

智能机器人先进技术丛书

 Springer

仿生自组织 机器人系统

Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems

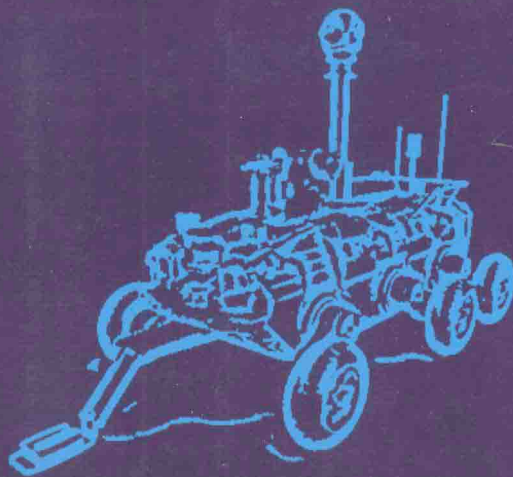
[美]孟 艳 (Meng Yan)

主编

[德]金耀初 (Jin Yaochu)

杨文明

译



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

智能机器人先进技术丛书

 Springer

仿生自组织 机器人系统

Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems



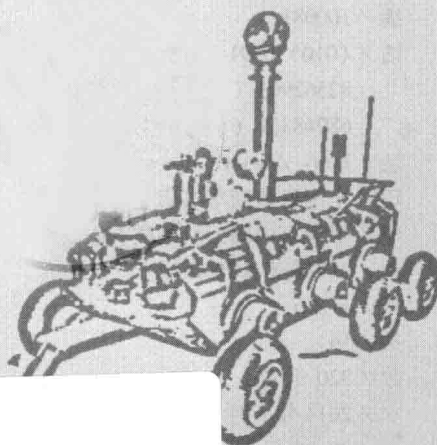
[美]孟 艳 (Meng Yan)

主编

[德]金耀初 (Jin Yaochu)

杨文明

译



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

仿生自组织机器人系统 / (美) 孟艳, (德) 金耀初主编; 杨文明译. —北京: 北京理工大学出版社, 2014. 5

书名原文: Bio-inspired self-organizing robotic systems

ISBN 978 - 7 - 5640 - 8970 - 2

I. ①仿… II. ①孟… ②金… ③杨… III. ①仿生机器人 - 自组织系统
IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 053228 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2013 - 3743 号

Translation from the English language edition:

Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems

by Yan Meng and Yaochu Jin (eds.)

Copyright© 2011 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 17.75

彩 插 / 14

字 数 / 320 千字

版 次 / 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 刘 娟

文案编辑 / 刘 娟

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前 言

在各种不同的不断变化、不可预测且未知的环境中，越来越需要使用机器人系统来完成多种复杂的任务，鉴于这些挑战，人们提出了自组织群机器人和自重构模块化机器人。例如，大规模群机器人系统的新型集体行为在面对环境变化时能够表现出高度的柔性和适应性；自重构模块化机器人能够自动改变系统的外形以适应复杂的地面状况。现在，为了面对更加复杂且苛刻的环境条件以及满足这些环境中的任务需求，机器人的认知能力和结构设计的发展同样变得越来越重要。与传统的预编程技术相比，自组织机器人系统在不断变化的、未知环境的应用中，尤其是在稳健性、自修复和自适应方面更具前景。为了具备上述特性，自组织机器人系统必须以分布式方式控制，理想的方式是单个简单机器人间的局部相互作用，而不是外部的全局控制。然而，分布式自组织机器人系统的设计仍然是机器人技术中最具挑战性的问题之一。

从宏观群居昆虫中的群系统到微观的细胞系统，生物系统能够在多种不确定性存在时通过相对简单的局部相互作用来产生稳健且复杂的新型全局行为。将由生物系统那里借用而来的思想用于开发自组织机器人系统，已经变得越来越普遍，而且在最近几年里取得了相当大的成功。例如，受到在群居昆虫群落和鸟群中所观察到的行为的启发，群体智能已经成为解决具有大量平行系统的复杂系统的新型范式。生物中另一个自组织过程是多细胞生物的形态形成，用来处理自组织机器人系统的基于胚胎发育计算模型的形态学方法已经表现出其潜在的价值，这种机器人系统也被称为形态机器人。

本书收集了关于仿生自组织机器人系统的最具代表性的研究工作。它由四个部分组成，第一部分讨论处理群机器人系统的仿生自组织方法，比如模仿多细胞生物中生物形态形成的形态学方法、模仿群居昆虫（比如鸟类、蜜蜂等）行为的群体智能方法、用于机器人机体的基于激素的方法，以及用于群机器人的基于沟通机制的遗传激励。我们在第一部分第一章中介绍了一种在机器人发展中最新出现的研究领域——形态机器人。形态机



机器人学的主要内容是应用发展的原理来设计自组织机器人系统的形态和控制器，这一章中总结了形态机器人学的主要主题，讨论了形态机器人学至进化机器人学与后继的机器人学之间的关系，展望了进化发展的机器人学，它是进化与发展机器人学的天然组合。

第一部分第二章由 Schmickl 撰写，该章中第一次提出了使用控制器的多种群机器人系统，这一控制器是模仿蜜蜂的群体行为和黏液凝聚的模型；然后讨论了多模式机器人机体的基于激素的控制模式，而且所有的这些都是分布式的自组织系统。在第一部分第三章中，La 和 Sheng 针对处于喧嚣和嘈杂环境中的多机器人的目标跟踪——它们是模仿自然界中观察到的鸟类、蜜蜂和鱼类等的集群行为的——提出了两种集群控制算法，即 Mult-CoM-Shrink 和 Mult-CoM-Cohesion，理论上研究了这两种算法的稳定性和可扩展性。模仿蚁群系统中基于信息素的激励行为，Brandoff 和 Sayama 在第一部分第四章中描述了一种群系统中机器人间接通信的人工遗传激励，这里的群机器人执行的是未知环境中的测绘任务。在第一部分的最后一章中，生物学家 Garnier 分享了如何从群机器人模仿动物世界中的生物自组织行为中受益，并反过来推动对动物集体行为的研究。

第二部分介绍了自重构模块化机器人的几种仿生方法。Kernbach 等人在第二部分第六章中提出了异构模块化机器人自组装的基于约束的自优化方法，这种方法主要是模仿分子生物中观察到的基因调控网络，而且该方法中还考虑了机械和混合约束。在第二部分第七章中，Meng 和 Jin 模仿多细胞生物的胚胎发育，提出了两种模块化机器人（即 Cross-Cube 和 Cross-Ball）自重构的分层的构型形成方法，这种分层结构由三层组成，其中基于虚拟单元的第 1 层控制器负责根据环境限制为机器人自动产生合适的目标构型，基于基因调控网络的第 2 层控制器为各模块提供自重构方案，基于骨架的第 3 层控制器在各模块的机械性约束和连通性约束下导引各模块向目标构型移动。通过使用这种分层的构型形成框架，机器人的目标样式能够自动形成以适应不断变化的环境。在第二部分第八章中，Miyashita 等人首先讨论了用于制造 3D 微型产品的自组装机器人中的三种基本研究问题，即组装问题、动态问题和相互作用问题。然后通过一个含有有源模块（由振动电动机激励）和无源模块（由永久磁铁激励）的研究案例，说明了分布式方式中模块的分异行为。本章中还对控制宏观自组装系统的熵进行了分析。

第一和第二部分集中讨论了群机器人和模块化机器人的自组织行为，而第三部分则将机器人系统的自主智力开发作为焦点。在第三部分第九章

中，Weng 基于进化网络（DN）提出了机器人系统控制中枢的通用模型，基于生物染色体均等分配原则提出了一种以细胞为中心的现场学习方法来处理所有层次的智力开发和运行，这种方法是从五种基本的智力难题中自动建立的，它们是开发、构造、领域、空间和时间。本章的焦点是对这种模型如何处理时间先后关系进行分析。

本书的第四部分给出了自组织机器人系统的两种特定应用。Jones 等人 在第四部分第十章中模仿生物体中的黏液菌，提出了类多头绒泡菌的机器人（其中的多头绒泡菌可看作一种智能计算材料），为多头绒泡菌机器人提出了一种基于粒子的计算模型，这种机器人能够以一种分布式方式从简单的局部相互作用中自发产生复杂的振荡模式。作者希望多头绒泡菌机器人可用于未来机器人器件智能材料的物理实例。在本书的最后一章——第十一章中，Hoffmann 等人提出了一种分层结构来为工业机器人建立自组织机器人单元，他们在所提出的系统中使用了一种基于有机计算的模型，将系统出现和自组织特性结合在一起。

我们相信，本书在仿生自组织机器人系统方面将为读者提供最新且全面的见解。希望本书能够在多学科研究领域之间建立起桥梁，比如机器人、人工生命、认知科学、系统生物学、发育生物学和进化计算等，从而启发研究者和工程师们产生更多创造性的想法，来进一步推动这一新兴且令人兴奋的领域的发展。

我们衷心感谢为本书贡献了优秀章节的所有撰稿人，我们还要感谢本系列丛书的主编 Janusz Kacprzyk 教授和 Springer 出版社的 Thomas Ditzinger 为我们提供了编写本书的机会。

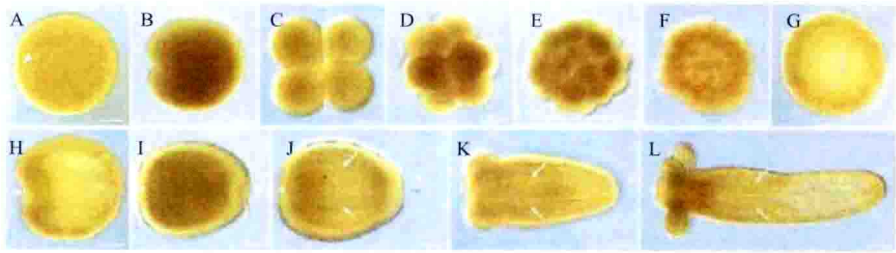
孟艳 (Meng Yan)

斯蒂文斯理工学院电子和计算机工程系，美国，霍博肯，NJ 07030

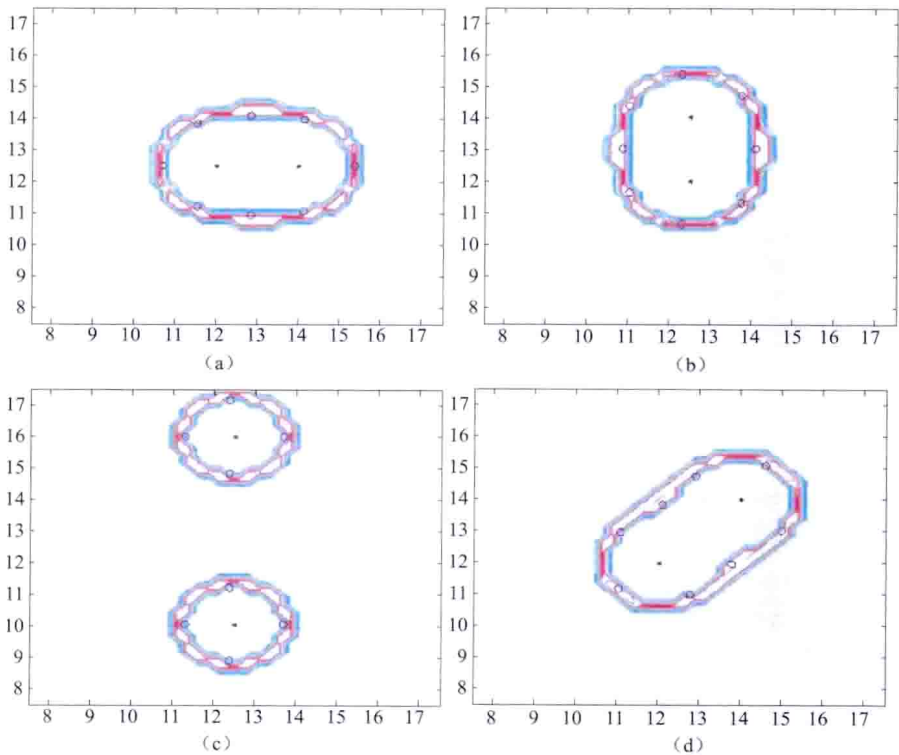
金耀初 (Jin Yaochu)

萨里大学计算机系，英国，吉尔福德，GU2 7XH

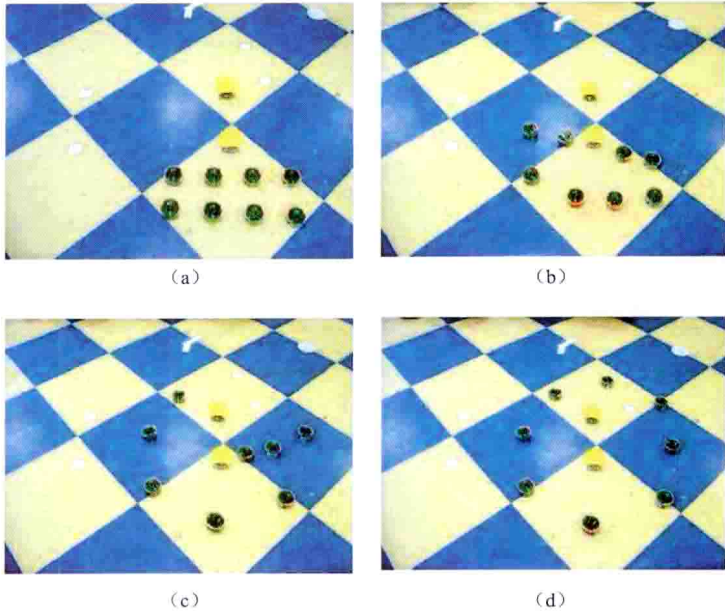
★ 第一部分第一章 形态机器人学——机器人系统形态和神经的一种进化发展的自组织方法



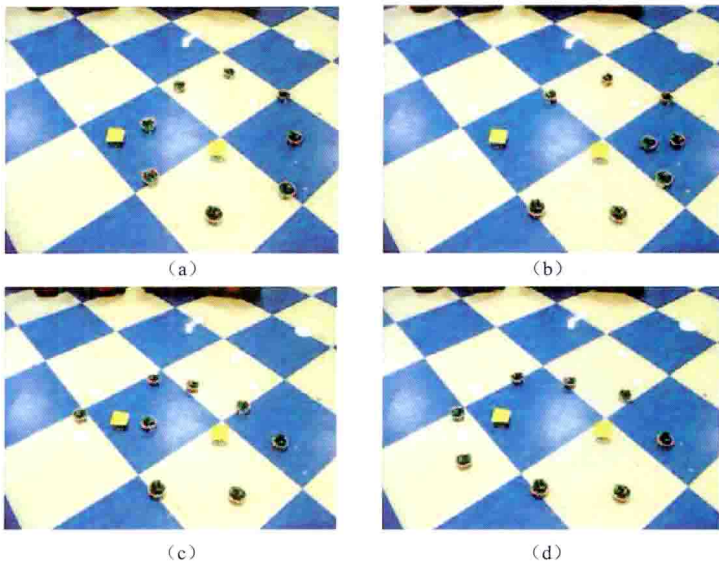
彩图1 海葵的变形。发育阶段为：卵 (A)，桑葚胚 (B~F)，囊胚 (G)，原肠胚 (H)，幼体 (I、J)，息肉 (K、L)。摘自文献 [27] (参见内文 p.5)



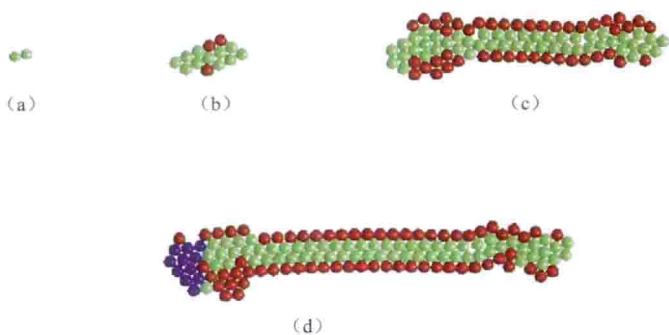
彩图6 图 (a)~图 (d) 是表示需要诱捕的目标移动时适应性形态形成的仿真结果快照 (参见内文 p. 12)



彩图7 图 (a) ~ 图 (d) 两个目标(用一张纸覆盖的)被其他八个由 H-GRN 模型组织机器人诱捕的实验结果快照 (参见内文 p. 12)

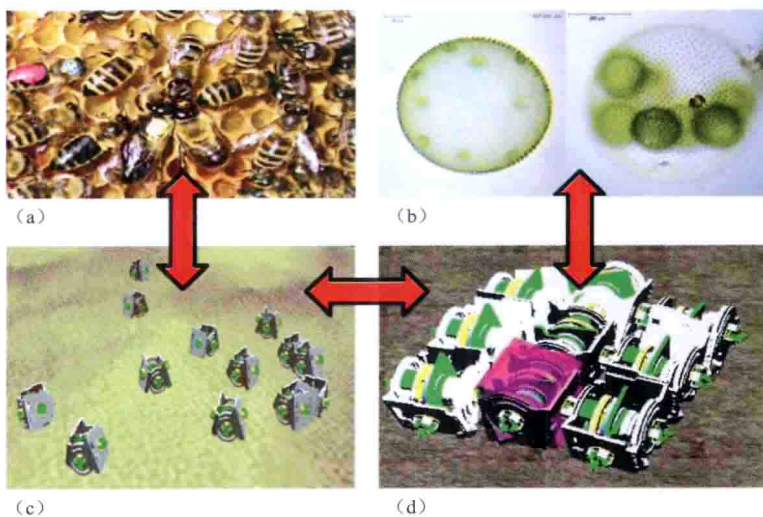


彩图8 图 (a) ~ 图 (d) 中, 目标形状的适应性和形状的再形成以保持对目标的诱捕 (参见内文 p. 13)

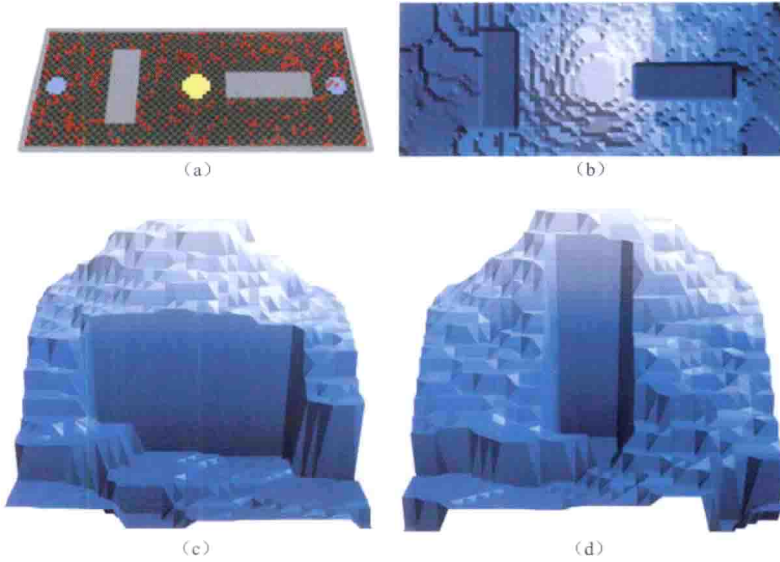


彩图 10 图 (a) ~ 图 (d) 为文献 [48] 中给出的在 GRN 模型控制下的自稳定细胞生长 (参见内文 p. 16)

★ 第一部分第二章 如何设计机器人机体和机器人群? ——具身自组织系统中的仿生、拟生和人工进化



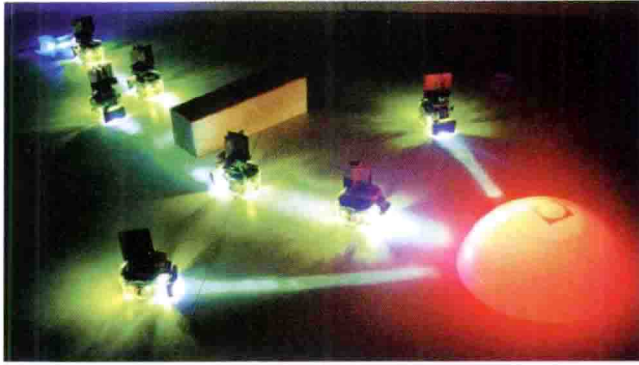
彩图 1 群机器人和多细胞机器人体的灵感源。箭头表示一个领域中的知识如何潜在地影响另一个领域中的研究。图 (b) 中的“团藻”由 Ralf Wagner 博士提供, 来自“维基共享资源库”(参见内文 p. 25)



彩图 3 使用交哺行为启发算法的机器人群的仿真。图 (a) 是清洁场景中花蜜设置的截图：机器人（红色）试图发现两尘粒区（蓝色）到中心卸载区（黄色）的最短路径。路径被两个壁面（灰色）阻碍。图 (b) 是指向卸载区的梯度的俯视图。图 (c) 是从左侧观察的相同梯度的侧视图。图 (d) 是从右侧观察的相同梯度的侧视图。图片来源于文献 [30]（参见内文 p. 31）



彩图 8 机器人在 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的场地中、食物源（右上方）和出发点（左下方）间 1.3 m 的距离上铺设的路径。图中的机器人正在从食物源指向出发点的返回路上，而且它遵循其自身的路线（参见内文 p. 38）



彩图 10 未来的工作中如何使用闪光的地板和传感器的设计照片。两个机器人正离开出发点寻找食物，其他的机器人正被导引至障碍物周围的出发点（参见内文 p. 39）



(a) 3个模块

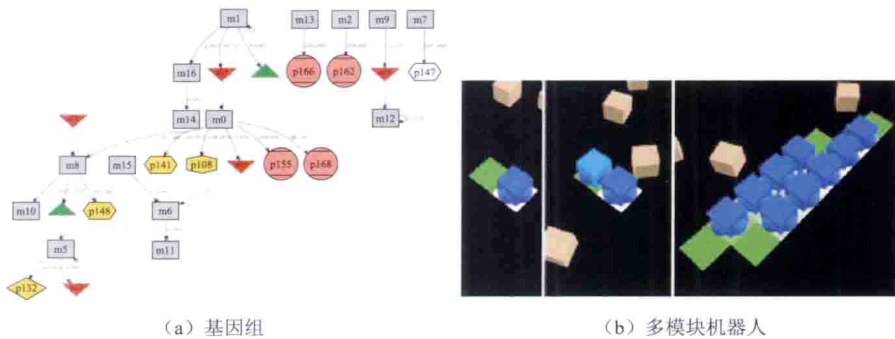


(b) 5个模块

彩图 11 模块化机器人中“步态学习”的标准程序场景实例。其中图 (a) 为 3 个模块，图 (b) 为 5 个模块。在图 (a) 和图 (b) 的两种构造中，AHHS 在几十代内进化并有效地移动机器人（参见内文 p. 41 - p. 42）

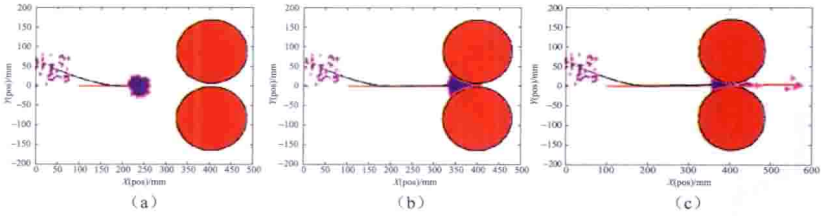


彩图 14 结构化 ANN 的进化。图 (a) 为给定的机器人形状，它是人工进化过程适应度函数的一部分。图 (b) 是虚拟胚胎的进化形状，它们组成了 ANN 网络拓扑。图 (c) 是一种 ANN 拓扑的例子，它由该胚胎生长而来（参见内文 p. 44）

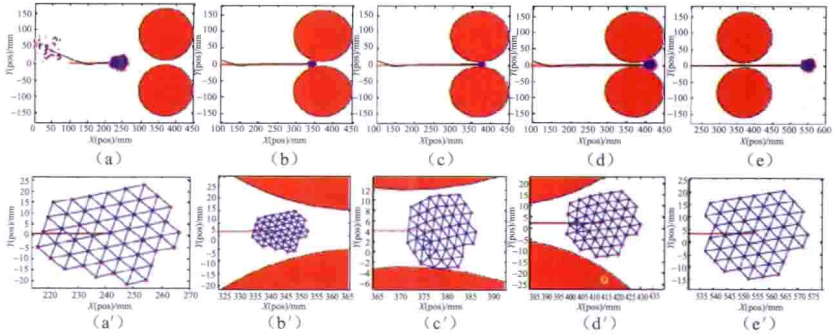


彩图 15 图 (a) 控制图 14b 中胚胎生长过程的进化基因组结构。基因组中的每一个基因都能够产生蛋白质，这些蛋白质反过来能够活化其他基因来产生形成素，改变细胞对形成素的接受能力，或者与其他细胞间建立神经连接。其中基因和蛋白质用几何形状来表示，蛋白质和基因之间的相互作用用箭头表示。图 (b) 在模拟环境中使用虚拟胚胎的多模块机器人成形。与上面提到的 VE 相比，细胞的复制过程通过连接机器人模块和机器人机体来实现。蓝色盒子表示已经连接的机器人模块，它们是多细胞机器人机体的一部分，绿色块表示一个“自由度”机器人模块能够连接到机器人机体的位置。左侧子图：过程的开始，机器人机体只由单个模块组成，它正在等待另一个模块进行连接；中间子图：连接了一个机器人模块，现在机器人机体由 2 个模块组成；右侧子图：机体成形进行中，多个模块已经连接在了一起（参见内文 p. 44）

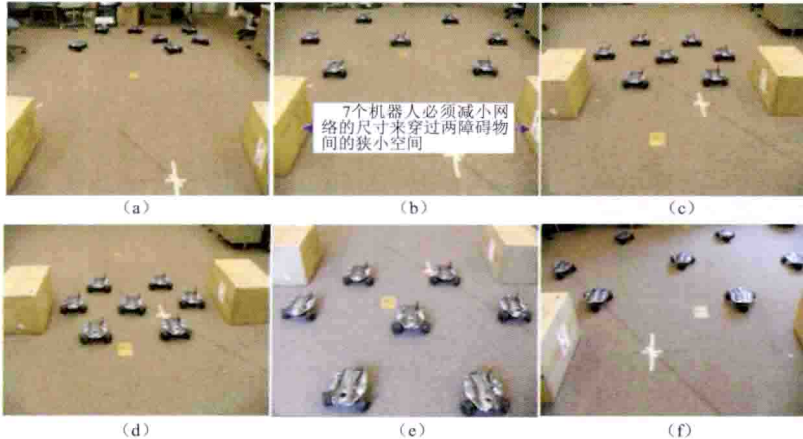
★ 第一部分第三章 喧嚣和嘈杂环境中的多体集群控制算法



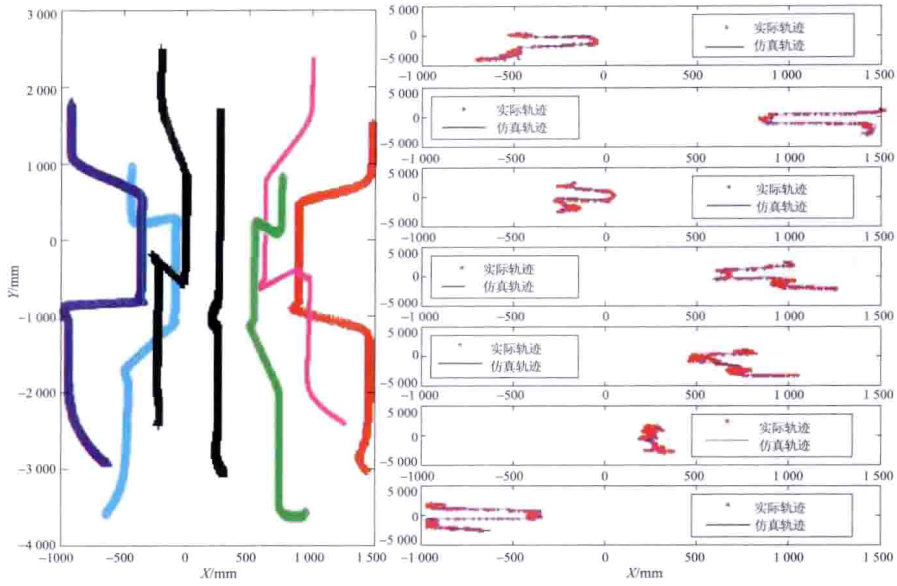
彩图 5 移动机体网络的快照图。图 (a) 为移动机体形成网络时；图 (b) 为移动机体避开障碍物时；图 (c) 为移动机体在两障碍物间的狭小空间内阻塞。这些结果在使用算法 (22) 后得到 (参见内文 p. 72)



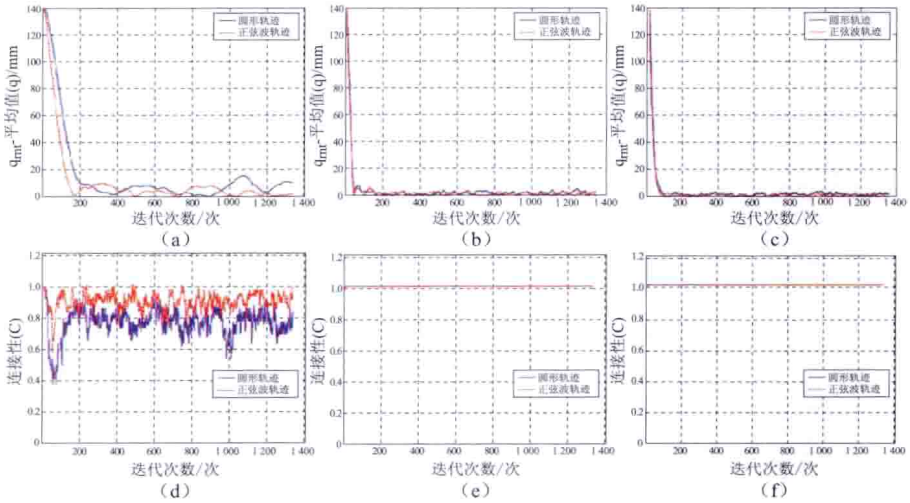
彩图 6 移动机体网络的快照图。图 (a) 为移动机体形成网络时；图 (b)、图 (c) 为移动机体网络减缩以避免障碍物；图 (d) 为移动机体成功穿过两障碍物间的狭窄空间；图 (e) 为移动机体恢复至其原来的尺寸。图 (a') ~ 图 (e') 分别为图 (a) ~ 图 (e) 的放大图。这些结果经使用我们的集群控制算法 (34) 得到 (参见内文 p. 73)



彩图 8 使用我们的适应性集群控制算法 (34) 时 7 个 Rovio 机器人适应性集群控制的快照图。图 (a) 中, 7 个机器人随机分布; 图 (b) 中, 7 个机器人形成点阵队形; 图 (c) 中, 7 个机器人开始减缩其网络的尺寸; 图 (d) 中, 7 个机器人穿过两个障碍物间的狭窄空间; 图 (e) 中, 7 个机器人开始恢复其网络的尺寸; 图 (f) 中, 7 个机器人完全恢复了其网络尺寸 (参见内文 p. 74)

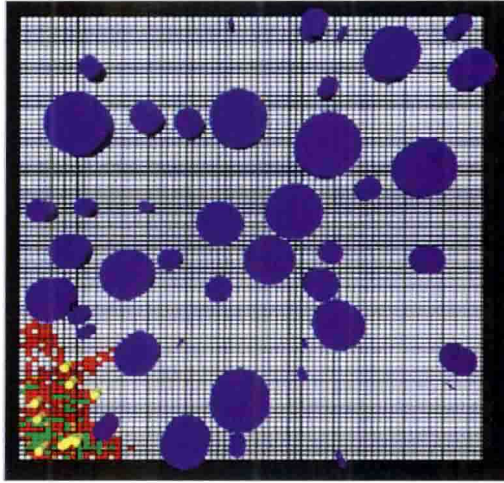


彩图 9 使用适应性集群控制算法 (34) 得到的 7 个机器人的轨迹 (参见内文 p. 74)

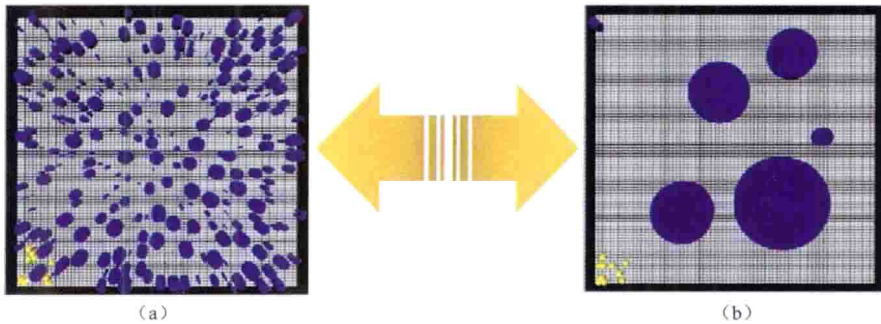


彩图 12 追踪性能结果 (CoM 与目标位置间的误差): 图 (a) 为算法 (22) 的结果; 图 (b) 为多 CoM 减缩算法的结果; 图 (c) 为多 CoM 聚集算法的结果。连接性由 $C(t)$ 进行评估: 图 (d) 为算法 (22) 的评估结果; 图 (e) 为多 CoM 减缩算法的评估结果; 图 (f) 为多 CoM 聚集算法的评估结果 (参见内文 p. 78)

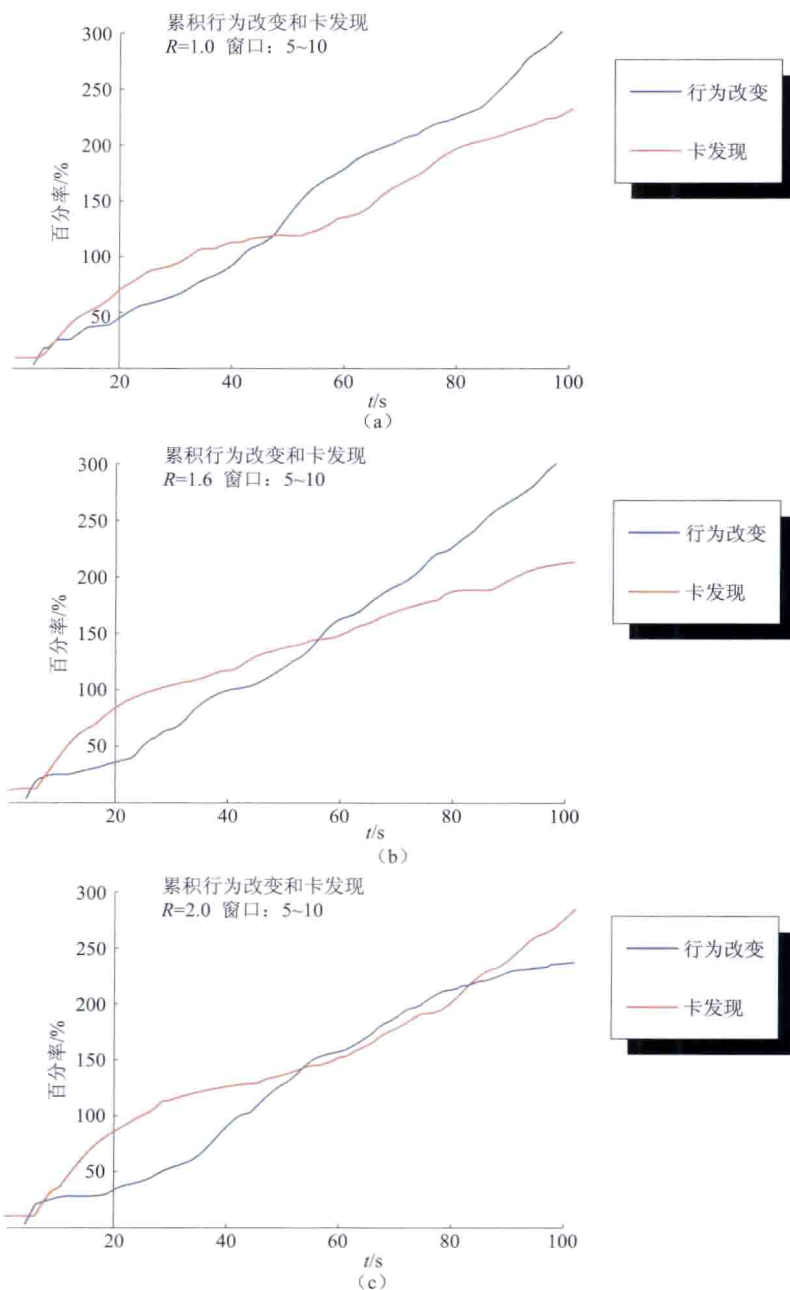
★ 第一部分第四章 遗传激励



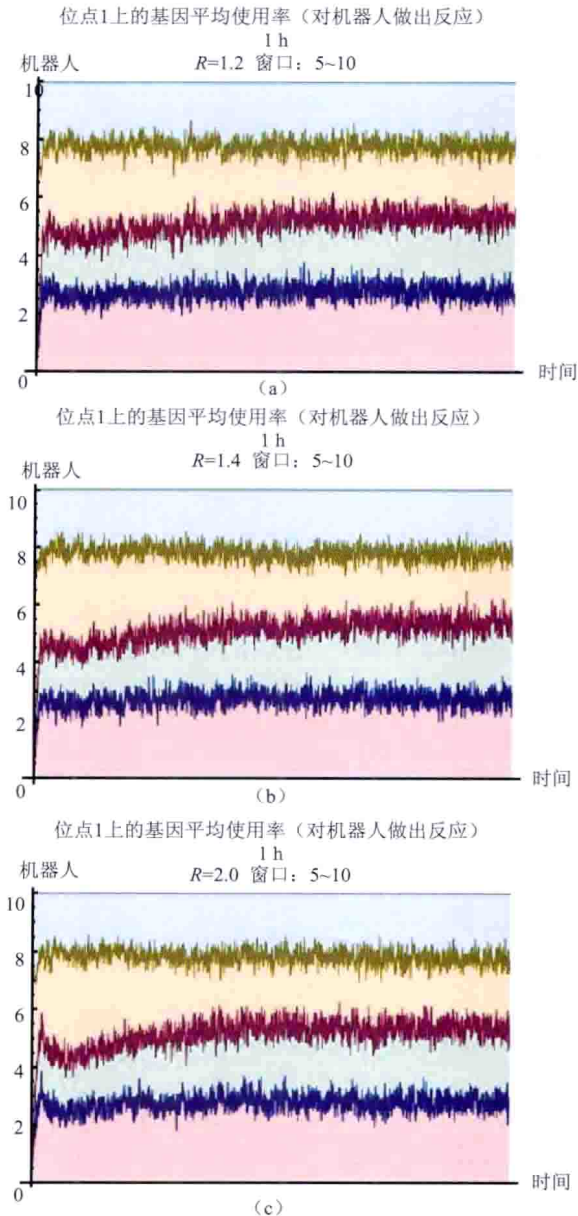
彩图3 十个群机器人（黄色）搜索随机产生的虚拟环境的“鸟瞰图”。环境中具有嵌入地板上的稠密 RFID 卡点阵。蓝色圆柱为障碍物，RFID 卡根据它们的当前状态改变颜色（参见内文 p. 89）



彩图4 R 值为 0.2 m (图 (a)) 和 2 m (图 (b)) 的环境实例。具有较小 R 值的环境中导航复杂性较大，而具有较大 R 值的环境中复杂性较小（参见内文 p. 90）



彩图 8 在 100 s 内机器人行为的累积变化数和机器人发现卡的累计数的时间序列曲线。其中可访问窗口为 5 ~ 10, $R = 1.0$ m (见图 (a)), 1.6 m (见图 (b)), 1.0 m (见图 (c))。在不同时间尺度上可观察到明显的累积停止时期, 在该时期内卡发现速率或行为改变速率明显减慢 (参见内文 p. 94)



彩图9 整个仿真过程中（1 h）位点1（控制机器人对其他机器人作出反应）上所有机器人的基因平均使用率。选择 R 值分别为 1.2, 1.4 和 2.0, 且可访问窗口为 5~10。与四种不同可能的等位基因对应的颜色分别为：红色表示“旋转向前”，绿色表示“旋转远离”，橘色表示“返回”，蓝色表示“随机选择”（参见内文 p. 95）