



## 專題

# 運用「細胞自動化」概念 在森林生態系模擬

◎李宣德／國立中興大學森林學碩士

◎馮豐隆／國立中興大學森林系教授

### 一、前言

森林常被視為有機體，森林如有機體般，具生命律動般運作著，森林的成長就像有機體，循著一定法則成長。若能找出此法則的脈絡，進而運作，則可以有效地觀察未來森林成長的趨勢，並掌握森林未來使用的空間結構。在未來的地理資訊系統中引入人工智慧的觀

念，可以增進電腦自我學習、組織、架構的能力，這個發展方向也逐漸被認為是地理資訊系統未來重要發展趨勢之一。在這樣的觀念下，擬在森林生態系模擬系統中，由整合地理資訊系統的空間分析技術，與細胞自動化中有關可自

我組織架構、反覆回饋的觀念，嘗試架構出一套新的森林預測模擬系統，以預測模擬未來空間中森林使用的發展狀況。

### 二、細胞自動化

#### (一) 概述

細胞自動化(Cellular automata)是一門新興的理論，近年來逐漸受到廣泛的討論，其應用面廣達整個自然科學領域。細胞自動化的發展，最早可以溯及到1940年代，物



理學家Ulam所提出；不久之後，Von Neumann利用此概念來研究自我複製系統的邏輯特性；而後，Burks（1966）整理、補充其他細節於Von Neumann已有的論文，彙集出版了「自我複製的自動化理論」。Langton於1980年繼續深入研究，並利用此理論發展出能自我複製的新一代細胞自動化，將細胞自動化的理論的發展往前推進一大步。這種自我控制的理論，因為是將空間劃分成小區塊，且每個區塊均具有類似生物自我繁衍的觀念，所以將這種空間中的區塊稱為「細胞」。

細胞自動化的產生方式非常簡單，他是由一種簡單的演化規則所產生出來的複雜現象，其最基本的組成要素是形狀相同的小方塊個體，每個個體都依循著相同的演化規則去進行演化。每個個體所反應出的演化現象，單獨看來只是簡單的變化。若由整體宏觀的角度來看，便可發現整體系統複雜了起來，他可以隨著時間產生不同的狀態，因此，細胞自動化是探討複雜系統中局部與整體間互動關係最簡單的模式，電腦模擬與數學推演是瞭解細胞自動化的行為的兩種方法。

細胞自動化可藉由不同的演化規則，連結小尺度與大尺度的區塊細胞。

其基本概念是假設每一個最小的單元體（細胞）皆存在著一些數值，並與附近其他的單元體互動，在所假設的規則下持續的演化下去，會產生較大尺度的多樣形態。

細胞自動化演化的空間結構並沒有維度的限制，他可以是一維（線性）、二維（平面）或三維（立體）的空間架構。基本來說，維度越大會愈接近現實，但演化形態的複雜性亦隨之增加，但目前的研究應用，大都以一維或二維空間為主。

## （二）基本要素

在進行細胞自動化模型成長操作時，必須先定義出四種要素：

1. 首先要明確定義出細胞的空間結構以及細胞的空間相鄰關係；

2. 定義在這套系統中每個細胞可以選擇的狀態，而且在一個時刻中只能有一種狀態；

3. 某一個細胞狀態的轉變是決定於相鄰細胞的狀態，而相鄰細胞的狀態又是根據其相鄰的細胞而定；

4. 系統必須規定細胞狀態轉變規則的函數，也就是所謂的「成長規則」，其中規定某細胞的成長狀態如何受到相鄰細胞狀態的影響。

利用細胞空間中相互影響的關係加

以衍生，便可將之應用於模擬空間的各種變化情形。

### (三) 演化形態特性

物理學者 Wolfram 在 1984 年指出，細胞自動化的演化型態具有自我相似性 (self-similarity) 與自我組織性 (self-organization) 兩種特性 (Wolfram, 1984)。

1. 自我相似性：就是細胞隨著時間演化形成的型態，往往是由許多相似形狀的小單位結構所組成的。這樣的特性也稱之為碎形 (fractal) (Mandelbrot, 1982)。碎形理論最大的貢獻便是碎形的維度不是一般的整數，他打破以往傳統歐式維度整數的概念，可以用來解釋一些無法用歐式維度來解釋的情形。

2. 自我組織性：是指不論起始狀態是屬於有秩序或是雜亂的排列，隨著時間的演變，整個形態會逐漸變成具有組織的結構形態，這種結構的產生，像是系統本身具有某種力量將其結構化。

### (四) 結果分類

Wolfram (1984) 指出細胞自動化不但

具有豐富的數學結構，且屬於非線性動力系統，他將所有的細胞自動化歸納為四個類型。

1. 單一狀態：無論剛開始細胞處於何種狀態，如果所有的細胞到後來全部都滅亡，都變成單一的畫面，沒有任何變化。這種最終演化至單一同質者屬之。

2. 穩定狀態：較第一類有生氣，隨著時間的演化，在這些規則的運作之下，細胞會合併成長為一個穩定的狀態。這些穩定狀態，有些是靜止的結構，有些則是週期性的震動。

3. 渾沌狀態：與第一類剛好處於兩個極端，是過度的生氣蓬勃，細胞的演化是朝向一種不穩定且不可預測的形態發展，某些結構剛一成形便馬上被破壞崩潰。

4. 複雜狀態：這種情形不會產生靜止的結構，也不會產生全然「渾沌」的狀態，他產生有連慣性的結構，以一種奇妙的方式繁殖、成長、分裂、並重新組合，從來不會安定下來。

表 1：各類細胞自動化特性比較表 (陳建元，1996)

特性種類	細胞演化情形	細胞結構形態	預測性	變動範圍
單一狀態	隨時間而減少消失	空間均質	完全可預測	無
穩定狀態	維持固定形式	以簡單穩定的次序或週期結構	部份範圍可預測	部份範圍
渾沌狀態	以固定速度無限期增長	渾沌結構	不可預測	範圍不斷增加
複雜狀態	增減無規律	複雜結構	不可預測	無規則

各類細胞自動化之特性比較，如表1所示。一般來說，要探討哪種發展形態歸於那一類，唯一的方法就是觀察與實證的結果，而無法事先對某一規則的演化結果預測其分類的歸屬。

### (五) 演化規則

在1970年，英國的John Conway發展出一套叫做「Game of Life」的互動模式，這包含了細胞自動化的基礎理論，可以利用最簡單的方式來自我再造，藉由簡單的規則衍生出各種無窮且複雜的理論。總而言之，「Game of Life」可以將每個細胞在空間中的狀態呈現出來，就像平面座標中每個細胞都生存在每個格子中，可以依據簡單的規則來了解生、死、更新以及繁衍，每一個細胞的生死都決定於相鄰細胞的狀態。

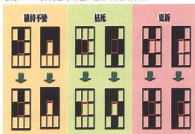
首先設定細胞有活與死兩種狀況，當某細胞周圍有2-4個活的細胞，則這個細胞將維持或轉變為活的細胞；當一個細胞周圍有1個或5個以上活的細胞，則這個細胞將維持不變或轉變為死的細胞，如表2所示，其演化情形如圖1所示。

整個模式就是靠這樣簡單的幾個規則，但是它神奇之處便是於此。當這些規則轉化成電腦程式之後，會發現螢幕

表2：「Game of Life」規則表

鄰近細胞具有之狀態	檢視之細胞狀態	
	活的細胞	死的細胞
只1個活細胞	死	不變
2-4個活細胞	不變	活
5個以上活細胞	死	不變

圖1：細胞狀態之演化情形



上似乎出現了新的生命，他們開始自我組織成為各式各樣連貫的形態結構，Conway 便在此簡單的規則中發現了各式各樣的演化形態。目前利用細胞自動化所設定的規則大多導衍於 Conway 「Game of Life」的精神。

### 三、應用於森林生態系模擬

細胞自動化模型所建立之細胞自動化規則及其有關自我組織架構、反覆回饋的觀念，可應用於地理資訊系統(GIS)的空間分析上，利用電腦模擬觀察地景在空間的演化情形。細胞自動化技術亦可用來探討不同空間尺度的網格單元性質間的關係。因此，將細胞自動化應用於森林生態系模擬，如樹種變化的演替

規則、森林地景動態模擬，是相當有用的。此技巧可應用在生態系動態變遷的探討，以進行各種假設情境模擬環境生育地因子的變化，提供生態系經營政策與管理策略等決策之參考。

## 四、結論

台灣生態系經營現今所迫切要做的工作是建立、評估台灣主要樹種、林型，在不同環境生育地因子的現況、功能及生長、演替變遷模式，以利生態系現象、狀態之正確的解釋和應用。結合細胞自動化中有關可自我組織架構、反覆回饋的觀念，經由對森林空間發展之研究，可以瞭解各種變因對森林發展的影響程度，以假設情境模擬出未來森林之發展方向。由模擬過程，可以清楚地顯示森林明確的空間分佈及其變化情形，以建立一套具生態生物機制過程的森林生態系模擬系統。以期能使理論、技術與實際應用相結合，充分發揮森林生態系模擬系統之功能。使森林經營者，更能掌握林木的生長、林分族群動態及地景的變遷資訊，以便在符合生態原則下能有效地經營森林，系統之模擬結果便可以做為森林生態系經營規劃以及決策者在制訂政策時之參考。

## 五、引用文獻

1.汪禮國，1997，細胞自動體模式(Cellular Automata)與都市空間演化，國立中興大學法商學院都市計劃研究所碩士論文。

2.陳建元，1996，資訊收集對於單細胞自動體中模仿行為的影響－以囚犯困境空間模式為基礎的電腦模擬，中興大學都市計劃研究所碩士論文。

3.Hogeweg, H., 1988. Cellular Automata as a Paradigm for Ecological Modeling. *Applied Mancairtics and Computation*, 23:81-100.

4.Mandelbort, B. B., 1992. *The Fractal Geometry of Nature*.

5.Von Neumann, J., 1966. Theory of self-reproducing automata, in A. W. Burks(ed.) 1949 *Univ. of Illinois on the Theory and Organization of Complicated Automata*.

6.Wolfram, S., 1984a. Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311(4):419-424.

7.Wolfram, S., 1984b. Computer software in Science and Mathematics. *Scientific American*, 351:188-203.

8.Wolfram, S., 1994. Cellular automata. in S. Wolfram, *Cellular automata and Complexity*. 