



群体系统的 协调控制理论及其应用

杨波 著



科学出版社

群体系统的协调控制理论 及其应用

杨 波 著

国家自然科学基金 (61203032)、湖北省自然科学基金
(2012FFB05007)、国家留学基金委基金 (201406955049) 资助

科 学 出 版 社

北 京

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229, 010-64034315, 13501151303

内 容 简 介

群体系统是由大量相互作用的自主或半自主子系统通过网络互联所构成的复杂系统。移动机器人群、传感器网络甚至社会网络都是群体系统的典型实例。近年来，在世界范围内开展了群体系统理论与应用方面的探索研究，并且取得了一系列重要成果，群体系统的协调控制是当前群体系统研究的核心内容。本书在介绍该学术领域国内外最新研究进展的基础上，系统地阐述了群体系统协调控制及其应用的理论和方法。

本书可作为高等院校控制科学与工程及相关专业高年级本科生、研究生的参考教材，也可供从事群体系统及相关研究工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

群体系统的协调控制理论及其应用 / 杨波著. —北京: 科学出版社, 2019.10
ISBN 978-7-03-062349-2

I. ①群… II. ①杨… III. ①协调控制系统—研究 IV. ①TP273
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 207179 号

责任编辑：闫 陶 / 责任校对：高 嵘
责任印制：彭 超 / 封面设计：莫彦峰

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 10 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2019 年 10 月第 一 版 印张：11

字数：219 000

定价：60.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

群体系统（又称多智能体系统）的应用研究起源于 20 世纪 80 年代，经过十多年的发展，在 20 世纪 90 年代中期被科学界广泛认可。如今，群体系统的协调控制理论已然成为分布式控制和人工智能领域的一个研究前沿。由多智能体组成的群体系统具有一定的智能性，主要体现在感知、规划、推理、学习及决策等方面。群体系统的目标是让若干具备简单智能且便于管理控制的智能体能够通过相互协作实现复杂智能，在降低系统建模复杂性的同时，提高系统的鲁棒性、可靠性、灵活性。由于现实环境复杂多变，群体系统协调控制的应用十分广泛：在工业领域中，用群体系统进行大型物体或危险品的搬运；在航天领域中，将卫星、探测器等航天器编队进行空间探测；在军事领域中，将装甲兵视为智能体，构建层次化的兵力群体组织结构，完成协调作战；在恶劣环境中，用智能机器人群体代替人类执行探索未知环境的任务。

如何通过分布式控制的方法使若干智能体进行协调合作完成复杂艰巨的任务，是国内外学者与专家一直探索的方向。近年来，系统与控制领域的国际主流期刊，如 *Proceedings of the IEEE*、*SIAM Journal on Control and Optimization*、*IEEE Control Systems Magazine* 和 *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 都相继推出了关于群体系统控制的专刊。同时，控制界的重要会议，如 IFAC（International Federation of Automatic Control）大会、ACC（American Control Conference）、IEEE-CDC（Conference on Decision and Control）和 CCC（Chinese Control Conference）都组织过关于群体系统分析与控制的专题报告会。2018 年第 37 届中国控制会议官网显示，作大会报告的 7 位专家中有 4 位与群体系统研究领域密切相关。由此可见，群体系统的协调控制已成为现代系统控制领域中一个极其重要的研究方向。

从系统控制论角度出发，首先要对群体系统协调行为进行数学建模研究。鉴于

群体系统中的具有独立自主能力的智能体通过一定的信息传递方式相互作用，本书通过对群体系统进行网络化建模，将系统中的智能体抽象为网络中的节点，智能体之间的通信抽象为连边，大量的节点和连边组成了群体系统的网络构架。此外，对于智能体本身的动力学特性，本书利用相应的动力学方程来刻画。通过分析与设计智能体之间的信息交互方式来研究群体系统的行为特性。本书正是基于上述数学工具，通过对群体系统的建模与仿真，给出从低阶到高阶的若干协调控制理论，同时对存在通信时延的群体系统协调控制理论进行探讨和研究。本书还对群体系统协调控制在现实中的应用问题进行相关研究，这在一定程度上有助于加深读者对群体系统协调控制理论的内在机制和应用的认识和理解，为工程应用领域提供理论基础。

本书系统地阐述群体系统协调控制理论及其相关应用，着力于群体系统协调控制领域的创新研究。

本书的具体章节结构为：第 1 章介绍大规模群体系统的理论研究进展和应用研究进展，以及未来的发展趋势；第 2~第 6 章详细讨论群体系统从低阶到高阶的协调一致性控制理论，以及随机群体系统的稳定性分析理论；第 7 章与第 8 章分别详细给出群体系统协调控制理论在水下航行器群与网络社团结构探测中的应用研究成果。

对于本书存在的疏漏与不妥之处，恳请广大读者不吝指正。

杨 波

2018 年 12 月

武汉理工大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大规模群体系统简介	1
1.2 理论研究进展	1
1.2.1 在生物学领域中的研究进展	1
1.2.2 在计算机仿真学领域中的研究进展	2
1.2.3 在控制工程领域中的研究进展	3
1.2.4 稳定性分析	5
1.3 应用研究现状	5
1.3.1 在群体机器人领域中的应用	5
1.3.2 在仿生学领域中的应用	6
1.3.3 在自主车群体的协调控制和刚性编队领域中的应用	8
1.3.4 工程实现	8
1.4 小结	10
参考文献	10
第 2 章 群体系统一阶协调一致性	13
2.1 概述	13
2.2 规则网络上的一致性问题的	14
2.2.1 动力学和网络结构	14
2.2.2 一阶协调一致性协议	14
2.3 一阶协调一致性能分析	15
2.3.1 规则网络一阶协调一致性的收敛速度	15
2.3.2 规则网络中通信约束的鲁棒性	16

2.4	大规模群体系统子系统状态的协调一致性	18
2.4.1	大规模群体系统子系统状态的协调一致性定义	18
2.4.2	基于非理想连接的线性一致性算法的稳定性分析	19
2.4.3	基于加权连接的非线性一致性算法的稳定性分析	20
2.4.4	仿真结果	22
2.5	小结	23
	参考文献	23
第3章	群体系统二阶协调一致性	25
3.1	概述	25
3.2	具有延迟动力学的群体系统二阶协调一致性	26
3.2.1	具有延迟动力学的二阶协调一致性协议	26
3.2.2	最大动力学时延	26
3.2.3	示例和仿真结果	30
3.3	存在通信时延的群体系统二阶协调一致性	32
3.3.1	存在通信时延的二阶协调一致性协议	32
3.3.2	最大通信时延	34
3.3.3	示例和仿真结果	38
3.4	小结	41
	参考文献	41
第4章	群体系统高阶协调一致性	42
4.1	概述	42
4.2	群体系统高阶协调一致性分析与设计	43
4.2.1	群体系统高阶协调一致性协议	43
4.2.2	一般稳定性判据	44
4.2.3	稳定判据的应用	47
4.2.4	利用网络拓扑性质的高阶协调一致性的充分条件	48

4.2.5 数值实例和仿真结果	49
4.3 存在时延的多智能体网络中任意高阶协调一致性的稳定切换	52
4.3.1 通用稳定切换判据	52
4.3.2 高阶协调一致性最大可容许通信时延	57
4.3.3 数值实例和仿真结果	59
4.4 小结	61
参考文献	61
第 5 章 群体系统受迫二阶协调一致性	63
5.1 概述	63
5.2 受迫二阶协调一致性协议	63
5.3 达到受迫二阶一致的时延条件	64
5.4 实例和仿真结果	68
5.5 小结	70
参考文献	70
第 6 章 随机群体系统的稳定性分析	71
6.1 概述	71
6.2 随机群体聚集模型	71
6.3 随机群体聚集模型的稳定性分析	72
6.4 随机微分方程的 Euler-Maruyama 数值方法	78
6.5 群体系统动态的仿真分析	79
6.6 小结	82
参考文献	82
第 7 章 群体系统的协调控制理论在水下航行器群中的应用	84
7.1 概述	84
7.2 基于 LQG/LTR 的水下航行器多变量鲁棒控制	84
7.2.1 NEROV 新型自主式水下航行器	84

7.2.2	LQG/LTR 鲁棒控制方法	86
7.2.3	基于 LQG/LTR 的水下航行器多变量鲁棒控制设计	87
7.2.4	LQG/LTR 控制方案仿真研究	88
7.3	基于分布式控制框架实现水下航行器群协调控制	90
7.3.1	非线性一致性协调算法和一致性协调器网络	90
7.3.2	自主式水下航行器动力学和 LQG/LTR 控制器设计	93
7.3.3	NEROV 群双层式分布控制框架	93
7.3.4	仿真研究	95
7.4	基于具有通信约束的分布式框架实现水下航行器群编队控制	96
7.4.1	水下航行器的非线性动力学	96
7.4.2	水下航行器群编队控制	98
7.4.3	仿真分析	100
7.5	小结	102
	参考文献	103
第 8 章	群体系统的协调控制理论在网络社团结构探测中的应用	104
8.1	概述	104
8.2	基于一致性动力学和动态矩阵探测网络社团结构	105
8.2.1	基础理论	105
8.2.2	社团结构探测算法	106
8.2.3	算法在计算机生成网络和现实网络中的测试	112
8.2.4	算法详细说明	117
8.3	基于一致性动力学和空间变换探测网络社团结构	120
8.3.1	基础理论	120
8.3.2	基于一致性动力学与空间变换的网络社团结构探测算法	121
8.3.3	算法测试	125
8.4	基于一致性和领导者节点选择之间的交替动力学探测网络社团结构	141

8.4.1 基础理论	141
8.4.2 使用一致性动力学进行社团探测	143
8.4.3 基于领导跟随模型的社团探测	148
8.4.4 算法在网络上的应用	149
8.5 小结	160
参考文献	161

第 1 章 绪 论

1.1 大规模群体系统简介

自然界存在许多群集现象，如蚁群集聚、鱼群洄游、动物迁徙等。受此启发，研究人员提出了群体系统的概念。近年来，对 Swarm 系统（即大规模群体系统）的研究越来越受到学术界的关注。其重要性不仅在于其作为生物群体或粒子群体随时间演化的数学模型，可以精确或较为精确地解释大多数生物群体的群体协调行为和自组织现象，而且在于 Swarm 系统具有明显的工程应用背景。例如，在军事和工业领域中，广泛存在着多智能体系统的协调控制、无人车的刚性或柔性编队的协调控制、移动传感器网络的自主配置等问题，而这类问题相应的控制策略有着明显区别于传统控制领域的地方。这类复杂系统往往包含很大数量的弱耦合子系统，从每个子系统个体能力的角度来看，个体均具有一定程度的自主能力，但仅具有有限的传感和通信的能力；从任务分配的角度来看，每个子系统处理信息和执行信息的能力都较为有限而不足以单独完成整个复杂任务，因此只有系统内多个子系统之间相互配合、协调运作才有可能完成整个复杂任务；从控制的角度来看，该系统具有大规模分布式协调控制的本质特征，而其分布式控制算法的构造往往通过对生物群体系统的数学建模和分析而获得重要启示。

1.2 理论研究进展

1.2.1 在生物学领域中的研究进展

生物学家很早就观察到生物圈中普遍存在的生物群体的聚集行为和自组织现象^[1]。从最为低等的单细胞生物如大肠杆菌^[2]，到较为高级的蚂蚁、蜜蜂，再到更为

高级的鸟类、鱼类^[3]及其他的哺乳动物，直到最为高级的灵长类动物如人类，生物群体都广泛地存在着聚集行为和自组织现象。尽管环境存在噪声、信息处理存在误差，以及缺乏全局的通信系统，生物群体仍然能够协调群内部个体的行为来共同完成个体无法完成的集体任务。生物数学家 Breder^[4]在对生物群体聚集行为的数学建模和分析方面做出了开创性的工作。他通过对鱼群聚集行为的观察和分析，提出了一种基于引力/斥力的数学方程来对群体动态行为进行建模和比较分析。通过其模型可知，整个群体对个体的影响随着群内个体数目的增加而显著增强，因此可将这种现象表达为方程 $c = kx^n$ 。其中， c 为群体对个体影响的度量； x 为群体中的个体数目； k 和 n 为某常数。

水栖生物体仅能感知相对本地的、较小空间的环境，因此 Grunbaum^[5]提出水栖生物在大范围区域捕食和迁徙的过程中会遇到的一个关键性问题，是其无法正确选择合理的运动方向。一般来说，当个体感知到本地环境变差时，可以通过引入带漂移项的随机游动来克服由局部感知能力的局限产生的问题，最终到达有利区域。然而，这种方法在环境梯度较弱或者环境中存在某种程度的噪声干扰的情况下效果并不好。Grunbaum 研究出在存在噪声干扰的环境中，群体觅食行为较个体觅食行为能更有效地抑制环境噪声干扰所带来的负面影响，所以群体能较准确地获得环境梯度信息，沿着环境梯度的方向运动，最终到达有利区域。其噪声抑制机理源于群体内部个体间的速度匹配趋势。这种速度匹配趋势不仅使得群内个体的运动方向分布相对集中，同时消除或抑制了个体的环境梯度感知误差对整个群体所产生的影响。Grunbaum 同时说明过强的群体聚集和速度匹配作用将减慢群体对环境梯度变化的响应，因此合理的群体觅食行为是在群体聚集行为和个体觅食行为之间找到的一种平衡。Okubo^[6]较为系统地对群体动态行为进行了建模和定量分析，并且从对流扩散过程的角度探讨了群体聚集行为的形成机制和群体大小分布的动态过程。

1.2.2 在计算机仿真学领域中的研究进展

飞速发展的计算机技术使得 Swarm 系统的计算机仿真实验得以实现。Reynolds^[7]

在大规模群体系统的计算机仿真方面做出了开创性的工作。Reynolds 通过仿真提出了形成 Swarm 群集行为的三条著名的启发式规则：①群体内所有个体都有向其邻近个体靠近的趋势；②群体内所有个体都有避免与其邻近个体相互碰撞的趋势；③群体内所有个体都有与其邻近个体保持速度一致的趋势。Reynolds 利用群体的上述三条个体行为规则，通过计算机仿真模拟出类似自然界中广泛存在的生物群体的群集现象。Vicsek 等^[8]提出了一种基于速度匹配规则的简单的离散时间动态模型，其中，个体被看作粒子，模型中假设每个粒子的运动速率保持不变，而每个粒子的运动方向为该粒子邻域内所有粒子运动方向平均值的随机摄动。Vicsek 等^[8]的仿真结果说明了在缺少集中协调机制的情况下，邻近规则同样可能使得在低干扰或高粒子密度条件下运动的所有粒子最终获得一致的速度，因此该结论与生物学家对自然界中生物群体行为的观察结果在原则上是一致的。Jadbabaie 等^[9]利用图论理论对 Vicsek 等^[8]所观察到的仿真结果给出理论解释，并且对其他一些类似的群体动态模型（即领导跟随模型）的收敛性结论给出证明。

1.2.3 在控制工程领域中的研究进展

大规模群体系统研究的主要内容是群体内部个体间的合作控制（cooperative control）问题和编队控制（formation control）问题。近年来，关于多机器人系统和多自主车系统的工程应用不断涌现，因此大规模群体系统中的合作控制问题和编队控制问题受到了学术界越来越多的关注。Finke 等^[10, 11]提出了一种针对无人驾驶自动车群（uninhabited autonomous vehicles）系统进行协调控制的数学模型。Finke 针对该模型，对系统的闭环特性进行了数学分析，并且使用蒙特卡罗仿真对不同的合作控制策略的性能进行了比较，最后提出了在系统设计时所应遵循的折中设计原则。Giulietti 等^[12]研究了多自主飞行器系统的编队飞行问题，将研究重点放在群内个体间通信机制的优化上，并给出当群内个体出现故障或完全失灵时群体仍能保持队形的重组策略。Leonard 和 Fiorelli^[13]提出了一种使用人工势场和虚拟领导者的方法对大规模无人自主车系统进行

分布式协调控制以实现编队队形的理论框架。该方法利用人工势场确定群内相邻个体间的相互作用力，并通过调节参数使得群内个体间能够保持编队距离（即在该队形下群体势能将达到最小或极小）；通过虚拟领导者调整群体队形和引导整个群体运动。Leonard 和 Fiorelli^[13]用群体动能和群体人工势场构造李雅普诺夫函数来证明闭环稳定性，并通过增加一个耗散项来获得编队队形的局部渐近稳定性。Ogren 等^[14]和 Bachmayer 与 Leonard^[15]均将 Leonard 和 Fiorelli 的工作扩展到移动传感器网络或传感器阵列，在未知的存在噪声的分布式环境中进行编队梯度攀升（gradient climbing）任务的协调控制。与 Leonard 和 Fiorelli 方法类似的大规模群体系统的分布式协调控制方法，是由 Reif 和 Wang^[16]提出的社会势场（social potential fields）方法。该方法运用群内个体间和群体间相互的虚拟逆幂或虚拟弹性作用力（即虚拟吸引力和虚拟排斥力共同作用而产生的虚拟合力）来协调整个群体系统。Tanner 等^[17, 18]分别研究了固定互联拓扑和动态互联拓扑的大规模群体系统群集行为的稳定性问题。在固定互联拓扑框架下，Tanner 等使用吸引力/排斥力和速度匹配力之和作为控制策略，以保证群体内个体间避免碰撞、保持群体的聚集性及获得一致速度。在动态互联拓扑框架下，Tanner 等使用同样的吸引力/排斥力和速度匹配力之和作为控制策略，以保证群体内个体间避免碰撞、保持群体的聚集性及获得一致速度，只是群体内个体间的控制互联拓扑是时变的，它依赖基于个体邻域规则的邻近网络的拓扑变化。因此，群体内个体的运动仅取决于其某个邻域（开域或闭域）内的其他个体的状态。尽管该控制策略仅获得系统的局部信息，以及互联拓扑的时变本质特性，但只要群体的邻近网络（或者称为相邻图）保持连通性，群体就能依据此种可扩展的本地控制策略形成群集行为。Liu 和 Passino^[19]讨论了大肠杆菌趋化行为的离散时间数学模型（该模型还考虑了大肠杆菌群体的进化和灭绝/转移事件因素），指出群体觅食过程是一种分布式的非梯度优化过程。该优化过程可以通过计算或分析方法得出群体觅食的最优策略，并将 Passino^[2]提出的群体觅食算法应用于自适应控制和自主车导航等问题中。Gazi 和 Passino^[20, 21]利用其早期工作中群体聚集行为的一些关于稳定性的结果，提出了一种基于滑模控制的大规模群体聚集行为的数学模型^[22]。由于考虑了群体内个体的实际

物理动态, Gazi 和 Passino 提出的模型可以看作他们早期工作中运动学模型的工程实现。Gazi 和 Passino 指出, 该模型经过少量修改便可应用于大规模群体系统的编队控制问题和集体觅食问题, 并且该模型对系统的不确定性和干扰具有较强的鲁棒性。

1.2.4 稳定性分析

大量的研究工作涉及大规模群体系统的稳定性(即群体的聚集)分析。Gazi 和 Passino^[21]分析了一个在有限维欧几里得空间里的基于个体的连续时间群体系统动态模型, 使用李雅普诺夫方法证明了群体内个体将在有限时间内聚集, 即该群体具有最终有界性, 并且得到了群体大小最终界的一个估计, 而该估计仅依赖系统参数。应用 LaSalle 不变原理证明了群体内的所有个体最终将停止运动(这是一种重要的渐近行为)。Gazi 和 Passino^[21]在之前工作的基础上扩展了群体模型, 提出了可以产生群体聚集行为的一类吸引/排斥函数, 并对该类函数的一些具体情况给出群体聚集行为的稳定性分析, 指出该动态模型经过扩展后可以解决编队控制问题。Gazi 和 Passino^[23]讨论了集体觅食群体的稳定性问题。事实上该模型反映了群体内部个体之间相互聚集的趋势和个体向有利区域觅食(与环境的相互作用)的趋势之间存在的矛盾, 而群体系统所产生的集体觅食的涌现行为正是这对矛盾的平衡与折中。Olfati-Saber^[24]针对大规模群体系统的无障群集行为和避障群集行为, 提出了可以产生上述群体自组织行为的3种分布式群集算法。Olfati-Saber^[24]提出的算法一借鉴了 Reynolds 提出的形成 Swarm 群集行为的三条著名启发式规则, 并将 Reynolds 的三条启发式规则应用于同一个运动方程; 算法二和算法三则在算法一的基础上显式地考虑了群集行为的群体目标项和避障项以提高算法的性能。

1.3 应用研究现状

1.3.1 在群体机器人领域中的应用

大规模群体系统的主要工程应用背景在机器人领域。关于群体机器人(swarm robot)

系统的研究内容包括：研究如何使得大规模的功能相对简单的智能体（agent）能够通过本地的交互作用涌现出整体的智能行为。而在自然界中，生物群体通过大量简单个体的相互作用产生复杂智能系统的例子比比皆是，因此可以通过对生物群体行为的细致观察和借鉴来构造和设计智能的工程群体系统，使之可以获得类似于生物群体系统在系统层面的典型特性和功能。如系统对少量个体故障或损毁的鲁棒性、对环境变化的柔性及群体规模上的可扩展性等，而所有这些特性正是设计智能体系统所必需的。

目前，存在的大量研究均涉及群体机器人问题。群体智能和群体机器人技术对于学术界仍是一个全新的多学科交叉领域，因此其中的很多概念和术语的定义相当模糊，同时存在较大争议。所以 Beni^[25]根据自己的理解对群体机器人系统中的一些重要概念的定义提出了看法，同时描述了该领域一些概念和术语的形成过程。Sahin^[26]提出了用以将群体机器人系统和其他多机器人（multi-robot）系统区别开的关于群体机器人的定义，详细描述了群体机器人系统在系统层面所应具有的重要功能和特征，同时评论了群体机器人系统的一些潜在应用领域。Balch^[27]评论了与群体系统研究高度关联的三个重要领域：通信、行为多样性和学习能力。群体内部的通信能力是实现协调合作，从而完成复杂任务的关键因素，然而过多的通信会显著提高系统开销与系统复杂度。因此，如何在尽可能少的通信条件下实现尽可能多的有效通信，从而使得群体系统能完成协调合作的任任务，成为群体系统内部通信的核心问题。群内个体的行为多样性和学习能力是群体系统能够熟练完成给定复杂任务及快速适应环境改变的重要因素。

1.3.2 在仿生学领域中的应用

Payton 等^[28]使用虚拟信息素的方法和群体内点对点的通信方式来组织群体机器人系统，使该系统成为分布式计算网格。Krieger 等^[29]指出具有自组织行为的机器人群体能够实时地与不可预测环境交互，以实现系统的柔性。而实现系统自组织行为的关键因素是群内个体的劳动分工的有效机制。通过设计基于蚁群觅食行为的

分布式控制算法,使得机器人群体相对于单个机器人,能够获得更高的觅食效率和维持较高的群体能量。Krieger 等通过实验发现,群体觅食行为对群内个体带来的好处将随着群内个体数目的过多而呈下降的趋势,这一点很可能是由群内个体间的过度竞争和相互干扰造成的。当实验中的食物分布相对集中而非均匀分散时,具有信息传递功能的机器人群体比不具备该功能的机器人群体觅食效率要高得多。该现象说明了这种通过对生物群体(特别是昆虫群体)行为的分析和借鉴来构造和设计工程智能群体系统,使之能够获得类似于生物群体系统在系统层面的典型特性和功能的设计方法是可行的。图 1.1 是一种名为 Khepera 的仿生机器人觅食的过程。Bayazit 等^[30]使用一种类似于蚁群优化算法的随机路标方法,使得群体系统具有较好的区域探测能力。该随机路标模式实际上是一种隐式的群内个体间的通信方式,这种隐式通信方式在自然界的昆虫群体中极为常见,它也是低等生物个体间的主要通信方式。Wilson 等^[31]提出了如何通过简单算法和最小硬件来实现类似于蚁群孵卵中形成的蚁卵环状排列结构的复杂多目标任务。其实现方法源于一种名为 *Leptothorax* 的蚂蚁在孵卵期间将成熟度不同的蚁卵分拣到不同的圆环上的自组织行为。

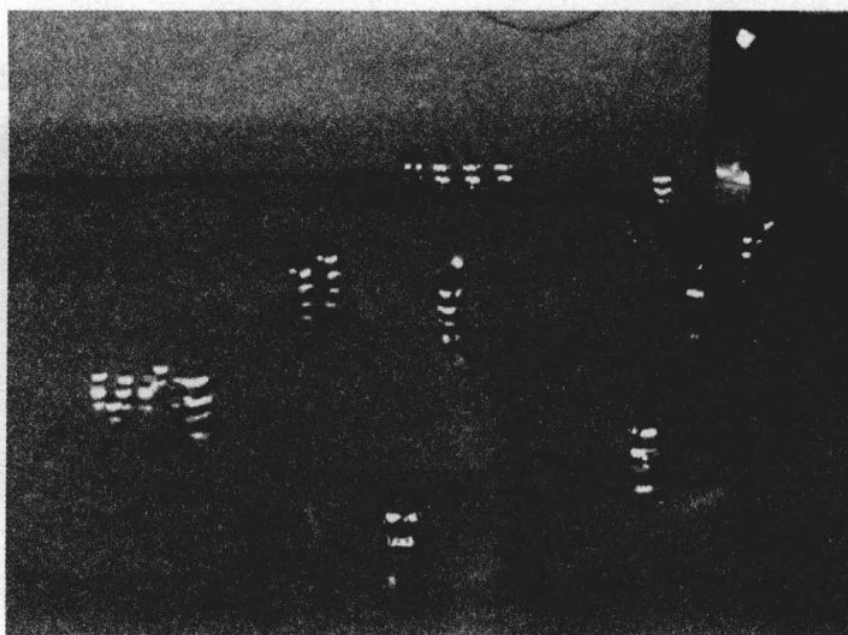


图 1.1 Khepera 仿生机器人觅食的过程^[29]