

关于元胞自动机的计算模型

林维贤 1900090401

【摘要】

目前通行计算机的基本结构是串行的，一般需要通过中央处理单元（CPU）和随机存取存储器（RAM）去进行数据存取及处理的工作。而元胞自动机宏观上是由大量处理器和存储器并联的新型计算模式。它可以被看作为一种理想化的复杂系统。整个模型并不存在中央控制，而是由大量简单的个体（元胞）组成的。在应用层面上，元胞自动机的特性为研究或模拟现实世界里复杂系统的整体行为及信息处理提供了一个有效的模型工具。本文尝试对元胞自动机的基本概念、理想模型及其主要特征做一些简洁易懂的表述，同时也讨论了元胞自动机的研究意义以及其应用。

【关键词】

元胞、复杂系统、局部、规则、离散

【正文】

一、元胞自动机运作的通俗理解

想象一个系统里有许多灯泡（图 1），每个灯泡与其周围的灯泡是有连接的。首先设定好各个灯泡的初始开关状态。这些灯泡需要遵循某规则不断定时地更新自身的开关状态。规则可以是这样子的：对于每一个灯泡而言，它根据邻域内 8 个灯泡（四周及斜对角）和它自己当下的状态来决定下一步需要“开”或“关”。如果领域内的灯泡（包括自己）超过一半是亮着的，那么那粒灯泡下一步的状态为“开”。反之，如果没超过一半，灯泡下一步的状态为“关”。所以，在每一段离散的时间内，每个灯泡的状态只取决于领域内的灯泡，并不存在中央系统。这就是运算机制上基于元胞自动机概念的一个简易例子。

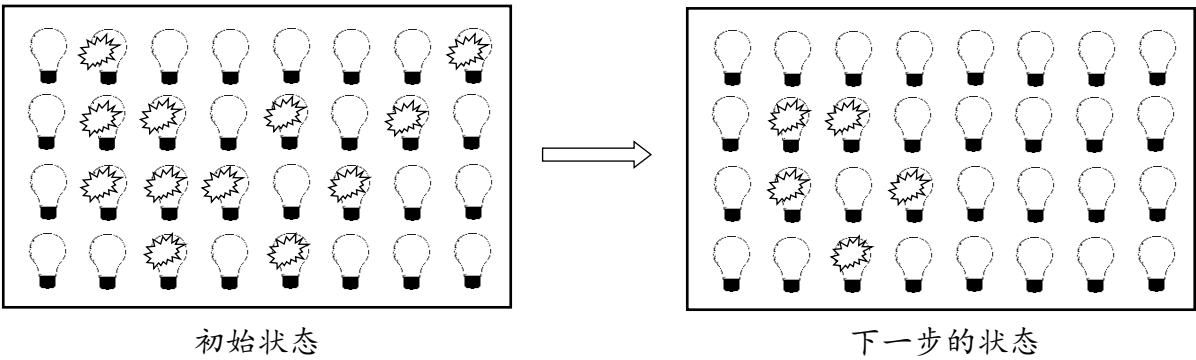


图 1

二、元胞自动机的具体解释

一个更精确描述元胞自动机模型的说法是，空间被一定形式的网格分割为许多单元，每个元胞作为系统最基本的组成部分，被赋予一定离散化的数值，以代表该点当下的状态。时间也是离散的，各个元胞的状态采取局域的规则，一步一步去更新状态，即下一步状态的数值仅取决于该元胞近邻及其本身此刻的数值。元胞自动机的精神是利用大量的“简单”元件，通过“简单”的连接和“简单”的运算规则，在时空中并行地持续运行，而得以模拟出复杂而丰富的现象。

就形式而言，元胞自动机一般有以下三个特征：

- 1) 局部的：元胞个体的状态变化只受到周遭个体的影响。
- 2) 并行计算：各个元胞个体同时同步进行计算工作。
- 3) 一致的：每一个元胞个体都被相同的规则所支配。

三、初等元胞自动机 (Elementary Cellular Automata)

元胞自动机的构建方式有很多。像大多数理论研究一样，物理学家史蒂芬·沃尔夫勒姆 (Stephen Wolfram) 从元胞自动机最简单的形式开始下手。他选择的是“一维两状态”的模型，每个元胞仅与相邻的两个元胞相连。（更复杂的模型可以是多维多状态的。）图 2a 显示的是一维元胞自动机，两端形成一个环，有“开”与“关”两种状态，分别用黑与白来表示。

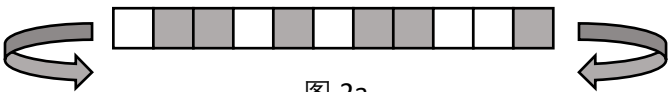


图 2a

相邻的三个元胞（周围两个与其自身）总共有 8 种可能的状态组合（图 2b），而每个元胞又有两种可能的状态，因此总共有 $2^8 = 256$ 种可能的规则。例如，当 3 个元胞的状态为开-关-关时，中间元胞下一步的状态是“关”（其中一种规则）。沃尔夫勒姆把开状态记为 1，关状态记为 0，例如图 2b 的规则被记为 01110110，把二进制转化为十进制等于 110，因此此类规则也被称作为“规则 110”。图 2c 则显示了在设定好的初始状态下，元胞自动机在特定规则下随着时间一步一步往下演变的时空图。

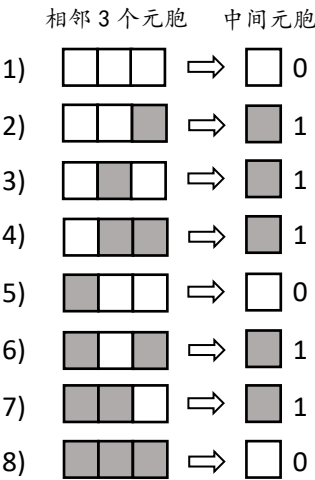


图 2b：规则 110

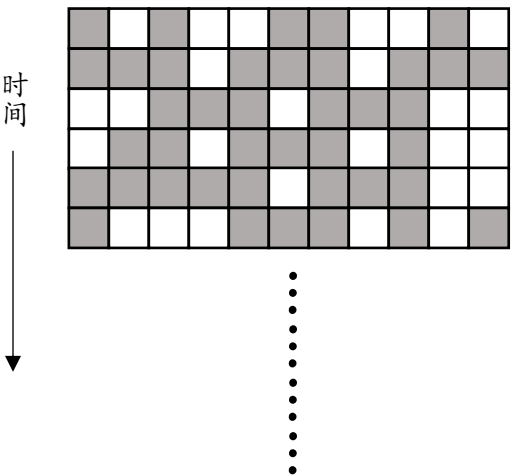


图 2c：元胞自动机的时空图

四、对于元胞自动机的观察与分类

沃尔夫勒姆对全部 256 种初等元胞自动机进行了彻底的研究。其中比较典型的有“规则 110”及“规则 30”。以下图 3a, 3b 由 200 个元胞组成，从随机的初始状态开始，分别在特定规则下往下的离散时间里更新了 200 步。

规则 110

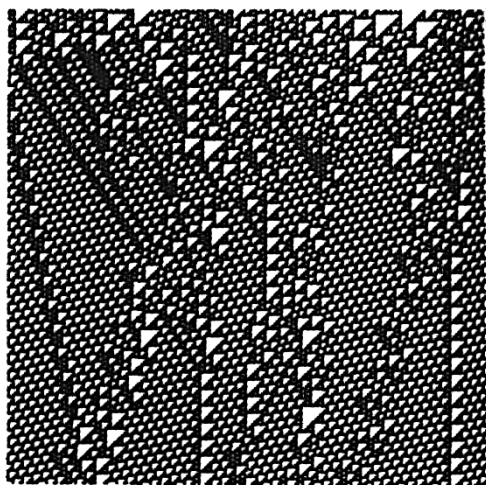


图 3a

规则 30

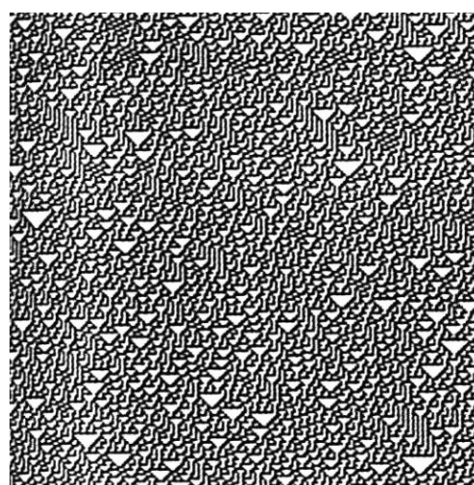


图 3b

对沃尔夫勒姆来说，如此简单的规则能涌现出如此的复杂性，是一个特别奇妙的事情。他发现可以把不同规则的元胞自动机分为 4 个类型：

- 类型 1：**不论初始状态如何，最后都会迅速演变成一个稳定且均衡的状态，即初始的随机性消失。
- 类型 2：**不论初始状态如何，都会迅速演变为稳定或振荡的结构。初始模式中的某些随机性可能会被滤除，但仍然存在。初始模式的局部变化倾向于继续保持局部性。
- 类型 3：**大部分初始状态会产生看似随机或混沌的形式。（规则 30 属于这一类型）
- 类型 4：**有序与随机的混合，局部结构相当简单，但是这些结构会移动，并以非常复杂的方式相互作用。（规则 110 就属于这一类）

其中，沃尔夫勒姆应用类型 3 中“规则 30”所呈现的混沌形式来构造伪随机数发生器，并为此申请了专利。而类型 4 被认为是最有研究价值的元胞自动机，因为它一定程度上可以描述生命系统等复杂系统中的自组织现象，并猜想大多数此类型的规则能进行通用计算。沃尔夫勒姆的助手马修·库克最终证明了“规则 110”的确是通用的，而这也许是目前已知最简单的通用计算机。

五、元胞自动机的研究意义及其应用

首先，个人认为元胞自动机研究的兴起对于计算概念在一定程度上产生了范式的转移 (paradigm shift)。狭义上说传统计算模型所指的计算通常需要通过中央控制系统执行明确的程序来处理数据。而随着元胞自动机的出现，科学家们逐渐认识到自然界有很多的现象涉及到计算的过程，这是一种更宽泛的计算概念。比方说，蚂蚁群体并没有中央领导者去支配它们的行动，整个系统由各个自主的个体组成，每一只蚂蚁都只依靠与另一小部分的蚂蚁的交互来做决策。根据计算机科学家梅拉妮·米歇尔 (Melanie Mitchell)，计算是复杂系统为了成功适应环境而对信息进行的处理。致力于推广元胞自动机概念的沃尔夫勒姆也认为，如果以上如此简单的规则都能产生复杂性并进行通用计算，自然系统的过程应该被视为一种计算。自然系统里包含信息，在任意时刻，系统里的个体通过简单的规则应用于当前状态来处理信息，而这就是元胞自动机的计算模型。

以上只讨论了理想情况下的低维简单模型，事实上在许多科学研究中，为了更真实地模拟研究对象，需要应用到更复杂的模型（更高维度、更多状态、更复杂的规则）。在典型研究复杂系统的社会科学和生命科学中，元胞自动机可用来研究经济危机的形成与爆发过程，还可用于模拟肿瘤细胞的生长过程以帮助了解其内在机理，或者是研究动物群体行为及模拟自然生态的动态变化过程。在物理学中，尤其是凝聚态物理，元胞自动机可用于模拟晶体的生长、无序有序的转变、自旋系统的相变等等。更有部分物理学家支持基于元胞自动机的物理世界或理论，比方说，诺贝尔物理学奖得主杰拉德·霍夫特 (Gerard't Hooft) 最近出版了一本书，介绍了利用元胞自动机重建量子力学的想法。

因此可以说，元胞自动机的计算模型为探索复杂系统提供了一个很有用的工具，这在不同学科中的研究中都得到了充分体现。当然，到目前为止我们对复杂系统的了解还不够透彻，仍然有许多工作要做。一些学者也还在继续发展更完善且严格的元胞自动机理论，我相信这会帮助我们更好地理解计算的本质，并推进人类对这个世界更深层次的认知。

【参考文献】

1. Mitchell, Melanie, *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press, 2011.
2. Wolfram, Stephen, *A New Kind of Science*. Wolfram Media, 2002.
3. Wolfram, Stephen, *Statistical Mechanics of Cellular Automata*. Reviews of Modern Physics. 55 (3), 1983.
4. Ilachinski, Andrew, *Cellular Automata: A Discrete Universe*. World Scientific, 2001.
5. Cook, Matthew, *Universality in Elementary Cellular Automata*. Complex System. 15(1), 2004.
6. Gerard't Hooft, *The Cellular Automaton Interpretation of Quantum Mechanics*, Springer International Publishing, 2016.