

國立交通大學 電機資訊學士班

資訊書報專題

專題名稱：細胞自動機的平行計算與模擬

指導教授：李毅郎

專題學生：0210003 楊宗諺

0210018 呂浚鉸

0210031 羅紹元

日期：103 年 7 月 10 日

一、 研究動機

當初在聽到細胞自動機時，知道他可以模擬一群細胞的存活或死亡，那時我們雖然不太清楚，但是細胞竟然可以用機器模擬它的生死狀況，這真的好新奇，而且這個細胞自動機竟然可以小至細胞，到化學反應的模擬，再到都市的擴張、自然災害的應用，甚至是宇宙的形成，都可以用細胞自動機來模擬，原來這個細胞自動機是那麼的多功能，這些都是我所想像不到的事情，因此在考慮之後，我們決定做這項充滿著各種變化的細胞自動機。

二、 研究主題介紹

細胞自動機 (Cellular Automata)，簡稱 CA，是一種離散模型，由一些特定規則的格子所組成，每個格子看做是一個細胞；每一個細胞可以具有一些狀態，但是在某一時刻只能處一種狀態之中。隨時間變化，格子上的每一個細胞根據周圍細胞的情形，按照相同的法則改變狀態，即一個細胞的狀態是由上一個時刻所圍繞的細胞的狀態所決定。CA 以簡單的規則，卻能夠產生複雜的動態交互現象，這些年來已經被運用於不同領域的研究，包括通訊、計算、建設、生長、再生、競爭及演化，甚至利用 CA 所做的生物模型也已經被提出。

(一) CA 的發展歷史

1. 1950 年代，Stanislaw Ulam 和 John von Neumann 為了模擬自我複製的發生，最早提出了 Cellular Automata，但未獲得學術界重視。
2. 1970 年代，John Horton Conway 設計了康威生命遊戲 (Conway's game of life)，吸引了科學家們的注意。
3. 1980 年代，Stephen Wolfram 對一維 CA 的 256 種規則所產生的模型進行深入研究，並將 CA 產生的模型依照複雜性分成四類。。
4. 1987 年，Christopher Langton 提出了人工生命 (Artificial Life)，CA 便是 AI 的第一個雛形。

(二) CA 的三個特徵

1. **Parallel computation**(平行計算)：每個細胞個體同時同步改變。
2. **Local**(局部的)：細胞狀態變化只受周遭細胞影響。
3. **Homogeneous**(一致性的)：所有細胞均受同樣的規則控制。

(三) CA 的構成

1. 構成 CA 的要素

一個標準的 CA 可表示為 $\{L, d, S, N, f\}$ ，其中：

- L: 細胞空間的範圍
- d: 細胞空間的維度
- S: 細胞的狀態集合
- N: 鄰域內的細胞集合
- f: 改變細胞狀態的規則
- 各細胞的初始狀態

這 6 項基本要素可構成一個 CA 模型。

2. CA 方格的類型

CA 模型由眾多相同形狀的格子佈滿架構而成，而這些格子的形狀可以是正方形、六邊形、三角形等。一般我們所探討的 CA 大都是正方形格子，規則比較容易定義，也方便觀察。

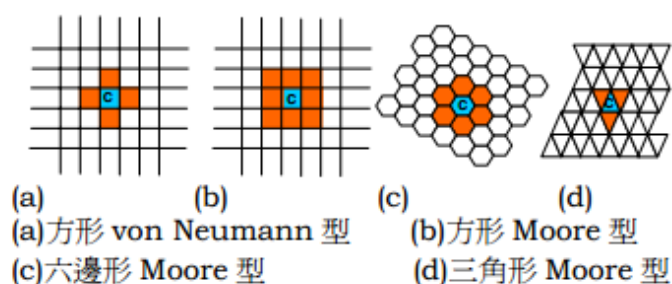


圖 1 CA 方格的類型



圖 2 六邊形方格

(四) CA 的四個普遍性等級

1. 四個普遍性等級

Stephen Wolfram 在 1980 年代的著作 << A New Kind of Science >> 和幾篇相關的論文中，根據 CA 模型的行為定義了四類模式類型，也是第一個對 CA 模型分類的嘗試。以下為 Stephen Wolfram 所分類的「四個普遍性等級」：

- (1) 第一級：完全的死寂。無論細胞的初始狀態為何，經過幾個疊代之後，細胞便會全部死亡或是不再做任何改變。這個等級的 CA 對初始狀態的敏感度非常低，也就是在同一演化規則下，不論初始狀態如何改變，畫面最終都會呈現死寂，沒什麼差異。

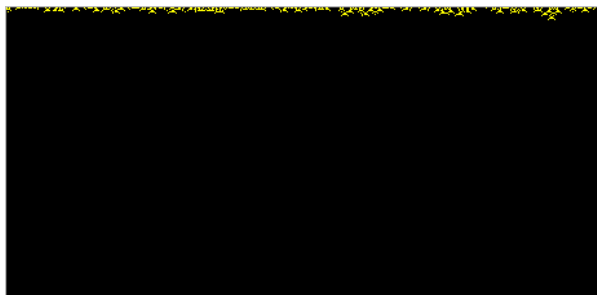


圖 3 第一級圖形

- (2) 第二級：稍有一點生氣。細胞隨機散布的初始狀態會很快地形成一組靜止的塊狀，另有幾塊會處於週期性的穩定振動，不會再有其他變化。

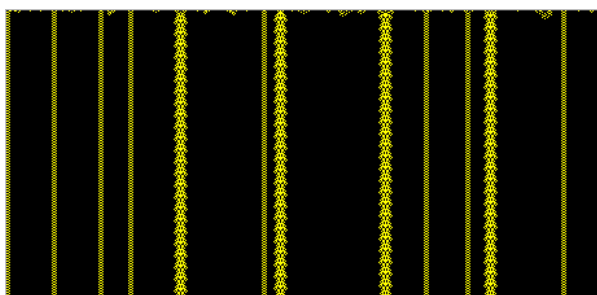


圖 4 第二級圖形

- (3) 第三級：過度的蓬勃。疊代的過程中只有極為短暫的穩定形態，絕大多數是過度活潑與隨處變遷的結構，在蓬勃的畫面中看不到特定的週期模式與規則，其特徵是混沌（Chaotic）。這個等級的 CA 對初始狀態非常敏感，也就是當用同一演化規則，但初始狀態有極微小差異的兩個模型，來做疊代比較時，會發現隨疊代次數的增加，兩個圖形的差別越來越大，呈現完全不同的結果。

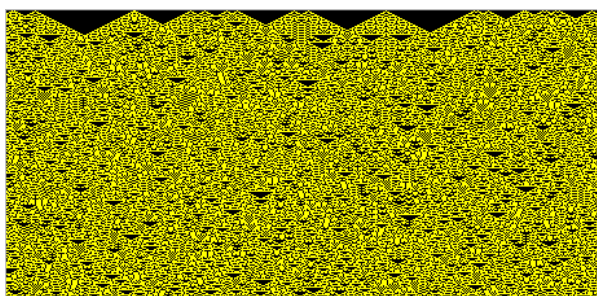


圖 5 第三級圖形

- (4) 第四級：疊代圖形處於秩序與混亂之間，有週期的穩定振動與不斷分化變遷的紊亂區塊交錯其中，而且原本亂無章法的細胞群落有時會突然寂靜地穩定下來，而過了一陣子又開始分裂與擾動，甚至可以看到有滑翔機（glider）在不同結構之間傳遞訊息，其特徵是複雜性（Complexity）。

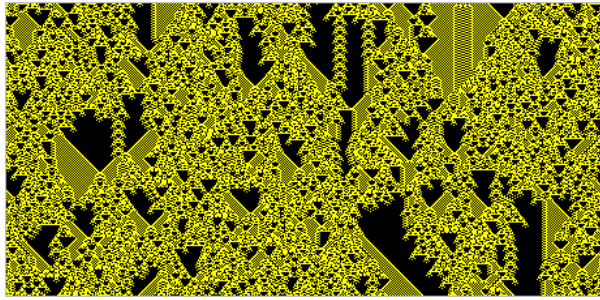


圖 6 第四級圖形

第四級的 Complexity 蘊藏著自我複製和人工生命的精髓，但在傳統動力系統理論中，找不到類似第四級的說法，是完全未知的領域。在 Stephen Wolfram 提出的當時，沒有人知道這個規則的真正含意，也沒有人知道為什麼有的規則能夠產生第四級的行為，有的規則卻不能。這些問題引起了人工生命領域的創始人之一 Christopher Langton 的注意。

2. 以 λ 參數探討四個普遍性等級

於是 Christopher Langton 使用了 λ 參數，他定義 λ 參數為：

$$\lambda \text{ 參數} = \frac{\text{疊代出存活細胞或誕生細胞的規則個數}}{\text{規則總個數}}$$

由定義可知 λ 參數介於 0 ~ 1 間，而我們只需要探討其中 0 ~ 0.5 的區間範圍即可。因為在 0.5 ~ 1 區間，相當於將死亡與存活的細胞狀態對調，而這個區間的等級表現是與前者對稱的。其中，每個區間都包含「四個普遍性等級」，就 0 ~ 0.5 區間，當 λ 參數增加，CA 通常會依序經歷過第一級、第二級、第四級、第三等級。以下是 Christopher Langton 的實際測試情形：

在 λ 值接近 0.0 時，只會出現死亡、僵化的第一級規則。稍微把 λ 值提高，則發現週期性的第二級規則，這時再把 λ 值提高一點，第二級規則要花越來越多時間才能穩定。如果他直接把 λ 值跳到 0.5，會如預期的出現第三級的全然混沌狀態。然而在第二級和第三級之間，存在著「 λ 關鍵值」，約 0.273，可以發現第四級規則，且這第四級只存在於極小的區域中。Christopher Langton 成功地用這個簡單的參數，找到了第四級在不同等級之間的轉換位置：

- I , II ==> IV ==> III
- 秩序 ==> 複雜 ==> 混沌

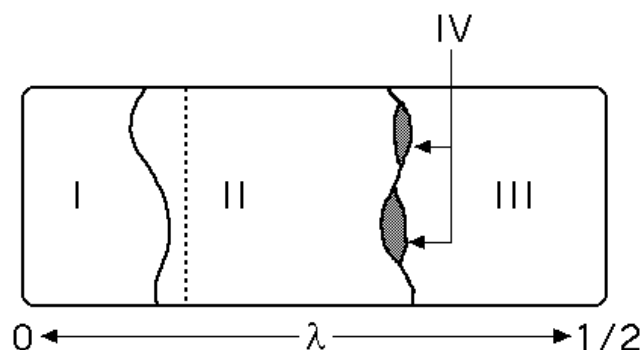


圖 7 λ 值與四個等級的關係圖

第四級處在第二級與第三級的轉換點，在這轉換點上呈現完美的平衡，有秩序的結構與混沌的紊亂等量齊觀，秩序與混沌交織成有創造性、變幻莫測的生命樣態，這也就是所謂的 Complexity。而 Complexity 的特徵為「突現」(Emergence)，即「整體大於部分的總和」，也是「人工生命」的最主要特徵。Christopher Langton 把這能產生 Complexity 現象的系統稱為「混沌邊緣」(Edge of Chaos)，這項特性也讓科學家聯想到宇宙的誕生與生命的緣起，使 CA 成為研究這些主題重要的模擬工具之一。

(五) CA 和康威生命遊戲 (Conway's Game of Life)

1. Conway's Game of Life 的介紹與規則

康威生命遊戲 (Conway's Game of Life)，是二維的 CA，由劍橋大學數學家 John Horton Conway 於 1970 年所提出。他認為一群細胞於平面中以一定的條件成長時，不會無限制的成長，於是他定義細胞在過度孤單（周圍細胞太少）與過度擁擠（周圍細胞太多）時會死亡，只有在鄰居數量適當（周圍細胞數量等於所設定的值）時細胞才會在下一次疊代時存活。他將此構想設計成規則極為簡單的 CA。

在這個 CA 中，每一格子代表一個細胞，每一個細胞有八個鄰居，這些細胞有兩種狀態：「生」、「死」，演化規則 (Life Rule) 如下：

- (1) 當前細胞為死亡時，周圍有 3 個存活細胞，則該細胞變存活。
- (2) 當前細胞為存活時，周圍低於 2 個（不含 2 個）存活細胞，則該細胞變死亡。
- (3) 當前細胞為存活時，周圍有 2 個或 3 個存活細胞，則該細胞保持存活。
- (4) 當前細胞為存活時，周圍有 3 個以上的存活細胞，則該細胞變成死亡。

Conway's Game of Life 被提出後馬上造成轟動，因為它僅以幾條簡單的規則，便能產生類似於生命演化過程中無比複雜的現象，這就是複雜性科學的研究焦點。

2. Conway's Game of Life 的三種穩定結構

模擬 Conway's Game of Life 可以觀察到細胞群自我組織成各式各樣的連貫性結構。有震盪、滾動、以及一群活細胞以固定的速度滑過的「滑翔機」。這些穩定的結構可分成三類：

- (1) 第一類：疊代過程中，細胞群不會改變其形狀。
- (2) 第二類：blinker(閃光燈)。疊代過程中，細胞群會在有限的疊代次數內週期循環其形狀。
- (3) 第三類：glider(滑翔機)。除了週期循環其形狀，還會穩定移動。



圖 8 Conway's Game of Life 範例 1



圖 9 Conway's Game of Life 範例 2

3. Gliders 的特性

Gliders 是會穩定移動並維持周期循環的結構，是生命遊戲中很具有代表性的特徵，它具有以下特性：

- (1) 具有訊號儲存與訊號傳遞的功能
- (2) 以 Artificial Life 為計算單位的電腦雛形
- (3) 川流不息的位元
- (4) 符號運算（glider 的碰撞相當於邏輯閘，入射機群為輸入，而碰撞後的碎片為輸出）
- (5) Game of life 在邏輯上，足以涵蓋數位電腦的全部功能。

也就是說，能夠產生 gliders 的生命遊戲，代表它具有訊號儲存與訊號傳遞的功能，而訊號的儲存與傳遞是生物演化機制的重要特徵，也是建構一台電腦的必要條件。同時也說明了 CA 可以建構一個以 Artificial Life 為計算單位的電腦雛形。

（六） 其他生命遊戲規則的介紹

1. Logic Rule

Logic Rule 的規則比 Conway's Game of Life 的 Life Rule 還要簡單，又呈現著截然不同的風貌，能夠產生更多樣而互相碰撞的滑翔機，而且由少數的細胞群落便能出現豐富的變化，以下為其規則：

- (1) 對一個存活細胞，任何狀況都無法繼續存活。
- (2) 對一個死亡細胞，當周圍有 2 個存活細胞，該細胞變存活。

2. Brain Rule

Brain Rule 是由 Brian Silverman 於 1984 年提出，與 Logic Rule 幾乎一樣，唯一不同的是它定義細胞有三個狀態：死亡、存活、幽靈狀態（ghosts）。

幽靈狀態指的是細胞在不符存活條件時，並不會馬上死亡，而會以第一級的鬼魂狀態繼續存留，下一次疊代時，便以第二級的鬼魂狀態存留，直到所有的鬼魂狀態都輪完才會真正死亡。幽靈狀態介於存活與死亡之間，它並非

正常存活，也不算是死亡的細胞，通常會以不同的顏色來表示不同級數的幽靈狀態，以下為其規則：

- (1) 對一個存活細胞，任何狀況都無法繼續存活。
- (2) 對一個死亡細胞，當周圍有 2 個存活細胞，該細胞變存活。
- (3) 存在一個幽靈狀態。

3. 其他規則

Game of life 的規則設定表示法：Survivals, Births, Ghosts (S/B/G)

名稱	規則 (S/B)	描述
2x2	125/36	有許多種擺動體與固定結構，但是幾乎沒有滑翔機
34 Life	34/34	有許多種擺動體，較少固定結構，群落有擴展的現象
Amoeba	1358/357	密度高的群落會形成類似變形蟲的圖樣，隨機的變形
Assimilation	4567/345	密度高的群落會容易形成穩定的菱形或矩形圖樣
Coagulations	235678/378	群落有擴展的現象，而且擴展過程中內部會形成凝結物
Conway's Life	23/3	最早被研究，也最有名的生命遊戲規則
Coral	45678/3	密度高的群落會緩慢的成長，並形成類似珊瑚礁的組織
Flakes	012345678/3	圓形的群落會擴展成美麗的雪花結構，並且持續成長
HighLife	23/36	特定的結構會形成令人驚訝的（節狀）自我複製現象
Logic	/2	每次疊代活細胞都會死亡，並且會產生平移的滑翔機
Maze	12345/3	群落在擴展的過程中，內部會形成類似迷宮的圖樣
Mazetric	1234/3	類似上一個規則，但是更容易產生線性的迷宮圖樣
Replicator	1357/1357	這是一個非常值得注意的規則，每經過 32 次疊代，初始圖樣都會被複製 8 次，這個規則具有明顯的碎形特徵
Serviettes	/234	對稱形狀的群落會形成美麗的磁磚花紋的圖樣
Stains	235678/3678	群落會向外擴展，但是擴展到一定程度就不再擴展
WalledCities	2345/45678	對於特定密度的隨機群落，其內部會形成聯結組織

圖 10 其他生命遊戲規則簡介 1

名稱	規則 (s/b/g)	描述
Banners	2367/3457/3	對於特定密度的隨機群落，會形成類似鳥類拍翅的圖樣
BelZhab	23/23/6	隨機的群落會形成類似 Zhabotinsky 化學反應的圖樣
BelZhab Sediment	145678/23/6	類似上一個規則，但是會在角落產生沉澱物
Bombers	345/24/23	隨機的群落會形成戰火蔓延的氣勢，一發不可收拾
Brian's Brain	/2/1	與 Conway's Life Rule 齊名的生命遊戲規則
Brain 6	6/246/1	Brain's Brain 的另一種變化，同樣常常被研究
Burst	0235678/3468/7	密度高的群落會形成爆裂的火花，同時產生點點餘燼
Caterpillars	124567/378/2	隨機的群落會形成類似蠕動的毛毛蟲，向前持續延伸
Chenille	05678/24567/4	隨機的群落會容易形成塊狀而直線前進的結構物
Cooties	23/2/6	隨機的群落會形成活潑的圖樣，像是一群蠕動的蟲子
Ebb&Flow	012478/36/16	形成如花開的圖樣，在結構內部有豐富的動態變化
Faders	2/2/23	對於特定密度的隨機群落，會形成火花散開的景象
Fireworks	2/13/19	任何初始狀態（例如幾個小點）都能夠產生壯觀的煙火
Flaming Starbow	347/23/6	任何初始狀態都能夠形成延伸的矩形螺旋結構
Frogs	12/34/1	隨機的群落會形成類似青蛙跳躍的滑翔機結構
Frozen Spirals	356/23/4	任何初始狀態都會形成延伸的單一中心的矩形螺旋結構
Glisserati	035678/245678/5	密度高的群落會形成美麗的萬花筒的圖樣
Lava	12345/45678/6	從區域的「角」落逐漸蔓延，像是熔岩般填滿整個區域
Lines	012345/458/1	隨機的群落會被自我組織成線性分布的結構
Nova	45678/2478/23	密度高的群落會容易形成持續前進的條狀結構
Prairie on fire	345/34/4	隨機的群落會產生像是四竄而無規則的火焰
Rake	3467/2678/4	容易形成前進的塊狀結構，但是往往在碰撞之後消失
RailRoads	345/2/4	特定的結構可以模擬一列列火車在鐵軌上前進的圖樣
SediMental	45678/25678/2	對於特定密度的隨機群落，會形成穩定的塊狀結構
Snake	03467/25/4	特定的結構可以形成類似蛇行的移動模式
SoftFreeze	13458/38/4	隨機的群落會形成像是液態結構的四竄現象
Spirals	2/234/3	隨機的群落會形成漂亮而穩定的螺旋結構
Sticks	3456/2/4	容易形成多種型態的棍狀（延伸）結構，與滑翔機
Swirl	23/34/6	對於特定密度的隨機群落，會形成持續打轉的螺旋體
Worms	3467/25/4	對於特定密度的隨機群落，容易形成許多小蟲亂竄
Xtasy	1456/2356/14	隨機的群落會形成不停漲落的矩形的螺旋結構

圖 11 其他生命遊戲規則簡介 2

（七）一維的 CA

1. One-Dimensional Cellular Automata

當全世界瘋迷生命遊戲時，Stephen Wolfram 於 1980 年代開始研究更簡單的一維 CA（One-Dimensional Cellular Automata）。為了讓一維 CA 的疊代過程方便觀察，會將新一次疊代的結果畫在前一代的下方，等進行了足夠的疊代次數後，便可以「同時」看見細胞們每一次疊代的連續過程，讓一維的疊代呈現二維的視覺效果。

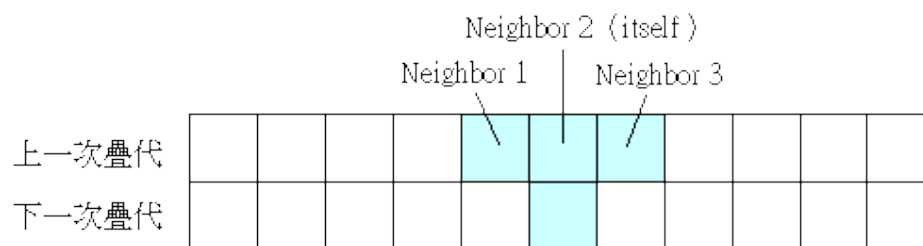


圖 12 一維 CA 表現方法示意圖

用這樣的呈現方式可以發現，Gliders 也常常出現在一維 CA 中，它們是斜對或垂直地經過畫面，當它們碰到阻礙可能會消失，或是分裂成更多的小碎片往不同方向繼續移動。

2. 一維 CA 的規則

一維 CA 的規則有兩個要素：鄰居 (Nb)、狀態 (States)。最常見的規則
是：定義影響細胞下一次疊代的鄰居有細胞兩邊各一個鄰居再加上細胞自己本
身，記為 Nb=3；定義細胞只有兩個狀態，即「生」、「死」，記為 States=2，在符
號表示上，以 0 代表細胞死亡，1 代表細胞存活。

在 Nb=3, States=2 的條件下可產生 $2^3 = 256$ 種規則。

3. 一維 CA 的範例

(1) Pascal's Triangle Rule

Pascal's Triangle Rule

Nb = 3, States = 2, RuleBinary = 01001000 or RuleHex = 12

規則編號	1	2	3	4	5	6	7	8
疊代前的細胞狀態	000	001	010	011	100	101	110	111
疊代後的細胞狀態	0	1	0	0	1	0	0	0

圖 13 Pascal's Triangle Rule

Pascal's Triangle Rule 所疊代出來的圖形就是巴斯卡三角形，而且圖形是不斷自我複製的，也具有碎形的特徵。

(2) Rule 110

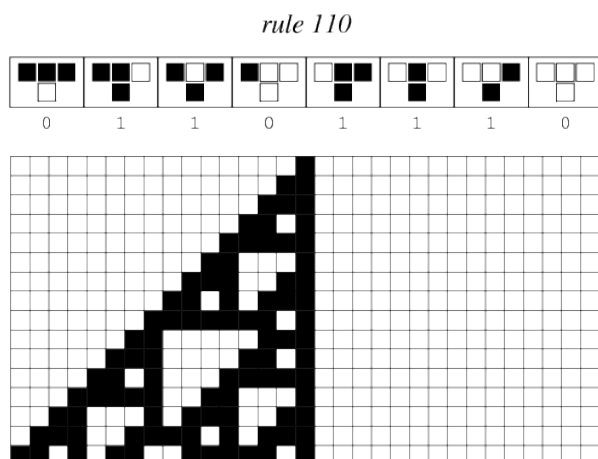


圖 14 Rule 110

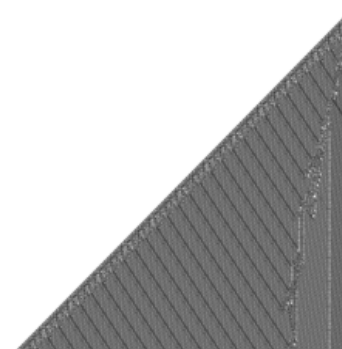


圖 15 Rule 110 經數千次疊代的圖形

Rule 110 所呈現出的結果屬於四種普遍性等級中的第四級，具有豐富多樣的複雜性，同時包含有 Turning complete 的特性。

(3) Rule 30

	111	110	101	100	011	010	001	000
	0	0	0	1	1	1	1	0

圖 16 Rule 30

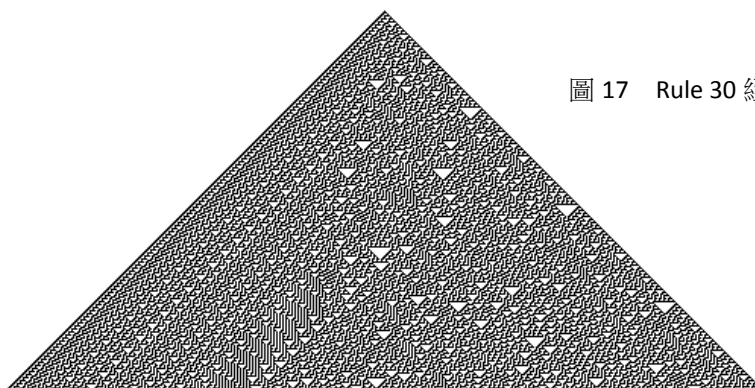


圖 17 Rule 30 經數千次疊代的圖形

Rule 30 所呈現出的結果屬於四種普遍性等級中的第三級，過度的蓬勃而看不出規律。

(八) CA 的應用

1. 研究科學界未有定論的現象

由上述 CA 產生複雜性的特點，CA 經常被用於模擬科學界尚未能夠解釋的現象，有助於幫助未解的科學之謎有突破性的發展，主要應用有：

- (1) 建構宇宙模型
- (2) 破解 DNA 編碼
- (3) 模擬生命演化

2. 研究能實際運用的主題

不少在都市計畫、都市發展、環境保護、人口變遷、土地災變、電路設計等領域的研究論文中，都會使用 CA 做為模擬的工具，輔助這些研究領域的發展，實際應用有例子有：

- (1) 土石流災害模擬
- (2) 消防模型
- (3) 結合 CA 與類分子神經系統的演化式數位電路
- (4) 建立垂向二維地熱數值模式
- (5) 模擬都市空間的擴張——以宜蘭平原為例
- (6) 預測都市發展——以台中市為例
- (7) 研究密碼學
- (8) 圖像處理
- (9) 建築形式操作

(1) 地理資訊系統(GIS)

(2) 類神經網路(Neural Network)

(3) 模糊理論(Fuzzy)

(4) 人工生命(Artificial Life，如基因演算
(Genetic Algorithms))

細胞自動機延伸應用的案例與領域則包括：

- (1) 傳染病疫情控制模擬分析(Fu，2003)
- (2) 土地利用模擬(Lay，2000)
- (3) 生態模擬(Lett *et al.*，1999)
- (4) 土壤沖蝕模擬(D'Ambrosio *et al.*，2001; Crave
& Davy, 2001; Nunes *et al.*，2003)
- (5) 污染源土壤入滲過程模擬(Spezzano & Talia，
1998)
- (6) 森林火災蔓延模擬(Rothermel, 1972; 1983)
- (7) 城市發展擴張模擬(Batty *et al.*，1990)
- (8) 結晶過程模擬(Basanta, 2003)
- (9) 流體流動模擬(Raed, 2003)

圖 18 CA 的應用之補充

三、 研究實作過程

(一) 研究工具：Five Cellular Automata 軟體

我們使用「Five Cellular Automata」這個免費的軟體作為研究 CA 模型的工具。「Five Cellular Automata」是一個能夠探索五種 CA 模型的軟體，其中之一是 Conway's Game of Life 的推廣，另外三個能模擬化學反應或生物演化的過程，最後一個則關係到模擬物理過程與計算。以下分別介紹這五種 CA 模型：

1. q-state Life

q-state Life 模式就是 Conway's Game of Life 的推廣，在 Conway's Game of Life 中，細胞的狀態只有「生」、「死」兩種，而在 q-state Life 可以有自己隨意設定的 q 種狀態，分別稱為 $1, 2, \dots, q$ 。

除了狀態數量，我們還可以定義初始狀態，有 random、symmetric、diagonal 三種可供選擇。Array size 能選擇所想要觀察的區塊大小，選擇範圍為 $33 \sim 528$ 。此外還可以設定細胞方格的形狀，有 circles 和 squares。

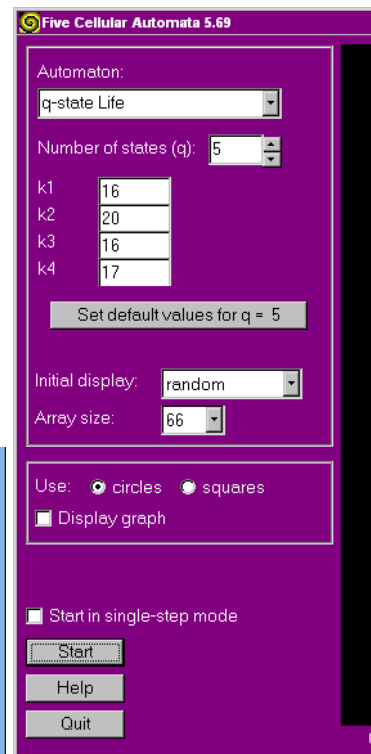
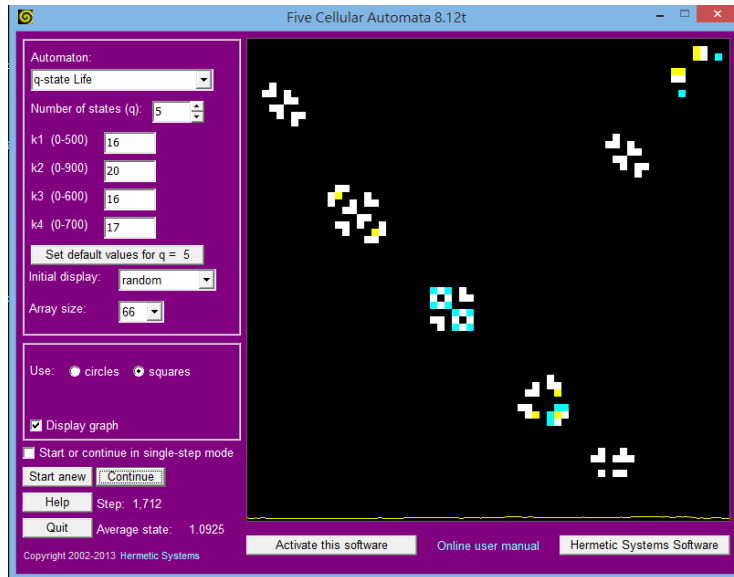


圖 19 q-state Life 操作介面

圖 20 q-state Life 範例

2. The Belousov-Zhabotinsky Reaction

Belousov-Zhabotinsky Reaction 是一個時空化學震盪器。

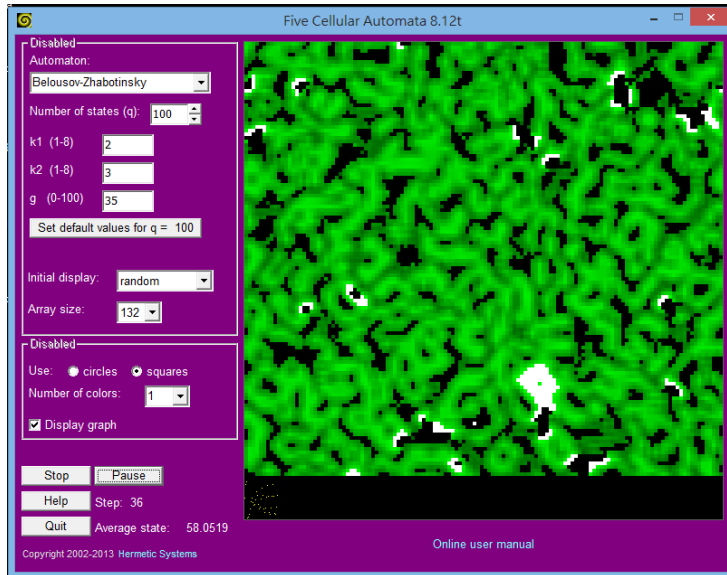


圖 21 Belousov-Zhabotinsky Reaction 範例

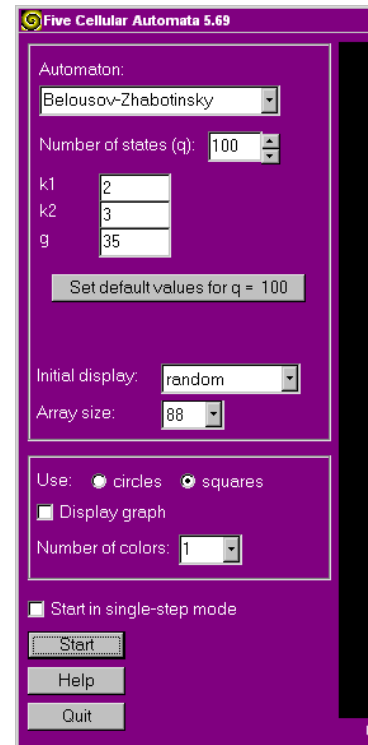


圖 22 Belousov-Zhabotinsky Reaction 操作介面

3. Togetherness

Togetherness 不同於之前所提到過的 CA，一般 CA 中的細胞是固定不動的，它能隨著疊代過程改變狀態，卻不能移動位置。然而 Togetherness 模式中的細胞可以改變它的位置，甚至和其他細胞的位置做交換。

Togetherness 的疊代原理，是細胞移動到空的空間或與處於其他狀態的細胞座位置交換的方式，讓周圍與自己狀態相同的鄰居數量達到最大值。因此經過數千步的疊代後，會發現相同狀態的細胞會聚集在一起，呈現一大塊一大塊的樣貌。

在這個模式的介面可以選擇 Number of states，每種狀態用一種顏色來表示。Concentration 決定細胞在平面上的濃度，也就是活細胞在平面上的覆蓋率。Selection range 定義細胞所能移動的範圍，若設為 1，則細胞只能移動或交換到上下左右各一格的位置；若設為 50，則移動範圍達到上下左右 50 格。Selection range 越大，細胞群聚的效率與效果越好，相同狀態聚集的程度越明顯，畫面呈現的色塊也越大。

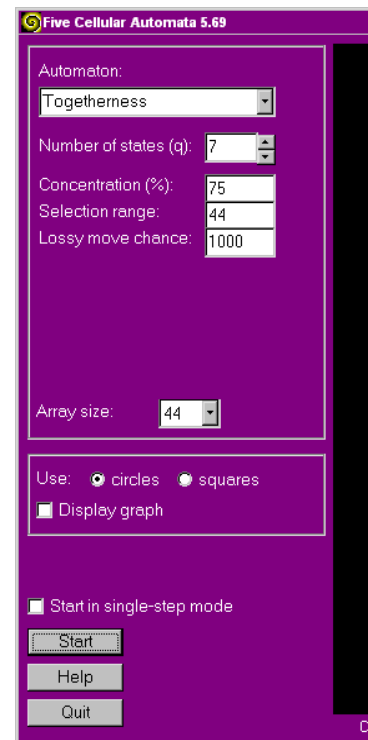


圖 23 Togetherness 操作介面

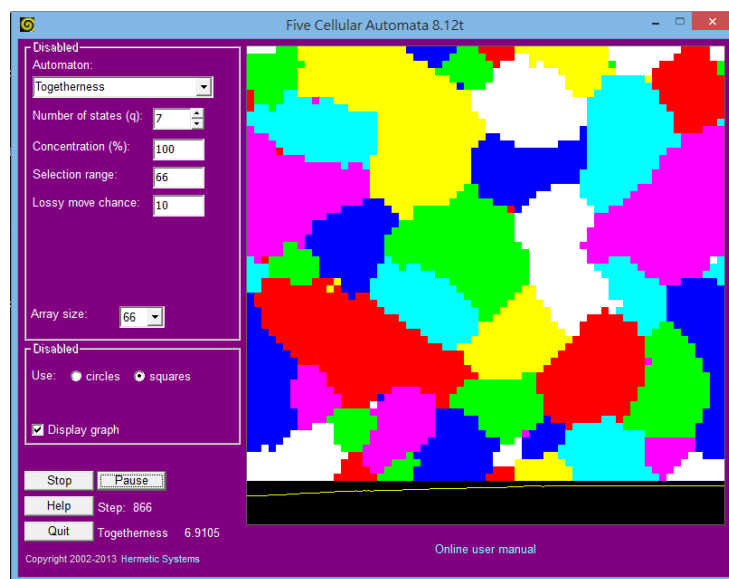


圖 24 Togetherness 範例

4. Viral Replication

Viral Replication 主要用來模擬病毒的繁殖。我們可以自己定義細胞的 Number of states，假設為 q ，則每個狀態分別稱為 1, 2, ..., q 。一個健康的細胞的狀態是 q ，而健康細胞會有一定的機率自然染病，這個機率即我們由介面能決定的 Base rate。一旦細胞染病狀態會變為 $q-1$ ，之後每經過一次疊代狀態都會減 1，直到狀態減為 0 時則死亡消失。當染病細胞死亡時會釋放病毒，讓周圍的健康細胞感染，這個讓周圍細胞感染的機率為 Active infection rate，也是由我們設定。另外，當一個健康的細胞周圍還有空間時，會有一定的機率分裂成兩個細胞，這個機率也由我們定義，即 Chance of cell division。

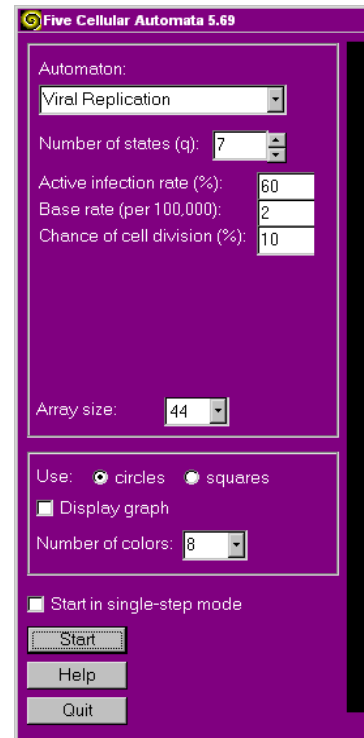
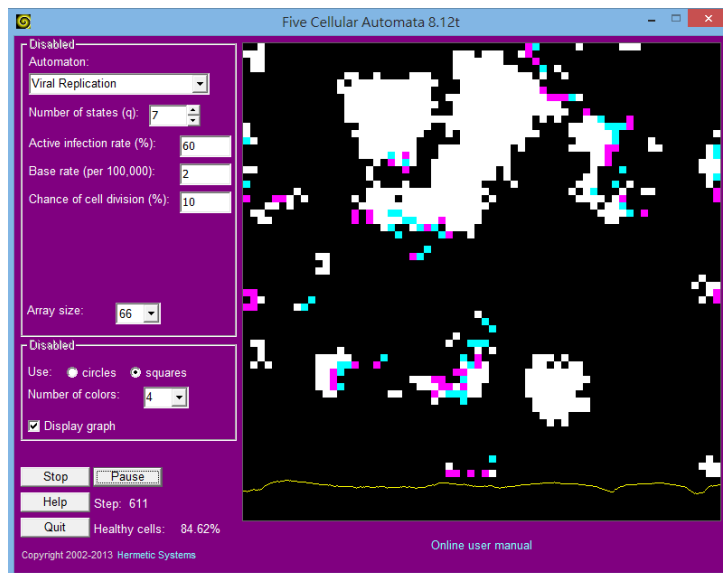


圖 25 Viral Replication 操作介面

圖 26 Viral Replication 範例

5. Diffusion-Limited Aggregation

在 Diffusion-Limited Aggregation 模式中，有一個或數個 seed cells，seed cells 是看得見且固定不動的。另一種細胞稱為 mobile cells，它是看不見的，而且會隨意移動。Fixed cells 是由 mobile cells 轉變而成的，它看得見且固定不動。當 mobile cells 在隨意移動時，若佔據了與 fixed cells 相鄰的空間，將會固定下來且可見，成為 fixed cells。如果 mobile cells 跑離 seed cells 太遠時，有可能會消失。一直到沒有 mobile cells，也就是所有 mobile cells 都變成 fixed cells 或消失時，這個過程才會停止。

我們可以由這個模式的介面調整濃度 Concentration，來決定過程結束後所有細胞在路徑範圍平面上的覆蓋率。Number of seeds 可以選擇初始狀態 seeds 的數量。Number of colors 能選擇要用幾種顏色來呈現，以利觀察。

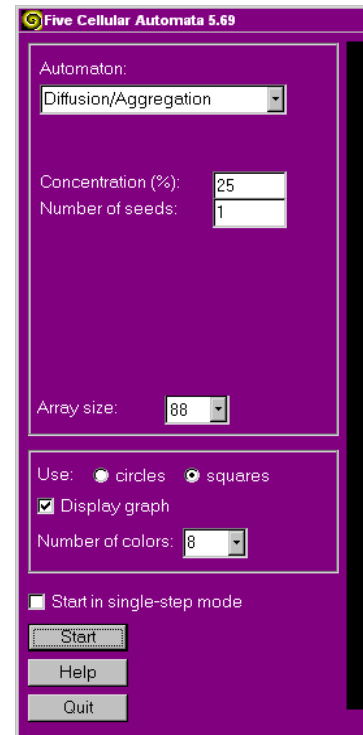
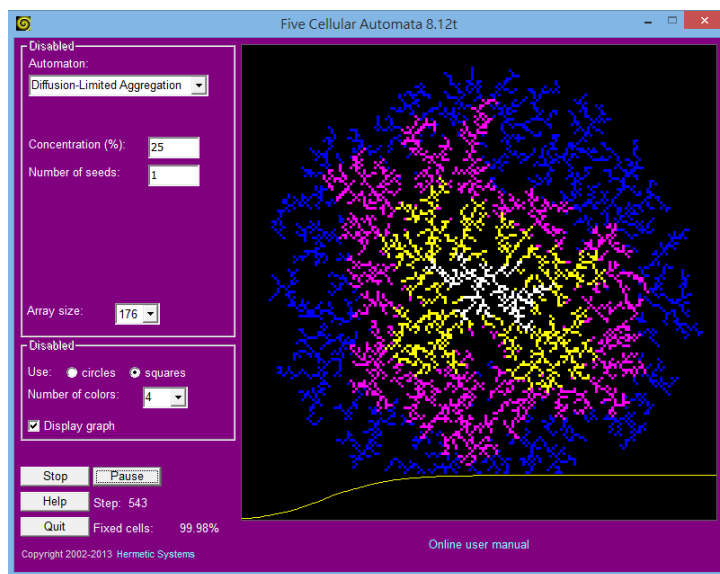


圖 28 Diffusion-Limited Aggregation 範例

圖 27 Diffusion-Limited Aggregation 操作介面



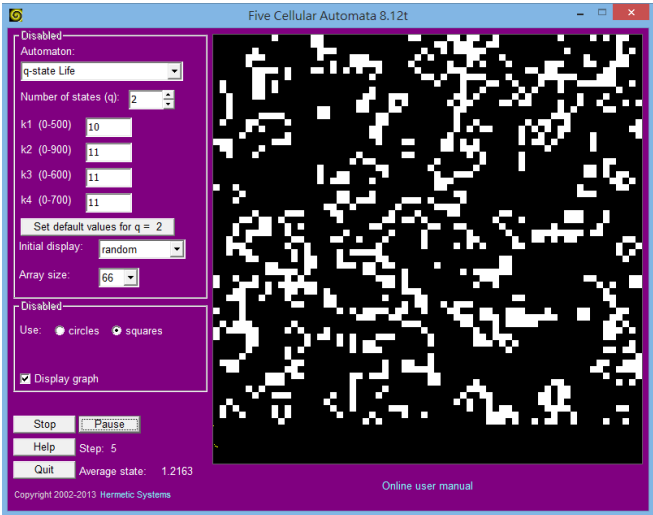
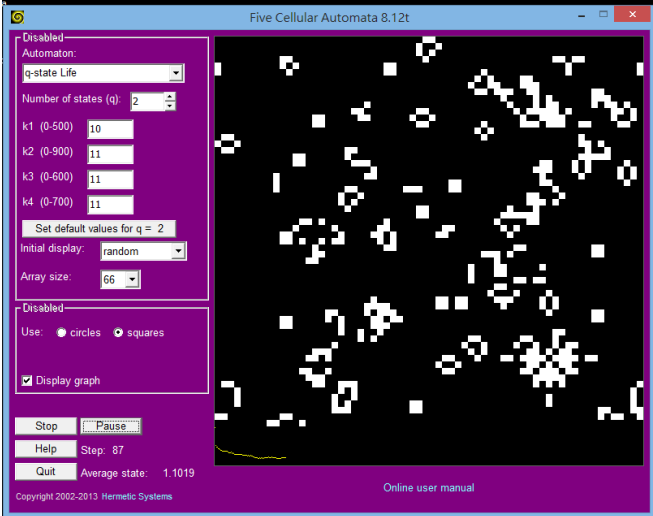
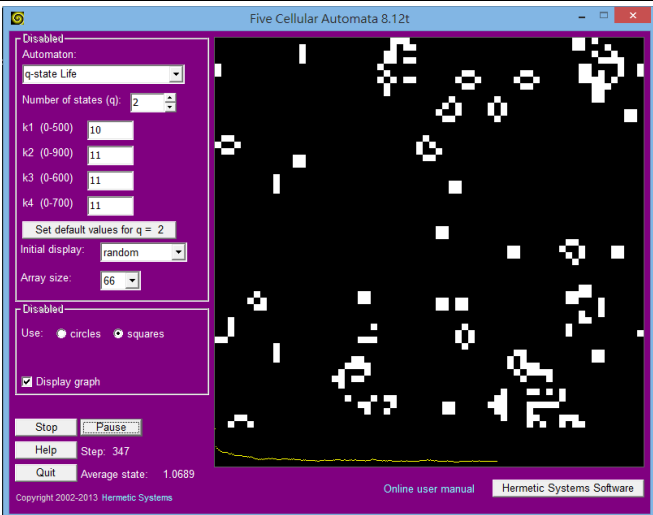
(二) 研究內容：q-state Life 的探討

Five Cellular Automata 軟體中的五種模式，我們挑選了 q-state Life 和 Viral Replication 兩種做較深入的探討，這邊將介紹我們研究 q-state Life 的結果。

1. 使用 the best values

我們先 q-state Life 固定變因 $q=2$ 、array size=66，使用 square cells 和 random 的初始狀態。在這些固定條件下，軟體有預設一個 the best values，能夠讓執行

結果最具複雜性、最接近第四等級，像是較多週期性的變化或產生較多 gliders。以下是用 the best values 執行時，不同時間點的截圖畫面：

<div>The best values : k1=10, k2=11, k3=11, k4=11</div>	
Step	圖形
5	
87	
347	

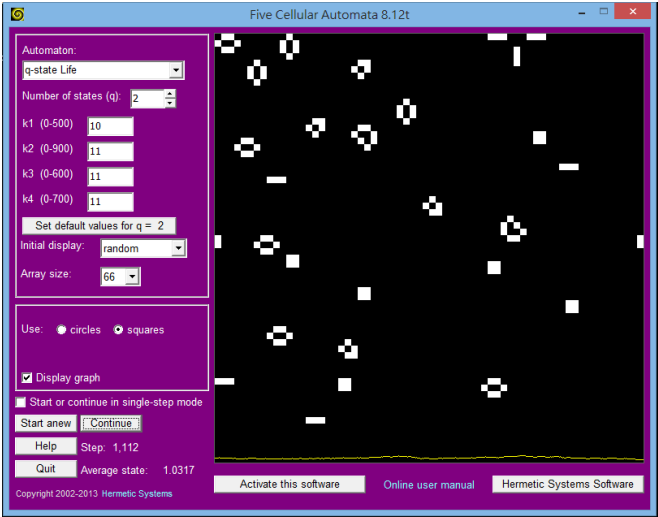
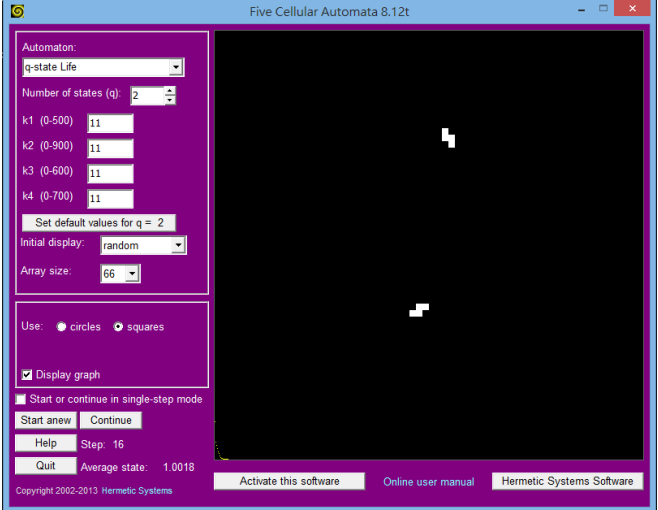
1112	
------	--

表 1

以 The best values 執行，畫面呈現豐富的面貌，是四個分類等級的第四級，平均要在 step > 1000 的情況下才會停止。過程中有局部週期性震盪，也有 gliders 跑動，各種擾動交錯，相互影響刺激，非常精采。

2. 不使用 the best values

(1) 將 The best values 的 k 值分別加 1

說明	圖形
<ul style="list-style-type: none"> 將 k1 加 1，其餘不變 k1=11, k2=11, k3=11, k4=11 分類等級：第一級 <p>不到 20 steps 就已經沒有變化而停止，非常單調。</p>	

<ul style="list-style-type: none"> 將 k2 加 1，其餘不變 k1=10, k2=12, k3=11, k4=11 分類等級：第三級 <p>過度蓬勃，找不到震盪變化 都週期性或規律。</p>	
<ul style="list-style-type: none"> 將 k3 加 1，其餘不變 k1=10, k2=11, k3=12, k4=11 分類等級：第一級 <p>不到 20 steps 就已經沒有變化而停止，非常單調。</p>	
<ul style="list-style-type: none"> 將 k4 加 1，其餘不變 k1=10, k2=11, k3=11, k4=12 分類等級：第三級 <p>過度蓬勃，找不到震盪變化 都週期性或規律。</p>	

表 2

(2) 將 The best values 的 k 值分別減 1

說明	圖形
<ul style="list-style-type: none"> 將 k1 減 1，其餘不變 k1=9, k2=11, k3=11, k4=11 分類等級：第三級 <p>過度蓬勃，找不到震盪變化都週期性或規律。</p>	
<ul style="list-style-type: none"> 將 k2 減 1，其餘不變 k1=10, k2=10, k3=11, k4=11 分類等級：第一級 <p>不到 20 steps 就已經沒有變化而停止，非常單調。</p>	
<ul style="list-style-type: none"> 將 k3 減 1，其餘不變 k1=10, k2=11, k3=10, k4=11 分類等級：第三級 <p>過度蓬勃，找不到震盪變化都週期性或規律。</p>	

- 將 k4 減 1，其餘不變
k1=10, k2=11, k3=11, k4=10
- 分類等級：第一級

不到 20 steps 就已經沒有變化而停止，非常單調。

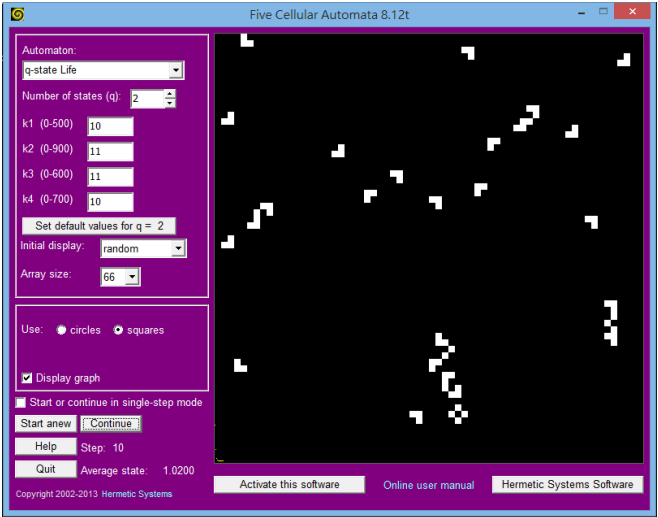


表 3

3. 結論

- (1) 只有使用 the best value 才能出現第四級、較有意義的結果。只要對 k 值稍做微調，結果就會南轅北轍。
- (2) 當 k1 或 k3 值相對於 the best value 較大時，會出現第一級的結果；當 k2 或 k4 值相對於 the best value 較大時，會出現第三級的結果。

4. 有趣的 gliders

我們嘗試了幾組數據，試著找到蘊含傳遞訊息意義的 gliders，以下是我們所找到的兩組：

- (1) q=6，使用 the best value：k1=17, k2=22, k3=18, k4=20

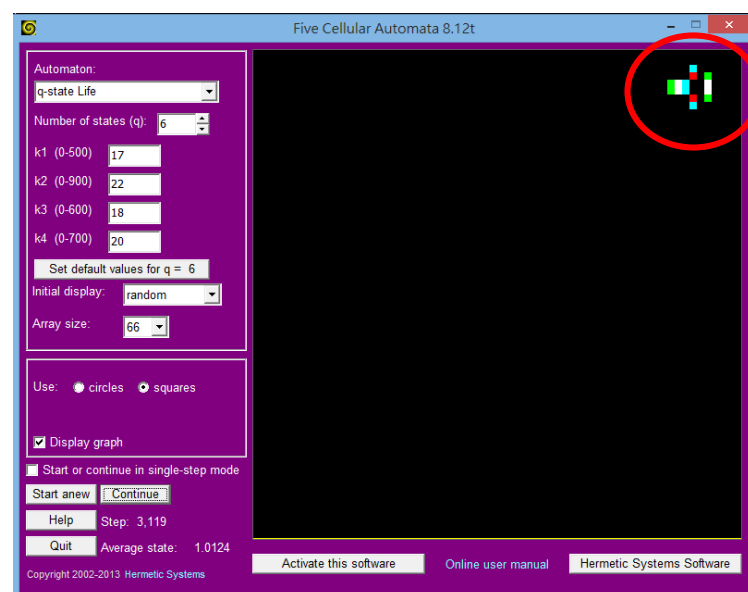


圖 29 gliders 範例 1

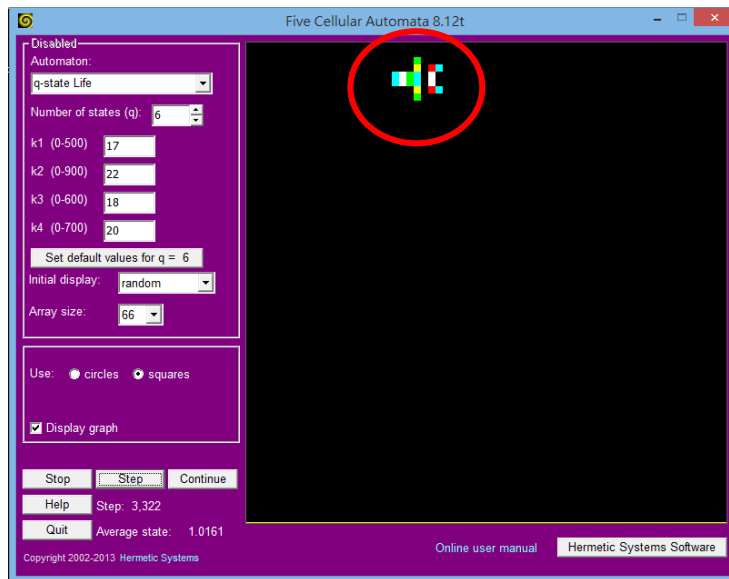


圖 30 gliders 範例 2

當疊代到 3000 次以上時，可以看到一個漂亮的 gliders 在畫面上方由右至左平行移動，並無限循環而不停止。每次執行因為初始狀態的不同，最後 gliders 出現的位置也會不同，但必定會演化出一個。

(2) $q=6$, $k_1=14$, $k_2=17$, $k_3=14$, $k_4=15$

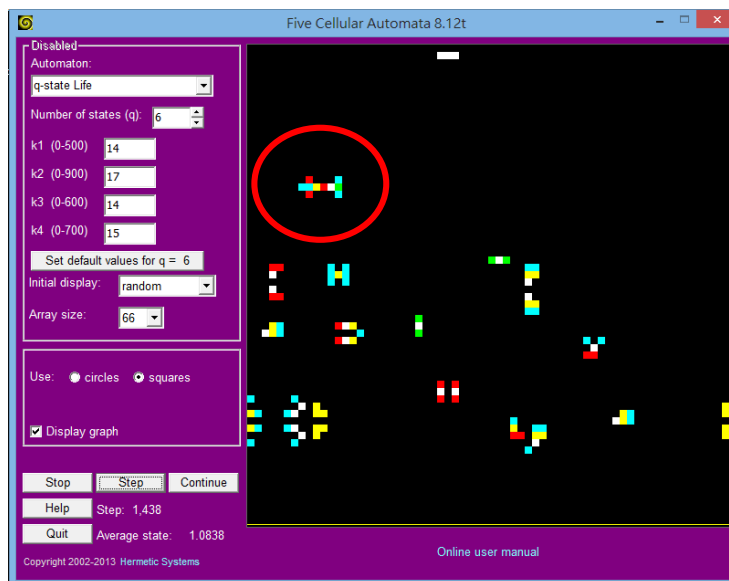


圖 31 gliders 範例 3

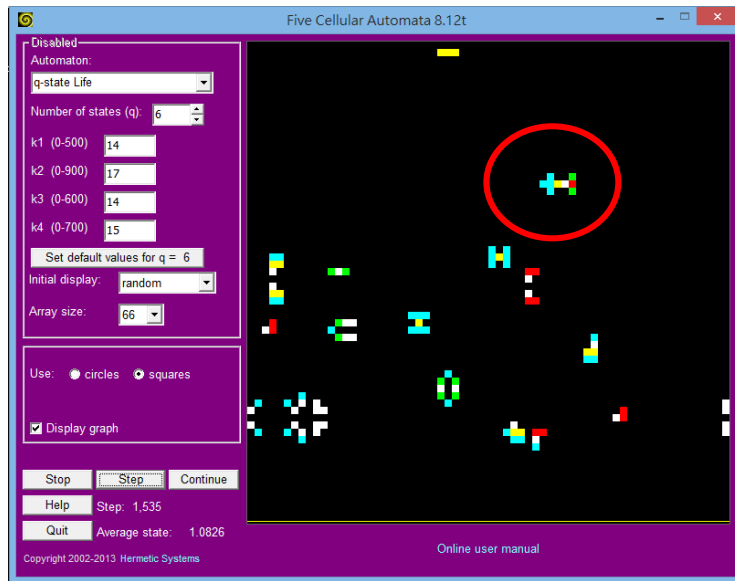


圖 32 gliders 範例 4

這次同樣是 $q=6$ 但不使用 the best value，雖然畫面比較雜亂沒那麼漂亮，但在疊代 1000 次後，仍能發現一個 gliders 水平移動。

（三） 研究內容：Viral Replication 的探討

這邊將介紹我們研究 Viral Replication 的結果。

我們在研究時統一設定 array size=66, square cells, 4 color, $q=20$ 。

1. 固定 base rate=2/100,000, chance of division=10% ; 改變 infection rate

Infection rate (%)	Steps	Healthy cells (%)
10	10	99.8
13	300	99.2
14	500	97
15	3000	89
16	1700	82
17	800	77
18	900	72
19	700	68
20	800	65
22	700	64
25	1200	63
30	1100	62
40	1200	62
50	1100	62
60	1400	61
70	1600	60 (55~65)
80	400	65 (60~70)
90	300	68 (63~73)
99	700 / 300	70 (65~75) / 0
100	300	0

表 4

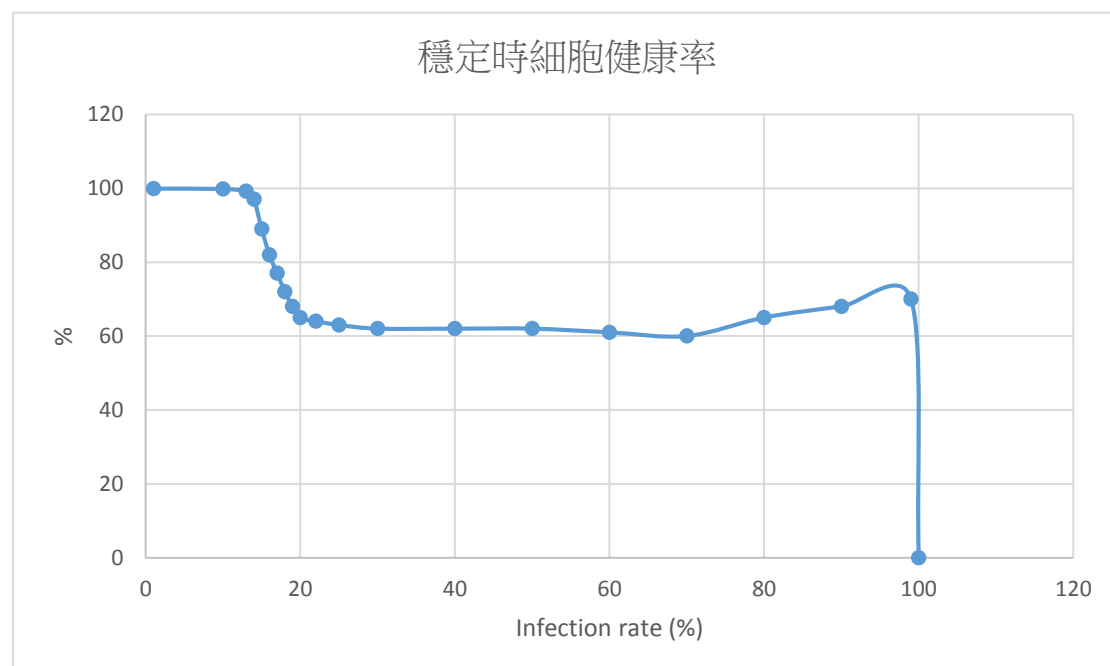

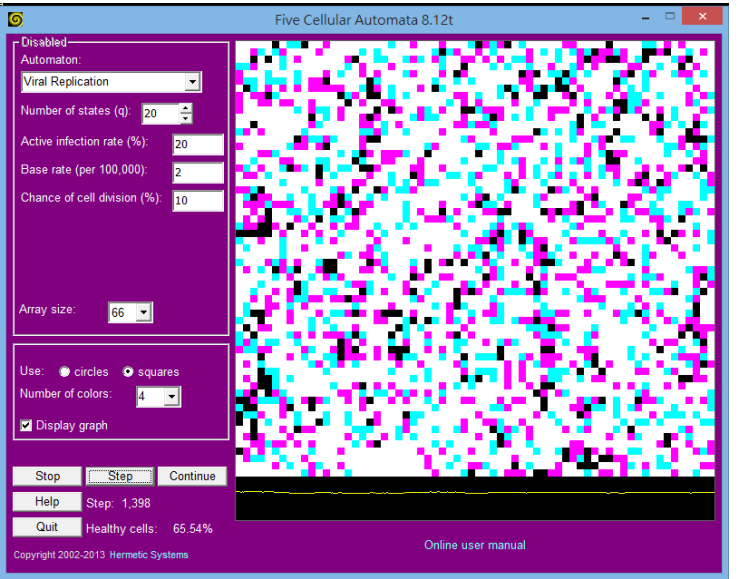


表 5

Infection rate (%)	取樣截圖
<p>10</p> <p>畫面上幾乎都是白色的健康細胞，比率高達 99.8%。</p>	 <p>The screenshot shows the 'Five Cellular Automata 8.12t' window. The 'Automaton' dropdown is set to 'Viral Replication'. The 'Number of states (q)' is 20. The 'Active infection rate (%)' is 10. The 'Base rate (per 100,000)' is 2. The 'Chance of cell division (%)' is 10. The 'Array size' is 66. The 'Use' section has 'circles' selected. The 'Number of colors' is 4. The 'Display graph' checkbox is checked. The 'Start or continue in single-step mode' checkbox is unchecked. The 'Start anew' button is highlighted. The 'Help' button is next to 'Step: 711'. The 'Quit' button is next to 'Healthy cells: 99.61%'. The 'Copyright 2002-2013 Hermetic Systems' is at the bottom left. The 'Activate this software', 'Online user manual', and 'Hermetic Systems Software' buttons are at the bottom right. The main display area shows a sparse distribution of colored cells (red, green, blue, yellow) on a white background.</p>
<p>20</p> <p>與 10%時畫面差異很大，健康細胞的比例明顯下滑，僅剩 65%。</p>	 <p>The screenshot shows the 'Five Cellular Automata 8.12t' window. The 'Automaton' dropdown is set to 'Viral Replication'. The 'Number of states (q)' is 20. The 'Active infection rate (%)' is 20. The 'Base rate (per 100,000)' is 2. The 'Chance of cell division (%)' is 10. The 'Array size' is 66. The 'Use' section has 'circles' selected. The 'Number of colors' is 4. The 'Display graph' checkbox is checked. The 'Stop' button is highlighted. The 'Step' button is next to 'Step: 1,398'. The 'Quit' button is next to 'Healthy cells: 65.54%'. The 'Copyright 2002-2013 Hermetic Systems' is at the bottom left. The 'Online user manual' button is at the bottom right. The main display area shows a dense distribution of colored cells (red, green, blue, yellow) on a white background, indicating a higher infection rate compared to the 10% screenshot.</p>

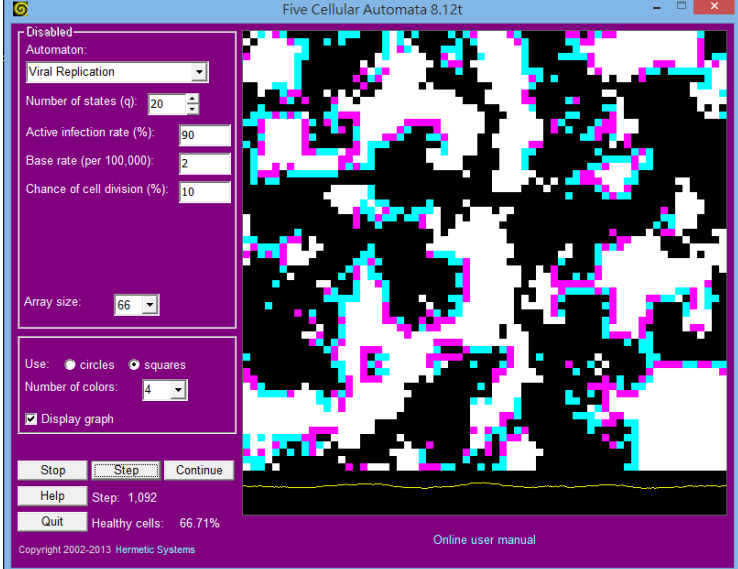
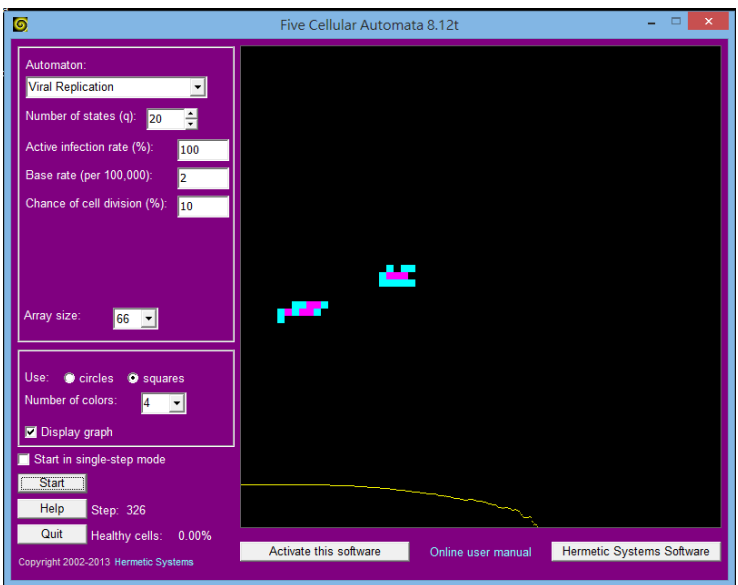
<p>90</p> <p>健康細胞的比例反而略有提升，達 68%，但細胞總數較少。</p>	
<p>100</p> <p>當疊代次數超過 300 次，細胞群必然走向滅亡，健康細胞比例 0%。</p>	

表 6

• 結果分析：

- (1) 整體而言，infection rate 越高，即染病細胞死亡時傳染給周圍健康細胞的機率越高時，達平衡時健康細胞的比例越低。
- (2) 當 infection rate 介於 0% ~ 14%時，健康細胞率幾乎不變，維持在 97%以上。
- (3) 當 infection rate 介於 15% ~ 20%時，健康細胞率劇烈下降，從 97%遽減到 65%，是變化率最大的區間。約經過 800 steps（疊代次數）後健康細胞率達到穩定平衡。
- (4) 當 infection rate 介於 20% ~ 70%時，健康細胞率幾乎不變，維持在 60% ~ 65% 以上，但是細胞總數越來越少。約要經過 1100 steps 健康細胞率才達穩定平衡。
- (5) 當 infection rate 介於 70% ~ 99%時，健康細胞率出乎意料地不減反升，從

60%微幅增長到 70%。

- (6) 當 infection rate 達到 100%時，最終沒有細胞能夠存活，健康細胞率 0%。有趣的是，infection rate 為 99%時健康細胞率還有 70%，但微調到 100%就能讓細胞群滅亡。

• 結論：

在一個群體當中，當病毒傳染率低於某個特定值（在此模型為 15%）時，不會對整個群體產生威脅，疫情容易控制。而一旦傳染率高過該特定值，疫情會瞬間爆發，讓群體的健康率或存活率劇烈下降。但當傳染率又高過另一個特定值（在此模型為 20%）時，傳染率的提升並不會對群體產生進一步的威脅，群體總數會減少，但健康者的比例卻能夠維持，而不會滅亡。

特別的是在此模型中傳染率高於 70%時健康率居然能夠微幅成長，較難以理解，推測是存活中的細胞已經減少很多，染病的幾乎都死亡，因此存活細胞的健康率能上升。此外，即使傳染率已高達 99%，群體仍有辦法生存，不過一旦達 100%，群體將注定滅亡。

2. 固定 infection rate=60%, chance of division=10%；改變 base rate

Base rate (per 100,000)	Steps	Healthy cells (%)	Survival rate (%)
1	400	58 (53~63)	100
10	500	60 (55~65)	100
50	600	57 (52~62)	100
100	400 (100)	56 (51~61)	100
500	300 (70)	52 (47~57)	100
1000	400 (60)	50 (45~55)	100
2000	300 (45)	45 (40~50)	100
3000	300 (40)	42 (37~47)	100
4000	500 (40)	40 (35~45)	90
4100	500 (40)	38	70
4200	500 (40)	37	70
4300	500 (40)	33	40
4400	1300 (40)	32	30
4500	1300 (40)	32	20
4600	2000 (40)	27	10
4800	*700	0	0
5000	*600	0	0
6000	*250	0	0
9000	*120	0	0
9999	*45	0	0

表 7

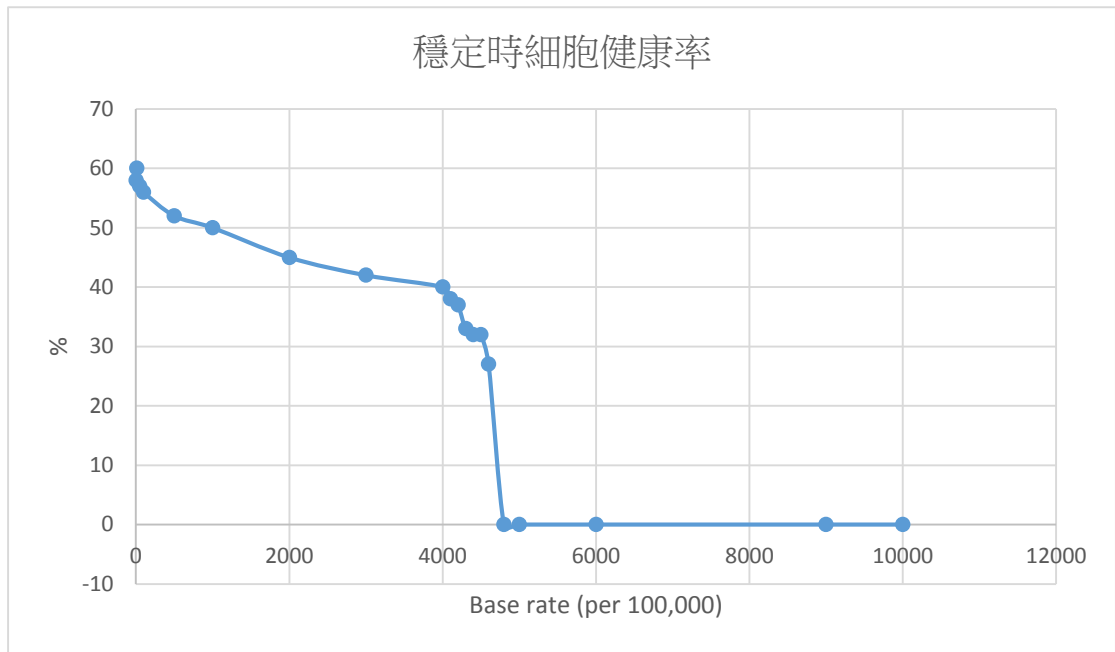


表 8

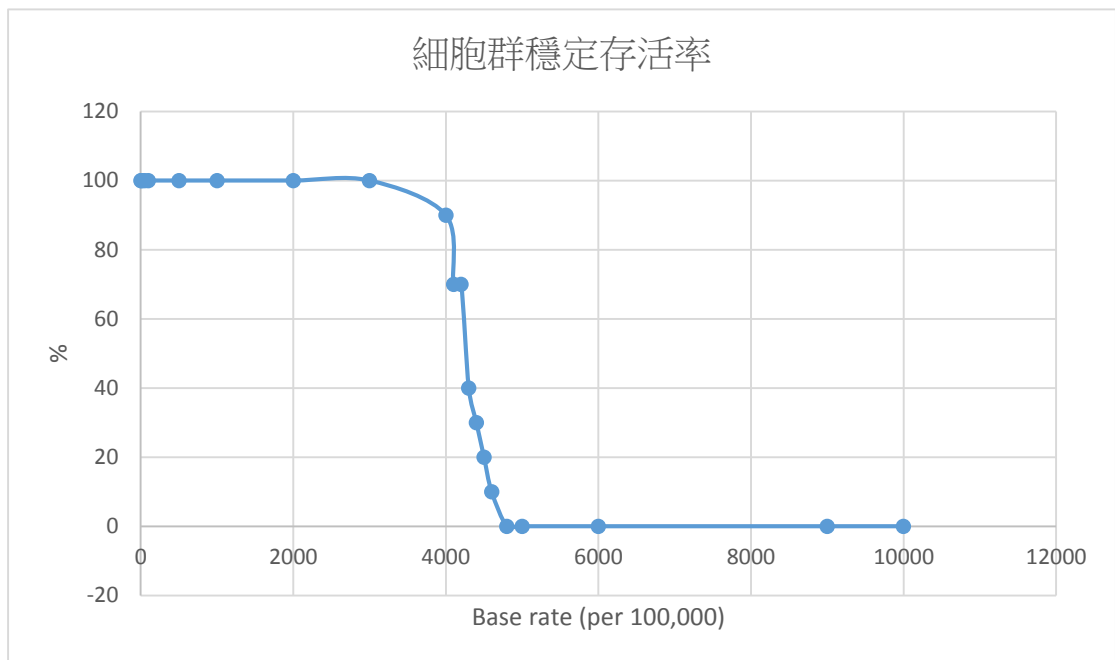
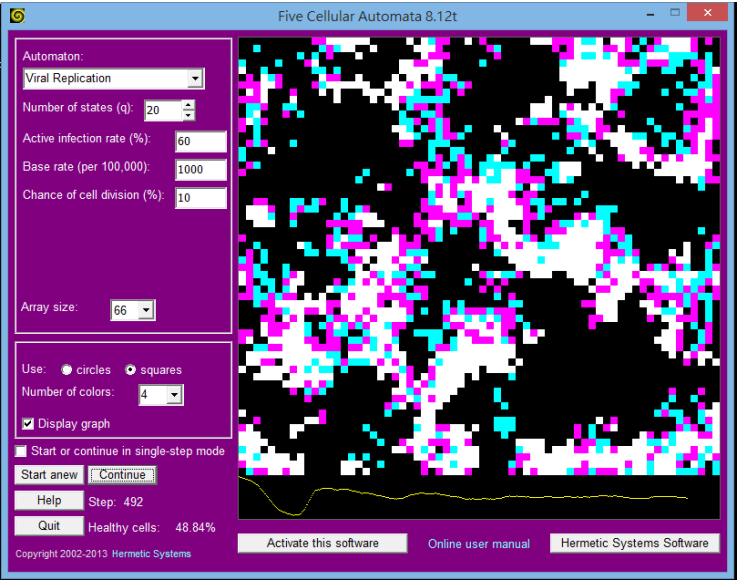
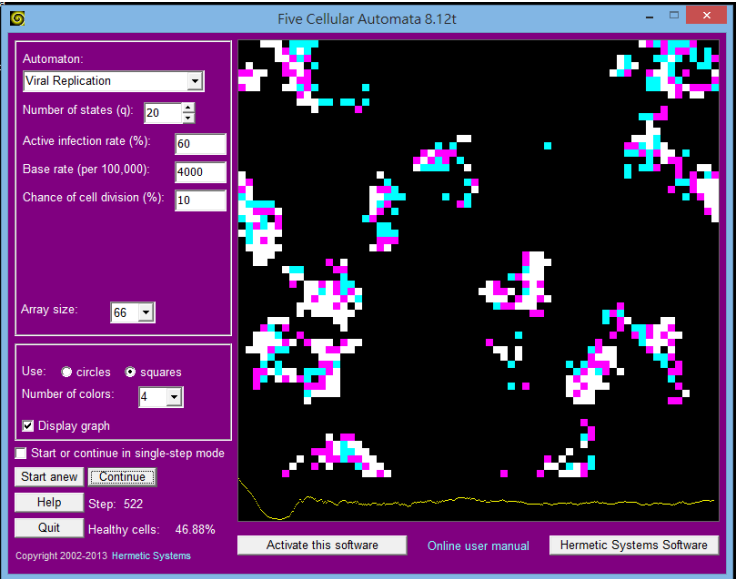


表 9

Base rate (per 100,000)	取樣截圖
<p>1000</p> <p>健康細胞率維持在50%上下</p>	
<p>4000</p> <p>健康細胞率下降到40%，而細胞總數明顯少了很多</p>	

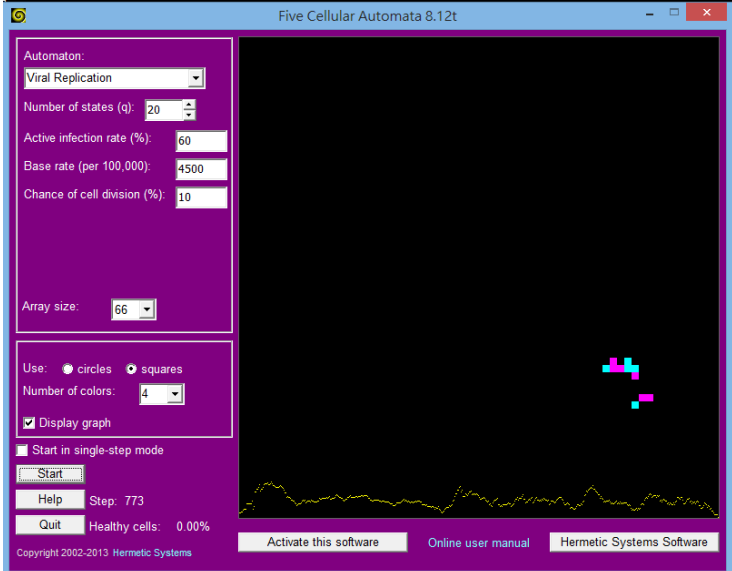
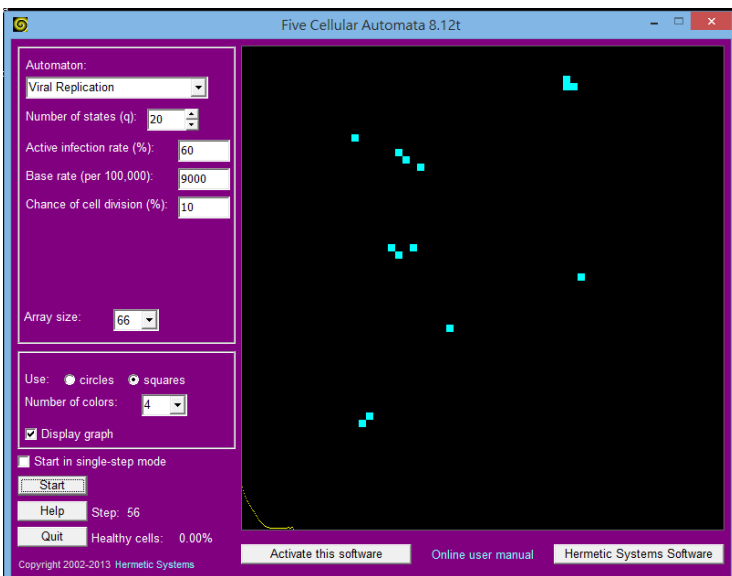
<p>4500</p> <p>細胞群在疊代 700 次後滅亡。</p>	
<p>9000</p> <p>細胞群僅疊代數十次就滅亡。</p>	

表 10

• 結果分析：

- (1) 整體而言，Base rate 越高，達平衡時健康細胞的比例越低。
- (2) 即使 Base rate 只有 1/100,000，健康細胞率也只有 58%。
- (3) 由截圖中下方的黃色曲線可以發現，在 40 steps 左右時健康細胞率會降至谷底，只剩約 10%到 20%，而後才緩慢提升，並漸漸趨於穩定。
- (4) 當 Base rate 介於 1/100,000 ~ 4000/100,000 時，健康細胞率穩定下降，由 60% 降至 40%。約經過 400 steps 後健康細胞率達到穩定平衡。數千 steps 後細胞群仍存活的機率為 100%，也就是細胞群永不滅亡。
- (5) 當 Base rate 介於 4000/100,000 ~ 4800/100,000 時，健康細胞率劇烈下降，從 40%遽減到 0%，是變化率最大的區間。而數千 steps 後細胞群的存活率也同

時劇烈下降，由 100% 降至 0%。也就是當 Base rate 大於 4800/100,000 時，細胞群最終必然全死而滅亡。

- 結論：

當某種傳染力很強（在此模型固定 infection rate=60%）的傳染病在一個群體中只要有自然染病的機會，即使這個機率很小，都會對群體造成顯著的衝擊。當這個自然染病率增加，卻仍低與某特定值（在此模型約為 4000/100,000）時，對群體的威脅雖會擴大，但趨勢仍可掌握，群體沒有滅亡的可能。一旦高過此特定值，疫情將猛烈爆發，群體健康率劇減，甚至整個群體最終滅亡的機率也迅速提高。只要自然染病率高過另一個特定值（在此模型約為 4800/100,000），群體將必然走向完全滅亡。

而由黃色曲線發現在疫情初期健康細胞率與細胞總數都會先盪到谷底，而後才漸漸回升趨於穩定。我們推測是因為一個疫情的出現會迅速對群體產生巨大威脅，但只要群體有足夠的繁殖率（在此模型固定 chance of division=10%），就能不斷繁殖新的健康細胞，讓整個群體恢復活力。而且當細胞總數極少時，因為空間足夠，使得繁殖的效果更為顯著。

3. 固定 infection rate=60%, base rate=2/100,000；改變 chance of division

Chance of cell division(%)	Steps	Healthy cells (%)
0	10	99
1	600	95 (90~100)
2	800	85 (80~90)
3	800	75 (70~80)
4	1000	70 (65~75)
5	700	65 (60~70)
6	1000	63
7	1200	62
10	300	58
20	400	46
30	500	40 (35~45)
40	400	33 (28~38)
50	600	30
60	400	28
70	400	27
80	400	26
90	400	24
100	400	23

表 11

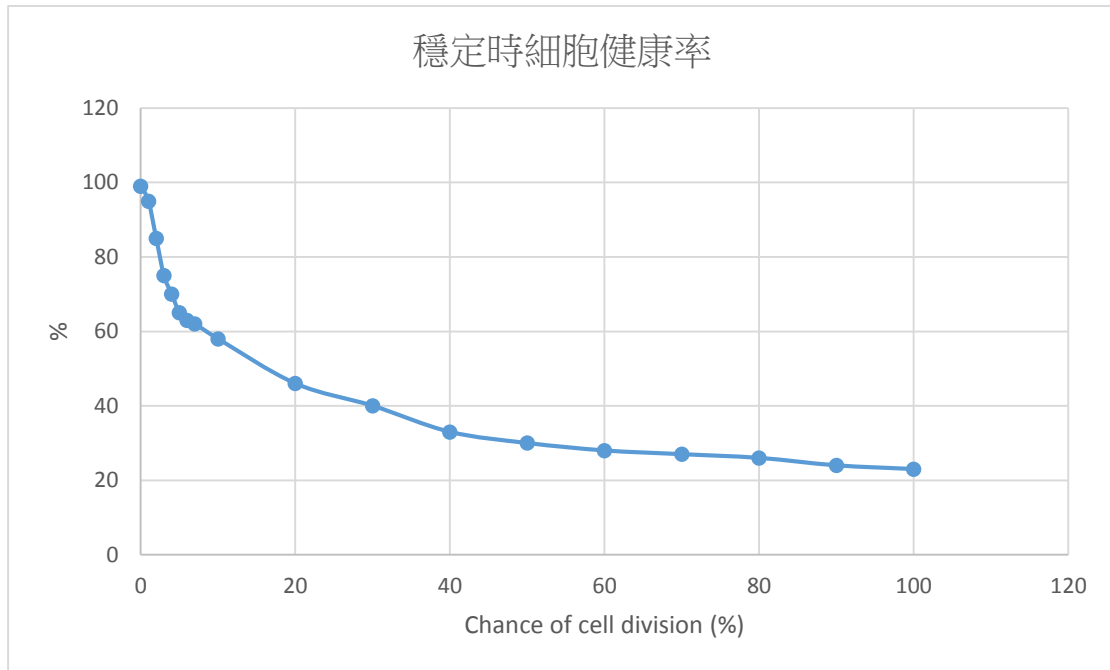
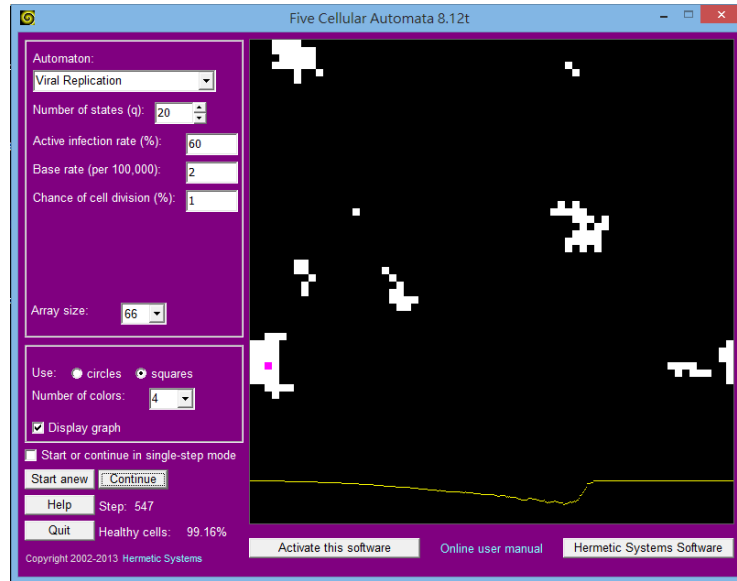


表 12

Chance of division (%)	取樣截圖
<p>0</p> <p>健康細胞率穩定地高達 99%，但因為不會有新的健康細胞繁殖，細胞總數會以極緩慢的速度減少，直到數萬 steps 後滅亡。</p>	

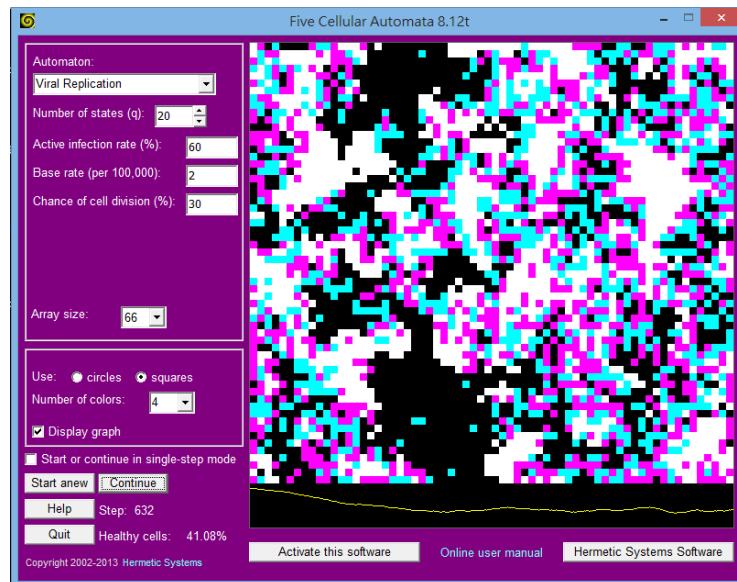
1

健康細胞率穩定地高達 95%，而繁殖率雖低但仍高於自然染病率，因此細胞群不會滅亡。



30

健康細胞率只剩 40%，但因繁殖率較高，細胞總數也多。



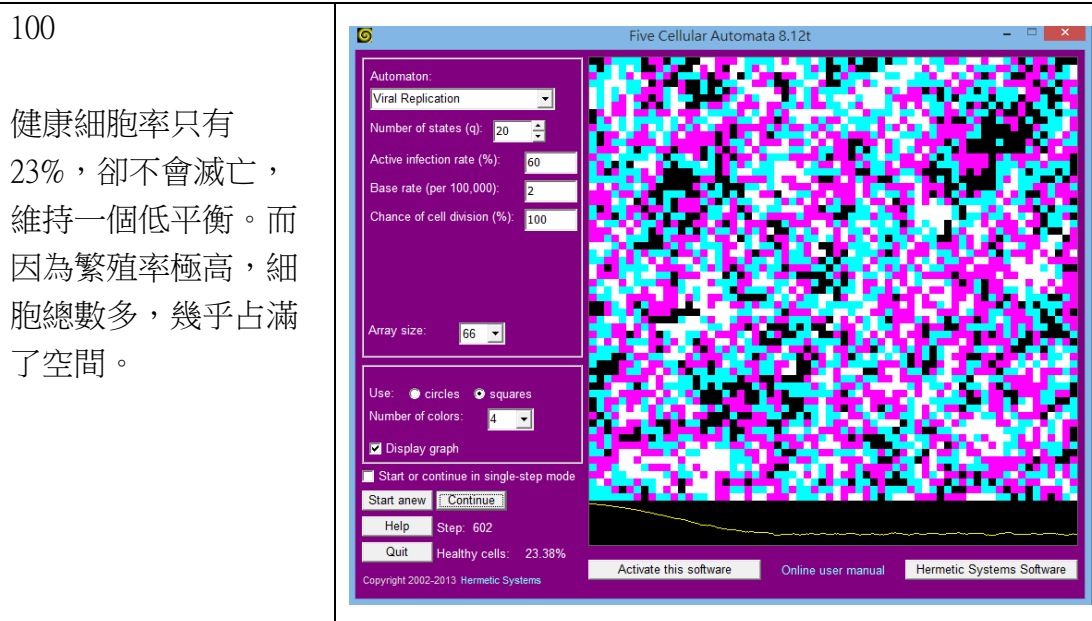


表 13

• 結果分析：

- (1) 整體而言，chance of division 越高，達平衡時健康細胞的比例越低。
- (2) Chance of division 越高，不分健康或已染病，細胞總數會越多。
- (3) 當 chance of division 介於 0% ~ 5%時，健康細胞率劇烈下降，從 99%遽減到 65%，是變化率最大的區間。約經過 800 steps（疊代次數）後健康細胞率達到穩定平衡。
- (4) 當 chance of division 介於 5% ~ 40%時，健康細胞率穩定下降，由 65%降至 33%。約經過 500 steps 後健康細胞率達到穩定平衡。
- (5) 當 chance of division 大於 60%時，健康細胞率會維持在約 25%的低平衡，但不會滅亡。約經過 400 steps 後健康細胞率達到穩定平衡。

• 結論：

當繁殖率 0%時，雖然疫情發生時健康者的比例很高，但沒有健康的個體誕生，最終仍會以緩慢的速度滅亡。當繁殖率上升卻仍低與某特定值（在此模型約為 5%）時，健康者的比率會迅速下降，因為會產生更多新個體被染病。繁殖率高過此特定值後，健康者比例下降的幅度就趨於平緩。

整體而言，在傳染病有一定的自然染病率與很強的傳染率時，群體的繁殖率越高，健康者的比例會越低。因為當個體越多，會自然染病或被傳染的個體也越多，對群體而言，就是染病率變高。另一方面，繁殖率越高群體總數也會越多，因此即使健康著的比率很低，群體仍能保持活力，維持在一個低平衡而不會滅亡。

4. 總結

這個模式的 CA 模型有助於對流感學、傳染病學，或甚至是其他類似概念的主題的研究上，進行模擬測試，而我們僅僅只是進行其中一小部分的實驗。對於其他相關領域的研究，還可以對參數做更多的改變測試，或以此為樣本加入更多變因進行實驗，像是加入時間軸，探討疾病與時間的關係；加入復原的情況，可讓樣本更真實……等等。CA 最主要的應用價值就在於建構使用者所需要的模擬模型，輔助各項領域的方展，並在其中佔有很重要的研究地位。

四、 研究心得

（一） 楊宗諺

武陵人，捕魚為業。

在一個窗外鳥鳴啁啾的午後，路面上柏油散發著熱氣，一個人影也沒有，午後艷陽不受我的邀約，兀自輕輕灑在我的臉龐。我敲打著黑白鍵盤，耳裡傳來牆上時鐘滴答滴答的聲響，好似催促我填寫先修報名資料。當按下完成鍵，此時，一項秘密計畫早已悄悄的展開，我將在資訊領域裡挖掘知識。

緣溪行。

起初，我們並不知道要找哪一位教授指資訊專題，正好，我對超大型積體電路有興趣，於是就找哪一位教授專精於這個領域。李教授，自然成為我們心目中理想的指導教授。

忘路之遠近。

第一次和教授討論，第一個感受是——我被他的謙遜和那充滿知識的眼光所吸引。在做專題過程中，教授熱心地給予協助，讓我很快就可以抓住重點，明白核心知識。回想半年來的學習，我一直在細胞自動機上摸索，找尋如何創新，突破舊有的框架。每一個禮拜都有不同的挑戰，像一座座峻嶺，考驗著我登高的能力，我雖跋山涉水，攀登險峻，卻遇見山路旁盛開的花兒；聽見蟲鳴鳥叫，頓時忘記路途的艱辛，汗水成為剔透的寶石。

忽逢桃花林。

轉眼間時光飛逝，半年如白駒過隙般畫下完美的句點。我可能不再有機會向李教授您學習，但我已經留下美好的回憶，將它保存在內心深處。藉由這專題課，我更篤定未來要走的路，以及找到自己的興趣所在。二十世紀偉大的物理科學家愛因斯坦說過：「興趣是最好的老師。」

最後，我要感謝羅紹元同學，在做專題時，一直提出新的想法和負責整個專題的規劃；我要給自己一個讚美：恭喜完成資工專題。

（二） 呂浚鉸

當初我以為資工專題是要無窮無盡的打 code，那時我好害怕，原本這方面就有點問題的我好怕會拖累到我的夥伴們，但是幸好我們有軟體直接讓我們測試，而且還可以自訂自動機的規則，如此一來就可以更充分了解它的規律了——但是，沒想到只是定了些微不同的規則，就有如此大的差異，那時令我們非常困惑，；還有一些令我們較不解的是在同樣得規則下，輸入些微不同的條件就能得出完全不同的結果，這和原本我們的預期差了很多，甚至在 99%和 100%的細胞分裂率下竟然完全不一樣，幸虧教授提供了一些想法，才讓我們有合理的解釋，最後再嘗試完許多數據後，總算是得出了一些規律，放下心中的大石頭了！

最後，感謝總是出主意了組員們，因為有你們的想法，我才能根據你們的想法和你們一起完成這複雜的專題。

（三） 羅紹元

當初要做資訊書報專題時，因為對資訊領域不了解，完全沒想過會做甚麼樣的主題，於是我們決定先選擇指導教授。當時我就跟組員提議找李毅郎老師，因為李老師剛好就是我的導師，兩次導聚讓我感覺老師是位專業又親切的人，而且又是資訊學院的教授，因此我們的指導教授就這麼決定了。

那時我們走進老師的辦公室，老師便主動提出 Cellular Automata 作為我們的專題主題。當時聽著老師解說著 CA，雖然聽不太懂，但深深被這個神奇的東西吸引：有許多格子，每個格子受到周圍鄰居的影響，而這影響像蝴蝶效應般擴展出去，牽動全局！感覺過程複雜，但是精彩豐富。老師也提到 CA 在各領域的應用，如電路設計、人口變遷等等，更是讓我對它著迷，於是我們當下就決定用了 CA 這個題目。

在做這個專題的過程中，我們接觸到了關於生命遊戲、蘭頓螞蟻、人工生命的資料，雖然無法深入研究，但仍大大拓展了我們的視野，第一次發現原來資訊領域不只有打程式，還有這些深奧迷人的主題。當然我們也將 CA 的基本概念了解得蠻清楚的，更在老師的幫助下找到 Five Cellular Automata 這個軟體，進行我們的實驗。

我們從同到尾都沒有自己打程式設計 CA 模型，與最初的預期有所落差，主要還是因為難度太高了，因此最終還是選擇使用現有的 CA 軟體來做分析探討。即使如此，我們還是學到了一些做研究的方式，像是自己勾勒研究方向、改變變因、觀察、重複試驗、取樣、做圖表等等。我想培養這些做研究的感覺跟經驗，就是系上讓我們在甚麼都還不懂的大一時就做書報專題的目的吧！

另外我們準備 meeting、做投影片、整理書面報告，也是做這份專題的收穫。不僅兩次 meeting 的投影片總頁數達 50 頁，書面報告更是在電資營辦完後花了我們三人整整三天的時間，閉關在宿舍整理了近 40 頁、超過 10000 字的成

果。畢竟我們沒有實際做出一個實體的成果，內容不敢說有多好，但這種報告量都是我們從前未曾做過，先前也不曾預料到的豐富。

最後要感謝兩位同組的同學這半年來的合作與陪伴，還有李老師的指導，不僅以導師的身分跟我們分享許多業界的故事，指導這份專題也讓我們獲益良多。相信這次專題經驗，在我們未來的路上會有所幫助。

五、 參考資料

http://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_automaton

http://en.wikipedia.org/wiki/Conway%27s_Game_of_Life

<http://www.atlas-zone.com/complex/alife/ca/index.html>

<http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/fcyu/research/6039.pdf>

<http://www.hermetic.ch/pca/pca.htm>

<https://www.google.com.tw/webhp?sourceid=chrome->

<instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#ie=UTF->

[8&q=%E7%B4%B0%E8%83%9E%E8%87%AA%E5%8B%95%E6%A9%9F%20%](8&q=%E7%B4%B0%E8%83%9E%E8%87%AA%E5%8B%95%E6%A9%9F%20%E6%87%89%E7%94%A8&sourceid=chrome-psyapi2)

<E6%87%89%E7%94%A8&sourceid=chrome-psyapi2>