

# Body Intelligence

[瑞士] Rolf Pfeifer [加拿大] Josh Bongard 著  
俞文伟 陈卫东 杨建国 译  
许敏 横井浩史 金丹

## 身体的智能

——智能科学新视角



科学出版社

www.sciencep.com

# 身体的智能

——智能科学新视角

Body Intelligence

〔瑞士〕Rolf Pfeifer 〔加拿大〕Josh Bongard 著

俞文伟 陈卫东 杨建国 许敏 横井浩史 金丹译

科学出版社

北京

图字: 01-2008-4549

## 内 容 简 介

我们的大脑控制着身体,人尽皆知,那么我们的身体又是如何影响思维的呢? Rolf Pfeifer 和 Josh Bongard 两位作者将通过本书向您揭示我们的思想并非独立于身体,而是受到身体的紧密约束和激励。他们认为我们所能具有的种种思想都是基于具身性——我们身体的形态和材质特性。

本书采用易于理解的非技术化语言,通过介绍大量例子以及建立在机器人学、生物学、神经科学和心理学最新发展成果之上的基本概念,来阐述关于智能的可行理论。书中还介绍了这一理论在普适计算、经济与管理学以及人类记忆的心理科学领域中的应用。两位作者描述的具身性智能对我们理解自然智能和人工智能都具有重要意义。

本书可供人工智能领域的科研工作者及研究生参考,也可供相关专业的科研人员参考。

©2007 Massachusetts Institute of Technology

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

### 图书在版编目(CIP)数据

身体的智能:智能科学新视角/(瑞士)罗尔夫等著;俞文伟等译.  
—北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025026-1

I. 身… II. ①罗… ②俞… III. 人工智能—研究 IV. TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第121201号

责任编辑:王飞龙 胡 凯/责任校对:赵燕珍

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

原海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年8月第一次印刷 印张:19

印数:1—3 000 字数:360 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)



认知科学之所以成为一门具有强大生命力的新兴基础科学,是因为它建立了研究认知和智力活动特有的科学概念和方法论。认知科学的一个核心概念是“计算”,一个基本理论是“认知的计算理论”。认知的计算理论认为“认知即计算”,即认知本质上是离散符号操作 Turing 定义的计算。可以说,在提出认知的计算理论之前,我们几乎没有任何严格科学的概念和方法来研究认知的本质。认知的计算理论已上升到哲学的高度,成为一种信仰,计算-表达的机能主义成为一种有影响的科学哲学思想。不管是自觉地还是不自觉地赞成认知的计算理论,计算常常被看成解决认知科学各种问题的时尚的一般方法。

认知科学的强大生命力更是反映在科学家们不断创新认知科学的基本概念和理论,挑战“认知即计算”的经典命题。计算是否就是人类认知和智力的本质或全部过程? Pfeifer 和 Bongard 的这本书正是从根本上明确挑战认知的计算理论的一个范例。书中,他们提出和发展的“具身性的研究方向”(embodied approach)对一个近乎天经地义的常识——大脑控制身体——提出了质疑,强调认知和智力活动不是头脑的孤立的计算,而是头脑、身体(通过感觉器官)和环境的相互作用,生物体的身体塑造了他们的认知和智力。通过科学哲学理论的系统论述,通过来自人工智能、神经科学和心理科学的丰富实例,这本书表明了“具身性”的概念对于理解智力的本质和研发人工智能系统的深远影响。

近代认知科学发展越来越多地得益于生物科学和信息科学。关于神经系统生物科学(如脑成像领域)的数据前所未有地大量涌现。计算机科学、物理学的概念被普遍借用到认知和智力过程的分析。毫无疑问,这些发展提供了理解认知和智力的空前机遇。然而,目前根源于认知科学自身的科学概念和理论问题却相对被忽视。如何在认知和心理的层次来理解这些空前丰富的生物学层次的数据问题超越了生物学的层次,必须要有心理科学和认知科学层次的、适合描述精神世界的心理和认知活动的新概念和新原则来回答。一门基础科学是否有生命力,取决于它是否能建立和发展其特有的、不可由其他学科替代(不是简单地借用于其他学科)的科学概念和方法论。如何能提出和发展根源于认知科学本身的适合研究精神(心理)过程的新概念,在认知科学的根本问题上做出原创性的系统的贡献? Pfeifer 和 Bongard 的这本

书中具身性的概念的提出和系统发展，给予了我们难得的启发。

我和 Pfeifer 教授相识于人工神经网络兴起的 20 世纪 80 年代初期。当时人工神经网络的复活引起了新一轮的计算理论热潮。我被他挑战认知计算理论的与众不同的远见和理论勇气所吸引，产生强烈共鸣。如果说他是从具身性问题对计算理论提出挑战，那么我则是从另外一个角度，即拓扑性质知觉和计算的关系问题，对计算理论提出挑战。从那时起到现在，这本书的出版和最近关于拓扑性质知觉理论的专辑（*Visual Cognition*, 2005）的出版，都经历了二十多年的历史。二十多年，无论对具身性的研究方向，还是对知觉组织的拓扑学研究方向，都是一个漫长而艰辛的道路。我在这里提到这期专辑，是因为我想这期专辑可能和这本书有异曲同工之妙，有助于读者理解，尽管任重而道远，但对认知的计算理论的挑战和认知科学新概念探索是一个有吸引力、有生命力的科学事业。

陈 霖

脑与认知科学国家重点实验室和北京磁共振脑成像中心

2008 年 11 月

### 经过

近年来，具身性认知(embodied cognition)领域(或者称具身性智能领域，embodied intelligence)引起了各界越来越多的瞩目。至今为止，脑是智能的载体这一说法被广泛接受。与此形成鲜明对比的是，具身性智能提倡身体对于智能产生的重要性，强调智能是脑(控制)、形态、材料及环境间相互作用的结果。

原著作者之一，苏黎世大学的 Rolf Pfeifer 教授是这个领域著名的学术泰斗。他在 2001 年所著的 *Understanding Intelligence* 是最早对这个学术领域的思想进行系统整理和阐述的巨著，得到了海外学术界的高度评价。而本书是对近年来从该领域中涌现的最新成果和思想进行的总结和发展。

本书的出版虽然尚未过两年，已经得到了国际学术界的高度评价。本书的日译本于 2008 年正式发行。西班牙语译本也正在紧密筹划中。本书第二版的出版计划已由 MIT 出版社审查通过。这次能够通过我们的努力推出中文译本，甚感荣幸。

### 本书概要及特色

本书中，作者首先从对古典人工智能的整理及反思入手，导出了具身性的重要性。然后根据具身性智能的原理循序渐进地演绎出设计和创建智能系统所必需的一整套设计原理，继而采用了包括生物学、心理学、机器人学以及管理科学等诸多相关领域的最新研究成果，对这些设计原理的适用性进行了验证，进而对具身性的重要性展开了深入的考察。同时，本书自始至终强调了打破常规惯例，从不同视点事物进行考察的重要性。

由于本书覆盖范围极广，并包括了大量的研究实例，因此从事教育、商业、信息技术(IT 管理、咨询、软件开发)、工程、娱乐、媒体(记者、编辑、设计)工作的人员以及各个研究领域(如工程学、信息学、心理学、神经科学、哲学、语言学、生物学)的不同层次的学术界人士(如学生、研究者、教授)都可以成为本书的理想读者。更进一步地说，所有关注科学技术、科学技术的未来及其对人类社会的作用的各界人士都可受益于本书。

使用大量的研究实例正是本书的一大特点。这使本书比著者的第一本关于具身性智能的著作 *Understanding Intelligence* 具有更强的可读性、趣味性和实践性。作者还面向不同的读者层,采用了科普作品的写作风格,在使用通俗易懂的语言的同时,使用了 40 多幅漫画风格的示意图对内容进行了形象的诠释。

## 译者

参加本书翻译的有俞文伟(序、前言、第 4 和 12 章、索引)、陈卫东(第 6 和 7 章)、杨建国(第 1~3 章)、许敏(第 10 和 11 章)、横井浩史(第 3 和 5 章)和金丹(第 8 和 9 章、注解)。在翻译过程中,陈卫东作了大量的联络工作。全书由俞文伟、陈卫东统稿并审校。

## 致谢

本书能够得以出版,首先要感谢原著作者之一 Rolf Pfeifer 教授对我们的信赖和帮助。脑与认知科学国家重点实验室和北京磁共振脑成像中心的陈霖教授在百忙中为本书的中文译本写作了序,对此我们深表谢意。我们也要感谢费斯托(中国)有限公司,没有他们的大力支持和赞助,本书的中文译本是无法完成的。由于我们学识和精力有限,而且经验不足,难免有错漏之处,敬请各位专家、学者及读者多多指正。

译者

2009 年 5 月



# 前言

科学上巨大的革命往往发生在以前被认为正确的且不容置疑的事物被质疑,而且最终被证明是不正确的时候。有时,这种攻击是急风暴雨、针锋相对的,而有时又是清风细雨历时漫长的,先蹒跚前行,最终一举成为不争的事实。

这本书是对现代理性主义一些间接信条进行的清风细雨般的批判,不是对理性主义本身,而是对理性主义的许多基本假定做出的批判。Rolf Pfeifer 和 Josh Bongard 质疑道:是否我们的神经系统进行着计算,是否它们独立于身体之外控制着我们的身体,甚至,是否真的存在非具身性的推理。

这三个想法在我们的计算隐喻中是如此根深蒂固,以至于它们一般从不遭到质疑。在我们的计算科学、人工智能,甚至神经科学的正统思想框架中,这些疑问显得不合情也不合理。除了单纯的技术性问题外,这些疑问对理智的理性主义之父 Rene Descartes(笛卡儿)及他的“我思故我在”(“Je pense, donc je suis”)(出自他 1637 年用法语而非拉丁语写成的著作《方法论》)提出了挑战。

虽然这些疑问能被视为对科学世界观最基础部分的挑战,但实际上并非如此。Pfeifer 和 Bongard 并没有像有些人担心的那样,建议抛弃科学方法论,而用后现代相对主义取而代之。其实他们只是对某些隐喻进行了攻击。那些隐喻对智能研究,即对人类本身的研究方法产生着近乎疯狂的影响。

对现代的智能观,存在着两种重要的、可能被低估的影响。

1. 就如 Alan Turing(图灵)在 1950 年所著的论文“计算机和智能”中所描述的那样,他早期关于计算机的模型来自对一台人类计算机的外部可观察行为所做的考察。这里所谓的人类计算机是指一个只用笔和纸进行计算,且“假定遵从固定规则”的个体。这种模型在今天仍然占据着统治地位。值得注意的是, Turing 所建立的是人的所为,而不是所思的模型。

2. 自从人脑被认为是思想、欲望及理想的基座以来,它总是和人类所拥有的最先进的技术相比。在我的一生中,我就看到了广为流传的脑进化的复杂性隐喻。当我还年轻时,脑被比作电磁电话开关网络。然后它又被比做数字电子计算机。其后,又成为大规模并行数字计算机。令人高兴的是,在 2002 年 4 月,某次演讲时听众问我,是否脑就像“互联网(world wide web)”。甚至,某些严肃的科学家非



常倾心于他们自己的复杂性隐喻，如声称量子现象和脑都如此复杂，所以他们必然是与同一事物相关的。

Turing 的隐喻成为计算的基本定义，在 1950 年的论文中，利用 Babbage 未实现的机械引擎作为例子，他指出这样的计算独立于表达计算的媒介。脑的隐喻(除了量子猜想外)已经建立起和 Turing 形式计算相当的牢固地位，因此理性主义者很大程度上假设人脑是一种 Turing 机，能执行 Turing 计算，控制周边装置，也就是人的身体。

但是，当我们考虑神经系统的进化历史时，我们面临着一个两难问题，这个问题和经常被用来挑战进化本身的问题并无二致。即眼的各个组分：晶状体、瞳孔和视网膜都必不可少，在只有各个组分都完全成形时，才能使其他组分在整体中有效发挥功能的情况下，进化是如何渐进地制造出眼的各个组分的？当我们以完全不同的方式开始怀疑时，马上就会产生如下疑问：在成为全功能的控制系统(就像 Turing 提到的“执行”和“存储”等“控制”组分)之前，较早的神经系统起到了什么作用。

在科学中，作为帮助理解难解系统的一种方式，隐喻是有用的：通过隐喻能提出适当的关于某个系统的疑问，能提供事物工作机制的直观模型，并且还能为形成更为明确的理论填补空白，提供桥梁。但是，隐喻也可能引导复杂性超出实际需要时的难题的思考方式。重力可以被看成传达一个物体对其他物体的信息的媒介，但是信息隐喻在计算行星绕太阳公转轨道时，就不如古典力学那么有用了。同样，计算和信息隐喻也可能并不总是理解智能的最有用的隐喻。

Pfeifer 和 Bongard 提供了观察智能的另一方式，这种方式和生物的进化历史更加吻合，并且和当今人工智能、认知心理学及神经科学的绝大多数研究工作相比，受到计算隐喻的影响较小。本书所采纳的观点将身体的物理表象放在第一位。和身体共同进化的智能物质，与其说是主要的中枢控制系统，还不如说是行为的调节器。这个反向的观点在应用于诸如动物或机器人是如何行走的等“低层次细节”时可能不会有激烈的争议。但是，当应用于感知时，这确实是一次和现代观点的正面冲突，如果应用对象是思想本身时，那么冲突更将有过之而无不及。毫无疑问，这确是著者们攻击的方向。

批判一个科学研究领域的某种现存方法要比创建这样一个领域要容易得多。而本书不仅仅只是批判。它报告了多种多样的实验，其中许多出自著者们本身，这些实验开始为展开进一步研究，更为构造机器人等人造自动装置提供一个替代框架。

抛开先入之见，智能可能比表面所见更简单。

Rodney Brooks

MIT 计算机科学和人工智能研究室所长  
松下机器人学教授



对于智能而言身体是不可或缺的，这就是具身性(embodiment)思想。这种思想已有近 20 年的历史，但是其基本思考方法有了许多变化。近年世界上诸多研究机构及有影响力的企业制作了或正在开发许多一般只在科幻作品里才出现的创造物：超真实的拟人机器人、机器人音乐家、可穿戴式技术、由生物大脑控制的机器人、无大脑控制就可以行走的机器人、现实生活电子人、家庭助老机器人、可以相互进行交流的机器人、自我繁殖的人工细胞以及假想生物成长的仿真基因调控网络等。这个新的科技领域以及随之而来的许多重要的理论性突破，是智能研究的具身性方法的直接结果。沿着这个方向，一些最初模糊的想法已经得到了精确阐释，讨论更加集中深入，形形色色的成果开始形成相互关联的结构。因此，现在正是编撰一部智能理论方面的著作，朝智能理论迈出第一步的良机。

从个人角度来看，我(Rolf)已经为非专业人士召开了许多研讨会并进行了演讲，其中许多听众可以以非常直接和自然的方式和我所提出的观点产生共鸣：即我所提出的许多观点和他们的自身的兴趣和专业有相当紧密的联系。令许多人感到富有启发的是，我们的研究证明了总是可以以不同的方式看待事物。我们都有很强的偏见，且总是倾向于认为“一定会那样，没有别的方式！”。例如，如果你想构造一个跑得非常快的机器人，就必须有非常快的电子器件；一个收集某种物体的机器人必须要有识别被收集物体的能力。还有，一个六足昆虫的脑中需要一个集中控制程序来协调行走中所有腿的动作。令人惊讶的是，就如我们将看到的那样，所列举的想法中没有一个是正确的。

因此，我觉得，与其写一本和 1999 年与 Christian Scheier 共著的 *Understanding Intelligence* 类似的专业教科书，一本可以被广大读者接受的通俗科学读物才是更为合适的。科学与技术已经不再是两个独立的领域。它们与当今社会的团体、政治和社会的各个方面紧密地相互作用。而这种相互作用的效用之一，就是增加了为基础研究提供正当理由的需要。我们深信，不仅仅在人工智能方面，在更具有普遍性的我们如何看待我们自身和周围世界的问题上，我们能提供一个崭新的观点。因此，我们试着用日常熟悉的语言去解释科学的结果和领悟，这就是这本书。

## 目的与范围

写此书的目的有两个：一方面是探究具身性的启示(身体是如何影响智能的)，迈出探究智能理论的第一步，并最终证明这些想法的广泛适用性；另一方面，我们要揭示总是可以以不同的方式看待事物。因此，这本书是理念性的，既面向教育、商业、信息技术、工程、娱乐、媒体，也面向几乎所有学术领域的不同层次的读者，特别适用于包括心理学、神经系统科学、哲学、语言学和生物学等学科的读者。最后，我们也打算把这本书提供给对技术、技术的未来及其对社会的启示感兴趣的读者使用。对本书的阅读原则上无需特别的专业知识和训练。考虑到读者的情况和在本书的阅读中可能遇到的问题和难点，本书会提供背景知识、实例以及进一步阅读的要点。

本书的理论核心由一组“智能系统设计原理”组成。之所以为我们的理论选择设计原理的形式，是因为这是一种描述一般智能系统的简洁方式，并且能为建立诸如机器人等的人工系统提供方便的指南。事实上建立一个系统是很关键的，因为通过设计并构造智能化人工系统，才能使我们全面理解智能系统。这就是综合方法论——人工智能最基本的方法论，其特点是通过构造来理解(understanding by building)。我们将给出许多例子来说明，通过构造一个人工系统，我们能学到关于生物学的知识，也能学到关于智能的普遍性知识。一个令人激动的前景是，我们不但能研究智能的自然形态，还可以去创造种种尚未存在的智能的新形态；套用人工生命创始人 Chris Langton 的话，那就是“如其所能的智能”。因此，学习关于智能的知识，而非构造技术尖端的机器人，才是我们制造机器人的意图。因而，本书中并没有对复杂的工程处理过程进行描述，也没有对如何制造一台机器人的详细过程进行描述，但是我们将在本书中介绍机器人构造过程中所获得的许多经验。

我们在本书中的一些想法具有超越人工智能本身的广泛应用前景。为了支持这个主张，我们引用了来自普适计算(ubiquitous computing)、战略性经营管理、人类记忆及日常生活中的机器人技术的一些例子。希望读者可以喜欢我们介绍的这些案例研究，并且感受到动力并将这些想法应用到读者自身所关注的领域中去。

在继续展开之前，我们或许应该简要地评论一下人工智能一词。随着 20 年前具身性概念的导入，这个领域的基础观点经历了变革，因此，有时也使用具身性人工智能一词。我们就曾经以此标题出版过一本书(Iida 等, 2004)。在本书中，我们避免了这种叫法，因为它会暗示有一个“真正的”人工智能领域，一个支配性的、无处不在的学术领域——然后有一个小的叫做“具身性”人工智能的领域。我们觉得这个观点有些不妥。因为在人工智能领域，本质上有两个方向：一个涉及有用的算法或机器人的开发，另一个则把焦点放到了生物或非生物智能的理解，关于这点我

们稍后会详细阐述。为了能顺利论述下去，“具身性”观点是不可或缺的。在这个研究分支中，人工智能是具身的。

在进入本书的主题之前，还有一点需要强调。尽管所展现的资料略偏理论，需要读者在阅读时集中精力，我们也尽力提供许多例子以增加阅读的乐趣。并且本书的网页([www.ifi.unizh.ch/groups/ailab/HowTheBody](http://www.ifi.unizh.ch/groups/ailab/HowTheBody))包含了一些视频资料和其他有用的说明材料，还有一个论坛的链接。为了让本书更加引人入胜，我们邀请了东京大学的画家兼计算机科学家 Shun Iwasawa 加入我们的工作。他非常有才能并富有技巧，对本书的主题有很深的理解。他为本书绘制了具有日本漫画风格的插图，我们希望这会激起读者的兴趣，与读者就这个领域充满乐趣的前卫思想进行交流。

## 本书的构成

本书由四个部分组成。第一部分是引言部分，让读者熟悉本书的内容和基本的概念。第二部分是本书的核心部分，概述了我们发展智能理论的尝试。第三部分是应用部分，着重介绍了第二部分中发展的原理在人工智能本身以外的领域中应用的案例研究。最后，第四部分对本书中所提到的主要观点进行了总结。

在第 1 章中，我们将介绍思维、认知、智能等术语的含义，讨论为什么有史以来智能对各行各业的人士有如此巨大的吸引力，并介绍人工智能领域和智能的具身性观点(embodied view of intelligence)。第 2 章展示人工智能的概貌。这将给读者带来领域中现存的一些研究问题，让读者感受在这个荆棘密布的跨学科领域中前行并进行实际研究工作的魅力及困难。

第二部分是迈向智能理论的第一步。这也是本书的核心所在，因此，从概念上讲，在这一章会有一些生僻难懂的部分。但是我们力求用许多例子去说明那些抽象的想法，支撑我们的论点。第 3 章概述了我们正寻求什么样的理论，并且介绍一个基本的框架。这个框架是由大量重要的概念构成的，这些概念有多样性-顺应性(diversity-compliance)、参照系(frame of reference)、综合方法论(the synthetic methodology)、时间观点(time perspectives)和涌现(emergence)。这一章包含了一些有关科学的哲学内容，我们用此概述理论的本质，并描述这对于从事本领域研究，进而取得进展所具有的意义。举例来说，我们可以通过三个时间框架来研究行为：“当今”(here and now)，学习和发育及进化。第 4~6 章围绕着这些框架来展开。

第 4 章首先介绍真实世界的智能体(agents)特征，然后我们勾画出一组设计指南(我们称之为智能系统的设计原理)，这些可以帮助我们以工程学方法构造智能体，也可以帮助我们理解生物智能体。这些设计原理几乎都涉及“当今”这个时间框架。第 5 章考察了从发育视点出发的设计和分析事项，并探讨了个体发育过程中高层次认知是如何形成的：即在智能体发育成熟为一个成体的过程中，认知是怎样

涌现(emerge)的。举例来说,某些离散的事物,如抽象的符号处理是如何从一个完全连续的系统(我们都是时间连续的系统)中产生的?一个具体的,但容易引起争议的实例是步行(walking),或更普遍地说,运动(locomotion)和思考的关系。我们将在这一章中详细探讨。本章以发育时间尺度上的一组设计原理作为总结。第6章将会介绍如何运用从生物的进化中学习到的经验去从零开始设计智能体——这包括躯体、传感器、驱动装置和大脑。在这里,作为设计者,我们后退一步,让仿真进化去为我们工作。其关键是让进化过程设计虚拟智能体并使其执行日益复杂的任务,因此,在有些时候,我们可能倾向于用认知这个概念去描述它们的行为。这一章的目标之一就是展示人工进化过程的威力。特别是,我们将会给出一些例子来展示它已经超越人类的地方。第5章把讨论聚焦于个体的生存期内,但是在第6章,我们拓展了时间框架去包含多代智能体并扩大视野,不仅对单个智能体并且对智能体群体进行思考。我们仍然以一组设计原理作为总结,不过这里是针对进化系统的一组原理。

在第7章中将讨论考虑群体而非个体意义。我们着眼于发生在智能体群体中的涌现现象;也就是从一群对全局模式一无所知的智能体间的相互作用中产生的全局行为模式或现象。这些涌现行为常常被认为和群体智能有关。我们还会引入其他类型的群体智能,也就是模块化机器人。机器人由许多模块所组成,模块之间相互作用可以完成有趣的群体行为。在模块化机器人中,除了机器人之外还可以把模块看作一个智能体。本章也用一组群体智能的设计原理进行概括。

第三部分讨论分析了一些案例来说明如何将第二部分中介绍的概念和设计基本原理应用于一些人工智能基础领域以外的问题。我们将会看到普适计算、管理、人类记忆的心理學、日常生活中的机器人学和人工智能技术。我们将揭示具身性观念给这些学科带来的新启示。这些例子是自成体系的,在读者读完第1~7章以后可以按照任何顺序来阅读。在第8章里,我们讨论普适计算,这是一个在信息学领域中快速成长的学科,而且实际上和人工智能共享着很多想法。这个新学科的目标是探索“把电脑放到任何地方”的可能性,如放入汽车、衣服、杯子、鞋、建筑物、家用电器、移动电话或消费品中;或把它们嵌入到日益扩大和复杂化的通信网络里。第9章由 Simon Grand 和 Rolf Pfeifer 共同完成,是将具身性人工智能的观点应用到商业世界的最初尝试,特别是应用于在本质上不确定、复杂和不可预测的世界中构建和设计新商品、商业和公司。这章主要说明设计原理确实有巨大的应用潜力。第10章介绍一个关于人类记忆的案例研究来说明具身性是如何为老问题的解决提供新视点的,另一方面它又能够使我们更好地理解记忆研究的新动态。第11章试图对开发可以进入和参与人类日常生活和社会活动的各类机器人,特别是拟人机器人的可行性、合意性和经济现实性作出评估。

第四部分,也是本书的最后一部分,将总结理论的要点,以单独的一章——第

12 章, 对设计原理进行综述。我们还将给出一个精选要点表, 来总结我们认为可以从本书得到的重要启示。作为全书的总结, 我们将要返回本书的中心目标之一——我们将要介绍一系列例子来说明事物为什么总是可以以不同的方式来看待。

## 致谢

我们感谢苏黎世大学人工智能研究室的所有成员, 感谢他们长年以来与我们进行的学术讨论、卓越的研究、积极的努力以及一些非常好的想法。这些想法最终都成为本书中提到的研究成果。尤其要感谢的是我们的朋友 Yasuo Kuniyoshi, Olaf Sporns, Akio Ishiguro, Hiroshi Yokoi, Koh Hosoda, Fumio Hara 和 Hiroshi Kobayashi, 他们在本书的写作过程中给了我们巨大的鼓励和鞭策。Josh 在这里对无私地为本书的写作提供了时间和空间的 Hod Lipson 表示衷心的感谢。我们还要感谢那些对本书中的研究课题提供资助的基金组织, 尤其是瑞士国家科学基金会(Swiss National Science Foundation)和欧盟的 IST 计划。此外, 我(Rolf)在这里对 Yasuo Kuniyoshi, Tomomasa Sato, Hirochika Inoue, Yoshi Nakamura 以及 Department of Mechano-Informatics 的其他人员, 对他们邀请我成为 21 世纪东京大学 COE(Center of Excellence)的信息科学和技术教授表示我的感谢。正是在那里, 我撰写了本书的大量章节的草稿。他们将智能体作为复杂动力系统的观点对本书的内容有很大的影响。

我们衷心感谢 Gabriel Gomez, 他对许多与本书相关的问题进行了研究。还有, 我们非常欣赏 Max Lungarella 的贡献, 他的博士论文以及许多与他个人间的讨论, 很大程度上定下了本书第 5 章的基调。还有 Fumiya Iida, 第 5 章的标题“从运动到认知”就来自于他的建议, 他帮助我们形成了第 5 章的写作思路。我们感谢 Shun Iwasawa 给我们提供的卓越的、富有灵感和启发性的示意图, 在这些示意图的帮助下, 我们得以在科学、工程学以及娱乐之间架起了沟通的桥梁。

同样也非常感谢来自世界各地的不同学科的研究者对本书提出的宝贵建议, 正是因为有了他们的建议, 这本书才会显得有条有理, 结构清晰。并且, 感谢 Rodney Brook, 他开辟了这个令人激动的学术领域, 并且为本书作了前言。

我们也对 MIT 出版社表达我们的衷心谢意, 特别是 Bob Prior, 他扶持了这个写作计划, 还有编辑 Suzanne Schafer 和很多匿名审稿人, 他们富有建设性的意见极大地提高了本稿的质量。我们同样感谢 Britta Glatzeder, 他参与了写作计划的最初部分并且提供了书名。我也希望感谢 Claudia Wirth, 她在本书临截稿期间为我提供了充足的写作时间和空间, 并且在我长期离开研究室期间保持了研究室的正常运营。

还得感谢许多其他的教员、职员、学生、朋友以及家人, 感谢他们对作者各方面的支持, 如果没有他们的话本书将不会完成, 我们欠你们很多。我(Josh)非常感谢我的家人 Toby, Carol 和 Ralph, 感谢他们长期以来对我的理解和帮助。我(Rolf)非常感谢我的两个儿子 Serge 和 Mischa, 是他们在我最艰苦的时候一直激励着我。



中译本序	i
译者的话	iii
前言	v
序	vii

## 第一部分 智能、人工智能、具身性及本书内容

1 智能、思维以及人工智能	3
1.1 思维、认知和智能	5
1.2 智能之谜	7
1.3 定义智能	10
1.4 人工智能	11
1.5 具身性及其意义	13
1.6 小结	15
2 人工智能：概貌	17
2.1 古典方法的成功之处	18
2.2 古典方法的难题	21
2.3 具身化转折点	24
2.4 神经科学的作用	26
2.5 多样性	27
2.6 仿生机器人学	29
2.7 发育机器人学	30
2.8 普适计算与界面技术	32
2.9 人工生命与多智能体系统	34
2.10 进化机器人学	37
2.11 小结	37

## 第二部分 走近智能理论

3 智能理论的前提条件	43
3.1 一般性的程度及理论的形式	44

3.2	多样性及顺应性 .....	47
3.3	参照系 .....	51
3.4	综合方法论 .....	55
3.5	时间观点 .....	59
3.6	涌现 .....	61
3.7	小结 .....	63
<b>4</b>	<b>智能系统：性质和原理 .....</b>	<b>64</b>
4.1	真实世界和虚拟世界 .....	65
4.2	完全智能体的性质 .....	68
4.3	智能体设计原理 1：三要素原理 .....	73
4.4	智能体设计原理 2：完全智能体原理 .....	75
4.5	智能体设计原理 3：廉价设计 .....	78
4.6	智能体设计原理 4：冗余性 .....	82
4.7	智能体设计原理 5：感觉-运动协调 .....	85
4.8	智能体设计原理 6：生态平衡 .....	89
4.9	智能体设计原理 7：并行、松散耦合的过程 .....	97
4.10	智能体设计原理 8：价值 .....	100
4.11	小结 .....	102
<b>5</b>	<b>发育：从运动到认知 .....</b>	<b>103</b>
5.1	动机 .....	104
5.2	如何实现发育机器人的设计 .....	106
5.3	从移动到认知：一个案例研究 .....	109
5.4	从步态到体象到认知 .....	112
5.5	符号接地问题 .....	117
5.6	大脑和身体动态机制的匹配 .....	118
5.7	扩展视野：发育的其他方面 .....	120
5.8	具身化系统中的学习 .....	124
5.9	社会性交互 .....	125
5.10	我们在何处，又将从此走向何方？ .....	127
5.11	小结：发育系统的设计原理 .....	128
<b>6</b>	<b>进化：从零开始的认知 .....</b>	<b>131</b>
6.1	动机 .....	135



6.2	进化计算的基本思想	137
6.3	进化计算的起源	139
6.4	真实世界中的人工进化：关于管道、天线和电路	140
6.5	进化机器人学	142
6.6	对形态与控制的进化	143
6.7	基因调控网络及发育可塑性	145
6.8	自组织——变异和选择的强大盟友	151
6.9	人工进化：我们身在何处，又将去向何方？	152
6.10	小结：进化系统设计原理	155
7	集体智能：从交互中认知	157
7.1	动机	158
7.2	基于智能体的建模	160
7.3	仿真与真实机器人的比较	162
7.4	机器人群体	163
7.5	关于合作的一个注释	166
7.6	模块化机器人	168
7.7	可扩展性、自组装、自修复、同质与异质	171
7.8	可自再造的机器	173
7.9	集体智能：我们在何处，从此走向何方？	175
7.10	小结：集体系统的设计原理	177
<b>第三部分 应用和案例研究</b>		
8	普适计算和界面技术	181
8.1	作为支架的普适技术	182
8.2	普适技术：特性及原理	184
8.3	同普适技术的交互	190
8.4	电子人	191
8.5	小结	195
9	创建智能化公司	196
9.1	管理和创业：不确定性情况下的决策和行动	197
9.2	作为具身性系统的公司	198
9.3	管理的综合方法	201