

从复杂性的观点来理解动物行为

周登勇 戴汝为

(中科院自动化所人工智能实验室 北京, 100080)

社会性昆虫的复杂的行为经常令人叹为观止[17]。一群行为显得非常盲目的蜜蜂,能够造出精巧的蜂窝[1-2, 5-7, 13];一窝毫无头绪的蚂蚁能协作起来搬动一个比任何一个个体大得多的实物[18]。这样的例子枚不胜数。社会性昆虫是怎样协作起来的呢?许多动物行为学家一直在苦苦思索内部的协作机制。让人立即猜测的一个假设是昆虫社会中存在一个领导者,它指挥与协调其他昆虫的行为。那么这个领导者的组织才能是怎样得到的呢?一个最简单的解释是进化来的。也可能有另外一种假设,认为每个昆虫头脑中都有一幅建设蓝图,每个昆虫都依这幅蓝图行事。当然,这幅蓝图也是在漫长的进化中形成的。我们总是试图用最简单的方式解释自然界,显然上述两种假设在这一点上并不太令人满意,它们好象把问题的复杂部分一股脑儿推到进化的里头去。近年来,无通讯协作的思想占据了大多数动物行为学家的观点[10-13]。这种思想的基本观念是不需要领导者或者蓝图的假设,也不需要昆虫之间存在明显的信息交流,每个昆虫只需要针对自己周围的环境作出适当的反应,整个群体就能完成一件在旁观者看来非常复杂的任务。个体的行为简单、盲目而且带有随机性,整体的行为却是连贯、流畅与一致的。这无疑是一个非常令人着迷的想法。让我们从现在开始带着这个观点分析几种社会性昆虫的行为,这将会让人深深感到无通讯协作的思想是多么的精彩!

1 蚂蚁排序行为

动物行为学家曾仔细观察过一种这样的白蚁群体行为[12]。他们在白蚁巢的周围随机分布许多死的白蚁。第二天,死的白蚁被堆成许多小堆。第三天,死的白蚁被堆成几个大堆。最后,所有的死白蚁被堆成一个大堆。动物行为学家对白蚁的协作机制做了如下推测:如果白蚁碰上一个死白蚁,就将它背起来;如果它再碰到一个死白蚁,就将所背的死白蚁放下来。每个白蚁只需遵循这两条基本规则,整个白蚁群体就能将所有死白蚁堆在一起。需要注意的是,这里并没有对白蚁的行走路线做任何的规定,也就是说,白蚁可以随机游走。检验假设是否正确的最好办法是做一个仿真实验。如果仿真实验能重显白蚁的这种群体行为,那么我们可以认为这个假设是正确的,反映了白蚁的这种群体行为的本质。仿真实验有两种可以采取的形式,机器人式的仿真或动画式的仿真。这两种仿真模式各有利弊。我们下面将要介绍的是动画式的仿真。

在仿真之前,我们有必要将这个问题完全明确化。首先,我们将空间看成由方格构成的二维离散空间。时间也是离散的。每只死的白蚁占一个方格。白蚁在每个离散的时间步只能

沿周围的八个方向移动一格。白蚁只能感知自己当前所占据的方格是否有死的白蚁。如果所在位置存在死的白蚁，那么白蚁可以将死白蚁运到任何一个没有死白蚁的位置放下来。当然，在搬的时候，同样每个离散的时间步只能移动一格。这些可以看成问题的条件部分。最终的要求是所有的死白蚁被堆在一起。堆在一起是一个非常形象的说法，容易让人理解，但还是需要一个明确的定义。如何定义堆的含义呢？所谓的堆，就是将格子空间分成两个区域。

我们可以将以上论述图示如下：

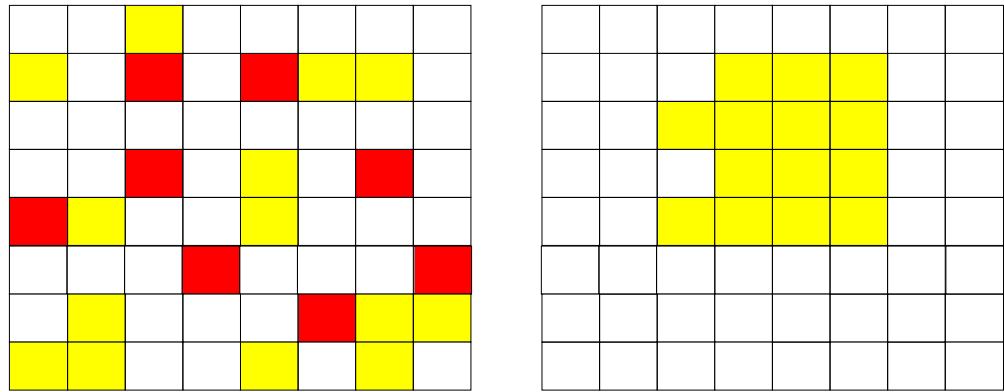


图 1.1 白蚁排序行为

在图 3.1.1 中，红色表示白蚁，黄色表示死的白蚁。左边的图表示初始状态，右边的图表示一种满足要求的终结状态。下面的堆就没有达到要求，它们均把空间分成三个区域。

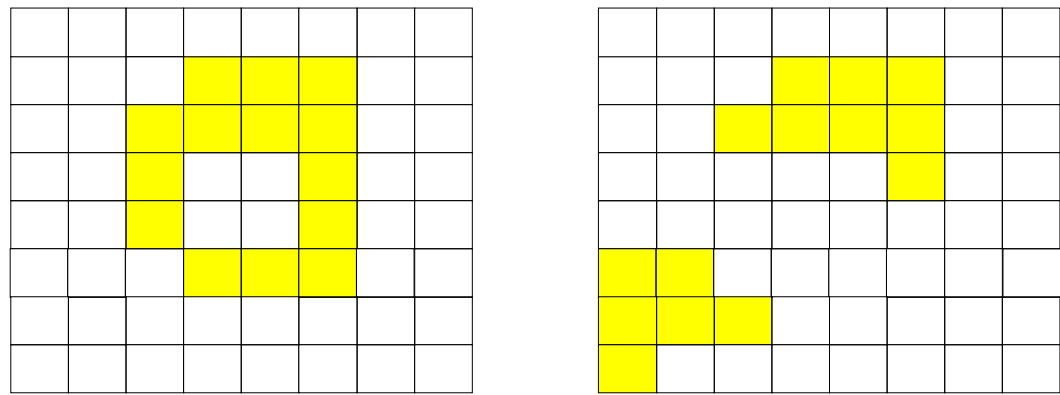


图 1.2 不符合要求的堆的形状

在前面我们已经说过，每只白蚁只需遵循两条规则：如果白蚁碰上一个死白蚁，就将其背起来；如果它再碰到一个死白蚁，就将所背的死白蚁放下来。现在，在我们当前的虚拟的仿真环境中，将这两条基本规则进一步细化。每只白蚁的工作流程是：（1）如果所在的方格有死白蚁，背上没背死白蚁，就把死白蚁背起来，然后随机选择一个方向移动一个方格。（2）如果所在的方格有死白蚁，背上还背着死白蚁，那么就随机选择一个方向移动一个方格。如果该格没有死蚂蚁，就把这只死蚂蚁放下来。否则，继续随机选择一个方向移动一个方格，直到发现一个没有死白蚁的方格而将背上的死白蚁放下来，然后随机选择一个方向移动一个方格。（3）如果背上没背死白蚁，而所在的方格又没有死白蚁，那么就随机选择一个方向移

动一个方格。

用有限状态自动机刻画蚂蚁的行为非常方便。我们可以选择如下三个状态：搜索死白蚁的状态（状态 1）；寻找新的死白蚁的状态（状态 2）；寻找空格并放下背上的死白蚁的状态（状态 3）。刚开始，所有的白蚁都处于搜索死白蚁的状态，即状态 1。在该状态下白蚁只是随机游走。一旦发现了死白蚁，就将它背起来，进入寻找新的死白蚁的状态，即状态 2。进入该状态后白蚁仍是随机游走。在状态 2 下，如果又发现一个死白蚁，转入状态 3。在该状态的任务是发现空格。一旦发现空格，放下背上的死白蚁，又回到状态 1。

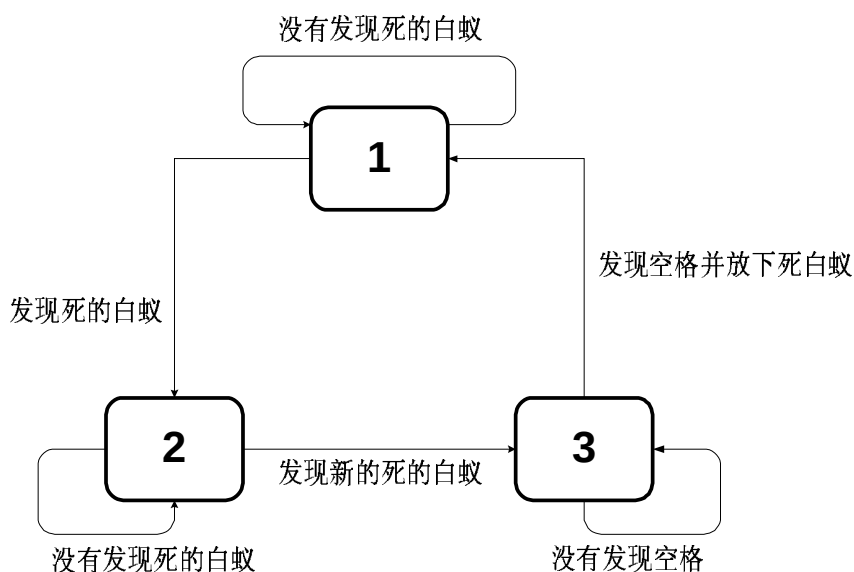


图 1.3 白蚁的大脑——刻画白蚁行为的有限状态自动机

图 3.1.4 是在仿真系统运行过程中捕捉下来的一系列的图象，时间上的顺序是从左至右，从上至下。从图片上我们可以看出，初试的随机分布的死的白蚁先被堆成许许多多的小堆。慢慢地，堆变大，堆的数目变少。接下来，变成三堆、两堆、乃至一堆（注意空间是环绕的）。计算机的仿真与实际的观察是一致的，这表明我们关于白蚁协作机制的假设是合理的。

我们可以对白蚁的行为作一直观上的理解。刚开始，死的白蚁被分成若干小堆，依照白蚁的行为这是显然的。问题的关键是，由于白蚁行为的随机性，这些堆的大小并不一样。一个堆越大，它被背着死白蚁的白蚁碰上的几率越大，这意味着这个堆更容易得到死白蚁，从而使这个堆变得更大。这形成了一个所谓的正反馈。可以推测，最终形成两个堆几乎是不可能的。因为只要其中一个堆稍微占点优势，就是说稍大于另一个堆，那么这种优势通过正反馈而被迅速放大，从而最后两堆合成一堆。当然可以假设最后达到的两堆的大小可能完全相同，没有任何一堆占优势，那么最终的结果是两堆，而不是一堆。是这样的吗？我们可以想象，达到大小完全相同的两堆的几率几乎是微乎其微。即便如此，由于白蚁行为的随机性，这种平衡是很容易打破的，正反馈迅速发生作用，最终将两堆合成一堆。

对于白蚁的集体行为，有一个很值得分析的数学问题。对于一个给定的死白蚁的分布密

度，需要多少只白蚁才能最快地完成任务。通过分析极端的情形，我们相信存在一最佳值。一般说来，两只白蚁能比一只白蚁更快地完成任务。但是，如果死白蚁的分布密度很小，而白蚁很多，那么完成任务的效率肯定不高，因为内耗太大。

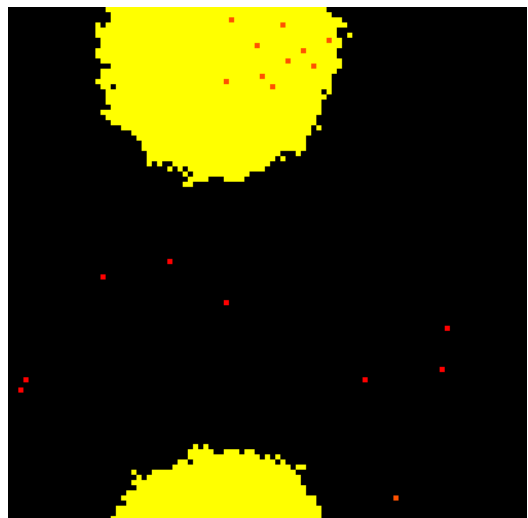
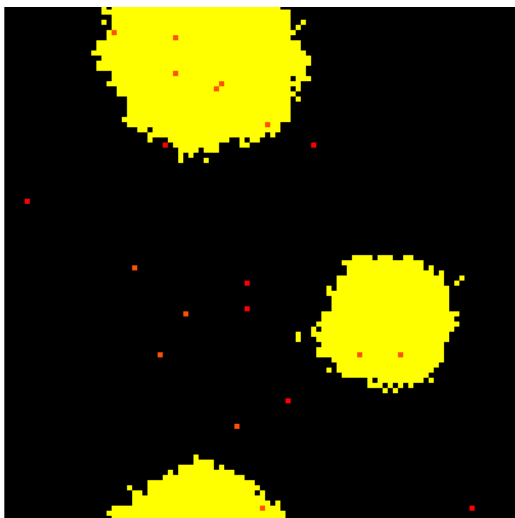
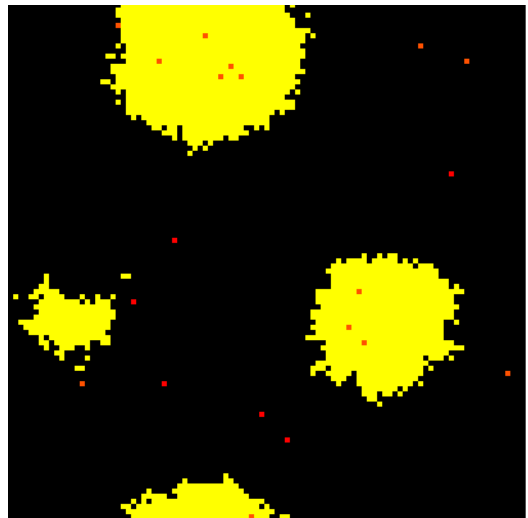
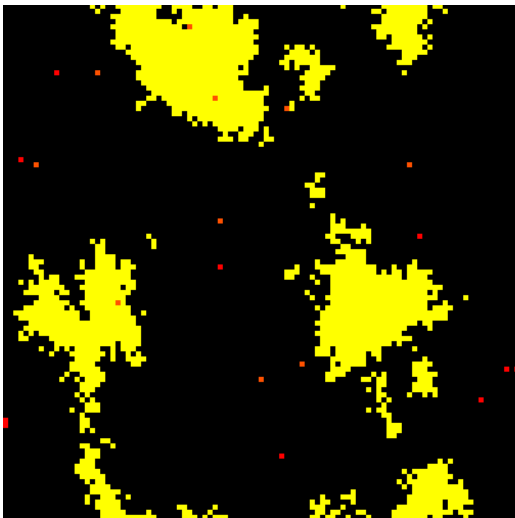
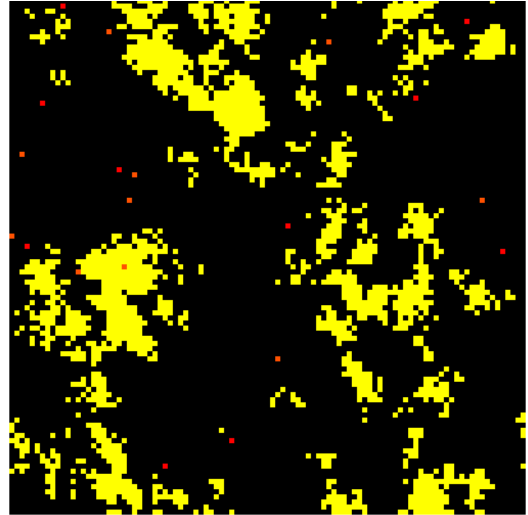
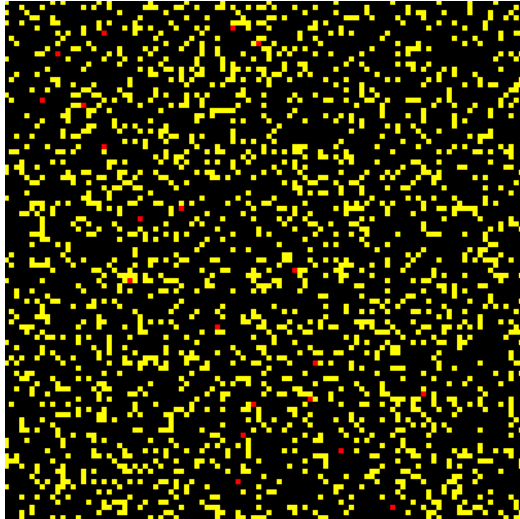


图 1.4 白蚁集体行为的仿真结果

这个问题存在一些变种。比如，我们可以扩大白蚁的感知范围，使它们可以知道所在位置的周围八个邻居的状态。这时我们需要对白蚁的行为规则作一点修改。如果周围的死白蚁较多，那么在该位置拾起死白蚁的概率较小，放下死白蚁的概率较大；否则，在该位置拾起死白蚁的概率较大，放下死白蚁的概率较小。我们还可以增加死白蚁的类别。比如说，存在两类死白蚁，要求将它们按类别分成两堆（图 3.1.5）。这个问题的处理是显然的，只需将每个类别分别按照上面所述算法分别对待即可。

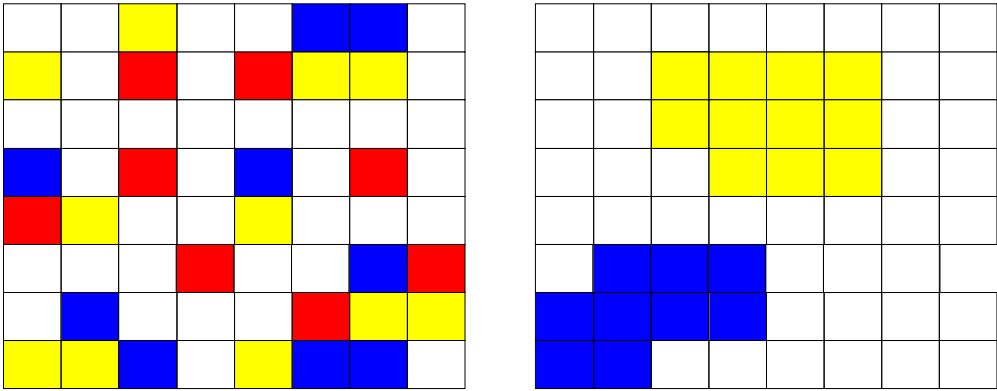


图 1.5 将不同类别的死白蚁按类别分堆

当然，我们还可以将死白蚁堆成指定的形状（图 3.1.6）。比如说，存在三种类别的死白蚁随机分布在方格空间。现在要求将第一种排在最左边，第二种紧挨着第一种，第三种紧挨着第二种[14]。

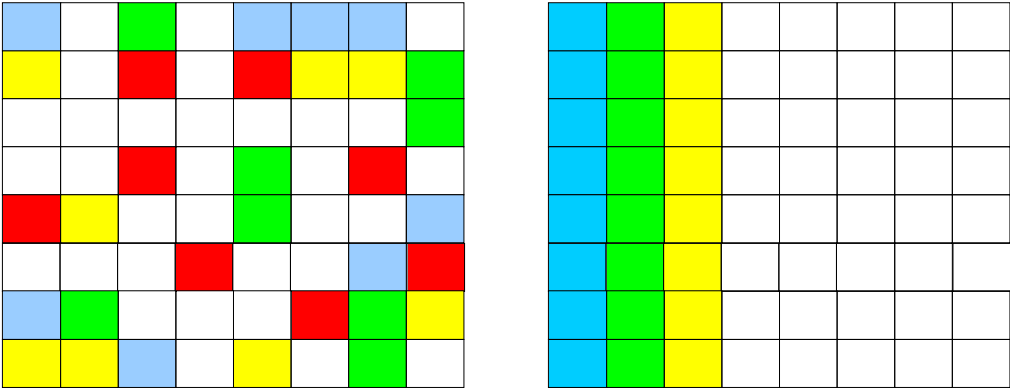


图 1.6 将死白蚁排成规定的形状

一般说来，发现一个导致某种整体行为的局部作用规则是一件非常艰苦的工作，可以考虑用演化算法发现这些规则[14]。

另外，我们这里所设计的算法是否与真实的白蚁协作机制相符是一件值得考虑的事情。至少，可以考虑是否还存在别的与这一样简单的机制实现白蚁的群体行为。

我们还可以考虑利用类似的思路去解决其他领域的问题，比如说某种优化问题，可能使一些困难的问题豁然洞开或者比以前的方法更有效，至少提供了一个解决老问题的新途径。

其实, 对于一个具体的生产实践中问题百思不得其解的时候, 到自然界中寻找类似的问题, 从自然界发现有效的解决办法, 是一个非常吸引人的解决问题的思路。遗传算法, 人工神经网络、模拟退火算法就是这样的一些例子。不过, 我们这里的观点包含着对一个具体的问题寻找一个对应的具体的自然界或社会的例子, 由这个例子启发出来的算法只对这个具体的问题有效。通常, 具体问题具体分析, 会比使用普适算法更有效。

3.2 蚂蚁觅食行为

蚂蚁觅食行为是动物行为学家非常感兴趣的一个对象[10, 11]。蚂蚁在觅食的时候, 总是集中兵力先搬离蚁窝较近的食物源, 然后又集中到次近的食物源, 而不是平均分散到各个食物源。动物行为学家在进一步的观察中发现, 蚂蚁在搬食物回巢的路上撒下一种激素, 以吸引其他的蚂蚁来到这条路上。是否这就足以解释蚂蚁觅食行为呢? 不再需要别的假设吗? 比如说, 假设存在一只蚂蚁王在指挥其他的蚂蚁? 回答这些问题的最好办法就是作仿真实验。与白蚁排序行为类似, 有计算机仿真与机器人仿真两种形式。我们在这里介绍的是计算机仿真。

在仿真之前, 我们有必要把问题在虚拟的格子空间中进一步明确化。这种明确化的过程实际上是抓住问题的主要因素, 获得一个可靠的能说明问题的简化模型。这个过程实际上是非常困难的。明确哪些因素起着本质的作用, 常常依赖于一个人的经验与直觉。经常可能发生的情况是把一些次要的细节仿真得非常详细, 而该注重的因素却被忽略或作了一个过于简单的处理。

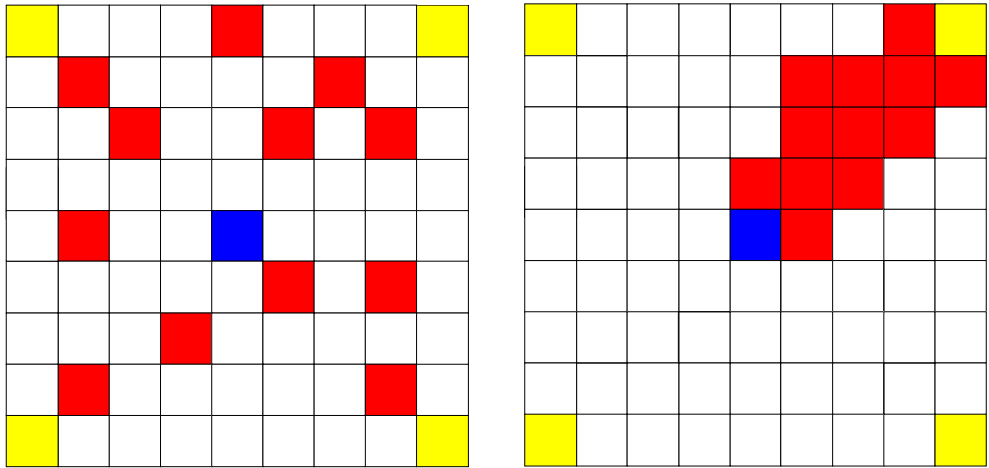


图 2.1 蚂蚁觅食行为的计算模型

在上图 3.2.1 所示的计算模型中, 位于四个顶点的黄色方块表示食物源, 位于正中间的绿色方块表示蚁巢, 随机分布的红色方块表示蚂蚁。食物源所包含的食物被认为是无限的。当然, 假设蚁窝可以存放任意多的食物。做这种假设的目的在于突出问题的关键: 蚂蚁是否最终集中到其中某一个食物源上 (如图 2.1 的右图所示)。

对蚂蚁的假设包括感知与激素分泌两个方面。蚂蚁的感知范围是周围的八个邻居。感知的内容包括是否有食物、是否是蚁巢以及激素的含量。蚂蚁在得到食物往回搬那一刻开始释放激素，直到将食物运到蚁巢之中。蚂蚁分泌激素的方式有多种可能性，一般会采取以下两种之一：一是均匀分泌；二是刚开始分泌得多，然后逐步减少，直到某一个最小值就不再减少。

激素的计算模型采用前面介绍的一阶扩散模型。也就是说，在每一个离散的时间步，每一格中的激素都向周围的上下左右四个邻居扩散。每格在扩散之后的激素量是原有的激素量加上由邻居扩散来的激素量并减去该格扩散到邻居里去的激素量。邻居扩散来的激素量是邻居激素量的平均值乘以扩散常数，由该格扩散到邻居里去的激素量是该格激素量乘以扩散常数。用公式表示就是：新的激素量 = 老的激素量 + (邻居激素量的总和 / 4 - 老的激素量) * 扩散常数。在计算完扩散量之后，新的激素量进一步用挥发常数校正：新的激素量 = 新的激素量 * 挥发常数。注意，扩散常数与蒸发常数均在 0 ~ 1 间取值。可以考虑用二阶扩散模型取代一阶扩散模型。甚至可以用别的一阶扩散模型取代这里的一阶扩散模型。

除了上面所讲到的觅食激素，还有一种蚁巢激素，是由蚁巢散发出来的。蚁巢激素既不挥发，也不扩散。每一格的蚁巢激素量决定于该格与蚁巢的距离。引入蚁巢激素的目的是引导蚂蚁回巢。这种通过激素引导回巢的作法已通过仿真证明是可行的，包括计算机仿真与机器人仿真。这种做法的优点是蚂蚁通过局部的环境就自行可以决定回巢的路线，而不需要一个全局的引导。一般将蚁巢所在位置的蚁巢激素定位最大值，其余各处的激素量与它到蚁巢的距离成反比。蚂蚁只要保证在任何一点都是沿着蚁巢激素较高的方向移动就可以回到蚁巢。一般认为蚂蚁会非常顺利地回巢，实际上并非如此。

现在我们开始设计蚂蚁用于觅食的行为规则。好象这是一件很简单的事。如果所在位置就有食物，就将食物搬回巢并沿途释放激素。否则，蚂蚁只要沿着激素浓度最高的方向走即可。如果存在多个浓度最高的方向，就随机选择一个。实际上的算法并不是这样设计，而是选择两个阈值决定蚂蚁的行为。不妨将一个称为低阈值，一个称为高阈值。如果所在位置的激素量低于低阈值，蚂蚁随机行走一步；如果所在位置的激素量高于高阈值，保持原来的移动方向并前进一步；如果所在位置的激素量处于低阈值与高阈值之间，选择激素量最高的方向作为移动方向并前进一步。

采用有限状态自动机能更方便地阐述蚂蚁的行为。这个有限状态机包含四个状态：吸引状态、搜索状态、跟踪状态与搬运状态。状态转换规则如下：

- (1) 所有蚂蚁的初始状态均是搜索状态。如果所处的位置有食物，转入搬运状态；如果所处位置的激素量高于低阈值，转入吸引状态；否则，随机游走。
- (2) 对于处于吸引状态的蚂蚁，如果所处位置的激素量低于低阈值，转入搜索状态；如果所处位置的激素量高于高阈值，转入跟踪状态；否则，沿着激素量最高的方向移动。

- (3) 对于处于跟踪状态的蚂蚁，如果所处位置的激素量低于低阈值，转入搜索状态；如果所在位置有食物，转入搬运状态；否则沿着以前的方向移动。
- (4) 对于处于搬运状态的蚂蚁，蚂蚁将依据周围蚁巢激素的分布回巢，然后转入搜索状态。

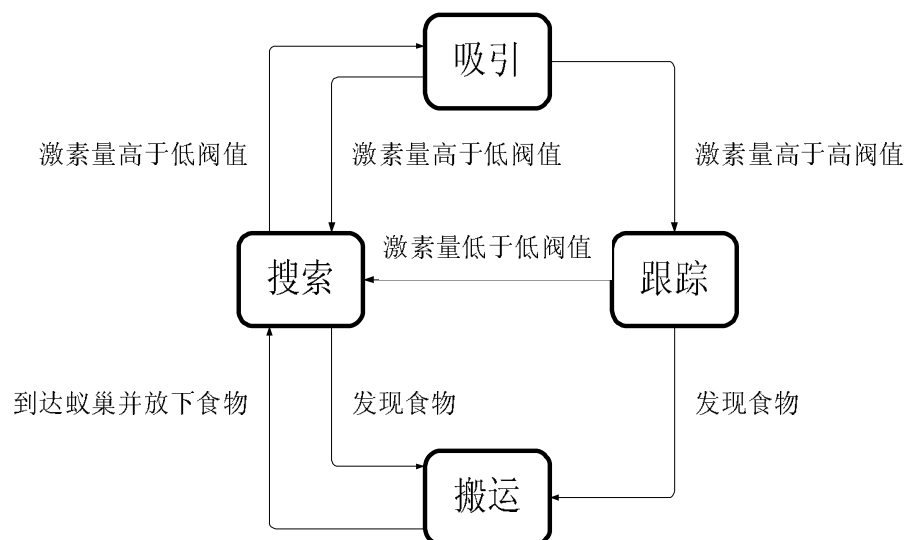


图 2.2 蚂蚁的大脑——刻画蚂蚁觅食行为的有限状态自动机

处于吸引状态的蚂蚁的基本行为是从周围的八个方向中挑选一个激素量最高的方向移动。但是，在具体的算法设计的时候，只考虑三个方向：正前方、左上方与右上方。也就是说，从这三者之中选择一个激素量最高的作为移动方向。蚂蚁沿着蚁巢激素回巢时也只考虑三个方向。已经尝试了考虑周围八个方向的方式，效果不好。

以下是我们在仿真过程中所使用的基本参数如图 3.2.3 所示。

蚂蚁总数	150
扩散常数	0.5
蒸发常数	0.95
最高激素释放量	60
每步激素递减量	1.5
最低激素释放量	1.0
低阈值	0.05
高阈值	6

图 2.3 仿真参数

图 3.2.4 列出了仿真过程中的一系列快照。系统初试化时，所有的蚂蚁均处于蚁巢。刚开始，蚂蚁只是随机游走。一旦发现食物，开始释放激素。在仿真的初始阶段，各食物源处的蚂蚁都差不多。慢慢地，有些食物源没有蚂蚁光顾了。接下来，蚂蚁几乎都集中到其中的两堆食物上。最后，所有的蚂蚁都去搬运某一堆的食物去了。仿真结果与动物学家的观察是相符的。这表明我们用漫画般的方式仿真的蚂蚁抓住了蚂蚁觅食行为的本质。

从直观上分析一下蚂蚁觅食行为的仿真结果是有意义的。在蚂蚁觅食的过程中，行为模式分布在三个层次。微观层次是蚂蚁的局部的有些盲目的行为，依据周围激素的分布决定自己的移动方向。中观层次是激素的扩散与蒸发，形成激素在空间分布的一种模式。宏观层次是有序的蚁群的觅食行为。中观层次沟通了微观层次与宏观层次，是自底向上的阶

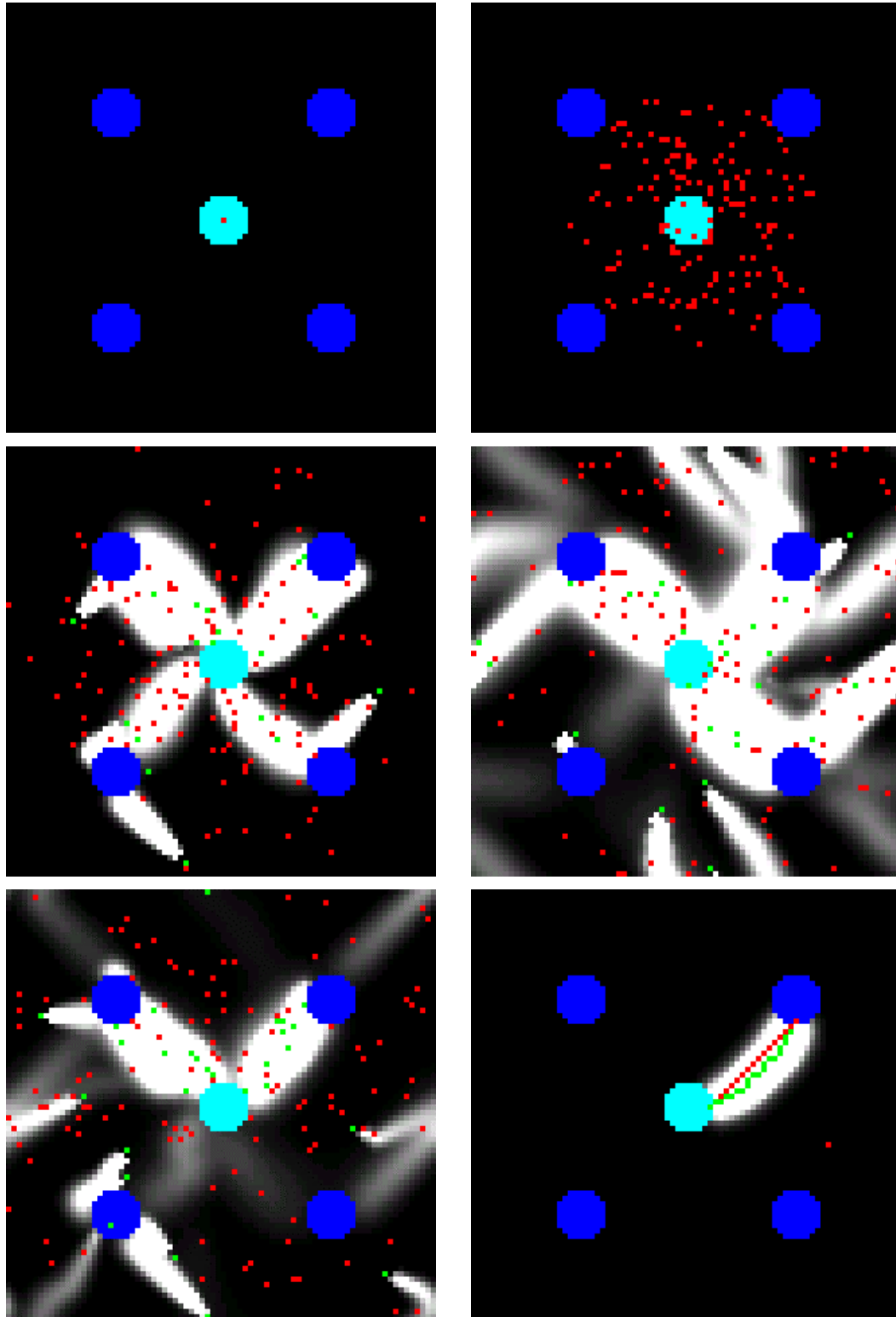


图 2.4 蚂蚁觅食行为仿真快照

梯。一旦某个食物源处的蚂蚁由于某种原因（甚至一种偶然的因素）比其他食物源的多，那么从该食物源到蚁窝的路径上的激素也就相应地较多，而这又反过来吸引更多的蚂蚁来到这条路径上，从而使这条路径不断得到加强。反之，一旦某个食物源处的蚂蚁由于某种原因（甚至一种偶然的因素）比其他食物源的少，那么从该食物源到蚁窝的路径上的激素也就相应地较少，而这又反过来导致难以吸引更多的蚂蚁来到这条路径上，从而使这条路径不断地减弱。这就是一种所谓的正反馈机制。

但是，并不是任何时候正反馈都能否发挥作用，而是与参数的选择密切相关。如果蚂蚁太少，而激素蒸发得又快，那么路径就不容易被强化；反之，蚂蚁的数目较大，而激素挥发得较慢，那么路径就容易得到加强。两个阈值的选择也影响路径的形成。如果高阈值过高，无法形成固定路径；反之，如果高阈值过低，会得到多条被强化的路径。如何选择合适的参数是一个棘手的问题，最好为此做一个严格的数学分析。

基于蚂蚁觅食模型的优化算法已经出现，并用于网络数据包的路由算法之中[15]。我们在这里讨论的是计算机仿真模型。多机器人的协作可参见[8，9]。

3 鸟的群集行为

我们经常看到鸟一群一群地在空中飞翔，但是一般很少有人去认真思考一下鸟是怎样聚集成群的。即使有人提到这个问题，一般人立即想到的答案是存在一只领头鸟，也就是飞在最前边的鸟。真实这样吗？在研究这个问题之前，我们有必要先把这个问题进一步明确一下。聚集成群的含义是什么呢？从背景的角度看，鸟应形成一个明显不同的群体。特别是以另一群鸟为背景。从在空间的分布上来看，应是均匀分布，互相之间不会产生碰撞。从总体的飞行来看，应该有一个总的运动方向。图 3.1 给出了由随机分布到聚集成群的形象刻画。

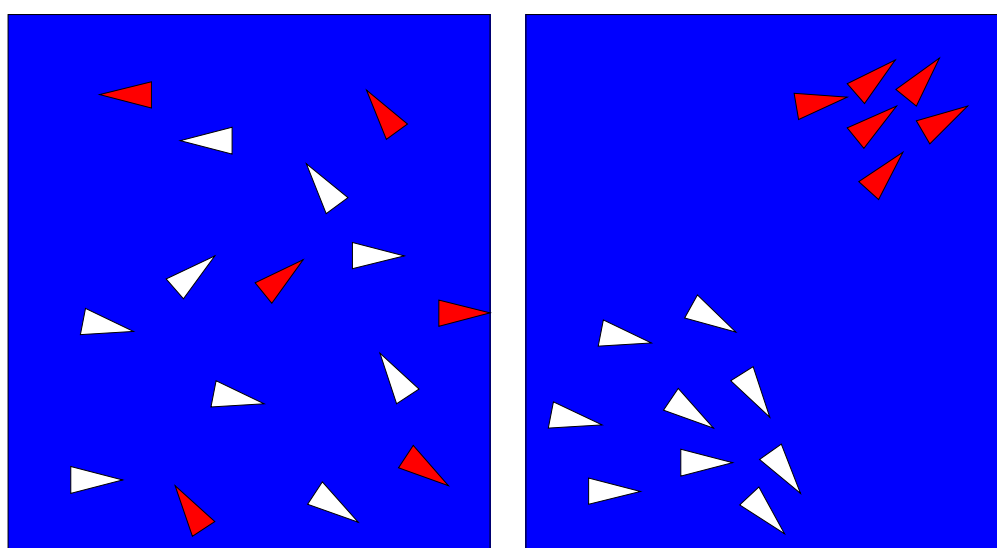


图 3.1 鸟的群集行为

近来的研究表明，我们并不需要一只领头鸟的假设。要想鸟聚集成群，只需每个鸟遵循

几条局部的相互作用规则[2]:

- (1) 分隔规则: 避免本地群集伙伴过于拥挤;
- (2) 匹配规则: 遵从本地群集伙伴的普遍方向;
- (3) 聚集规则: 朝本地群集同伴的中心移动。

鸟的群集行为是一个从局部的相互作用到大范围模式突现的一个良好范例。检验我们假设的鸟的相互作用规则是否正确的一个有力的实验手段是计算机仿真。

与前面的例子类似, 在仿真之前, 进一步将相互作用规则细化。我们先提出一种细化方案, 然后再研究其他的方案。首先我们考虑分隔规则的准确含义。显然, 我们必须定义一个鸟与鸟之间的最小距离。一旦两只鸟之间的距离小于最小距离, 我们必须让它们分开。分开它们的最基本的方法是让它们飞行的方向相反。所以分隔规则可以描述为如果距离自己最近的鸟小于最小容许距离就朝与之相反的方向飞行。我们再用同样的思路来细化匹配规则的详细含义。很容易想到的一点是, 如果与距离最近的鸟的距离大于最小距离, 那么就与它的飞行方向保持一致。但是就这一点还是不够。如果对两只相距较远的鸟还采用这种做法, 就无法使鸟聚集成群。所以我们必须定义一个最大距离。有了最大距离, 匹配规则就可以定义为如果与距离最近的鸟的距离大于最小距离而又小于最大距离, 那么就与它的飞行方向保持一致。最后我们来考察聚集规则的细化。这已经是很显然的了。聚集规则就意味着如果与距离最近的鸟的距离大于最大距离, 那么就朝它所在的位置飞行。

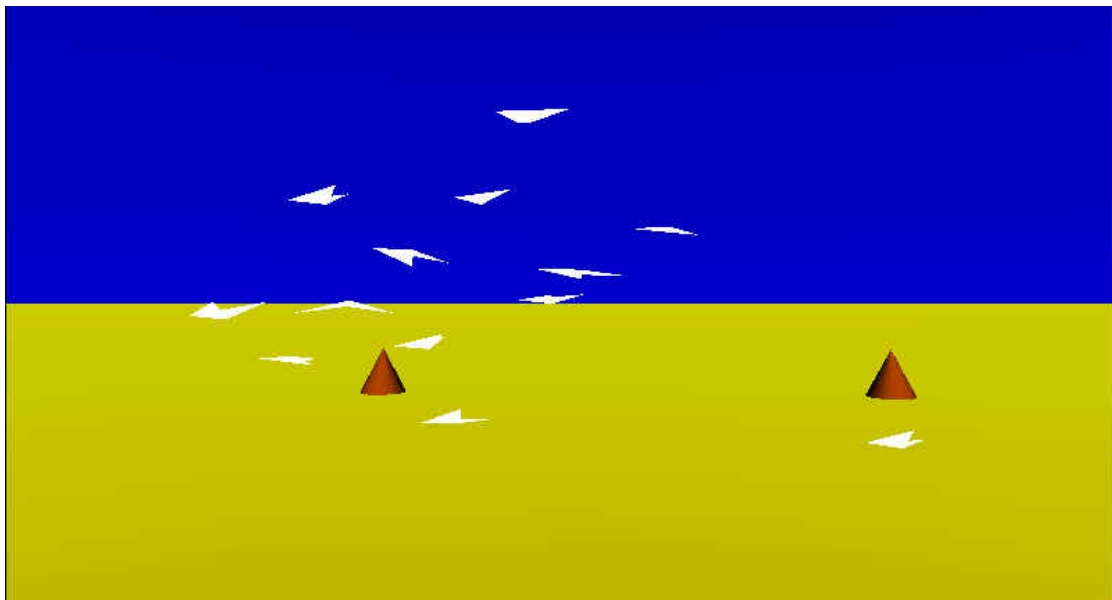


图 3.2 鸟的群集行为的三维仿真

前面已经提过, 实现这三条规则的具体算法是多种多样的。一种更普遍的算法是将每只鸟的作用依据距离远近做一个适当的加权, 然后将加权的结果作为移动方向。这种做法的基本思路是好像任意两只鸟之间都有一根弹簧相连。如果离得太近, 就相互排斥; 如果离得太远就相互吸引; 否则, 二者之间没有相互作用。每只鸟所受的作用是其他鸟施于它的作用的

总和。一般情况下也不是把所有的鸟的作用都考虑进去，而是定义了一个邻居的概念，只有邻居才能影响该鸟的行为。邻居的定义也是多种多样的。比如说，将邻居定义为以自己为中心的一个球型邻域是一个常见的手法（如图 3.3.3 的左图所示）。

下面我们介绍两种替代方案。实际上的替代方案是很多的。

第一个方案的邻域是一个扇形。这个扇形的定义一般是以当前的方向为轴线，左右各偏转一定的角度，比如说 45 度角。落在这个扇形范围内的鸟被当作邻居（如图 3.3.3 右图所示）。我们先考虑分隔规则的实现。同样需要定义一个最小距离。分隔规则就是如果与最近的邻居之间的距离不大于最小距离，那么就调整到与它的飞行速度大小以及方向一致。所谓的匹配规则，落实到这个方案中就是将邻居速度大小的平均值作为自己速度的大小。聚集规则则给定了飞行的方向——朝邻居的中心飞去。按照这种方式定义邻域时，一般还需考虑没有邻居的情形。这表明飞得太快，应该减慢速度。

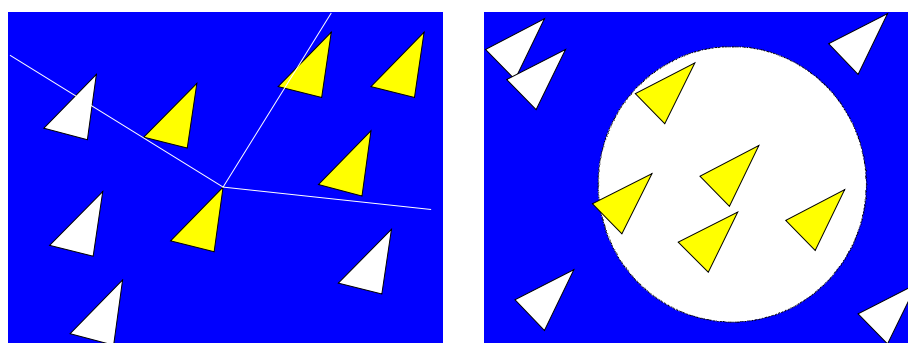


图 3.3 鸟的邻居——扇形邻居与球形邻居

第二种方案的邻居是一个球形。用矢量的运算可以对这个方案作一个清晰的描述。我们只考虑所有鸟的速度大小均一样的情形。首先，将原来的飞行方向定义为一个既有大小又有方向的一个矢量。当然，这个矢量的大小不代表速度，只是一个相对量，以它的长度为标准衡量邻居对它的方向造成的影响。如果某鸟与其邻居之间的距离小于最小距离，

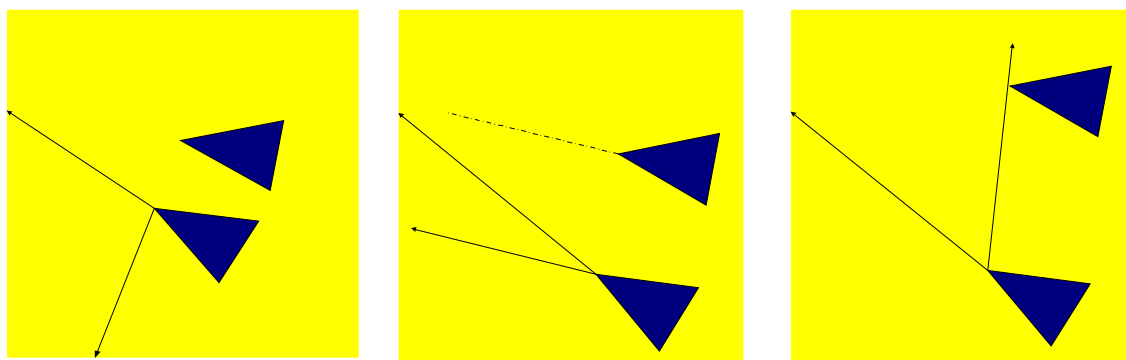


图 3.4 分隔规则、匹配规则与吸引规则

该邻居将一个方向为从它指向该鸟的向量作用于其上，而这向量的大小是距离的函数。距离越小，向量越长。反之，如果某鸟与其邻居之间的距离大于最小距离，该邻居将一个方向为从该鸟指向自己的向量作用于其上，并且距离越大，向量越长。注意，在邻域之外的鸟

不是邻居，从而对该鸟的方向没有任何的影响。然后，将所有鸟的作用向量加起来，取一个平均值，作为该鸟的偏移向量。鸟在下一时刻的飞行方向就是原来的飞行矢量与偏移矢量的和所指的方向。

鸟的群集行为的仿真有一个很有趣的变种，就是要求鸟群集成一定的形状。比如说圆形。鸟很少见到飞成这种形状，倒是鱼会游成这样。那么这种大范围模式来自于什么样的局部相互作用规则呢？

4 对基于个体的思维范式的思考

上面给出的几个例子显示了基于个体的思维范式的威力。但是，基于个体的思维范式听起来容易做起来难，往往给人的第一感觉是无从下手，甚至感觉不可能采用这种思路解决问题。现在就举一个似乎不能采用这种思路的例子，或许能给我们带来很大的启发。这个例子来自于流体力学领域[16]。

流体力学的研究对象当然是流体。流体的流速、密度、压力是流体力学要研究的内容。通常我们可以认为流体连续分布在它所占有的区域，流体的速度、密度、压力是空间与时间的足够光滑的函数。在以上假设的基础上，结合经典的力学规律就可以得到描述流体运动的大名鼎鼎的 Navier-Stokes 方程，然后流体力学的研究就在这个方程上展开。对这个方程做差分或有限元离散后得到代数方程，就可以求得数值结果。

那么怎样从基于个体的思维范式去思考流体的动力学规律呢？无论那种流体都是由分子构成的，流体的性质是流体内分子做无规律的热运动的结果。很容易让人想到的是去研究分子的运动规律，通过研究分子的运动而获得大范围的流体的性质，如流速、压力等。然而，这是一条让人望而生畏的道路，更别提有人希望深入到构成分子的原子层次来最终理解流体的运动规律。即使作到了，也会很慢，而且很可能得到错误的结果。

好象基于个体的思维范式在此陷入了困境。事实上，1985 年在 Los Alamos 实验室工作的科学家提出了所谓的 FHP 模型，该模型的数学工具一般称之为格子气自动机 (Lattice Gas Automata)，是元胞自动机在流体力学领域的具体应用。该方法提出的背景是 S. Wolfram 在元胞自动机领域的杰出工作鼓舞了人们对元胞自动机的热情。

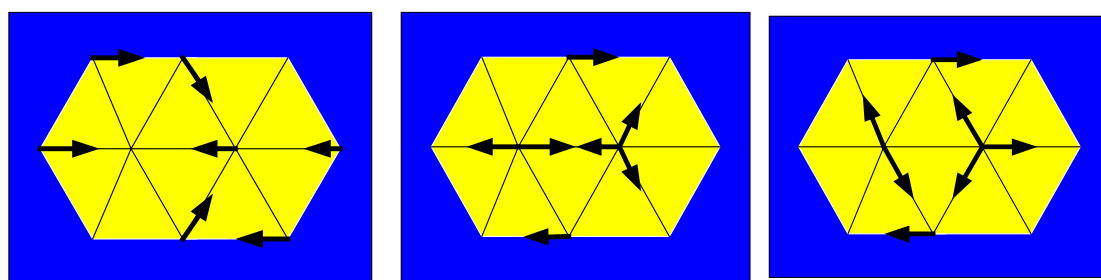


图 4.1 格子气自动机

格子气模型将流体所在的空间划分成离散的格子，如正方形、三角形等，时间也离散成

整数时间步。流体视为由大量只有质量而没有重量的粒子构成，这些粒子沿着网格线从一个网格节点移到另一个网格节点，几个同时到达同一节点的粒子可能会产生碰撞而改变移动方向。如何设计一个格子气去解决具体的问题往往有多种方案，只要所设计的粒子的运动规则以满足物质守恒、动量守恒以及能量守恒等基本的物理规律为前提，否则结果会与实际不符。换一个角度说，基本的物理规律为粒子运动规则的设计提供了思路。

图 4.1 是流体力学领域常见的一种格子气自动机类型。每个粒子由它所在的位置以及运动方向来决定。在左图与中图中，粒子沿着网格线移到相邻的格点。在中图，粒子产生了碰撞。右图显示了碰撞之后的结果。这个模型的碰撞规则非常简单，只是要求所有在一点上动量和为零的箭头顺时针旋转六十度。人们已用此模型成功地模拟了一些经典的流体力学中的问题，并且证明了该模型的宏观行为符合标准的 Navier-Stokes 方程。

从格子气自动机中我们可以得到的一个有益的教训就是如何设计个体模型。一般在处理复杂系统的问题时，人们容易走到两个极端。一种人认为，我们必须有精确的个体模型。只有对组成复杂系统的单元有了清晰完整的理解，我们才可能从个体出发获得系统整体的性能。另一种人认为，要把握一个复杂系统的整体行为，必须从整体出发进行研究，研究构成系统的基本单元是徒劳无益、于事无补的行为。前者有成功的操作范例，如粒子物理、分子生物学等。但是，后者也有成功的操作范例，经典热力学、经典流体力学、心理学等。如果将这两种人的观点上升到哲学的高度，差不多就是通常所说的还原论与整体论。我们在这里不去讨论什么是还原论、什么是整体论以及孰是孰非的问题，因为这些东西太含糊不清。我们要讨论的是，在对复杂系统的处理上，那一种人观点我们应该采纳呢？如果各有利弊的话，我们又该如何折取呢？通过格子气自动机这一成功的范例，我们可以得到一个明确的答案。

首先分析第一种人的观点。第一种人在批驳第二种人时往往强调他们才是真正坚持了先分析后综合的原则，并认为没有分析的整体论只是就事论事，不是科学的做法，而认为他们在分析清楚基本单元后下一步自然会走综合的道路。问题的关键在于对组成复杂系统的单元有了清晰完整的理解是否意味着我们可能从个体出发获得系统整体的性能，以及是否只有对组成复杂系统的单元有了清晰完整的理解我们才能从个体出发获得系统整体的性能。事实上，第一种人错误地低估了综合的困难，而且往往这些人都天真地认为在彻底了解组成系统的个体后系统的整体性质如囊中之物。至少，只要具备强有力的计算机，通过仿真我们把个体真实地再现出来，就可以得到整体的性质。这种仿真可能是永远行不通的。稍微有点数值计算经验的人，只要想一想如何从真实的水分子出发去仿真水的运动就可以理解这一点，而且极有可能得到一个错误的甚至荒谬的结果。这种做法的难度也是不可想象的。拿流体为例子，构成流体的分子是多种多样的，第一种人则要去一个一个地研究。想完全获得一个特定分子的所有性质也不是一件简单的事，要达到这一步，第一种人还要去研究分子的原子构成。这样下去就没完没了。好了，我们再回到前面的问题，是否只有对组成复杂系统的单元有了清晰完整的理解我们才能从个体出发获得系统整体的性能呢？当然是不一定。不知道水分子

的性能，我们一样可以研究流体力学。没有分子运动论的知识，我们也得到了如几何学般严格完美的热力学定律。我们在这里列举物理学的例子使得我们的观点非常容易接受，但是一涉及到生物学领域问题就复杂起来。又在哪个地方出问题了呢？这个问题留在后面分析，让我们先继续来分析第二种观点。

第二种人一般都会认为第一种人的做法不现实。正如一个众所周知的道理，精通了英语的二十六个字母与理解一个英语句子或一篇英语文章纯粹是两码事。对于一个试图研究计算机内部机制的人，如果将精力集中在晶体管的导电特性以及产生这种导电性的原子、电子机理上，那么这个人的愿望十有八九要落空。其实，我们作为局内人很清楚，这个人所作的是搞半导体的材料专家的事，与搞计算机体系结构与性能设计的专家根本不是一回事。退一步来说，假设这个人已经知道计算机是由逻辑元件的网络构成的，他能通过跟踪这些元件的输出而知道计算机正在解某一个偏微分方程吗？显然不现实。而且，第二种人一般相信，整体的性质是脱离于局部的细节的，这是自然界普遍遵循的一个基本原则，否则我们的世界就无法被理解。第二种人往往还会批评第一种人所追求的目标不明确，因为他们对系统的总体功能要么不清楚，要么不能做清晰的表达。他们并不是不重视分析的手法，相反他们会认为自己在这方面比第一种人做得更好。因为已经获得了对系统总体功能的清晰的认识，那么就可以通过这种认识思路明确地、而不是盲目地去构造系统的内部实现，而获得对系统的完整认识。而且，通过这种方式构造出来的模型更抓住了系统基本单元的本质，就是说，抓住了基本对整体功能有贡献的性质，而忽略了一些无关的细节。

通过对两种人观点的分析，好象我们更支持第二种人的观点，因为我们还没有指出第二种观点的弊病所在。问题的关键在于我们我们能否通过这种认识方式彻底了解系统的本性。一般人是不会对此抱太大信心的。其实，这两种观点源于一个共同的错误，就是没有深刻认识到复杂系统的层次性。这是一个说起来容易做起来难的事。研究不同学科领域的人经常争论不休甚至互相指责，实际上往往是因为他们在不同的层次上工作的缘故。我们在研究复杂系统时，应该首先明确这是处于什么层次的问题，这样才对这个问题有个基本的认识。但是，我们同时不应该期望为系统建立一个简洁干净的模型，而是从构造系统的基本单元出发来获得对系统的整体认识。而这单元的具体构造又与所要解决的问题密切相关，其实也就是与系统的层次密切相关。一个完全真实的单元模型可能对我们毫无用处。就象在构造一个经济系统时，复杂的个体模型并不会比简单的个体模型说明更多的问题，甚至恰恰相反，从复杂的个体模型得到的是荒谬的结论。试图从量子力学的角度解释人的精神现象，这就跨越了太多的层次，无疑是一个愚蠢透顶的计划。所以，我们的基本观点是必须明确要解决的是一个处于什么层次的问题以及使用什么层次的基本单元的问题。这两个问题是相辅相成的。复杂系统的困难在于我们不能确定问题的层次，也不知道使用何种层次的基本单元，因为复杂系统的层次性很不清晰，甚至给人的感觉是毫无层次。但是，我们又必须从层次的角度着手研究，因为层次分析法的本质在于认为高层次的性质脱离于低层次琐碎细节。

在这里正确讨论一下简化论的思想是顺理成章的，也是非常必要的。其实这一段观点已经隐含在上一段之中。很有一部分第一种人为了便于问题的理论分析，使用一个高度简化的模型。这种模型会带来与事实不符的结果，经济学中的均衡论便是一例。这一点也是第二种人嘲笑第一种人的一个地方。其实，对任何一种科学研究来说，简化是非常必要的，否则就没办法进行研究。建立个人或家庭的更完善的模型的经济仿真系统并不见得就比粗线条的模型得到更多的东西。问题的关键在于如何简化。第一种人的简化过程通常受到传统的理论分析工具所制约，甚至出现为理论而理论的情况。计算机给我们提供了更广阔的建模方案，但是我们又不要迷信计算机的威力而建立毫无必要的逼真的或高度复杂的模型，我们从这样的模型中可能毫无所获。一幅政治漫画能给人留下深刻的影响，而一张真实的照片会把人物的真相掩盖在其中。为简化而简化是有害的。相反地，走到另一个极端，为复杂而复杂同样是有害的。它们都对解决实际的问题于事无补。

从上面的论述可以看出，我们的观点好象是第一种人的观点，又象是第二种人的观点，但又两者都不象。我们的思路是充分糅合了这两种观点而得到的一个全新的思路。这种处理问题的思路与计算机的使用是密不可分的。只有通过计算机，我们才能将对系统的局部认识编织成一个整体，才能尝试出那些局部性质对整体来说是至关重要的，才能反复地检验我们的假设。比如，我们不能改变真实世界上的实验对象的神经元之间的连线，但是可以在计算机上改变神经元之间的连线。做过程序设计的都知道，我们只有反复使用并尝试修改一个程序，才能对这个程序有清晰的认识。通过基于个体的计算机仿真来探索问题的答案，正在改变我们传统的思考问题的方式，已经在许多传统的学科领域掀起了变革的风暴，如经济学、社会学、生物学等。这场风暴将它们从定性的范畴带入到定量的范畴，或者从一个错误的定量的范畴带到一个更贴近真理的范畴。甚至在通常认为已非常理论化的领域，如流体力学中，都重新有了一个更简洁明了的基于个体的模型。

5 设计基于个体模型的一些有用的原则

试图由局部的相互作用构造所需的大范围行为是一件非常困难的工作。这是一种逆向的综合的思维方式，需要具备丰富的想象力，假设的模型则要通过计算机仿真、实际的观察数据以及数学工具进行验证。尽管已有许多成功的结果，但并没有一般的模式可循。我们所能尽力做到的，是将从一个系统得到的经验转移到另一个系统。那么，我们从前面论述的系统可以得到那些方面的教训呢？

5.1 正反馈

在讲正反馈之前，先温习一下负反馈的基本思想。我们通常熟悉的是负反馈。比如说一个温度调节系统。如果温度高于预定值，就停止加热；如果低于预定值，就恢复加热。负反馈的核心环节就是将输出值与目标值的差值送到输入处。负反馈在我们的许多工程设计中是

比不可少的。我们考虑如何设计一个沿墙走的机器人的问题。有人可能会提出一个简单明了的方案，将机器人的初始方向与墙平行，然后让它一直往前走就行了。实际上这个方案肯定行不通。我们不能保证墙是绝对平直的，也不能保证地面绝对是一个平面。就机器人来说，我们不能保证它的两个轮子转速完全相同。如果左轮转的较快，它就会慢慢右转；反之，如果右轮转的较快，它就会慢慢左转。就实验操作者来说，能保证机器人的初始方向与墙绝对平行吗？只要墙足够长，就出现“差之毫厘，谬之千里”的局面。有这么多不确定性，或者说随机的因素，马上又会有人感觉到这个问题太困难了。解决这个问题的关键就在于使用负反馈。我们需要给机器人装备一个距离传感器。如果机器人离墙太近了，就向外转；如果机器人离墙太远了，就朝里转；否则，保持原方向前进。当然，这只是一个基本的设计方案，在实际中还会有许多细节需要完善，比如传感器的信息可能不精确。但是，通过这个例子足以让人意识到负反馈的本质含义与实际意义。

那么正反馈有什么意义呢？使一个系统崩溃、不稳定？通过前面对负反馈的了解，无疑会让人对正反馈产生这样的印象。其实，正反馈的例子也是比比皆是。我们已经在前面动物行为学的仿真中反复提到正反馈的作用。这里再讲一个经济学方面的例子，这就是圣菲研究所（SFI）的 **Brian Arthur** 所发现的报酬递增率。新古典经济学认为，自由市场总是最有效率或最先进的的技术站优势。其实不尽然。比如 **QWERTY** 就是一个很好的例子。当初设计这种键盘的人是为了放慢打字人的速度，因为在那时候打字太快容易使打字机卡壳。这种键盘在大量生产投入市场后，许多人使用它来学习打字。反过来，这又使其他公司也开始产销采用 **QWERTY** 键盘的打字机。这进一步导致更多的人使用这种键盘来打字。现在，这种设计的键盘基本上已永久地占领了市场。**Arthur** 甚至猜测以前存在与现在旋转方向相反的的时钟，不过是由于某种微小的历史因素的逐渐放大而导致它退出历史的舞台。**Arthur** 的报酬递增率在高科技产业中特别有意义。一旦某种产品由于某个微弱的优势使它抢先一步占领了市场，则这种领先会被不断地放大，那么其它同类产品将需付出比以前高得多的代价才能抢回市场。这样，在 **Arthur** 的新经济学中，外在干扰与人的差异变为驱动力量，经济永远处在时间的边缘，它不断地向前发展，存在多个平衡点，因而经济系统是不可预测的。这样的经济系统是一个相互依存的、错综复杂的、不断演化的、开放的系统，是一个象生物一样运转的活生生的系统。新古典经济学中的仿真是从假设人们完全一致的并且完全理性的而得到的数学方程出发，从而最后系统的演化达到某个预定的平衡点。新经济学中的仿真强调有限理性的人们对环境的适应性以及人们之间的不同，直接从个体出发进行仿真。系统每次运行的结果可能各不相同。我们可以从这样的仿真系统中的丰富多彩的结果中去学习到许多新的东西。

5.2 随机性

随机性与正反馈一样，通常并不受人欢迎。人们往往希望系统的每个组员都能够非常精

确地被定义，这样整个的演化就能够随心所欲地控制。在学校里，老师希望他的学生都规规矩矩地按照他说的去办；在工作单位，有的领导不管多累，方法面面的事都亲自一手操办；对一个国家的管理而言，许多统治者都希望建立非常细致的等级制度，想方设法限制人员的流动，社会的计划由统治者统一制定。这些都是潜意识里希望对组员行为进行精确控制而导致的一种本能反应。

通过对局部的、各层次的严格控制而达到对整体的严格控制，是一种非常本能、非常原始的手段。在一些情况下这是一种非常行之有效的手段，但在另一些情况下可能会导致灾难性的后果。这种做法没有认识到随机性对整个系统发展的意义。对于一个复杂的系统，要找到一个最好的控制方案，是根本不可能的，只有让系统自身去发现解决问题的办法。随机性就在这里发挥作用，成为最终突现的系统大范围有序行为的种子。这个种子是由于系统的不均匀性而产生的，而不是人为的、预先放进去的。白蚁搬运死白蚁的随机行为导致了最终将所有死白蚁堆成一堆；公路上各车的不同速度导致了交通堵塞。

5.3 环境

人们在思考一个问题的时候，通常不自觉地将环境放在一个被动的地位上，而将个体（如生物）放在一个主动的地位上。人们认为是个体作用于环境上，是个体改变了环境，而不是将环境摆在与个体平等的地位，看成是个体与环境的交互。

在海滩上爬行的一只蚂蚁是一个非常形象的例子[3]。从蚂蚁爬行的轨迹来看，蚂蚁的行为非常复杂。实际上，与其说这是蚂蚁的复杂性，不如说这是海滩的复杂性，是环境的复杂性造就了个体行为的复杂性。也就是说，蚂蚁本身只有一些简单的行为，只是蚂蚁顺应复杂动态的环境，就表现出在局外人看来不可理解的行为。从这一点还可以看出，我们对环境的观点与控制论并不相同，甚至可以说是恰恰相反。我们强调的是如何利用环境的不确定性，而控制论强调的是如何消除环境的不确定性。这与我们前面对随机性的讨论是一致的，我们是利用随机性，而不是消除随机性。

我们在这一节所总结的三条有用的设计原则尽管非常有用，还是有一些局限性。这些原则毕竟是针对我们研究过的例子得到的。在其他基于个体的成功的模型中，不见得是它们发挥了作用，至少格子气自动机与此毫无关系。

参考文献

1. Bonabeau, E., 1998. SFI working paper 98-07-067.
2. Bonabeau, E., Dorigo, M., and Theraulaz G. 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Santa Fe Institute Publications.
3. Reynolds, C.W. 1987. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. *In Proceedings of SIGGRAPH'87, Computer Graphics 21(4)*.
4. Simon, H., 1969.. *The Sciences of the Artificial*. Cambridge, MA: MIT Press.
5. Theraulaz, G., Bonabeau, E., and J. -L., Deneubourg. 1998. SFI working paper 98-07-065.

6. Theraulaz, G., Bonabeau, E. (1995a). Coordination in distributed building. *Science* 269, 686-688.
7. Theraulaz, G., Bonabeau, E. (1995b). Modeling the collective building of complex architecture in social insects with lattice swarms. *J. Theor. Biol.* 177, 381-400.
8. Mataric, M. 1995. Designing and Understanding Adaptive Group Behavior. *Adaptive Behavior*, Vol. 4, 1.
9. Mataric, M., Nilsson, M., and Simsarian, K. T. (1995). Cooperative Multi-Robot Box-Pushing, in *Proceedings, IROS-95*, IEEE Computer Society Press, Pittsburgh, PA.
10. Deneubourg, J. L., Aron, S., Goss, S., Pasteels, J. -M. And Duerinck, G. 1986. Random behavior, amplification process and number of participants: how they contribute to the foraging properties of ants. *Physica D* 22, 176-186.
11. Deneubourg, J. L., Goss, S. (1989). Collective patterns and decision making. *Ethol. Ecol. & Evol.* 1, 295-311.
12. Deneubourg, J. L., Goss, S., Franks, N. R., Sendova-Franks, A., Detrain, C., and Chretien, L. (1990). "The Dynamics of Collective Sorting: Robot-like Ants and Ant-like Robots." In Meyer, J-A, and Wilson, S., eds, *Simulation of Adaptive Behaviour: from animals to animats*, Cambridge, Mass.: MIT Press, 356-65.
13. Deneubourg, J. L., and Franks, N. R. (1995) Collective control without explicit coding: the case of communal nest excavation. *J. Ins. Behav.* , 417-432.
14. Kosa, R., J. 1993. Evolution of Emergent cooperative Behavior Using Genetic Programming. Published in *Computing with Biological Metaphors*, edited by Ray Paton for Chapman & Hall.
15. Dorigo M., V. Maniezzo & A. Colomi 1996. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 26(1):29-41.
16. Kadanoff, L. P., and Goldenfeld, N. 1999. *Science*, 2/4/1999.
17. Edelstein-Keshet, L., and Parrish J. K. 1999. *Science*, 2/4/1999.
18. Kube, C. R. and H. Zhang. 1997. Task Modelling in Collective Robots. *Auto. Robots* 4(1997): 53-72.