

我們還需要康德的先驗概念嗎？

從心理學和神經科學重新檢視康德的時空概念

作者：張復

張復 2013 年從中研院資訊科學所退休，專長為：認知科學、機器學習、模式識別、生物資訊學。著有短篇小說集《高塔》（九歌）、《二〇〇一：洄游之旅》（印刻）。

康德 (Immanuel Kant, 1724-1804) 是擁有崇高地位的哲學家。在他出版《純粹理性批判》[1] 的時候，心理學與神經科學還不存在。然而在康德之前已經有哲學家針對知覺做了思想性的質疑。柏克萊 (George Berkeley, 1685-1753) 是其中的一位哲學家。他認為我們無法從知覺取得任何物體本身的訊息。例如，物體距離我們遠，它們就顯得小；距離近，它們就顯得大。石頭撞擊我們時，我們會覺得痛；撞擊到其他物體時，我們只聽得到聲音。所以，從知覺得來的訊息沒有一個不會隨著某種條件而改變。休姆 (David Hume, 1711-1776) 是另一位對知覺提出批判的哲學家。他不認為我們可以從知覺看到因果律則。不錯，我們可以看到太陽每天從東邊出現，因此期待它明天依然會從東邊出現。可是我們並不能從經驗得到這樣的保證。

另一方面，在康德的時代，歐幾里得幾何（簡稱歐氏幾何）以及牛頓力學被認為是顛撲不破的真理。然而幾何以及物理所描述的都是物體的不變性 (invariance)，也就是那些不會隨著外在條件而改變的性質。於是問題來了：如果不變性不能從知覺得來，它們來自哪裡？康德給予的答案是，我們在認識外在世界時已經預設一個觀念架構；幾何世界以及物理世界的不變性來自於這樣的架構。康德學派常常說，你外在世界只看得到物體，卻看不到空間，這是因為當你看到物體時，你已經預設它們存在於空間裡。



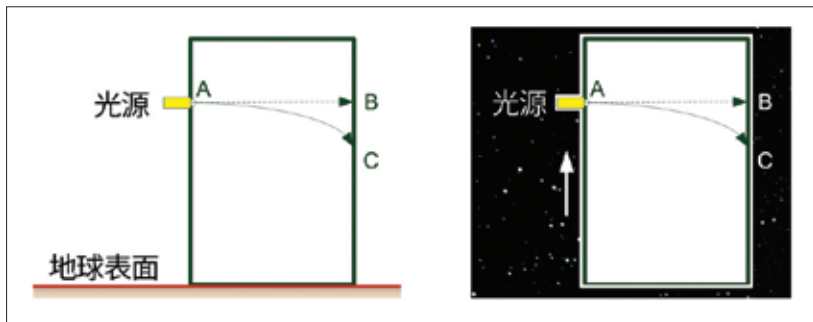
康德。(維基)

然而，從純粹的思維來考量，幾何與物理律則所展現的不變性可以有兩種不同的解釋。一種解釋是如同康德所主張的，來自我們自己的觀念架構。另一種解釋是，它們來自外在世界的恆常性。我們的知覺也許無法直接看到恆常性，卻可以推論它的存在。例如，物體的大小看起來會隨著距離而改變，然而改變的方式永遠遵循某一種規律，因此我們推論出這樣的規律來自物體本身。第一種解釋在康德的時代之所以顯得合理，是因為當時的幾何只有一種，就是歐氏幾何；而物理也只有一種，就是牛頓力學。

物理學與幾何學的演變

康德的主張看起來很合理，因為歐氏幾何與牛頓力學被認為是不可能改變的真理。然而，隨著相對論的出現，這兩個學說失去了顛撲不破的地位。首先，物理學家發現，牛頓力學與馬克士威電磁學其實是建立在兩個不同基礎的學說。在牛頓力學裡，如果一個坐標系統相對於另一個坐標系統在做等速移動，那麼同一物體的速度在這兩個系統之下不可能相同。然而在馬克士威理論裡，這兩個坐標系統所看到的光速卻永遠一樣。

愛因斯坦提出特殊相對論的目的是要讓力學與電磁學站立在同一個基礎上。為了達到這個目的，他提出了兩個要求。第一、兩個等速移動的坐標系統所觀察到的物理定律都是一樣的。第二、這



愛因斯坦的「等效原理」認為在地球表面上靜止不動（左）和在無重力處做等加速運動（右）的電梯，兩者無法區分，因此光行走的路徑也相同，結論就是光線在重力場中會彎曲。

兩個坐標系統所測量到的光速也是一樣的。在這個新的基礎上，我們會發現，如果有兩個孿生兄弟，哥哥停留在地球上，弟弟以接近光的速度離開地球一陣子，然後又以同樣的速度折返地球，那麼弟弟的年齡會比哥哥小許多。孿生兄弟的例子也許只是想像的例子，然而在宇宙裡確實有一種極為細微的物質，稱做介子，是在外太空產生的。這樣的介子壽命非常短促，它們怎麼可能在地球上被偵測到？理由是，它們是以接近光的速度行進。所以，就像上面孿生兄弟裡的弟弟，介子的壽命遠比地球上的人延展得慢。時間的延展會隨著移動速度而改變，這在牛頓力學是不可能發生的；然而在特殊相對論裡，這是必然的結果，也是被驗證了的結果。

如上所說，愛因斯坦提出了特殊相對論，因為他想將力學與電磁學納入同一個理論基礎。後來愛因斯坦又提出廣義相對論，目的是將牛頓的萬有引力定律也納入同一個基礎。為了達成這個目的，他提出了等效原理（equivalence principle）。這個原理將重力視為等加速度運動。用這種方式去看重力，我們可以把地球表面上保持靜止的電梯看成在向上做等加速運動（如圖）。假如有光源將一束光從電梯左側的小孔（A 點）以水平方向射進電梯裡。由於電梯可以視為在向上加速，當這束光抵達電梯的右側時，電梯已經向上移動了若干距離，所以光束不會射到與 A 點平行的位置（B 點），而會射到 B 點下方的位置（C 點）。然而，這個光束實際上是穿越一個重力場。因此結論是光束通過重力場不會採取直線行進。這個結論不可能從牛頓的萬有引力定律推導出來，因為後者只及於有質量的物質，而光並沒有任何質量。然而，光通過重力場時會走

彎曲的路徑，在 1919 年已經被愛丁頓（Arthur S. Eddington）知名的日蝕觀測驗證是正確的。

愛因斯坦有了上面的看法以後，理解到重力場所在的空間是有曲率的空間。當物體在這樣的空間裡自由移動，它們會循著一條彎曲的路徑行進。要想像這樣的空間其實並不困難。如果你觀賞過高爾夫球比賽，你一定看過小白球在果嶺上不一定依循直線行進。我們都知道，這是因為果嶺的表面不一定是平坦的。高爾夫球在不平坦的果嶺上會採取彎曲的路徑行走，正如物體在有曲率的空間裡會依循曲線行走一樣。事實上，這種有曲率的空間在愛因斯坦之前已經成為數學家如高斯、黎曼（Georg Riemann）所研究的題材。數學家知道，彎曲空間所表現的幾何性質與歐氏幾何並不相同，因此稱呼這樣的幾何學為非歐 / 黎曼幾何^①。

愛因斯坦的相對論推翻了牛頓力學與歐氏幾何是宇宙基石的假定。這個結果當然直接影響到康德學說的合理性。問題並不在於康德是否接受這兩個理論為永恆的真理，而在於人類似乎不需要某種特定的時空觀念就能夠認識外在的世界。不錯，人類曾經認為時空具有歐氏幾何與牛頓力學的特性。這樣的誤解卻不妨礙我們理解不同型態的幾何以及物理學，而後者可能更適合解釋宇宙全體的事物。

另一個值得思考的問題是，如果牛頓力學與歐氏幾何並不是宇宙的基石，為什麼它們卻那麼容易討好人類的大腦？這是不是意味著，我們的大腦在接

① 編註：古典非歐幾何，用現代術語指的是曲率為常數但非零的幾何空間性質，至於一般可能彎曲幾何空間的幾何學統稱為黎曼幾何。



2014年諾貝爾生醫獎得主，左起為莫澤夫婦，右為奧基夫，攝於記者會會場。（Gunnar K. Hansen 攝，維基）

觸外界事物之前已經有了一套觀念架構（如康德所主張的）？事實正好相反，牛頓力學與歐氏幾何之所以符合我們的直覺，是因為人類所處的時空正好表現得如這兩個理論所描述的那個樣子。事實上，無論從尺度或運動速率來說，人類依靠知覺所體驗到的世界只是宇宙極為狹小的一部分。而人類偏愛牛頓力學與歐氏幾何說明了兩件事。第一，這兩個理論相當合理的描述了這部份宇宙呈現的面貌。第二，我們的知覺提供了充分的資訊，得以推論這部份宇宙所應該有的數學與物理結構。

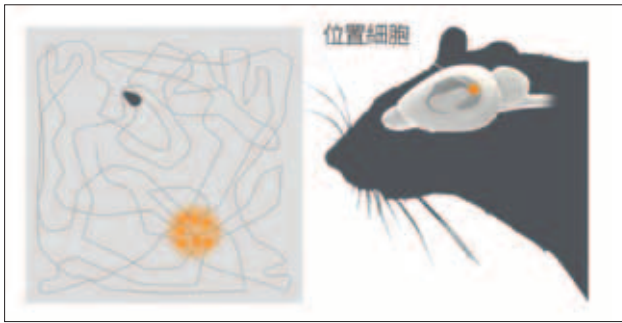
認知圖理論

康德學說所造成的最大衝擊不在物理學或數學，而在神經科學。事實上，能夠直接檢驗康德學說的途徑，莫過於實際去瞭解人類的神經系統如何從事各種與時空相關的運作。在這方面，最引人注目的是在2014年獲得諾貝爾生理學與醫學獎的奧基夫（John O'Keefe）。奧基夫比同時獲獎的莫澤夫婦（Edvard I. Moser and May-Britt Moser）更受到非專業人士的注意。奧基夫有別於一般的神經科學家，他在一開始著書立論 [2] 時就主張動物的神經系統裡有一套認知圖（cognitive map），而且他明白表示，這個想法的基礎是康德的先驗哲學。因此，對奧基夫而言，認知圖不是外在環境所加諸神經系統的經驗模型，而是神經系統為了認識外在世

界所必備的理念架構。然而，什麼是認知圖？奧基夫並沒有給予明確的說明。因此，就像康德的學說一樣，奧基夫的認知圖是一個哲學主張，多於科學理論。在當時行為主義還十分風行的學術環境裡，提出這樣的主張等於做出新的宣示。它斷言，動物神經系統有比「刺激反應」更深刻的運作原理。

奧基夫並不是第一個提出認知圖概念的科學家。早在1948年，托曼（Edward Tolman）已經使用迷宮實驗來測試老鼠尋找出路的能力。他發現，如果把一隻飢餓的老鼠放置在迷宮的進口，老鼠會走入迷宮裡，開始東走走、西走走，這裡聞聞、那裡嗅嗅，最後牠們會走到迷宮的出口，發現放置在那裡的食盒，並且開始快樂的進食。以後幾天，飢餓的老鼠歷經相同的測試。有趣的是，隨著測試次數的增多，老鼠花費在迷宮裡的時間逐漸降低 [3]。

請注意，在這個實驗中，老鼠只有在找到出口以後，才會得到食物的獎賞。因為如此，這個實驗有別於一般行為主義者所設計的實驗。在行為主義的實驗裡，獎賞會很快出現在某個行為之後。例如，在老鼠壓下一個槓桿之後，食物或果汁就會馬上出現。在托曼的實驗裡，老鼠必須找到迷宮的出口才會得到獎賞。為了尋找出口，老鼠必須走過好多個巷道，並且在每一個岔口決定要如何移動。然而，老鼠怎麼會因為一個遲來的獎賞而做出一連串複雜的行為？托曼的解釋是，在老鼠獲得獎賞之前，牠



右側大鼠 (rat) 腦中的深灰色區是海馬。左側是大鼠移動的軌跡。灰橘色區中的小橘圓點表示當位置細胞活化時，大鼠當時所在位置。(諾貝爾網頁)

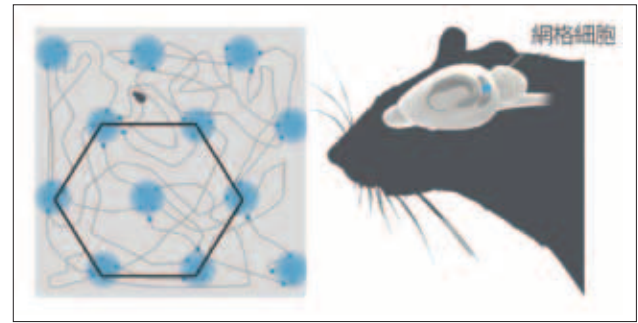
已經展開一種學習，托曼稱之為潛在學習 (latent learning)。這樣的學習啟動了一種針對外在環境而做的內在表徵 (representation)，也就是他所命名的認知圖。

托曼的解釋並沒有說明老鼠如何利用認知圖來縮短在迷宮裡遊走的時間。然而，他提供了很好的實驗，讓往後的科學家可以針對它們所呈現的結果做出不同的解釋，並且可以刺激科學家設計新的實驗來進一步評估各種可能的解釋。

今日回顧神經科學 (包括心理學) 的發展，我們可以看到托曼的實驗起碼帶動了兩個研究的方向。第一個方向，是奧基夫以及他的研究夥伴所開啟的研究。他們找到了動物為自己定位的神經細胞，奧基夫稱之為位置細胞 (place cell)。位置細胞是生長在大腦海馬 (hippocampus) 的細胞。當老鼠移動到某個位置時，這樣的細胞會變得活躍。老鼠移動到另一個位置以後，原來活躍的細胞會活力減弱，另一個細胞則變得活躍。後來的科學家又陸續發現了頭方向細胞 (head direction cell) [4]，邊界細胞 (boundary cell) [5] 與網格細胞 (grid cell) [6]。毫無疑問，這些型態的細胞是神經系統處理空間必備的要件，然而它們的存在還不足以說明老鼠如何在迷宮遊走。我們會再回到這個問題。

強化式學習

第二個方向，則是從更廣的角度來研究，企圖回答為什麼遲來的獎勵能夠幫助老鼠在迷宮裡尋找較佳的路徑。這一方向的研究逐漸結合在「強化式學



網格細胞位於內嗅皮質區內 (右藍色區)。大鼠抵達環境某些特定位置時，會活化單一的網格細胞。注意左圖中的藍色區域呈現正六邊形 (正三角形) 排列。(諾貝爾網頁)

習」 (reinforcement learning) 的旗幟下。以下簡述幾個重要的成果。

首先，透過薩頓 (Richard S. Sutton) 與巴托 (Andrew G. Barto) 的努力，強化式學習行為被制定為可以在電腦上操作的計算法則 [7]，可以解決某些傳統方法所無法解決的問題。強化式學習還可以與其他的學習方法結合在一起，成為更有效的方法。最近由谷歌 DeepMind 團隊設計的電腦軟體 AlphaGo 便是以強化式學習結合深度學習 (deep learning) 的方法，將這個軟體訓練為圍棋能手，並且在電腦對抗人腦的競賽中以 4:1 的結果擊敗了圍棋界的一流高手李世乜。

強化式學習的架構如下。假定 \mathcal{P} (例如人、動物、電腦軟體等等) 所處的狀況是 S ， \mathcal{P} 會根據經驗賦予 S 一個值 $V(S)$ ，代表 \mathcal{P} 評估 S 可能帶來的效益。一開始， $V(S)$ 被設定為零。在學習的過程中，如果 \mathcal{P} 在 S 的狀態下執行動作 A ，使得 \mathcal{P} 的狀態由 S 改變為 S' ， \mathcal{P} 會比較這兩個狀態所帶來效益的差異。這個差異被稱為預測誤差 (prediction error)。然後， \mathcal{P} 會根據預測誤差來修正 $V(S)$ ：如果預期效益小於實際效益， \mathcal{P} 會增加 $V(S)$ 的值；否則， \mathcal{P} 會減少 $V(S)$ 的值。

強化式學習的另一個特點是，它採取的是「一邊做，一邊修正」的學習模式。所以， \mathcal{P} 在任何狀態下都不會嘗試所有可能的 A 。相反的，它只選取比較有希望帶來高效益的 A 。因此， \mathcal{P} 不但使用預測誤差來修正 $V(S)$ ，也同時修正它對 A 的偏好值。一開始，所有可行的 A 都具有相同的偏好值。

然後，如果 \mathcal{P} 執行 A 以後帶來了高於預期的效益， \mathcal{P} 會增加對 A 的偏好值；否則 \mathcal{P} 會減少這個值。此後，當 \mathcal{P} 再度進入 S 狀態， \mathcal{P} 會根據某種機率來選取 A，且這個機率會隨著 A 的偏好值而（非線性的）成長。這麼做的好處是，剛開始任何一個 A 都有機會被選取。到了後期，只有某個 A 的偏好值遠大於其餘，因此更有機會被選取。

如果讀者需要例子，就請想像電腦在使用加強性學習來下圍棋。在這個例子裡，S 是目前棋盤上黑子與白子所佔據的位置，A 則是下一個落子的位置，而 $V(S)$ 則是在 S 的狀況下落子於 A 可能帶來的效益（贏棋的機會）。用通俗的語言來說，強化式學習的原理是：當我們做一件事所得到的報償大於預期，神經系統會賦予這件事更高的價值。也就是說，我們會更想做這樣的事。反之，如果它的實質報償低於預期，我們會減少對這類事情的興趣。如上所述，實際與預期效益之間的落差被稱為預測誤差。預測誤差在神經科學裡扮演非常重要的角色。在神經系統裡有許多型態的學習行為都需要預測誤差的訊息來調整方向，以獲取更好的成果。

如果神經系統依循強化式學習原理來運作，我們必然能夠在這個系統裡找到顯示預測誤差的訊息。令人欣喜的是，研究者確實找到了這樣的訊息。它來自一種神經傳導物質，名字是多巴胺（dopamine）。從多巴胺的來源與流向，研究者進一步發現到能把知覺與行動連結在一起的網絡。這個網絡是相當分散的系統。它的某些部門接收外界的訊息，也就是關於 S 的訊息。有些部門接收情緒中心對 S 的評價。這樣的評價又被傳送到另一個部門，以便分析它是否與預期的評價有所差異，也

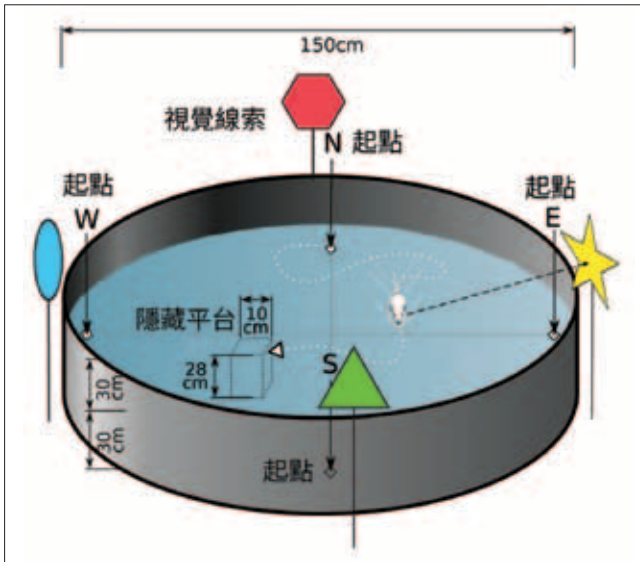
就是預測誤差。顯示預測誤差的訊息會進一步影響決策的部門。後面這個部門決定了什麼樣的 A 會被選擇以及執行。由於這個網絡將狀態 S 與動作 A 做了緊密的連結，我們姑且稱之為 SA 網絡 [8]。

SA 網絡的存在證實了加強性學習是神經系統所依循的運作原理。從這裡發展出來的另一個有趣的研究方向，則是對神經系統病變（精神分裂症、藥癮、憂鬱症、創傷後壓力症候群、注意力不足過動症等等）的分析。過去對於神經性病變的分析只能從外顯的行為出發。新的研究方向則能夠根據神經系統所依循的運作原理，來找出各種病症與正常行為之間的差異。在新的研究方向裡，多巴胺與加強性學習再度扮演了重要的角色 [9]。然而這個議題已經離本文主題太遠，就此打住。

莫里斯水迷宮

現在回到認知圖的議題。近年來神經科學家所採用的實驗設計不再是人類所熟悉的那種迷宮，而是一個圓形的水池（直徑為 1.5 到 2 公尺），裡面注入了不透明的物質（如牛奶），使得老鼠無法看到隱藏在水面下的平台（直徑為 10 到 15 公分，安置在遠離圓心的位置）。這樣的水池被稱做莫里斯水迷宮（Morris water maze）[10]。當老鼠被安置在水迷宮邊緣時，牠必須設法游到平台上才能休息。

為了讓游泳中的老鼠建立起適當的位置細胞，實驗者必須在周遭的環境安置一些視覺線索（四個不同形狀的圖形），並且給予老鼠兩天探索的機會，每天為時 180 秒。在探索期間，水底的平台暫時被移除。探索的意義是，當老鼠游到某個位置時，只有特定的位置細胞會因為老鼠在該位置所看到



莫理斯水迷宮。共有四個可隨機選擇的起點，長方形積木是水中隱藏的平台，四個不同形狀的圖形是在水迷宮周遭的視覺線索。（維基·本刊修圖）

的線索而起反應。事實上，每個位置細胞都只對一小塊區域做反應，研究者稱之為感知域（receptive field）。為了簡化討論，我們假定任兩個位置細胞的感知域都不重疊。在此假定下，我們可以想像水迷宮被位置細胞分割成若干區域。當老鼠游入某區域時，只有對應於這區域的細胞會起反應。

我們在前面說過，電腦可以使用強化式學習法來練習下圍棋。研究者發現，他們也可以使用強化式學習的模式來模擬老鼠如何在莫理斯水迷宮裡尋找平台 [11]。在後面的這個例子裡，狀態 S 是老鼠目前所在的區域，動作 A 則是老鼠進入這個區域以後可以採取的行進方向。在模擬的實驗中，我們假定每個區域都有 8 個可能的行進方向。在每次的嘗試中，隱藏平台的位置不變；老鼠出發的位置則從四個（上圖的四個起點）任選其一。那麼，老鼠經過大約 20 次的嘗試，就能夠從出發點直接游到平台去。不僅如此，老鼠花費在尋找平台的時間會隨著嘗試次數而逐步減少。這個結果不但在實際的情況下如此，在模擬的環境中也是如此。兩個結果的吻合，說明了強化式學習極可能是老鼠在陌生環境裡尋找出路所依循的機制。

到目前為止，我們還沒有回答兩個問題。第一，為什麼強化式學習能夠幫助老鼠縮短搜尋平台的時間？這是因為，強化式學習的目標是增加總體的報償。為了反映老鼠只有在找到平台後才能獲得報

償，強化型學習計算總體報償的方式是：如果起始時間是 0，而老鼠找到平台的時間是 T，那麼老鼠得到的總體報償是 γ^T （ γ 是小於 1 的正數）。所以，老鼠越快找到平台，牠得到的總體報償越大。

第二，老鼠只有在找到平台以後才獲得報償。為什麼這遲來的報償能夠幫助牠在更多的嘗試中逐漸降低搜尋平台的時間？這是因為，一開始老鼠的 V 值只有在平台座落的區域才上升為正值。然而，隨著嘗試次數增多，平台附近以及更多外圍區域的 V 值也上升為正值。而且，在進入 V 值為正的區域時，老鼠最可能選擇的 A 是能讓牠最快接近平台的方向，因為這個方向最能讓牠及早獲得休息的機會，增加總體的報償。不僅如此，隨著嘗試次數的增加，各個區域的 V 值都會逐漸增長。越接近平台的區域，它們的 V 值增長得越快速。

擁有正 V 值的區域會隨著嘗試次數而逐漸向外擴散。這現象反映了心理學經常提到的次級增強物（secondary reinforcer）效應。在心理學的術語裡，初級增強物（primary reinforcer）如食物、飲水、性愛、愉悅，是我們不需要經過學習就會反應的刺激。反之，次級增強物必須與初級增加物連結在一起才能誘發我們的反應。然而，次級增強物也能夠轉變為初級增強物，引導其他原來只是中性的刺激轉變為次級增強物。例如在人類世界中，金錢就扮演這樣的角色。金錢可以讓我們購買各種滿足生物需求的要件。於是，金錢本身變成了具有強烈吸引力的東西，導致高薪的職位、無限商機的產品、優惠的販售活動都變為有吸引力的刺激。

在結束這一節以前，讓我很快寫下兩點評論。首先，強化式學習對於老鼠在陌生環境裡遊走提出了

有趣的解釋。這解釋並不假定老鼠的大腦擁有類似地圖那樣的東西，卻可以讓老鼠在學習過程中逐漸找到最佳的途徑。這樣的學習依賴預測誤差的訊息，來幫忙老鼠修正在每個狀態下所做的決策。研究者已發現預測誤差的訊息存在於動物的腦神經系統裡，負責溝通協調知覺和行動之間的活動。因此，強化式學習的解釋擁有一定的合理性與可信度。

其次，我們在這裡所提出的解釋，可能只適用於動物在陌生環境裡的探索，並不足以說明人類許多複雜的行為，例如計程車司機如何在大都會區裡行車。只要思索一下計程車的工作特質就可以想到，計程車每更換一組乘客就改變了出發點與航向目標。然而，他們只有一次（而不是 20 次）的機會來尋找最佳途徑。因此，如何重新使用（reuse）過去的經驗，如何將這些經驗轉變為類似程式設計裡的副程式，變成非常重要的課題。事實上，已經有不只一個方向的研究注意到這個課題的重要性，好幾個未解的問題都指向這個新研究領域。

是否有先驗的時空架構？

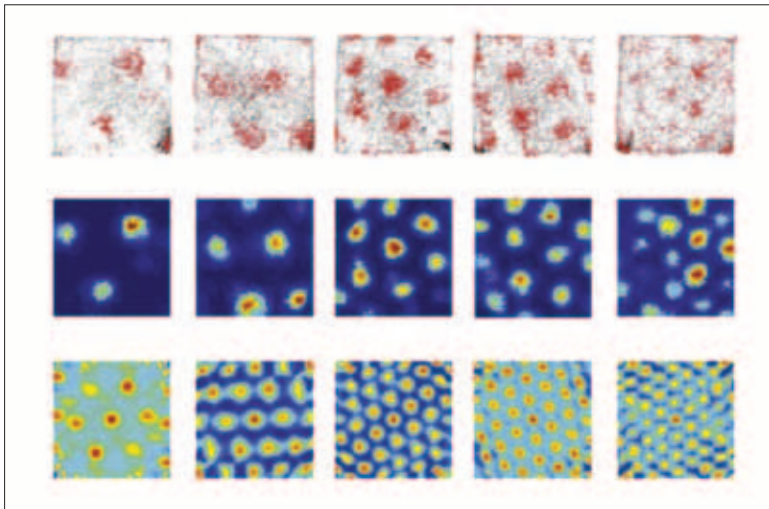
沒有人會否認，當我們企圖理解外在世界時，我們需要某種時空的架構來表徵我們的認知。問題是，這樣的架構是與生俱來，還是後天習得的？這個問題看起來相當不容易回答。然而隨著物理學、幾何學與神經科學的發展，我們竟然得到一些線索得以嘗試回答它。

愛因斯坦與康德一樣重視不變性在認知上所扮演的角色。然而愛因斯坦發現，正因為物理學律則具有不變性，時空的結構反而不能符合歐氏幾何以及牛頓力學的架構。既然如此，為什麼歐氏幾何與牛

頓力學卻相當討好我們的直覺呢？這或許是因為人類接觸到的現實世界確實符合那樣的描述。換言之，這種架構不是先驗的，而是從周遭世界學習來的。然而，人類如何學得這樣的架構不是物理學的探索目標。這類問題，只有心理學與神經科學才有可能提供合理的答案。在這方面，一系列與認知圖相關的研究再度掀起很多爭議：動物是否擁有內在的空間架構，導引牠們在陌生的環境探索？這樣的架構是否先驗的，也就是說，先於經驗而存在？

在這裡，先補充一個近年出現的研究結果。上文提到，除了位置細胞以外，還有其他幾種型態的細胞被認為是構成認知圖的重要元件，其中的網格細胞，被發現存在於內側嗅皮層（medial entorhinal cortex）。網格細胞從其他腦部輸入感覺（主要是視覺）的訊息，然後將整合過的訊息輸出到位於海馬的位置細胞。

網格細胞與位置細胞在動態行為上有很大的不同。如果以等高線來標示每個細胞在接受刺激時所產生的反應強度，那麼位置細胞的感知域只有一個高峰出現，而網格細胞的感知域則會有好幾個以週期排列的高峰出現。位置細胞的高峰與外在環境的邊緣物體有關，網格細胞的高峰則與這些東西無關，卻與外在環境整體的幾何結構息息相關。例如，在歐氏幾何環境裡生長的網格細胞，其位於感知域中央的高峰，總會有其他高峰以整齊的六角形排列在四周。然而，如果網格細胞的生長環境是某種直徑的圓球內部，那麼鄰近的高峰則會呈現五邊形的排列 [12]。更有趣的是，莫澤夫婦（與奧基夫同時獲得諾貝爾獎）的團隊確實執行了實驗來驗證這樣的假說，並且獲得正面的結果。也就是說，網



出自莫澤夫婦論文中的網格細胞實例。(維基)

地圖能幫助人類駕駛汽車，對於動物的荒野求生卻沒有任何價值，甚至對在室內活動的機器人也毫無用武之地。

並沒有證據顯示，動物的神經系統會使用坐標來為周遭的物體定位。相反的，動物會使用環境的線索為自己的位置以及頭顱的方向定位。現在已經有計算模型能夠說明 [14][15]，老鼠如何使用影像比對的方法來做到這兩種類型的定位。基本上，老鼠在探索陌生環境時，會建立一系列的視像細胞 (view cell) 為牠所遊走的環境存影。當老鼠再度出現在這個環境時，牠會比對前次看到的影像與這次看到的影像之間的相似程度，來估計自己所在的位置以及頭顱的方向。

頭顱方向對於老鼠的未來行進扮演非常重要的角色。當老鼠回到某個區域時，牠的頭顱方向未必與前次的方向相同。然而，如果老鼠知道牠的頭顱相對於某個固定點 (例如，遠處的一盞燈) 的角度，牠就可以利用這個訊息來調整身體的方向。例如，如果上次老鼠從東邊走到 A 點必須右轉，那麼這次牠從西邊走到 A 點就必須左轉。

我們現在理解到，為動物的位置與頭顱方向定位，其實就是托曼所說的潛在學習。潛在學習並不是像人類製作地圖那樣，為外在環境建立一個坐標系統，而是使用穩定的視覺線索，為動物的活動建立一套一致的內在表徵。這類策略已經在機器人身上實現，間接證明人或動物不需要依靠先設定的坐標系統，就能打造幫助自己遊走的架構。

喜歡深思的讀者一定會問，如果上述的潛在學習並不建立在先定的幾何基礎上，那麼它成功的祕訣在哪裡？答案是：學習。潛在學習的目的是要建立

格細胞的動態行為確實受到幾何環境的影響 [13]。

上面的發現似乎否定了神經系統對於任何幾何模式具有先天的偏好。網格系統並不能決定外界環境的幾何架構。反之，外界的幾何環境影響了網格細胞的動態行為。這與我們在上面所討論的強化式學習精神一致。強化式學習是以「一邊做、一邊修正」的方法來探索環境，並且學得獲取報償的最佳方式。從外界獲取的經驗是強化式學習方法的致勝關鍵。

從水迷宮的例子，我們可以進一步分析，如果神經系統有所謂認知圖這樣的東西，它與人類所設計出來的地圖有什麼不同？在人類設計的地圖裡，每一個位置都被賦予一個坐標值。如果使用者知道自己所在的坐標值，就能夠在地圖上找出到達目的地的最佳途徑。然而，在很多時候，我們不知道，或者不確定自己所在的位置，這也是紙本地圖不便的地方。近年來商業化的衛星導航系統補足了這方面的缺失。這個設備一旦與相關衛星系統連結，就能定出我們位置的坐標值，計算出前往目的地的最佳途徑，還進一步把附近的環境 (包括我們所在的馬路) 放置在螢幕上。

衛星導航系統確實為汽車航行帶來極大的便利。然而這個系統建立在龐大的專技基礎上。人類社會必須擁有足夠的專業人才、足夠的時間投入以及足夠的精良儀器，才製作得出像今天我們所使用的地圖。這些當然不是老鼠這類動物所能負擔。然而，

很多模式辨識器 (pattern recognizers)，然而它事先並不知道有哪些可能的模式，也不知道模式的總數。前文所提到的視像細胞就是一種模式辨識器。然而，視像細胞是在老鼠進入新環境以後才開始建立的。老鼠事先並不知道要在哪些位置上建立這些細胞，也不知道總共要建立幾個這樣的細胞 [16]。換言之，學習是一種資料導向 (data driven) 的活動。學習者需要建立新的辨識器，是因為他偵測到某種新模式，而這種模式無法用舊辨識器辨認。

自從托曼提出認知圖的概念後，學術界一直圍繞這個議題爭議不休。老鼠走迷宮的例子真的支持神經系統裡有認知圖這樣的東西嗎？如果有，它真的擁有像人類地圖所預設的幾何架構嗎？幾十年過去了，研究者開始提出一些具體可被驗證的理論。本文所提出的兩種學習策略——強化式學習與潛在學習——目前被認為是神經系統用來建立內在表徵的方法。這樣的表徵並不是一個坐標系統，它卻能夠支持老鼠在陌生的環境裡搜尋出路，還可以透過不斷的修正而縮短搜尋的時間。

強化式學習與潛在學習是兩種不同的學習策略。潛在學習是一種連結式的學習方法，目的在於建立各種形式的模式辨識器。強化式學習則是一種最佳化的學習方法，目的在尋找更好或更多的報償。然而這兩種學習方法都是資料 (或經驗) 導向的方法，都嘗試藉由某種型態的預測誤差來修正自己。更重要的是，動物的神經系統不僅使用這兩種策略在處理空間的問題，也使用它們來解決各種在認知以及運動上所面對的問題。這些理由都讓我們相信，學習策略，而非先定的架構，才是神經系統所仰賴的運作機制。

總結

康德的先驗哲學並不像嚴謹的科學理論那樣擁有實驗的證據以及理論的模型。要檢視這樣的學說，我們必須使用相關的科學理論來與之對照。在這篇文章裡，我們提出了三個這樣的科學理論，發現它們都不支持先驗的哲學觀點。(一) 從牛頓力學與歐式幾何演化到相對論與非歐 / 黎曼幾何，說明了人類的時空觀點並不是一成不變的；相反的，它們可以隨著實驗證據以及理論架構而做大幅度的調整。(二) 網格細胞的動態行為說明了從事空間的神經細胞並沒有先天的幾何偏好，而會依循歐氏或非歐 / 黎曼幾何的生長環境而有所變化。(三) 針對認知圖實驗所提出的理論模型 (潛在學習與強化式學習) 顯示了，神經系統並不需要人類地圖所使用的座標系統來導引動物做空間漫遊。這結果提示我們，座標系統以及它所預設的幾何架構可能只存在於人類 (而非動物) 大腦的上層結構中。這也可以合理的解釋，為什麼物理學家與數學家可以修改時空的架構，而不會受到下層神經系統的牽制。

最後值得一提的是，這篇文章在神經科學的議題上偏重於空間問題的探討，對於時間問題則甚少著墨。這是因為前者已經提供足夠書寫的題材，讓作者不得不割捨後者。∞

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

延伸閱讀

► 范姜文榮〈2014 諾貝爾生醫獎特別報導：大腦 GPS 導航位置與網格細胞系統〉

<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=59101>