臺大管理論叢 2015/12
第 26 卷第 1 期 181-208
DOI: 10.6226/NTUMR.2015.JUN.A102-050

水清無魚？印表機的技術變遷

No Turbulence in River, No Fish? Technological Change in Printers

洪世章 / 國立清華大學科技管理研究所教授
Shih-Chang Hung, Professor, Institute of Technology Management, National Tsing Hua University

賴俊彥 / 國立清華大學科技管理研究所博士生
Jiun-Yan Lai, Ph.D. Student, Institute of Technology Management, National Tsing Hua University

涂敏芬 / 淡江大學企業管理學系助理教授
Min-Fen Tu, Assistant Professor, Department of Business Administration, Tamkang University

Received 2013/7, Final revision received 2014/6

摘 要

本研究透過混沌理論的觀點與方法，探討 1976 年至 2010 年間，全球印表機的技術變遷。混沌理論提供非線性的思考模式，並對於技術變遷所隱含的連續與不連續、秩序與失序，具有概念上的啟發意涵。本研究先以兩種量化分析工具：局部赫斯特指數與局部李雅普諾夫指數，來檢視印表機產業是否呈現長期記憶與局部混沌，接著再應用此結果來引導個案分析。研究結果發現 1988 年 9 月至 1992 年 10 月經歷第一次混沌，2008 年 4 月至 2009 年 11 月經歷第二次混沌，且在每一次混沌後，產業中技術典範的脫穎而出，正如水中的魚在濁水中於焉而生。

【關鍵字】混沌理論、局部赫斯特指數、局部李雅普諾夫指數、印表機、技術變遷

Abstract

This paper examines the chaos of technological change in printers during the period 1976~2010. Chaos theory, developed to reveal the structure of nonlinearity, provides implications for the relationship between continuity and discontinuity, order and disorder in technological change processes. To apply chaos theory to technological change, we used two mathematical tools, local Hurst exponent (LHE) and local Lyapunov exponent (LLE), to detect the long-term memory and chaotic patterns in printers. The results of this quantitative analysis were then used to guide our interpretative analysis of technological changes in printers. Findings show that chaos occurred in the periods from September 1988 to October 1992, and from April 2008 to November 2009. Paradigms or standards emerged after those chaotic periods, just like the fish would appear in the turbulence.

【Keywords】chaos theory, local Hurst exponent, local Lyapunov exponent, printers, technological change

壹、導論

混沌理論、量子力學與相對論是二十世紀物理學界最重要的三個發現 (Gleick, 1987)，其中混沌理論修正了古典力學下的線性思維。在混沌觀的世界中，並非遵循傳統「種瓜得瓜、種豆得豆」的線性因果循環，而是主張初始狀態的微小變化，有可能經過某種演化程序後，對未來造成巨大影響，這就是眾所皆知的「蝴蝶效應」(Butterfly Effect)。蝴蝶效應解釋亂中有序的現象，亦即在一個看似隨機、無秩序的系統中，背後根本上隱含著某種簡單法則與根本秩序，來導引系統行為的表現 (Prigogine, Stengers, and Pagels, 1985)。混沌理論的應用不只侷限在自然界，社會科學學者也開始相信混沌觀點可以用來解釋不可預測性的動態過程。遵循這個研究軌跡，我們將探討技術變遷的混沌過程與發生原因，並以印表機技術為研究個案。

方法上，同時結合量化與質性的分析方式，由於混沌理論強調以數學運算之分析，因此利用美國專利與商標局 (USPTO) 資料庫為實證資料來源，擷取 1976 年 1 月至 2010 年 12 月的專利，做為該產業創新的代理指標，並搭配局部赫斯特指數 (Local Hurst Exponent; LHE) 與局部李雅普諾夫指數 (Local Lyapunov Exponent; LLE) 進行量化分析。前者可幫助我們描述創新的發生並非隨機，且存在長期記憶、長期相依與混沌的特質，屬於宏觀的角度；後者則可幫助我們找出發生混沌的確切時間點，屬於微觀的角度。接著，再以量化分析所得出的結果，引導本文進行質性的個案描述。

本文分成六個段落。第一段落為導論。第二段落為本文的理論背景，依序針對混沌理論、混沌理論的應用、以及用混沌觀點解釋技術變遷。第三段落為研究方法，說明美國專利與商標局之專利資料，如何透過局部赫斯特指數與局部李雅普諾夫指數進行運算，並接續說明質性資料的來源。第四段落為量化分析的結果呈現。第五段落為個案描述，透過質化的方式闡述量化分析之結果，並以此找出關鍵創新因素。第六段落則為本文討論與結論。

貳、理論背景

一、混沌理論

混沌理論起源於 1960 年代 Lorenz 對於氣象系統一系列的觀察與研究，他發現此動態系統對初始條件的些微差距，隨著時間的推移，終將導致南轅北轍的差異，這就是初始條件的敏感依賴性，也被稱為蝴蝶效應。Lorenz (1963) 認為此動態系統雖然看似混亂，卻隱含著根本的秩序與簡單的法則，即亂中有序，雖然演化路徑難以預測，但其實隱含著某種規則，而 Li and Yorke (1975) 稱之為「混沌」。Mandelbrot (1975) 從幾何圖研究中試圖解答混沌系統中晦暗不明的秩序，他在觀察英格蘭海岸線長度後，在維度的思考上提出碎形 (Fractal) 的概念，碎形意指一個粗糙零碎的幾何圖，如

果進行尺度的微縮，會發現小尺度的幾何構造和大尺度極為相似，這種現象被稱為尺度的不變性 (Thiétart and Forgues, 1995)。

對於碎形圖的秩序行為，Ruelle and Takens (1971) 所提出的吸子 (Attractor) 正可用來解釋與理解之。吸子是迭代系統在有限的相空間中，隨著時間演化的軌跡所圍繞成某種結構或樣式，可以想像成一個點集合，其概念類似碎形圖。混沌系統所形塑的奇異吸子 (Strange Attractor) 是由無數個點所組成，且軌跡永不重複，同時具備不可逆性與不可預測性。勞倫茲吸子為典型的奇異吸子，Lorenz (1963) 透過三條常微分方程式在相空間中繪製而成，其結構與外觀所展現出來的秩序便是類似蝴蝶展翅的外觀。

二、混沌理論的應用

混沌理論的應用起初被應用在物理、數學與拓撲等領域中 (Kauffman, 1996)，主要是透過數學模型的建立來模擬與預測系統行為。而後，這種數學的量化工具被學者借用來討論社會現象 (Loye and Eisler, 1987)，並用一種概念性隱喻的方式，在混沌理論與社會現象之間建立聯想關係，用來研究諸如經濟、產業與組織、策略等研究議題，用來解釋社會現象之不可預測性的動態過程。

在經濟研究中，從 1980 年代開始許多學者利用混沌的非線性觀點解釋經濟系統的動態性，主張考量不理性的假設才能更符合現實的經濟現象，尤其混沌經濟學特別強調的報酬遞增現象，正是蝴蝶效應的另一種說法。Day (1983) 闡述在古典的經濟成長模型中如何顯現出混沌的波動。Baumol and Quandt (1985) 則研究廣告支出與利潤所得之間的關係，在長期下將會導致大幅度且不可預測的震盪。

在產業與組織研究中，產業與廠商的變化之所以難以預測，原因在於產業內部存在眾多利害關係者，長期互動下使得產業的變化趨向複雜且難以預測。同時，組織可以被概念化為一個開放、複雜且非線性的動態系統 (Levy, 1994)，同時受制於趨向穩定的力量與趨向不穩定的力量 (Nonaka, 1988; Thiétart and Forgues, 1995)。標準作業程序與稽核考察制度可以被視為趨向穩定的力量；相對地，創業家精神與研發實驗過程則被視為趨向不穩定的力量。Navarro, Curioso, Gomes, Arrieta, and Cortes (2013) 便指出組織內部對於員工的激勵模式呈現非線性的碎形結構，隨著時間呈現劇烈的變動。若從制度的觀點來看，Radzicki (1990) 認為組織與制度的混沌特質有回饋機制、內生變化、路徑依賴與制度效果。回饋機制為系統的迭代作用，組織上一期的結果將成為下一期的初始值，並以類似物理學慣性定律 (Law of Inertia) 的方式依循著內生變化的結果演化。

在策略管理研究中，開始有學者思考為何有些企業在面臨突發危機時，仍然可以繼續生存下去，但有些即便面臨非常小的事件，也有可能一夜消失，因此衍生出混沌管理 (Chaos Management) 的概念。混沌管理特別強調管理者要如何面對競爭環境中巨

變所帶來的影響，例如 2009 年的金融風暴，使得一般所認知的管理方法並非放諸四海皆準。Sanders (1998) 便闡述混沌理論如何和策略相結合外，並呼籲在這個快速變遷的環境中，管理者在擬定策略時，應該培養對於現況與未來的洞察力。Kotler and Caslione (2009) 則指出企業在面對不可預測的競爭環境時，需要建立起自身的預警機制，來減少這些突發事件帶來的傷害。

三、混沌觀點解釋技術變遷

在本文裡，我們則是援引混沌觀點解釋技術變遷，特別是混沌觀點中所寓含之秩序與混沌的二元特性，在時間的軸面下，將形成一個週期交替的軌跡，而此將呼應到技術變遷過程中技術典範的更迭交替。

單一技術典範的生命週期可繪成一條 S 曲線 (Foster, 1986; Frenken, 2006)，先後具有萌芽、成長、成熟與衰退四個階段，當技術變遷經過反曲點，績效的改善便會逐漸減緩，直到逼近物理極限，此技術便逐漸被淘汰。然而技術典範的移轉就有如兩條 S 曲線。當既有的 S 曲線演化到晚期時，績效改善的空間有限，此時後繼的 S 曲線便開始萌芽，直到既有的 S 曲線逐漸被後繼的 S 曲線所淘汰。在既有曲線和後繼曲線之間產生技術的不連續面，會為產業帶來騷動，且廠商之間的競爭加劇。

就技術變遷的長期過程來看（可包含多條 S 曲線的替換），S 曲線上的漸進式改變顯露出連續特質，而在多條 S 曲線競逐技術標準的當下則是顯露出不連續特質 (Foster, 1986)。而此，亦可從混沌視角中象徵隱喻所寓含的矛盾二元性（秩序與混沌、確定與不確定、可預測與不可預測）來闡釋。換句話說，長期演化中二元特性的交替，意味著產品發展與製造過程的不同階段隱含著不同的創新內涵 (Utterback and Abernathy, 1975)。連續面隱含技術的漸進式創新，在這段期間產業存在著一個技術典範，並依照路徑依賴的特性進行演化 (Liebowitz and Margolis, 1995; Rycroft and Kash, 2002)；不連續面則隱含技術的激進式創新，在多個技術的競逐下，將有其中之一在劇烈的競爭環境中脫穎而出，遂而進入下一個新的技術典範。於是乎，「連續－不連續－連續」的循環演化，彰顯了技術週期的動態性交替軌跡 (Anderson and Tushman, 1990)。

混沌理論恰可為本研究對於印表機技術變遷提供動態性的觀點，且兩者存在著許多相似性 (Hung and Tu, 2014)。首先，混沌理論與技術變遷均強調時間的依賴性，經過時間的長期累積，蝴蝶效應將會發生；對比至技術變遷，同樣也需要長時間進行演化，新舊技術才會發生替代效果。其次，不可逆性也是兩者的共有特質，此特質在混沌系統中係指吸子的軌跡永遠不會重複過去的路徑，亦即「你將不會涉入相同的河水兩次，即使你站在同一個位置」，這個比喻經常被用來解釋不可逆性。對比至技術變遷的管理意涵，意指在技術開發過程中的一個策略或決策的執行，將不會在相同的情

境脈絡下發生兩次 (Ketterer, 2006)。最後，技術變遷與混沌理論都隱含著類似慣性定律的路徑依賴，兩者在某種程度上會抵抗不連續面的變革，依循現有的典範進行演化 (Mokyr, 1992; Herbig and Kramer, 1993)。

因此，引用混沌理論解釋技術變遷的動態性，「時間」是演化過程中的重要共同要素，使得我們觀察到技術變遷過程同時隱含著秩序與混沌的特質，而兩者的關係可用圖 1 說明。在不連續面上，產業與技術呈現混沌且不可預測，但此技術斷層結束後便會進入連續面上，新的技術典範脫穎而出。本研究將檢視印表機技術變遷是否曾經歷混沌的局面。

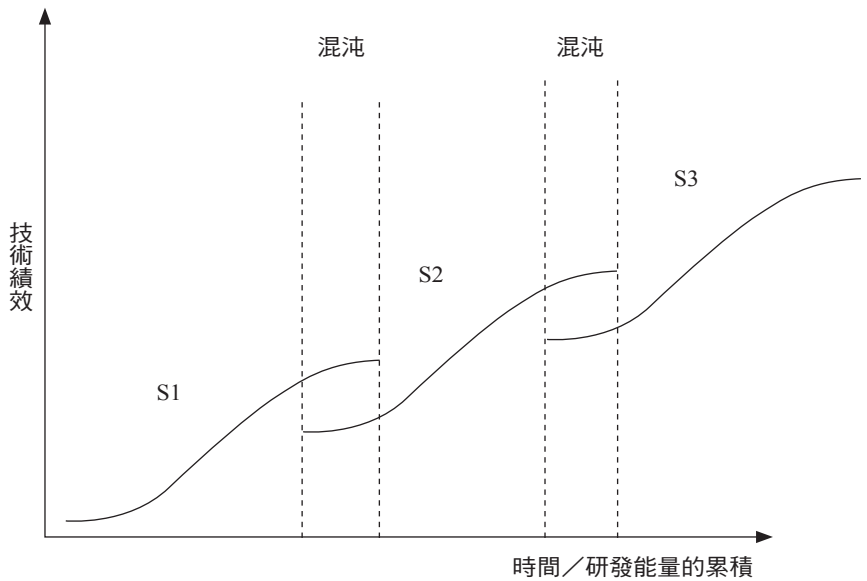


圖 1 技術變遷連續面與不連續面

參、研究方法

本文在研究方法上，是一個兩階段的過程，第一階段是以量化的數值分析為主，繼此，開啟第二階段的質化分析。

一、局部赫斯特指數

本研究使用的第一個量化之數值分析工具為局部赫斯特指數，可以宏觀地闡述系統行為整體而言是否具有長期相依程度，而長期相依即隱含著長期記憶的概念 (Lo,

1991)，並可衡量時序資料是否存在非線性的混沌現象特徵 (Musielak, Musielak, and Kennamer, 2005)。

換句話說，只要一個時序資料不存在隨機，則必定隱含著記憶的過程，意指時間序列資料在大範圍下行為的持續性，這種現象被稱為約瑟效應 (Joseph Effect) (Mandelbrot and Wallis, 1969)，此典故來自於《舊約聖經》中，約瑟精確預言埃及在經歷連續七年的豐收後將遭遇連續七年的飢荒，豐收和飢荒並非呈現隨機分布。因此，長期記憶性可概念化為混沌系統形塑奇異吸子的潛在力量。

赫斯特指數的作法是將整個時序資料視為一個有 n 筆資料的總系統 X_s:{X_1,X_2,...,X_n}，取其平均數 $\overline{X}$，計算每筆資料對於此平均數的離差值，每一筆離差值再向前累加得出累計離差，此累計離差可以被視為新的時間序列。之後我們在累計離差中找出最大與最小值，相減得到全距 R，R 與樣本標準差 S 相除便得到 R/S 統計量。Hurst (1956) 認為當樣本數趨近於無窮大時，R/S 統計量符合德國物理學家 Albert Einstein 於 1908 年對於布朗運動的描述，詳見公式 1：

$$\left(R/S\right)_n = \lim_{n\to\infty}\frac{1}{S}\left[\max_{1\le t\le n}\sum_{i=1}^{t}(x_i-\bar{x}) - \min_{1\le t\le n}\sum_{i=1}^{t}(x_i-\bar{x})\right] \sim a(n)^H \text{，} S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}$$

……（公式 1）

若只看前後項，分別取對數後則可表達成：

$$\log(R/S)_n \sim H\cdot log(n) + log(a) \quad \text{……（公式 2）}$$

公式 2 中，雙對數方程式中的 H 便是赫斯特指數，同時也是雙對數坐標系中此方程式的斜率，其理論範圍界在 0 和 1 之間。若 $0 \le H < 0.5$，則時序資料呈現反持續性；若 $0.5 < H \le 1$，則時序資料呈現正持續性，表示系統存在長期記憶性；若 $H = 0.5$ 時，則時序資料為隨機遊走。Mandelbrot (1982) 演繹碎形維度 (Fractal Dimension，慣稱 D) 如何由赫斯特指數推導：若 $0 \le H < 0.5$，則 $D = 1/(1-H)$；若 $0.5 < H \le 1$，則 $D = 1/H$；若 $H = 0.5$，則 D = 2。因此，從維度的思維來看，時間序列若呈現長期記憶性，其維度為分數維度，便可知道時序資料正處於混沌的系統中。

然而在計算赫斯特指數中，若 $H > 0.7$ 時通常會有高估的現象，而 $H < 0.4$ 時會有低估的現象，為了要能夠更精確估計出 H，本研究採用線性迴歸的方式，透過最小平方法求算 H，這有別於傳統一次性的作法，又被稱為天花法 (Pox Diagram) (Mandelbrot

and Wallis, 1969; Boes and Salas, 1978; Mesa and Poveda, 1993)。首先，將整體時間序列分成 n/τ 個子系統，τ 為子系統內部的資料數，並計算每個子系統之 R/S，取其期望值 $\mathrm{E}\left(R/S\right)_\tau$，以此為線性迴歸的應變數，以子系統內的長度取對數為自變數 $\log(\tau)$。因為整體時序資料可以被分成數個不同長度的子系統，因此就可以透過以下雙對數方程式來估算 H 之值，此處的 H 就是局部赫斯特指數，標記為 H_{loc} 或是 LHE，判別方式與先前所述一樣，若 $0.5 < H_{loc} \leq 1$ 時，時序資料便呈現長期記憶的混沌特質。

$$\log\left(E\left(R/S\right)_\tau\right) = log(a) + H_{loc} \cdot log(\tau) \quad \text{……（公式 3）}$$

二、局部李雅普諾夫指數

本研究使用的第二個量化分析工具為局部李雅普諾夫指數，可以微觀地幫助我們找出混沌系統中發生混沌的時間點。

李雅普諾夫指數強調時間序列資料在空間中初始狀態經過時間演變後的發散現象，同時李雅普諾夫指數也代表空間中指數發散或收斂的平均速度 (Wolf, Swift, Swinney, and Vastano, 1985)，若時序資料呈現指數發散，則此系統可被判定為混沌系統。李雅普諾夫指數的計算方式，是在時序資料中隨意找兩個點 X_i 與 X_j，這兩點的差距非常短、非常靠近，可以用 $X_j = X_i + \delta$ 表達，δ 非常小。之後得到初始距離 $d_0 = |X_j - X_i|$，依此類推，可以得到在不同時間點下 δ 的發散狀態 (δX_i)：

$$\delta X_1 = d_1 = \left|X_{j+1} - X_{i+1}\right|$$

$$\delta X_2 = d_2 = \left|X_{j+2} - X_{i+2}\right|$$

$$\vdots$$

$$\delta X_n = d_n = \left|X_{j+n} - X_{i+n}\right| \quad \text{……（公式 4）}$$

以上由距離所形成的資料可被視為一個迭代系統，若距離隨著時間的演變而呈現指數發散，即可描述此系統呈現混沌現象，請見公式 5 的表達：

$$\delta X_n = d_n = d_0 \cdot e^{\lambda n}，n \to \infty$$

$$\lambda = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} ln\left(\frac{d_n}{d_0}\right) = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} ln\left(\frac{\delta X_n}{\delta X_0}\right) \quad \text{……（公式 5）}$$

此 λ 便是李雅普諾夫指數，因為呈現出宏觀的局面，因此特別被稱為極大李雅普諾夫指數 (Maximal Lyapunov Exponent; MLE)，標記為 λ_{MLE}。若 $\lambda_{MLE} < 0$，代表指數迭代速度收斂，可判定此迭代系統趨於穩定，原本很靠近的兩個點在經過 n 次迭代後會更靠近；若 $\lambda_{MLE} = 0$，代表指數迭代速度穩定，則此迭代系統呈現週期性運動；若 $\lambda_{MLE} > 0$，代表指數迭代速度發散，則此迭代系統具有混沌的現象，將在有限的相空間中形成看似混亂、但又存在某種規律的奇異吸子。

相對於極大李雅普諾夫指數，局部李雅普諾夫指數可以估計局部的特徵 (Wolff, 1992; Strogatz, 1994; Kiel and Elliott, 1996; Jayanthi and Sinha, 1998）。整體系統可以依照不同的初始值分成數個子系統，若共有 n 筆資料則有 n 個以 X_i 為初始值的子系統。初始值的選取對於局部李雅普諾夫指數具有重要影響，標記為 $\lambda_{LLE} = \lambda_{LLE}(X_i)$。$\lambda_{LLE}$ 呈現起初相當接近的兩個事件，其發展軌跡經過時間的演化後會呈現發散或是收斂的狀態 (Schuster and Just, 2005)，且任何一個系統都會存在著 $\lambda_{LLE} < 0$ 或 $\lambda_{LLE} = 0$ 的子系統，但如果在某些時段發生 $\lambda_{LLE} > 0$ 的情況，則可判斷在這段時間內呈現混沌的狀態。

本研究在實證中將遵循幾點規則。在實際操作上是使用線性迴歸的方式估計每個子系統的 λ_{LLE}，並且使用 R^2 大於 0.36 的點做為判斷是否呈現混沌的依據。另一方面，本研究關注一個有限系統下的發散過程，因此迭代的次數不能太長，本文設定每個子系統的長度為 12，同時避免過於靠近的兩個點其行為表現過於相似，X_i 和 X_j 至少要超過 2 年（24 期）。

三、資料蒐集

在量化分析部分，本研究以美國專利商標局 (USPTO) 在 1976 至 2010 年間的專利申請數為原始資料，並且以月份為單位，共計有 420 筆資料。由於單筆專利資料的文章長度約為一般報紙與雜誌的 24 倍 (Kang, Na, Kim, and Lee, 2007)，為了能夠找出具有代表性的專利資料，本研究透過三個步驟來蒐集專利資料。首先，擷取印表機專利最常使用的技術詞彙，本研究是以國際專利分類號 (International Patent Classification; IPC) 為依據，理由是 IPC 是一種專利排列、組織、分類與搜尋的標準分類方式，透過 IPC 可以加速專利資料的管理 (Kang et al., 2007)；其次，將這些技術詞彙在 USPTO 進行檢索，找出主要落在哪些 IPC；最後，以這些 IPC 為基礎發展檢索詞彙。

本文先試圖以「printer」做為關鍵字在專利資料庫閱讀近幾年之專利申請，並透

過人工閱讀的方式擬定幾個常出現的技術詞彙，再經由工研院相關專家之確認，最終歸納七個技術詞彙，分別是 dot matrix、ribbon、inkjet、piezoelectric、laser printer、drum、multifunction。若以 IPC 之 3 階表達，本研究發現印表機專利大約落在表 1 所示的五個集群，其中又以「B41J」所占的比例是最高的。

表 1 印表機技術最常集群的 5 個三階 IPC

IPC	技術意涵
B41J	打字機；選擇性印刷之印刷機構、及不用印版之印刷機構；排版錯誤之修正。
G06F	電子數位資料處理。
G01D	非專用於特定變量的測量；不包括於其他單獨次類內的測量兩個或多個變量之裝置；非專用於特並變量的移轉與轉換裝置；計費設備；其他類目部包括之測量或測試。
G06K	數據識別；數據表示；紀錄載體；紀錄載體之處理。
H04N	影像通信，例如電視。

基於以上結果，結合布林邏輯的技巧，本研究擬定檢索語法如下：

ICL/(B41J$ or G06F$ or G01D$ or G06K$ or H04N$) AND
ACLM/printer$ AND APD/month/day/year->month/day/year

圖 2 是本研究在 USPTO 進行檢索後的結果分布，總共有 27,979 筆專利資料，但為了使此資料呈現出同為一個系統的特質，每月份的資料數除以總資料數，以小數點的方式表達，如此一來 420 筆資料的和為 1。

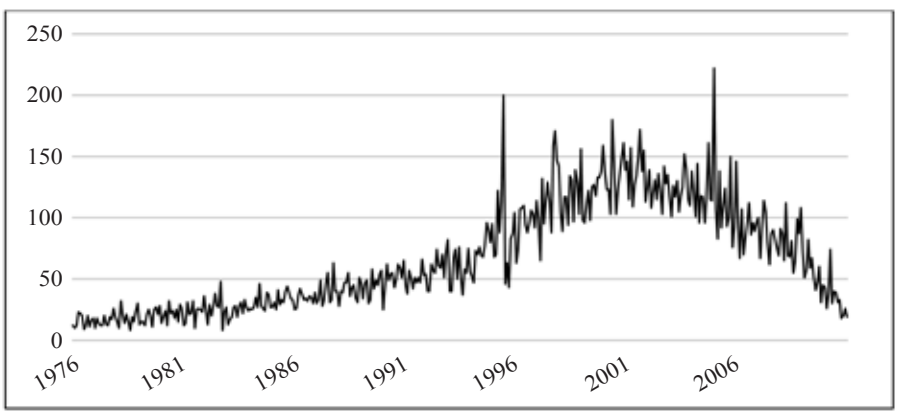


圖 2 在 USPTO 進行檢索後的分佈結果

四、質化資料蒐集

本研究將以混沌分析之量化結果引導質化的產業分析。為了這階段的分析，我們引用了兩個不同類別的資料來分析現實世界印表機技術變遷的過程。次級資料來源有學術期刊、報章雜誌、網路資料、產業分析報告，本研究同時參閱印表機製造商發行的期刊（如 HP Journal）以及官方網站所整理的歷史回顧，且為了找出關鍵歷史事件，本研究還檢視聯合報系的媒體資料庫平台聯合知識庫。在初級資料來源上，我們相當程度倚賴產業專家與技術工程師的訪談資料來瞭解印表機技術的發展。我們的目的在於連結實證觀察的資料與數值分析的模型，來建立起對於採用混沌觀點的個案研究之綜合描述。

肆、量化分析

一、局部赫斯特指數運算結果

用天花法估計赫斯特指數時，每個子系統的長度 (τ) 不能小於 10 筆資料，否則將產生誤差 (Peters, 1991)。因此，本研究選定子系統時間長度分別為 10、12、15、20、30、42、60、70、84、140、210、420。天花法在估計赫斯特指數時，是採用最小平方法之線性迴歸的方式。圖 3 的 L1 顯示運算後所得的結果，直線斜率 1.1243，R^2 高達 0.9887，但是在理論上，H_{loc} 應該介於 0 與 1 之間，若不在此範圍，有可能是因為赫斯特模型無法解釋此時間序列，抑或是此資料為一個非穩定的時間序列 (Park and Park, 2009)。為了使此模型能解釋原始資料之特質，因此採用差分整合移動平均自迴歸模型 (Autoregressive Integrated Moving Average Model; ARIMA) 來處理原始資料，使之成為一個穩定的時間序列。

ARIMA 是最常用來處理隱含趨勢或季節性的時間序列資料。其核心概念是為時間序列資料配置一個模型，模型中有參數 p、d、q，可以近似此時間序列的資料產生過程。雖然 ARIMA 無法配置一個 100% 完全符合的模型，但可以透過各種檢定方式近似原始資料的產生過程。本研究最終選定模型 ARIMA (5, 1, 5) 做為配置模型。圖 3 的 L2 是處理過後重新計算的結果，新的 H_{loc} 為 0.6571，在合理範圍的 0 與 1 之間，且 R^2 也有 0.9804。

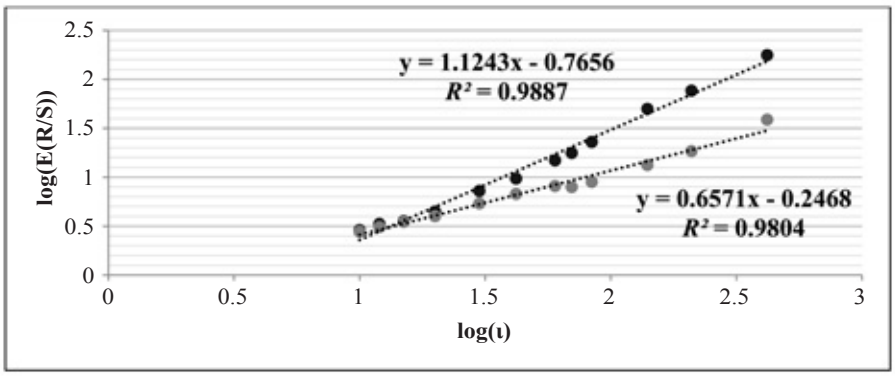


圖 3 赫斯特指數的運算結果

從圖 3 之結果顯示：印表機的技術變遷呈現長期記憶的正持續性，即未來的發展深受過去的歷史經驗與路徑所影響。根據 Mandelbrot (1982) 所提出由赫斯特指數推導碎形維度之方法，可以得知原始資料之維度為 1.52183，介在 1（直線維度）與 2（平面維度）之間，為一個存在碎形圖的非整數維度，即印表機產業在 1976 年至 2010 年間的技術變遷具有混沌的特質。然而至於那些時段呈現局部混沌，則有賴於局部李雅普諾夫指數的計算。

二、局部李雅普諾夫指數運算結果

局部赫斯特指數計算之結果可以得知 1976 年至 2010 年間的印表機技術呈現長期記憶性的混沌特質。接續，本研究試圖從局部李雅普諾夫指數的計算找出局部混沌的時間點。專利資料經過局部李雅普諾夫指數運算後，得到在 R^2 大於 0.36 的情況下有 16 個大於 0 的 λ_{LLE}，其分佈的時間點與 λ_{LLE} 詳見表 2。

表 2 R^2 大於 0.36 下局部李雅普諾夫指數大於 0 的子系統

時間點	初始值 X_i	λ_{LLE} (X_i)	$R^2 > 0.36$
1988/09	X_{153}	0.0430142	0.4442192
1989/11	X_{167}	0.0464987	0.3637524
1990/04	X_{172}	0.0865804	0.3787970
1990/06	X_{174}	0.0590689	0.6817732
1990/09	X_{177}	0.0480493	0.4087865
1990/10	X_{178}	0.0469053	0.3930188
1991/03	X_{183}	0.0523677	0.4032829
1991/12	X_{192}	0.0631878	0.6518722

時間點	初始值 X_i	$\lambda_{LLE}(X_i)$	$R^2 > 0.36$
1992/10	X_{202}	0.0819392	0.4178527
1996/08	X_{248}	0.0296600	0.4302681
1996/11	X_{251}	0.0330396	0.3910231
2008/04	X_{388}	0.1480783	0.3995237
2008/06	X_{390}	0.2922994	0.6657443
2008/07	X_{391}	0.1881203	0.5857399
2008/08	X_{392}	0.2227144	0.4985522
2009/11	X_{407}	0.0347454	0.4570881
		$\overline{\lambda_{LLE}} = 0.092266806$	

從表 2 可以知道，印表機技術變遷從 1976 年到 2010 年間呈現局部混沌，並且在某些時段中有群集的現象，本研究將大於 0 的 λ_{LLE} 所群集的時間點視為一個混沌狀態的發生，如此得到在兩個時間區間有發生技術變遷中的不連續面：1988 年 9 月至 1992 年 10 月、2008 年 4 月至 2009 年 11 月。雖然 1996 年 8 月與 11 月的 λ_{LLE} 也同樣大於 0，但因為時間過短，無法成為密集且顯著的群集，故本研究視之為異常值。圖 4 則呈現出大於 0 之 λ_{LLE} 所形成的兩個群集。

為了使混沌理論與技術變遷更加結合，本研究將 1976 年至 2010 年區分成 5 個時間區域，分別命名為 T1、T2、T3、T4 與 T5，如表 3 所示。T2 與 T4 所代表的就是局部混沌狀態，為印表機技術變遷的不連續面；而 T1、T3 與 T5 所代表的就是秩序與穩定，產業存在著技術典範，為技術的連續面。從本研究的量化分析可以知道，印表機的技術變遷呈現秩序與混沌交替的局面。

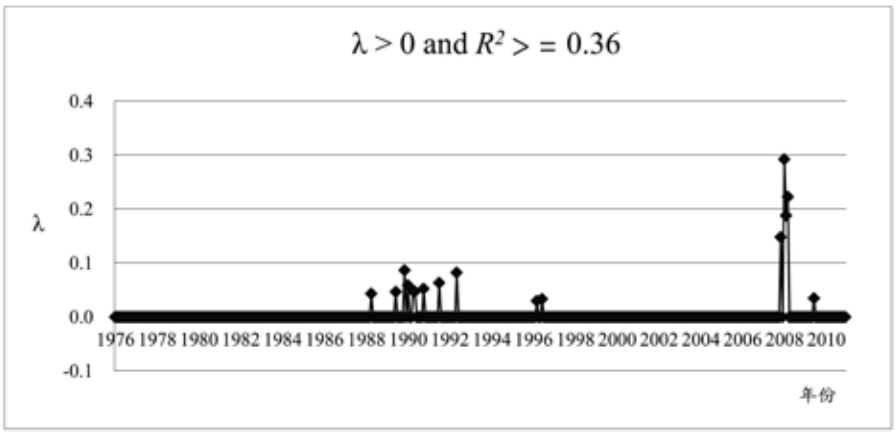


圖 4 印表機技術的局部混沌群集

表 3 印表機技術變遷的 5 個期間之比較

期間	$\overline{\lambda_{LLE}}$	時間	狀態
T1	-0.0101747	1976 年 1 月至 1988 年 8 月（152 月）	秩序
T2	0.0197830	1988 年 9 月至 1992 年 10 月（50 月）	混沌
T3	-0.0074026	1992 年 11 月至 2008 年 3 月（185 月）	秩序
T4	0.0673699	2008 年 4 月至 2009 年 11 月（20 月）	混沌
T5	0.00220364	2009 年 12 月至 2010 年 12 月（13 月）	秩序

三、研究發現

基於量化分析之結果可以得出兩個結論：（一）1976 年至 2010 年間的全球印表機技術變遷呈現長期記憶性，其技術的創新並不是隨機發生，而是受到過去的經驗與路徑所影響，為正持續性的創新過程，隱含混沌的特質；（二）1988 年 9 月至 1992 年 10 月以及 2008 年 4 月至 2009 年 11 月產生了局部混沌，混沌的產生是由於初始值的些微差距經過時間的演化下所產生的巨大差異，因此在混沌發生初期應該有關鍵的創新因素。我們的發現，可整理成：

發現一：1976 年至 2010 年印表機之技術變遷呈現不隨機的長期記憶性，並以正的持續性進行變遷，隱含混沌的特質。

發現二：印表機技術變遷的混沌特質展現在 1988 年 9 月至 1992 年 10 月、2008 年 4 月至 2009 年 11 月，這兩個時段印表機產業有關鍵創新因素，使得印表機產業呈現局部混沌。

本研究接著利用以上的兩個研究發現，以印表機產業發展為分析個案，來闡述印表機技術變遷。

伍、個案分析

從量化分析之發現一可以得知，印表機的技術變遷呈現長期記憶性的混沌，而從發現二可以幫助我們找出變遷過程當中發生混沌的時間點。在本節裡，我們將利用混沌量化分析結果，應用來分析與描述印表機在 1976 年至 2010 年間的技術變遷。

一、T1：點陣式技術的「卓爾不群」

此時期是 1976 年 1 月至 1988 年 8 月，產業的技術典範為點陣式技術，且在 1988 年以前一直都是高品質輸出的選擇，即便這段期間噴墨印表機與雷射印表機有許多研發活動與產品上市，但都無法撼動點陣式印表機卓爾不群的典範地位。

自從 1866 年美國發明家 Christopher Sholes 發明第一台商業化打字機後，擊打式技術深受消費市場歡迎，尤其在二次大戰後，消費市場對於打字機的需求日增，而擊打式技術也在早期成為印表機最初採納的技術。1968 年 Seiko 推出第一台商業化的點陣式印表機 EP-101，重量只有 2.2 公斤，標誌著點陣式印表機主宰市場的濫觴。1969 年 Diablo System 的研究員發明菊輪式印表機 Diablo 630，原理是一個槌子會去擊打金屬花瓣，每片金屬花瓣的頂端會有一個由字母或符號形成的字模，花瓣因為受到外力而去擊打墨帶，進而在媒介上印出相對應的字母或符號，且列印頭是可替換的。1970 年代產業發展出混合式打字機 (Hybrid Typewriter)，即打字機與印表機混合的設備，如 1971 年專注在縫紉機與打字機事業的 Brother 開發出高速點陣式印表機。

值得注意的是，雖然此時期噴墨印表機與雷射印表機被發明出來，且有許多研發活動，但在技術的成熟度上不如點陣式技術，因此無法撼動點陣式技術的主流地位。1969 年影印機製造商 Xerox 的研究員 Gary Starkweather 想到結合雷射光束與影印機創造出雷射印表機的概念，並且製造出機器的雛型，Xerox 基於在影印技術的核心能耐，成為雷射印表機的先驅者。而第一台商業化的噴墨印表機為 IBM 於 1976 年推出，採用 Lund Institute of Technology 的 Carl Hertz 教授所開發的連續式噴墨技術 (Continuous Inkjet; CIJ)，但因為無法有效控制噴墨的滴量，容易造成滲透，輸出品質太差，即便後來有控制液滴式的噴墨技術 (Drop-on-Demand; DOD) 被發明，噴墨技術仍無法取代點陣式技術。雖然如此，因為點陣式印表機有噪音等缺點，如何在不久的將來讓噴墨技術與雷射技術取代點陣式技術已是產業內的共識。

二、T2：噴墨式技術的「蓄勢待發」

此時期是 1988 年 9 月至 1992 年 10 月，產業歷經第一次的混沌，關鍵創新事件是 Hewlett Packard (HP) 推出 DeskJet 黑白噴墨印表機，此款印表機蓄勢待發，將正式終結點陣式技術的主流地位，並取而代之。

早在 1984 年 HP 便推出採用熱泡式技術的 ThinkJet 噴墨印表機 (Nielsen, 1985)，但並未獲得成功。直到 1988 年，DeskJet 系列產品可說是 HP、甚至是整個印表機產業中的重大創新，它內建的送紙器使得紙張可以連續輸送至機器內部進行列印 (Harmon and Widder, 1988)，同時蘊含著紙張的產業標準，且解析度達 300dpi，已達到當時雷射列印的水準。DeskJet 剛開始的售價約 995 美元，為雷射印表機的一半，一方面為了讓機器更具吸引力，HP 在往後幾年不斷調降機器的售價，1993 年時售價只剩 365 美元。另一方面，HP 將 DeskJet 的保固期限延長為 3 年，這也成為 HP 在印表機市場成功的關鍵之一，如此增加消費者對新技術的信心，最終使得 DeskJet 成為 HP 未來 20 年內最成功的產品之一。HP 基於 1988 年的成功，陸續推出同系列的印表機：1989 年的 DeskJet Plus、1990 年的 DeskJet 500、1991 年的 DeskJet 500C 則是 HP 第一

台彩色噴墨印表機，對於往後彩色噴墨印表機有深遠的影響力。

三、T3：噴墨式技術的「脫穎而出」

此時期是 1992 年 11 月至 2008 年 3 月，產業的技術典範為噴墨式印表機。噴墨式技術在經過上一階段的混沌期後，最終脫穎而出，取代點陣式技術。同時，隨著照相機的普及與桌上出版的風潮，噴墨式技術也朝向彩色化前進。

1990 年代開始底片相機的推廣達到巔峰，同時數位相機開始進入消費市場，大眾輸出照片的需求增加，此時的彩色噴墨以沖洗照片為主要用途，因此對於相機的使用者來說，彩色噴墨印表機成為首選。1994 年 Epson 順勢推出非文件列印的彩色噴墨印表機 Stylus Color 720，採用微壓電技術 (Micro Piezo)，解析度高達 720dpi，墨水匣則是紅、黃、藍三色和一盒獨立式黑色墨水匣，使得 Epson 在彩色噴墨印表機市場上比起同時期的競爭者表現更好，甚至威脅到龍頭 HP。除此之外，彩色噴墨隨著技術的精進、機器成本的降低，以及列印品質的提升，在 1996 年時彩色噴墨印表機已經佔所有噴墨印表機市場的 63%，躍然成為噴墨印表機的主流。進入 21 世紀後，印表機產業前四大領導品牌分別是 Canon、HP、Epson 與 Lexmark，但也有其他競爭者不斷加入此產業，如 2001 年韓國 Samsung 開始研發雷射印表機的省碳技術、2007 年傳統相片廠 Kodak 生產彩色噴墨印表機，更加劇印表機產業的競爭。

雖然噴墨印表機是此時期的技術典範，但雷射印表機與多功能事務機也有不錯的表現。此時期雷射印表機的列印速度比噴墨印表機更快、解析度更高，且列印文件可長久保存，但因為售價偏高，主要的使用族群為公司團體、共用網路使用群與個人工作室，普及率不如噴墨印表機。因此，各家廠商為了能夠儘速搶攻雷射印表機的市場，雷射印表機在 21 世紀初也面臨削價競爭的局面。另一方面，多功能事務機的概念也在這時期被提出來。1996 年產業界提出將列印、傳真、影印與掃描功能整合的構想，最早類似產品的是由日本 Alps Electric 推出名為 Scan-printer 的產品，並在隔年各家廠牌開始陸續推出類似的整合機，成為多功能印表機 (Multifunction Printer; MFP)，搶攻逐漸興起的 SOHO 族 (Small Office Home Office)，並在 2000 年以後 MFP 搭配噴墨技術成為印表機市場的主流型態。

四、T4：無線區域網路的「眾山響應」

此時期是 2008 年 4 月至 2009 年 11 月，產業歷經第二次的混沌，關鍵創新因素是無線印表機與網路印表機的推出，使得印表機在多功能事務機的整合上更趨成熟。過去產業並存著黑白與彩色噴墨、黑白與彩色雷射的技術，但無線區域網路的普及使得這些眾山頭相互響應，開始以整合式的多功能事務機為主流設計。

2000 年隨著多功能事務機的推出，便開始有辦公室網路化的構想以及無線印表機

的需求，當時採用的技術是屬於個人無線網路範疇的紅外線與藍芽，HP、Canon、Epson、Xerox 都有在研發藍芽印表機，但因為當時藍芽價格偏高，技術尚未成熟，且傳輸速度慢，因此並未在消費市場引起注意。2008 年正值另一種無線技術 Wi-Fi 普及的年代，也是智慧型手機剛推出之際，區域無線網路 (Wireless Local Area Network; WLAN) 對於人類日常生活的重要性愈來愈顯著，許多 3C 產品均有配置無線通訊晶片，智慧型手機也能透過 Wi-Fi 上網，許多網路社交平台也逐漸崛起。因此電腦周邊設備透過 Wi-Fi 除了朝向多功能事務機發展外，也結合無線區域網路。例如：Lexmark 於 2009 年推出首台無線列印的噴墨印表機 Lexmark X4550，以及有觸控螢幕功能的印表機。HP 與 Samsung 也在同年推出同時有無線上網功能與觸控的印表機，將印表機的技術推向整合與智慧化。

五、T5：多功能事務機的「天涯咫尺」

此時期是 2009 年 12 月至 2010 年 12 月，產業的技術典範為多功能事務機，更有廠商如 Google 與 Apple 推出結合雲端運算的列印技術，印表機距離不再是問題，距離遙遠卻仍可透過雲端與無線網路達到列印的需求，天涯咫尺的隨選列印得以實現。

Wi-Fi 印表機的出現衍生出另一種技術趨勢：雲端列印。Google 於 2010 年 4 月推出雲端列印，並可以整合瀏覽器 Google Chrome 與 Android 行動裝置。而 Apple 也在同年 10 月推出的 iOS 4.2 增加 AirPrint 的新功能，可使行動裝置隨時隨地列印，達到真正的隨選列印。

除了過去 50 多年的平面列印技術外，2010 年開始，由於用途增加與價格下降，3D 印表機開始進入主流市場。3D 印表機最早出現在 1980 年代，當時只被應用在模具或是模型的製作，在工業上達到快速雛型與快速製造，主要的製造商有 Object Geometries、Stratasys、3D Systems 與 Z Corporation。但 21 世紀開始，隨著應用層面的擴大，開始出現各種消費型 3D 印表機，如消費產品、醫療製藥、建築等用途，甚至有廠商設立電子便利站 (Kiosk) 與零售店。3D Systems 在 2013 年 CES 會展 (Consumer Electronics Show) 推出 Cubify 系列的家用 3D 印表機，標誌 3D 印表機將在未來從工業製造的利基市場轉往個人、家庭使用的主流市場。雖然 3D 印表機被英國《經濟學人》雜誌聲稱將在未來推動第三次工業革命，但是否真能成為未來列印技術的典範，仍然有待時間來驗證。

陸、結論與意涵

本研究對於混沌理論提供兩點意涵。第一、混沌理論對於複雜的社會現象具有相當的描述能力與解釋能力。混沌理論背後的概念相當簡單，但缺少相對直觀的分析方法，過去研究大多集中在非直觀的隱喻性與對比性研究，然而本研究專注在專利的實

證研究，透過量化的數值分析方式處理時間序列隱含的混沌特質，由此可知混沌理論可透過直觀的研究方法來解釋社會現象。第二、混沌理論對於管理者提供策略性的思考 (Stacey, 1993; Levy, 1994; Torbert, 1996)，產業、組織、制度以及本文探討的技術變遷均呈現複雜的互動過程，混沌的隱喻概念對於管理者而言充分顯示出競爭環境的演化動態。誠如本文所探討的個案，許多印表機的創新其實來自於不經意的策略行動，像是雷射印表機的構想來自於 1969 年 Xerox 內部研究員無意中的發想、熱泡式噴墨來自於 HP 在 Palo Alto 研究室一位薄膜技術的工程師無意中的構想，以上案例使我們不得不質疑長期規劃的有效性 (Pascale, 1999; McMillan and Carlisle, 2007)，而這也突顯出現代創新策略的實踐必須跳脫傳統線性的框架。

此外，本文對於技術變遷研究也有三點重要意涵。第一、技術變遷乃是一個動態的過程，同時受制於連續面與不連續面：連續面意味著產業存在著技術典範，技術變遷的長期記憶性表現在技術典範演化的路徑依賴，記憶性就是一種被技術典範套牢的力量；不連續面意味著產業存在一些關鍵創新事件，導致技術變遷呈現混沌局面，既有技術典範被新的技術典範所取代。本文先從局部赫斯特指數發掘印表機的技術變遷呈現長期記憶性，結果顯示為正的持續性，同時也應證了印表機產業存在著混沌的特質。

第二、雖然技術 S 曲線與技術週期說明技術在演進過程中會經歷技術典範的移轉，但卻未言明技術在移轉期間所發生的狀況，例如：技術移轉期間的長度、變動幅度會有多大等。但在本研究中，我們援引混沌工具分析印表機技術，得以具體化技術演進過程中的樣貌，特別是「混沌－秩序」的迭代交替。而這更透過局部李雅普諾夫指數發現技術變遷的局部特徵：1988 年 9 月至 1992 年 10 月呈現第一次混沌，來自於噴墨印表機的大量商品化，HP 的 DeskJet 為此時期動態系統中的關鍵創新事件，經過產業的內生變化後引發分岔，進而產生混沌的局部現象。2008 年 4 月至 2009 年 11 月呈現第二次混沌，來自於無線區域網路 Wi-Fi 與多功能事務機的整合，使得過去理想中的隨想列印得以實現。

第三、與第二點相關的是，第一次的混沌期間歷經約莫 50 個月，而第二次的混沌期間經歷約莫 20 個月，而對比整個觀察期間 420 個月，從混沌分析結果觀察得出，技術演進多數仍是處於漸進式改變的過程中（長達 350 個月），而創造性破壞的期間雖短，卻在混沌對初始值敏感依賴的路徑引導下，產生巨大影響。

最後，針對本文之研究限制有三點說明。首先，在個案分析方面，本文提供質性的個案描述來說明量化的分析結果，此時在本質上存在時間落差，因為量化分析使用專利申請數做為衡量技術變遷的代理指標，而在個案描述上是以印表機產品為主軸所建構而成的個案故事，因此其中在技術被開發出來以及商品化之間有時間落差，此為本文的第一個研究限制，而此亦可做為未來的研究方向之一，探討專利與產品間的時間落差是否隨產業演進而變動，例如：時間落差縮短或是商品化速度加快等議題。

其次，在代理指標方面，本文採用專利申請數做為衡量技術變遷的代理變數。然而，在混沌理論或非線性動態系統的研究中，有其他的代理變數可供後續未來研究參考，例如熱動力學的熵 (Entropy) 以及碎形維度。熵闡述動態系統具有朝向最大亂度的慣性，且不具可逆性 (Radzicki, 1990)，有如技術創新在演化過程中技術典範對過去被淘汰的技術展現絕對的優勢。而碎形維度則是以赫斯多夫維度 (Hausdorff Dimension) 的形式表達，如果一個系統的維度為非整數維度，則為混沌 (Grassberger and Procaccia, 1983)。本文在研究方法中曾提及碎形維度間接從赫斯特指數推導的方法，但並未深入討論，因此，如何直接以碎形維度做為研究方法是未來研究可以進一步著墨之處。

最後，在衡量係數方面，本文使用局部赫斯特指數與局部李雅普諾夫指數，然而過去赫斯特指數的應用較侷限在資本市場的研究，例如 Greene and Fielitz (1977) 與 Aydogan and Booth (1988) 對於股票收益率的長期記憶性研究，卻鮮少應用在商管領域的研究，而本文採用赫斯特指數來衡量印表機創新的長期記憶性是一大特點，但此方法尚有許多議題值得深入討論，例如技術變遷長期記憶性過程是否受到短期記憶性的干擾 (Lo, 1991)、V 統計量對於赫斯特指數的檢定，均是未來在創新與技術研究可以參考的議題與方向。

No Turbulence in River, No Fish? Technological Change in Printers

Shih-Chang Hung, Professor, Institute of Technology Management, National Tsing Hua University
Jiun-Yan Lai, Ph.D. Student, Institute of Technology Management, National Tsing Hua University
Min-Fen Tu, Assistant Professor, Department of Business Administration, Tamkang University

Summary

This paper draws on chaos theory to examine the technological changes in printers during the period of 1976 through 2010.

Chaos theory has been developed for decades to reveal the structure of non-linearity, arguing against the causality of "as you sow, so shall you reap"; namely, the cause is not linearly proportional to the eventual effect. More specifically, different outcomes will result when starting with exactly the same or slightly different variables in a chaotic or complex system. Managerial problems arise because of the sensitivity to small differences in initial conditions that cause long-term planning to be difficult.

Chaos theory has been applied in physics and mathematics to examine the behavior of non-linear dynamic systems through mathematical modeling. It has also been drawn upon to discuss complex social issues in the fields of economics, organization, and management.

In this study, we apply chaos theory to explore the technological change process. Arguably, technological change is analogously similar to biological evolution's three sequential stages: variation, selection, and retention; that is, some alternatives or variants would emerge in market, and some of them would then be selected and kept as the dominant technology by the consumer market. In terms of temporal dimensions, the three sequential stages could be inferred to and visualized as an s-curve, as they go through an alternation of generation over time.

The iterations of continuity and discontinuity along technological changes echo this observation. On the one hand, continuity refers to evolutionary, incremental innovation of a particular technological path evolving along the path of an s-curve. On the other hand, discontinuity reveals revolutionary, radical innovation commonly resulting from stochastic R&D breakthroughs. As such, the new path or paradigm tends to emerge after a series of discontinuities. In short, chaos theory provides implications for the relationship between continuity and discontinuity, order and disorder in technological change processes.

Some similarities exist between chaos theory and technological change processes. One similarity is that they both stress time dependence; it is necessary for a dynamic, recursive system to evolve over a long time period, otherwise the subtle difference will not be

amplified enough to display the butterfly effect. Similarly, the continuity-discontinuity loop of technological change also requires a long time period. Another similarity is that both chaos theory and technological change display dependence on the evolutionary path; in other words, technology evolves in a way that follows the accepted paradigm or standard.

During the discontinuity period, the industry seems to be tumultuous and unpredictable. It is always through this period that a new paradigm will emerge to govern the behavior. Just as the metaphor "fish in turbulence" implies, technological paradigms would not emerge, if technological change does not undergo discontinuous, chaotic dynamics.

Our investigation emphasizes the chaos of technological change, as it broadly follows the natural scientific methods of inquiry and justification logic. More specifically, the investigation is designed to be carried out in two stages. The first stage focuses on the deductive use of mathematics to generate theoretical propositions, and for this purpose, patent data are used. The aim is to develop idealized chaotic models of change that could be verified by empirical observations. The second stage of the research involves using real-world data from a historical review of industry activities to test the accuracy of the propositions established in the first stage (using chaos theory). Consequently, we adopt a pattern-matching approach to analyze the data from the industry review to formulate some working hypotheses. We then combine both quantitative and qualitative methods to enhance the validity of our study.

The first chaos tool used in our quantitative analysis is the local Hurst exponent. The Hurst exponent can be traced back to British hydrologist Harold Hurst, who in 1951 noticed that annual water levels are not independent of each other. He analyzed the water data by applying the Hurst exponent to assess the extent of long-term dependence, long-term memory, and the chaotic patterns of the time series data.

The second quantifier employed in our study is the local Lyapunov exponent, which can determine the precise time period of chaos. The Lyapunov exponent is named in honor of the great contributions of Russian mathematician and physicist Aleksandr Lyapunov to the stability theory. The Lyapunov exponent, providing a qualitative and quantitative characterization of dynamical behavior, is related to the exponential divergence or convergence of the nearby orbits in the limited phase space. Once the time series is diverging exponentially, the system could be diagnosed as a chaotic one.

Our research target is printer technology, one of the most dynamic and innovative industries in the current worldwide economy. Because of the market size and economic significance, US patents are an adequate indicator of patenting. Therefore, to conduct our

analysis, we apply United States Patent and Trademark Office (USPTO) time series data. In total, we collect information on 360 printer patent applications per month for the period of 1976 through 2010. Data also includes the United State Patent Codes (USPCs) of printer-related patents according to the "index to the USPC" from the official website of the USPTO. Only utility-type patents were taken into consideration.

In general, we find that an idealized chaotic model of technological change would consider the period between September 1988 and October 1992 as the first era of chaotic dynamics, during which certain small changes led to large-scale and radical consequences. This mathematical or chaotic finding is reasonable, because our historical review illustrates that the launch of the DeskJet by Hewlett Packard (HP) broke the pre-dominate design of the impact, dot matrix printer, and shifted the dominance to the inkjet printer.

The period between April 2008 and November 2009 was the second era of chaotic dynamics. Our historical review also shows that it is during this period that the multifunction printer (MFP), which combined facsimile, photocopier, and printer, appeared as the next standard design. In short, paradigms or standards emerged after those chaotic periods, just like the Chinese proverb "no turbulence in river, no fish."

In terms of limitations, we acknowledge that the qualitative data from our industry review are more market-oriented, while the patent activities are more technology-oriented. Further research could develop some other alternative proxies to examine the usefulness of chaos theory. Another important direction of future research would be to explore how particular firm actions or interactions more deeply relate to the dynamics of chaos.

Still, the application of chaos theory to innovation studies provides implications for managers seeking to sustain competitiveness in changing technology environments. Managers should expect chaos, or extreme non-linear dynamics, to arise in the evolution of technology. While the evolutionary path of the chaotic system is not predictable, the pattern of the path could be predicted. It is through regularities or simple rules that the basis for the emergence of a new technological trajectory is formed.

In the case of printer technology, firms that are sensitive to and created small differences or changes to printer technology during the periods of September 1988 through October 1992 and April 2008 through November 2009 (initial conditions) were critical in moving the industry in and out of the equilibrium and developing new advantages. There is a strong need to provoke as many small changes (e.g., incremental process innovations, new patent applications, and new product launches) as possible and develop simple rules at the edge of chaos. The content of a high-performing technology strategy will likely focus on

capturing and leveraging a few initial points that provide windows of opportunities for continued growth and innovation performance.

參考文獻

Anderson, P., and Tushman, M. L. 1990. Technological discontinuities and dominant designs: A cyclical model of technological change. ***Administrative Science Quarterly***, 35 (4): 604-633.

Aydogan, K., and Booth, G. G. 1988. Are there long cycles in common stock returns?. ***Southern Economic Journal***, 55 (1): 141-149.

Baumol, W. J., and Quandt, R. E. 1985. Chaos models and their implications for forecasting. ***Eastern Economic Journal***, 11 (1): 3-15.

Boes, D. C., and Salas, J. D. 1978. Nonstationarity of the mean and the Hurst phenomenon. ***Water Resources Research***, 14 (1): 135-143.

Day, R. H. 1983. The emergence of chaos from classical economic growth. ***Quarterly Journal of Economics***, 98 (2): 201-213.

Foster, R. 1986. ***Innovation: The Attacker's Advantage***. New York, NY: Summit Books.

Frenken, K. 2006. ***Innovation, Evolution and Complexity Theory***. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.

Gleick, J. 1987. ***Chaos: Making a New Science***. New York, NY: Viking.

Grassberger, P., and Procaccia, I. 1983. Measuring the strangeness of strange attractors. ***Physica D: Nonlinear Phenomena***, 9 (1-2): 189-208.

Greene, M. T., and Fielitz, B. D. 1977. Long-term dependence in common stock returns. ***Journal of Financial Economics***, 4 (3): 339-349.

Harmon, J., and Widder, J. 1988. Integrating the printhead into the HP Deskjet printer. ***Hewlett-Packard Journal***, 39 (5): 62-66.

Herbig, P. A., and Kramer, H. 1993. Innovation inertia: The power of the installed base. ***Journal of Business and Industrial Marketing***, 8 (3): 44-57.

Hung, S. C., and Tu, M. F. 2014. Is small actually big? The chaos of technological change. ***Research Policy***, 43 (7): 1227-1238.

Hurst, H. E. 1956. Methods of using long-term storage in reservoirs. ***ICE Proceedings***, 5 (5): 519-543.

Jayanthi, S., and Sinha, K. K. 1998. Innovation implementation in high technology manufacturing: A chaos-theoretic empirical analysis. ***Journal of Operations Management***, 16 (4): 471-494.

Kang, I. S., Na, S. H., Kim, J., and Lee, J. H. 2007. Cluster-based patent retrieval. ***Information Processing and Management***, 43 (5): 1173-1182.

Kauffman, S. 1996. ***At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-***

Organization and Complexity. Oxford, UK: Oxford University Press.

Ketterer, J. 2006. Chaos and complexity: The uses of the foremost metaphor of the new millennium. ***International Management Review***, 2 (3): 34-55.

Kiel, L. D., and Elliott, E. W. 1996. ***Chaos Theory in the Social Sciences: Foundations and Applications***. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

Kotler, P., and Caslione, J. A. 2009. ***Chaotics: The Business of Managing and Marketing in the Age of Turbulence***. New York, NY: AMACOM.

Levy, D. 1994. Chaos theory and strategy: Theory, application, and managerial implications. ***Strategic Management Journal***, 15 (Supplement-2): 167-178.

Li, T. Y., and Yorke, J. A. 1975. Period three implies chaos. ***The American Mathematical Monthly***, 82 (10): 985-992.

Liebowitz, S. J., and Margolis, S. E. 1995. Path dependence, lock-in, and history. ***Journal of Law, Economics, and Organization***, 11 (1): 205-226.

Lo, A. W. 1991. Long-term memory in stock market prices. ***Econometrica***, 59 (5): 1279-1313.

Lorenz, E. N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. ***Journal of the Atmospheric Sciences***, 20 (2): 130-141.

Loye, D., and Eisler, R. 1987. Chaos and transformation: Implications of nonequilibrium theory for social science and society. ***Behavioral Science***, 32 (1): 53-65.

Mandelbrot, B. B. 1975. On the geometry of homogeneous turbulence, with stress on the fractal dimension of the iso-surfaces of scalars. ***Journal of Fluid Mechanics***, 72 (2): 401-416.

_____. 1982. ***The Fractal Geometry of Nature***. San Francisco, CA: Times Books.

Mandelbrot, B. B., and Wallis, J. R. 1969. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. ***Water Resources Research***, 5 (5): 967-988.

McMillan, E., and Carlisle, Y. 2007. Strategy as order emerging from chaos: A public sector experience. ***Long Range Planning***, 40 (6): 574-593.

Mesa, O. J., and Poveda, G. 1993. The Hurst effect: The scale of fluctuation approach. ***Water Resources Research***, 29 (12): 3995-4002.

Mokyr, J. 1992. Technological inertia in economic history. ***Journal of Economic History***, 52 (2): 325-338.

Musielak, D. E., Musielak, Z. E., and Kennamer, K. S. 2005. The onset of chaos in nonlinear dynamical systems determined with a new fractal technique. ***Fractals***, 13 (1):

19-31.

Navarro, J., Curioso, F., Gomes, D., Arrieta, C., and Cortes, M. 2013. Fluctuations in work motivation: Tasks do not matter!. ***Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences***, 17 (1): 3-22.

Nielsen, N. J. 1985. History of ThinkJet printhead development. ***Hewlett-Packard Journal***, 36 (5): 4-20.

Nonaka, I. 1988. Creating organizational order out of chaos: Self-renewal in Japanese firms. ***California Management Review***, 30 (3): 57-73.

Park, J., and Park, C. 2009. Robust estimation of the Hurst parameter and selection of an onset scaling. ***Statistica Sinica***, 19 (4): 1531-1555.

Pascale, R. T. 1999. Surfing the edge of chaos. ***Sloan Management Review***, 40 (3): 83-94.

Peters, E. E. 1991. ***Chaos and Order in the Capital Markets: A New View of Cycles, Prices, and Market Volatility***. New York, NY: John and Sons Inc.

Prigogine, I., Stengers, I., and Pagels, H. R. 1985. Order out of chaos. ***Physics Today***, 38 (1): 97.

Radzicki, M. J. 1990. Institutional dynamics, deterministic chaos, and self-organizing systems. ***Journal of Economic Issues***, 24 (1): 57-102.

Ruelle, D., and Takens, F. 1971. On the nature of turbulence. ***Communications in Mathematical Physics***, 20 (3): 167-192.

Rycroft, R. W., and Kash, D. E. 2002. Path dependence in the innovation of complex technologies. ***Technology Analysis and Strategic Management***, 14 (1): 21-35.

Sanders, T. I. 1998. ***Strategic Thinking and the New Science: Planning in the Midst of Chaos Complexity and Change***. New York, NY: Simon and Schuster.

Schuster, H. G., and Just, W. 2005. ***Deterministic Chaos: An Introduction (4th ed.)***. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

Stacey, R. 1993. Strategy as order emerging from chaos. ***Long Range Planning***, 26 (1): 10-17.

Strogatz, S. H. 1994. ***Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering***. Cambridge, MA: Westview Press.

Thiétart, R. A., and Forgues, B. 1995. Chaos theory and organization. ***Organization Science***, 6 (1): 19-31.

Torbert, W. R. 1996. The “chaotic” action awareness of transformational leaders. ***International Journal of Public Administration***, 19 (6): 911-939.

Utterback, J. M., and Abernathy, W. J. 1975. A dynamic model of process and product

innovation. ***Omega***, 3 (6): 639-656.

Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., and Vastano, J. A. 1985. Determining Lyapunov exponents from a time series. ***Physica D: Nonlinear Phenomena***, 16 (3): 285-317.

Wolff, R. C. L. 1992. Local Lyapunov exponents: Looking closely at chaos. ***Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)***, 54 (2): 353-371.

作者簡介

*** 洪世章**

英國華威克大學商學院策略管理博士，現為國立清華大學科技管理研究所教授。論文曾發表於 Strategic Entrepreneurship Journal、Research Policy、Organization Studies、Human Relations、Long Range Planning、Management and Organization Review 等學術期刊。目前研究興趣包括策略實務、制度創業、中國產業轉型等議題。

Shih-Chang Hung is Distinguished Professor and Director of the Institute of Technology Management, National Tsing Hua University, Taiwan. His works have appeared in Strategic Entrepreneurship Journal, Research Policy, Organization Studies, Human Relations, Long Range Planning, Management and Organization Review, etc. His current research focuses on strategizing activities and practices, institutional entrepreneurship, and the transformation of the Chinese industry.

賴俊彥

國立清華大學科技管理研究所博士生，目前的研究聚焦在混沌理論與策略實務。

Jiun-Yan Lai is a Ph.D. student at the Institute of Technology Management, National Tsing Hua University, Taiwan. His current research focuses on chaos theory and strategizing activities and practices.

涂敏芬

國立清華大學科技管理研究所博士，現為淡江大學企業管理學系助理教授。論文曾發表於 Research Policy、R&D Management、管理學報、臺大管理論叢、中山管理評論、科技管理學刊等國內外學術期刊。目前研究興趣包括技術創新與制度興業等議題。

Min-Fen Tu is an Assistant Professor in the Department of Business Administration, Tamkang University, Taiwan. She received her Ph.D. from the Institute of Technology Management, National Tsing Hua University. Her works have appeared in Research Policy, R&D Management and some Taiwanese management journals. Her current research focuses on technological innovation and institutional entrepreneurship.

* E-mail: schung@mx.nthu.edu.tw