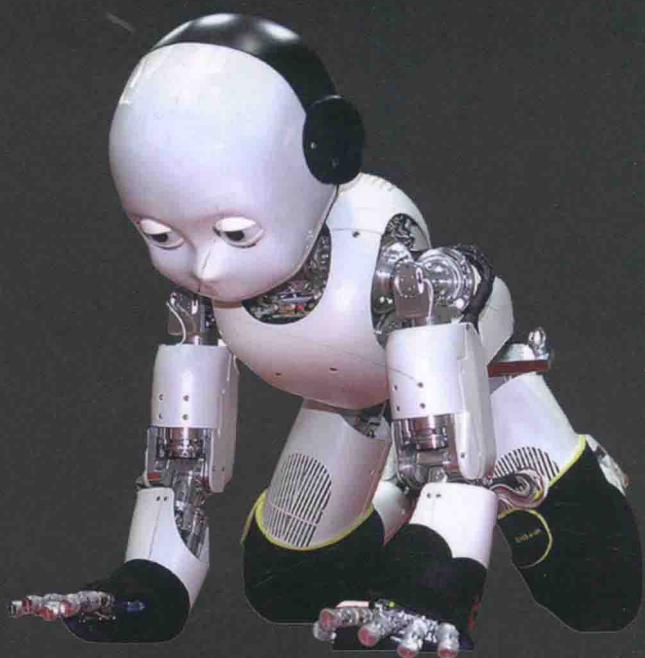




[意] 安吉洛·坎杰洛西 (Angelo Cangelosi) 著
[美] 马修·施莱辛格 (Matthew Schlesinger)

晁飞 译

发展型机器人

由人类婴儿启发的机器人

Developmental Robotics

From Babies to Robots



机械工业出版社
China Machine Press

机器人学译丛

[意] 安吉洛·坎杰洛西 (Angelo Cangelosi) 著
[美] 马修·施莱辛格 (Matthew Schlesinger)

晁飞 译

发展型机器人

由人类婴儿启发的机器人

Developmental
Robotics

From Babies to Robots



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

发展型机器人：由人类婴儿启发的机器人 / (意) 安吉洛·坎杰洛西 (Angelo Cangelosi) 等著；晁飞译. —北京：机械工业出版社，2016.12

(机器人学译丛)

书名原文：Developmental Robotics: From Babies to Robots

ISBN 978-7-111-55751-7

I. 发… II. ①安… ②晁… III. 机器人—研究 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 002142 号

本书版权登记号：图字：01-2016-2402

Angelo Cangelosi and Matthew Schlesinger: Developmental Robotics: From Babies to Robots (ISBN 978-0-262-02801-1).

Original English language edition copyright © 2015 by Massachusetts Institute of Technology.

Simplified Chinese Translation Copyright © 2017 by China Machine Press.

Simplified Chinese translation rights arranged with MIT Press through Bardon-Chinese Media Agency.

No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system, without permission, in writing, from the publisher.

All rights reserved.

本书中文简体字版由 MIT Press 通过 Bardon-Chinese Media Agency 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内独家出版发行。未经出版者书面许可，不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书跨越心理学、机器人学、计算机科学和神经医学等众多领域，全面且系统地论述了发展型机器人学的理论基础和研究动态。全书共 9 章，首先介绍基本原则和主要实验平台，随后结合儿童发展心理学理论，通过实验详细探讨了内在动机、运动技能和早期语言等机器人行为及认知功能的建模和实现，最后展望了未来的研究方向。

本书旨在为跨学科的发展型机器人研究者提供帮助，也可作为高等院校机器人相关研究方向的教学用书。

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）

责任编辑：曲 熠 李 艺

责任校对：董纪丽

印 刷：北京瑞德印刷有限公司

版 次：2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

开 本：185mm×260mm 1/16

印 张：17.25

书 号：ISBN 978-7-111-55751-7

定 价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88378991 88361066

投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问：北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

2005 年攻读博士学位伊始，我的导师 Mark Lee 教授给我定的研究题目是 developmental robotics。那时我确实是一头雾水，面对这么大的题目不知如何开始。随着阅读与学习的深入，我逐渐理解了这项研究的内涵与意义，我的研究领域自此与发展型机器人密不可分。

本书前言中的第一句话，即阿兰·图灵在《计算机器与智能》一文中提到的：“与它尝试建立模拟成人心智的计算机程序，为什么不尝试建立模拟儿童心智的程序呢？只要儿童心智程序获得合适的教育，那么它应该有可能成长为成人的大脑。”这是我的导师 Mark Lee 教授最喜欢引用的话。在与发展型机器人打交道的这十年，我深深认同这句话，如果机器人能从婴儿发展到成人，必将为提高类人机器人的智能开拓一条最有前途的道路。

关于 developmental robotics 这个术语，一些国内同行将其翻译成发育型机器人或者发育机器人。最初我也倾向于采用这个名称，但是又想到 developmental robotics 与 developmental psychology 和 developmental neuroscience 有着密切联系，而后两者在国内普遍译为发展心理学和发展神经科学。之后，我接受了厦门大学周昌乐教授的意见，将 developmental robotics 翻译成发展型机器人。

本书的英文行文相对晦涩，在翻译一些专用名词时，我参考了同行专家的翻译，但最终也没有得到比较满意的结果。如 motor babbling，从字面意思来看，babbling 意为婴儿牙牙学语或者咿呀声，是婴儿通过不断的发声练习来学会模仿大人的声音。而 motor babbling 指的是婴儿通过自发的、随机的重复动作来掌握运动技能。比如，婴儿在出生后不久，可以通过手臂的自发性随机挥舞动作用来掌握对手臂的控制。因此，motor babbling 翻译成“运动咿呀”就不妥当了。在运动层面，我想到儿童在一开始学习走路的时候是通过蹒跚的步伐来学习的，因此，最后决定把它翻译成“运动蹒跚”。

在本书中还分别用到了 android 和 humanoid 这两个词。两个词都可以指形状跟人类相似的机器人，并且从当前的研究背景来看，humanoid 所指的范围要更广泛一些，一般只要一个机器人有机械臂和视觉系统就可以称为 humanoid 机器人。但是 android 这个词则多指那些跟人极其相似的机器人，如 Geminoid 机器人。因此，我将 android 翻译成“人形机器人”，将 humanoid 翻译成“类人形机器人”或“类人机器人”。同时，本书还介绍了大量发展心理学的知识来拓展读者的知识面。关于发展心理学的术语，我主要参考了北京师范大学邹泓老师翻译的《发展心理学：儿童与青少年》（第 8 版）中的术语。

本书的作者有两位，在翻译过程中我能明显感到他们截然不同的行文风格，一位作者用很清晰的短句来阐述需要介绍的内容，而另一位作者则喜欢用较长的定语从句进行撰写。为了保证全书风格的统一和易读性，我尽量把冗长的定语从句改成短句子。有些译文读起来可能有些啰嗦，但是其中的逻辑关系会更清晰，也更容易理解。

感谢我的研究生，没有他们的帮助，我无法如此顺利地将译稿呈现给大家。本书译稿的第2章由王证帅协助翻译，第3章和第7章的部分内容由朱祖元协助翻译，第4章和第8章的部分内容由吴秋霞协助翻译，第3章的部分图表和第5章由黄雨轩协助翻译，第6章和第8章的部分图表由张欣协助翻译。由于我的翻译水平有限，书中难免存在错误和不准确的地方，希望专家和读者进一步批评指正。

科学的主要方法是分析与简化。这一思想是1628年由笛卡儿明确指出的：在研究任意现象的时候，把它简化成最重要的组成部分，并对所有部分进行剖析。这种方法是由“复杂系统在尽可能低的水平上才能被更好地理解”这一信念启发的。实体越小，需要的解释就越少，因此我们希望能找到足够简单的实体来进行充分的分析与解释。不可否认，这种方法在现代科学中取得了巨大成功。然而，这种方法并没有告诉我们简单元素构成的系统应当如何进行复杂的操作才能实现具有自主性的智能体。构建可以在复杂多变的环境中行动和适应变化的人工智能体需要一种不一样的科学——一种以综合与复杂化而不是以分析与简化为主的科学。理解生物系统发展过程的理论任务也需要一种综合科学。

发展型机器人学的前提是，发展过程的原则是自适应工程和流体智能实现的关键。尽管这个前提尚未完全实现，但是在过去的十几年中已经取得了显著的进展。本书展现了发展型机器人的最新研究动态，同时，作者为发展型机器人学家与发展心理学家之间更深入的合作贡献了一个很好的范例。目前两个领域之间的关系还是比较弱的，虽然学者们正在研究相关问题、阅读类似的文献，有时也参加联合会议，但是很少以持续的方式进行真正的合作。我坚信：通过对人类发展与机器人学的纲领性研究，这两个领域都能够取得显著的成果。对于发展心理学，我能做出的承诺是：通过使用发展的人工智能系统来实现生物途径和经验的可操纵化，一定有更好的理论和新的方法来对发展心理学理论进行测试。因此，在这篇序言里，我强调了通过发展型机器人或许能更好地理解人类发展过程的七个基本方面。

1. 扩展的不成熟性。发展（如进化和文化）是一个通过积累变化来创造复杂性的过程。在任何时候，发展的智能体都是所有以往发展的产物，而任何新的变化都是以以往发展为首端并在此基础上进一步发展的。拥有灵活智能的生物系统都有比较长的不成熟期。为什么会是这样？“缓慢积累”的智能如何产生更高和更抽象的认知形式？回答这些问题的一种可能性是：一个缓慢积累的系统（不能很快稳定）可以获得在多个粒度上生成多层次知识的大量经验。另一种相关的可能性是：什么样的情况被发展心理学家称为“就绪”，以及何种最新的机器人研究被称为“学习进程”^[1]？随着学习的推进，新的学习结构和新的学习方式会涌现出来，这就使得同样的经验对学习系统的影响在发展的后期与前期是不同的。如果这些观点是正确的，那么发展途径自身或许能部分解释为什么人类智能会具有它自身的那些属性。因此，这种发展途径或许不能很方便地实现快速发展（尝试建立模拟成人的智能系统），也不能很方便地实现具有生物发展系统特征的流体智能和自适应智能。

2. 活动。学习经验不是被动地在婴儿身上“产生”的。Piaget^[2]描述了一种具有高度展示性的婴儿活动模式。他在一个四个月大的婴儿手上放置了一个拨浪鼓。一旦婴儿摇动拨浪鼓，它就会出现在婴儿眼前并且制造噪声，这不但惊动了婴儿还引起了更多的身体动作，从而导致拨浪鼓移进又移出婴儿的视线并产生更多的噪声。婴儿对拨浪鼓并没有任何先验知识，但是通过这些动作，婴儿可以发现晃动拨浪鼓所能引出的效果和目标。也就是说，当婴儿意外地移动了拨浪鼓并看到和听到之后的结果后，利用所捕获的这些活动（移动和摇晃，寻找和聆听）和这些活动的增量式反复动作，就能变得有目的地控制拨浪鼓的摇晃和噪声产生的目标。行动与探索创造了学习的机会和需要被征服的新任务。本书很好地阐释了行动的作用，并且，这也是发展型机器人可以清晰地展示其与发展心理学理论紧密相关的研究领域。

3. 重叠任务。发展中的生物体不仅要解决单一任务，还要解决许多重叠任务。再来回顾一下拨浪鼓这个例子。婴儿摇晃拨浪鼓的动作将建立和改变大脑的专门区域，并对这些区域之间连接的听觉、运动和视觉系统进行耦合^[4]。但是，这些相同的系统和功能连接可以用于许多其他行为，并且这些在摇晃拨浪鼓时所取得的能力可以得到拓展，进而影响方法-目的推理或多模式同步处理。发展理论迫切地需要一种方法来探索多模式与多任务的经验如何创建一个抽象的、通用的和创造性的智能。也正是在这一领域中，发展型机器人将会做出巨大的贡献。

4. 简并。简并在计算神经科学^[3]中是专门针对复杂系统的。在这些系统中，单个组件能对多种功能产生贡献，并且有多种途径来实现同一种功能。在发展成果中，人们认为简并可以提高鲁棒性。由于功能冗余的途径可以彼此互补，所以这些冗余相当于为途径故障提供了一种保险。机器人模型可以利用这些原则来构建强大的系统，即便某些组件发生了故障，这些系统仍然可以长期地在多个任务中成功工作。这类机器人模型还提供了一种严苛的方式来测试多因果关系的影响和有可能会限制发展结果的动机复杂系统。

5. 级联。发展理论家将这种方式称为早期发展对后期发展的深远影响，也称为“发展级联”。这些往往体现在非典型发展的扰动模式的级联，也将典型发展和这种看似不同的智能领域描述成某一类发展过程，类似于从蹲坐动作与视觉对象表征方法发展到行走动作与语言输入这样的发展过程^[4]。这是更深层次的理论问题：这些级联的因素（早期的发展为后期截然不同的发展开拓了发展途径）是否跟人类智能如何以及为何拥有这些已具有的属性有关联？发展型机器人不仅要使用这类问题来推进机器人的工程化，也提供了一个平台来理解人类认知发展的综合特性和复杂途径为何对人类智能如此重要。

6. 有序的任务。生物发展系统通常需要面对一个特定序列中的多种经验和任务，并且，大量关于变化的级联发展结果的理论与实验研究文献关注的是动物中感知运动发展的自然顺序^[5]。人类婴儿在生命的头两年中要经历一系列环境的系统化改变，比如，婴儿要逐步经历翻滚、接近动作、稳定的坐姿、爬行和行走。在生命头两年中运动能力的变化提

供了强大的和更有可能是进化选择的经验大门。无论是在人类发展中还是在发展型机器人的系统发展中，有序经验的后果和重要性以及该有序经验中扰动的意义都没有得到明确的理论定义。因此，这个方向是一个重要的前沿研究领域。

7. 个人主义。即发展中的个体。物种的历史存在于固有生物个体中以及包含同种个体的环境中，这些同种个体构建了发展的支架，但是每个发展的个体都要遵循自己的发展途径。因为发展途径是简并的，发展建立在自身之上，内在生物和环境本质上是独特的，所以不同的发展个体可能通过不同的发展途径来生成类似的实用技能。这是一个了解人类智能的鲁棒性和变异性的的重要理论思想，或许也是用来建立在任何环境中都足够智能的多功能自适应机器人的基本思想。

本书是通往发展科学美好未来的最佳跳板。

Linda B. Smith

参考资料

- [1] Gottlieb, J., P. Y. Oudeyer, M. Lopes, and A. Baranes, "Information-Seeking, Curiosity, and Attention: Computational and Neural Mechanisms," *Trends in Cognitive Science* 17 (11) (2013): 585–593.
- [2] J. Piaget, *The Origins of Intelligence in the Child*, trans. M. Cook (New York: International Universities Press, 1952. (Original work published in 1936.)
- [3] O. Sporns, *Networks of the Brain* (Cambridge, MA: MIT Press, 2011).
- [4] L. Byrge, O. Sporns, and L. B. Smith, "Developmental Process Emerges from Extended Brain-Body-Behavior Networks," *Trends in Cognitive Science* (in press); L. B. Smith, "It's All Connected: Pathways in Visual Object Recognition and Early Noun Learning," *American Psychologist* 68 (8) (2014): 618.
- [5] G. Turkewitz, and P. A. Kenny, "Limitations on Input as a Basis for Neural Organization and Perceptual Development: A Preliminary Theoretical Statement," *Developmental Psychobiology* 15 (4) (1982): 357–368.

与其尝试建立模拟成人心智的计算机程序，为什么不尝试建立模拟儿童心智的程序呢？只要儿童心智程序获得合适的教育，那么它应该有可能成长为成人的大脑。

——阿兰·图灵，《计算机器与智能》

把人类儿童当作智能机器的设计模板这一思想在现代人工智能发展的早期就已经根深蒂固了。阿兰·图灵是认知科学跨学科领域的众多研究学者中的一员，Marvin Minsky、Jean Piaget、Noam Chomsky 以及 Herbert Simon 等学者不约而同地阐述了同一种思想来研究生物个体和人工（或人造）系统。然而，受儿童启发的人工智能在之后的 50 年中却没有得到广泛关注，仅仅取得了零星进展。直到 2000 年，才有一大批针对发展型机器人学的研究在心理学、计算机科学、语言学、机器人学、神经科学和其他一些相关学科中开展起来。在本书第 1 章中也特别指出，两个新兴的社区（自主心智发展与后成机器人学）、两大学术年会系列（IEEE ICDL：IEEE 国际发展型学习年会；EpiRob：国际后成机器人学研讨会）以及一个国际 IEEE 学术期刊（《IEEE 自主心智发展会刊》^①）也相继推出，所有这些都致力于发展型机器人的研究。

近十年间，这两大新兴研究社区已经合二为一（参见 icdl-epirob.org）。合并的时间点正是一个承上启下的关键阶段，它不仅回顾了发展型机器人学前几十年的研究工作，更重要的是阐明了形成和指导这个学科发展的核心原则。

我们为本书制定了三大目标。第一，让读者容易理解和接受本书的内容，不管他们是工程师还是哲学家，是人类学家还是神经学家，是发展心理学家还是机器人专家，我们的目标是确保广大读者都能愉快地阅读和理解相对复杂的知识内容。基于这一点，我们也想让本书既适合工程、生物专业又适合社科、人文专业的高等学校的本科生和研究生阅读。

第二个目标是特意采用以行为为中心的实现方式。这种方式是指我们专注于那些可以被转化成相对容易直接与人类婴儿和儿童行为进行对比的机器人研究工作。也就是说，我们把机器人研究（更宽泛地说是计算模型）的重心要么放在寻求直接模拟与复制特定的发展阶段，要么放在找到一种能被准确定义的发展现象（比如爬行动作、早期语言、脸部识别等能力的涌现）。

① 该期刊于 2016 年 1 月更名为《IEEE 认知与发展型系统会刊》（IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems），主编是英国萨里大学的华人金耀初教授。——译者注

第二个目标也为第三个目标奠定了基础，第三个目标是展示发展型机器人的跨学科协作性质。因此，专注于具有涉身性、感知、运动和自主性的机器人系统的最大好处是我们可以解释各种各样的研究案例。在这些例子中，发展型科学的研究与机器人学、工程学和计算机科学共同的研究是相互推进的。作为第三个目标的一部分，在每一章中我们特意选择并描述对一种特定人类发展现象的研究，并在可能的情况下给出与之对应的模拟类似任务、行为或发展现象的机器人研究。我们希望通过对这些相似的自然生物和人工系统的同步对比，给出明确而有说服力的证据，从而表明人类和机器确实有很多地方可以互相学习！

本书不仅仅是两位作者努力的成果，也是我们整个实验室协作团队和研究发展型机器人的国际学术界的集体贡献。

许多同仁耐心地提供了一些章节的草稿，特别是确保了我们可以对他们的模型和实验结果进行正确且清晰的阐述。特别感谢以下同行，他们为第 2 章提出了宝贵意见和反馈，还提供了他们自己的婴儿机器人照片。他们是 Gordon Cheng、Paul Baxter、Minoru Asada、Yasuo Kuniyoshi、Hiroshi Ishiguro、Hisashi Ishihara、Giorgio Metta、Vadim Tikhonoff、Hideki Kozima、Kerstin Dautenhahn、William De Braekeleer (Honda Motor Europe)、Oliver Michel (Cyberobotics)、Jean-Christophe Baillie (Aldebaran Robotics)、Aurea Sequeira (Aldebaran Robotics) 以及 Masahiro Fujita (SONY 公司)。Lisa Meeden 为第 3 章提供了反馈意见，Daniele Caligiore 审阅了第 5 章的某些部分。Verena Hafner、Peter Dominey、Yukie Nagai 和 Yiannis Demiris 审阅了第 6 章的一些小节。Anthony Morse (提供了框 7-2)、Caroline Lyon、Joe Saunders、Holger Brandl、Christian Goerick、Vadim Tikhonoff 和 Pierre-Yves Oudeyer 审阅了第 7 章 (特别感谢 Pierre-Yves 友情提供了其他许多章的反馈意见)。Marek Rucinski (提供了框 8-2) 和 Stephen Gordon 为第 8 章提供了反馈意见。Kerstin Dautenhahn 和 Tony Belpaeme 审阅了第 9 章中的辅助机器人部分。此外，三个编审提出的宝贵建议和反馈使得本书的最终版本得以更加完善。我们也要感谢很多同事，他们向本书提供了很多图的原始图像文件 (他们的名字都标注在图名中)。

特别感谢普利茅斯大学机器人与神经系统中心的硕士、博士研究生，他们帮助我们规范书中的格式、图表和参考文献，尤其是 Robin Read (制作了一部分图表)、Ricardo de Azambuja、Giovanni Sirio Carmantini (绘制了部分图表)、Giulia Dellaria (确认索引)、Matt Rule (核对了数百条参考文献) 以及 Elena Dell' Aquila。

我们还要感谢 MIT 出版社的工作人员：Ada Brunstein 对本书出版计划的热心支持，Marie L. Lee 和 Marc Lowenthal 在稿件准备阶段的后期提供了连续不断的支持，Kathleen Caruso 和 Julia Collins 在定稿编辑时提供了帮助。

Cangelosi 还要感谢 Rolf Pfeifer，他在不经意中提供了决定性的动力，用他在涉身智能方面有影响力的著作启发 Cangelosi 开始着手本书这个项目。

本书的研究经费来源于欧盟第七框架计划 (ITALK、POETICON++ 和居里夫人 ITN ROBOT-DOC 项目)、英国工程和物理科学研究委员会 (BABEL 项目) 以及美国空军科学研究办公室 (EOARD 格兰特分布式通信项目)。

最后，衷心感谢家人在我们不得不减少同他们在一起的时间来努力完成本书时所付出的耐心。我们希望他们能理解这是“值得投入的时间”，希望他们能喜欢这本关于婴儿机器人的作品。

译者序

序言

前言

致谢

第 1 章 成长中的婴儿与机器人 1

1.1 先天与后天的发展理论 1

1.2 发展型机器人学的定义与起源 ... 3

1.3 发展型机器人学的基本原则 4

1.3.1 作为动态系统的发展 5

1.3.2 系统发展和个体发展的交互 ... 7

1.3.3 涉身性、情境性和生成性
的发展 81.3.4 内在动机和社交学习的
本能 91.3.5 非线性、类似阶段化的
发展 10

1.3.6 在线开放式累积学习 12

1.4 全书总览 13

扩展阅读 14

2.3.2 NAO 机器人 33

2.3.3 ASIMO 和 QRIO 机器人 ... 35

2.3.4 CB 机器人 37

2.3.5 CB² 和 Pneuborn-13
机器人 382.3.6 Repliee 和 Geminoid
机器人 40

2.3.7 Infanoid 机器人 41

2.3.8 Affetto 机器人 42

2.3.9 KASPAR 机器人 43

2.3.10 COG 机器人 44

2.4 发展型机器人中的移动式
机器人 45

2.5 婴儿机器人模拟器 47

2.5.1 iCub 机器人模拟器 48

2.5.2 Webots 机器人模拟器 50

2.5.3 胎儿机器人和新生儿机器人
模拟器 51

2.6 本章总结 54

扩展阅读 55

第 2 章 婴儿机器人 15

2.1 什么是机器人 15

2.2 机器人学简介 18

2.2.1 自由度、效应器和
执行器 19

2.2.2 传感器 23

2.3 类人婴儿机器人 29

2.3.1 iCub 机器人 31

第 3 章 新奇、好奇与惊奇 57

3.1 内在动机：概念总览 58

3.1.1 早期的影响 58

3.1.2 知识与能力 59

3.1.3 IM 的神经基础 60

3.2 内在动机的发展 61

3.2.1 婴儿中基于知识的 IM:
新奇性 61

3.2.2 婴儿中基于知识的 IM: 预测	64	5.2 接近动作机器人	120
3.2.3 婴儿中基于能力的 IM	68	5.3 抓握动作机器人	125
3.3 内驱型智能体和机器人	70	5.4 爬行动作机器人	130
3.3.1 IM 的计算框架	70	5.5 行走动作机器人	132
3.3.2 基于知识的 IM: 新奇性 ...	73	5.6 本章总结	135
3.3.3 基于知识的 IM: 预测	77	扩展阅读	137
3.3.4 基于能力的 IM	80		
3.4 本章总结	83	第 6 章 社交机器人	138
扩展阅读	85	6.1 儿童的社交发展	139
第 4 章 观察世界	86	6.1.1 联合注意力	139
4.1 婴儿的视觉发展	87	6.1.2 模仿	141
4.1.1 婴儿感知的测量	87	6.1.3 合作与共享计划	143
4.1.2 人脸感知	90	6.1.4 心智理论	146
4.1.3 空间感知	91	6.2 机器人中的联合注意力	148
4.1.4 自我感知	93	6.3 模仿	154
4.1.5 物体感知	94	6.4 合作与共享意图	159
4.1.6 可供性	96	6.5 心智理论	164
4.2 机器人的人脸感知	98	6.6 本章总结	166
4.3 空间感知: 地标和空间关系 ...	101	扩展阅读	169
4.4 机器人的自我感知	102	第 7 章 早期语言	170
4.5 物体感知的发展启发模型	104	7.1 儿童的早期词汇和句子	171
4.6 可供性: 感知指导的动作	105	7.1.1 时间刻度和里程碑	171
4.7 本章总结	108	7.1.2 概念与词汇发展的原则	174
扩展阅读	110	7.1.3 案例研究: Modi 实验	178
第 5 章 运动技能获取	111	7.2 机器人咿呀学语	179
5.1 人类婴儿中的运动技能获取 ...	112	7.3 机器人命名物体和动作	186
5.1.1 操控: 接近	113	7.3.1 学习命名物体	187
5.1.2 操控: 抓握	114	7.3.2 iCub 机器人的 Modi 实验 ...	189
5.1.3 移动: 爬行	117	7.3.3 学习命名动作	192
5.1.4 移动: 行走	118	7.4 机器人学习语法	195
		7.4.1 语义合成性	195
		7.4.2 句法学习	197

7.5 本章总结	201	9.1.2 系统发展和个体发展的 交互	239
扩展阅读	203	9.1.3 涉身性和情境性的发展 ...	240
第8章 抽象知识推理	205	9.1.4 内在动机和社交学习	241
8.1 儿童抽象知识的发展	205	9.1.5 非线性、类似阶段化的 发展	243
8.1.1 Piaget 和抽象知识的 感觉运动起源	205	9.1.6 在线开放式累积学习	243
8.1.2 数值认知	207	9.2 更多成就	244
8.1.3 抽象的文字和符号	210	9.2.1 儿童发展数据建模	244
8.2 计数机器人	212	9.2.2 基准机器人平台和软件仿真 工具的获取	246
8.3 学习抽象词汇和概念	219	9.2.3 辅助机器人和针对儿童的 人-机器人交互的应用	247
8.3.1 实现抽象词汇的扎根	219	9.3 公开挑战	250
8.3.2 学会说“不”	222	9.3.1 累积学习与功能集成	250
8.4 决策制定的抽象表征生成	226	9.3.2 身体与大脑形态中的进化与 发展变化	252
8.5 发展认知结构	229	9.3.3 cHRI、机器人外观与道德 规范	253
8.6 本章总结	235		
扩展阅读	237		
第9章 总结	238	索引	255
9.1 发展型机器人学关键原则的主要 成就	238	参考文献 [⊖]	
9.1.1 作为动态系统的发展	238		

⊖ 参考文献为在线资源，请访问华章网站 www.hzbook.com 下载。

成长中的婴儿与机器人

人类的发展过程是自然界中最迷人的现象之一。初生的婴儿都是无助的个体，虽然具有简单的运动与认知能力，但是在没有父母或其他看护者的帮助下，这些能力还远远无法满足存活的需要。尽管如此，仅在短短几年内，人类婴儿就能发展出复杂的心智水平。10岁的儿童就会下国际象棋、玩电脑游戏、解决难度逐渐增加的数学问题、掌握一种或多种语言、建立一种自我和他人的心智理论、无私地配合同伴和成年人、擅长于体育运动以及使用复杂的工具和机器。这些缓慢却令人印象深刻的发展变化引出了一系列关于理解人类发展的关键问题：是什么机制使儿童自己发展出这些心智能力？与儿童交互的社会与自然环境是如何塑造与支持儿童发展出认知功能和知识的？先天（即基因）和后天（即环境）这两者在人类智能发展过程中贡献的相对比例是多少？在发展过程中，定性阶段的变化以及身体和大脑成熟的变化对于支持发展的机制和原则有什么样的启示？

发展心理学这门学科旨在以不同年龄和不同文化背景的儿童为研究对象，通过实景与实验室实验，并使用比较心理学的研究方法来理解儿童的自主心智发展。这些经验式的调查不仅能使运动、认知和社会化的发展理论与假说得以定义，还能使以心智能力为基础的普适发展原则得到认同。

这些关于人类发展的逐渐增长的经验数据和理论知识，除了可以使人文学科、心理学、哲学和认知科学等学科从中受益外，还具备在科技上的巨大应用潜质。如果我们能通过社会交互来发现婴儿先天认知能力发展的底层原则与机制，就可以用这些发现来推进人工系统（诸如机器人）认知功能的设计水平。这些基本原则与机制可以在机器人的认知结构中实现，并通过机器人发展过程的实验来得到验证。以上这些是发展型机器人的研究目的，同时本书将探讨通过机器人的社交互动来设计自主心智发展能力所带来的最新成就与所面临的最新挑战，这些探讨将有利于发展心理学家和发展型机器人学家之间的交流与互动。

1

1.1 先天与后天的发展理论

在心理学和哲学领域，先天与后天对人类智能发展的贡献是最久远且无休止的争论之一。长期与自身和社会环境交互是婴儿心智发展的本质，并为婴儿全程的心智发展带来了显著影响。与此同时，基因在婴儿身体和智能发展中都起着最基本的作用。一些特征，尤其是身体特征，还包括诸如颜色感知这样的认知能力，很大程度上是由基因决定的，而环境的影响只起到很微弱的作用。

这场争论引出了关于先天和后天作用的多种发展心理学理论 (Croker 2012)。先天主义理论倾向于强调儿童拥有与生俱来的特定领域知识, 这些知识是心智发展基因直接影响的结果, 而外部环境对这些知识只有很少的影响或者根本没有影响。一个最著名的先天主义理论是 Chomsky 的语言习得机制和普遍语法假说 (Chomsky 1957; Pinker 1994; Pinker 和 Bloom 1990)。这个先天主义理论提出儿童具有与生俱来的语言知识和句法原则, 其中的参数通过父母的语言经验再进行调整。在其他方面, Leslie (1994) 提出的假说认为儿童具有与生俱来的心智理论, Wynn (1998) 认为儿童天生具有数学概念的知识。在另一个极端, 经验主义理论则强调社会和文化环境在认知发展中的重要性。这是 Vygotsky (1978) 的社会文化观中的一部分: 在引导儿童去探索潜在能力空间时, 成人和同伴的作用是至关重要的。同样, Bruner (Bruner 和 Haste 1987) 的社会认知发展理论强调社会交互和人际沟通在不同学习阶段的重要性。Tomasello (2003) 提出了一种基于建构主义和涌现式发展原则的经验主义语言发展理论, 即儿童通过与其他具有语言能力的个体进行交互来构建自己的语言表达能力。

2 在这些极端的理论中, Piaget (1971) 提出了发展心理学中最有影响力的一个理论, 这个理论结合了先天与后天机制这两种理论的长处。Piaget 理论的主要宗旨是儿童的整个发展需要经历不同的发展阶段, 在每个阶段中, 儿童能发展出本质上不同并且日益复杂的认知图式 (智能的构建模块)。这些发展阶段受到了由基因决定的成熟限制机制的影响, 在 Piaget 的理论中, 这些阶段也被称为“后成”。但是, 儿童还需要经历适应的过程, 在这个过程中, 现有认知图式要适应新知识 (同化), 并且要修改和创建新的认知图式 (顺应), 而外部环境对这两方面的贡献都是非常重要的。Piaget 提出了心智能力发展的四个关键阶段, 并且重点关注思维能力的发展和在感觉运动知识中抽象思维模式的起源。在感觉运动阶段 (阶段 1, 0~2 岁), 儿童的发展开始于感觉运动图式的知识获取, 这包含最基本的反射动作。在前运算阶段 (阶段 2, 2~7 岁), 儿童获得对客体和动作的以自我为中心的符号表征, 这些符号可以让儿童表征多种客体, 哪怕有些客体是不可见的 (客体永久性任务, 儿童知道移动的物体从障碍物后方经过后能再次出现)。在具体运算阶段 (阶段 3, 7~11 岁), 儿童能够采纳他人对客体表征的观点, 对具体的客体能进行认知转换操作 (比如液体守恒问题)。最后进入最终的形式运算阶段 (阶段 4, 大于 11 岁), 在这个阶段中, 儿童获得了抽象思维能力和解决复杂问题的能力。Piaget 关于抽象知识模型的理论和发展阶段思想将在第 8 章进一步描述。

另外一种理论, 也就是 Thelen 和 Smith (1994) 的发展动态系统理论, 认为生物和环境因素是同时产生贡献的。该理论考虑到在认知策略的自组织过程中, 各种神经、涉身和环境因素之间复杂的动态交互 (1.3.1 节将详细介绍)。

先天/后天的争论与先天主义/经验主义理论也大大影响了众多与智能相关的学科, 特别是人工智能和机器人学。在构建人工认知系统时, 人工智能中的自适应系统和机器人学

中的认知机器人系统就十分适合采用先天主义的方法。这就意味着这些智能系统的认知体系结构完全是研究人员预定义的,在与环境的交互过程中不会发生显著改变。另一方面,在人工智能和机器人学中,使用经验主义方法需要定义一系列自适应和学习机制,这些机制使得智能系统能够通过与其他系统和人类用户的交互来逐步发展自己的知识和认知体系。本书中的发展型机器人实现方法主要在先天主义/经验主义方面遵循中庸的机器人设计方法,从而更强调在与环境交互过程中机器人能力的发展,以及制约发展的成熟与涉身机制。特别需要注意的是, Piaget 的理论除了在发展心理学领域最具影响力外,也强烈影响着发展型机器人学领域,包括借用他的术语“后成”作为“后成机器人学”系列会议的名称。这是因为 Piaget 的理论强调心智发展的感觉运动机理以及生物与环境协调的实现方法。

3

与 Piaget 齐名的另一位著名发展心理学家 Vygotsky 也极大地影响了发展型机器人学领域。Vygotsky 的理论更强调社会环境对心智发展的作用以及在儿童认知系统发展过程中社会和自身环境带来的支架影响 (Vygotsky 1978)。因此,他的见解对社会学习和机器人模仿能力的研究以及发展型机器人学支架理论都具有很大贡献 (Asada 等人 2009; Otero 等人 2008; Nagai 和 Rohlfing 2009)。

在后续几节里,我们先提出发展型机器人学的定义并对它的历史进行简短回顾,之后将讨论在机器人的自主心智发展的研究中,整合生物和文化现象动态交互的实现方法的主要特征和原则。

1.2 发展型机器人学的定义与起源

发展型机器人学是人工智能系统(机器人)中对行为和认知能力进行自主设计的具有跨学科背景的研究方法,它的灵感直接来源于在儿童先天认知系统中观察到的发展原则和机制。发展型机器人学的主要思想是:机器人通过使用内在发展原则调节身体和大脑与环境之间的实时交互,实现自主获得越来越复杂的感觉运动和心智能力。

发展型机器人学是高度跨学科研究的产物,既包括经验主义发展型学科(如发展心理学、神经科学和比较心理学),也包括计算与工程学科(如机器人学和人工智能)。发展型科学通过提供实证基础和数据来找出普适的发展原则、机制、模型和现象,从而引导认知能力的增量式获取。机器人控制体系结构中原则与机制的实现方法,以及通过机器人与它自身和环境交互实验的测试方法,可以同时为机器人复杂的行为和心智能力的原则与实际设计方案进行验证。发展心理学和发展型机器人学都可以从对方的研究中受益。

从历史上看,发展型机器人的源头可追溯到 2000~2001 年,特别巧合的是,两个学科的研讨会第一次将人类学和机器人学领域中对发展心理学原则都感兴趣的科学家聚集到一起。在这些研讨会之前,一些研究工作和论文已经指出了人类发展和机器人之间的显式联系,比如: Sandini、Metta 和 Konczak (1997); Brooks 等人 (1998); Scassellatti (1998); Asada 等人 (2001)。

4