

机器人 团结就是力量

它们所依托的“群体智能”技术源自对社会性昆虫群体行为和DNA演化的研究。相比单个超高性能机器人的单打独斗，该技术通过多个简单机器人协同工作来完成复杂任务。机器人的发展或将由此迎来颠覆性变革。

撰文 Pierre-Yves Bocquet
编译 李晓桦

背景资料

“群体智能”概念诞生于1989年，指的是非智能机器人采取集体智能行为的能力。

众所周知，人们的日常生活中，即将出现能够自主完成复杂任务的机器人。比如人形机器人、飞机机器人、汽车机器人等，它们往往极为先进，并且具有高级人工智能。然而机器人学的发展不会局限于这类计算性能顶尖的个体，另一种完全对立的思路正逐渐抬头：人工智能并不集中于单个机器人，而是以个体机器人团结协作的形式体现。

这些机器人若单独拉出来看，配置十分简陋：运算能力较差，时钟频率仅为几兆赫，内存只有几十兆，对应的控制算法很少上到200行代码。然而，与最为复杂的单体机器人相比，群体机器人同样可以完成艰巨任务，甚至能够做得更好！

何以能实现这样的壮举？因为这些机器人并非单打独斗，而是以数十个为单位，作为“群体机器人”一起行动。

复杂的超级有机体

这一愿景从最初设想开始实现，历时将近20载岁月。作为机器人技术、生物学、动物行为学和人工智能相互融合的产物，该技术自1990年代初诞生起，在很长一段时间里，仅限于理论和计算机模拟。而如今，情况终于有所改变！群体机器人学已然成为最有活力、最有前途的机器人学分支。“得益于元件成本下降，该学科重新受到关注，因为现在以1000个机器人甚至更大的群体规模来进行实验已不是什么难事。这在5年前还是无法想象的。”英国布里斯托大学助理教授、生物医学纳米机

MLBIRATTARI

群体机器人已能

这在动物界是智能体现的首要指标，而如今一群机器人首次共同确定了行动顺序。

右图中的群体机器人由二十来个小型机器人组成。小机器人配有轮子，需要按顺序经过三个位置不明的独立地点，且只有经过这些地点后，才知道行走顺序是否正确。为了让小机器人积累经验，研究人员对它们中的一部分进行编程，以一条机器人链的形式向其他小机器人指明接下来的行走

机器人专家萨宾·哈尔特（Sabine Hauert）兴奋地说。

群体机器人与传统机器人在研究方法上存在本质不同：前者着重通过低价易编程的数个低端机器人协作，共同完成复杂行为。“其目标是模仿那些在个体层面上认知能力低下，却能协同完成复杂任务的动物群体。”法国信息技术、信息处理与系统实验室（LITIS）研究员鲁道夫·夏里耶（Rodolphe Charrier）解释说。首选模仿对象包括擅长选择最佳路径运送食物回巢的蚂蚁，超级结构工程师白蚁，以及组成超级有机体共同抵抗天敌的棕鸟和鱼类。

这些动物群体的智能并非集中在某一个体，而是分散在所有个体。它们基于所处环境的简单规则，尤其是由相邻个体传递的信息而自主活动。信息由此被一步一步传递出去。这使得模仿它们的群体机器人具备极大弹性优势，在某一个体发生故障或丧失机能时，仍保有可操作性。“这便是分布式系统的价值所在：减少一个或数个成员，又或是重新补充，都不会影响到群体的整体行为。”比利时布鲁塞尔

实现自组织

路径。随着带头小机器人通过红外线信号互相传递结果，机器人链渐渐移动，直到指出类似GPS导航路线一般的正确路径，从而帮助其他小机器人确定目标位置，以及辨认行走顺序。“机器人链对集体认知进行了编码。简言之，群体中的一些个体通过所处的空间位置构成了该群体的集体记忆。”莫罗·比拉塔里如是总结，他与入合著的相关论文已于2018年7月发表。



▲在不断移动中，群体机器人形成了自己的集体记忆。

理工学院人工智能跨学科研究与开发研究所的莫罗·比拉塔里（Mauro Birattari）指出。

这种独特的分布式运作方法不存在控制中心，所以具有传统机器人无法企及的优势。试想一下，一群蜘蛛般的微型机器人能够潜入地震废墟，互相协作来找出被掩埋的幸存者；而一队无人侦察机可用来探测雷区中爆炸物的位置，或者勘察未知行星的表面。2018年7月，英国发动机厂商罗斯-罗伊斯就宣布，将通过内窥镜把成群袖珍机器人引入飞机发动机内部，以便对那些最隐蔽的组件进行检查。美国麻省理工学院的物理学家则索性设想，将体积更小的一大群纳米机器人注射入人体，以便瞄准癌细胞实施精准治疗……“在无法使用大型机器人的医疗行业、需要并行作业的建筑或农业领域，以及就个体而言有莫大风险的场合，群体机器人将发挥单个机器人无法替代的作用。”莫罗·比拉塔里预测。

打造群体机器人，得先编写出能产生此类分布式智能并且采取集体行为的计算机程序。这正是问题的症结所在：要令个体机器人团结

行动，这对整个学科的规则制定提出了更高要求，必需根据相应特点创建新的算法。

令人头疼的算法

群体机器人是一个复杂的系统：个体间互动很多，难以通过计算来预测整体行为。可能发生的情况很快便会无规律地纷至沓来，促发各种非线性现象，导致群体机器人出现预料之外的行为，比如局部聚集，或者相反，一些个体脱离团体。“从个体层面很难演绎出人们所

我们终于可以开展个体数量达到1000甚至更大规模的群体机器人实验，这在5年前还是无法想象的

萨宾·哈尔特
布里斯托大学生物医学
学纳米机器人专家

期望的整体行为。”萨宾·哈尔特概括道。在某种层面上，群体机器人就像是黑匣子：我们知道我们想让它们干什么，比如勘察地形、避开障碍物、找到一个特定目标、完成运输等，却不知道如何给每个个体编程才能获得相应的结果。这不仅是一个数学难题，也是一个算法难题。对此，研究人员采取不同方法，开展大量研究予以解决。其中三种方法近年来取得了引人瞩目的突破。

第一种策略可以说是群体机器人的“DNA”里自带的：模仿大自然，对昆虫的行为进行编码，然后将程序移植到机器人身上。一套基于仿生学的“蚁群算法”应运而生。“其理念是模仿蚂蚁的行为。它们能够找到最短路径，并且在所到之处留下信息素。路径越短，往来的蚂蚁就越多，释放的信息素量也越大。蚁群算法再现了这种行为：虚拟个体在一定图形上移动，并且会在一些地点留下虚拟信息素。”该算法的发明者、比利时科学研究基



▲ 这些无人机能够实时优化飞行速度以及邻里之间的距离。

金会（FNRS）研究主任马可·多里戈（Marco Dorigo）解释说。

这个方法看似简单，却能解决一类最复杂的数学难题“NP 完全问题”——例如经典的推销员旅行问题，其难点是找到拜访多个城市的最短路径。“这类算法的优势在于，只要留足运算时间，总能找到解决问题的最佳方案。”鲁道夫·夏里耶兴奋地说。

其他模型也有从蜜蜂身上汲取灵感的：蜜蜂找到食物时会跳舞，食物质量越高，舞蹈的强度就越大，从而能招募到更多的蜜蜂同行。在一个强度可调的简单光源助力下，研究人员通过计算机程序将此能力转化到机器人身上。甚至还有效法鱼群的，比如右页辅文介绍的在威尼斯大显身手的水下群体机器人。

只是，从动物身上找寻灵感的策略很快便会遭遇瓶颈。马可·多里戈坦承：“群体机器人的行为应当效法自然，并且能够规范化，但情况并非总是如此。”解决之道是使用元启发式优化算法，也就是依托于解决复杂组合问题的专门软件。这里仍然可以借助蚁群算法：不是将该算法直接植入机器人，而是作为计算优

只要我们留足运算时间，这类算法总能找到解决问题的最好办法

鲁道夫·夏里耶
法国信息技术、信息处理与系统
实验室（LITIS）研究员

探测并避开障碍物

30架速度达30千米/时的无人机协调飞行，避免了在有限空间内互撞——这是在如此速度条件下进行的群体性探测与障碍物回避的首次实地演练结果。无人机群实际上极为敏感，更何况还要克服障碍物、风或其他环境因素干扰。为此，匈牙利专家加博尔·瓦萨赫伊（Gábor Vásárhelyi）及其团队在上百架虚拟无人机上测试一种进化算法。经过数代进化，计算机终于选出合适的代码，创建了能够实时优化无人机速度与安全间隔距离的新算法。

彼此不同仍能协作

2017年9月，在威尼斯潟湖，由三种不同的机器人（aMussel、aFish、aPad）组成的群体执行了一次别开生面的协作。aMussel待在水底调研水质；aFish像鱼儿般游动，把自己的测量数据传输给aMussel；而两者浮上水面时，都会在aPad处充电。为了操控这些机器人，研究人员开发

出一种受电鱼和萤火虫启发的算法，来克服它们彼此之间的通信挑战。“威尼斯潟湖环境复杂：水体混浊，还有各种垃圾和船只。”SubCULTron项目总指挥托马斯·施密克（Thomas Schmickl）强调，“所以我们运用了各种通信方式，包括闪光、声音和电流等等。”



▲ 这些个体机器人采用数种通信方式。

化来编写代码行，使所有的个体机器人遵循简单规则移动（改善内聚性以形成队列，排成直线以保持行进方向等）。这些规则借鉴了人工生命程序，例如计算机图形专家克莱格·雷诺兹（Craig Reynolds）开发的Boids，一种用来模拟鸟群飞行的算法。现在，需要引进一个随机数，促使群体机器人行为多样化；还要根据其行为准确与否给出或高或低的分数，来

巩固正确的反应。接下来只需运行该模型直到获得最高分。“这些算法可以模拟巡逻，或取回特定物品、包围一个目标等。”法国索邦大学智能系统与机器人学研究所（ISIR）研究员尼古拉·布勒代什（Nicolas Bredèche）举例道。

第二种方法借鉴了生命的演化：惊人的“进化算法”模仿了DNA在世代交替中的遗传

和优胜劣汰方式，并将之应用于编程，最终获得一套适用于群体机器人所需行为的程序。为此，研究人员将一些进化算法植入上百个虚拟机器人后进行模拟，从中筛选出最佳算法；然后，通过混合代码并引入随机突变，令这些算法以符合遗传学的方式自行重组。经过一定

群体机器人可控吗？

有些机器人的智能好比黑匣子，即使设计者本人也几乎一无所知。能否信任机器人，是人工智能的一大难题。这对于群体机器人而言尤为突出。“在认证时会出现不少困难，不仅在技术层面，还需要就伦理和社会方面作答。”莫罗·比拉塔里预测说。为此，专家们仍在探寻基于相关算法的解决方案，以期通过监测程序实时控制群体机器人的行为。英国谢菲尔德大学已经以 600 个机器人为对象完成了首次测试。

次数的世代更替，研究人员便能获得使群体机器人完成指定行为的算法。一支匈牙利研究团队便据此找到了最佳设置，使无人机在呈紧凑队形飞行的同时避免相撞。“唯一的小问题是，我们并不是每次都能解释为什么该算法能完成既定行为。”萨宾·哈尔特笑称。而加快算法选择需要强大的计算能力配合，适合在实验室环境下找到需要灌输给机器人且很难通过编程让它们自发产生的行为。然而群体机器人的意义在于它们有能力根据个体间的交互和自身经验进行现场学习并演化。

第三种办法正是以这些能力为基础开发

的，就是所谓的“粒子群优化（PSO）”。“在这种算法里，每个个体都朝着被视为正确的地点移动，”该算法专家莫里斯·克莱克（Maurice Clerc）解释说，“只不过同时牢记着最后所处的正确位置，并将之共享给 5 到 6 个与自己直接相邻的个体。”该算法相当简单，仅数十行代码，却能快速聚集无人机群并重现出鸟群的飞翔模式。

这些方法还有一个共同的问题。“一旦用于真实的机器人，不可能总是运作正常。”萨宾·哈尔特指出，“当我们增加一个机器人，或是它们中的某个发生故障，可能会导致整个群体失灵，即便这是不应该出现的。”尼古拉·布勒代什也很肯定：“真实的机器人并不完美，行为有可能与虚拟模型不同：它们多少会有些偏离轨道，并不会总是沿着规定的方向行进。”所以，使算法更加稳定是一项亟待解决的艰巨任务。只有这样，初始条件发生的细微变化才不会最终演变成群体机器人大规模失控从而发生撞毁事故，或者出现危及人类安全的行为……

如此，方能研制出可行走、可进化、可协调、群体智能高于所有个体之和的群体机器人。这难免令人联想到电影《黑客帝国》和《少数派报告》中出现的蛛形机器人大军……真是令人既兴奋又不安的前景。 ■