



圍棋程式擊潰圍棋大師

從 AlphaGo 看類神經網路的浴火重生

2016年3月9日是一個大日子。

圍棋程式 AlphaGo 這一天在分先（不讓子）的情況下，擊敗圍棋九段高手韓國李世乭，震撼了現場與網路直播的百萬觀眾，儼如大師的棋感更令人無法置信。沒想到之後 AlphaGo 再下兩城。以致於當李世乭在3月13日下贏第四盤、維護了人類尊嚴時，現場媒體竟然一片掌聲歡呼，激動莫名。戲劇化的情緒轉折，莫此為甚。

∞

1997年7月「更深的藍」（Deeper Blue）以3勝2敗1和正式擊敗西洋棋王卡斯帕羅夫，轟動當時媒體。但許多內行人並不特別在意，因為以程式對付西洋棋只要有效搜尋所有棋步，原則上機器擊敗人腦是早晚的事。

當時《紐約時報》報導，業餘圍棋高手兼普林斯頓高等研究院計算天文物理學家胡特（P. Hut）斷言，電腦想擊敗圍棋高手，「一百年都沒輒，甚至更久。一個有腦筋的人學圍棋，不消數月就能擊敗現存所有圍棋程式，你不必是卡斯帕羅夫。」AlphaGO 擊敗李世乭後，胡特承認：「顯然我的預言全錯了，這真是令人目瞪口呆。」胡特所代表的正是典型的主流意見。

1986年，臺灣應昌期圍棋基金會、宏碁、第三波文化舉辦了世界第一個程式 / 程式與程式 / 人圍棋競賽，最高獎金可高達一百萬美金。（附帶一提，深藍、AlphaGo 的設計人許峰雄、黃士傑都出身臺灣。）競賽持續多年，但即使到了1997年，第一名的圍棋程式仍然只能在對方讓十子的情況下，戰勝業餘五段的小學生棋手。這種情況，在21世紀出現蒙特卡羅樹搜尋法（Monte Carlo Tree Search, MCTS）後才有改善，例如知名程式 Crazy Stone 與 Zen 都有相當的棋力。2012年，Zen 在對方讓5、4子的情況下，兩次擊敗武宮正樹；2013年，Crazy Stone 被讓4子擊敗石田芳夫。武宮和石田都是多次奪得本因坊的宗師級九段高手。同是本因

坊且持續關注圍棋程式發展的臺灣棋手王銘琬，卻發現程式的棋力五年前開始停滯。顯然只靠 MCTS，程式不可能在分先時與大師對奕。眼看摩爾定律走到盡頭，很多人只能把希望放在量子電腦或取代矽晶片的新材料。

沒想到《自然》（Nature）在2016年1月27日刊登了一篇論文〈以深層神經網絡與樹搜尋掌控圍棋〉（Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search），作者群出身於2014年 Google 收購的英國人工智慧公司 DeepMind（底下縮寫成 DM）。文中宣稱他們的程式 AlphaGo 巧妙結合深層學習（deep learning）與 MCTS，不論是單機型還是更強大的分散型 AlphaGo 已經一面倒的擊敗現存的圍棋程式。去年10月，分散型 AlphaGo 秘密挑戰職業二段的歐洲圍棋冠軍樊麾，五戰全勝。他們自估單機型棋力約兩段，分散型則有五段左右的棋力。

電腦首次在分先擊敗職業棋手的新聞一出，馬上傳遍棋壇及科技界。Google 隨即下戰書挑戰世界排名前三，多次贏得世界冠軍的李世乭。韓國、中國圍棋高手雖然訝異樊麾之敗，仍相當有自信電腦不可能那麼快就挑戰九段高手，尤其是李世乭。王銘琬曾說：「我不喜歡用『天才』形容別人，可是對於李世乭，實在想不到其他字眼。」

沒想到在短短五個月內，AlphaGo 宛如易筋洗髓，功力再增，竟然四勝一敗擊敗李世乭，而且賽中妙著紛呈。AlphaGo 正式被認證是圍棋高手，不但世界排名第二（僅次於中國柯潔），韓國棋會還破例授與名譽九段棋士。高段棋手紛紛稱讚：「完全看不出來哪個是人，哪個是機器。」這算是 AlphaGo 通過圍棋塗林測試的至大恭維。

許多不熟悉圍棋的人誤以為 AlphaGo 是背譜比賽或針對對手棋路密集訓練。但參與趨勢科技圍棋團隊 Go Trend 的王銘琬，雖然賽後感覺自己似被雙重打敗，卻不同意。他認為除了身心狀態的先天弱點，目前人類思考面對客觀的 AlphaGo 也討不了便宜。他更提到其中的關鍵，「要下好圍棋，死背棋譜沒用，需要對棋盤全體直覺式的認識，深層學習就是學習人的感覺的技術。」



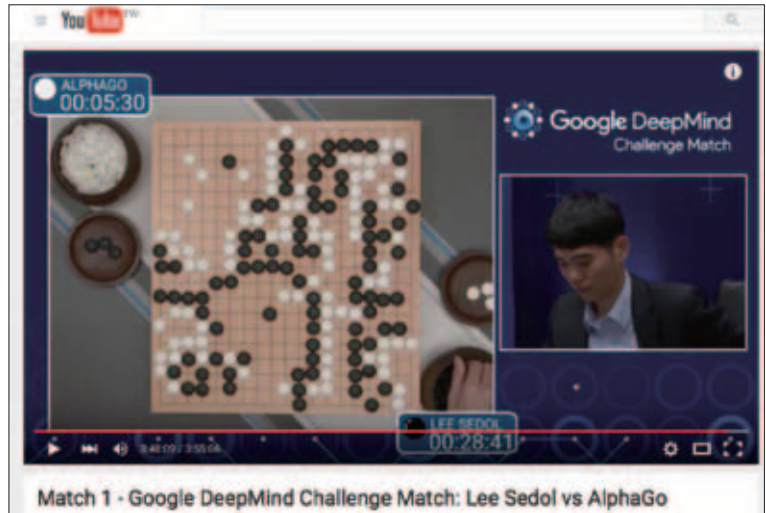
圍棋和西洋棋（或象棋）很不同。西洋棋走的是棋子，走法固定，吃掉國王的目標明確。但圍棋很不同，棋盤上每一點皆可落子，勝負以圍空為目標，型態差異很大，再加上圍棋 19 路棋盤遠比西洋棋盤大。因此不管是時間（棋步順序）還是空間（落子位置）都遠比西洋棋遼闊。深藍

的暴力搜尋法在圍棋絕對行不通。對於這個圍棋難題的第一個突破，來自前述 MCTS 的應用，運用隨機取樣的概念，讓機器搜尋能隨機做到廣又深。這是近年所有圍棋程式棋力能提高的主因。

不過 MCTS 並不能幫程式更有效的評估局勢與落子，想要分先對戰高手，這是關鍵的難題。圍棋高手下棋並非只是局部細算，需要倚重直覺兼顧整體。新學棋的人常看不懂高手下棋，為什麼在布局時花很長時間卻只下寥寥幾子，而且抽象難名。在學棋時學的「定石」或「手筋」，高手卻又往往不拘於此，反而針對棋勢找尋更正確的著手。這種不陷於局部圍地計算的直覺，正是電腦程式難以突破的地方。

但是對盤勢的直覺卻和人臉辨識或語音辨識頗有相通之處，都是一種模式辨識（pattern recognition）的問題。人類辨識人臉並不是單純的複製一份影像，而是擅長掌握特徵，才能從不同相片辨識出同一張臉。下圍棋也不能死背棋譜，畢竟棋局近乎無限，重要是能正確感受「模樣」或「味道」，才能評斷正確的落子。人臉辨識一直是資訊界的聖杯之一，近年受惠於計算機能力逐漸強大、類神經網絡的復活（深層學習），終於有突破。這正是 AlphaGo 出現的背景。

20 世紀人工智慧本來的主流路線是「由上往下」，建立在公設、知識規則與推理之上。但是類神經網絡則以大腦為師，認為「智慧」是「由下往上」學習的。基本的模型是在輸入與輸出中，夾帶一層或數層隱藏層，在其中「連接」的線路上設定權數，再以環境的回饋或範例的「訓練」逐漸調整權數，達到學習或應用的目的。不過類神經學習的特性是其對習得的「知識」不知其所以然（一堆訓練過的權數），和「由上而下」的觀點正好相反。80 年代，因為平行計算



李世乭與 AlphaGo 第一局對戰，棄子投降前一刻。（DeepMind 網路直播，YouTube 網頁截圖）

興起，類神經網絡曾經風行一時，但受限於當時計算能力不足以應付運算的龐大需求，隱藏層太少時實際運作的效率又差，終究不免沈寂。但是到了 21 世紀，因為電腦運算能力逐漸強大，數學與統計模型到位，類神經網絡又以深層學習之名在處理大量數據的風潮中浴火重生。

DM 的貢獻是結合深層學習與 MCTS 的巧思⁶，其中深層學習正是用來模擬下圍棋的抽象直覺。AlphaGo 用了兩個深層網絡。它使用決策網絡（policy network）來選擇可能的落子，評估網絡（value network）來評斷落子的勝率。這兩個網絡是事先「學習」過的。首先是決策網絡「模式辨認」大量專家棋譜的訓練（監督式學習），然後再用自我對戰幾千萬局，互動收斂到更強健的結果（加強式學習）。這時決策網絡不靠搜尋，已經能找出聰明的落子可能位置（把自己當對手），不陷於局部戰鬥。從自我對戰訓練的評估網絡，則可以從「經驗」更明確的評斷落子的勝率。

不過臨場下棋時，除了運用決策網絡和評估網絡，仍需針對實際盤面做計算。這一面向是由 MCTS 運用決策網絡決定落子（減少搜索的廣度），再加權綜合評估網絡的建議（減少搜索的深度）與加速落子（rollouts）的即時評估，然後做整體棋局的搜索。這種下棋法和人類雷同。

AlphaGo 最讓人訝異的是，它在訓練網絡時竟然沒有輸入圍棋規則。光是看棋，就慢慢看出怎麼下棋、什麼是好棋。DM 工程師席爾弗（D. Silver）說，在訓練過程中 AlphaGo

⁶ 臉書研發圍棋程式的田淵棟最近在自己參加圍棋程式 UEC 競賽後，從內行眼光讚嘆席爾弗和黃士傑這兩位 AlphaGo 首席工程師「在計算機圍棋上多年的功力在此展現。」



「發現」（「體會」）了圍棋的微妙棋感如：先手、模樣、味道、劫爭等，深度學習出一種數值的直觀，克服先前圍棋程式的弱點，更讓電腦實質上可與圍棋大師並駕齊驅。

圍棋只是 DM 一項計畫。Google 看中這家公司的 Deep-Q 網絡面對 Atari 2600 遊戲機的 45 款經典遊戲，光靠螢幕畫素與得分就成功「學習」成遊戲大師。DM 領導人哈沙比斯（D. Hassabis）的真正野心是萬用神經網絡，圍棋只是第二個階段性指標。Google 和李世石簽約一定要下滿五場，正是因為與大師對局的數據，是分析系統最寶貴的資料。

AlphaGo 的兩顆「腦」都是多層神經網絡，行話稱為深層卷積神經網絡（deep convolutional neural networks），可以學習更抽象的「概念」，也是深層學習常用的模型。這種模型戰績輝煌：2009 年贏得手寫辨識比賽；2010 年讓語音識別速度提升 70 倍；2012 年以來，微軟團隊在知名 ImageNet 大賽中，以 152 層深層學習把錯誤率由 26% 降低到 3.57%（人類是 5%）。這些都是突破性的成就。現在智慧手機裡面已經有非常多基本功能，受惠於這些發展。

基於深層學習有模有樣的「智慧」，以及大數據與數據科學的應用前景可期，網路或電腦產業的巨頭如 Google、Facebook、Microsoft、百度，都已經投下重資。李世石被打敗後，韓國總統朴槿惠也隨即宣布投入一兆韓元（約 280 億台幣），發展人工智慧產業。

人工智慧的成功不免讓人擔心其威脅，霍金就警告：「創造人工智慧的成功，將是人類史上最巨大的事件，但不幸的，它也可能是最後一個。」不過哈沙比斯認為這是杞人憂天，「我們才剛踏上第一階樓梯，目前還只是遊戲階段。」以史為鑑，人類還不如擔心使用科技的同類。據載哈沙比斯和霍金面談四小時後，霍金就不再公開反對人工智慧。哈沙比斯描述，當他與霍金道別時，霍金說：「我祝你幸運，」然後眨了眨眼，「但是不要太多。」（編輯部）

本文參考資料請見〈數理人文資料網頁〉
<http://yaucenter.nctu.edu.tw/periodical.php>

2016 年數學大獎

堪稱數學諾貝爾獎或終生成就獎的阿貝爾獎，今年頒發給英國數學家懷爾斯（A. Wiles），他在 1995 年證明谷山/志村猜想中半穩定橢圓曲線的特例，因此證明數學界幾世紀的猜想——費馬最後定理。他十年磨一劍的故事早已是膾炙人口的科普軼事。懷爾斯今年 63 歲，是平均得獎年齡 78 歲的阿貝爾獎迄今最年輕的得獎者。

去年首頒數學突破獎的五位得主組成評選委員會（見本刊 3〈一個時代的終結？〉），將 2016 年數學突破獎頒給加州大學柏克萊分校的阿戈爾（I. Agol）。

費爾茲獎得主瑟斯頓在 1982 年一篇論文中，提出「幾何化猜想」（geometrization conjecture），推廣以常曲率刻畫二維曲面的想法，猜測所有三維流形都可以拆成八類標準幾何形體的某種結合，而且與二維一樣，雙曲幾何將占有主要角色。這篇論文為一整代三維拓樸學家畫出詳細的地圖。到了 2012 年，文中列出的 23 個問題只剩下四個與雙曲幾何有關的難題。連被認為是世紀猜想的三維龐卡赫猜想，也在 2003 年被帕瑞爾曼以漢米爾頓的瑞奇流方法證明了。

2012 年 3 月，阿戈爾與他的夥伴證明了所謂的魏茲猜想（Wise's conjecture），結合幾何、拓樸、幾何群論的跨領域研究，一舉解決了剩下的雙曲幾何相關猜想。這項結果讓三維流形的研究進入後瑟斯頓時代。而在提出猜想的 30 年後，瑟斯頓安然病逝於 2012 年 8 月。

今年同時首頒、為新秀研究者設立的數學新視野獎則頒給麻省理工學院的古斯（L. Guth）與倫敦帝國學院的奈維斯（A. Neves）。後者和馬奎斯（F. C. Marques）合證出已 50 年的威爾摩猜想（Willmore conjecture）。有趣八卦兩則：第三位得獎者，解決德利涅單值猜想、波昂大學的舒茲（P. Scholze）拒絕了這個獎；古斯的父親就是提出宇宙暴脹論的阿朗·古斯（A. Guth）。

另外，今年的物理突破獎頒給五個微中子研究團隊，總人數超過 1300 人，其中包括中國的大亞灣團隊。（編輯部）



數學家族譜有什麼意思？

用網絡科學一窺數學的歷史變遷

上網搜尋過數學家資料的人想必都用過「數學系譜計畫」網站 (Mathematics Genealogy Project, MGP)。網頁列出數學家國籍、博士學位年分、頒授學校、指導老師和學生, 88% 還有論文題目, 43% 有 AMS 領域分類碼。目前 MGP 累積了將近 20 萬筆數學家資料, 時間橫跨 14 世紀到現在。但是這個計畫堪稱極簡, 除了告訴網友數學家最基本的資訊, 偶爾帶來「X 原來是 Y 的學生!」的驚訝外, 資訊似乎不多。

其實不然。比利時納慕爾 (Namur) 大學的科學家嘉朱洛 (F. Gargiulo) 等人, 最近發表一篇題為〈現代數學的古典起源〉 (The classical origin of modern mathematics) 的論文, 利用 MGP 的資料描繪出七個世紀以來數學發展的輪廓。

他們首先將 MGP 的資料與維基百科和其他學術資料庫比對, 利用人工智慧技術校正、補充資料, 其中最重要的是補足數學家專長領域, 以及建立單線的師承關係 (若有多位指導老師, 選出最主要的一位)。當資料完善後, 就使用網絡科學的理論和技術加以分析, 得出一些有趣的結果。

其一是數學大國的興衰。他們將數學家依國籍分析人口變動的歷時資料, 將各國的發展模式分成數類: 早期歷史占有核心地位的是義大利、法國、希臘, 接著上場的是中歐國家, 有些國家是在世界大戰後崛起, 如日本、印度, 最近數十年的新興國則有中國和巴西。

其中有些變動可以標定出明顯的時間點, 例如奧匈帝國瓦解造成奧地利和匈牙利退出核心位置; 美國和德國互換主導地位是在 1930-40 年代之間; 蘇聯進入領先集團則是在 1960 年代, 而在最近則可觀察到俄羅斯的衰退。

再者是潮流的演變。運用同樣的方法也可以分析各領域的變動趨勢, 他們發現, 工業革命造成機械相關學科, 例如熱力學、電磁學的興盛。二次大戰時, 因為通訊和密碼的需求, 提高了數論和譜函數的地位。80 年代之後, 則輪到計算機科學和統計學成為顯學。

這些都再次印證了數學並不是超然獨立的學術, 放大時間尺度來看, 它的變遷與世界歷史息息相關。

然而嘉朱洛等人的研究最出人意料的结果應該是「家譜」的分析。他們發現 MGP 上的學者, 前 24 大家族佔了 65% 的人口。最大的一支是 1415 年源自義大利帕多瓦大學醫學院的波卡斯特羅 (S. Polcastro), 論文中未說明其人數, MGP 上的記錄是 10 萬人左右。

帕多瓦是文藝復興時期的學術重鎮, 許多現代知識發軔於此, 再傳播至歐洲各地。波卡斯特羅學術家族在醫學和化學界都堪稱顯赫, 例如發現血液循環的哈維 (W. Harvey)、本業為醫師的俄國作曲家鮑羅定 (A. Borodin)、兩度獲得諾貝爾獎的化學家鮑林 (L. Pauling) 都出自這個家系。

帕多瓦學術系譜在傳入日耳曼後, 起初仍固守在醫學院, 但到了 17 世紀開始產生物理學家及數學家, 再歷經約一個世紀, 出現了凱斯特納 (A. Kästner) 和普法夫 (J. F. Pfaff) 這一對師生。正如 GMP 首頁樹狀圖所示, 他們的門下包括懷爾斯查司 (K. Weierstrass)、雅可比 (K. Jacobi)、高斯、莫比烏斯 (A. Möbius) …… , 以及圖上未列出的如羅巴切夫斯基 (N. Lobachevsky) 等, 其廣度和重要性, 已不是枝葉繁茂可以形容的了。

嘉朱洛等人所找到的第二大家系是 19 世紀末源自俄羅斯的多布尼亞 (I. P. Dolbnya), 論文指出, 以其時間的晚近, 且學者大多集中在俄羅斯, 足以證明俄羅斯數學學派的高繁衍力。(據 MGP, 多布尼亞的門生數僅 659 人, 絕不是第二大家族應有的人數, 嘉朱洛應是找到網站上遺漏的師生連結, 可惜論文未予說明)。

在此之前已有多篇針對 MGP 的論文, 由於該計畫長期深耕, 現已成為網絡科學的重要研究對象。倣效它, 其他學術領域也紛紛建立各自的系譜。等將來資料更齊備, 進行各領域的綜合或比較分析, 必有更引人入勝的結果。(編輯部)

► MGP 網站: <https://genealogy.math.ndsu.nodak.edu/>

► 胡一凡 (Yifan Hu) 繪製的 MGP 系譜圖 (2008) http://yifanhu.net/GALLERY/MATH_GENEALOGY/index.html