

應用演化計算於碎形圖樣設計問題

藍國桐

德明財經科技大學

資訊科技學系 副教授

E-mail: ktlan@takming.edu.tw

摘要

本論文利用演化計算來完成一個碎形圖樣的設計問題，其主要的應用如人工魚礁的佈建問題。本研究的主要目的是以有限成本前提之下，設計一個碎形維度最大的佈建圖樣，這研究的起源來自於解決海洋生態上的漁礁佈建問題。這問題是在一個固定大小的基地上，就有限的人工魚礁個數以及施工成本，佈建一個海洋生態漁場並希望這個漁場的碎形維度值最大。由於碎形圖樣設計問題的搜尋空間具有非線性變化現象，加上在搜尋空間中存有相當多的局部最佳點，這些局部最佳點常常會成為搜尋上的陷阱，因此一般傳統登山式搜尋演算法或是窮舉式的搜尋法則並無法成功得到最佳的搜尋結果。採用演化計算具主要著眼於其具有傳統登山式搜尋演算法所無法達成的搜尋能力，本研究提出一個如何應用演化法則設計一個碎形圖樣的實作過程，並比較了演化方式與演化步伐的關係，並以實例印證歌西式突變的優異搜尋能力。最後，本論文採用歌西式突變方式的演化計算來設計一個三維立體圖樣，除此之外，也詳細探討了在設計一個立體人工魚礁圖樣之中的相關訊息。

關鍵詞：演化計算，碎形維度，人工魚礁，登山式搜尋演算法，歌西突變。

一、前言

無論是工程上，經濟行為上，科學研究，甚至日常生活上，我們經常要面臨最佳化(optimization)的問題，如時間最少、速度最快、效率最好等等。面對這類的問題，一般都需要先對問題及解決方案(solution)之間作一個評估(evaluate)，所以會得到一個目標函數(objective function, cost function, fitness function)，根據這個函數所得到的函數值(fitness value)我們可以評估這個解決方案的好壞並作為改善此方案或是另謀他途的依據。傳統求最佳解的方法乃是根據這個目標函數作梯度(gradient)或其他高階(high-order)統計方法，以求得一個搜尋的方向，並循此方向改善解決方法，這種方法我們統稱為登山式搜尋(hill-climbing)。由於這些登山式搜尋(hill-climbing)的方法是利用目前的解和下一個解作比較來得到一個搜尋空間(landscape)的地貌資訊，據此資訊得到下一個較佳的解並且重複上述步驟。由於搜尋方向是基於目前解的局部梯度資訊，因此常常會有收斂在局部最佳點(local optima)的問題[1]。演化計算

(evolutionary computation)是模擬演化過程，希望能解決此類的局部收斂問題(又稱為早熟問題，premature)。它的演算過程中具有突變(mutation)及天擇(selection)兩種機制可以對複雜崎嶇(rugged)的地形作有效的搜尋(這種搜尋並不是以局部的地貌資訊來作為搜尋的依據)。突變會導致所產生的下一代個體的內在或外形發生隨機性的變異，它是族群中的個體嘗試向未知的空間探索的重要機制，而天擇則會產生一個天擇壓力(selection pressure)來驅趕族群個體邁向適合度更高的狀態。目前演化計算可分為：著重於族群個體的行為(即表現型，phenotype)演化的進化演算法(evolutionary algorithms; EA)及重視個體的基因編碼(即基因型，genotype)演化的遺傳演算法(genetic algorithms; GA) [2-4]。

本論文針對如何設計一個三維立體圖樣(pattern)的實際問題為研究目標，並探討演化計算對一複雜搜尋空間的鑑別，這研究的起源來自於解決海洋生態上的漁礁佈建問題[5, 6]。這問題是在一個固定大小的基地上，就有限的人工魚礁(reef)個數，佈建一個漁場並希望這個漁場的碎形維度值(fractal dimension)最大。針對這問題，我們初步將它簡化成：設計一個三維圖樣(3D pattern)，利用演化計算找出一組碎形維度最大的二維圖樣。在這個初步的結論[11]中，發現它是一個高維(high dimension)、多模態(multi-modal)的搜尋空間。由於搜尋空間的龐大及複雜($f: R^{n \times n} \rightarrow R$)，我們開發了一個適合鑑別複雜的碎形維度空間的演化突變方式並討論了搜尋空間(searching space)對於演化能力- 突變步伐(mutation step size)及演化與學習機制之間的關係。至於面對實際的人工魚礁佈建，由於搜尋空間的規模變得相當巨大(一個高維的搜尋空間 $f: R^{n \times n \times n} \rightarrow R$)，如何設計一個好的三維立體圖樣(3D pattern)將會是一大挑戰。本論文的演化技術則是採用傳統的進化演算法(EA)，它是一個成熟的表現型演化技術，我們將修改它的突變方式以適合鑑別複雜的碎形維度空間。本論文討論了搜尋空間(searching space)對於演化能力- 突變步伐(mutation step size)及演化與學習機制之間的關係，以此基礎之下找出三維立體圖樣的設計方式，並且從中發現一些重要的訊息，進而提出一些建設性的具體建議。本論文以下的章節規劃成：第二節列出本論文針對圖樣設計所適用的進化演算法中演化個體的設計，第三節則是設計一個適用於

演化過程中的突變機制，第四節是我們針對幾個典型的設計要求所形成的複雜搜尋空間，利用進化演算法對其作搜尋測試的實驗結果分析，第五節作一個總結。

二、演化個體的設計

針對一個複雜無梯度資訊的非線性空間，本論文以進化演算法(Evolutionary Algorithm)來搜尋其碎形維度所形成的目標函數地貌(landscape)。在實作演化計算中，我們必須對每個族群中的個體(individual)指定一個適合度(fitness value)給它，這個適合度函數 $f:R^m \rightarrow R$ 端視環境的要求而定，而本研究視一個二維(三維)圖樣的設計為一個個體，計算該圖樣的碎形維度並指定為其適合度值。我們的目標希望演化出來是一個碎形維度值最大的二維(三維)圖樣設計。不過由於演化個體(individual)的特殊，我們必須重新定義演化個體以用來代表(represent)問題的候選解(candidate solution)，也因此演化計算中的突變過程也就必須稍加修改。

由於人工魚礁佈建的目標是追求碎形維度最大的圖樣設計，因此本研究中演化個體的適合度函數就是以碎形維度為計算目標。此外一個演化個體(individual)就是一個設計好的人工魚礁佈建形式，也就是一個圖樣(pattern)。將這個圖樣拿來作 box counting 形式的碎形維度(fractal dimension)計算之後，可以得到一個本個體的適合度值如圖 1：追求個體適合度值的最大就是演化計算的目標。

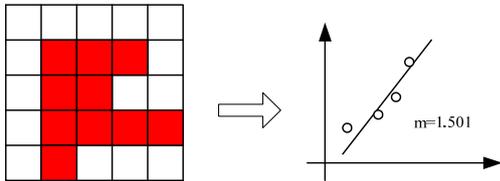


圖 1(a) 某個 2D 漁礁佈建樣形圖，及其碎形維度值

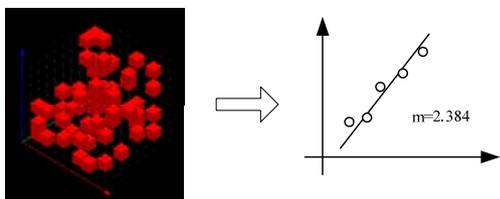


圖 1(b) 某個 3D 漁礁佈建樣形圖，及其碎形維度值

圖 1. 以碎形維度為目標的圖樣個體之適合度計算。

要計算這個圖樣(pattern)的碎形維度(box-counting fractal dimension)，必須對這個圖樣

作等分切割後，求其

$$FD = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \epsilon}$$

ϵ 為切割的小塊的邊長，

$N(\epsilon)$ 為該圖樣所覆蓋的小塊數目

三、演化過程中的突變機制的設計

由於演化個體的特異性，因此每個個體(individual) \bar{x}_i 均具有以下特性：

個體 $\bar{x}_i = [x_i(1) \ x_i(2) \ \dots \ x_i(m)]$ 中的 m 個位元中只能有 n 個位元的值是 1，其他的位元的值必須為 0。

由於演化過程中，圖樣中位元 1 的個數必須保持固定 n ，因此傳統進化演算法中的步驟 2 中的突變過程必須重新定義- 它必須視隨機變數 R 來對圖樣作 R 次的擴張(dilation)或縮減(erosion)。

因此除了在演化過程中時時保持圖樣位元 1 的個數不變外，我們又定義擴張(dilation)或縮減(erosion)演算法：

擴張演算法：

1. 任選一個邊界點，將它周遭的某個背景點由 0 改成 1。
2. 重複上述步驟 R 次。
3. 最後，對圖樣作縮減以保持魚礁個數不變。

縮減演算法：

1. 任選一個邊界點，將它由 1 改成 0。
2. 重複上述步驟 R 次。
3. 最後，再圖樣作擴張以保持魚礁個數不變。

四、實驗結果與分析

本研究源自於如何以有限的人工魚礁數佈建成一個碎形維度最大的圖樣：因此本實驗將探討在不同的佈建基地大小(base)及不同的魚礁個數(number of reef)的情形下，演化計算的搜尋能力。

以下為本研究針對三維漁礁佈建的演化實驗所採用的一些參數：

佈建基地大小：10 X 10 X 10, 12 X 12 X 12, (此亦為個體結構或稱為一個圖樣的大小)

目標函數：該圖樣的 box counting fractal dimension

族群個體數目：12 或 24

演化代數：1000 或 2000

突變型態：Cauchy mutation

突變步伐：2.0, 10.0

天擇型態：Ranking

族群初始分佈：uniform distribution

針對演化計算求解問題的隨機性，因此在本演化實驗中，對一個演化過程(epoch)均重複作 10 次取其平均作為實驗結果。同時我們也記下在這 10 次實驗中所得到的最佳解，用來評估演化計算對全

域最佳值的搜尋能力。

實驗一、

首先我們在一個 10 X 10 X 10 的立體空間下，針對不同的人工魚礁個數(即圖樣中的位元 1 的數目)，試著以進化演算法搜尋最大碎形維度的佈建設計，在這個實驗中，族群個體數目為 12，突變步伐為 2.0，將最佳個體記錄下來可得到的實驗數據如圖 2。

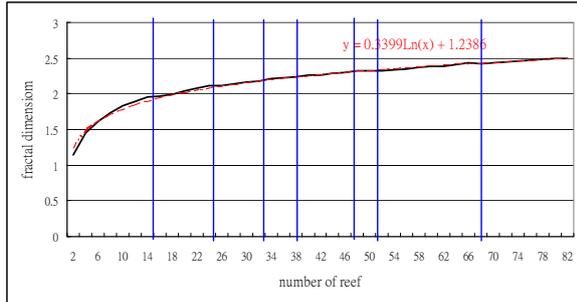


圖 2. 10 X 10 X 10 佈建基地下，不同魚礁個數的最佳設計效能

由圖 2. 可以看出來：碎形維度和魚礁個數成一個對數函數的趨勢： $FD = a \cdot \log(x) + b$ ， x 是人工魚礁的個數， a, b 是常係數。任舉其中兩個典型的最佳設計如圖 3. 及圖 4.，圖 3. 中，在佈建基地為 10 X 10 X 10(共有 1000 個空間)下，使用 18 顆人工魚礁佈置一個立體人工魚礁圖樣，採用如圖的佈置方式可以得到一到碎形維度最大的立體人工魚礁圖樣，其碎形維度(box counting fractal dimension)為 $FD=1.9975$ 。

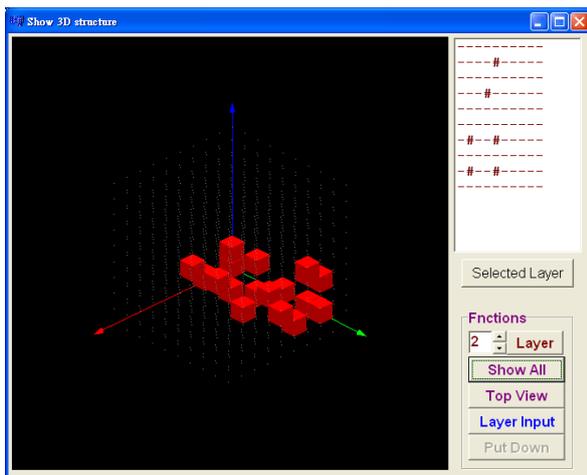


圖 3. 佈建基地為 10 X 10 X 10，使用 18 顆人工魚礁限制下的最佳設計， $FD=1.9975$

若使用 60 顆人工魚礁佈置同一個立體空間，如採用圖 4. 的佈置方式，可以得到一到碎形維度

最大的立體人工魚礁圖樣，其碎形維度(box counting fractal dimension)為 $FD=2.3843$ 。

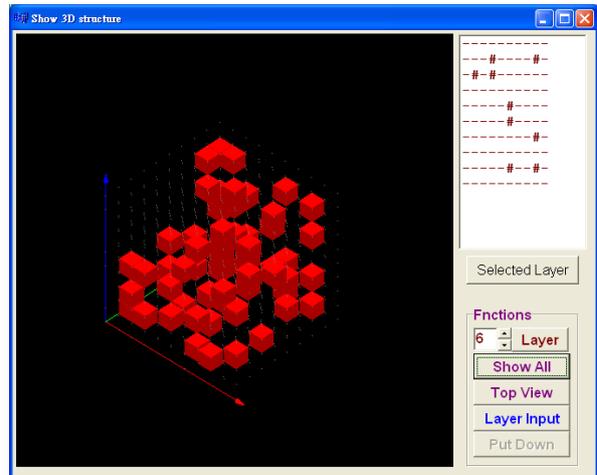


圖 4. 佈建基地為 10 X 10 X 10，使用 60 顆人工魚礁限制下的最佳設計， $FD=2.3843$

實驗二、

在本實驗中，我們在一個較大規模的立體空間 12 X 12 X 12 下，針對不同的人工魚礁個數(即圖樣中的位元 1 的數目)，試著以進化演算法搜尋最大碎形維度的佈建設計，在這個實驗中，由於搜尋空間增大相當多，因此我們必須擴大族群個體數目為 24，突變步伐為 10.0，而且演化代數增大為 2000 代，在 10 次的演化過程後，將最佳個體記錄下來可得到的實驗數據如圖 5。

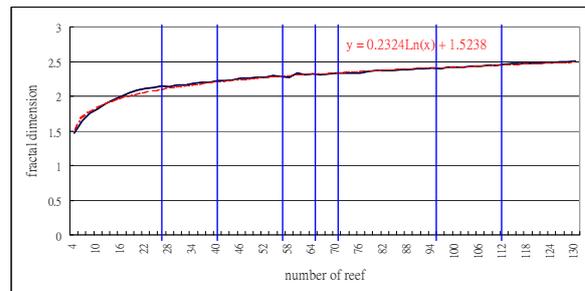


圖 5. 12 X 12 X 12 佈建基地下，不同魚礁個數的最佳設計效能

相同地，圖 5. 中，我們發現碎形維度和魚礁個也是成一個對數函數的趨勢： $FD = a \cdot \log(x) + b$ ， x 是人工魚礁的個數， a, b 是常係數。而且圖 2. 也可發現相同的佈署人工魚礁的設計原則：由人工魚礁的個數來決定必須將這些魚礁佈到幾個小區域中。例如，若要佈署的人工魚礁數 22，則務必將這 22 個魚礁放到單一個小區域中。又例如，若魚礁數是 82，那要作到最佳化(碎形維度最大)則先決條件就是要將這 82 顆魚礁擠在

任 6 個小區域中。所以同樣在圖 5.中，我們也標出漁礁設計時要考慮的 8 個區塊。

任舉其中兩個典型的最佳設計如圖 6. 及圖 7.，在圖 6. 中，在佈建基地為 $12 \times 12 \times 12$ (共有 1728 個空間)下，使用 26 顆人工漁礁佈置一個立體人工魚礁圖樣，採用如圖的佈置方式可以得到一到碎形維度最大的立體人工魚礁圖樣，其碎形維度(box counting fractal dimension)為 $FD=2.1499$ 。

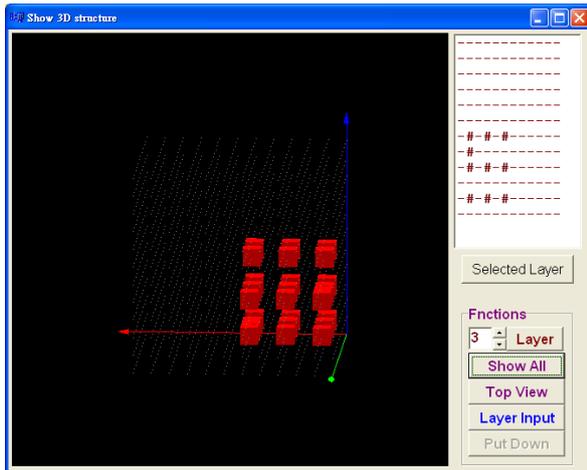


圖 6. 佈建基地為 $12 \times 12 \times 12$ ，使用 26 顆人工漁礁限制下的最佳設計， $FD=2.1499$

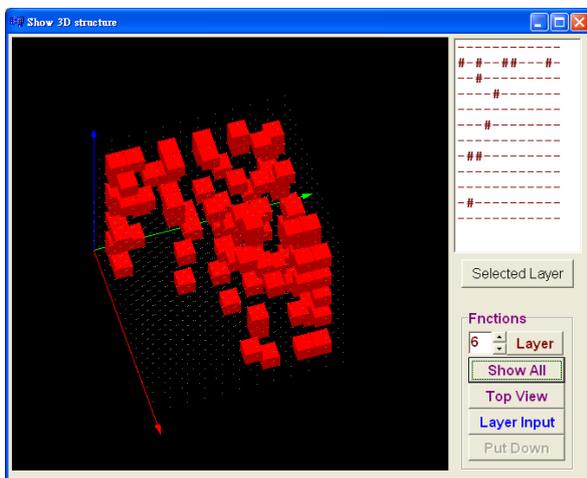


圖 7. 佈建基地為 $12 \times 12 \times 12$ ，使用 94 顆人工漁礁限制下的最佳設計， $FD=2.4055$

在圖 7. 中，在佈建基地為 $12 \times 12 \times 12$ 下，使用 94 顆人工漁礁佈置一個立體人工魚礁圖樣，採用如圖的佈置方式可以得到一到碎形維度最大的立體人工魚礁圖樣，其碎形維度為 $FD=2.4055$ 。

五、結 論

本論文利用演化計算來設計一個三維立體圖樣(人工魚礁)的問題，本研究的主要目的是設計一個適合度最大的三維立體圖樣，而適合度是以三維立體圖樣的碎形維度為計算目標，其主要的應用如人工魚礁的佈建問題。透過數個由碎形維度所形成的複雜搜尋地貌，利用演化計算對這些搜尋地貌的鑑別，由於三維立體圖樣設計的搜尋空間具有非線性變化，加上搜尋空間隨維度呈指數形式的變大(即規模問題(scaling))，因此一般傳統登山式搜尋演算法或是窮舉式的搜尋法則並無法成功得到最佳的搜尋結果。利用跳脫能力較佳的突變方式(如歌西式的突變方式)或是採用較大突變步伐的演化方式具有比較好的空間搜尋能力，也不易陷入局部最佳解上。也因此本研究以演化計算完成了設計一個三維立體人工魚礁圖樣設計上的可行性。

參考文獻

- [1] 藍國桐，競爭式進化演算法理論分析及其在非線性動態系統之應用，台灣科技大學電機系博士論文，2000年。
- [2] D. B. Fogel, "An introduction to simulated evolutionary optimization," *IEEE Trans. Neural Net.*, vol.5, no.1, pp.3-14, 1994.
- [3] D. B. Fogel, *Evolutionary Computation: Towards a New Philosophy of Machine Intelligence*, Discataway, NY: IEEE Press, 1995.
- [4] T. Back, U. Hammel, and H. P. Schwefel, "Evolutionary computation: comments on the history and current state," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol.1, no.1, pp.3-17, 1997.
- [5] C. H. Lan and C. Y. Hsui, "The Deployment of Artificial Reef Ecosystem: Modeling, Simulation and Application," *Simulation Modeling Practice and Theory*, vol.14, no.5, pp.663-675, 2006.
- [6] C. H. Lan and C. Y. Hsui, "Insight from complexity: A new Approach to Designing the Deployment of Artificial Reef Communities," *Bulletin of Marine Science*, vol.78, no.1, pp.21-28, 2006.
- [7] R. M. Crownover, *Introduction to Fractals and Chaos*, Jones and Bartlett Publishers, 1995.
- [8] G. Rudolph, "Local convergence rates of simple evolutionary algorithms with Cauchy mutations," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol.1, no.1, pp.249-256, 1997.
- [11] 藍國桐，王李吉，"應用演化計算於人工漁礁設計問題"，中華管理發展評論，第 1 卷，第 1 期，135~150 頁，2009。