

都市自我組織  
制度與空間演變的模擬比較  
Urban Self-organization  
A Simulation Comparison between  
Institutional and Spatial Change

賴世剛\*                  王昱智\*\*                  韓昊英\*\*\*  
Shih-Kung Lai              Yu-Chie Wang              Haoying Han

**Abstract**

Since the rise of Complex Science, it has emerged as the new paradigm of urban evolution. Compared with the traditional mathematical model, exploring the urban development with complexity theory can help us understand the structure of a city, such as the handling of different types of agents and the characteristics of limited rationality. Recently, Agent-Based Modeling (ABM) has been introduced in social sciences. ABM is similar to Cellular Automata (CA), but it is more effective in modeling the real world of urban development. Nevertheless, ABM has its limitation in studying intangible entities such as the strategy of decision making.

Spatial Garbage Can Model (SGCM) is a conceptual model to explore urban development. This research intends to reconstruct the SGCM through ABM, and incorporate adaptability and irreversibility, by viewing the SGCM as an artificial society and testing this system in terms of self-organization, as well as finding out

---

\* 國立臺北大學城市治理英語碩士學位學程主任

Director, International Program on Urban Governance, National Taipei University.

\*\* 國立成功大學都市計劃學系碩士

Master, Department of Urban Planning, National Cheng Kung University.

\*\*\* 中國浙江大學土地管理系副教授

Associate Professor, Department of Land Management, Zhejiang University, China.

institutional and spatial emergence which influence urban development processes. Results showed that the system self-organized itself, that institutional structures were more efficient in problem-solving than spatial structures, and that the characteristics of self-organization of spatial structures were more significant than institutional structures. In addition, the interaction between spatial and institutional structures was significant. The implication is that we should focus on both in making plans for urban development, rather than solely on spatial structures as traditionally practiced.

**Keywords: self-organization, agent-based modeling, spatial garbage can model, artificial society.**

## 摘 要

自複雜科學興起以來，已漸成為探討都市發展演變的典範。相較於傳統的數理模型，以複雜理論探討都市發展可彌補其不足之處，包含了可處理不同類型的個體，以及可模擬出更貼近真實世界中個體的有限理性等特性。近年來，基於個體之模擬 (Agent-Based Modeling, ABM) 在社會科學研究逐漸受到重視。其概念與 Cellular Automata (CA) 相似，但是 ABM 相對於 CA 在探討都市發展上更貼近真實環境。雖然如此，ABM 仍有其侷限之處，如甚少研究針對於無法碰觸的抽象個體，像是決策的選擇機會。

空間垃圾桶模型 (Spatial Garbage Can Model, SGCM) 正是以一種概念性的模型，來探討都市發展，因此本研究以 ABM 重新詮釋 SGCM，並加入了適應性與可逆性之概念，將 SGCM 重新表現為一人工社會，來探討此系統是否為一自我組織的系統，以及制度與空間何者對於都市發展影響較為顯著。最後結果發現，系統呈現自我組織的現象，而且發現制度在解決問題的效率上較空間來的高，以及空間之相對自我組織性較制度為高。且制度與空間之間相互作用顯著，顯示在都市發展中，制度與空間是互相影響的，因此在都市規劃上，應同時著重兩者，而非僅以空間規劃為主。

**關鍵字：自我組織、個體基礎建模、空間垃圾桶模型、人工社會**

## 前 言

自從複雜科學於 1980 年代在美國聖塔菲學院 (Santa Fe Institute) 發展以來，已漸成為探討都市發展演變的典範 (paradigm) (Batty 2005)。相較於傳統的數理模型 (如 Anas, Arnott, and Small 1998)，以複雜理論探討都市發展可彌補其不足之處，包含了可處理不同類型的個體，以及可模擬出更貼近真實世界中個體的有限理性等特性 (Briassoulis 2008)。但最讓人注意的是，以複雜理論為基礎之都市發展模型往往可發現自我組織<sup>1</sup> (self-organization) 的現象 (如 Batty 1997; Clarke, Hoppen, and Gaydos 1997; Wu and Webster 2000)。

然而，對於都市發展的變化，如同傳統的模式一般，迄今依然沒有一個以複雜理論為基礎的模型

能夠完美的重現都市發展的過程，或是能完全解釋都市發展的機制 (Batty 2005)。因為都市的複雜性高，都市內包含著幾近無限多的要素，以及都市內個體之間相互作用的不可預測性，要完全地模擬出都市過程幾乎是不可能的，因為任何模式都只是真實世界的簡化。因此，對於都市我們只能掌握其結構化概念性的架構，以此發展出都市發展演變模型。

空間垃圾桶模型 (Spatial Garbage Can Model, SGCM) (Lai 2006) 便提供了一種概念性的模型架構來看待都市發展。SGCM 從決策制定的機制來看待都市發展的過程，將都市發展視為是決策累積的現象，包括了五個因子：參與者 (participants)、問題 (problems)、解決方案 (solutions)、選擇機會 (choice opportunities) 及區位 (locations)。這五種因子如水流般隨機移動，在特殊的時機及場合，決策被制定。而決定因子個體間的組合是否能制定決策的重要關鍵之一，便是系統內的結構限制，即建立五個元素之間關係的限制條件，詳述如後。其概念接近於基於個體建模 (Agent-Based Modeling, ABM) 之觀念：個體在虛擬的空間上依循著一定的規則移動，而在一定條件之下，個體之間會相互作用，並影響整個系統。以 ABM 的建模方式來探討社會科學問題已逐漸受到重視 (Troitzsch 2009)。SGCM 並無針對都市空間的型態與變化作明確地描述，而是將都市發展中制度 (無論是正式的或非正式的) 與空間視為是都市發展的結構限制，來探討其對於都市發展的效率。

在空間垃圾桶模型 (SGCM) 中，結構限制是固定且為外部給定的，而在真實世界中，該限制，如制度，應是緩慢的改變，因此該模型可針對這個限制加以改善。SGCM 一文中大膽假設，若結構限制並非固定，其應會在模擬中與系統共同演變，就如同法規管制 (regulation) 在都市發展中湧現 (emerge) 一般。因此，本研究希望賦予結構限制內生變動而非外生給定的機制，使其可以隨著系統共同演化，並觀察其是否呈現自我組織的現象。

一般探討都市自我組織性的模型，多數皆以空間的型態和演變為研究主體 (如賴世剛、高宏軒 2001)，然而在 SGCM 中已經發現在都市發展的過程中，制度設計比空間實質設計對都市發展而言，產生更大的影響力，說明制度在都市發展中是重要的因素之一。然而對於制度是否會呈現自我組織的特性，文獻上卻很少研究探討，因此綜合以上所述，本研究希望以 ABM 重現空間垃圾桶模型，以驗證下列假說：

一、結構限制在允許其變動的情況下，該結構限制是否會隨著時間的演進，而產生秩序性，換言之，此系統是否為自我組織的系統？

二、在確定此系統為一自我組織的系統的情形下，制度與空間究竟何者對都市發展較具有影響性，或是互相影響？

本文第二節進行文獻回顧；第三節說明電腦模擬設計；第四節闡述模擬結果；第五節為結論。

## 文獻回顧

### (一) 自我組織與都市發展

「自我組織」(self-organization) 這個概念為 Lotka 於 1920 年代首先提出，他認為生態系統為一網絡能量流動的模式 (Lotka 1925)。為了解釋此一新的概念，Lotka 將自我組織視為最大的能量輸入及產

出現象。自我組織是開放的複雜系統之基本特性，其理論含意為如果向系統輸入能量使得某一參數達到臨界值，系統往往會形成某種秩序。也就是說，系統演化時不需要外界的特定干擾，只需依靠系統內部要素之相互協調並能達到某種狀態時，便可稱此系統為具有自我組織的特性。

自我組織系統通常有幾項特質 (賴世剛、高宏軒 2001)：

#### 1. 個體間的互動 (local interaction)

系統由許多的個體組合而成，單一個體的行為不但受到其他個體的影響，其本身也會影響其他個體的行為，最終系統的整體型態是受到個體間不斷互動所達成的結果。不同系統中個體互動的誘因或緣由不盡相同。如原子及分子的互動源於作用力，而經濟個體的互動誘因源於從交易中獲取利潤。都市中的個體互動則源自於不同的個體為各自的利益，而制定了不同的決策，而這些決策又互相影響，也就是都市發展的決策具有相關性 (賴世剛 2005)。這種相關性促成了互動的作用力，例如，興建捷運系統的決策會影響周遭土地開發的決策，進而成為都市發展的動力。而個體的互動也同時產生整體型態的湧現，也因此複雜系統中整體會大於所有組成份子的加總 (The whole is greater than the sum of the parts)。

#### 2. 非動力線性學 (nonlinear dynamics)

複雜系統中的組成份子息息相關，小騷動有可能不會一直維持其小騷動。在適當條件下，小小的騷動會膨脹擴大，使得整個系統完全無法預測。自我組織現象存在於具有正回饋 (positive feedback) 的互動系統中，傳統假設靜態均衡的數理模型難以解釋及預測真實的都市發展現象。

#### 3. 數量龐大的個體 (many agents)

自我組織是建立在系統中組成份子連結 (connections)、互動 (interaction) 及回饋 (feedback) 的基礎上。也就是說呈現自我組織現象的複雜系統中必存在著數量龐大的個體 (agents)。個體可能是分子、神經元或消費者，甚至於企業。無論個體是什麼，皆會因相互影響而逐漸不斷地自我組織或重組為巨大的結構。因此分子會形成細胞；神經元會形成頭腦；物種會形成生態系；消費者和企業會形成經濟體；設施和活動會形成都市，而這些新產生的整體結構都會形成不同層次的行為模式。都市中正因為有著數量龐大的個體，且個體種類及特性繁雜，因而難以預測個體之間的互動情形，但能藉由賦予個體移動及決策的規則，透過電腦模擬觀察個體間互動的結果。

#### 4. 湧現 (或突現) (emergence)

此論點認為系統整體會大於組成份子的加總，而整體型態所呈現出的結構與秩序是在組成分子互動下所產生。湧現也意涵著複雜系統所表現出的結構與秩序並非與較低階組成份子的個別演化規則相同。因此有機體在共同演化中競合，形成協調的生態系統；人們為了滿足物質需求彼此交易物品，而創造了市場的湧現結構等，都是湧現的例子。湧現與自我組織意義常令人混淆，Wolf and Holvoet (2005) 認為，湧現與自我組織的關係存在三種看法：(1) 自我組織是湧現產生的原因；(2) 自我組織是湧現的結果；(3) 自我組織是湧現的一種特殊形式，甚至是同一的、可以互相替代。當將自我組織看成是微觀機制和動態過程的時候，一般持第一種看法；將自我組織看成是系統的一種性質的時候，往往產生第二種看法；而結合前兩種看法或對湧現和自我組織在概念上不加區分的時候，就會得到第三種看法。

#### 5. 整體與局部的互動 (global-local interactions)

湧現的論點同時也點出了自我組織系統中的整體與局部之間的相互影響效果。在局部角度下個體

之間的互動，形成整體組織的結構與形態，這樣的結構又影響到個體的行為而產生不同的相互影響關係。

都市系統符合了上述幾項特點，因此可說是個自我組織的系統。關於都市呈現自我組織現象的論證，Krugman (1996) 曾以美國 1993 年的統計資料，以 130 個都市的規模資料套入冪次率 (power law)<sup>2</sup> 模型，呈現高度吻合。統計結果，模型的斜率約為-1，表示人口大於某一數量  $S$  的都市個數與  $1/S$  成比例關係。而後 Krugman 建立起多核心都市的空間自我組織模型，其模型以廠商之間的吸引力及離心力及其相互作用的分析為基礎，闡述了由一隻看不見的手形成大範圍內的有規則經濟空間模式的內在紋理。國內亦有類似的研究 (薛明生、賴世剛 2002)。其研究將台灣本島分為三組規模<sup>3</sup>，發現亦符合冪次律。而賴世剛及高宏軒 (2001) 則認為都市空間中的土地使用變遷主要為空間單元與周圍相鄰單元開發決策互動的結果；並視都市為一複雜空間系統，且空間決策者具有有限理性 (bounded rationality)，藉由二維細胞自動體 (Cellular automata) 進行土地使用變遷的電腦模擬。經由實驗結果顯示，系統中相同使用類別 (如住宅使用) 的宗地聚集規模與頻率呈現出冪次法則的自我組織現象。而 Portugali (2000) 則將目前對於都市的自我組織性之探討做了整理<sup>4</sup>。

都市無疑是個自我組織的系統，目前對於都市自我組織性的研究仍是方興未艾，且對於都市的自我組織性所探討的僅局限於空間模式上，但對於都市空間模式為何呈現自我組織系統仍沒有一致的解釋原因。儘管如此，都市自我組織發展的特性，仍然有隱藏其後的秩序和自身的規律。Batty (2005) 於其所著之《*Cities and Complexity*》一書中，認為都市應是被視為是一層層相疊的都市變化，而非傳統所認為將都市視為是整體的空間結構與型態。該書中將都市變化的關鍵視為是隨機的、歷史性的偶然，而都市的優勢 (無論是資源上或是經濟上的) 則是認為物質決定論 (physical determinism) 所決定。都市發展則與正回饋 (positive feedback) 相關，因而有規模報酬遞增的現象，而這種現象使得最為基本的動態形式產生出混亂形式的複雜。這顯示了都市系統是一種遠離均衡 (far-from-equilibrium)<sup>5</sup> 的狀態，這也是為何都市之結構經常被觀察到是規律的，但卻是處在混亂的邊緣 (edge of chaos)。

## (二) Agent-Based Modeling 及都市發展

Agent-Based Modeling (ABM)，目前並無統一的譯名，可稱之「以個體為基礎模型」或「以代理者為基礎模型」。ABM 的起源是從 1940 年代一個簡單的概念發展而成。因為它需要精深的計算程式，在 1990 年代以前並不普遍。ABM 的歷史可以追溯到 von Neumann machine，首先建立一個具有 5 個鄰域、29 個狀態，並能自我複製的初等細胞自動機 (Elementary CA)，後來轉變為細胞自動體 (Cellular Automata) (von Neumann 1966)。而後 Conway (參見 Gardner 1970) 創造出眾所皆知的生命遊戲 (Game of Life)。但至此為止都只限於網格之間的相互作用，而 ABM 是個體可以在網格上自由移動並與環境相互作用的建模方式。一個 agent 需要具有某些特性，包括行動性 (activity)：個體具備行動、決策的能力；自主性 (autonomy)：個體在成達成目標的前提下，有自主能力採取行動；相互作用 (interaction)：個體之間會有相互作用產生；社會性 (sociality)：個體與個體會有短距離之溝通行為；回應性 (responsiveness)：個體會針對環境而做出回應；持續性 (durative)：個體的行為是持續不斷的，除非操控者使之停下，否則個體的行動將持續；適應性 (adaptability)：個體具備學習並能隨經驗而增長；以及可移動性 (mobility)：個體可在系統內任意移動 (Batty 2003)。相對於傳統數理模型，這些特性會使

得模擬環境更像是真實的社會。目前為止學術界尚未給予 agent 統一且確切的定義，但儘管在不同領域中對 agent 的理解有一定的區別，但大多學者都認為 agent 是一種實體 (entity) (薛頌、楊開忠、沈體雁 2004)。它能夠因應周遭環境給予的訊息自發性的運作，並具有學習能力並與其他 agent 並存且互動，也就是說，它們的行為是自發的、推理後決策、學習及與其他 agent、環境互動的結果。然而在都市中，agent 所代表的是具決策能力的個體，如政府、開發商、地主等。

根據 ABM 的概念創造社會系統的研究則歸功於電腦科學家 Craig Reynolds。他曾嘗試將真實的生物 agent 建模，也就是人工生命 (artificial life) (陳建元等 2005)。隨著 1990 年代中期 SWARM 及 2000 年 RePast 的問世，有著部份可自行編撰的編碼 (custom-designed code)，讓越來越多 ABM 具體化。如 Benenson (1998) 及 Benenson, Omer, and Hatna (2002) 由一個棋盤所類比的都市，根據居民的經濟狀況、房地產價格變動以及文化認同性等模擬了都市空間演化的自我組織現象和居民種族隔離及居住分異現象 (黎夏等 2007)，但模型只考慮居民 agent。而 Ligtenberg, Bregt, and van Lammeren (2001) 提出 ABM 與 CA 結合的模型，該模型引入了政府主導規劃因素。而黎夏則結合了 CA，模擬了中國廣州市海珠區的發展，並比對模擬的結果與現況發現兩者大致吻合 (黎夏、葉嘉安 2005)。Hanley and Hopkins (2007) 則以 ABM 來評估單戶住宅 (single-family house) 發展模式以模擬在下水道管線擴充的大小、區位和時機的規劃下，地主和開發者的反應及其影響。

### (三) 空間垃圾桶理論

空間垃圾桶模式 (Spatial Garbage Can Model, SGCM) 則是由 Lai (2006) 提出，將垃圾桶模式 (Garbage Can Model) (Cohen, March, and Olsen 1972) 之決策因子加入區位，並增加解決方案結構與空間結構兩種結構限制，用以敘述都市發展決策制定的過程。此理論認為都市 (類似組織) 是一種有組織的無政府 (organized anarchy)。都市是由許多決策與規劃累積而成的，這個結果是由公部門與私部門兩者大量個體相互影響並制定決策而形成。都市發展過程可以藉由了解整個模擬過程以觀察整體發展型態湧現的現象，亦即源於五種幾乎獨立的元素流的交互作用，分別是決策者 (參與者) (decision makers)、解決方案 (solutions)、問題 (problems)、決策情況 (選擇機會) (decision situations or choice opportunities) 與區位 (places or locations)。如圖 1 所示，當五種個體碰撞在一起時，決策有可能被制定。決策者可視為是公部門或私部門的開發者，在公開或私底下找尋適當的土地開發；解決方案則是對開發的土地、資本或是對決策有益之資源；問題是決策者的期待與當下狀況的落差；決策情況是開發決策是否會被制定的機會；區位則是決策情況發生之地點。決策者一開始可能有可利用的土地，不知如何利用。當機會來了，如利率低時，或是主要道路的開闢造成土地價值上升，決策者與其他合夥人，像是地主，或許會決定在該地開發土地以期待獲利。因此五種元素間的關係是不明確、不清楚的。解決方案也許已經存在於問題發生之前，元素間並沒有明顯的順序關係。

此外，都市事件充滿變化，而事件觸發活動。例如，商人提供服務進而影響著家戶的選擇：住宅區位、購物選擇、工作地點、選擇哪家餐廳吃晚餐、看哪部電影、去哪家醫院看病、走哪條路、上哪間學校等。每個活動，是照計畫或是不按計畫的，都會引起複雜的結果相互盤繞著決策者、解決方案、問題、決策情況及區位。例如，一個家庭會先有購物的預算，再來開始搜尋位於不同區位的商店所販賣的物品，最後在一個特定的店裡，將會找出符合其需求的商品，決策就是這樣被制定。當決策者、

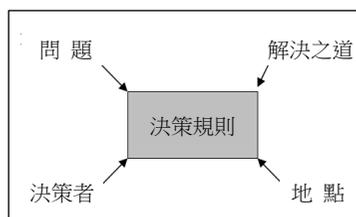
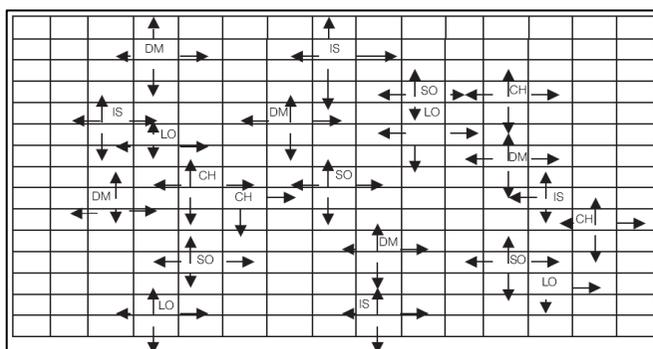


圖 1 空間垃圾桶模式示意圖

Fig. 1. Conceptual diagram of spatial garbage can model.

解決方案、問題在特定的決策情況，決策是否會被制定，端看這五個元素的契合度。開發決策與行動決策彼此間是相輔相成的。一個成功的高速公路建設將會吸引更多旅次的活動產生，且會依次影響到高速公路沿線交流道附近的土地使用。在更基本的層面上，開發決策以及活動行為是否會發生，也要看這五個因子相遇時，是否滿足某些空間及功能上的限制條件。例如，購物活動僅能在商場發生，而休閒活動多發生在公園內。由此可知，開發決策與活動行為受到一套正式或非正式的規則及制度的限制，而這些規則便構成空間垃圾桶模式的結構限制。分區管制就是一個很好的例子。它規定了何種型式的发展是被允許的，如發展的區位與密度，且依此決定何種活動在特別的地區是不能進行的。例如，在住宅區內，公寓或類似的設施只能建造作為居住性的用途，而禁止其他用途的使用。

對於都市發展的過程有了這樣簡化的概念及想法後，在空間垃圾桶模型呈現的模擬，主要是建立在某種推測上，此推測是把城市當作是一種混亂的組織，在某些有規則的結構限制中，透過無法預測的方式，凌亂且緩慢地結合了五種元素的契合度，產生出決策的結果。而這五種元素就像五道河水，有時候各自流動，互不相干，有時又會形成交集。換句話說，什麼問題會浮上檯面，成為熱門的議題，然後定下一個決策來試圖解決（只能說是試圖解決，因為，有時候問題是解決了，有時候問題並沒有解決，有時候則解決了一部分問題，但又衍生出另外一些問題），就看這五種力量的消長和互動。圖 2 為空間垃圾桶模型模擬圖，五種個體在虛擬的空間上隨機移動，箭頭表示該個體可能之移動方向。



資料來源：Lai (2006)。

說明：DM：決策者；IS：問題；CH：決策情況；SO：解決方案；LO：區位。

圖 2 空間垃圾桶模型模擬圖

Fig. 2. Simulation diagram of spatial garbage can model.

結構限制表示元素間的關係共有四種：通道結構 (access structure)、決策結構 (decision structure)、解決方案結構 (solution structure) 以及空間結構 (spatial structure)。通道結構說明哪些問題可以在哪些決策情況中討論；決策結構限制決策者可參與的決策情況；解決方案結構說明哪些方案可以在哪些決策情況中討論；空間結構則規範決策情況與區位間的關係。這些結構以 0-1 矩陣表示；0 表示行列元素不能同時存在，1 則可。

在 SGCM 的模擬結果中發現，只有通道結構對總淨能量有顯著影響。換句話說，規劃上制度結構的改變較實質設計上來的有效率。舉例來說，要創造新都市主義所提倡的可步行社區 (walkable communities)，增加社會資本的制度結構設計會比實質設計更有效率。我們應該增加社會的公平性，不是僅僅提供相等的街道可及性，而是應該透過管制分配相等的路權給每個人，如此就可以獲得相同的步行權利，且會使每個人到設施的可及性也平均分配。

空間垃圾桶模型的結構限制是以垃圾桶模型為基礎，雖然增加了兩種結構限制，但也無法完全將現實都市模擬。最大的因素在於模擬中的結構限制是外生給定的，其認為通道結構與決策結構可視為在結構制度下的權利分配，因為結構限制代表的是決策者對於問題以及選擇機會的接觸權限。因此在 SGCM 一文中認為若不設定結構限制，而讓其元素自由碰撞，結構限制應會隨著系統發展下湧現，如同制度在都市發展下湧現一般，此正為本文探討的主要方向。

#### (四) 垃圾桶理論以 Agent-Based Modeling 之改寫

空間垃圾桶模型是以垃圾桶模式為主體所提出，而原始垃圾桶模型所探討的是組織的決策模式，因此，以 ABM 改寫更可貼近於真實世界之決策情形。Fioretti and Lomi (2008) 將垃圾桶模式以 ABM 改寫，將垃圾桶模型的四個元素設定為四種不同的 agent，在網格上隨機移動，每一網格代表的是一個組織，最後發現系統有湧現的現象。文中最後提到模擬尚缺乏之處，包含了可以將參與者決策更加的貼近現實，如決策行為的路徑化 (routinisation)、穩定化 (stabilisation) 及差異性 (differentiation)，甚至是使參與者有記憶，對未來有著學習及搜尋策略。Troitzsch (2008) 則以垃圾桶模型為概念，但將其簡化，將參與者以「工作者」代替，能量值以「技巧」代替，不同的技巧對應不同的問題，而工作者會依照自身之技巧去搜尋問題解決。上述研究可說是將垃圾桶模式改寫為一人工社會 (artificial society) 系統。

人工社會研究起於人工生命 (artificial life)，人工生命的研究側重生命系統的過程特性，如自我組織、合作、湧現、學習和進化等等。而「人工社會」是人工生命的延伸。社會本身是一個人造和主要由人組成的系統，是一個客觀的事實，而人又是社會的產物。因此，將人工生命的思想擴充到人工社會，可以用來研究社會自身的生命力、發展動力及其相關現象，以個體行為的局部微觀模型產生社會的整體宏觀規律。在《*Growing Artificial Societies: Social Science From the Bottom Up*》(Epstein and Axtell 1996) 一書中，人工社會的研究開始展開。其作者便是採用 ABM 來打破學科界線，從生死、性別、文化、衝突、經濟、政治等各種活動與現象的動態下手，綜合地由個體的行為模型開始分析社會結構和群體規律 (王飛躍、史蒂夫·蘭森 2004)。

人工社會是對真實世界的縮影，若應用於電腦模擬研究上，特點是可以設定不同之情境，並可重複模擬，以產生大量資料以供分析，故不同於純演繹法的偏重於定理的證明。此外，電腦模擬有一定

的邏輯架構作依循，故又不似純歸納法的主觀論述。其次，傳統的數理演繹適合用來描述簡單現象；對於複雜現象的闡述，有其侷限性。因此，針對此數學的侷限性，學界發展出了實驗數學 (experimental mathematics) 的領域。而電腦模擬便可視為是實驗數學的主要研究方法之一 (賴世剛 2006)。

## (五) 小結

都市毫無疑問的是個複雜系統，其發展是動態的、複雜的，若要探討都市發展的過程，以傳統的數學模式去詮釋有其困難性，因為必須處理龐大種類及數量的個體，以及動態的變化性。因此當複雜理論興起時，面對都市發展的議題似乎找到了另一種方法。近年來 ABM 對於都市發展相關議題之研究越來越熱烈，因為其更能貼近現實的都市現象，且這些研究也發現，模擬中與現實都市一樣，皆擁有湧現及自我組織的現象，雖無法完全的將都市建模 (modeling)，但卻彌補了傳統數理方法的缺失，如無法處理多種個體之間的互動等。

ABM 大多將都市中顯在的實體當作是行為者，在虛擬的空間上依照設計者的規則任意遊走，與其他個體互動並制定決策，並影響著空間演變，但對於觸摸不到的實體 (intangible entities)，如決策情況，或是決策機會卻較少提及。而空間垃圾桶模型正是以一種概念性的模型，將決策情況視為都市發展決策重要的因子，不同的結構限制 (分別代表制度與空間) 探討都市的發展。但空間垃圾桶模型之結構限制為初始外生給定的，是固定不變的，但真實世界中制度與空間是不斷的在改變，因此本研究以 ABM 改寫空間垃圾桶模型，將結構限制賦予給每個體，並使兩種結構限制—分別代表制度與空間—隨著時間的演進，進行具有簡單規則的轉換，使得空間垃圾桶模型近似為一人工社會，觀察此系統是否會呈現自我組織的現象，並檢驗制度與空間何者會影響都市發展。

## 模擬參數、規則與設計

本研究所提出之假說為：「在不可逆性下，具有適應性的結構限制會隨著時間而呈現自我組織的現象；以及比較制度與空間何者對於都市發展有較顯著的影響?」。而若是令所有結構限制都具有適應性，則太過於繁雜，因此，本模擬挑選兩個結構限制，分別為代表制度之決策結構，以及代表空間之空間結構，賦予兩者適應性；而通道結構和解決方案結構則是依空間垃圾桶模型中其中三種型態而設定：無分隔性 (unsegmented)、階層性 (hierarchical) 及專業性 (specialized)，不考慮隨機性的因素。

### (一) 參數設定

#### 1. 個體數量、網格數量、與模擬時間

這三項設定與空間垃圾桶之設定相同，模擬空間組成分為兩部份：網格與個體。網格部份設計為長寬各為 50 格，共 2,500 格網格。個體則有分為參與者 (決策者)、問題、解決方案、選擇機會與區位五種不同類型個體。

初始給定系統 500 個決策者及 500 個區位，於模擬初始隨機散佈在系統網格上。而解決方案、問題以及選擇機會則在每一時間點 (指整體系統模擬時點) 下各加進一個進系統，共加入 500 個為止。共模擬 20,000 個時間點。

## 2. 個體所帶之能量值

在 SGCM 中，每個個體皆帶有能量值，此能量值代表的是制定出決策所需耗費的各種成本，因此，能量值有著正負號的差別：符號為正代表是供給了決策制定所需的資源技術；符號為負則表示決策制定所需的成本。為方便比較起見並參考原始垃圾桶電腦模擬參數設定的邏輯 (Cohen, March, and Olsen 1972)，在本模擬中，能量值的設定則沿用 SGCM 之設定，參與者為 0.55、區位為 2.55、解決方案為介於 0~1 的隨機數；選擇機會與問題皆為-1.1。這些參數值可表示效用 (utility)，其雖無穩固的實證量測基礎，但表達了元素間特質的相對差異性，就某個程度而言，反應了真實性，且應不致於影響模擬所得到的結論。例如，區位是決策制定的重要因素，其影響效果一般而言較參與者為大。以土地開發為例，地段往往決定不動產投資案的成敗。而問題負效用 (如交通擁擠) 則介於兩者之間。

## 3. 個體所帶之屬性

除了能量值外，每個個體進入此系統時，皆會帶屬於自己的「身分證號」(以下以 ID 表示)，以誕生的順序來給定，但每種個體分開計算。例如第 10 個誕生的參與者其身分證號為 10，第 10 個誕生的選擇機會其身分證號亦編為 10，但兩者不同而不會重複計算。ID 的用意為表達結構限制之方式，後面將會詳述是如何應用。選擇機會除了上述 ID 與能量值之外，還另外帶有三種屬性：分別是決策結構序列、空間結構序列以及是否制定過決策。決策結構序列與空間結構序列，分別以長度為 500 的 0-1 表列表示，初始以隨機分配，也就是 0 或 1 出現的機率各為 0.5，表示無序的狀態，爾後隨著時間的演進，我們可觀察到這些序列是否會湧現出有序的 0-1 排列。而是否制定決策則以 0 或 1 表示，0 代表未制定過決策；1 則表示制定過決策。

## (二) 結構限制與移動規則

SGCM 中結構限制的作用如下：當一網格上有五種個體相遇，若此網格上所有個體相加之總能量值為正值，則再依結構限制之元素決定決策是否能夠制定，若為 0，則決策無法制定，若為 1，決策被制定。在本模擬中，將結構限制以個體的移動規則來表示，原本之結構限制為 0，代表對應之兩種個體不能制定出決策，在本模擬中則是使特定兩種個體無法接觸，進而無法制定出決策，使個體更符合 ABM 之特性。

### 1. 通道結構決定問題與選擇機會的移動規則

#### (1) 無分隔性

無分隔性移動規則為完全不受限，任一問題與任一選擇機會皆可碰撞。

#### (2) 階層性

階層性則是指重要的問題比不重要的問題可以進入更多的選擇機會中，換句話說，階層較高的問題可以碰觸到階層較低的選擇機會，選擇機會無法碰觸到比自己階層高的問題。而此規則利用個體所擁有的 ID 來實現，問題在移動之前，會搜尋自己所在網格周遭一格內是否有選擇機會存在，若沒有，則隨機移動一格，但若有選擇機會，則會比較自身 ID 與選擇機會之 ID，若選擇機會 ID 較大，則可移動；若有一個選擇機會 ID 較自身 ID 小，則此時間點停止不動；而選擇機會亦然，判斷規則也相同，若自身 ID 較問題 ID 大，則可以移動，若有一個問題 ID 較自身 ID 大，則此時間點停止不動。

#### (3) 專業性

專業性則是單一選擇機會只能與特定的問題產生碰撞，是一對一的關係，因此判斷規則為，若問題自身 ID 等於選擇機會 ID，則可移動，若不相同，則此時間停止不動；選擇機會與問題之判斷規則相同。

2. 解決方案結構決定解決方案與問題的移動規則與前述通道結構移動規則類似，故不再贅述。

3. 決策結構決定決策者與選擇機會的移動規則

選擇機會中決策結構序列中的元素順序對應的就是參與者的 ID。當參與者移動前，會搜尋周圍一格內是否有選擇機會，若沒有，則隨機移動一格，若有選擇機會，則會搜尋其序列所對應之元素，若為 1 則可移動，若為 0 則此時間停止移動一格；選擇機會則無此限制，此原因為還是讓原本無法制定決策的情形有機會可以制定出決策，代表制度變遷中偶發性的事件。

4. 空間結構決定區位與選擇機會的移動規則與前述決策結構移動規則類似，故不再贅述。值得一提的是，區位由於其本身的不可消滅性，故在決策制定後仍保留在系統中。

### (三) 決策制定規則

制定出決策的種類有兩種，除了 SGCM 中的決策，還引入了垃圾桶模型決策種類之無意義決定 (oversight)，原因為適應性的轉變其中之一便是需要有效率的轉變，而無意義決定與 SGCM 中的決策差別在於，SGCM 之決策是五種個體需都在同一網格上，且其餘條件成立，才能制定出決策；而無意義決定則是不需要問題，也就是說，除了問題之外的其他個體在同一網格上，且其餘條件成立，就會制定出無意義決定，換言之，此種在決策中問題並沒有被解決的情況，可視為是較無效率之決策。而 SGCM 之決策在本模擬中則稱之為問題解決 (resolution)。

決策制定與否由網格來判定，在每一時間點，系統內每個網格皆會作判定，其規則如圖 3：

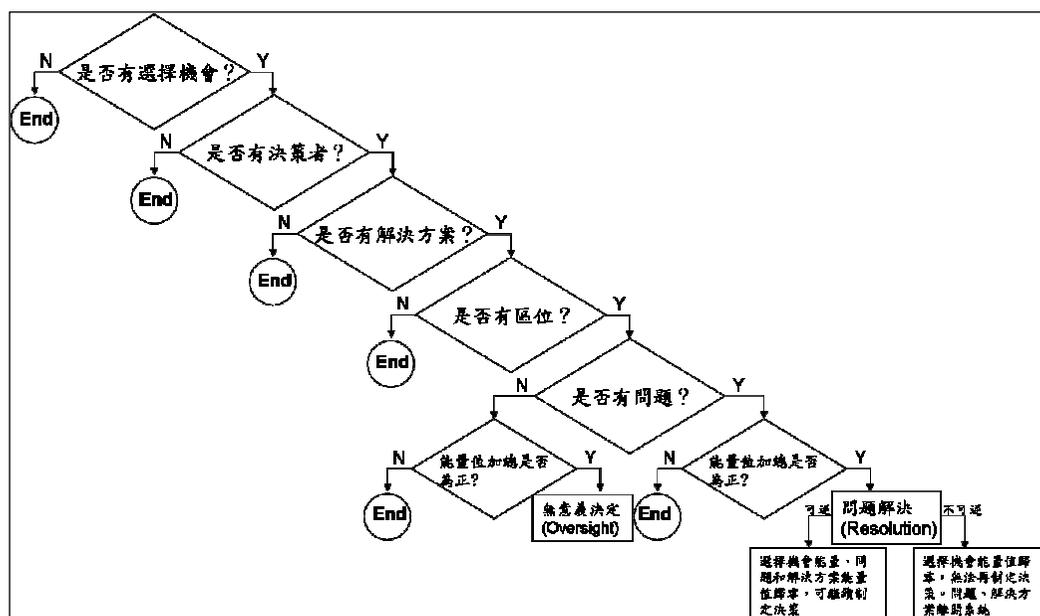


圖 3 決策制定流程圖

Fig. 3. Flow chart of decision making.

1. 如果至少有一個決策者，至少有一個機會，至少有一個解決方案及一個區位上在同一個網格上，如果沒有問題已經存在，且此網格上所有個體之總能量值為正，則產生無意義決定 (oversight)。如果是有多數參與者，所有這些參與者都參與。如果有多數機會在同一方格上，隨機挑選一機會參與決策。如果有數個解決方案及數個區位是在同一方格上，其中一個解決方案及一個區位隨機被挑選參與決策。

2. 如果至少有一個決策者，至少有一個機會，至少有一個解決辦法，並至少有一個問題，且至少一區位，發現自己在同一方格上，且此網格上所有個體之總能量值為正，則產生問題解決。

3. 制定出決策後，決策者、區位及選擇機會留在系統內，而問題及解決方案則被拋出系統外。此外，選擇機會之能量值會歸零，並給予標記，使其不可再次參與決策，用以計算熵值 (詳述如後)。

#### (四) 可逆性

本研究所指之不可逆性指的是空間的不可逆性以及制度變換的不可逆性。空間的不可逆性是指 Hopkins (2001) 所提出之都市發展之四個 I<sup>6</sup> 的其中之一，也就是決策的不可逆性 (Irreversibility)。

意即，當決策被制定時，會直接的落實在空間上，且一旦實行之後，無法不花費顯著的成本恢復成原來的樣子，換言之，都市發展的決策創造出一種真實紋理的慣性 (Hoch 2007)。

制度變換的不可逆性，則是由於制度的變遷並不是經常的，亦非常規，因為制度的變遷意味著成本高昂以及相應的困難度，因此只有在短暫的危機或關鍵性干預而得以突出，隨後便是長時間的穩定狀態或形成路徑依賴 (薛曉源、陳家剛 2007)。因此，本研究將制度變遷可逆的成本視為非常顯著，顯著到可逆幾乎是不可能的，此為制度變換的不可逆性。

可逆性指的是決策的可逆性以及制度變換的可逆性，因此，可逆性的設計必須同時考慮兩者。將可逆性的設計用以改變選擇機會的規則最為適當，因為其同時擁有了結構限制及決策所需個體的兩種因子。前已論述過，在真實世界中，若要改變制度，或是對已建設之空間回復先前的狀態，都必須付出龐大的代價，也就是有著不可逆性。因此，本研究之不可逆性是建立在若要將原有的制度，或是已實行的規劃回復到先前的狀態，其成本過大，而導致不可逆性；而可逆性則是在不考慮回復的成本，即可以任意回復原有的狀態 (當然也可以再次制定決策)，也就是結構限制中 0 與 1 的互換次數並無限制，端看選擇機會是否參與決策以及是否制定出決策。以下將不可逆性與可逆性模擬作介紹：

##### 1. 不可逆性

為了實現不可逆性，即當某一選擇機會制定出決策後，結構限制矩陣中所對應行列元素的值就固定下來，因此本應讓選擇機會制定出決策後就被拋出系統，但如此一來無法計算系統內的決策結構與空間結構之熵值。因此選擇機會制定決策後，使其帶有一「標記」，而若擁有此標記，則無法再次參與決策。

##### 2. 可逆性

可逆性則是指個體可以重複的制定決策，亦即制定出決策後，所有個體皆不被拋出系統外，可繼續於系統內制定決策。

#### (五) 適應性

本研究的假說認為，SGCM 之結構限制在可變動的機制下，系統會產生自我組織的現象，而其變動的機制必須是要有目的，而非隨機的變動。因此，本研究的假設為：於都市中的個體希望追求本身制定決策的效率，換言之，個體會傾向制定出有效率之決策，進而改變系統的結構限制，使其更有效率。也就是說，制度是具適應性的。所謂制度的適應性，是指 North (1998) 所提出之「適應性效率」(adaptive efficiency)，即社會隨時間演進而產生的各種規則。該論述包含兩個重點，一是制度的適應性是透過決策的制定而改變，二為個體具有學習、適應之能力，以提升本身之效率，而本研究將以這兩種概念加以簡化並融入 SGCM 之結構限制的改變機制中。

因此，結構限制適應性的改變必須藉由決策的制定來決定其改變的規則，其次，若結構限制經過改變，此改變會影響該個體再次制定決策的規則，即學習、適應的概念。結構限制的改變規則如下：

1. 若五種個體在同一網格上且能量值加總為正（即制定出問題解決），則區位 ID 所對應之元素變為 1（若原為 1 則保持不變）。其意涵為當制定出問題解決時，代表的是制定出有效率的決策，因此下次參與者或區位再遇到選擇機會時，可以碰觸到該選擇機會，使得制定出問題解決決策的機率較高。

2. 若任一區位制定出無意義決定，或是五種個體在一網格上，但能量值加總為負值，則參與者 ID 所對應元素變為 0（若原為 0 則保持不變）。其意涵為當制定出無意義決定，或是有機會制定出問題解決，但卻沒有制定時，代表的是沒有效率的決策，因此參與者或區位再次遇到該選擇機會時，將選擇不碰觸，以提高決策效率。

上述規則描述出，若是結構限制具適應性，代表參與者與區位具備有學習及適應的能力。當參與者與區位制定的決策越多時，所累積之「記憶」也隨之增多，因此，應是會更有效率的制定出決策。

## (六) 系統紀錄方式

在模擬程式中紀錄三種數值動態的趨勢圖，分別為每一時間點之系統能量值、決策結構與空間結構個別之熵值以及無意義與問題解決決策的數量。系統內的總能量值計算方式為將系統內所有個體所帶之能量值加總，並於每一個模擬時間點紀錄。

除了檢視系統內總能量值來觀察系統是否會呈現穩定現象外，本研究希望以訊息熵 (information entropy) 來量測決策結構與空間結構的秩序性，以觀察兩者之穩定度。最早提出熵的學者為 Hartley (引自葉季栩 2003)，而後 Shannon (1949) 加以修改，定義試驗的熵值表是為一試驗的平均隨機性，數值越大代表該試驗的結果越不易猜測。熵值係根據決策結構與空間結構矩陣中的 0-1 序列依下列公式計算：

假設  $x$  代表一個隨機變數 (random variable)  $X$  所可能發生的狀態，又假設各個狀態  $x$  發生的機率為  $P(x)$ 。熵值越低代表系統內的秩序性越高。 $X$  的熵  $H(X)$  算式如下：

$$H(X) \equiv -\sum_x P(x) \log_2 [P(x)]$$

其中  $P(x)$  的隨機初始值為 0.5。

訊息熵代表的是系統混亂的程度，其值是小於 0 的負值，值越大代表系統越混亂，因此在本研究中，熵值的意義所代表的是事件的驚奇度，原始給予序列中 0 與 1 的機率各是 0.5，也就是依照機率，序列中 0 與 1 的數量應是相同的，熵值代表的就是序列中 0 較多（相對來說，就是 1 較少）或是 0 較少（相對來說，就是 1 較多）的比例。進一步說，序列中 0 與 1 的總數是相等的，因此計算上可藉由計算序列中 0 的數量再減去 1 的數量，再取絕對值，如此就可計算出序列中 0 與 1 失衡的比例。這種

失衡若逐漸增加就是表示系統秩序性越高，相反的，若是這種失衡的比例能夠維持在一定範圍，那便可以說此系統是有秩序性。自我組織的表現便是從無秩序到有秩序的過程，若是此系統的兩種結構限制之熵值最後呈現收斂至較低值之現象，則可稱為是自我組織的。

### (七) 模擬設計

決策結構與空間結構的熵值動態紀錄於模擬系統中利用圖表顯示，因此，藉由觀察圖表是否有遞減現象便可知結構限制是否趨近於穩定。檢定決策結構與空間結構對於總能量值的影響，則是參考 SGCM 對於結構限制的檢定方法，但與之不同的是，SGCM 之四種結構限制形式種類相同（即四種結構限制皆有相同的四種類型），因此採用希臘－拉丁方格設計，再作 ANOVA 檢定。但是本研究在結構限制的設定上，通道結構與解決方案結構具有相同的三種形式（無分隔性、階層性及專業性），而決策結構與空間結構則是具有與前兩種結構限制不同的兩種形式（有適應性及無適應性），換言之，檢定決策結構與空間結構的影響，無法使用拉丁方格設計。但若以原始 36 種組合對四種結構限制做 ANOVA 檢定，將無法看出決策結構與空間結構對能量值的影響，因為通道結構與解決方案結構的三種形式對於總能量值的影響過於顯著，因此將通道結構與解決方案結構組合中分為兩組，分組方式則依通道結構與解決方案結構之組合中對於個體移動規則之約束性，也就是系統內秩序性的高低區分，若通道結構與解決方案結構的組合為：無分隔性 / 無分隔性、無分隔性 / 階層性、階層性 / 無分隔性、階層性 / 階層性則為秩序性低之組合，而剩餘之組合則為秩序性高之組合。

組別分為兩組，第一組為秩序性低，第二組為秩序性高，再使每組分別以決策結構與空間結構為自變數，總能量值為依變數，進行 ANOVA 檢定，以排除通道結構與解決方案結構對總能量值的影響。分組種類如表 1。

表 1 結構限制分組表

Table 1. Grouping of structural constraints.

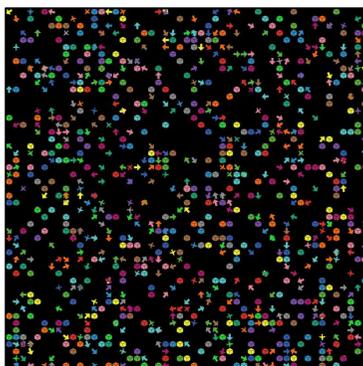
| 通道結構 | 解決方案結構 | 決策結構 | 空間結構 | 組別 |
|------|--------|------|------|----|
| 無分隔性 | 無分隔性   | 無適應性 | 無適應性 | 1  |
| 階層性  | 階層性    | 有適應性 | 有適應性 |    |
| 無分隔性 | 專業性    | 無適應性 | 無適應性 | 2  |
| 階層性  |        | 有適應性 | 有適應性 |    |
| 專業性  | 無分隔性   | 無適應性 | 無適應性 |    |
|      | 階層性    | 有適應性 | 有適應性 |    |
|      | 專業性    |      |      |    |

## 模擬結果

本研究在 NetLogo 4.0.3 平台上於個人電腦自行撰寫程式展開前述模擬設計。NetLogo 為建立 ABM 的軟體之一，以 Java 程式語言開發而成，已被廣泛使用於複雜的人工或自然現象的模擬。NetLogo 系

統由三大部份組成模擬空間，分別是觀察者 (observer)、個體 (turtles) 以及網格 (patches)。觀察者即是系統程式的使用者，可以操作網格及個體的系統變數，設計個體與個體、個體與網格以及網格與網格之間的互動。網格和個體則組成了系統的模擬空間，網格為可調整大小之方形，座標原點 (0,0) 於正中央。網格可在每個時間點同時變化，與 CA 的細胞 (cell) 概念類似。個體即是 agent，可在網格環境中在觀察者的允許下自由移動。個體依模擬的需要可設定為不同的種類，所有個體可在每個時間點同時做出反應。而個體及網格藉由簡單的規則互動出複雜的結果。圖 4 為模擬介面範例，其中 (a) 為模擬圖形進行的呈現，不同顏色及符號代表五種元素在網格中的移動，而 (b) 則可從按鈕中從事參數的選擇。

(a) 圖形介面



(b) 控制介面

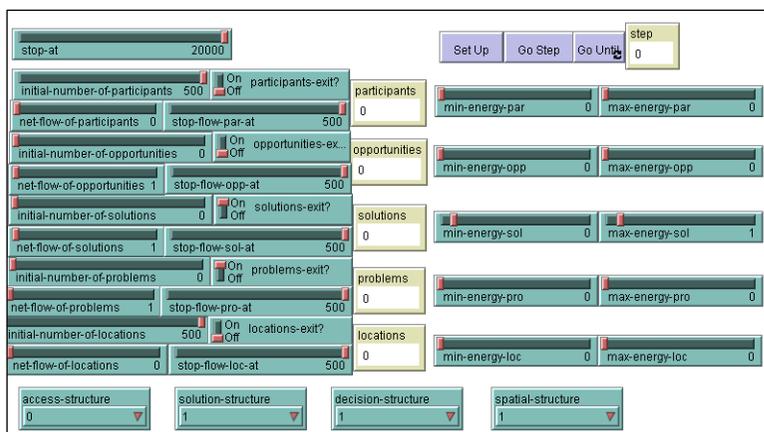


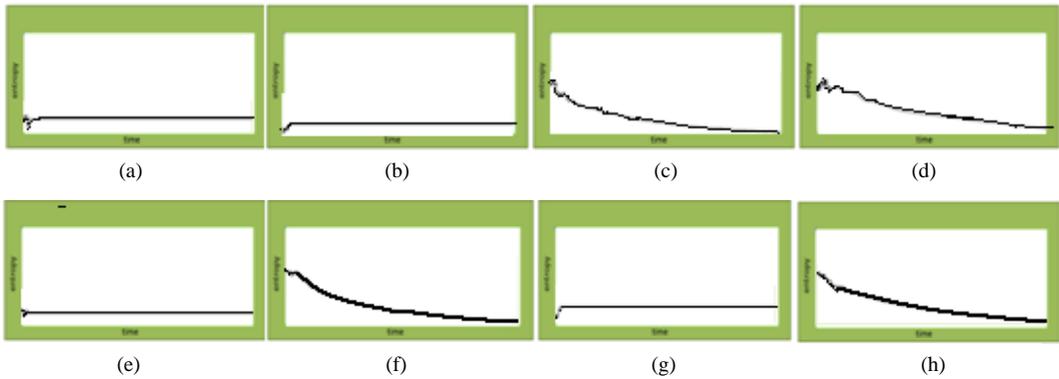
圖 4 模擬介面範例

Fig. 4. Example of simulation interface.

### (一) 決策結構與空間結構熵值

如圖 5 所示，決策結構與空間結構兩者在有適應性的情形，熵值會呈現遞減的現象，且這種現象，是超出通道結構與解決方案結構的組合限制之外，亦即，無論通道結構與解決方案結構的組合為何，熵值遞減的現象皆存在。

這種現象代表著系統內決策結構與空間結構中的 0 與 1 的比例自模擬開始後，便不是呈現 1:1，雖無法知道兩種結構限制中 0 與 1 兩種元素的實際比例為何，但可以確定的是，隨著模擬時間的增加，這兩種元素的比例會越趨失衡，不再維持 1:1 的比例。前 500 個時間點熵值呈現快速減少的現象，因為選擇機會為前 500 個模擬時間點陸續加入，因此熵值呈現快速減少，而 500 個時間點之後，隨著系統內無意義決定與問題解決的數量隨之增加，而所帶來的改變是：決策結構與空間結構中 0 與 1 的數量改變，在模擬中，無意義決定的數量較問題解決多，亦即 0 的數量會較 1 來的多，因此，決策結構與空間結構之熵值皆會呈現遞減的現象。此現象表示，系統內的秩序性隨著模擬時間的增加，是越趨有序的，因此，依照此結果，系統具有自我組織的現象。當結構限制具適應性時，熵值呈現遞減的現象，而這種現象是超出通道結構與解決方案結構以及可逆性限制之外。圖 5 為取在不可逆性下，通道結構與解決方案結構分別為（無分隔性、無分隔性）；決策結構與空間結構之組合為（無適應性，無適應性）((a)、(e))、（無適應性，有適應性）((b)、(f))、（有適應性，無適應性）((c)、(g))、（有適應性，有適應性）((d)、(h)) 四種組合。



說明：x 軸為模擬時點；y 軸為熵值。上圖 ((a)、(b)、(c)、(d)) 為決策結構，下圖 ((e)、(f)、(g)、(h)) 為空間結構，由左而右共 4 種組合。

圖 5 不可逆性下決策結構與空間結構熵值

Fig. 5. Entropy values of decision and spatial structures under irreversibility.

## (二) 決策結構與空間結構對總能量值之影響

模擬設計中依秩序性高低將不同的結構限制組合分為兩組，而又將模擬分為不可逆性與可逆性兩種情形，以下分別說明結果。

### 1. 不可逆性

在不可逆性中，第 1 組（低秩序性）決策結構與空間結構兩者對於總能量值皆無顯著影響，且決策結構與空間結構兩者之間並無顯著交互作用。而在第 2 組的檢定（參見表 2），因最後一組合（通道結構為專業性、解決方案為專業性）似乎規則過於嚴格，導致在決策結構與空間結構的四種組合中幾無決策制定，因此做因子檢定時，將此組合排除在外，以增加精確度。而檢定的結果發現，決策結構與空間結構皆不顯著，但兩者之間的交互作用顯著，顯示決策結構與空間結構是否會影響總能量值並

不可由此結果推定，必須再做兩個因子的單純主要效果比較。結果顯示無論空間結構是否有適應性，決策結構皆對總能量值無顯著影響；空間結構則在決策結構有適應性的情形下對總能量值無顯著影響，但是在決策結構無適應性的情形下，空間結構對於系統的總能量值是有顯著的影響（參見表 3）。

表 2 不可逆性第 2 組兩種結構限制檢定表

Table 2. The ANOVA table of two structural constraints for the second group under irreversibility.

| 依變數：總能量     |             |     |         |        |       |
|-------------|-------------|-----|---------|--------|-------|
| 來源          | 平方和         | 自由度 | 平均平方和   | F      | 顯著性   |
| 決策結構        | 2.184       | 1   | 2.184   | .119   | .736  |
| 空間結構        | 1.820       | 1   | 1.820   | .099   | .758  |
| 決策結構 x 空間結構 | 200.946     | 1   | 200.946 | 10.961 | .006* |
| 誤差          | 219.993     | 12  | 18.333  |        |       |
| 總數          | 8209042.514 | 16  |         |        |       |

註：\*表示在  $\alpha=0.05$  時顯著。

表 3 不可逆性下決策結構為無適應性的空間結構檢定表

Table 3. The ANOVA table of decision structure (non-adaptive) under irreversibility.

| 依變數：總能量 |         |     |         |        |       |
|---------|---------|-----|---------|--------|-------|
|         | 平方和     | 自由度 | 平均平方和   | F      | 顯著性   |
| 組間      | 120.509 | 1   | 120.509 | 11.596 | .014* |
| 組內      | 62.353  | 6   | 10.392  |        |       |
| 總和      | 182.862 | 7   |         |        |       |

註：\*表示在  $\alpha=0.05$  時顯著。

因此，從而可推論出，在決策不可逆的前提，在結構限制秩序性較低的狀況下，決策結構與空間結構兩者皆沒有對總能量值有顯著的影響。其原因可能為因秩序性較低，而使得系統內制定出決策的機率變高，因而雖然決策結構與空間結構限制了部份決策者與區位的移動性，但不足以影響系統內制定決策的數量。但當系統內秩序性提高時，雖然單看決策結構或是空間結構並不對總能量值產生影響，但經檢定後發現空間結構在決策結構沒有適應性的情形下，對能量值有影響，亦即在秩序性高的情形之下，制度限制與空間限制會相互影響，進而影響能量值，而兩者之間決定性的因素在於制度的結構限制，而此結果也與空間垃圾桶模式的結果近似。

另外，若是觀察結構限制的組合與系統制定出問題解決的數量，會發現在不可逆的前提，低秩序性的情形下，決策結構與空間結構的有無，也會影響決策的數量，兩者在有適應性的情形下，皆會減

少決策制定的數量，但有適應性之決策結構減少決策的數量低於有適應性之空間結構所減少的問題解決數量；而在高秩序性的狀況下，有適應性之空間結構幾乎都會減少問題解決數量，而有適應性的決策結構則會增加問題解決數量，且在越嚴苛的移動條件之下，此狀況越為明顯。直覺上，若決策結構與空間結構擁有適應性，系統所制定出問題解決的數量應會下降，前面已提到決策結構與空間結構若有適應性，會隨著模擬時間的增加而熵值下降，也就是代表秩序性的提昇。秩序性的提昇代表的就是有越多的決策者或區位會受到選擇機會限制其移動，因此能制定出問題解決的機率應是降低的。但是決策結構卻與之相反，在有適應性，且秩序性高的情形下，對於系統制定出問題解決的數量有正面的影響。以此結果，或許可以假設在此種適應性下，決策結構在秩序性高的情形對於決策的制定有正面的影響。

## 2. 可逆性

在決策是可逆的情形下，在第 1 組與第 2 組之中，決策結構與空間結構皆不對總能量值產生顯著影響 ( $p$  值分別為 0.971 及 0.928 (第 1 組) 以及 0.912 及 0.207 (第 2 組))，兩者之間也沒有顯著的交互關係 ( $p$  值為 0.992 (第 1 組) 及 0.522 (第 2 組))。換言之，無論是在低秩序性或高秩序性的情況下，決策結構與空間結構兩者都不影響總能量值。若觀察決策結構與空間結構的適應性對於系統制定出問題解決的數量，會發現在秩序性高的情形下，與決策不可逆性一樣，也就是當決策結構或空間結構有適應性時，會降低系統制定出問題解決的數量，而決策結構所帶來的影響依然較空間結構少；但是在高秩序性的情況下，決策結構與空間結構的適應性幾乎不會影響問題解決制定的數量。

### (三) 決策結構與空間結構之解決問題效率及相對自我組織性

由前兩節之模擬結果，可判定此系統具有自我組織性，但此系統依然有其餘特性是值得探討，如決策結構與空間結構之解決問題效率以及兩者的相對自我組織性，這兩種特性呈現出一種規律，說明如下。

#### 1. 決策結構與空間結構解決問題效率

模擬結果發現在通道結構與解決方案結構組合相同的情形之下，若比較決策結構有適應性、空間結構無適應性，以及決策結構無適應性、空間結構有適應性這兩種組合，會發現決策結構有適應性、空間結構無適應性這種組合所產生的問題解決數量大部分是較多的，在不可逆的情形下，差距還不是很大，但若是系統是可逆的情形，因制定決策的機率不隨著模擬時間的增加而變低，因此制定出問題解決的數量也增加許多，因此兩者之間的差距也越趨明顯。決策結構與空間結構之適應性定義相同，但最後模擬結果，在問題解決效率上，卻是決策結構的適應性較空間結構的適應性的效果為佳，這或許可解釋 SGCM 的模擬結果中，認為在都市發展中，制度設計較空間設計來的有效率之觀點。

#### 2. 決策結構與空間結構相對自我組織性

在結構限制的熵值有正負號的意義時，通道結構與解決方案結構組合相同的情形下，比較決策結構有適應性、空間結構無適應性，以及決策結構無適應性、空間結構有適應性這兩種組合，以及兩者皆具有適應性的情形下，皆可發現空間結構的熵值皆低於決策結構，由此結果可之，空間結構所呈現的自我組織特性較決策結構相對來的顯著。

## 結 論

都市是無疑是個自我組織系統，都市發展存在著某種規律，使都市呈現秩序性，這種秩序性展現於都市的各項特徵，如空間結構、人口數等。近來對於都市的自我組織研究也大多以此為主，認為都市的形成與發展是從一個（或多個）樞紐點，無論是軍事要地、商業重心亦或是交通的樞紐點。一旦此樞紐點確定，便開始都市結構的演化，而在演化過程中受到了政治、經濟、文化影響，而在型態上呈現了碎形，也就是有著自我組織性。而這種現象，有許多不同的解釋。而這些研究，都著重在空間結構上的探討，但是對於其自我組織的機制，卻沒有統一的解釋。

因此本研究將都市視為一整體，不去探討內部各種不同影響都市發展之作用力，而是聚焦於「限制」這些作用力之結構，也就是制度對於都市發展的影響，以及各種決策制定的過程。而 SGCM 正是探討這些結構限制對都市發展的概念性模型，因此本研究以 ABM 改寫空間垃圾桶模型，並將適應性概念加入結構限制，最後有下列發現：

一、利用訊息熵的計算發現，熵值呈現遞減現象，也就是系統確實呈現自我組織之現象。

二、在解決問題的效率上，決策結構具適應性較空間結構具適應性來的高

模擬結果發現決策結構在解決問題的效率上較空間結構來的好，意即在都市發展上，制度設計比空間設計還來的有效率，而此觀點也與 SGCM 的模擬結果是符合的。

三、空間結構之熵值較決策結構熵值低

模擬結果發現，在通道結構與解決方案結構組合相同之下，若結構限制具適應性，空間結構熵值會較決策結構熵值來的低，意即空間結構的相對自我組織性較決策結構來的高，這或許可以解釋目前對於都市的自我組織為何大多著重於空間的形態，由模擬結果可知，空間結構的秩序性較為明顯，相對於制度，更可被察覺出其自我組織的特性。

四、都市發展中制度會影響空間，進而影響都市發展，對於都市規劃應可有不同的角度去研究。

現今國內對於都市規劃的思潮，幾乎都以空間為導向，較輕視制度對於都市發展的影響力，因此，根據此結果，在都市發展的過程中，制度與空間是相互影響的，若是只顧及制度或是只顧及空間的規劃對於都市發展是較沒有效率的，應該兩者兼顧，才能對都市規劃有更好的效果。

任何模式的建立皆因簡化而受到限制，本研究亦不例外。尤其是，不可逆性與可逆性的假設導致全然不同的結果，值得深入探討。可能的解釋是，不可逆性隱喻著較封閉的系統，而可逆性可能表達一種較開放的系統。然而，都市無疑地是開放系統，而未來將此系統建立為更開放的系統，以檢視本文發現的韌性 (robustness)，似乎是一值得的嘗試。

## 謝 辭

作者感謝國家科學委員會對本研究的資助（計畫編號：NSC97-2410-H-305-064-MY2）以及兩位匿名評審寶貴的意見。

## 註 解

1. 自我組織指一種有序結構自發的形成，及維持及演化的過程，即在沒有特定外部干預下由系統內部組成單元相互作用而自行由無秩序到有秩序，從低層級秩序到高層級秩序的一種演化過程。
2. 公式為  $R(x) = ax^{-b}$  其中， $x$  為規模， $R(x)$  為其名次（第 1 名的規模最大）， $a$  為係數， $b$  為冪次，為自我組織的特性之一。
3. 大規模：臺灣本島、中山高經過都市與非經過都市；中規模：依中山高經過與否，在分北中南三區、北中南東區；小規模：臺灣本島各縣市。
4. 當中將其理論分為耗散都市 (Dissipative Cities)、協同都市 (Synergetic Cities)、混沌都市 (Chaos Cities)、碎形都市 (Fractal Cities)、細胞都市 (Cellular Cities)、沙堆都市 (Sandpile Cities) 及 FACS (free agents on a cellular space) 與 IRN (inter-representation network) 都市等。
5. 遠離均衡是一種動態平衡，指的是系統隨著時間的推移而不斷變化的原因是外部能量（或問題）的投入所造成 (Pacault and Vidal 1978)。
6. 四個 I 指的是面對不完全預見 (Imperfect foresight)、決策的相關性 (Interdependence)、不可分割性 (Indivisibility) 與不可逆性 (Irreversibility)。

## 引用文獻

- 王飛躍、史蒂夫·蘭森 [Wang, F. Y., and L. Steve] 2004。從人工生命到人工社會—複雜社會系統的現狀和展望 [Cong ren gong sheng ming dao ren gong she hui—Fu za she hui xi tong de xian zhuang han zhan wang]。學會月刊 [Xue hui yue kan] 5: 42-7。
- 陳建元、游繁結、羅俊雄、陳天健、李文正 [Chen, C. Y., F. C. Yu, C. H. Loh, T. C. Chen, and W. C. Lee] 2005。細胞自動機的介紹及其在土石流災害模擬的初步應用 [Xi bao zi dong ji de jie shao ji qi zai tu shi liu zai hai mo ni de chu bu ying yong]。中華水土保持學報 [Zhong hua shui tu bao chi xue bao; Journal of Chinese Soil and Water Conservation] 36 (3): 293-300。
- 葉季栩 [Yeh, C. H.] 2003。複雜系統中規劃的作用—以細胞自動體理論為基礎的解釋 [Fu za xi tong zhong gui hua de zuo yong—Yi xi bao zi dong ti li lun wei ji chu de jie shi; Planning effectiveness in complex systems - An explanation based on cellular automata]。國立臺北大學都市計劃研究所碩士論文 [Master thesis, Graduate Institute of Urban Planning, National Taipei University, Taipei]。
- 黎夏、葉嘉安 [Li, X., and G. O. Yeh] 2005。基於神經網絡的元胞自動機及模擬複雜土地利用系統 [Ji yu shen jing wang luo de yuan bao zi dong ji ji mo ni fu za tu di li yong xi tong; Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks]。地理研究 [Di li yan jiu; Geographical Research] 24 (1): 19-27。
- 黎夏、葉嘉安、劉小平、楊青生 [Li, X., G. O. Yeh, X. P. Liu, and Q. S. Yang] 2007。地理模擬系統：元胞自動機與多智能體 [Di li mo ni xi tong: Yuan bao zi dong ji yu duo zhi neng ti]。北京 [Beijing]：科學出版社 [Science Press]。

- 賴世剛 [Lai, S. K.] (譯) 2005。Hopkins, L. D.原著。都市發展制定計畫的邏輯 [Du shi fa zhan zhi ding ji hua de luo ji; *Urban development: The logic of making plans*]。臺北 [Taipei]：五南圖書出版股份有限公司 [Wu-Nan Book Inc.]。
- 賴世剛 [Lai, S. K.] 2006。都市、複雜與規劃—理解並改善都市發展 [Du shi fu za yu gui hua: Li jie bing gai shan du shi fa zhan; *Cities, complexity and planning: Understanding and improving urban development*]。臺北 [Taipei]：詹氏書局 [Chan's Arch-Publishing Co., Ltd.]。
- 賴世剛、高宏軒 [Lai, S. K., and H. H. Gao] 2001。都市複雜空間系統自我組織臨界性之初探 [Du shi fu za kong jian xi tong zi wo zu zhi lin jie xing zhi chu tan; Self-organized criticality in urban complex spatial systems]。建築與城鄉研究學報 [Jian zhu yu cheng xiang yan jiu xue bao; *Bulletin of Environmental Studies*] 10: 31-44。
- 薛明生、賴世剛 [Xue, M. S., and S. K. Lai] 2002。人口分布自組性之時空尺度特性—臺灣本島之實證研究 [Ren kou fen bu zi zu xing zhi shi kong chi du te xing—Tai wan ben dao zhi shi zheng yan jiu; Invariability and universality of the power law of population distribution in time and space: A case study of the Taiwan island]。台灣土地研究 [Tai wan tu di yan jiu; *Journal of Taiwan Land Research*] 5: 67-86。
- 薛領、楊開忠、沈體雁 [Xue, L., K. Z. Yang, and T. Y. Shen] 2004。基於 Agent 的建模—地理計算的新發展 [Ji yu Agent de jian mo—Di li ji suan de xin fa zhan]。地球科學發展 [Di qiu ke xue fa zhan] 19 (2): 305-11。
- 薛曉源、陳家剛 [Xue, X. Y., and J. G. Chen] 2007。全球化與新制度主義 [Quan qiu hua yu xin zhi du zhu yi]。臺北 [Taipei]：五南圖書出版股份有限公司 [Wu-Nan Book Inc.]。
- Anas, A., R. Arnott, and K. A. Small. 1998. Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature* 36 (3): 1426-64.
- Batty, M. 1997. Cellular automata and urban form: A primer. *Journal of the American Planning Association* 63: 266-74.
- . 2003. Agent, cells and cities: New representational modeling for simulating multi-scale urban dynamics. Working Paper Series 65. Centre for Advanced Spatial Analysis.
- . 2005. *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based modeling, and fractals*. London: MIT Press.
- Benenson, I. 1998. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Computers, Environment and Urban Systems* 22 (1): 25-42.
- Benenson, I., I. Omer, and E. Hatna. 2002. Entity-based modeling of urban residential dynamics: The case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B: Planning and Design* 29 (4): 491-512.
- Briassoulis, H. 2008. Land-use policy and planning, theorizing, and modeling: Lost in translation, found in complexity? *Environment and Planning B: Planning and Design* 35 (1): 16-33.
- Clarke, K. C., S. Hoppen, and L. Gaydos. 1997. A self-modifying cellular automaton modeling of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24 (2):

247-61.

- Cohen, M. D., J. G. March, and J. P. Olsen. 1972. A garbage can modeling of organizational choice. *Administrative Science Quarterly* 17 (1): 1-25.
- Epstein, J. M., and R. Axtell. 1996. *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Fioretti, G., and A. Lomi. 2008. Agent-based representation of the garbage can modeling of organizational choice. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11 (1) <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/1/1.html> (last accessed 9 April 2012).
- Gardner, M. 1970. Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American* 223: 120-3.
- Hanley, P. F., and L. D. Hopkins. 2007. Do sewer extension plans affect urban development? A multiagent simulation. *Environment and Planning B: Planning and Design* 34 (1): 6-27.
- Hoch, C. 2007. Making plans: Representation and intention. *Planning Theory* 6 (1): 16-35.
- Hopkins, L. D. 2001. *Urban development: The logic of making plans*. London: Island Press.
- Krugman, P. 1996. *The self-organizing economy*. Cambridge, Massachusetts: Blackwell Publishers Inc.
- Lai, S. K. 2006. A spatial garbage-can model. *Environment and Planning B: Planning and Design* 33 (1): 379-89.
- Ligtenberg, A., A. K. Bregt, and R. van Lammeren. 2001. Multi-actor-based land use modelling: Spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning* 56 (1, 2): 21-33.
- Lotka, A. J. 1925. *Elements of physical biology*. Baltimore: Williams and Wilkins.
- North, D. C. 1998. Institutions, ideology, and economic performance. In *The revolution in development economics*, eds. J. A. Dorn, S. H. Hanke, and A. A. Walters, 95-107. Washington: Cato Institute.
- Pacault, A., and C. Vidal. 1978. *Synergetics, far from equilibrium: Proceedings of the conference far from equilibrium: Instabilities and structures*. Bordeaux, France: Springer.
- Portugali, J. 2000. *Self-organization and the city*. Berlin: Springer-Verlag.
- Shannon, C. E. 1949. Communication theory of secrecy systems. *Bell System Technical Journal* 28 (4): 656-715.
- Troitzsch, K. G. 2008. The garbage can model of organizational behaviour: A theoretical reconstruction of some of its variants. *Simulation Modelling Practice and Theory* 16 (2): 218-30.
- . 2009. Perspectives and challenges of agent-based simulation as a tool for economics and other social sciences. Paper presented at the 8<sup>th</sup> International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009), Budapest, Hungary.
- von Neumann, J. 1966. *Theory of self-reproducing automata* (edited and completed by Arthur Burks). Champaign, Illinois: University of Illinois Press.
- Wolf, T. D., and T. Holvoet. 2005. Emergence versus self-organisation: Different concepts but promising when combined. In *Engineering self organising systems: Methodologies and applications*, eds. S. A.

- Brueckner, G. D. M. Serugendo, A. Karageorgos, and R. Nagpal, 1-15. Berlin: Springer-Verlag.
- Wu, F., and C. J. Webster. 2000. Simulating artificial cities in a GIS environment: Urban growth under alternative regulation regimes. *International Journal of Geographical Information Science* 14 (7): 625-48.

2011年8月11日 收稿

2011年12月23日 修正

2012年4月9日 接受