

知識天地

網路 (networks)

劉維中助研究員 (統計科學研究所)

什麼是網路呢？簡單來說它是一個由一群點 (nodes) 與線 (links) 所組成的個體，而點與點之間是靠線連接起來的。網路是一個無所不在的現象，比如說把你週遭的人 (包括你自己) 用點來代表，再把“誰是誰的朋友”用線連起來，那就得到了一個朋友關係網路 (friendship network) (圖 1)；假如是用線來連接“誰是誰的敵人”，那你就得到了一個敵對關係網路 (enemy network)。再往微細的方向去觀察，你會發現到個體生命的產生是由複雜的基因體之間的調控網路 (gene regulation network) 所控制的；而一個生命生存，背後都是要依靠複雜的生化反應及新陳代謝網路 (biochemical and metaolic networks)。往大的方向去觀察，其實地球上的生態系統充滿了不同種類的物種，而物種之間的天敵與獵物或者事競爭的關係往往也會形成複雜的生態網路 (food webs and ecological networks)。

最基本的網路研究通常從如何去描述網路開始，這些描述的指標包含了點的數目和線的數目去描述一個網路的大小 (network size)。然而這些資訊是不足於描述一個網路的結構 (network structure)，例如圖

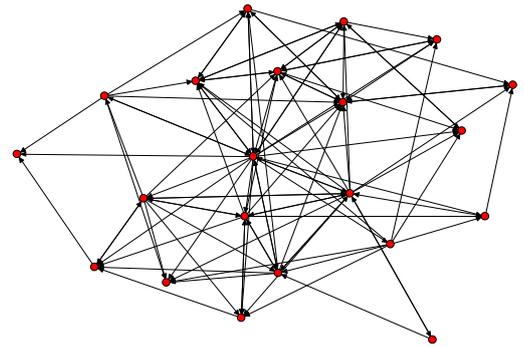


圖 1：朋友網路

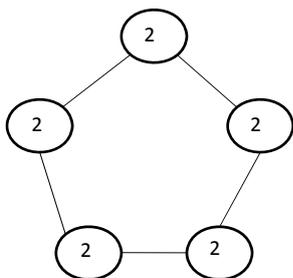


圖 2：一個簡單由 5 個點和 5 個線所組成的網路

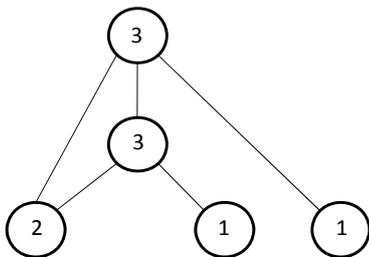


圖 3：一個簡單由 5 個點和 5 個線所組成的網路

2 與圖 3 的網路都是由 5 個點和 5 個線所組成的網路，不過很明顯的

它們的構造是很不同的。仔細的觀察會發現說圖 2 的網路的每個點都有 2 個線連到其他 2 個鄰居 (direct neighbours)，然而圖 3 的網路的每個點並沒有一樣多的鄰居。所以要描述一個網路的結構，我們必須要了解每個點是如何與其他點連接的。近 10 年的網路研究發現很多的生物網路 (biological networks) 都有一個很奇特的結構，那就是點的鄰居數 (1 個點有跟多少個連結) 是有 power-law 分佈的現象 (圖 4) (Jeong et al. 2000; Jeong et al. 2001)。白話來講，就是大部分的點只有少數幾個鄰居，而只有少數幾個點有非常多的鄰居 (圖 4)。這種 power-law 的網路結構是很有特色的，其中最有趣的就是在隨機的把點拿掉的情況下 (random deletion)，這種網路還是保持著它大部份完整的結構 (network integrity) (Barabási and Albert 1999; Barabási and Oltvai 2004)。這是因為鄰居數很少的點是佔多數的，所以它們被隨機拿掉的機會

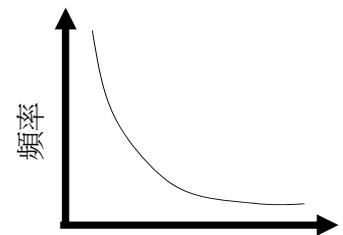


圖 4：Power-law 網路結構的鄰居數 (degree) 分佈圖

會比那些鄰居數多的點還大，於是拿掉它們並不會對網路結構產生激烈的影響。許多研究網路的專家通常認為 power-law 的構造是生物網路因為要自我保護而演化的結果；不過，假如今天我們是特別挑那些鄰居數大的點以及拿掉它們的話 (targeted deletion)，那這些有 power-law 構造的網路將會很容易被瓦解掉。

另一種很常見的網路結構是所謂的小世界網路 (small world networks) (圖 5) (Watts and Strogatz 1998)，很多的社會網路是屬於這個特別的網路結構。簡單來說小世界網路是由多個群體 (clusters) 組成的，而每個群體裏包含了密集連結的點，而且通常有捷徑 (shortcuts) 連接不同的群體 (圖 5)。例如朋友網路，不同的群體代表了不同的朋友群 (friend groups)，在同個朋友群的人幾乎彼此都是朋友，而一個朋友群裏可能會有少數人也同時認識別的朋友群的人，如此就形成了

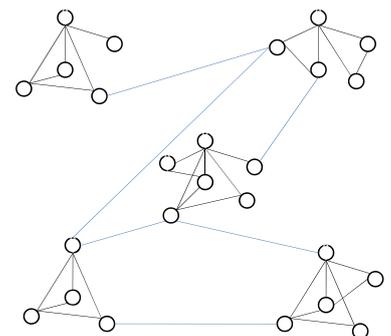


圖 5：小世界網路。此圖包含了 5 個群體，群體間有捷徑 (藍色線) 連接起來

一個小世界網路。這種網路結構有兩種特色，一是同個群體的點互相連結的程度遠高於來自不同群體的點；二是兩個來自不同群體的點可以因為捷徑而拉近彼此之間的網路距離。其實小世界現象早在 1960 年代就被社會學家 Milgram 發現 (Milgram 1967)，在 Milgram 的實驗裏，他準備了幾百封信件，而每個信封上都標示了同個收件人，以及指示拿到信件的人要傳給最有可能認識收件人的人。然後 Milgram 發給隨機抽取的人們這封信件，之後發現這封信件要從一個陌生人傳給收件人平均要經過 6 個人（包括第一個傳信的人和收件人）。換句話說，假如我們從人群中隨機抽取兩個人，平均來說這兩個人要經過 6 個人（包括被隨機抽取的兩人）就可彼此認識。讀者們應該有和陌生人聊天時發現原來彼此都認識某某人的經驗，而這就是小世界現象最好的見證。

從無到有，一個網路的演化包括了新的點的加入和舊的點的刪除。研究網路的另一個研究重點是一個網路如何演化成我們今天所看到的構造，目前最著名的是偏好性附加模型 (preferential attachment model) 是如何產生 power-law 網路結構 (Barabási and Albert 1999; Barabási and Oltvai 2004)。偏好性附加模型是個觀念極為簡單的網路演化模式，基本上它描述當一個新的點要加入一個網路時，它要如何去選它要和哪個點連接。在這種情況下，通常鄰居數較多的點被選上的可能性是高於鄰居數較少的點，如此增加新點的方式就會產生 power-law 網路結構。舉個例子來比喻，當一個人要加入一個新的群體，他會選擇與受歡迎或朋友多的人來往。假如不同的點都有被新加入的點選上一樣的可能，那所產生的網路將會是一個完全隨機的網路 (random networks)。往另一方向思考，舊的點的刪除也可以產生 power-law 網路結構，這種演化模型稱為選擇性刪除模型 (selective removal model) (Salathe M, et al. 2005)。這種模型描述當我們要從一個網路刪除一個舊點時，通常鄰居數和鄰居的鄰居數 (neighbours' neighbours) 較少的點被刪除的可能性是比較大的，如此的刪除舊點 (同時隨機增加相同數目的新點來保持網路的大小) 就會產生 power-law 網路結構。一樣舉個例子來比喻，一個人際關係較少的人通常很可能較容易離開一個朋友網路。

除了網路的結構和網路的演化外，網路研究也包含了其他的議題與應用。其中較基本的是如何去描述與量化一個點在網路上的位置 (network position) 以及所產生的重要性 (positional importance) (Wassermann and Faust 1994)。通常描述與量化的方法是多種的，而最常見的是所謂的一個點的中間度指標 (nodal centrality)；中間度指標簡單說起就是衡量一個點是否在一個網路裏佔有一個核心的位置，最常見的包括了連接中間度指標 (degree centrality)、近距中間度指標 (closeness centrality)，和參與中間度指標 (betweenness centrality)。其中以連接中間度指標最為簡單易懂，它其實就是一個點的鄰居數。一個具有高連接中間度指標的點有可能是重要的點因為它可以影響很多點或者是被很多點所影響，近距中間度指標主要在量化一個點和其他同網路點的距離。一個具有高近距中間度指標的點有可能是重要的點，因為它距離其他的點都很近，所以它可以很快的影響其它點或者是很快的被其它點所影響。在一個網路上，每兩個點至少都有一條連接此兩點的最短途徑，而參與中間度指標是去量化一個點出現在所有最短途徑的次數。一個具有高參與中間度指標的點有可能是重要的點，因為從一個點到另一點都要經過它作為橋樑。其實在生物網路裏，中間度高的點通常扮演著重要的角色。比如說在酵母菌 (yeast) 的蛋白質交互作用網路 (protein-protein interaction network)，那些中間度高的蛋白質通常都是維持酵母菌存活的重要因素 (Jeong et al. 2001)。另外在傳染病學上，流行病的傳染通常是發生在人與人的接觸網路上 (contact network)，而通常只要隔離中間度高或是高接觸次數的點或人就可以有效減少流行病傳染的可能性 (Woolhouse et al. 2005)。

因為網路是個無所不在的自然現象，所以網路研究可以應用在不同的科學領域。比如說我們可以利用中間度指標去量化一個物種在一個生態系統的重要性，然後提供研究人員生態保育的方針與指標 (Jordán et al. 2006)。或許在保護瀕臨絕種的物種時也要同時保育重要的物種，因為瀕臨絕種的物種或許要依靠重要的物種才能生存。其它有趣的例子包括了如何利用網路結構去探討傳染病的演化，數學模型表示當一個傳染病的流行途徑是屬於小世界網路時，傳染病極有可能朝向高殺傷力 (high pathogenicity) 的方向演化。然而當小世界現象逐漸消失時 (或者是當連接不同群體的捷徑減少時)，傳染病極有可能演化成低殺傷力的疾病 (Read and Keeling 2003)。其實我們在日常生活裏都已有利用網路結構的時候，比如說有很多人都會有“最有用的朋友多是不太熟的朋友”的經驗，因為不太熟的朋友往往都有他的朋友群而所連帶的社會資源，而通常自己有需要幫忙時往往可以透過不太熟的朋友而獲得更好的解決事務的方法。比如說有很多人都有靠不太熟的人的介紹而找到工作的經驗吧？而這又是社會網路裏小世界現象最好的見證。

今天在本文裏所提到的網路研究只是這個領域的極小部分，讀者如果對網路研究有興趣的話，或許可以多觀察

周遭的人事物，往往在一個重要的事件或者是有趣的現象背後或許都有一個微妙的網路結構。

參考文獻

1. Barabási AL, Albert R: **Emergence of scaling in random networks.** *Science* 1999, **286**:509-512.
2. Barabási AL, Oltvai ZN: **Network biology: understanding the cell's functional organization.** *Nat Rev Genet* 2004, **5**:101-113.
3. Jeong H, et al.: **The large-scale organization of metabolic networks.** *Nature* 2000, **407**:651-654.
4. Jeong H, et al.: **Lethality and centrality in protein networks.** *Nature* 2001, **411**:41-42.
5. Jordán F, et al.: **Topological keystone species: measures of positional importance in food webs.** *Oikos* 2006, **112**:535-546.
6. Milgram S: **The small world problem.** *Psychol. Today* 1967, **2**:60-67.
7. Read JM, Keeling MJ: **Disease evolution on networks: the role of contact Structure.** *Proc. R. Soc. Lond. B* 2003, **270**:699-708.
8. Salathe M, et al.: **The evolution of network topology by selective removal.** *J. R. Soc. Interface* 2005, **2**:533-536.
9. Wassermann S, Faust K: *Social Network Analysis.* Cambridge University Press, Cambridge; 1994.
10. Watts DJ, Strogatz SH: **Collective dynamics of 'small-world' networks.** *Nature* 1998, **393**:440-442.
11. Woolhouse MEJ, et al.: **Epidemiological implications of the contact network structure for cattle farms and the 20-80 rule.** *Biol. letters* 2005, **1**:350-352.

※各期知識天地文章請逕於本院網頁：<http://www.sinica.edu.tw/> 「常用連結」之「週報〈知識天地〉」項下瀏覽。※