

# 群体智能研究综述

王 玫<sup>1,2</sup>, 朱云龙<sup>1</sup>, 何小贤<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 群体智能利用群体的优势, 在没有集中控制、不提供全局模型的前提下, 为寻找复杂问题的解决方案提供了新的思路。首先阐述了群体智能的研究现状, 包括典型的蚁群优化算法、粒子群优化算法、群体机器人以及算法的应用。在此基础上, 对今后的研究趋势进行了分析和展望: 对群体智能系统底层机制的研究以及群体机器人的研究将是今后研究的重点, 具有重大意义和广阔前景。

**关键词:** 群体智能; 群算法; 群体机器人; 涌现

## A Survey of Swarm Intelligence

WANG Mei<sup>1,2</sup>, ZHU Yunlong<sup>1</sup>, HE Xiaoxian<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**【Abstract】** A survey of swarm intelligent system is presented. Large amount of simple individuals have more advantages over a single complex one. Thus, swarm intelligence provides a new way to solve complex problems without global control. Firstly the prolific research results in this field are illustrated involving typical algorithms, applications and swarm-based robotics. On the basis of that, the future directions in this field are analyzed. Finally, the significance of study on swarm intelligence is pointed out in the conclusion.

**【Key words】** Swarm intelligence; Ant colony algorithm; Swarm-based robotics; Emergence

群体智能作为一个新兴领域, 自从 20 世纪 80 年代出现以来, 引起了多个学科领域研究人员的关注, 已经成为人工智能以及经济、社会、生物等交叉学科的热点和前沿领域。由单个复杂个体完成的任务可由大量简单的个体组成的群体合作完成, 而后者往往更具有健壮性、灵活性和经济上的优势。群体智能(swarm intelligence)利用群体优势, 在没有集中控制, 不提供全局模型的前提下, 为寻找复杂问题解决方案提供了新的思路。对群体智能的定义进行扩展, 普遍意义上有以下几种理解。一是由一组简单智能体(agent)涌现出来的集体的智能(collective intelligence)<sup>[1]</sup>, 以蚁群优化算法(Ant Colony Optimization, ACO)和蚂蚁聚类算法等为代表; 二是把群体中的成员看作粒子, 而不是智能体, 以粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)为代表。群体智能是对生物群体的一种软仿生, 即有别于传统的对生物个体结构的仿生。可以将个体看成是非常简单和单一的, 也可以让它们拥有学习的能力, 来解决具体的问题。

### 1 研究现状

#### 1.1 群体算法研究

对群体智能的研究起源于对以蚂蚁、蜜蜂等为代表的社会性昆虫的群体行为的研究<sup>[1]</sup>。现有的对群体智能的研究, 大都是从某一种由大量个体表现出来的群体行为出发, 从它们的群体行为中提取模型, 为这些行为建立一些规则, 从而提出算法, 应用于解决实际中的问题。目前国内外研究得比较多而且也比较成熟的算法有蚁群优化算法、蚂蚁聚类算法、粒子群优化算法, 还有对蚂蚁分工的研究。如表 1 所示。

##### 1.1.1 蚂蚁优化算法(ACO)

蚂蚁优化算法受蚂蚁取食行为中的通信机制启发而来。经过大量的观察研究发现, 蚂蚁个体之间可以通过分泌

信息素(pheromone)来传递信息。蚂蚁在行动的过程中, 会在经过的路径上留下信息素, 后面的蚂蚁通过感知这种物质的浓度来选择自己的路径。这样, 由大量蚂蚁组成的蚁群集体行为就表现出了一种信息正反馈的现象, 信息素随时间挥发, 在较短的路径上浓度较大, 因而蚂蚁总是可以找到更短的路径取食。用人工蚂蚁来模仿自然蚂蚁, 在走过的路径上留下信息素, 为解决各种寻优问题提供了一种新的方法。该算法已经被成功地应用在很多复杂的组合优化问题上。意大利学者 Macro Dorigo 首先将该方法用于求解 TSP 问题, 随后诸多学者陆续使用了该算法解二次分配问题、皇后问题等。所解决的问题以各种 TSP 问题为主, 另外有函数优化问题、背包问题等, 而且从离散空间扩展到了连续空间。在解决这些问题的性能方面, 比之于传统的优化算法, 蚂蚁优化算法表现出了良好的性能<sup>[4]</sup>。

表 1 群体算法总结

群体行为	算法	应用
蚁群觅食	蚂蚁优化算法	首先用来解决 TSP 问题, 之后推广到各种组合优化问题; 实际应用于网络路由的优化等
蚂蚁公墓形成、幼虫分类	LS 算法 KLS 算法	用于数据分析和图的划分
蚂蚁分工	任务分配算法	任务分配
群鸟觅食	粒子优化算法	函数优化问题、神经网络训练等

##### 1.1.2 蚂蚁聚类算法

某些种类的蚂蚁在打扫巢穴时, 聚集尸体形成一个“公

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(70171043)

**作者简介:** 王 玫(1980—), 女, 硕士生, 主研方向: 群体智能系统; 朱云龙, 研究员、博导; 何小贤, 博士生

**收稿日期:** 2004-10-07 **E-mail:** wangmei@sia.ac.cn

墓”，或者将它们的幼虫分成几堆。现在还无法充分阐释这种行为，但是有一个简单的模型，可以解释蚂蚁聚类或者分类中的某些特征。在该模型中，空间中随机运动的个体(如蚂蚁)根据局部的信息拿起或者放下某种物体(蚂蚁尸体或者幼虫)。这个模型可以被应用在数据分析上：具有不同属性的对象可被视为要分类的物体。由此受到启发得到蚂蚁分类算法，并且应用于数据挖掘的分类和聚类上。

### 1.1.3 粒子群优化算法

粒子群优化算法(PSO)是由 James Kennedy 博士和 R. C. Eberhart 博士于 1995 年提出的。该算法源于对鸟群、鱼群觅食行为的模拟<sup>[5]</sup>。在 PSO 中，首先初始化一群随机粒子(随机解)，然后通过迭代寻找最优解。在每一次迭代中，粒子通过跟踪两个极值来更新自己的速度和位置。第一个就是粒子本身所找到的最优解，这个解叫做个体极值；另一个极值是整个种群目前找到的最优解，这个极值是全局极值，另外也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居，那么在所有邻居中的极值就是局部极值。PSO 算法简单易实现，不需要调整很多参数，主要应用有神经网络的训练、函数的优化问题等。

## 1.2 群体机器人

群体智能最早被用在细胞机器人系统的描述中<sup>[2]</sup>，其中多个简单的机器人通过与近邻的交互产生一种自组织的模式。对蚂蚁、蜜蜂的分工、搬运、筑巢等行为的研究中，发现了社会性昆虫的自组织和自组装能力。以此为理论基础，展开了群体机器人自组织、自组装以及协作的研究。

### 1.2.1 自组织、自组装

社会性昆虫的巢穴结构往往复杂而精巧。蚂蚁筑巢过程中，与环境的交互分 2 种：连续的和离散的。离散的交互是指刺激因素类别不同，因而产生不同的反应；连续的交互是指由于刺激因素的量的不同而产生不同的反应。基于离散的交互和自组织提出一个模型，在这个模型中，个体在三维空间运动，依据它的周围空间的砖块的排布决定是否在当前位置放下背负的砖块，利用该模型实验的结果显示可以产生非常类似黄蜂巢穴的结构。自组装的机器人系统可以借鉴这个筑巢模型。

Swarm-bots 是由布鲁塞尔自由大学 IRIDIA 实验室 Macro Dorigo 领导的一个项目，该项目是为了研究一种设计和实现自组织和自组装的人工物的新方法。该项目的具体目标是建立一个由多个比较简单的，类似昆虫的机器人的群体 swarm-bots。这些机器人使用相对便宜的构件，具有自组织和自组装能力来适应环境。

### 1.2.2 多机器人协作

当一只蚂蚁发现了猎物，尝试搬动，如果不成功，则试着变换方向和位置，如果再次失败，就会召集同伴。召集同伴的过程中也会撒下信息素告知猎物的大小。蚂蚁合作搬运显示出远远高于个体搬运的优势，整体所能搬动的重量  $W$  和蚂蚁的个数  $N$  呈指数关系。所以蚂蚁整体显示出惊人的力量。蚂蚁之间通过影响环境来协调动作。搬运过程中，可能遇到死锁，它们会变换方向和位置解除死锁。

合作搬运行为是基于群体的机器人研究的基准任务之一。机器人学家对蚂蚁的合作搬运进行了建模，并设计了几个相互无通信、无中心控制的机器人进行推盒子的实验。这些机器人结构相同，各自有 3 个传感器和 1 个行为装置。传感器用来感知障碍物、其他机器人和目标。并定义了机器人

的 5 种动作<sup>[1]</sup>。

## 1.3 算法的实际应用

蚂蚁优化算法在电信网络的路由问题(ACR)上的应用已经比较成熟，HP 公司、英国电信公司都在 20 世纪 90 年代后期就展开了这方面的研究<sup>[6]</sup>。该算法也越来越多地应用于企业，如工厂生产计划的制定和运输部门的后勤管理。美国太平洋西南航空公司采用了一种直接源于蚂蚁行为研究成果的运输管理软件，每年至少节约上千万美元开支。英国联合利华公司已率先利用这种技术改善其一家牙膏厂的运转状况。美国通用汽车公司、法国液气公司、荷兰公路交通部和美国一些移民事务机构也都采用相应技术以改善其运转的机能。

近年来群体智能的应用有构建网站、优化搜索引擎、创建知识管理系统甚至进行音乐创作等。

## 2 发展趋势及展望

蚂蚁优化算法、粒子优化算法等为了解一类优化问题提供了新的思路，众多研究者纷纷给予改进，使之得到了扩展和完善，在解决某些问题方面表现出了比传统优化算法更好的性能，但是单纯对优化算法的研究很难再有其他大的突破。然而，生物群体拥有巨大的潜力供人们研究，目前还没有形成系统的理论，许多问题有待回答。以下几个方面将是研究的热点：刺激产生新的算法的生物群体的行为模型；各种算法的完善和结合在实际问题上的应用；群体机器人的研究；群体智能系统的底层机制的研究；系统的建模、仿真以及实际应用。

### 2.1 新的行为模型

如前所述，根据蚂蚁群体以及鸟群、鱼群等生物群体行为提出的算法都得到了广泛的应用。生物的奥秘是无穷的，从生物学甚至社会学的角度出发，新的有益的行为模式有待去发现和提炼。

### 2.2 群体智能系统的底层机制研究

#### 2.2.1 自组织(self-organization)

自组织是一种动态机制，由底层单元(部件)的交互而呈现出系统的全局性的结构。交互的规则仅依赖于局部信息，而不依赖于全局的模式<sup>[1]</sup>。自组织并不是外部的影响施加给系统而体现的一种性质，而是系统自身涌现出的一种性质。系统中没有一个中心控制模块，也不存在一个部分控制另一部分。

自组织的特点：通过利用同一种介质或者媒体创建时间或空间上的结构<sup>[1]</sup>。比如蚂蚁筑的巢、寻找食物时的路径等。

正反馈(positive feedback)群体中的每个具有简单能力的个体表现出某种行为，会遵循已有的结构或者信息指引自己的行动，并且释放自身的信息素，这种不断的反馈能够使得某种行为加强。尽管一开始都是一些随机的行为，大量个体遵循正反馈的结果是呈现出一种结构。

自然界通过系统的自组织来解决问题。理解了大自然中如何使生物系统自组织，就可以模仿这种策略使系统自组织。

#### 2.2.2 间接通信(Stigmergy)

群体系统中个体之间如何进行交互是个关键问题。个体之间有直接的交流，如触角的碰触、食物的交换、视觉接触等，但个体之间的间接接触更为微妙，已经有研究者用 Stigmergy 来描述这种机制：也就是个体感知环境，对此作出反应，又作用于环境。Grassé 首先引入 Stigmergy 来解释白蚁筑巢中的任务协调<sup>[1]</sup>。Stigmergy 在宏观上提供了一种将个体行为和群体行为联系起来的机制。个体行为影响着环境，又

因此而影响着其他个体的行为。个体之间通过作用于环境并对环境的变化作出反应来进行合作。总而言之，环境是个体之间交流、交互的媒介。从蚂蚁寻食到蚂蚁聚集尸体到蚂蚁搬运、筑巢，个体之间的通信机制总是离不开 Stigmergy 机制，对于环境的作用，通常由各种各样的信息素来体现。

### 2.2.3 涌现(emergence)

群体智能中的智能就是大量个体在无中心控制的情况下体现出来的宏观有序的行为。这种大量个体表现出来的宏观有序行为称为涌现现象。没有涌现现象，就无法体现出智能。因此，涌现是群体智能系统的本质特征。只知道孤立的个体行为并不能了解整个系统(如蚁群)的情况，仅仅研究孤立的部分无法有效地研究整体性质，因此，对涌现现象的研究必须既研究各个部分，又研究各个部分之间的相互作用<sup>[3]</sup>。

“遗传算法之父”约翰·霍兰在文献[3]中对涌现现象进行了较为深入的探索。他认为涌现现象的本质是“由小生大，由简入繁”，并且把细胞组成生命体，简单的走棋规则衍生出复杂的棋局等现象都视为涌现现象。他认为神经网络、元胞自动机等可算作涌现现象的模型。群体智能的涌现现象与系统论和复杂系统中阐述的涌现本质上是相同的，它是基于主体的涌现。1979年霍夫施塔特对基于主体的涌现作了描述，整个系统的灵活的行为依赖于相对较少的规则支配的大量主体的行为。研究群体智能系统，要弄清涌现现象的普遍原理，建立由简单规则控制的模型来描述涌现现象的规律。

### 2.3 群体机器人

由多个简单机器人组成的群体机器人系统通过协调、协作可以完成单机器人无法完成或难以完成的工作。相对于单个机器人，基于群体的机器人系统具有很大的优势：相互合作的N个机器人的能力远远大于一个单机器人的N倍；设计和制造多个简单机器人比单个复杂机器人更容易、成本更低；群体机器人系统的并行性和冗余性可以提高系统的灵活性和鲁棒性等<sup>[6]</sup>。研究群体机器人系统，目标是能够建立经济、灵活、健壮的系统去完成复杂的任务。

群体机器人系统的主要研究内容为群体机器人之间的交互、通信、协作与控制、机器人的自组装等。这些都可以从对生物群体的研究中得到启示。

(上接第161页)

## 6 结语

数字图像的几何变换算法，除了简单的图像平移算法以外，其他基本算法，如图像的缩放、图像的旋转，以及一些复合变换算法，从像素移动的角度来说，都是非线性的，也就是说，每个像素的移动偏移量是不相同的。本文研究的是如何在线性的PE阵列上进行这些非线性像素移动问题。文中提出的方法，通过图像像素和阵列PE的对应关系，从像素几何变换所需的像素偏移量入手，把几何变换问题转换成了阵列PE的移动问题。通过对几何变换过程中像素移动规律的研究，找到了在PE阵列上进行图像几何变换的方法，并从理论上证明了这种方法的正确性。

### 参考文献

- 1 沈绪榜. MPP 嵌入式计算机设计. 北京: 清华大学出版社, 1999-04
- 2 Braunl T. Parallel Image Processing. Heidelberg: Springer-Verley,

## 2.4 群体智能系统建模与仿真

对群体智能系统提出较为通用的模型将是今后研究的一个重点。该模型用来反映智能在群体系统中的涌现过程。建立这个模型，首先需要群体系统的基本的特征和机制有相当的理解。在此基础上，构建个体之间能够交互，具有一定学习能力的智能系统，进而解决具体的问题。

Swarm 平台是由美国桑塔费研究所开发的开放式仿真平台。Swarm 拥有可扩展的类库和精巧的架构，提供了用于多agent系统这样的设计、实现、运行和分析的工具。Swarm 的基本思想是：描述一系列独立的个体，通过独立事件进行交互作用。在Swarm中，个体行为的组合决定了整个群体的行为，而群体行为决定了个体作出它们行为选择的环境。利用Swarm平台进行群体智能系统的仿真，可以在一定程度上反映系统的自组织、间接通信和智能涌现的特点。

## 3 结论

在群体智能的范畴内，已经取得了相当多的研究成果。研究和掌握群体智能系统的特性与规律，是一个具有理论和应用两个方面重要意义的课题。它的发展，将为人工智能领域带来新的活力，提供解决问题的全新的角度和方法，同时由于它广阔的市场前景，也是和人类社会经济密切相关的，现实意义非常明显。可以预见，对群体智能的研究即将全面展开，必将在某些方面出现新的成果。

### 参考文献

- 1 Kennedy J, Eberhart R C. Swarm Intelligence[M]. USA: Academic Press, 2001
- 2 Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Swarm Intelligence—from Natural to Artificial System[M]. Oxford: Oxford University Press, 1999
- 3 约翰·霍兰. 陈禹译. 涌现——从混沌到有序[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001
- 4 Tarasewich P, McMullen P R. Swarm Intelligence: Power in Numbers[J]. Communication of ACM, 2002, 45 (8): 62-67
- 5 胡晓辉. 粒子群优化算法. <http://www.swarmintelligence.org/papers/cPSOTutorial.pdf>, 2002
- 6 张海英, 刘祚时, 林桂娟. 群体机器人研究的现状和发展[J]. 电子技术应用, 2004, 30(2): 1-3
- 7 Shi H, Ritter G X, Wilson J N. Parallel Image Processing with Image Algebra on SIMD Mesh-connected Computers. Advances in Imaging and Electron Physics, Academic Press, 1995,90:353-431
- 8 Argüello F, Amor M, Zapata E L. FFTs on Mesh Connected Computers. Parallel Computing, 1996,22(1):19-38
- 9 Chaver D, Prieto M, Piñuel L, et al. Parallel Wavelet Transform for Large Scale Image Processing. International Parallel and Distributed Processing Symposium (Symposium Volume), Fort Lauderdale, California, 2002-04
- 10 Roerdink J, Meijster A. The Watershed Transform: Definitions, Algorithms and Parallelization Strategies. Fundamenta Informaticae, 2000,41(1-2):187-228
- 11 Castlman K R. 朱志刚译. 数字图像处理. 北京: 电子工业出版社, 1998-09