arXiv:2603.01701v1 [q-bio.PE] 2 Mar 2026

一种部分通过开放式演化测试的物种形成模拟

Th´eo de Pinho* Lana Sinapayen†

2026年3月3日

摘要。 人工生命研究的主要目标之一，是在人工系统中重现我们在地球生物圈中所见的实体、交互和过程不断变得更加复杂和新颖的趋势，也就是说，创造开放式 系统。本文针对 Lana Sinapayen 创建的人工生命软件生命之树模拟（ToLSim），测试其是否具有东京 I 型开放式演化（OEE）。为此，我们进行了一项实验，用于测量演化活动统计数据。这些统计数据要求我们定义组成部分的概念。在这里，我们将智能体的“基因”定义为组成部分。结果表明，ToLSim 能够展现无界的演化活动累计总量。然而，总体和中位数标准化 累积演化活动似乎有界，且新演化活动始终为零，这表明 ToLSim 并非开放式。后续研究可以在 ToLSim 中重复此实验，改用个体甚至物种而非基因进行测试，以检验当前结果是否成立。

1 引言

人工生命（ALife）是一门旨在理解生命及其基本属性的领域 [Bedau, 2007]。其主要研究主题之一是开放式演化 （OEE），具体涉及生命和类生命系统。OEE 指的是不断自我更新并变得更加复杂的演化系统 [Bedau et al., 2000, Stanley et al., 2017]。地球生物圈就是一个（可能的）开放式系统实例。从简单的微观生物到复杂的动物社会，地球生命的自然选择似乎不断产生越来越复杂的实体和系统，且始终不会耗尽实现这一点的新颖方式。文化也呈现出某种形式的开放式演化 [Borg et al., 2024, Chalmers et al., 2010, Buchanan et al., 2011, Oka et al., 2015]。人们可能会思考，能否在人工系统中从头开始重现 OEE。这样做不仅能够增进我们对开放式演化必要且充分条件的理解，还能让我们创造出生成艺术和科学领域前所未有的新思想的开放式算法[1] [Stanley, 2019]。数十年来，人们一直尝试在化学（“湿”ALife）、机器人学（“硬”ALife）和计算机科学（“软”ALife）领域创建开放式人工系统 [Bedau,2007], , 但似乎没有任何人工生命系统达到地球生物圈的开放式演化水平[Karelin, 2025]。具体而言，在计算机科学领域，仅有少数程序展现出开放式演化的迹象，例如Geb [Channon, 2003, 2006]。

在本文中，我们通过应用 Alastair Channon 用于检验东京 1 型开放式演化的流程中的步骤 1、2 和 3，来测试由 Sinapayen 创建、用于模拟物种形成的多智能体程序生命之树模拟（ToLSim）的开放式演化 [2]。 [Channon, 2024],

*theo.depinho.etu@univ-lille.fr - 里尔大学，法国

†lana.sinapayen@gmail.com - 索尼计算机科学实验室 / 国立基础生物学研究所，日本[1]我们并不把创新视为目的。以创新本身为目的可能会造成有害的结果。但我们认为，在某些情况下，创新可以通过减轻有感知能力的生物生命中的痛苦，并可能使其生活更加有趣，从而提高生活质量和幸福感。[2]模拟和分析的源代码可在 https://github.com/LanaSina/speciation 找到。ToLSim 的一次运行视频可在 https://www.youtube.com/watch?v=GJsBIk-9iyE 找到

东京 1 型开放式演化的特征是“有趣的新型实体和交互” [Packard 等人， 2019]。

该程序意味着需要使用演化活动统计数据。事实上，演化活动统计数据似乎是衡量开放式演化的相当好的替代指标。它们衡量开放式演化的核心方面：新颖性、复杂性和适应成功的累积。此外，演化活动统计数据似乎既合理又 具体。事实上，它们证实生物圈具有开放式演化，而许多人工系统（例如 Bugs 和 Evita）则不具备 [Bedau 等人， 1997]。

演化活动统计数据衡量组成部分的演化活动。根据分析的层级，组成部分可以是基因、个体或物种。一些演化活动统计数据包括演化活动累计总量、演化活动平均累计量、多样性 和新活动。这些内容将在第（3）节中详细说明。

最早使用演化活动统计数据的案例之一见于 Bedau 和 Packard [1992]，作者用这些统计数据研究了由战略虫构成的软人工生命系统。Bedau 等人 [1997] 使用演化活动统计数据研究了三个系统：两个人工生命程序（Evita 和 Bugs）以及生物圈（以化石记录为依据）。他们测量了多样性、累积活动总量 和平均累积活动量。生物圈的累积活动总量和多样性呈现出显著的上升趋势，而 Evita 和 Bugs 这两个人工系统则没有。随后，Bedau 等人 [1998] 又加入了一项新统计指标新演化活动，用以衡量演化系统的新颖性。他们还加入了一项测试，涉及三类演化系统，其定义如下：不表现出适应性演化活动的演化系统（第 1 类）、表现出有界适应性演化活动的演化系统（第 2 类），以及表现出无界适应性演化活动的演化系统（第 3 类）。因此，这些统计数据可用于判断系统是否具有无界演化趋势（即是否具有开放式演化）。后来，Channon [2006] 使用演化活动统计数据测试了 Geb 人工生命程序，发现它呈现出开放式演化趋势。

在本文余下部分，我们将应用演化活动统计数据来检验 ToLSim 的开放式演化。下一节将说明 ToLSim 的工作原理。在方法部分，我们将介绍如何应用演化活动统计数据对其进行检验。最后，在结果部分，我们将呈现实验的关键结果，并对 ToLSim 的开放式演化得出结论。

2 生命之树模拟（ToLSim）

生命之树模拟（ToLSim）是一款人工生命软件，用于模拟不同物种分支的出现。图2中的统计图展示了 ToLSim 中“生命之树”可能呈现的样貌。该程序以 Java 编写，并使用 R 代码分析生成的数据。

该模拟由一个 50×50 的单元格网格组成。在这张地图的中央，一个 30×30 的区域持续生成具有随机特征的智能体。模拟开始时尚无进化；相反，随机智能体会在中央的 30×30 区域自发出现。它们可以移动、尝试捕食其他智能体、通过克隆进行繁殖，也会死亡。起初，大多数智能体因适应性不足而未能繁殖便死亡。然而，有时第一代个体能够成功繁殖（即克隆自身），从而产生第二代个体。这些个体也可能在没有后代的情况下死亡，或是繁衍后代。经过一段时间（通常从模拟运行开始算起几百个时间步，也就是几秒钟），世代便开始形成一条无尽的链条。这一时刻类似于地球生命的出现，因为自然选择的个体正是在此刻涌现出来（此前的个体都是随机生成的）。程序自带的用户界面会显示网格，让人能够清楚地观察到这一时刻。事实上，由于第一代个体被刻意设置为在网格上不可见，网格起初毫无生气，随后在几秒钟内便充满了移动的生物（图1）。从此，种群达到一个平台期，并持续进化。

让我们进一步了解 ToLSim 的运行机制。智能体具有遗传属性和

非遗传属性。遗传属性是固定的——也就是说，它们在智能体的一生中不会发生变化——具体如下：

- speed：智能体在每个时间步内可以在网格中移动的距离；
- maxEnergy：智能体能够储存的最大能量；
- kidEnergy：智能体繁殖一个后代所消耗的能量；
- nKids：智能体在每个时间步内最多可以拥有的子代数量；
- pgmDeath：智能体能够达到的最大年龄或“程序设定”年龄（以时间步计）；
- matForKids：智能体达到成熟的年龄（以时间步计），也就是它能够繁殖的年龄；

- *传感器*：用于判断是否吃掉其他智能体的各种类型的传感器。

这些属性会遗传给后代。每当一个智能体克隆自身时——它会在每个能量足够的时间步进行克隆——它有 50% 的概率产生突变后代。突变后代的每种性状都有 60% 的概率相对于从亲代遗传的值发生改变[3]。

唯一不遗传的属性是能量，它只是智能体在特定时间所拥有的能量数量。智能体通过吃掉其他智能体获得能量。它在移动时、尝试吃掉能量比自己多的智能体时、其他智能体试图吃掉它时（如果捕食者智能体得逞，猎物就会失去全部能量并死亡），以及产生后代时，都会损失能量。此外，智能体每一步都会仅仅因为维持自身存在而损失能量。最后，智能体会在能量降至 0 或达到最大寿命（程序设定死亡年龄）时死亡。

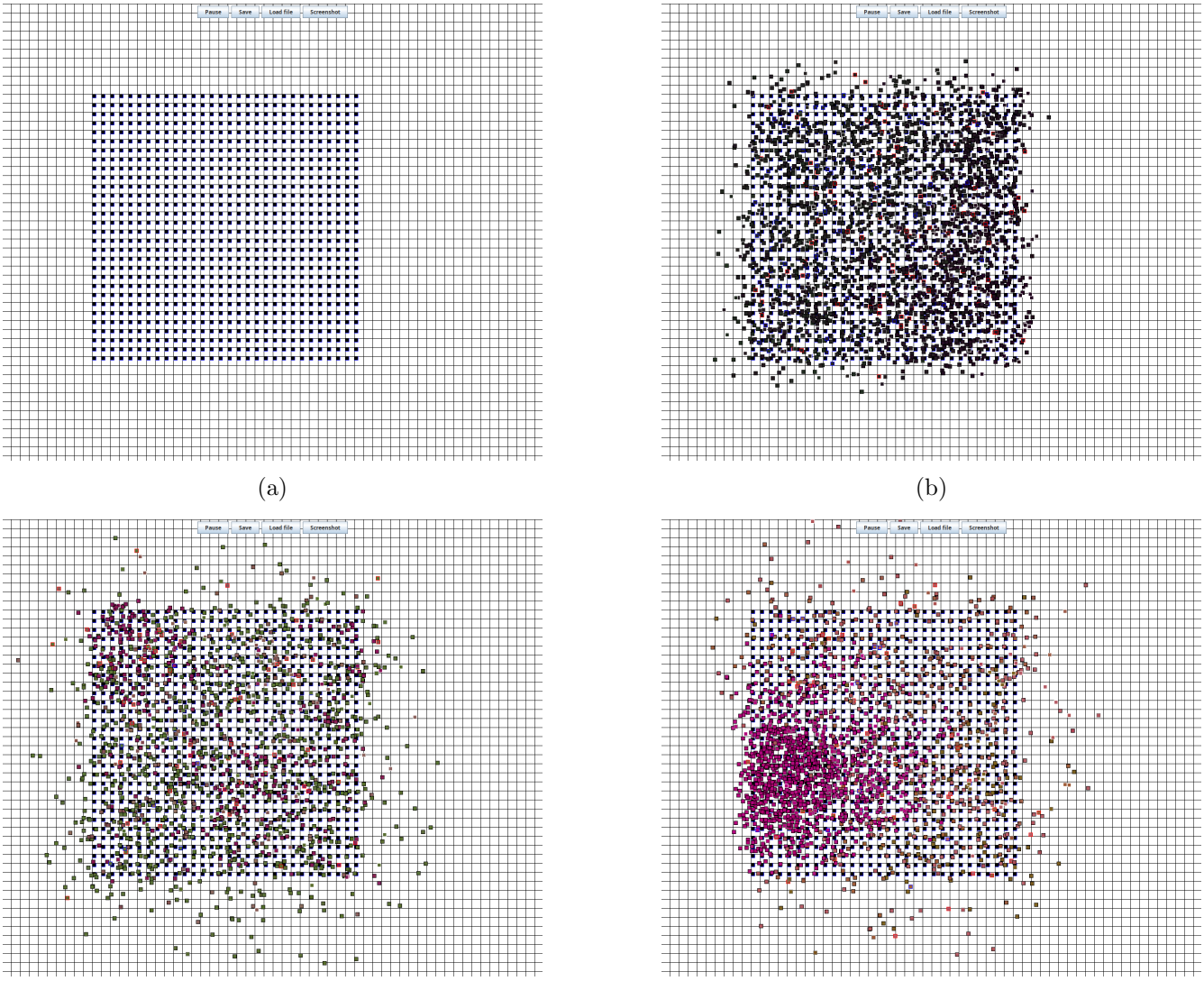
下面详细说明捕食的运作方式。智能体只能吃掉与自己处于同一单元格中的其他智能体。此外，一个单元格中的智能体越多，任意两个智能体之间发生捕食的可能性就越大。要尝试吃掉另一个智能体，一个智能体（下文称为*捕食者*）必须先探测到它，这可以通过传感器完成。每个智能体都有一个传感器列表。每个传感器都能感知猎物的一种属性（例如速度、最大能量等），前提是该属性的值处于以下范围内：

$$predatorSensorValue - 5 \leq preyProperty \leq predatorSensorValue + 5 \tag{1}$$

一个智能体可以有多个用于感知同一种属性的传感器，但每个传感器覆盖的范围不同。

如果捕食者的至少一个传感器探测到另一个智能体，那么该智能体就会被发现。例如，如果捕食者有一个数值为 10 的速度传感器，它就能探测到速度为 5、15 或 9 的智能体，但无法探测到速度为 4、16 或 50 的智能体（除非其他传感器探测到它们）。如果在该时间步中捕食者的能量高于猎物，捕食尝试就会成功，捕食者会吸收猎物的全部能量。如果捕食失败，两个智能体都会“受伤”，也就是说，它们会损失能量（每个智能体损失的能量等于另一个智能体的能量乘以某个常数）。请注意，智能体能够感知到什么并不取决于其自身的内部属性。最后，智能体都很贪婪：它们会尝试吃掉其所在单元格中所有能探测到的智能体。

[3]这意味着突变后代的实际概率低于 50%：存在个体属性未被随机突变的偶然性。



(a) (b) (c) (d)

图1：ToLSim 在不同时间运行时的截图。(a) 显示 ALife 出现之前的 ToLSim（黑色方块是能量源）。(b) 显示 ALife 出现并扩散后不久的 ToLSim（新增的方块是智能体）。(c) 和 (d) 显示此后几分钟的 ToLSim。(d) 显示一个物种正在扩散。

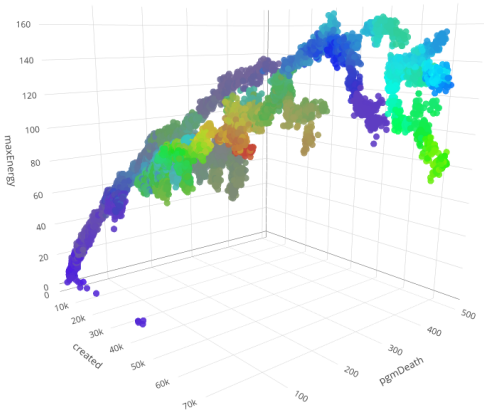


图2：表示一次 ToLSim 运行的树。每个点代表一个个体。个体按照其出生（创建）的时刻、最大能量（maxEnergy）以及最大或“程序设定的”死亡时间（pgmDeath）绘制。树枝清晰可见，凸显了不同“物种”的出现。

3 方法

[Packard等人， 2019] 将 OEE 的东京类型定义如下：(1) 有趣的新实体类型及其相互作用；(2) 可演化性的进化；(3) 重大转变；以及 (4) 语义演化。[Channon， 2024] 提出了一套用于检验 OEE 类型 1 的程序。在本节中，我们将应用该程序的前三个步骤，检验 ToLSim 的开放式演化。

该程序所用的演化活动统计数据需要先定义组成部分。我们选择将基因而非智能体或物种定义为组成部分。在 ToLSim 中，最符合基因定义的是第 2 节所述的可遗传属性：速度、最大能量、子代能量、子代数量、死亡和子代材料。因此，一个基因就是一个属性值（例如，速度 = 3、子代数量 = 6 等）。请注意，由于这些遗传属性的取值除了必须为正数之外没有其他限制，因此理论上每种属性都可以对应无限多个基因。

3.1 步骤 1：基本演化活动统计数据

Channon 的流程的步骤 1 包括计算演化活动累计总量，该指标“衡量演化活动的程度：系统中通过持续使用组成部分而累积并保留下来的活动量” [Channon，2006]。计算方法如下。在每个时间步 t，每个组成部分 i都对应一个活动增量 $\Delta_i(t)$，它仅反映该组成部分在时间 t是否存在：

$$\Delta_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{if component } i \text{ exists at } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

然后，累积演化活动 $a_i(t)$反映了组成部分 i 随时间的持续存在：

$$a_i(t) = \begin{cases} \sum_{\tau=0}^{t} \Delta_i(\tau) & \text{if component } i \text{ exists at } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

如果组成部分 i 在时间 t不存在，则此变量为空；否则，它等于该组成部分截至目前存在的时间步总数。最后，将所有组成部分的累积演化活动相加，即可得到演化活动累计总量：

$$A_{cum}(t) = \sum_i a_i(t) \tag{4}$$

步骤 1 的测试包括检验演化活动累计总量是有界的还是无界的。如果它是无界的，则步骤 1 的测试通过，我们可以继续进行步骤 2。

3.2 步骤 2 和 3：分量归一化演化活动统计

Channon 提出的流程中的步骤 2 包括实施一个中性“影子模型”和一种影子重置方法。中性影子模型（或简称影子模型）是一个与真实模型并行运行并对其进行模拟的模型：真实模型中的每次出生都会导致影子模型中发生一次出生，真实模型中的每次死亡都会导致影子模型中发生一次死亡。两个模型之间的区别在于，影子模型中的每次出生/死亡都作用于一个随机分量（每个分量被选中的概率相同）。因此，在影子模型中存活下来的每个分量，并非得益于适应性优势，而是由于偶然性。由于影子模型不实施自然选择，将影子模型与真实模型进行比较，可以让我们评估演化活动中真正具有适应性的部分。

每隔一段时间（例如，每 1000 个时间步），影子重置方法会将影子模型组成部分的状态（即种群）和演化活动历史重置为真实模型相应组成部分的状态和演化活动历史。这样做可以避免影子模型与真实模型相差过远，并使其能够较好地代表真实模型演化活动中非适应性的部分。

影子模型用于归一化组成部分的演化活动，即排除非适应性演化活动。将影子模型中某个组成部分 i 的活动增量从其在真实模型中的对应项的活动增量中减去，即可得到归一化（或适应性）活动增量 $\Delta_i^N(t)$：

$$\Delta_i^R(t) = \begin{cases} 1 & \text{if component } i \text{ exists in the real model at } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

$$\Delta_i^S(t) = \begin{cases} 1 & \text{if component } i \text{ exists in the shadow model at } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

$$\Delta_i^N(t) = \Delta_i^R(t) - \Delta_i^S(t) \tag{7}$$

我们可以使用这些归一化增量来计算每个组成部分 i 的归一化累积演化活动：

$$a_i^N(t) = \begin{cases} \sum_{\tau=0}^{t} \Delta_i^N(\tau) & \text{if component } i \text{ exists in the real model at } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

由此可以计算归一化累积演化活动的总量和中位数：

$$A^N_{cum}(t) = \sum_{i\text{: component } i \text{ exists in the real model at } t} a^N_i(t) \tag{9}$$

$$\tilde{A}^N_{cum}(t) = \operatorname*{Median}_{i\text{: component } i \text{ exists in the real model at } t} a^N_i(t) \tag{10}$$

利用归一化活动，我们还可以计算新活动：

$$A^N_{new}(t) = \frac{1}{D^R(t)} \sum_{i\text{: component } i \text{ is ``newly adaptively-significant''}} a^N_i(t) \tag{11}$$

其中，自适应显著组分定义为活动值大于自适应活动的最小值绝对值的组分，而 D^R 是组分多样性，即真实模型中当前存在的组分数量：

$$D^R(t) = |\{i : a_i(t) > 0\}| \tag{12}$$

Channon 的流程中的步骤 3 使用步骤 2 的统计数据进行另一项开放式演化测试。当且仅当归一化累积演化活动的总值和中位数（$A^N_{cum}(t)$ 和 $\tilde{A}^N_{cum}(t)$）无界，且新演化活动 $A^N_{new}(t)$ 持续为正时，测试才通过。

3.3 实现

我们运行了 20 次模拟，每次运行 200 万个时间步。我们使用每次运行的数据，分别计算步骤 1 和步骤 2 的演化活动统计数据。

该程序只计算演化智能体的活动增量，也就是说，不考虑第一代智能体的活动增量。这是因为第一代智能体并非进化的产物，因此与评估仿真器的开放式演化无关。

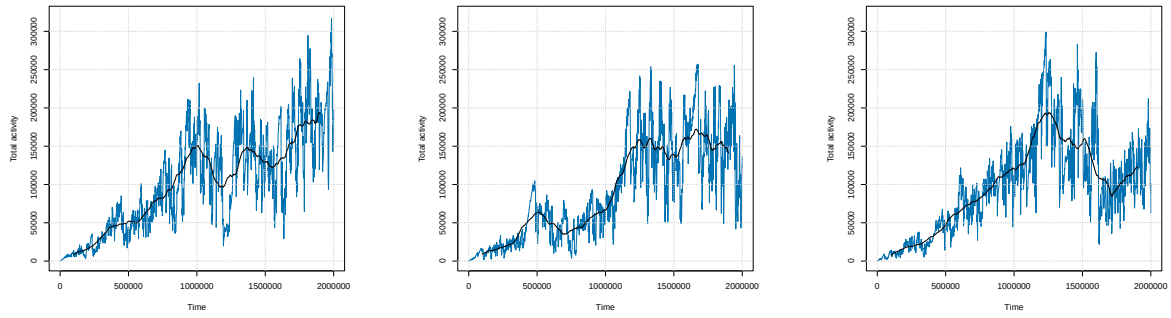
4 结果

这里展示 ToLSim 在 20 次运行[4]中的演化统计数据。如果曲线从某个时刻起似乎停滞不前，我们就将总量和中位数统计数据归类为“有界”；如果曲线看起来持续稳定增长，则归类为“无界”。我们还将部分结果归类为“不明确”，即既未呈现明确的持续增长，也未明显停滞。类似地，我们根据曲线形态，将新活动 统计数据归类为“持续为正”“非持续为正”或“不明确”。完整结果见附录。

4.1 步骤 1：基本演化活动统计

在 8 次运行中，演化活动累计总量似乎没有上限（图 3a）；在 4 次运行中有上限（图 3b）；另有 8 次运行的结果不明确（图 3c）。总体而言，这项统计量在 40% 的运行中似乎没有上限。因此，可以说 ToLSim 部分通过了步骤 1 测试。

[4]原始数据集可在 athttps://figshare.com/articles/dataset/Data_获取，其中包含_演化_活动_的_20_运行___生命之树__模拟__/31443793?file=62289298 ，也可使用数字对象唯一标识符 10.6084/m9.figshare.31443793 获取。



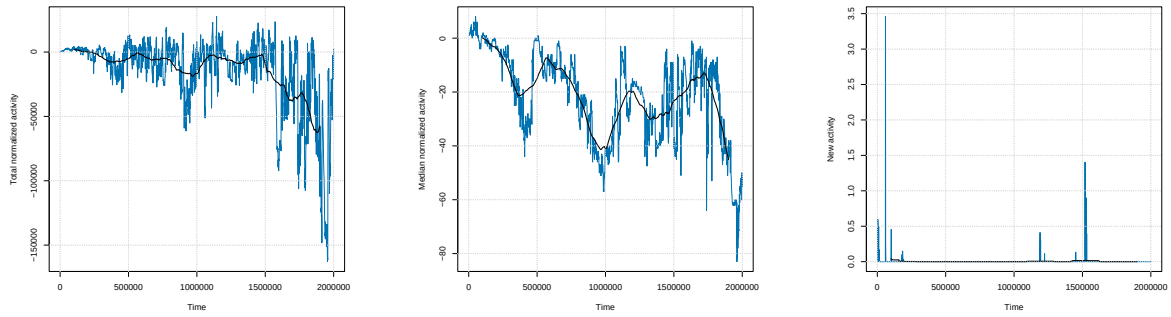
(a) 无界 (b) 有界 (c) 不明确

图3：第1、12和20次运行的累积活动总曲线，分别展示了20次运行中常见的典型趋势。

4.2 Ste图2和图3：按组成部分归一化的演化活动统计数据 s

在全部 20 次运行中，新活动 似乎并非始终为正；事实上，每次运行中的新活动大多为零。仅凭这一结果就足以得出结论：ToLSim 未通过步骤3测试。

ToLSim 的所有运行中，累积活动总量和中位归一化累积活动均有界（甚至呈下降趋势）。图4展示了第一次运行的图表，作为三项统计数据趋势的典型示例。可以看出，新活动始终为零，而累积活动总量和中位归一化活动趋于下降，数值变为负数。这两项统计数据为负的原因可能是，大多数组成部分只存在于影子模型中，因为其中的选择是随机的，并允许出现更大的多样性。



（a）总归一化活动 （b）中位归一化活动 （c）新活动

图4：第1次运行的总归一化累积活动、中位数归一化累积活动和新活动。此次运行代表了所有运行。

5 结论

我们使用生命之树模拟（ToLSim）人工生命软件进行了一项实验，在基因层面测试其开放式演化。我们应用了 Channon 的开放式演化测试流程中的步骤 1、2 和 3 [Channon, 2024]，考察与复杂性和新颖性相关的统计趋势。结果发现，20 次运行中有 8 次通过了第一项测试（步骤 1），没有一次通过第二项测试（步骤 3）。

未能通过第二项测试，可能是因为 ToLSim 不具备开放式演化能力。也可能是因为我们在基因层面对程序进行了分析。事实上，ToLSim 在个体或物种层面上或许能够通过第二项测试。此外，模拟的设置也可能并非最适合开放式演化。可以调整的设置包括地图大小、能量输入或维持生命的成本。

本实验仍可加以改进。事实上，预先定义组成部分存在局限性。事实上，这会妨碍即时识别和分析新的组成部分，从而限制开放式演化测试。 [Taylor等人 2016] 所讨论的一种解决方案是在物理学和化学尺度上定义模型，而不是在基因或个体尺度上定义。另一项局限在于统计数据是基于肉眼观察进行分类的。采用更系统的方法将大有裨益。

若能成功创建具有开放式演化特性的人工生命软件，可能会带来巨大益处。这不仅能让我们更好地理解生命与开放式演化，还能创建可在艺术、电子游戏或科学等生活各领域产生新颖想法的算法。目前尚不清楚是否可能存在与地球生物圈同样具有开放式演化特性的程序，但本文以及其他研究成果（例如有关Geb的发现）可以点燃希望。

6 致谢

我们衷心感谢Alastair Channon在数据分析期间进行的深入讨论并提供的建议。非常感谢Hyoyeon Lee和Jane Adams，他们为ToLSim项目贡献了有用的可视化成果。

Run	$A_{cum}(t)$	$A^N_{cum}(t)$	$\tilde{A}^N_{cum}(t)$	$A^N_{new}(t)$
1	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
2	Unclear	Bounded	Bounded	Null
3	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
4	Bounded	Bounded	Bounded	Null
5	Bounded	Bounded	Bounded	Null
6	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
7	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
8	Unclear	Bounded	Bounded	Null
9	Bounded	Bounded	Bounded	Null
10	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
11	Unclear	Bounded	Bounded	Null
12	Bounded	Bounded	Bounded	Null
13	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
14	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
15	Unclear	Bounded	Bounded	Null
16	Unclear	Bounded	Bounded	Null
17	Unbounded	Bounded	Bounded	Null
18	Unclear	Bounded	Bounded	Null
19	Unclear	Bounded	Bounded	Null
20	Unclear	Bounded	Bounded	Null

Table 1: Trends of the evolutionary statistics of the Tree of Life Simulator (ToLSim).

参考文献

Mark A. Bedau. 人工生命。载于生物学哲学，第 585–603 页。爱思唯尔，2007年。ISBN 978-0-444-51543-8。doi: 10.1016/B978-044451543-8/50027-7。URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444515438500277。Mark A. Bedau 和 Norman H. Packard。演化活动、目的论与生命的测量。人工生命 *II*，第 431–461 页，1992 年。Mark A. Bedau、Emile Snyder、C. Titus Brown 和 Norman H. Packard。人工演化系统与生物圈中演化活动的比较。第四届欧洲人工生命会议论文集，第 125–134 页，1997 年。Mark A. Bedau、Emile Snyder 和 Norman H. Packard。长期演化动力学的分类，1998 年。URL https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=824c21fe82392be4f005ae5e40d59aedbc4e2fd5。Mark A. Bedau、John S. McCaskill、Norman H. Packard、Steen Rasmussen、Chris Adami、David G. Green、Takashi Ikegami、Kunihiko Kaneko 和 Thomas S. Ray。人工生命中的未解问题。人工生命，6(4):363–376，2000 年。ISSN 1064-5462。URL https://doi.org/10.1162/106454600300103683。James M Borg、Andrew Buskell、Rohan Kapitany、Simon T Powers、Eva Reindl 和 Claudio Tennie。文化演化中的涌现开放式演化：开放式演化研究的新维度。人工生命，30(3):417–438，2024。Andrew Buchanan、Norman H Packard 和 Mark A Bedau。衡量专利记录中技术创新驱动因素的演化。人工生命，17(2):109–122，2011 年。Devin W Chalmers、C Cooper Francis、Noah M Pepper 和 Mark A Bedau。专利记录中的高内容词反映了技术演化中的关键创新。载于*ALIFE*，第 838–845 页，2010 年。Alastair Channon。改进后仍通过人工生命测试：分量归一化活动统计量将 Geb 中的演化归类为无界。人工生命 *VIII*，第 173–181 页，2003 年。Alastair Channon。在一个主动处理并改造其环境的智能体系统中，无界的演化动力学。遗传编程与可进化机器，7(3):253–281，2006 年。ISSN 1389-2576，1573-7632。doi: 10.1007/s10710-006-9009-3。URL http://link.springer.com/10.1007/s10710-006-9009-3。Alastair Channon。检验东京 I 型开放式演化的程序。人工生命，30 (3):345–355，2024。ISSN 1064-5462，1530-9185。doi: 10.1162/artl a 00430。URL https://direct.mit.edu/artl/article/30/3/345/120681/A-Procedure-for-Testing-for-Tokyo-Type-1-Open。Georgii Karelin。人工生命中的费米悖论。载于人工生命会议论文集 *37*，第 2025 卷，第 81–86 页。麻省理工学院出版社，剑桥，One Rogers Street，2025 年。Mizuki Oka、Yasuhiro Hashimoto、Takashi Ikegami 等。网络系统中的开放式演化。最新进展，第 17 页，2015 年。Norman Packard、Mark A Bedau、Alastair Channon、Takashi Ikegami、Steen Rasmussen、Kenneth O Stanley 和 Tim Taylor。开放式演化综述：开放式演化 II 专刊的编者按。人工生命，25(2):93–103，2019 年。Kenneth O. Stanley。开放式演化为何重要。人工生命，25(3):232–235，2019 年。

Kenneth O. Stanley、Joel Lehman 和 Lisa Soros。《开放式性：你从未听说过的最后一个重大挑战》，2017年。URL https://www.oreilly.com/radar/ open-endedness-the-last-grand-challenge-youve-never-heard-of/。

Tim Taylor、Mark Bedau、Alastair Channon、David Ackley、Wolfgang Banzhaf、Guillaume Beslon、Emily Dolson、Tom Froese、Simon Hickinbotham、Takashi Ikegami 等人。《开放式演化：来自约克开放式进化研讨会的观点》。人工生命，22(3):408–423，2016年。