

## 應用單維細胞自動體模擬空間賽局互動系統 以檢視規劃作用的影響

賴世剛\* 陳建元\*\*

論文收件日期：九十三年二月十六日

論文接受日期：九十三年六月二十八日

### 摘 要

規劃作用對複雜空間系統的演化產生何種影響？是本文嘗試探討的問題。本文以單維細胞自動體(one-dimensional cellular automata)進行電腦模擬，並根據囚犯困境模式(prisoner's dilemma)，探討規劃行為中資訊收集活動對空間互動決策者所產生之集體行為演化的影響。細胞自動體考量離散的空間與時間向度，依據其設定之規則經由細胞與細胞間彼此互動，演化出多樣的組織及時空形態。本研究認為單維細胞自動體為複雜系統演變的基本模式，可以模擬其他具普遍運算(universal computation)功能的複雜系統，包括都市空間系統。基於這個假設，本文進行以囚犯困境互動機制為基礎的單維細胞自動體電腦模擬，考慮細胞互動範圍與決策比較範圍為兩項控制變數。因此本研究欲探討在囚犯困境之不同的得分報酬間、不同的規劃作用大小、不同初始結構及不同互動範圍下情況下，單維細胞自動體將會演化出什麼樣的組織及時空型態。模擬結果顯示規劃作用確實對於單維細胞自動體演化時空形態有所影響；具體而言，規劃作用的增加使得系統演化變得更多樣。

關鍵字：單維細胞自動體、囚犯困境、都市空間演變

---

\* 國立台北大學土地與環境規劃研究中心，台北市民生東路三段六十七號，電話：2500-9595  
傳真：2502-0384，lai@mail.ntpu.edu.tw

\*\* 英國Cardiff大學都市及區域規劃學系博士候選人

# **Application of One-Dimensional Cellular Automata to Simulate Spatial Games to Examine Effects of Planning**

**Shih-Kung Lai, Chuan-Yuan Chen**

## **Abstract**

How would planning affect the evolution of complex spatial systems? To answer the question, the paper conducts computer simulations based on one-dimensional cellular automata and the prisoner's dilemma game to explore into the effect of information gathering activities in planning behavior on the evolution of spatial decision makers interacting with each other. Cellular automata consider discrete space and time and evolve into diversified organizations and space-time patterns through transition rules based on which cells interact with each other. The research is grounded on the presumption that one-dimensional cellular automata are the basic models of all complex systems in that these models can emulate all other complex systems capable of universal computation, including urban spatial systems. We conduct one-dimensional cellular automata simulations based on the mechanisms of the prisoner's dilemma game, considering the interaction scope of cells and the comparison scope of decisions as two control variables. In short, the research investigates under different payoff structures, planning investments, initial conditions, and interaction scopes, what organizations and space-time patterns would emerge in the one-dimensional cellular automata model. The results show that planning investments indeed affect the space-time patterns of one-dimensional cellular automata evolution. More specifically, increase in planning investments makes the systems' evolution more diverse.

**Keywords:** one-dimensional cellular automata, the prisoner's dilemma game, urban spatial change

## 一、前言

都市是一複雜系統，因為都市的形成是由許多開發決策及其間的互動關係在時間及空間上累積而成。目前學界對於複雜系統特性的理解有限，而研究複雜系統最常用的分析工具不是數學模式的建立，而是電腦模擬(Casti, 1997)。其主要原因在於傳統數學在描述複雜的自然及社會現象有其限制。Wolfram(2002)對傳統數學在描述複雜現象的困境有深入的探討。他認為透過傳統數學所認知的世界十分有限，而透過類似單維細胞自動體(one-dimensional cellular automata)的簡單電腦程式，可以模擬許多傳統數學無法描述的現象，例如流體的動態。本文持類似的看法，認為傳統數學模式雖有其成功之處，但仍有許多複雜現象，包括都市空間演變，難以用數學模式駕馭。建構在合理機制上的電腦模擬應可提供我們了解都市空間演變的基本原因。從另一方面來看，有關規劃作用對都市空間演變所造成的影響，學界所知有限(Hopkins, 2001)，主要是因為若從實證的方法入手，研究這樣的課題其資料收集及因果關係的界定十分困難。因此，本文一方面嘗試藉由簡單的電腦模擬模式——單維細胞自動體——作為都市空間演變的基本模式。另一方面透過該模式機制的操作，以表現規劃的作用，用以檢視該作用大小的改變對都市空間演變的影響。本文所定義的規劃作用狹隘地指為資訊收集降低所面臨的不確定性以擬定最佳行動策略。

本文認為要建立有用的模式，不見得要從具象的都市空間模型著手，而可從簡單而抽象的架構入手。畢竟模式不是模擬物體的表象，而是對物體現象本身特性發生的一種解釋。傳統許多都市空間結構模式便是用抽象的數學語言為之(Anas等, 1998)。同理，本文所採用的電腦模擬模式是單維細胞自動體，雖然該模式乍看之下與實質都市空間結構無甚關聯，但至今已發現該模式已能解釋許多自然界及人文環境的複雜現象，包括股票市場的變動、自然演化及相對論等(Wolfram, 2002)。有些單維細胞自動體甚至具普遍運算(universal computation)的功能而能模仿任何複雜的運算。如果我們視都市空間演變過程為一種複雜的運算過程，應用單維細胞自動體來模擬都市空間的演變過程，雖不具表面的具象特色，也不足為奇了。換句話說，本文視單維細胞自動體如同數學模式一般，為一模式語言，而不是一種物像(iconic)模式。目前規劃界將細胞自動體作為物像模式的研究方法，針對模擬結果與實際都市空間演變進行比較，雖有其貢獻，卻有失細胞自動體的本意。因為細胞自動體作為複雜現象解釋的一種抽象模式語言，似不應將其圖像直接與實體的物像作比較。

近代科學的發展在化約論的驅使下，旨在尋求構成所觀察到複雜事物的基本成因，且獲得相當程度的成功。傳統科學以數學作為分析工具，成功地解釋許多自然現象，且成果多指向這些自然現象的背後隱藏著不變的基本規則(即自然定律)。但筆者同意Wolfram的說法，認為數學語言所能解釋的現象仍十分有限，且多為簡單系統。最明顯的例子莫過於物理學上三個粒子的運動，至今仍無法以數學模式解釋。都市空間演變何其多變，但作為複雜系統之一，筆者相信其背後應隱藏著簡單的規則。而Wolfram的單維細胞自動體模式可以作為探討都市變遷源由的分析工具(Lai, 2003)。

規劃行為是一普遍現象。任何決策者在執行較為繁複的任務時皆會擬妥計畫據以採取行動。都市發展尤其需要規劃，因為都市發展特性與新古典經濟學的均衡理論的假設有很大的不同(Hopkins, 2001)。對於計畫的定義與規劃行為的描述(即計畫擬訂的過程)，雖然學者的意見莫衷一是，但從資訊經濟學的角度切入，似乎頗具說服力。制定好的計畫如同制定好的決策一般，需要依賴正確而有用的資訊。因此，雖然規劃的定義有許多，但從資訊操弄的角度來看，一個很重要的概念便是「資訊收集」，如Hopkins(1981及2001)將規劃定義為「資訊的收集以降低不確定性的一種活動」，Schaeffer及Hopkins(1987)更以系統性的架構來描述土地開發之規劃行為內涵。他們亦將規劃視為「一種收集及產生資訊的過程」，視資訊為決策者制定決策時的輸入變數，目的在於減少決策判斷中的不確定性。所以「資訊收集以降低不確定性」是規劃行為理論中很重要的概念。Lai(2002)亦曾以資訊經濟學的概念證明資訊的收集原則為準確性與報酬相關性。因為規劃往往不可避免地發生在一個複雜而充滿不確定性的環境中，不確定性的原因在於環境的複雜性而導致資訊的不完全，所以在複雜的空間環境中決策者所收集的資訊，往往視其所處的環境不同而有所不同。因此，收集資訊具有空間上的限制。然而在目前大多規劃行為的研究中，並無將空間因素直接界定為決策變數(如Hopkins, 1981及2001; Knaap等, 1998; 賴世剛、曾喜鵬, 1995; Lai, 1998等)。因此，研究規劃行為中對於資訊收集的活動加入空間範疇的考量，以觀察決策者在空間系統中互動演化的結構特性，是一個很重要且迫切需要探討的主題。因此，本文對規劃的定義從狹隘的資訊操弄入手，並不擬將規劃作一通盤性的解釋。

傳統數學模型在描述都市空間發展的應用上有其限制，主要原因在於數學語言在描述複雜現象上的不足。而電腦模擬便可以補足這樣的缺失，因為電腦模擬的計算能力可以描述許多數學模式無法建構的複雜系統動態，包括都市及區域系統。當然，電腦模擬無法取代數學模式，兩者應是相輔相成。本研究便嘗試以簡單但具有

解釋力的電腦模擬模式，探討在空間因素的考量下，規劃行為中資訊收集範圍的改變對空間演化的影響。雖然描述都市空間演變的理論可由不同角度入手，如生態學、社會學、經濟學及政治經濟學等(Kaiser等，1995)，賽局理論作為土地開發者間的互動機制似乎在描述開發策略擬定以謀求利益最大化上更為貼切(Rudel，1989)。而賽局理論中著名的「囚犯困境」的模式(prisoner's dilemma)可簡單勾勒出部分具真實性的決策者互動的機制。該模式亦可說明中雙方在不斷累積經驗及學習的資訊中，找出對自己有利的最佳的策略(Axelrod，1984及1997)。由於本研究重點在於探討資訊收集範圍的影響，並未深入探討策略形成的賽局演變，因此不擬針對賽局理論作深入的探討。無論如何，本文以「囚犯困境」的簡單賽局架構為都市發展機制的假設，應可捕捉部分土地開發互動的真實情況。例如，相鄰基地不同地主決定是否要共同重建以改善居住環境便是「囚犯困境」的典型例子。為求簡化，本研究定義資訊收集的旨在於模仿空間模式週遭最佳決策者的決策，而不包含盤算對方可能行動及策略的行為等。這種資訊收集的定義可視為規劃行為，為降低有關環境不確定性的一種活動。<sup>1</sup>

探討處於囚犯困境的人類行動最深入者莫過於Axelrod(1984及1997)，該研究主要想了解在何種情況下，合作行為會發生？本文則欲探討在囚犯困境的互動架構下，規劃作用的大小對都市空間變化有何影響。原始囚犯困境賽局無空間上的考量，此時細胞自動體(cellular automata)模型便提供一個具有考量空間因素的模型(Nowak及May，1993)，本研究僅考慮以單維細胞自動體模型建立互動模式，因其為最簡單的細胞自動體(所有細胞在一維空間或線型空間上排列)，且文獻上有深入研究(如Wolfram，1994及2002；Wuensche及Lesser，1992等)。根據此模式導入囚犯困境模式與規劃作用，建立其演化(evolution)規則，探討不同資訊收集範圍下，決策者以模仿行為在單維細胞自動體中整體互動演變的情形。而根據電腦模式模擬結果，可以觀察資訊收集活動，在這簡單的空間互動模式中，對其演化之結構特性的影響，並進而說明此模式可以運用在解釋實際規劃問題的可能性。第二節分別說明單維細胞自動體模式及囚犯困境架構；第三節說明電腦模擬設計，包括細胞自動體運行規則的設計；第四節分析模擬結果。

---

註1.Friend及Hickling(1997)從決策的觀點，認為規劃所面臨的不確定性可分為外部規劃環境，未來相關選擇、價值判斷這三種求確定性，而Hopkins(1981)認為還有替選方案之不確定性。因此，規劃所面臨的不確定性共有四種。

## 二、細胞自動體與囚犯困境

細胞自動體概念的提出最早從von Neumann及Morgenstern(1966)所思考的一部自我複製機(self-reproducing automata)後,到Conway等(1985)的生命遊戲(game of life)可以說已開啟了一個探討複雜現象的分析方式。而這一發展陸續經由多位學者發表一系列研究之後,使細胞自動體模型更趨成熟(Nowak及May, 1993)。之後,迅速地都市規劃領域中應用(例如, Environment and Planning B: Planning and Design在1997年第24期第2卷有針對細胞自動體作深入探討的專輯)。此觀念目前廣泛應用在生態(如Nowak及May, 1992)、經濟(如陳樹衡與程永夏, 1994)及規劃界(如Batty及Xie, 1994)等。細胞自動體其產生的方法很簡單,即由一簡單的規則產生複雜的現象。其主要概念是,在很大的相位空間中,真正影響下一時刻某細胞值的,只有在其附近有限個細胞的值。於是下一時刻的值的決定就由左右  $r$  半徑內的細胞所決定。例如,假設有  $2r + 1$  個單維細胞自動體如下所示:

$$a_{i-r}, a_{-r+1}, \dots, a_i, \dots, a_{i+r-1}, a_{i+r}$$

它的動態方程式就是一個離散時間的函數:

$$a_i^{(t)} = F[a_{i-r}^{(t-1)}, a_{i-r+1}^{(t-1)}, \dots, a_i^{(t-1)}, \dots, a_{i+r-1}^{(t-1)}, a_{i+r}^{(t-1)}] \dots \dots \dots (1)$$

其中

$a_i$  = 第  $i$  個細胞,

$t$  = 時間, 及

$r$  = 互動半徑。

假設  $F$  之值域為 1 或 0, 即  $\{1,0\}$ , 則  $F$  可定義為

$$F: \{1,0\}^{(2r+1)} \rightarrow \{1,0\} \dots \dots \dots (2)$$

$F$  函數狀況的個數是有限的, 共有  $k^{(2r+1)}$  個, 其中  $k$  表每個細胞可能值的個數。例如當  $r = 1$  且  $k = 2$  時,  $2r + 1 = 3$  個相臨細胞的組合中間細胞共有 8 個可能性, 即 111、110、101、100、011、010、001 及 000。而每個組合對應的  $k$  值為 0 或 1, 使得  $F$  函數的狀況有  $2^8 = 256$  種。因此其簡單的函數模式產生的行為便能造成一個很複雜情況。從上述看來, 細胞自動體的連結只是區域性的  $2r + 1$  個(具有空間因素的考量), 而不是總體的相聯。但依據其傳播定則(propagation law)卻可說明每一個細胞的影響作用仍是整體性的。

Wolfram 單維細胞自動體的 256 個規則, 看似簡單, 其意義卻是深遠的。如果我們將這些 256 個規則視為複雜系統(含都市)運作基本規則(及自然定律)的宇集合,

便可用這個模式來解釋包含都市變遷的複雜現象。例如，Wolfram將這些256個規則分成四個大類(後有詳述)，其中一大類稱之為複雜結構，其演化的型態變化多端，具有生機。筆者推論都市空間變遷便應具備這種特性，而所屬的基本規則共同形成機率性的演變規則，使得都市變遷充滿不確定性(Lai, 2003)。

Nowak及May(1992)曾將囚犯困境與細胞自動體結合進行電腦模擬以觀察複雜形態如何從簡單的規則突現(emergence)出來。他們先將囚犯困境模式之得分報酬間的關係加以簡化(如圖一所示)，將前述原始囚犯困境得分矩陣中四種不同的得分組別，簡化為兩種得分組別。即採取合作策略則得分報酬為1(即(C, C))，而採取對抗策略以應付合作策略的得分報酬為 $b$ (即(D, C))。其他的情況如(D, D)、(C, D)皆加以簡化使其得分為0，這樣便使得系統行為的動態，完全取決於變數 $b$ 的值，因而使囚犯困境的情況簡化為一個參數。雖然此簡化的結構與原始囚犯困境的結構略有出入，但當 $b$ 大於1時，雙方的優勢策略皆為對抗策略，此邏輯與原始囚犯困境一致。其細胞自動體之規則設計為本身細胞與其固定距離之鄰近細胞互動，而鄰近細胞再分別與其相同距離互動範圍之鄰近細胞互動，其互動結果以囚犯困境的得分報酬計算。之後，在本身細胞與鄰近細胞間分別具得分總和，從中取其得分最高者所採取的策略，為其下一刻該中間細胞所採取的策略，類似模仿優勝者的策略。再根據此種規則，在二維細胞自動體中演化，觀察在不同 $b$ 值區間細胞演化結果。此簡化的囚犯困境在實例上可描述公共財的提供、鄰避設施及重建決策等多種都市規劃問題。以相鄰兩地主考慮重建為例，視C為重建而D為不重建。若兩地主皆不重建，雙方報酬均為0。若雙方均重建，報酬皆為1。若一方重建而另一方不重建，不重建的一方獲得 $b$ 報酬，較重建的一方獲利為大(即為0)。此結果與標準囚犯困境的邏輯是一致的。

	C	D
C	1	0
D	$b$	0

C：合作策略，D：對抗策略， $b$ ：(D,C)報酬之變數。

圖一 簡化之囚犯困境模式之得分

本研究修正此二維模式以結合部分規劃作用(即資訊收集或細胞得分值比較的範圍)於單維細胞自動體之中，因為，如前所述，單維細胞自動體似乎是任何複雜

系統的基本型態(Wolfram, 2002)。電腦模擬設計改變囚犯困境賽局報酬矩陣參數( $b$ )、模仿行為資訊收集範圍( $n$ )及細胞互動範圍( $r$ )，進行細胞自動體演化，觀察C及D之增加或減少之演化情形。

### 三、電腦模擬設計

本研究之電腦模擬設計乃是基於囚犯困境模式與單維細胞自動體之結合，也就是將前述Nowak及May(1992)的觀念表現在單維細胞自動體之中。所不同的是，本研究重點乃欲探討規劃作用作為一種控制變數，其對空間演變結構的影響。而單維細胞自動體之規則，如前所述，其下一時刻細胞的數值或策略決定於這一時刻本身的細胞與其鄰近左右細胞互動的結果。因此其互動的範圍為左右兩個方向，較二維細胞自動體互動的方向來的少。以下分別詳細說明本研究所設計建立的細胞自動體的電腦模擬內容所考慮的控制變數。

#### (一)每個細胞之值域 $k$ 之範圍

本研究中每個細胞所可能擁有的值  $k$ ，在此表示每個細胞不是合作就是對抗的情況下，因此  $k=2$ 。以1代表對抗(D)而0代表合作(C)，如下所示：

$a_i \in \{0,1\}$ ，其中

1 = (D)，對抗策略

0 = (C)，合作策略

因此， $k$  值在本模擬實驗中是固定不變的。

#### (二)界定互動範圍 $r$ 與比較策略範圍 $n$

互動範圍  $r$  即是代表其左右互動相鄰細胞的距離， $n$  為比較策略的細胞數。而在此說明的是Nowak及May(1993)並無考慮  $r$ 、 $n$  的關係，即互動多少細胞即為其比較決策的範圍。在Nowak及May(1993)的二維模式中以  $r=1$  為例，表示其與上、下、左、右共四個細胞分別互動，而比較決策範圍亦是  $r=1$  半徑內之四個細胞( $n=4$ )。因為本研究利用規劃行為理論中將規劃作用定義為比較相鄰細胞的策略並從中選取最優的策略模仿之，而將  $n$  與  $r$  分別獨立考慮。以  $n$  代表比較策略的範圍，所以  $n$  值的大小視作是資訊收集範圍的大小。另外  $r$  值在此代表互動範圍的大小，即是每個細胞以囚犯困境模式為互動的範圍，其互動表空間上具有利害關係

之細胞。因此，互動範圍  $r$  可視作決策相關性的影響範圍。以  $r=1$ 、 $n=3$  為例， $r=1$  表示細胞本身分別與其各自本身及左右最鄰近的一個細胞互動，而其互動結果便是依據囚犯困境模式之報酬得分計算方式，即圖一的得分矩陣。而  $n=3$  則表示在前述互動方式下，本身及其左右相鄰細胞分別得到三組互動得分總和而取其得分最高者決定下一刻所採取的策略。

### (三) 加入規劃作用

將規劃的資訊收集作用加入細胞自動體運行規則之中，就是每個細胞收集資訊的能力擴大，即  $n$  的個數的增加。在實例上，規劃有如進行樣本抽樣或實驗，藉以取得資訊以改變決策。如果抽樣或實驗的結果改變了決策的策略，規劃作為資訊操弄的作用便能彰顯。就都市規劃而言，抽樣有如基地的資料收集而實驗便有如數學模式的建構以預知都市政策所造成的可能影響，進而改變都市策略。此處的規劃範圍如同前述並未考慮策略行為，亦即猜測對方可能採取的行動，然後根據預測採取因應的策略。因此，資訊收集的旨在於了解周遭決策者的行動，進而採用或模仿最佳或最有利的策略，故可解釋為有關決策環境的資訊之收集。以前述  $r=1$ 、 $n=3$  的情況來說，加入規劃作用便形成  $r=1$ 、 $n=5$  的情況(即  $n$  增加)。而互動範圍  $r$ ，亦可以類似的方式控制。本研究所設定的情況包括互動範圍  $r=1$ 、 $n=3$  的情況及增加規劃作用後形成  $r=1$ 、 $n=5$  的情況及互動範圍增加為  $r=2$ 、 $n=3$  的情況及增加規劃作用後形成  $r=2$ 、 $n=5$  等的情况，共形成四種情况的設定，如表一。接著便在這四種不同情況下，隨著囚犯困境之報酬參數  $b$  的改變，產生不同規則的內容。至於  $b$  值的改變如何形成演化規則的轉變，請參見附錄。

表一 電腦模擬設定對應表

比較策略範圍	$n=3$	$n=5$
互動範圍		
$r=1$	$r=1$ 、 $n=3$	$r=1$ 、 $n=5$
$r=2$	$r=2$ 、 $n=3$	$r=2$ 、 $n=5$

本研究電腦模擬的主要內容，如前述依照  $r=1$ 、 $n=3$ ； $r=2$ 、 $n=3$ ； $r=1$ 、 $n=5$  及  $r=2$ 、 $n=5$  四種情況，分別設定每種規則不同的細胞自動體模擬初始結構。本研究設計的初始結構參考 Wolfram(1994) 以往的作法設計兩種情形，即在單一

端點的情況(seed)，即其初始結構為只有一個D在中央細胞餘則為C的情況，及設定其在隨機的情況(random)，即其初始結構為C、D隨機排列的情況。所以每種規則利用電腦模擬，分別模擬這兩種不同的狀況所演化的結果。(如表二所示)

表二 電腦模擬內容表

	單一端點(seed)	隨機(random)
模 擬 內 容	$r = 1, n = 3$	$r = 1, n = 3$
	$r = 2, n = 3$	$r = 2, n = 3$
	$r = 1, n = 5$	$r = 1, n = 5$
	$r = 2, n = 5$	$r = 2, n = 5$

在實際細胞自動體之演化規則計算上，本研究依據Nowak及May(1992)的觀念而將原始單維細胞自動體的轉換規則加以修改。以 $r = 1$ 其本身與鄰近細胞共為3個( $n = 3$ )的情況來說，因鄰近細胞需與其各自鄰近細胞互動，故互動範圍共為5個。故除了原有3個細胞之外，左右需各增加一個細胞。而所增加之細胞其值為未知。為考慮所有可能的情況，根據所增加細胞其值組合的可能，每列各增加四種情況，並將每列計算後依各細胞互動值加以總和，取其總和分數最高之細胞決定為下一刻所採取的策略。以 $r = 1, n = 3$ 之101三個細胞為例，左右各增加一個的情況下便有01010、01011、11010、11011四種情況，分別計算出每個情況101各個細胞之得分再予以加總，然後計算各細胞最後總分並取其最高者，若為101中的0其總分最高，則下一刻的值則繼續為0，若為其中左右兩端之1之任一得分最高，則下一刻值則轉換為1(若產生1與0之得分相同則細胞維持上一刻之相同的決定)。由此建立本研究之規則內容，總共產生40種規則其分布如表三所示。規則產生的過程詳見附錄中之說明及表七至十。

表三 規則數分布

參數設定	規則數
$r = 1, n = 3$	5
$r = 2, n = 3$	3
$r = 1, n = 5$	14
$r = 2, n = 5$	18

## 四、電腦模擬結果分析

本節主要說明利用前述設計之規則分別以單點及隨機起始狀況兩種情況，利用電腦模擬將此模擬結果分別依照 Wolfram(1994)所分類細胞自動體的方法予以分類，探討在不同互動範圍與因改變規劃作用而對細胞自動體演化造成的影響，並描述C群與D群在不同初始情況下及在不同 $b$ 值的規則間演化的情形。本研究主要利用 Wuensche及Lesser(1992)所設計的細胞自動體模擬程式為基礎進行模擬測試。其程式為單維細胞自動體的演化程式，模擬相鄰個數以3個及5個為限(即 $n=3$ 及 $n=5$ )。

### (一)細胞自動體模擬結果之分類

細胞自動體之演化複雜而多樣，但根據 Wolfram(1994)之研究指出單維細胞自動體的演化情形，都可以歸類為四種普遍性的種類(universality class)，如下所示，其中規則編碼(code)係根據 Wolfram(1994)的總和(totalistic)編碼方式產生：

#### 1. 第一類(class 1)

無論剛開始時的細胞表現什麼型態，皆會演化至一個單一同質的型態。



code 4 (000100)

圖二 第一類細胞自動體演化形態

#### 2. 第二類(class 2)

第二類的細胞自動體演化結果產生了一些個別、獨立的簡單結構。

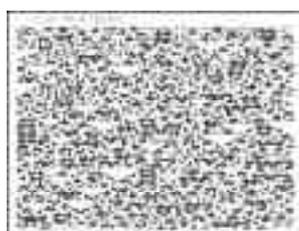


code 24 (011000)

圖三 第二類細胞自動體演化形態

### 3. 第三類(class 3)

此類的細胞自動體，演化結果為一個不具週期性、混亂的情況。



code 18 (010010)

圖四 第三類細胞自動體演化形態

### 4. 第四類(class 4)

第四類的細胞自動體所演化的型態是一個很特殊的結構，看似混亂卻也存在著某些秩序，非常難以預測。Wolfram(1994)也發現第四類細胞自動體的產生在 $k=2$ 與 $r=1$ 的情況下十分罕見，然而當 $r$ 變得愈來愈大時，則第四類細胞自動體的發生也愈來愈多。



code 20 (010100)

圖五 第四類細胞自動體演化形態

而本研究細胞自動體種類之判斷係根據前述四類細胞自動體之分類，而由於第三、四類細胞自動體之混亂或複雜的型態甚難以分辨，須利用熵(entropy)的測度，方能正確分辨(Wolfram, 1984)。因此，本研究除了分辨第一、二類細胞自動體之外，餘則為可能為第三類或第四類。

根據Wolfram的分類，本研究所設的規則其演化的結果，大多所屬第一與第二類，僅出現一種混亂的之第三、四類細胞自動體(即 $r=2$ 、 $n=5$ 且 $9/7 < b < 4/3$ ) (參見表四)。由此看出，本研究所模擬的結果，大多都隨著演化便很快產生一種固定結構或均質的穩定型態。若視都市為第四類複雜結構，此意味著都市的形成是不易的。詳細的規則內容，請參閱附錄中表七至十的說明。

表四 模擬結果分類表

設定情況	第一類(個數)	第二類(個數)	第三、四類(個數)
$r = 1, n = 3$	3	2	0
$r = 2, n = 3$	2	1	0
$r = 1, n = 5$	9	5	0
$r = 2, n = 5$	10	7	1

## (二) 互動情況不同下的情況( $n$ 固定而 $r$ 改變 )

根據表五可知(整理自附錄的模擬結果), 互動範圍增加的情況下(由  $r = 1$  增加為  $r = 2$ ), 共同點是  $b$  值區間的減少, 亦即不同規則所對應的  $b$  值範圍減少。另外從相對敏感度而言, 即以  $b$  值區間除以規則數以表現規則變動的平均  $b$  值差距, 敏感度高(平均  $b$  值差距愈小)表示  $b$  值些微改變, 便會導致規則的改變(參見附錄  $b$  值與演化規則關係的推算)。其意義表示系統的演變規則隨著  $b$  值的變化而趨多樣化, 導致系統演變因細胞互動範圍的增加而呈現較不穩定, 即當互動範圍增加時, 各個細胞自動體之規則變化對於  $b$  值呈現較為敏感。而在規則數方面, 當  $n = 3$  時, 則互動範圍增加時, 規則數減少, 而  $n = 5$  時, 規則數反而增加。此外根據 Wolfram 的分類, 當  $b$  值位於區間範圍的兩端時, 系統演化為第一類, 而當  $b$  值位於區間中段時才有可能出現其他較複雜的型態分類, 表示  $(D, C)$  的  $b$  值相較於  $(D, D)$  的 1 過大或過小均導致系統傾向均質演化。很顯然地, 若因政策或環境因素導致  $b$  值的改變, 將使得都市的演變機制產生改變。

表五 不同互動範圍及鄰近細胞組合後細胞自動體之演化特性表

	規則之 $b$ 值區間	差距	規則數	敏感度 (差距 / 規則)	演化結果分類		
					第一類 (個數)	第二類 (個數)	第三類 (個數)
$r = 1, n = 3$	$2/3 \leq b \leq 5/3$	1	5	0.20	3	2	0
$r = 2, n = 3$	1 為臨界值	0	3	0.00	2	1	0
$r = 1, n = 5$	$1/2 \leq b \leq 3$	2.5	14	0.18	9	5	0
$r = 2, n = 5$	$1/2 \leq b \leq 8/5$	1.1	18	0.06	10	7	1

### (三) 規劃作用大小( $n$ 改變而 $r$ 固定 )

根據表五可知，增加規劃的作用即是表示資訊收集範圍的擴大或  $n$  值增加，其共同點為  $b$  值區間的擴大，與前述互動範圍增加的  $b$  值的情況完全相反。此外，從相對敏感度來看，發現當規劃作用增加時， $r = 1$  時各個細胞自動體對於  $b$  值呈現較敏感，而在  $r = 2$  時各個細胞自動體對於  $b$  值反而呈現較不敏感，但差別不明顯。除此之外，規劃作用增加後，不管  $r = 1$  或  $r = 2$  規則數都增加許多，演化型態也較為多樣。很顯然地，作為資訊操弄的規劃作用將會改變都市變遷機制以及互動報酬值  $b$  的敏感性。

### (四) C、D 增減變化情況

依據本研究模擬之結果發現，C 群與 D 群在不同  $b$  值間，它們隨著演化其增減亦隨之變化。以下從當  $r = 1, n = 3$  ;  $r = 2, n = 3$  ;  $r = 1, n = 5$  與  $r = 2, n = 5$  等四種情況下，分別依照其初始結構設定為單點與隨機兩種情況依序說明如后。

#### 1. 初始結構不同對於最後演化結果並無差異

由前述不同初始狀況的電腦模擬分析中，可知在初始單一端點情況下，很快演化形成一個有秩序的固定結構或均質的結果。這與隨機情況下最後所演化的結果非常類似，只是在隨機情況下，出現較晚。但除了  $r = 2, n = 5$  且  $9/7 < b < 4/3$  時其初始結構因隨機與單一端點不同其最後演化結果有所不同外，餘則並無例外。因此，初始結構不同對於最後演化結果並無影響。

#### 2. 合作群體(C)聚集時相對於對抗群體(D)具有優勢

從前述之電腦所模擬各種情況分析來看，發現 C 群聚集時(即細胞間具相鄰邊)相對於 D 群具有優勢，也就是說當 C 聚集時 D 無法輕易的侵略它。因為若當  $b > 1$  時，根據前述簡化的囚犯困境報酬矩陣(圖一)雙方應該會選擇 D(對抗)，然從模式結果中發現 C 群聚集時具有優勢，仍然會繼續生存下去，而須將  $b$  值相對提高到一定程度時才能漸漸打破 C 所聚集的群體。此種優勢主要來自報酬矩陣的結構非對稱性。因不論  $b$  值為何， $(C, C) = 1$  的報酬必大於  $(D, D) = 0$ 。因此，相對的，由於 D 不具有聚集的優勢，其在  $b < 1$  時就便很快就消失了，且即使  $b$  稍大於 1 仍無法打破 C 群的聚集。表六更能說明此一種情況。從該表中發現  $b$  只要接近或小於 1 則很快演化出被 C 群所佔據的情況，而  $b$  大於 1 時，則因 C 群具有聚集的優勢因此並不會很快的發生被 D 所佔據的情況，而須待將  $b$  值漸漸相對提高後才會被 D 群所佔據。此等現

象的發生，乃是因為囚犯困境報酬矩陣之結構與空間因素所致。另一種可能的解釋為在重複性囚犯困境賽局中，因為雙方均防範未來對方採取報復行動，便傾向採取合作的策略，本研究結果似與Axelrod(1984)的發現不謀而合。此意味著此種賽局情狀適合解釋重複賽局出現機率比較高的都市地區，如發展較成熟的都市變遷和緩地區。

表六 不同種類演化至均質(均為C或D)其b值比較表

	何時被C群全部佔據	何時被D群全部佔據
$r = 1, n = 3$	$b < 3/4$	$b > 5/3$
$r = 2, n = 3$	$b < 1$	$b > 1$
$r = 1, n = 5$	$b < 5/4$	$b > 2$
$r = 2, n = 5$	$b < 7/8$	$b > 4/3$

## 五、討 論

本研究將囚犯困境模式與規劃作用結合於單維細胞自體之運行規則當中，並將設計的運行規則利用電腦模擬加以歸納整理。但這些模擬及分析雖僅止於抽象的系統說明，但本節仍嘗試利用前述所歸納所得的特性，解釋現實世界的有關土地開發行為。也許有人會質疑本研究所採納的單維細胞自動體模式過於簡單，而無法解釋現實世界的複雜空間系統其變化趨勢。但最近已有證據已顯示單維細胞自動體可用來解釋許多實質的物理及其他複雜現象(Wolfram, 2002)，表示單維細胞自動體的演化特性似可以解釋或模擬包括都市空間演變的複雜系統通性。以本研究所探討的互動範圍參數 $r = 1$ 、 $r = 2$ 及規劃作用參數改變之 $n = 3$ 、 $n = 5$ 來說，其意義並非真如其數字所說的大小，而是一個相對性的概念。即互動範圍小( $r = 1$ )、互動範圍大( $r = 2$ )、資訊收集範圍小( $n = 3$ )、資訊收集範圍大( $n = 5$ )的相對性概念。囚犯困境報酬矩陣中之變數 $b$ 在解釋土地開發行為中亦僅表達一個總體外在影響因素之概念，其中可能包含政府的稅收、開發行為的收入與支出，甚至實際環境演變的過程不確定性。以下便分別從資訊收集範圍( $n$ )及互動範圍( $r$ )這兩方面逐一對模擬結果就土地規劃上的意義說明之。

### (一) 規劃作用改變因素( $n$ )之解釋

從前述 $n$ 的定義中可知，其在細胞自動體的模式中為「決策比較的範圍」，而加入規劃作用因素就是 $n$ 個數從 $n = 3$ 增至 $n = 5$ 。決策比較範圍的增加可解釋為資訊收集範圍的增加。而從前面的分析中(參見表五)得知資訊範圍擴大，規則數增加，演化結果增多，可表示當個體細胞規劃作用增加時，系統演化結果變得多樣與複雜。此結果似應可排除經濟學者對規劃作用的疑慮，認為市場本身具有有效分派資源的功能而不需規劃的介入。規劃作用至少以本文的狹隘定義為例，確實對空間系統的演化產生影響。

### (二) 互動範圍( $r$ )之解釋

互動範圍( $r$ )在前述中的定義為細胞彼此以囚犯困境模式互動的範圍，進而從其互動中產生得分報酬。以現實世界來看其互動表示決策者間具有某種空間利害關係存在(即互動者間的決策互相影響對方的報酬)。而 $b$ 值的改變，也決定賽局情況是否為囚犯困境。例如前述中說明囚犯困境成立的要件須 $b > 1$ 才能成立，若 $b < 1$ 則困境無由產生。因此，互動範圍 $r$ 可視作「決策相關性」的影響範圍，即其決策之利害關係大，則互動範圍增加。以土地使用為例，首先假設每個細胞為一個街廓，而每個街廓只有兩種土地使用，不是住宅使用就是零售使用，其得分矩陣利用本研究前述之囚犯困境轉換如圖六所示：

	C	D
C	1	0
D	b	0

C：合作策略，D：對抗策略。

	住	商
住	1	0
商	b	0

住：住宅使用，商：零售使用， $b$ ：(D, C)報酬之變數或(住, 商)報酬之變數

圖六 住宅、商業使用報酬矩陣圖

得分計算如同前述將其轉化為兩者皆作住宅使用之得分報酬為1，而零售使用面對住宅使用其報酬為 $b$ ，其餘情況得分為0。此假想的報酬關係雖無法解釋所有的

狀況(如聚集經濟)，但其目的乃在說明本研究結果可如何應用來描述真實世界情況。互動範圍增加也就是決策利害關係影響範圍增加，如在一新社區的土地使用別間其厲害關係範圍較小、單純，而由於該地區街廓漸漸發展，人口遷入、商業發展等之關係使得利害關係複雜化，其範圍、個數增加。而從前述分析中得知，若互動範圍( $r$ )增加， $b$ 值區間明顯減少，系統對 $b$ 值的反應特別敏感。

根據以上所述，可知在不同的互動範圍( $r$ )與資訊收集範圍( $n$ )下對於報酬 $b$ 值的反應亦不同。而 $b$ 值為一外生變數可由我們來控制其規則演化的結果。可解釋為如前述之土地使用作為住宅使用或零售使用的例子中，政府利用課稅、土地變更利益回饋等手段來控制報酬 $b$ 值的大小，使其欲將該區的土地使用型態演化為純住宅使用避免零售使用入侵(如同前述演化結果為均質C的演化型態)，或是欲將住宅使用轉化為零售用途的土地使用型態(如同前述演化結果為均質C、D均成長的型態)的政策目的。這種對於細胞自動體的解釋及其在政策上的應用，則須另外進行深入及嚴謹的探討。

## 六、結 論

本研究以簡單的單維細胞自動體模型根據囚犯困境為空間互動機制，利用電腦模擬觀察規劃作用對系統演化的影響。研究結果顯示，規劃作用增加使得 $b$ 值空間的擴大，系統的演化也受到影響而更多樣化。且互動範圍增加的使得 $b$ 值區間減少，各個細胞對於 $b$ 值相對於規則呈現較為敏感， $b$ 值些微改變，便會導致規則的改變。另從電腦模擬中發現C群聚集時相對於D具有優勢；也就說當C聚集時D無法輕易的侵略它。此種優勢主要來自報酬矩陣的結構非對稱性以及重複性囚犯困境賽局中合作行為的突現性(emergence)。文獻上已證實單維細胞自動體對現實世界複雜系統的解釋能力，因此對如都市等之複雜空間系統的演變，該模式應具有某程度的可信度。本研究便是在這樣的背景概念下，從事類似的嘗試，至於如何將研究成果應用在規劃實務的操作上，則需更深入及嚴謹的電腦模擬設計以及新的解釋觀點。

### 附錄：單維細胞自動體演化規則之設定

以  $r = 1$ 、 $n = 3$  為例，三個細胞的排列有八種，分別為 111、110、101、100、011、010、001 及 000。由於左右兩個細胞必須與外側各一個細胞互動，因此每一組排列便有四種可能性，如下所示。其中括弧內的數字代表該三個細胞根據圖一囚犯困境報酬得分計算之結果。最後一列為四個可能性的總計。

01110	01100	01010	01000	00110	00100	00010	00000
( <i>b</i> 0 <i>b</i> )	( <i>b</i> <i>b</i> 2)	(2 <i>b</i> 1 2 <i>b</i> )	(2 <i>b</i> 2 3)	(2 <i>b</i> <i>b</i> )	(2 2 <i>b</i> 2)	(3 2 2 <i>b</i> )	(3 3 3)
01111	01101	01011	01001	00111	00101	00011	00001
( <i>b</i> 0 0)	( <i>b</i> <i>b</i> 1)	(2 <i>b</i> 1 <i>b</i> )	(2 <i>b</i> 2 2)	(2 <i>b</i> 0)	(2 2 <i>b</i> 1)	(3 2 <i>b</i> )	(3 3 2)
11110	11100	11010	11000	10110	10100	10010	10000
(0 0 <i>b</i> )	(0 <i>b</i> 2)	( <i>b</i> 1 2 <i>b</i> )	( <i>b</i> 2 3)	(1 <i>b</i> <i>b</i> )	(1 2 <i>b</i> 2)	(2 2 2 <i>b</i> )	(2 3 3)
11111	11101	11011	11001	10111	10101	10011	10001
(0 0 0)	(0 <i>b</i> 1)	( <i>b</i> 1 <i>b</i> )	( <i>b</i> 2 2)	(1 <i>b</i> 0)	(1 2 <i>b</i> 1)	(2 2 <i>b</i> )	(2 3 2)
(2 <i>b</i> 0 2 <i>b</i> )(2 <i>b</i> 4 <i>b</i> 6)(6 <i>b</i> 4 6 <i>b</i> )(6 <i>b</i> 8 10)(6 4 <i>b</i> 2 <i>b</i> )(6 8 <i>b</i> 6) (10 8 6 <i>b</i> )(10 12 10)							

根據上述資料分析，發現當  $b$  值介於五個門檻值時會分別形成五種規則，如表七所示。其中二元規則代碼指的是對應於上述八組細胞群，在下一時段中央細胞值的變化。例如，10000000 表 111 1、110 0、101 0、100 0、011 0、010 0、001 0 及 000 0。其他  $r$ 、 $n$  值組合後  $b$  值區間與規則之制定依此邏輯進行結果如表八、九及十所示。 $n = 5$  之規則轉換如下，以

10101100111001000010111000000000 為例，11111 1、1110 0、11101 1、11100 0、11011 1、11010 1、11001 0、11000 0、10111 1、10110 1、10101 1、10100 0、10011 0、10010 1、10001 0、10000 0、01111 0、01110 0、01101 1、01100 0、01011 1、01010 1、01001 1、01000 0、00111 0、00110 0、00101 0、00100 0、00011 0、00010 0、00001 0 及 00000 0。

表七  $r = 1$ 、 $n = 3$ 之規則綜理表

規則	二元規則代碼	Wolfram分類
$b$ 值區間		
$b < 2/3$	10000000	第一類
$2/3 < b < 3/4$	10100000	第一類
$3/4 < b < 3/2$	10100100	第二類
$3/2 < b < 5/3$	11101100	第二類
$b > 5/3$	11111110	第一類

表八  $r = 2$ 、 $n = 3$ 之規則綜理表

規則	二元規則代碼	Wolfram分類
$b$ 值區間		
$b < 1$	10000000	第一類
$b = 1$	11001100	第二類
$b > 1$	11111110	第一類

表九  $r = 1$ 、 $n = 5$ 之規則綜理表

規則	二元規則代碼	Wolfram分類
$b$ 值區間		
$b < 1/2$	10000000000000000000000000000000	第一類
$1/2 < b < 2/3$	10000000001000000000000000000000	第一類
$2/3 < b < 3/4$	10100000101000000000000000000000	第一類
$3/4 < b < 1$	10100100101000000000110000000000	第一類
$b = 1$	10100100111000000010110000000000	第一類
$1 < b < 5/4$	10101100111001000010111000000000	第一類
$5/4 < b < 4/3$	10101100111101000010111000110000	第二類
$4/3 < b < 3/2$	10101110111111000010111000110000	第二類
$b = 3/2$	11101110111111001110111100110100	第二類
$3/2 < b < 2$	11101110111111001110111100110100	第二類
$b = 2$	11101110111111001111111100110100	第二類
$2 < b < 5/2$	1110111011111111111111111100110100	第一類
$5/2 < b < 3$	11111110111111111111111111110100	第一類
$b > 3$	11111111111111111111111111111110	第一類

表十  $r = 2$ 、 $n = 5$ 之規則綜理表

規則 $b$ 值區間	二元規則代碼	Wolfram分類
$b = 1/2$	10000000000000000000000000000000	第一類
$1/2 < b < 3/4$	10001000000000000000000000000000	第一類
$3/4 < b < 4/5$	10101000100000000000000000000000	第一類
$4/5 < b < 5/6$	10101000110000000010000000000000	第一類
$5/6 < b < 6/7$	10101010110010000010000000000000	第一類
$6/7 < b < 7/8$	10101010110011000010001000000000	第一類
$7/8 < b < 1$	10101010110011000010001000010000	第二類
$1 < b < 8/7$	10101010110011000111001001010000	第二類
$8/7 < b < 7/6$	10101010110011000111001101010100	第二類
$b = 7/6$	10101010110111000111001101110100	第二類
$7/6 < b < 6/5$	10101010110111100111001101110100	第二類
$6/5 < b < 5/4$	10101010110111100111111101110100	第二類
$5/4 < b < 9/7$	10101010111111100111111101110100	第二類
$9/7 < b < 4/3$	10101010111111100111111101110110	第三類或第四類
$4/3 < b < 3/2$	11101010111111101111111101110110	第一類
$b = 3/2$	11111010111111101111111111110110	第一類
$3/2 < b < 8/5$	11111110111111111111111111110110	第一類
$b > 8/5$	11111111111111111111111111111110	第一類

### 參考文獻

陳樹衡、程永夏(1994)，自我實現預期、貝氏學習與經濟謊言：細胞互動模型的模擬與分析，台灣經濟學會年會論文集：123-150。

賴世剛、曾喜臚(1995)，規劃的邏輯-以薩維吉效用理論為基礎的解釋，「規劃學報」(22)：85-97。

Anas, A., R. Arnott, and K. A. Small (1998). Urban spatial structure, *Journal of Economic Literature*, XXXXVI (September): 1426-1464.

Axelrod, R. (1984). *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books & Co.

- Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Batty, M. and Y. Xie (1994). From cells to cities, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 121:31-48.
- Casti, J. L. (1997). *Would-be Worlds: How Simulation Is Changing the Frontiers of Science*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Conway, J. H., R. K. Guy, and E. R. Berlekamp (1985). *Winning Ways: For Your Mathematical Plays*, Volume 2. New York: Academic Press.
- Friend, J. and A. Hickling (1997). *Planning under Pressure*. Oxford: Butterworth/Heinemann.
- Hopkins, L. D. (1981). The decision to plan: Planning activity as public goods, in *Urban Infrastructure, Location, and Housing*, Lierop, W. R. & P. Nijkamp (eds.), Sijthoff and Noordhoff, Alphen aan den Rijn: 273-296.
- Hopkins, L. D. (2001). *Urban Development: The Logic of Making Plans*. London: Island Press.
- Kaiser, E. J., D. R. Godschalk, and F. S. Chapin, Jr. (1995). *Urban Land Use Planning*. Chicago: University of Illinois Press.
- Knaap, G. J., L. D. Hopkins, and K. P. Donaghy (1998). Do plans matter? A framework for examining the logic and effects of land use planning, *Journal of Planning Education and Research* 18(1): 25-34.
- Lai, S. K. (1998). From organized anarchy to controlled structure: effects of planning on the garbage-can decision processes, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25: 85-102.
- Lai, S. K. (2002). Information structures exploration as planning for a unitary organization, *Planning and Market*. <<http://www-pam.usc.edu>> 5(1): 31-42 .
- Lai, S. K. (2003). On transition rules of complex structure in one-dimensional cellular automata: Some implications for urban change, *Annals of Regional Science*, 37(2), 337-52.
- Nowak, M. A. and R. M. May (1992). Evolutionary games and spatial chaos, *Nature*. 359: 826.
- Nowak, M. A. and R.M. May (1993). The spatial dilemmas of evolution, *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 3(1): 35-78.

- Rudel, T. K. (1989). *Situations and Strategies in American Land-Use Planning*. New York: Cambridge University Press.
- Schaeffer, P. and L. D. Hopkins (1987). Behavior of land developers: planning and the economics of information, *Environment and Planning A*. 19:1221-1232.
- Von Neumann, J and O. Morgenstern (1996). *Theory of Self-Reproducing Automata*. Burks, A. W. (ed.), Urbana: University of Illinois Press.
- Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311 : 419-424
- Wolfram , S. (1994). Universality and complexity in cellular automata, in *Cellular Automata and Complexity*. Wolfram , S. (ed.), Massachusetts : Addison-Wesley & Co.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, Inc.
- Wuensche, A. and M. Lesser (1992). *The Global Dynamics of Cellular Automata: An Atlas of Basin of Attraction Fields of One-dimensional Cellular Automata*. Massachusetts: Addison-Wesley & Co.