

宮格自動機於土地利用變遷模擬之結合機制

林峰田¹ 林士弘² 李萬凱³ 孫志鴻⁴ 林建元⁵ 李培芬⁶

摘要

本研究結合宮格自動機及地理資訊系統理論，發展台北都會區之都市發展模擬系統。本研究依據八十三年國土調查資料、縣市土地使用計畫分區圖、區域計畫土地使用計畫分區圖、各年度人口調查資料、道路系統圖及縣市統計要覽等資料，以 120 公尺見方為宮格單元，建構土地使用轉移規則，以模擬民國八十七年的土地使用發展型態，並加以校估，以評估模擬成果的可信度。

關鍵字：宮格自動機、地理資訊系統、土地使用模擬模型

Abstract

This article employs theories of cellular automata and geographical information systems to develop an urban development simulation model of Taipei Metropolitan area. The simulation model uses databases, including national land use survey of 1994, land use zoning maps in study area, census data base, road system maps, and county annual statistic books. A grid system of 120 meters resolution and a set of land use transition rules are used to simulate the land use of the study area in 1998. A calibration is also performed to assess the accuracy of the simulation result.

Keywords: Cellular Automata, Geographic Information Systems, Land use simulation model

Note：本文承國科會專題補助，編號 NSC90-2621-Z-002-022，謹此致謝。

-
1. 國立臺灣大學建築與城鄉研究所所長(台大土木系及中研院資料所合聘)
 2. 國立臺灣大學土木工程所碩士
 3. 國立臺灣大學土木工程所博士候選人
 4. 國立臺灣大學建築與城鄉研究所教授
 5. 國立臺灣大學全球變遷研究中心主任
 6. 國立臺灣大學動物學系副教授

一、前言

都市的發展涵蓋了土地使用、交通運輸、公共建設、環境保育、人口、產業、社會、政治等多元面向。為了掌握此一複雜現象，城鄉研究者很早便發展出各式各樣的數理模型，分析其發展趨勢，並期能預測或模擬未來發展之情境。近年來，由於地理資訊系統(Geographical Information Systems, GIS)技術大大的增強了城鄉規劃者所需的空間資料庫以及空間分析能力；復由於電腦硬軟體及物件式程式設計的快速進步，使得大型整合式數理模型重新受到矚目。其中，美國華盛頓大學所發展的 UrbanSim (Waddel 1998 a,b,c) 是近年來相當受到重視的一個大型整合式數理模型，其主要功能在預測都市地區土地利用、基盤設施、資源利用與污染散布等現象。UrbanSim 的研發工作仍在持續進行中，其原始程式碼置於網站(<http://www.urbansim.org>)，可以公開取得，以供各界視其需要加以修改。

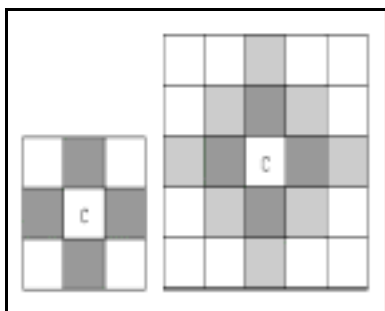
本研究係國科會 90 年度「國土規劃與土地區位之研究 - 以台北都會區為例」整合型計畫之「台北都會區都市發展模式之研究」子計畫的初期研究成果。該整合型計畫係擬引進美國 UrbanSim 的原始程式碼，依我國之實際情形加以修正，期能應用於我國國土規劃與土地區位之研究工作。本子計畫係在該整體架構之下，結合宮格自動機(Cellular Automata, CA)理論，發展一套適於台灣的都市發展土地使用空間模型。

本研究以台北盆地，淡水河流域地區為研究範圍，為了資料收集和模型驗證的方便，以行政界線做為分區，包括台北市、台北縣和基隆市。資料來源有八十三年國土調查資料、縣市土地使用計畫分區圖、區域計畫土地使用計畫分區圖、各年度人口調查資料、道路系統圖及縣市統計要覽。

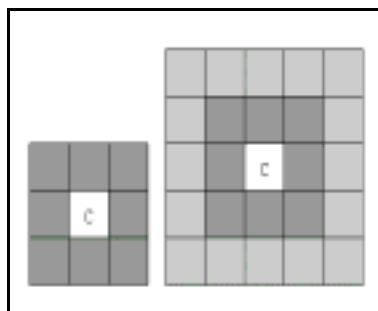
二、宮格自動機理論

宮格自動機是由 John von Neumann 所提出，最初是用來發展可以自我複製的機器，他認為由計算機的軟體給定規則後，計算機可以像生物一樣表現出生命的現象出來。之後劍橋的 John Conway 於 1970 所發表的 Game of Life，成為較有代表性的宮格自動機之一，它可借由簡單的規則表現出豐富的型態(pattern)出來，同時其複雜系統的特性也促使許多人投入相關的研究。

傳統宮格自動機的定義包括有宮格(cells)、宮格狀態(cell states)、鄰近定義(neighborhoods)、轉移規則(transition rules)等。所有活動都是在由宮格所組成的棋盤宮格上所完成。理論上宮格形狀可以是任何一種形狀(六角形、四邊型...)但一般最常見者，則為方形宮格。宮格狀態係指宮格上所儲存的值，例如宮格可以使用 1 代表宮格已配置，0 表未配置。鄰近的定義則有 Moore 型的 8 鄰近(8 connected)、Von Neumann(4 connected)的 4 鄰近、還有兩者的擴充型等等...如圖一、圖二所示。擴充型的鄰近，除了考量相接的宮格外，更以不同半徑定義不同的鄰近範圍。



圖一、Moore 型的
8 鄰近及其擴充型



圖二、Von Neumann 型
的 4 鄰近及其擴充型

轉移規則是宮格演化的動力，轉移規則會依據鄰近的狀態來轉移 t 時間的宮格狀態。宮格依據不連續(discrete)的時間，透過轉移規則同步把所有的宮格從 t 時間狀態轉移到 $t+1$ 時間狀態，其數學式如(公式1)；其中， S_t 代表 t 時的狀態， N_t 代表 t 時的鄰近範圍， TR 為轉移規則。

$$S_{t+1} = TR\{S_t, N_t\} \dots\dots\dots (公式1)$$

在國外相關研究方面，Tabler 於 1979 年首次建議使用 CA 於地理模型方面，但是此時的研究只是在理論方面，而沒有應用到實際的例子，直到 1990 年 Cecchini 和 Viola 才應用 CA 於空間模型 (spatial modeling) 的研究之上(White 2000)。近幾年由於資訊技術的進步和運算成本的降低，結合 CA 和 GIS 的模型已應用在許多實際問題上面。Roger White 和 Guy Engelen (White 1997)結合 CA 和 GIS 做為區域動態(Regional Dynamic)的模擬，這個模型最重要的地方就是它整合了區域經濟學(regional economics)、人口統計學(demographics)、和自然環境的改變等變數，然後以 St Lucia 做為模型驗證的地方，依據這個模型它可以看出氣候改變對人口和經濟之間互動的影響關係。Engelen 還結合了 CA、專家系統 (Expert System) 和知識庫系統 (Knowledge Based System) 成為一決策支援系統 (Decision Support System)，用來做為 Wadden Sea 地區的政策決定和規劃之用 (Engelen 1997)。由於時間狀態和宮格狀態的不連續，因此傳統宮格自動機宮格的改變都是“突現”的。香港大學城市規劃及環境管理研究中心葉嘉安等人，利用“灰度”的增加值來表示出空間連續變化的過程、灰度的增減表示了鄰近區域對中間宮格的土地使用所造成影響程度的變化。且利用不同的限制條件 (constrain) 來模擬不同的條件下城市發展的情形。並且整合了 CA 和 GIS 利用不同的參數設定，模擬出珠江三角洲七種都市發展型態 (urban forms) 和能源使用、自然環境變化的關係 (Yeh 2000)。Clarke (1997) 等人利用 CA 整合 GIS 的模型，預測舊金山海灣地區(San Francisco Bay areas)天氣對都市成長的影響，且以 300 公尺的宮格大小進行分析，使用 diffusion、spread、breed、slope、resistance 等五個變數進行模型的控制，利用了一百多年的土地變化資料去校估模型，使模擬結果接近真實都市的演化情形。WU (2000, 1998) 利用個體經濟模型來定義轉移函數，整合於 CA 模型架構之內，並以此架構模擬不同的土地發展政策。土地開發者的邊際效益會隨者開發密度的提高而遞減。土地開發者所造成的外部成本可利用賦稅的方式轉移給土地開發者。傳統理論、CA 和 GIS 的結合，可在此模型架構內，檢視傳統理論下都市發展的情形，以做為決策和相關研究之用。除了應用 CA 於都市模型外，CA 也應用於傳統數理模型的驗證上。

Benati (1996) 使用 CA 檢視二維的區位理論，依模擬的結果的確可以表現出 Hotelling 的理論，同時也發現 Hotelling 一維的理論其實是其中一個特例。

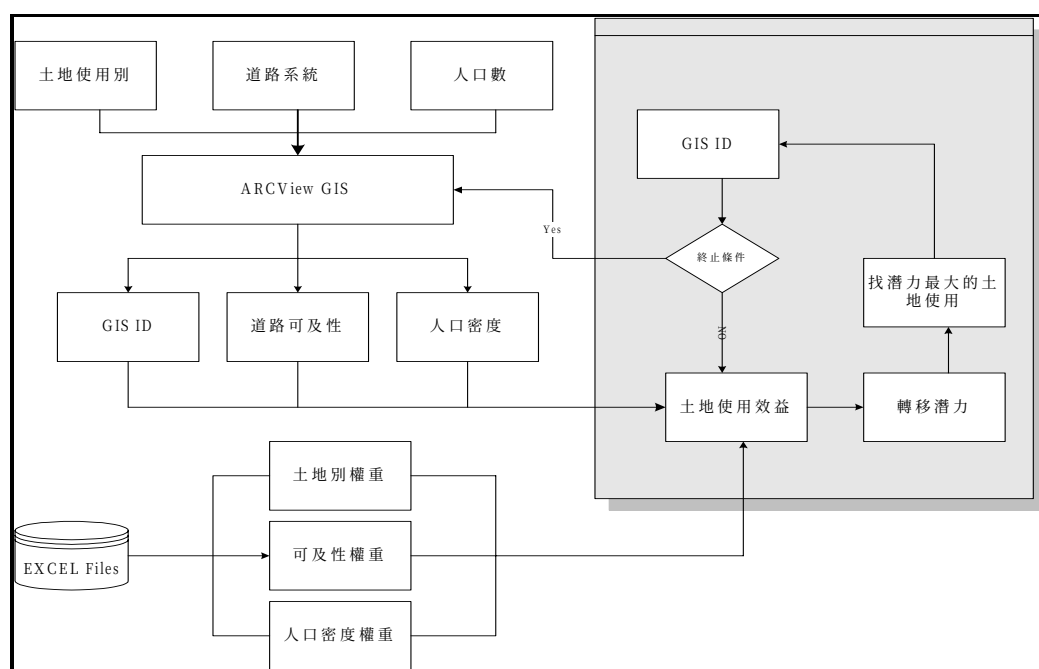
在國內相關研究方面，賴進貴 (2000) 利用 GRASS 開發 CA 模組，並已利用 Game of Life 來探討 CA 整合 GIS 模擬之研究及網格大小和演化規則之間的關係。陳宥任 (1999)，則利用 CA 討論交通和都市發展的問題，蔡宜鴻 (1998) 結合 GIS 及 CA 預測土地使用發展，其演化規則係利用多目標規劃理論中之「分析階層程序法」分析轉移因子間的優先順序。高宏軒 (1997)，視都市為一複雜空間系統以 CA 進行土地使用變遷的模擬，藉以觀察個體間的互動結果所呈現的整體土地使用形態。汪禮國 (1997) 以複雜理論探討都市空間演化問題，研究中發現在都市為一複雜體的假設下，有著與 Conway 生命遊戲相類似的規則出現。

三、本研究模型建構

(一)系統架構

影響土地變遷的因素相當的多，數理模型不可能同時考慮所有的影響因子，勢必加以簡化。不過，簡化難免造成誤差，模型在選擇影響因子時，必須力求降低誤差，儘量使之接近真實現象。

本研究系統架構如圖五，灰色部份為 CA 模型的運算部分，模型利用轉移函數推估下一時間階段最有可能的土地使用。



圖五、系統架構圖

(二)轉移函數

轉移函數 T 為鄰近(N_i)、土地使用狀態(L_i)及影響因子(A_i)的函數(公式 2)。依不同鄰近定義和不同土地使用型態給定不同權重值。 M 為依鄰近和權重所計算出來的所有宮格轉移潛勢值(公式 3)。藉由比較潛勢值的大小，以找出 $t+1$ 時間最有

可能的土地使用。

$$T = \{N_t, L_t, A_t\} \dots\dots\dots (公式 2)$$

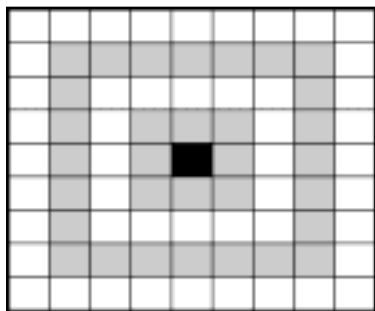
$$M = N (\sum (L) + \sum (A)) \dots\dots\dots (公式 3)$$

(三)鄰近的定義

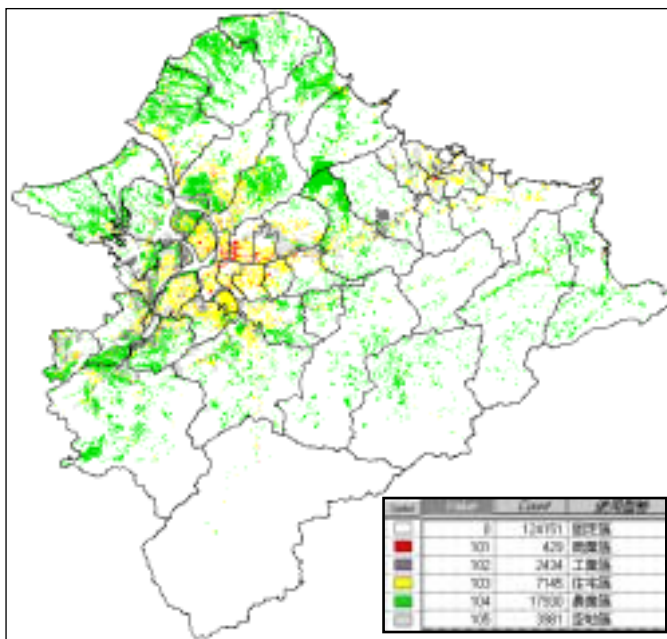
本研究中鄰近的定義採用 Moore 的擴充型。依距離中間網格的格數不同，定義不同處理範圍。圖六中兩個灰色的環框分別為距中間網格 1 格和 3 格的兩個鄰近範圍。

(四)土地使用(L)

本研究的初始資料係八十三年國土利用調查資料，由調查資料可以看出現況土地使用型態。土地型態的部份分成商業區、工業區、住宅區、農業區、空地及固定區，各區域透過屬性資料的對應轉換為相對的土地使用型態，數值本身為名目尺度，用來類別土地使用型態，例如國土利用調查資料中的項目為農業用地、稻作、旱地和廢耕地則轉成農業用地，其他禁止發展的森林區和無法發展的行水區等則列為固定區域。最後對應結果如圖七。



圖六、鄰近的定義



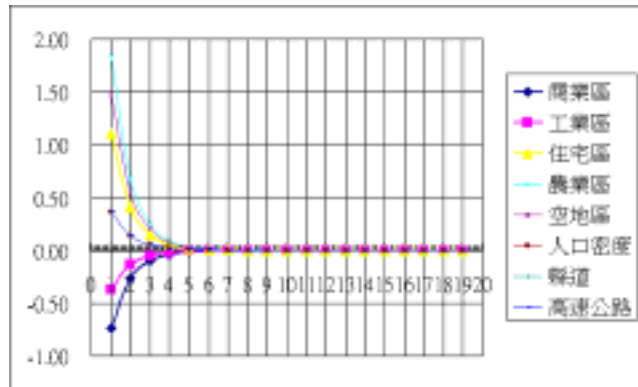
圖七、土地使用型態初始值

(五)影響因子(A)

本模型考量，人口密度、縣道可及性和高速公路可及性等三種影響因子。資料的預處理包括有道路系統可及性的處理，道路系統由GIS做環域分析(Buffer)計算所有網格因道路系統所受到的影響。人口密度處理，則由各鄉鎮人口數換算。

(六)鄰近的定義(N)

依鄰近的不同定義距離遞減函數如圖八所示，使距離中間網格愈近者權重影響愈大。鄰近距離以參數設定，本模型中設定最大鄰近距離為6個網格距離。



圖八、依距離遞減函數給定不同影響權重

四、本研究模擬成果

當所有資料前置處理完後就可以進入模型內模擬，依權重表內的不同設定，產生不同的發展情境。表一所示為空地變為商業區之轉移規則權重表，代表鄰近宮格對中心宮格所造成的影響。由於計有5種土地使用類別，故共有25張權重檔，分別顯示各種土地使用狀態轉移成其他各土地狀態的權重。

表一、空地轉商業區權重表

距離	商業區	工業區	住宅區	農業區	空地區	人口密度	縣道	高速公路
1	0.74	-1.84	0.74	-1.84	-1.84	0.00	0.00	0.00
2	0.27	-0.68	0.27	-0.68	-0.68	0.00	0.00	0.00
3	0.10	-0.25	0.10	-0.25	-0.25	0.00	0.00	0.00
4	0.04	-0.09	0.04	-0.09	-0.09	0.00	0.00	0.00
5	0.01	-0.03	0.01	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.00
6	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

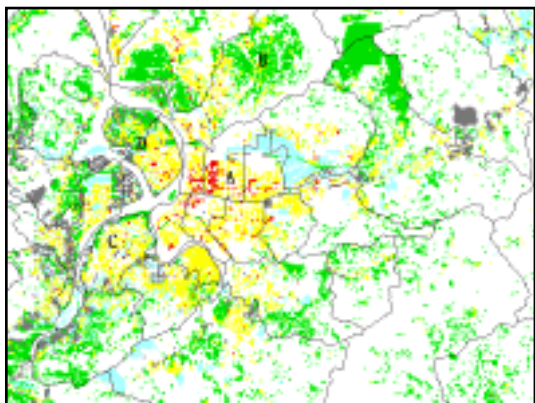
一般而言，土地的發展會依循聚集性和自組性的原則，亦即，中間宮格易朝向占鄰近宮格中較多數的土地型態發展。例如某空地附近商業用地數量占多數，則土地使用易轉移成商業區。此外，土地的發展也可能受到鄰近地區一些重要設施的影響，例如：道路的建設會刺激商業區的出現，故在道路附近的土地使用易轉移成商業區。權重表中設定空地為負，表示了空地維持空地土地使用的慣性，如附近空地使用很多的話將使空地不易轉換，但如果鄰近有商業區、住宅區、縣道經過或是人口密度較高的區域則空地轉為商業用地的機會就會變大。

而鄰近空間組成型態如以工業區和農業區為主，則空地不易轉變為商業用地。比較商業用地和工業用地權重的絕對值，會發現商業用地大於工業用地，如一

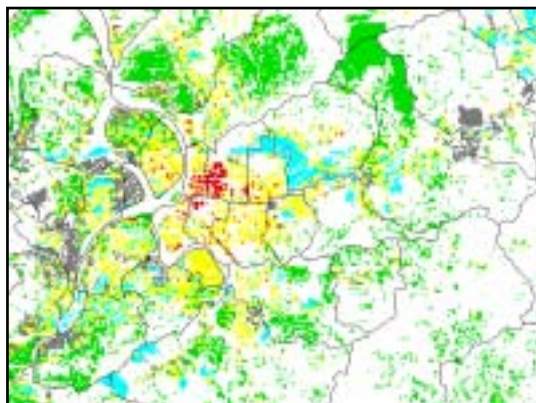
空間組成型態商業用地和工業用地數目相同的時候，由於商業區權重較高，空地會易轉為商業區。

同理考慮高速公路的影響時，模型假設高速公路附近，因可及性的增加所以易形成商業區，由規則內設定高速公路可及性和商業區成正比所以造成高速公路附近易形成商業區。

由圖九和圖十比較可以看出，圖九的A區域商業區往商業區聚集多的地方聚集，B區域因為農業區的比例較住宅區多，所以多數住宅區轉為農業區，C和D區域則相反的因住宅區的多數使住宅區擴張。



圖九、初始資料



圖十、模擬結果

五、模擬結果的數量校估

本研究中以八十三年國土調查資料為起始年，以八十七年為目標年。利用試誤法調整轉移函數，使演化規則近似實際資料的變化情形。假設工業區、商業區和住宅區各縣市網格數成長比例和縣市統計要覽土地使用成長比例相同，由八十三年國土調查資料估算目標年各縣市土地使用的面積，成為模擬目標年的推估值。模型驗證的方式係利用比較各縣市模擬值和推估值的誤差，使由轉移函數所得的模擬結果近似於實際土地使用情形。

八十年國土調查資料的土地使用經資料處理和網格化後共有空地、農地、住宅、工業和商業等五種。因此假設統計要覽內建地成長比例和住宅、工業和商業用地的總網格數，其成長比例相同。由其成長比例推測八十七年各鄉鎮土地使用面積(公式4)。

$$R_{i,t_2} = R_{i,t_1} \times \left[\frac{(S_{i,t_2} - S_{i,t_1})}{S_{i,t_1}} \right] \dots\dots\dots (公式4)$$

R_{it2} : t_2 年 i 地區(鄉鎮)土地面積

S_{it2} : t_2 年 i 地區(鄉鎮)土地使用面積(縣市統計要覽)

經由試誤法，調整各種不同的轉移規則，挑選通過假設檢定

$$H_0 : u = 0, H_1 : u \neq 0, \text{ 設定 } \alpha = 1.0$$

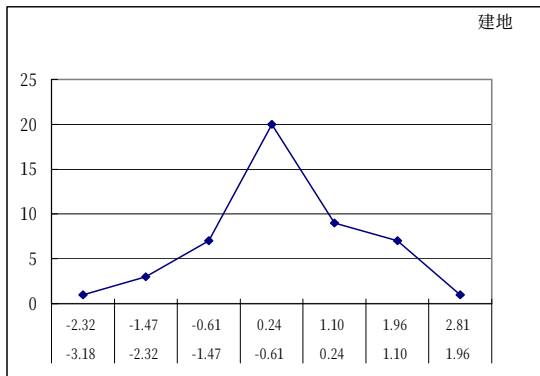
五組轉移規則，比較五組轉移規則的標準差，擇其中最小者。假設模擬值和估計值的誤差值呈常態分配如表二、表三及圖十一、圖十二所示，計算其標準差和平均值，可得建地區平均值-2.58，標準差43.22，農業區平均值-7.52，標準差65.93。

表二、建地誤差值次數分配表

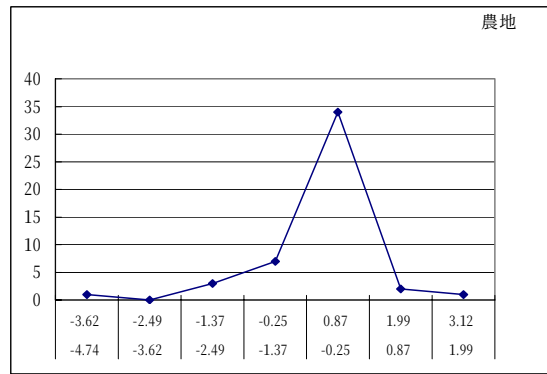
組限	次數	相對次數
-140 -103	1	2.08%
-103 -66	3	6.25%
-66 -29	7	14.58%
-29 8	20	41.67%
8 45	9	18.75%
45 82	7	14.58%
82 119	1	2.08%

表三、農地誤差值次數分配表

組限	次數	相對次數
-320 -246	1	2.08%
-246 -172	0	0.00%
-172 -98	3	6.25%
-98 -24	7	14.58%
-24 50	34	70.83%
50 124	2	4.17%
124 198	1	2.08%

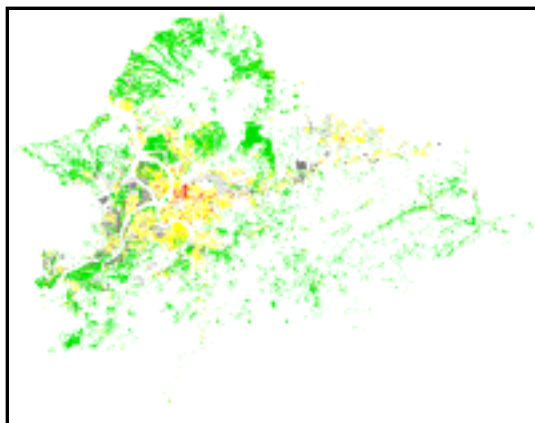


圖十一、標準化後建地誤差次數分配

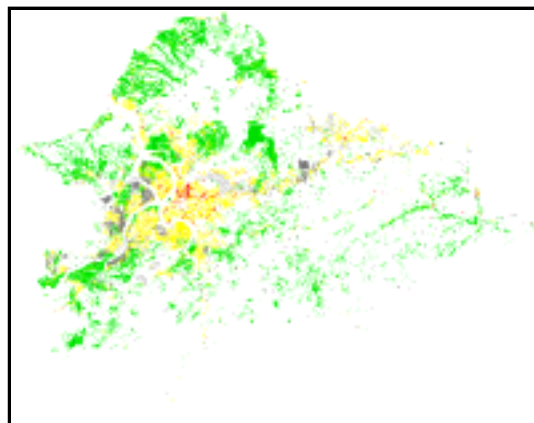


圖十二、標準化後農地誤差次數分配

由資料預處理所得到的空間資料為起始年如圖十三所示，透過本研究所建立的模型經由影響因子和轉移函數的影響得到模擬的結果，再經由歷史資料校估模擬結果，使模擬值近似於真實資料之後，所得到的空間資料如圖十四。



圖十三、八十三年初始狀態



圖十四、八十七年推估狀態

六、結論

本模式結合GIS和CA的功能，使GIS軟體可以表現動態的空間重組過程，並可利用GIS的強大分析功能進行結果的後續分析。模型中，利用CA整合不同的因子以解釋因子對系統所造成的影響。

由於影響土地變遷的因素很多，本模型中使用目前可取得的資料，由影響因子去估算出土地使用的可能狀態，並利用現有淡水河流域的資料，和模型的模擬結果校估，以得到系統演化背後的影響權重。利用這些影響權重可做為相關分析之用。

本研究轉移規則的設計，並非利用現有的傳統理論建構，而是利用歷史資料校估影響因子，使其表現出系統演化的情形。故不需考慮影響因子間的相依性。研究中以試誤法求出可能的演化規則，使其和歷史資料的誤差值最小，則此演化規則可近似於真實的土地演化情形。網格的解析度方面，不同的解析度的確是會影響到模擬結果，然如考慮較遠的鄰近範圍，由大範圍的鄰近決定網格狀態，則可減少網格大小所造成的影響。

UrbanSim 為一個由程式模組來表示不同的模型，透過所有模組的互動達到動態不平衡的模擬方法。其分析所使用的網格式資料型態和CA相同，而模型中所考量的參數也可用CA的模擬方法來達成。因此本研究以CA的模擬方法討論土地使用變遷模擬的可行性，期能整合兩者的長處以達到更精確的模擬結果。

七、參考文獻

- [1]汪禮國(1997),”宮格自動體模型(Cellular Automata)與都市空間演化,” 碩士論文, 國立中興大學(台北)都市計劃研究所
- [2]高宏軒(1997),”都市複雜空間系演化自我組織臨界性之探索-有限理性典範的應用,” 碩士論文, 國立台北大學都市計劃研究所
- [3]陳宥任(1999),”都市土地使用與運輸網路動態關係--以宮格自動體(Cellular Automat)為基礎之探索,” 碩士論文, 國立台北大學都市計劃研究所
- [4]蔡宜鴻(1998),”以GIS及CA為基礎的土地使用發展預測模擬方法,” 碩士論文, 國立成功大學都市計劃學系
- [5]賴進貴(2000),”宮格自動機與地理資訊系統結合之初探研究,” 中國地理學學會會刊, NO. 28, 109-126 [3] Benati, S. (1996),”A Cellular Automata for the simulation of competitive location,” Environment and Planning B: Planning and Design 1997. vol. 24, 205-218
- [6] Clarke, K. C., Hoppen, S. (1997),”A Self-modifying Cellular Automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area,” Environment and Planning B, vol. 24, 247-261
- [7] Engelen, G., White, R., (1997),”Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy-making,” White and Inge Uljee, Decision Support Systems in Urban Planning, Harry Timmermans.

Published, ISBN 0 419 2105 4

- [8]Waddell, P.A. 1998a. UrbanSim: the Oregon prototype metropolitan land use model.
In: *Proceedings of the 1998 ASCE Conference on Land Use, Transportation and Air Quality: making the Connection*. Portland, Oregon.
- [9]Waddell, P.A. 1998b. Simulating the effects of metropolitan growth management strategies. Prepared for presentation at *the 1998 Conference of the Association of Collegiate Schools of Planning*, November 1998, Pasadena, California.
- [10]Waddell, P.A. 1998c. Monitoring and simulating land capacity at the parcel level.
Lincoln Institute of Land Policy Conference on Land Capacity Monitoring, Seattle, Washington.
- [11] White, R. , Engelen, G.(1997),”Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling,” *Environment and Planning B*, vol. 24, 235-246
- [12] White, R., Engelen, G. (2000),”High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems,” *Computers,Environment and Urban Systems* , vol. 24, 383-400
- [13] WU, F. L. , WEBSTER, C. J. (2000),” Simulating artificial cities in a GIS environment: urban growth under alternative regulation regimes,” *Geographical Information Science*, vol. 14, no. 7, 625-648
- [14] Yeh, G. O., Li, X. (2000),”A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS,” *Environment and Planning B*, vol. 24, 733-753