

類神經網路於碎形影像壓縮之研究 A Study on Fractal Image Compression Using Neural Networks

李錫仁
Lee Saik-Jen

吳博雅
Wu Pou-Yah

孫光天
Sun Koun-Tem

台南師院資訊教育所
Institute of Information Education
National Tainan Teachers College
louie@ipx.ntntc.edu.tw

台南師院數理教育系
Department of Mathematics and
Sciences Education
National Tainan Teachers College
pywu@ipx.ntntc.edu.tw

台南師院資訊教育所
Institute of Information Education
National Tainan Teachers College
ktsun@ipx.ntntc.edu.tw

摘要

本研究係利用類神經網路 (Neural Networks) 技術於碎形 (Fractal) 影像壓縮, 以完成傳統碎形影像壓縮所需之大量的比對計算, 改善碎形影像壓縮編碼的執行時間。

關鍵字: 類神經網路、碎形、影像壓縮。

Abstract

In this paper, we propose neural network technologies to fractal image compression by implementing numerous comparisons that are required by the traditional methods. In this way, the computation time of encoding can be reduced for compressing an image.

Keywords: Neural Network, Fractal, Image Compression.

一、簡介

影像壓縮/解壓縮之技術可以降低資料的儲存量, 並節省資料傳輸的時間, 在圖形介面使用頻繁, 網際網路應用發達的今天, 具有相當的重要性。然而, 傳統以離散餘弦轉換 (Discrete Cosine Transform, DCT) 執行影像壓縮, 有易成塊狀[16], 以及當影像放大時會有鋸齒狀等問題[16], 故其它壓縮技術之發展為目前研究之熱門領域。

利用影像的自我相似性, 逐次反復執行轉換, 使影像收斂到可以接受的地步, 這就是以碎形原理產生影像的方法。目前此方面的研究已有不錯之成果, 如: Hutchinson 測度的提出可以證明影像的收斂性[1,7,14], Mandelbrot 展示以碎形原理產生影像的可能[14], 及 M. Barnsley 提議以碎形原理來執行影像壓縮, 並提出拼貼理論 (Collage Theorem), 運用逐次函數系統 (Iterated Function System, IFS) 製作碎形碼 (Fractal Code), 其壓縮比更可達到 $10^4:1 \sim 10^6:1$, 吸引了許多人的注意[1-3,6,28,29]。

一些研究者發現: 雖然以 IFS 建置影像可以達到極高的壓縮率, 但搜尋碎形碼的方法始終無法由程式自動產生[10,11,16,27,29,35]。Jacquins 於 1992~1993 年, 提出以不相重疊的部份影像, 以分割逐次函數系統 (Partitioned Iterated Function system, PIFS) 尋找碎形碼, 而不以 IFS 方式尋找碎形碼, 奠定碎形碼自動尋找之基礎[10,11]。

目前碎形影像壓縮的研究, 主要以提高壓縮比, 減少壓縮時間等方向為主。前者是以不同的分割方式[5,8,18,30]、編碼方法[19,30,33,36]及可競爭的智慧型搜尋[25]為主要發展; 後者則是以影像的分類[8,11,16,32]、平行處理[12,17]和類神經網路[4,20,21,26]為主軸。

類神經網路 (Neural Network) 為新近研究之技術, 並已成功且廣泛的應用在各領域[9,13,15,20-24,26,31,34,37], J. Stark 在 1991 年最早提出以類神經網路技術於 IFS[4,20,21], 並以 Hopfield 類神經網路模式解線性規劃問題, 以快速求出 Hutchinson 測度的方法[21,24]。

本研究目的, 即以類神經網路技術於 PIFS, 將每一像點 (pixel) 以一神經元 (neuron) 取代, 透過各神經元間的鍵值 (weight), 及各神經元的閾值 (threshold) 調整, 尋找出適當的碎形碼, 解碼時再根據這些碎形碼, 逐次產生影像。第二章將介紹 PIFS 和以類神經網路技術執行壓縮/解壓縮的概念, 第三章將說明我們所提的類神經網路技術完成影像壓縮部份, 第四章則說明解壓縮的部份, 第五章將展示一些我們的研究成果, 並與原始影像做一比較, 最後提出我們研究的一些心得與未來發展建議, 供相關研究之參考。

二、分割逐次函數系統和類神經網路的回顧

1. 分割逐次函數系統的原理

PIFS 原理是將原影像複製成兩份一樣的影像, 其中一塊分割成互不重疊的區域 (最簡單的是正方形) 做為值域 (Range), 另一塊分

割成可以重疊的，長、寬各為值域 2 倍大小的區域，稱為定義域 (Domain)。

接著，比較定義域和值域的測度差 (四個定義域的点和其相對應於值域的一點之灰階值之差別；為了簡化問題起見，以灰階影像說明)，尋找誤差最小的或是在我們可接受的範圍內，對每個值域記下其對應之定義域與轉換 (transform)。如果所有的誤差都超過可接受的範圍，則將定義域和值域都切成四等分再尋找，或是接受最小誤差的對應，此種影像分割法稱為四方樹分割法 (Quadtree Partition) [8,19]，表 1 為此法的演算法。

圖 1 表示這樣的對映關係，其中左右兩圖均為原影像的複製。左圖表示定義域的分割法，是可以互相重疊的一些區域，只要長、寬是對應值域的兩倍即可。右圖表示值域的分割法，是不可重疊的區域，這些區域都要找到一個定義域與它們對應，並記下對應的區塊和對應用的轉換，所以有些值域可以在較大區塊時找到對應，有些則必須切成較小的區塊才能找到。

表 1 · 四方樹分割法的演算法：

步驟	內容說明
1	選擇一個容忍度 e_c ，及最小的分割 r_{min} 。
2	設值域 R_i = 原始影像 I_2 ，且標記為尚未找到 (定義域及轉換)。
3	如果有值域 R_i 標記為尚未找到，則重複步驟 3 與步驟 4： 從定義域中找出所有可能的區域，並一一和 R_i 比較，找到和 R_i 誤差最小的區域 D_i 及對應的轉換。
4	若步驟 3 中所得的誤差小於 e_c ，或是已經達到 r_{min} ，則標記 R_i 為已找到；否則分割 R_i 為 1/4 的大小，並且全部標記為未找到。

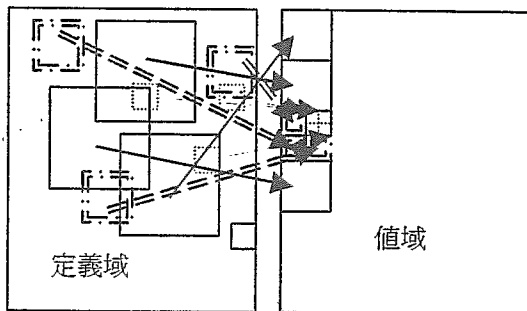


圖 1 · 分割逐次函數系統 (PIFS) 的對映關係。左、右兩圖均為原始影像的複製，但採用不同的分割方式。

這樣的搜尋包含空間和灰階值的兩種對映，而且這兩種對映都必須是收斂的，如此逐次

解壓縮時，影像才會穩定 [8,10,11,16]。因為在空間上，值域是定義域的 1/4 影像，根據收縮映射原理 (Contraction Mapping Theorem) [1,8] 知道，影像在空間上會收斂。而灰階度上的收斂則要靠對比 (contrast, $-s$) 與明亮度 (brightness, b) 來規範。所以這樣的 PIFS 每一轉換 (transform, τ_i) 可以用下面的式子來表示 (為了簡化問題，不考慮旋轉和翻轉的比較)：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \tau_i \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & s_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \\ b_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， (x, y) 為定義域座標， z 為其上之灰階值， (x', y') 為值域座標， z' 為值域上的灰階值。 (e_i, f_i) 為定義域左上角座標， s_i 為對比值， b_i 為明亮度的值，這四個值 e_i, f_i, s_i 及 b_i 為壓縮後須記錄之資料，解碼時即可根據這些碼，反復執行以產生所要的影像。

2. 類神經網路

一般類神經網路的模型如圖 2 所示，係由許多單元 (稱為神經元, neuron) 組成，每一個神經元 v 和一群神經元 v_0, v_1, \dots, v_{N-1} 相連接，其中 v_0, v_1, \dots, v_{N-1} 的輸出值分別為 x_0, x_1, \dots, x_{N-1} ，與連接 v 之連接值 (稱為神經鍵值) w_0, w_1, \dots, w_{N-1} 互相作用後，輸入到神經元 v 中。神經元 v 根據內部的閾值 (internal threshold 或是 offset) θ 和作用函數 o (如圖 3 所示)，決定神經元 v 的輸出值 [13,37]。

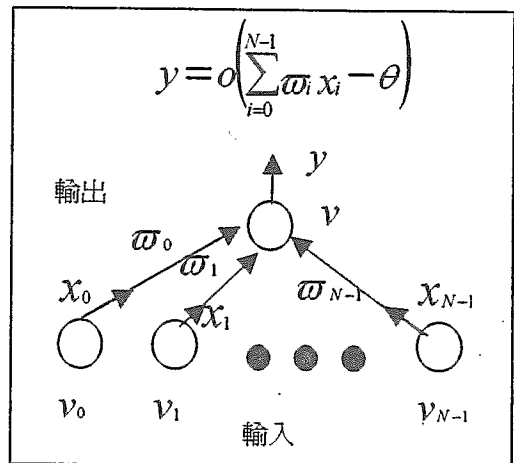


圖 2 · 類神經網路中，各神經元之間的關係。

類神經網路主要由網路的拓樸 (網路的連接方式)，神經元的狀態 (可視為神經元的輸出) 以及訓練、學習的規則 (網路鍵值與閾值的調整方式) 組成。這樣的模式因為可以對神經元的狀

態，或鍵值調整，所以有學習和容錯的能力；又因為運用大量的神經元同時運作，所以具有相當高的計算速率與平行處理能力。這也是我們想要以類神經網路技術應用於 PIFS 碎形碼的尋找及碎形影像產生的主要原因。

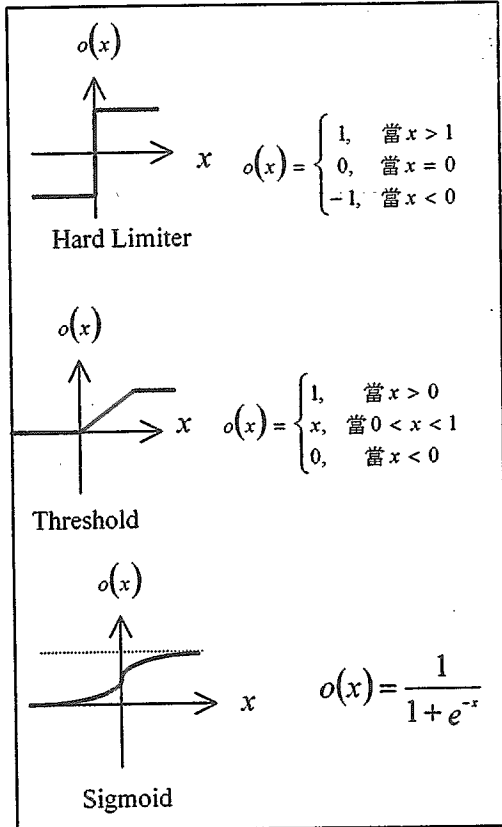


圖 3 · 幾種常見用於類神經網路的作用函數。

三、應用類神經網路於碎形影像壓縮

以類神經網路技術於 PIFS 編碼的架構如圖 4 所示，基本上，我們將把影像上每一個像點 (pixel) 視為一個神經元，而其灰階值即為神經元的狀態。影像分割成定義域和值域，定義域內的每一個像點為輸入層神經元，值域內的每一個像點則為輸出層神經元。每一個輸出層的神經元都和其相對應的 4 個輸入層神經元相連。

如圖 4，影像中之值域 1 不同位置的神經元，分別由定義域 1 之相對位置之 4 個鄰近神經元連接；值域 2 的神經元由定義域 2 的 4 個神經元相連接。因為定義域 1 及定義域 2 有部份互相重疊，所以這些重疊區域的輸入層神經元（如圖中斜紋部份的兩個神經元）會同時連接 2 個輸出層神經元。

如此，每一個輸出層神經元 j 都和其相對應的 4 個輸入層神經元 i 、 $i+1$ 、 $i+2$ 及 $i+3$ 相連。神經元 j 的輸出值 z'_j ，乃由神經元 i 、 $i+1$ 、 $i+2$ 及 $i+3$ 的輸出值 z_i 、 z_{i+1} 、 z_{i+2} 、

z_{i+3} 和其相對應的神經鍵值 w_{ji} 、 w_{ji+1} 、 w_{ji+2} 及 w_{ji+3} ，與神經元 j 內部的閾值 θ_j 及作用函數 o_j 決定：

$$z'_j = o_j \left(\sum_{k=i}^{i+3} w_{jk} \times z_k - \theta_j \right) \quad (2)$$

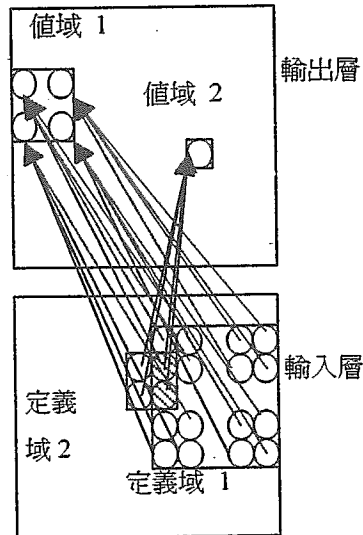


圖 4 · 類神經網路於碎形影像壓縮之架構。其中，有斜紋的兩個輸入層神經元同時和兩個輸出層神經元相連接。

1. 網路的拓樸：

如上圖 4 所示，將定義域視為輸入層，值域視為輸出層，每一層都具有和影像像點相同數目的神經元。網路的連接方式為輸出層每一個神經元都和輸入層的 4 個神經元相連接。因為定義域可以重疊，所以輸入層每個神經元可以連接不只一個輸出層的神經元，也可以不和任何輸出層的神經元相連接。

對照式 (1) 與式 (2)，其中，式 (2) 的輸入層神經元的輸出值 z_k 可對應為式 (1) 中定義域像點的灰階值 z ，式 (2) 之神經鍵值 w_{jk} 則對應式 (1) 對比值 s_i 的 $1/4$ ，式 (2) 中的閾值 θ_j 則對應式 (1) 之明亮度值 b_i 的負值，此時，式 (1) 則可完全以式 (2) 取代；另外，式 (2) 中作用函數 o_j 我們採用 threshold logic function (放大 255 倍)：

$$o_j(x) = \begin{cases} 255, & \text{當 } x \geq 255. \\ x, & \text{當 } 0 < x < 255. \\ 0, & \text{當 } x \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

而式 (2) 中 z'_j 即為式 (1) 之 z' ，為輸出層神經元產生之結果，將與原像點之灰階值 z^{pre} 做比較，進行鍵值與閾值之改變。

2. 神經元的狀態：

各神經元狀態 z_i 、 z_{i+1} 、 z_{i+2} 、 z_{i+3} 及 z'_j 的範圍為灰階值的範圍（一般為 0~255），鍵值 w_{ji} 、 $w_{j,i+1}$ 、 $w_{j,i+2}$ 及 $w_{j,i+3}$ 的範圍均為 0~1，閾值 θ_j 範圍為 -255~0 之間。輸入層神經元狀態的初始值為原始影像上各像點的灰階值，輸出層神經元的狀態、閾值及神經鍵值等初始值為隨機設定。

3. 神經元狀態的學習：

由類神經網路之輸出結果與原始像點之灰階值，我們定義每一神經元 j 的差距量 δ_j 為：

$$\delta_j = z_j^{inc} - z'_j \quad (4)$$

其中， z'_j 為作用函數產生的輸出值， z_j^{inc} 為原像點 j 之灰階值。為了控制閾值、神經鍵值的改變，以使整個網路能夠穩定、快速的學習，加入一個學習速率參數 η ，由線性方程式可求得神經鍵值的改變量 Δw_{jk} 為：

$$\Delta w_{jk} = \eta \times \frac{\delta_j}{z_k}, \quad k = i \sim i+3 \quad (5)$$

神經元 j 閾值的改變量 $\Delta \theta_j$ 為：

$$\Delta \theta_j = -\eta \times \delta_j \quad (6)$$

如此反復的學習，直到類神經網路之輸出結果在可接受的誤差範圍內。

四、應用類神經網路於碎形影像解壓縮

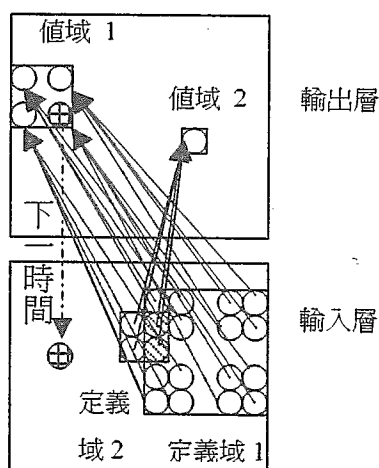


圖 5·類神經網路於碎形影像解壓縮之架構。其中，輸出層方格紋神經元的狀態，為下一時間輸入層方格紋神經元的狀態。

以類神經網路技術於 PIFS 解碼之基本構想如圖 5 所示，大致上觀念和圖 4 類似；也就是把每一個像點看成是一個神經元，由於 PIFS 的碎形碼是把原定義域的影像縮小 1/4，故可以看成是 4 個神經元（定義域）和另一個神經元（值域）

相連接。詳細步驟說明如下：

如圖 5 所示，輸入層定義域 1 與定義域 2，分別對應於輸出層值域 1 與值域 2，值域中每個神經元都和對應的定義域中相對位置中的 4 個神經元連接。因為定義域 1 及定義域 2 相重疊，所以重疊部份的神經元（斜紋部份的兩個神經元）同時連接兩個不同值域的神經元。

在解壓縮之過程中，神經鍵值和閾值均固定不變，而且輸出層的狀態會重新輸入為相同位置（對照原影像）輸入層神經元下一時間的狀態。在圖 5 中，如輸出層方格紋神經元即是下一時間裡輸入層方格紋神經元的狀態。

1. 網路的拓樸：

如圖 5 所示，網路為一不具隱藏層的拓樸結構，每一層都具有和影像像點相同數目的神經元。網路的連接方式為輸出層每一個神經元都和輸入層相對應的 4 個神經元相連接，因為定義域可以相互重疊，所以輸入層每個神經元可以連接不只一個輸出層的神經元，也可以不和任何輸出層的神經元相連接。

2. 神經元的狀態：

在每一迴圈時間 t （第 t 次逐次運算）時，輸入層神經元 i 的狀態為 $z_i^{(t)}$ （當 $t=0$ 時， $z_i^{(0)}$ 為 0~255 內任意值），輸出層神經元 j 的狀態為 $z_j^{(t)}$ ；而神經元 i 、 j 的鍵值為 w_{ji} 與神經元 j 的閾值為 θ_j ，已由壓縮過程中的類神經網路求得，因不隨時間改變，故沒有上標。

3. 神經元狀態的改變：

設輸出層神經元 j 在時間 t 之輸出值 $z_j^{(t)}$ 如式 (7) 所示：

$$z_j^{(t)} = o_j \left(\sum_{k=i}^{i+3} w_{jk} \times z_k^{(t)} - \theta_j \right) \quad (7)$$

在時間 $t+1$ 下，輸入層神經元 j 的狀態 $z_j^{(t+1)}$ 為前一時間 t ，輸出層神經元 j 之輸出值：

$$z_j^{(t+1)} = z_j^{(t)} \quad (8)$$

如此反復的執行，直到穩定為止。

五、實驗結果

依照我們所提的類神經網路架構，以 Lena 和 Bridge 兩張影像為例子，進行影像之壓縮與解壓縮，算出其尖端信號雜訊比 (Peak Signal Noise Ratio, PSNR)，以了解影像的失真情況，PSNR 的意義如式 (9) 所示：

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{B}{rms} \right) \quad (9)$$

其中 B 為灰階值之最大可能值 (本文定為 255), rms 為原始影像和壓縮/解壓縮後灰階值差的均方根:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i^{rnc} - z_i')^2}{N}} \quad (10)$$

其中, z_i^{rnc} 為原始影像上的灰階值, z_i' 為壓縮/解壓縮後的灰階值, N 為影像上所有的像點數量。

表 2 是 Lena 和 Bridge 兩張影像以我們類神經網路技術進行的 $PSNR$ 值:

表 2. 類神經網路於碎形影像壓縮的 $PSNR$ 值

影像資料和 $PSNR$	Lena	Bridge
原始影像大小	512x512	640x480
原始影像資料量	262144	307200
壓縮編碼大小	45634	40499
$PSNR$	27.666	26.795

圖 6 是 Lena 的原始影像和以我們的類神經網路壓縮, 再解碼出來的影像, 圖 7 是 Bridge 的原始影像和解碼出來的影像。經由比較, 可以發現以我們的類神經網路架構來執行碎形影像壓縮/解壓縮, 可得到不錯的結果。



(a).Lena 的原始影像。

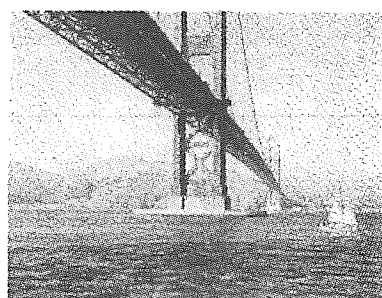


(b).以類神經網路解壓縮後的 Lena 影像。

圖 6. 兩張 Lena 的影像用來評估我們的方法。



(a). Bridge 的原始影像。



(b).以類神經網路解縮後的 Bridge 影像。

圖 7. 兩張 Bridge 的影像用來評估我們的方法。

六、結論

碎形原理為目前影像壓縮/解壓縮技術發展的一個重要研究領域, 因為它有高壓縮比、低失真率等特性, 對於資料儲存和傳輸時間都有很大貢獻。但是它的大量比對計算卻也令人咋舌, 因此如何加速碎形碼的搜尋及碎形影像的產生, 是一急待突破的瓶頸。

以類神經網路架構來建構 PIFS, 並處理由 PIFS 方法所產生的碎形碼, 已在本研究計劃中初步完成, 目前, 壓縮比率與傳統 PIFS 差不多, 並未明顯提高, 這部份, 我們認為應可以藉由提高類神經網路的訓練次數、調整學習速率與收斂方式等方向再做改善。此外, 因為類神經網路技術相當適合平行處理, 因此, 本論文為未來碎形影像壓縮/解壓縮之平行處理技術, 指引出一可行的研究方向。

參考資料

- [1] M. F. Barnsley, *Fractal everywhere*, New York, Academic Press, 1992.
- [2] M. F. Barnsley and A. D. Sloan, "A better way to compress images," *Byte*, vol.13, pp.215-223, Jan. 1988.
- [3] M. F. Barnsley, A. Jacquin, L. Reuter, and A. D. Sloan, "Harnessing Chaos for Image Synthesis," *Computer Graphics*, vol.22, no.4, pp.131-141, 1988.
- [4] A. J. Crilly, R. A. Eamshaw, and H. Jones, *Fractals and chaos*, Spring-Verlag London, 1991.

- [5] F. Davoine, M. Antonini, Jean-Marc Chassery, and M. Barlaud, "Fractal image compression based on delaunay triangulation and vector quantization," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol.5, no.2, pp.338-346, 1996.
- [6] S. Demko, L. Hodges and B. Nayloy, "Construction of fractal objects with iterated function systems," *Computer Graphics*, vol.19, no.3, pp.271-278, 1985.
- [7] K. J. Falconer, *The geometry of fractal sets*, Cambridge University Press, 1985.
- [8] Y. Fisher, *Fractal image compression*, New York, Spring-Verlag, 1994.
- [9] J. J. Hopfield and D. W. Tank, "Neural computation of decisions in optimization problems," *Biological Cybernetics*, vol.52, pp.141-152, 1985.
- [10] A. E. Jacquin, "Image coding based on a fractal theory of iterated constructive image transformations," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol.1, no.1, pp.18-30, 1992.
- [11] A. E. Jacquin, "Fractal image coding: a review," *Proceedings of the IEEE*, vol.81, no.10, pp.1451-1465, 1993.
- [12] H. T. Kung, "Why systolic architecture," *IEEE Computer*, pp.37-46, Jan. 1982.
- [13] R. P. Lippmann, "An introduction to computing with neural nets," *IEEE ASSP*, pp.4-23, Apr. 1987.
- [14] B. Mandelbort, *The fractal geometry of nature*, San Francisco, CA: freeman, 1982.
- [15] M. Mougeot, R. Azencott, and B. Angeniol, "Image compression with back propagation using different cost functions," *Neural Network*, vol.4, no.4, pp.467-476, 1991.
- [16] M. Nelson, *The data compression book*, 2nd ed., M&T books, New York, 1996.
- [17] Soo-Chang Pei, Chien-Cheng Tseng, and Ching-Yung Lin, "A parallel decoding algorithm for ifs codes without transient behavior," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol.5, no.3, pp.411-415, 1996.
- [18] D. C. Propescu, A. Dimca and H. Yang, "A nonlinear model for fractal image coding," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol.6, no.3, 1997.
- [19] E. Shusterman and M. Feder, "Image compression via improved quadtree decomposition algorithm," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol.3, no.6, pp.207-215, 1994.
- [20] J. Stark, "Iterated function systems as neural network," *Neural Network*, vol.4, no.5, pp.679-690, 1991.
- [21] J. Stark, "A neural network to compute the Hutchinson metric in fractal image processing," *IEEE Trans. on Neural Network*, vol.2, no.1, pp.156-158, 1991.
- [22] K. T. Sun and H. C. Fu, "A hybrid neural network model for solving optimization problems," *IEEE Trans. on Computers*, vol.42, no.2, pp.218-227, 1993.
- [23] K. T. Sun and H. C. Fu, "A neural network implementation for the traffic control problem on crossbar switch networks," *International Journal of Neural Systems*, vol.3, no.2, pp.209-218, 1992.
- [24] D. W. Tank and J. J. Hopfield, "Simple neural optimization networks: an A/D converter, signal decision circuit and a linear programming circuit," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol.cas-33, no.5, pp533-541, 1986.
- [25] L. Thomas and F. Derrai, "Region-based fractal image compression using heuristic search," *IEEE Trans. on Image processing*, vol.4, no.6, 1995.
- [26] L. Zhang, B. Zhang, and G. Chen, "Generating and coding of fractal graphics by neural network and mathematical morphology methods," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol.7, no.2, pp.400-407, 1996.
- [27] G. Zorpette, "Fractal: Not just another pretty picture," *IEEE Spectrum*, vol.25, Oct. pp.29-31, 1988
- [28] 傅治平, "混沌與碎形在影像壓縮上的應用", 台灣大學, 電機工程研究所碩士論文, 1992。
- [29] 林清詠, "碎形以及它在影像壓縮上的應用", 台灣大學, 電機工程研究所碩士論文, 1993。
- [30] 胡宗義, "碎形影像壓縮及其應用之研究", 台灣大學, 資訊工程研究所碩士論文, 1994。
- [31] 賴政坪, "以類神經網路及碎形幾何為基礎之連續 CT 影像肝臟輪廓擷取系統", 成功大學, 電機工程研究所碩士論文, 1994。
- [32] 郭育銘, "碎形影像壓縮結合分頻技巧之研究", 成功大學, 電機工程研究所碩士論文, 1995。
- [33] 許秉凱, "區域式碎形影像壓縮編碼法", 清華大學, 資訊科學研究所碩士論文, 1996。
- [34] 黃逸輝, "利用類神經網路於影像壓縮及震測訊號處理", 交通大學, 資訊科學研究所碩士論文, 1992。
- [35] 陳樹發, "以碎形幾何為基礎之影像分析", 清華大學, 資訊科學研究所碩士論文, 1991。
- [36] 林治彬, "以碎形為基礎的數位影像壓縮技術", 台灣大學, 電機工程研究所碩士論文, 1995。
- [37] 葉怡成, 類神經網路模式應用與實作, 第四版, 儒林書局, 1995。