

複雜系統、人造生命與人工智能

- PeterWolf

1. 核心問題意識

三個領域共同關注的根本問題：

- 複雜性如何從簡單規則中湧現？
- 適應性與學習如何發生？
- 智能是否需要生物基質？
- 計算與生命的本質關係是什麼？



交集點：三者都在探索「組織化複雜性」的產生機制

2. 湧現的計算機制

- 2.1 從微觀到宏觀
 - 跨尺度的湧現現象：

層次	複雜系統	人造生命	人工智能
微觀	個體規則	基因/細胞	神經元/參數
中觀	局部結構	組織/器官	特徵檢測器
宏觀	系統行為	生物體	智能行為

2. 湧現的計算機制

<https://www.youtube.com/watch?v=wbPgoZ2d0Nw>

2.2 湧現計算的實例

- 元胞自動機（CA）→ 神經網絡
 - Wolfram Class IV CA：通用計算能力
 - 卷積操作的局部連接類比
 - 時空模式的湧現 (e.g., 天下大勢，分久必合，合久必分；雨男)
- 群體智能 → 多智能體系統
 - 蟻群算法與強化學習的結合
 - 群體機器人的自組織行為
 - 注意力機制的群體決策類比

3. 演化作為學習機制

3.1 達爾文主義的計算版本

- | 生物演化 | 演化計算 | 機器學習 |
|------|-------|--------|
| 基因型 | 參數/架構 | 權重/超參數 |
| 表現型 | 行為/性能 | 預測/輸出 |
| 選擇壓力 | 適應度函數 | 損失函數 |
| 突變 | 隨機擾動 | 梯度噪音 |
| 重組 | 交叉算子 | 集成學習 |

複雜系統

?

3. 演化作為學習機制

3.3 集體決策的智慧

- 群體決策優於個體的條件：
 - Condorcet 陪審團定理
 - 多樣性預測定理
 - 集體準確性的湧現
- AI 應用
 - 集成方法（Ensemble Methods）
 - 投票與共識機制
 - 分散式訓練的理論基礎



4. 生命與計算的邊界

強人造生命論題



Lee Cronin

Lee Cronin和他的研究小組正探索複雜的自組織化學系統的形成—稱之為無機生物學。

化學家Lee Cronin問道，「生命最小的單位為何？」目前細菌是可進行演化的最小化學單位。但在Cronin的新研究領域中，他思考非生物的生命形式。為了探索這個問題，並嘗試瞭解生命本身如何由化學物質形成，Cronin及其他研究人員試著從能模仿天然細胞行為的完全非生物性化學物質中創造真正的人造生命。他們將其稱為化學細胞，或Chells。Cronin的研究興趣還包括自組裝及自我發展結構—在奈米層面上進行生命組合是較佳方式。他的研究團隊在Glasgow大學進行的晶體結構研究已發表了大量論文。

- "生命是過程，而非物質。任何能夠實現相同過程組織的系統都是活的。"

那物質方面呢？如果我們能賦予物質生命，會發生物質性危害嗎？因此，思考一下，這是個嚴重的問題。如果筆可以複製，確實會有點問題。因此，如果我們想賦予物質生命，就必須用不同的方式思考，我們也必須謹慎看待這個問題。但在我們能製造生命之前，讓我們思考一下生命真正的特性為何。抱歉讓你們看這麼複雜的圖表，這只是細胞代謝途徑的總圖。細胞對我們來說顯然是令人著迷的東西，合成生物學家對細胞進行操作，化學家試著研究分子以瞭解疾病，你體內同時運行著這所有的代謝途徑。你的身體可進行調控、轉錄訊息、製造催化劑、產生各種機能。但細胞的功能如何運作？它會分裂、競爭、存活。我想這就是我們思考建立生命概念的起點。

但生命還有什麼特性？嗯，我喜歡將它想成一團瓶中的火焰，我們在圖中看到是單細胞複製、代謝及藉由化學反應燃燒的過程。因此，我們必須瞭解，如果我們打算製造人造生命或瞭解生命的起源，就必須以某種方式提供動力。所以在真正著手製造生命之前，我們必須思考生命起源於何處。達爾文本人在一封寫給同事的信中寫道，他認為生命可能出現在某些溫暖的小池塘中；也許不在蘇格蘭，也許在非洲，也許在別的地方。但真正的答案是，我們對此毫無概念，因為生命的起源依然是個問號。想像一下，四十五億年前，存在一個充滿化學物質的溶液，人類從中誕生。

https://www.myoops.org/ted_detail.php?id=203

4. 生命與計算的邊界

爭議點：

- **生命是否等價於計算？**
- **計算是否等價於過程？**
- **語言是否等價於計算？**
- **碳沙文主義（Carbon Chauvinism）：只有碳基生物能計算。**
- **濕體（Wetware）與矽基的差異是否本質？**

4. 生命與計算的邊界

連續體觀點：

病毒 → 細菌 → 多細胞生物 → 社會性昆蟲 → ?AI 系統?

- **評估準則：**
 - **自主性 (Autonomy)**
 - **適應性 (Adaptation)**
 - **複製能力 (Reproduction)**
 - **代謝 (Metabolism)**
 - **演化能力 (Evolvability)**

5. 研究方法論

5.1 跨學科整合

- 必要的知識背景：
 - 動力系統理論
 - 演化生物學
 - 資訊理論
 - 統計物理
- 必要的知識背景：
 - 計算神經科學
 - 機器學習理論
 - 生成語言學

5. 研究方法論

5.2 跨領域的困難

- 方法論挑戰：
 - 術語與概念的對應
 - 不同抽象層次的橋接
 - 實驗設計的複雜性
 - 不同領域的對話困難

6. 當前研究前沿

6.1 世界模型（World Models）

- 架構：
 - 視覺編碼器（V）
 - 記憶 RNN（M）
 - 控制器（C）
- 與複雜系統的連接：
 - 預測作為適應的基礎
 - 內部模型的演化
 - 想像與規劃的計算基礎

6. 當前研究前沿

6.2 因果湧現 (Causal Emergence)

- 宏觀尺度的因果效力
- 有效資訊 (Effective Info) 的測量
- 弱 / 強湧現的區分

對 AI 的意義：

- 表面的因果結構
- 可解釋性的層次
- 抽象的計算角色是本體論地否存在？ (或是認識論地存在？)

1. 核心問題意識

三個領域共同關注的根本問題：

- 複雜性如何從簡單規則中湧現？
- 適應性與學習如何發生？
- 智能是否需要生物基質？
- 計算與生命的本質關係是什麼？

交集點：三者都在探索「組織化複雜性」的 生機制

7. 理論統一的嘗試

7.1 生命的熱力學理論

- Schrödinger "What is Life?" :
 - 負熵與有序
 - 遺傳密碼
- 現代發展：
 - 非平衡態統計力學
 - 最大熵產生原理
 - 耗散適應 (Dissipative Adaptation)

7. 理論統一的嘗試

7.2 預測處理統一框架

- 階層預測編碼：
 - 大腦作為預測機器
 - 生命作為預測的過程，亦是計算的過程？
 - 演化的預編碼

7. 理論統一的嘗試

7.3 計算複雜性理論

- **Kolmogorov 複雜性：**
 - 最短描述長度
 - 壓縮與預測的等價性
 - 奧卡姆剃刀的形式化
- **湧現的定義：**
 - 計算不可約性
 - 強 / 弱湧現的區分
 - 複雜性階層

8. 實驗設計思考

8.1 驗證湧現的實驗

- 如何區分真湧現與表觀複雜性？
 - 測量指標的選擇
 - 對照組的設計
- 可能方向：
 - 因果干預實驗
 - 資訊流分析
 - 跨尺度觀察

8. 實驗設計思考

8.2 人造生命的開放實驗

- 虛擬環境：
 - Avida、Tierra 的後繼
 - 開放世界模擬器 (e.g., minecraft)
 - 多層演化平台
- 機器人實驗：
 - 長期演化實驗
 - 身體 - 大腦共演化 (具身)
 - 真實物理的約束 (真世界, 非模型)

9. 方向的整合

9.1 何為心智？何為智能？

- 爭論：
 - 複雜系統可完全還原嗎？
 - 湧現現象的本體論地位該堅持？還是可以改為認識論？
- 對 AI 的意義：
 - 符號主義 vs. 聯結主義
 - 模組化 vs. 端到端學習
 - 多尺度建模的必要性

9. 方向的整合

9.2 目的論的再興起

(但這是錯的！小心，不要扮演上帝！)

- 演化中的目的性：
 - 目標導向行為無需設計者
 - 吸引子作為 " 目的 "
 - 遠程因果（Teleology）的自然化
- AI 中的目標：
 - 目標函數是誰設定的？
 - 在目標的湧現
 - 價值對齊問題的本質

10. 跨領域案例研究

10.1 LLM 的規模湧現

- 量變到質變：
 - 小模型：模式匹配
 - 大模型：推理、創造、理解？
- 湧現能力：
 - Few-shot learning
 - Chain-of-thought reasoning
 - 指令跟隨
- 未解問題：
 - 何時何地才會湧現？
 - 可預測嗎？
 - 理解 vs. 模仿？

10. 跨領域案例研究

10.2 波士頓動力的機器人

- 具身智能的實踐：
 - 動態平衡與恢復
 - 地形適應
 - 多模態整合
- 與傳統 AI 的差異：
 - 實時反應的優先性
 - 物理定律的硬約束
 - 感知 - 動作的緊密耦合

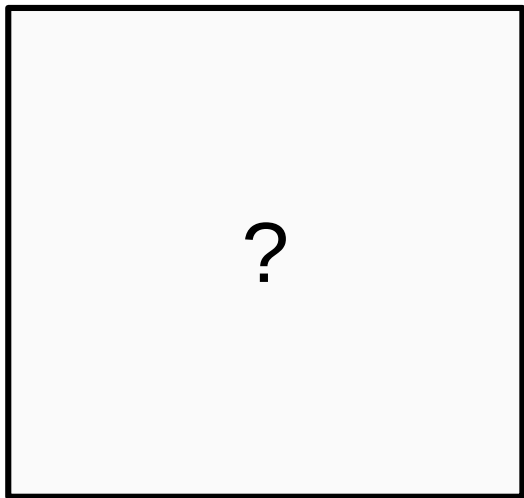
11. 未來技術方向

11.1 神經符號整合

- 兩種範式的優勢：

符號 AI	聯結 AI
可解釋性	通用性
組合性	泛化
邏輯推理	模式識別
少樣本	大數據

NeuroSymbolic AI



11. 未來技術方向

整合嘗試：

- **Neural Module Networks**
- **Differentiable Programming**
- **Probabilistic Programming**
- **Loki NLU System**

11. 未來技術方向

11.2 持續學習系統

- **生物啟發：**

- 海馬迴的記憶鞏固
- 睡眠的重播機制
- 神經發生的作用

- **技術方法：**

- 動態知識圖譜
- 語境感知設計
- 程式重載

13. 總結與展望

13.1 回顧

- 複雜系統教我們：
 - 簡單規則 → 複雜行為
 - 整體 \neq 部分之和
 - 湧現是普遍現象
- 人造生命教我們：
 - 從能量角度來看，生命是過程，非物質
 - 演化是強大而簡單的預載算法
 - 自組織是結果，無需設計
- 人工智能教我們：
 - 智能可以工程化
 - 學習是核心能力
 - 表現是商業成功的關鍵，
不一定是科學前進的關鍵

13. 總結與展望

13.2 整合的願景

1. 適應性系統的通用理論

- 預測、學習、演化的統一
- 湧現的計算理論：Algebraic Mind

2. 新一代智能系統

- 自主、適應、演化
- 具身、社會性、開放式
- 生物級效率與 Robustness

3. 理解型的自然智能

- 大腦作為複雜適應系統
- 生命的計算本質
- 意識的湧現機制

作業

理論作業：

分析兩個特定系統（如蟻群、神經網絡）的湧現特性

程式作業：

實現並擴展 Game of Life