

## 使用蒙特卡羅法模擬獵物與捕食者的共同演化

11100586 黃少甫

### 摘要

本專題使用基於蒙特卡羅法來探索獵物和捕食者族群的共同演化。透過模擬生存、繁殖和適應等關鍵的進化機制，該計畫直觀地展示了速度和視覺等特徵如何隨著世代的推移而進化。結果驗證了選擇壓力推動這些特徵發生重大變化，從而導致族群規模和演化優勢的變化。

### 前言

當我在生物課本中學習到演化相關知識時，特別好奇這些理論究竟只是一種觀察的結論，又或是禁得起模擬實驗的驗證。共同演化是我個人覺得最有趣的部分，因為捕食者與獵物之間的捕食關係是任何生態系中食物網的建構基礎，再結合遺傳演化後，是否可以復現真實情況的種群消長與演化優勢的變化？因此，本專題調查了在不同環境約束下獵物和捕食者的關鍵特徵（速度和視覺）如何進化。使用基於蒙特卡羅的模擬，我們模擬了食物供應、繁殖和捕食對演化適應性的影響。為了嚴謹的驗證遺傳、演化、生態系的經典理論是否可以完美結合，我們參考了馬爾薩斯的人口論、孟德爾的遺傳原理和達爾文的演化論作為實作的指引和設定。

### 理論框架與實作細節

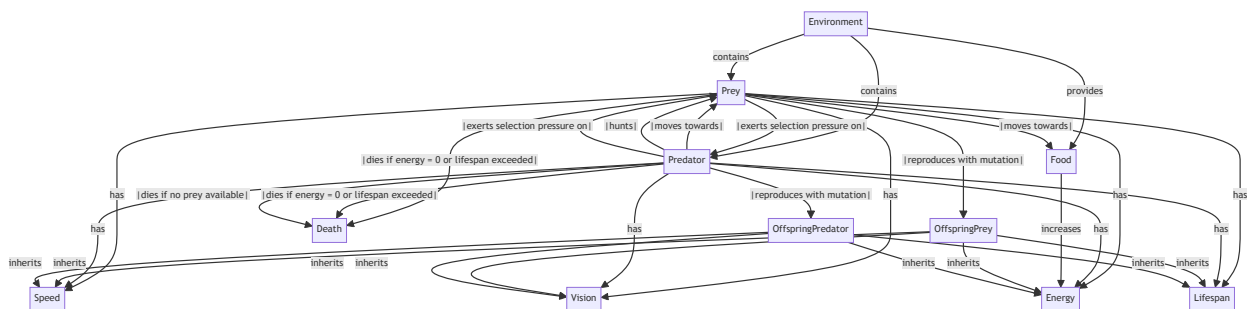


圖1 以Mermaid表示實作邏輯框架和細節

本研究透過程式碼模擬一個二維生態系統，其中包含三種基本元素：食物、獵物與捕食者。我們為這些個體設計了簡單而清晰的行為規則，獵物會尋找並趨向食物，而捕食者則會追蹤並捕捉獵物。每個生物體的行動受到視野範圍與移動速度的限制，這些因素決定了它們在環境中的生存能力。此外，每個個體都擁有有限的生命年限與體力，當體力不足或生命週期結束時便會死亡，而成功獲取食物或獵物則能補充能量。我們基於這些基本設定構建了初始生態系統，並進一步探討其中的族群變化與演化過程。

馬爾薩斯的人口論指出，當資源充足時，族群數量會呈指數增長，但隨著資源減少，個體將面臨競爭、生存壓力與掠奪等因素的影響，使得族群數量受到抑制。在我們的模擬中，獵物在食物豐富的條件下會快速繁殖，導致族群數量顯著上升，而當獵物數量增加後，捕食者也會隨之增長，因為食物來源變得更為充足。然而，當食物資源開始枯竭，獵物族群減少後，捕食者的數量也會隨之下降，形成週期性的族群波動，這種動態與現實生態系統中的捕食-獵物關係相符。

這種週期變動同時推動了生物個體的適應與演化。速度較慢的獵物更容易被捕食，而較快的獵物則有較高的生存機率，使得整體族群逐漸演化出更快的移動能力。同樣地，視野範圍較廣的獵物能夠更早發現捕食者，提高存活率，進而使這種特徵在族群內逐步累積。對捕食者而言，速度與視覺能力同樣影響狩獵效率，因而更適應狩獵環境的個體能夠繁殖，推動捕食者族群的演化發展。

個體的特徵變化基於孟德爾的遺傳學理論與達爾文的自然選擇學說。我們假設每當生物體繁殖時，其後代會繼承親代的速度與視覺範圍，同時伴隨微小的隨機突變，這些變異遵循高斯分佈，確保演化的變動是連續且細微的。在這種機制下，生物的演化過程受到選擇壓力影響，例如捕食者通常會優先捕捉速度較慢的獵物，導致獵物族群的速度逐代提升。此外，獵物若能演化出更敏銳的視覺，便能更早察覺捕食者並逃跑，提高存活率；相對地，捕食者也會因為更成功的狩獵經驗而逐步演化出更優越的視力與速度，使其在競爭環境中存活並繁衍。

這樣的機制形塑了獵物與捕食者之間共同進化關係。隨著獵物的速度不斷提升，捕食者也必須變得更快，否則將無法有效捕捉獵物，這種相互驅動的現象即構成了生態軍備競賽。同樣地，獵物在演化出更敏銳的視覺以提高警覺性的同時，若捕食者進一步發展出更佳的隱蔽能力（例如降低可視度），則這種生態互動將趨於新的平衡點。在這種演化動態的影響下，捕食者與獵物的族群規模持續波動，並反映出自然生態系統中普遍存在的捕食與獵物循環模式。

我們的模擬不僅成功重現了生態族群間的變動趨勢，也展現了自然選擇與遺傳變異在演化過程中的關鍵角色，進一步驗證了物種如何透過適應與競爭來塑造其生存策略。

### 結果與討論

#### 1. 速度與視野的進化

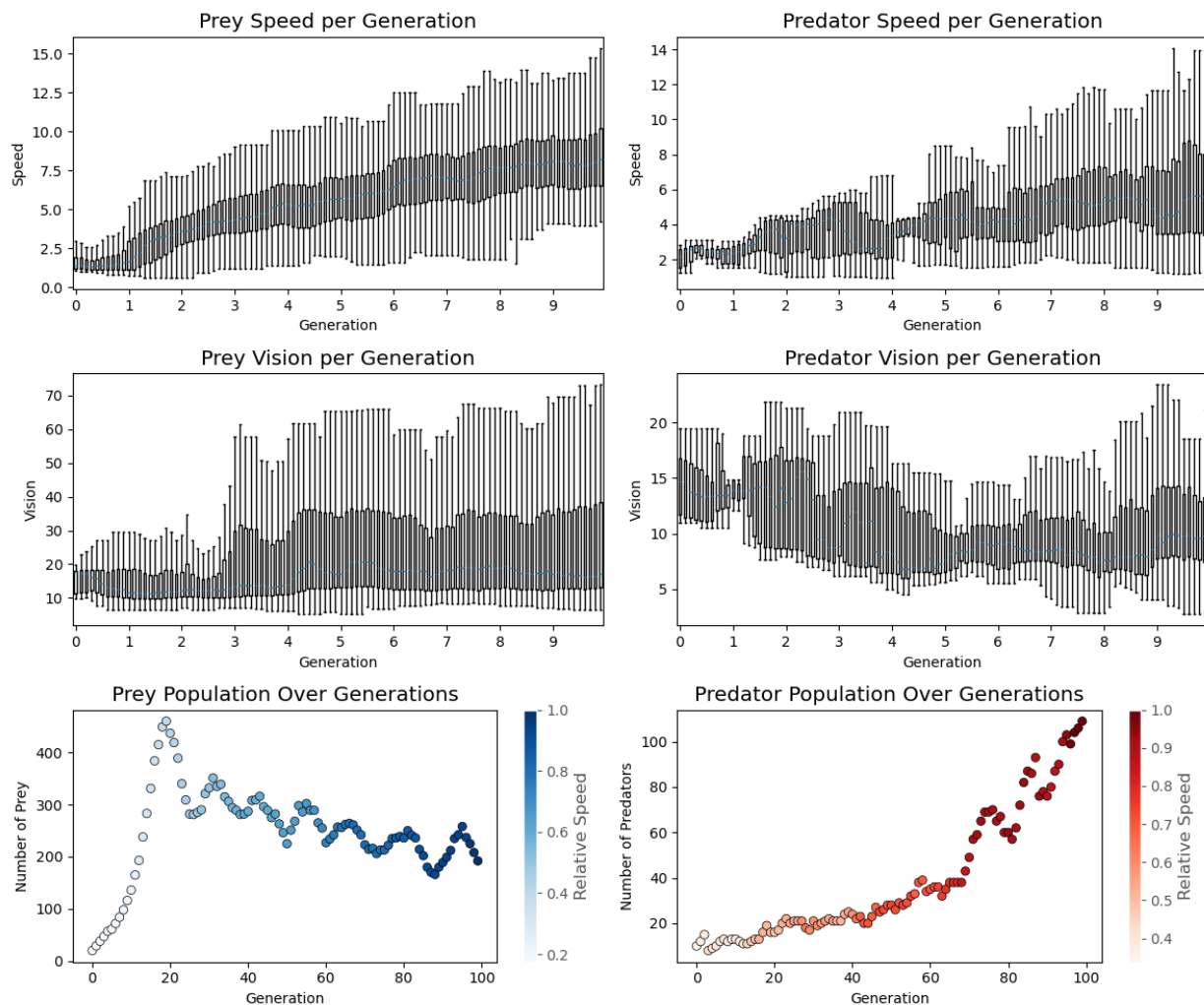


圖2 左上：獵物隨著時間族群速度統計、右上：掠食者隨著時間族群速度統計、左中：獵物族群視野統計、右中：掠食者族群視野統計、下：將種群數量與族群速度隨時間的變化同時呈現

圖2表示，獵物和掠食者的速度都隨著時間的推移而增加，證實了方向選擇。獵物的視野比掠食者的視野擴大得更多，這表明及早發現威脅比更好的狩獵視野更為重要。

2. 人口動態

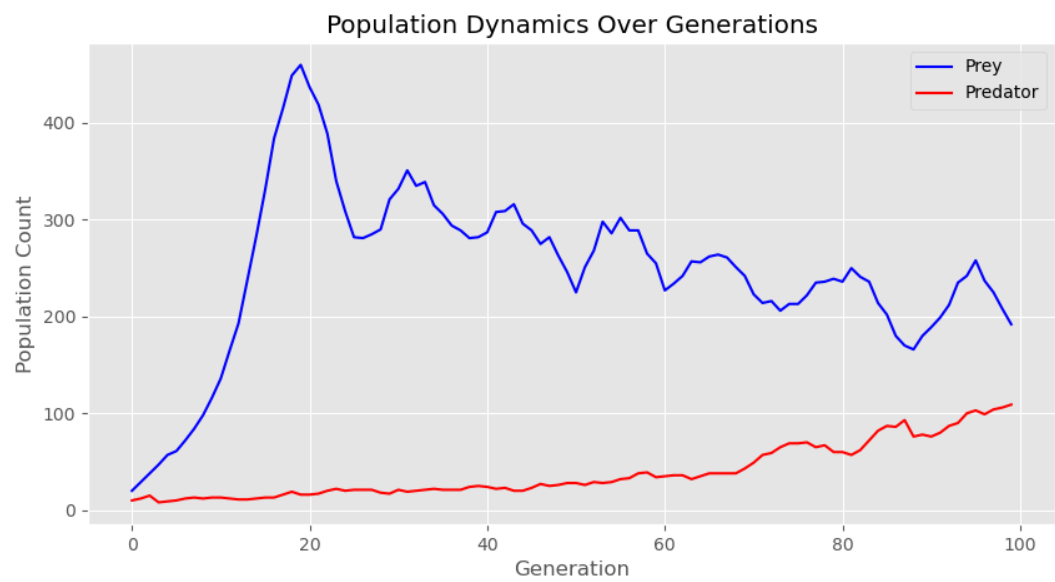


圖3顯示獵物數量最初增加，但捕食者數量後來激增，導致獵物數量減少。這些波動類似於經典的 Lotka-Volterra 捕食者-獵物模型。

3. 理論模型的比較

| 理論   | 預期                      | 模擬     |
|------|-------------------------|--------|
| 人口論  | 基於資源限制出現Boom-bust cycle | 符合理論預期 |
| 遺傳理論 | 遺傳特徵大致承襲自前一代            | 符合理論預期 |
| 自然選擇 | 具有較高的演化優勢者得以繁衍後代        | 符合理論預期 |
| 共同演化 | 跨物種相互增加演化優勢的門檻          | 符合理論預期 |

## 結論

這個模擬提供了對獵物和掠食者之間共同進化軍備競賽的洞見。這項發現與族群、遺傳、演化和共同演化的原理一致，強化了基本的生態和演化原理。未來的研究可能會引入環境變化、不同的捕食者-獵物物種或額外的生存策略來探索更複雜的演化場景。

## 參考資料

- [1] Malthus, T. (1798). An Essay on the Principle of Population.
- [2] Darwin, C. (1859). On the Origin of Species.
- [3] Mendel, G. (1865). Experiments in Plant Hybridization.
- [4] Lotka, A. J. (1925). Elements of Physical Biology.
- [5] Volterra, V. (1926). Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically.
- [6] Dawkins, R. (1976). The Selfish Gene.