

# 類比思考人工智慧研究及其對於科學教育的意涵

任宗浩

國立臺灣師範大學 科學教育研究所

## 摘要

本文主要介紹 Copycat 與 AMBR 兩個人工智慧類比模型的理念與運作機制，並藉此探討人工智慧類比模型發展的趨勢以對科學教育的類比教學進行反省。文中指出目前人工智慧類比模型發展的趨勢包括：(1)統整不同的心理運作機制；(2) 利用更基本的認知理論來解釋類比的運作；(3) 採用符號和聯結的混合模型；(4) 強調類比的動態過程。在類比教學方面，作者建議科學教師應注重一般性推理思考的訓練，以加強學生在標的概念領域的評估能力。

關鍵字：類比、人工智慧、類比教學

## 一、前言

類比對人類思考的重要性一直是哲學和認知心理學所關心的重要議題(Holyoak & Thagard, 1995; Petrov, 1998)。研究指出當科學家對於一些意外發現作推論時，類比往往是科學家思考的重要元素(Dunbar, 1995, 2001)。科學發展的歷史也顯示類比在許多理論模型的創造和解題上扮演關鍵性的角色。例如在物理領域中，波爾(1913)利用太陽系解釋原子模型；麥斯威爾(1864)利用電和磁相關公式在數學結構上的類比，修正安培定律而得到完整的電磁波動方程式；化學家克庫勒(Kekulé)(1865)因為「咬尾蛇」類比得到苯環的結構模型。其實類比不僅發生在科學創造或解題的時候(Boden, 1990; Clement, 1988)，人們在日常生活中也經常藉著類比將新資訊與舊知識相關聯，並調適相關認知結構以獲得整體知識結構的連貫性(Petrov, 1998)。

認知學者嘗試提出各種理論和人工智慧

模型以模擬類比的心理機制。這些類比理論的發展，大致符合從分析(Genter, 1983; Holyoak & Thagard, 1989; Keane, 1990)到統整(Hofstadter & Mitchell, 1993; Hummel & Thagard, 1997; Kokinov, 1994; Salvucci & Anderson, in press)的演變趨勢。早期的人工智慧類比模型(如 SME、ACME 和 IAM 等等)將類比推理或思考視為若干獨立心理過程(如表徵、檢索、遷移、評估和學習)的集合，主要著重類比對應和檢索的機制。最近的一些類比模型(如 Copycat、Sapper、AMBR、LISA)則嘗試提出統整性的理論，以解釋類比對應機制與其它心理過程之間的交互作用。本文藉由對 Copycat (Hofstadter & Mitchell, 1993) 和 AMBR (Associative Memory-Based Reasoning) (Kokinov, 1994a) 兩個人工智慧類比模型的介紹，探討人工智慧類比理論的發展，並提供對科學教育意涵的反省。

## 二、整合知覺表徵的類比推理模型—Copycat

### 基本理念

Copycat (Hofstadter & Mitchell, 1993) 主要用來解釋「流暢的概念」、「高層次知覺」以及「類比的產生」。將類比視為一種「高層次知覺」(high-level perception; 縮寫為 HLP) 的產物。HLP 是指生物對一個概念層次在某種情境下的表徵過程，這個表徵過程是經由高階概念和低階的知覺過程交互作用的結果：高階概念影響低階的知覺過程，而低階作用所知覺到的則會影響某些高階概念的激發，以至於建立該情境的表徵(Hofstadter, 1984; Hofstadter, Mitchell & French, 1987; Chalmers et al., 1992; Mitchell, 1993)。Chalmers 等人(1992)主張 HLP 和其它的認知過程是相互交織作用的，對於大部分人工智慧的研究都只嘗試去模擬概念過程，忽略知覺過程，因而無法充分了解人類的心智運作的限制提出批評。Copycat 利用一個簡化的字母領域(letter-domain)，建立類比情境的表徵系統，將 HLP 的原理具體化。

Copycat 最重要的一項特點就是藉由一些低階執行媒介(agents)之間的交互作用，經由統計後集體顯現出高階的概念層次行為。這些微小、低階以及不具決定性的執行媒介，稱作「小碎碼」(codelets) (Hofstadter & Mitchell, 1993)。透過這種分散的運作方式，「小碎碼」可以同時處理不同的工作。為了要模擬高層次知覺的特質，Copycat 採用聯結模型(connectionist)的整體顯現計算方式(emergent computation)，並融入了傳統符號

(symbolic) 典範的許多觀點 (Marshall & Hofstadter, 1997)。

### 類比運作機制

Copycat 主要包含三個子系統，分別為「Slipnet」、「Workspace」及「Coderack」。Copycat 的類比機制就是在這三個子系統的互動之下完成的(Hofstadter & Mitchell, 1993; Marshall & Hofstadter, 1997) (如圖一所示)：

#### (1) 長期記憶—「Slipnet」

「Slipnet」指的是儲存所有固定概念的地方，相當於「長期記憶」，它包含各種概念形式的概念網絡，但不包括概念範例。它包含了與字串類比解題有關的各種不同概念，例如「繼承」、「承先」和「相反」，以及「a」、「b」、「c」等字母。概念網絡將這些概念彼此關聯起來，每個概念由一個節點來代表，概念的抽象程度用一個測量數值「概念深度」來表示。「概念距離」則是表示兩個概念間相互影響的難易或趨力。「Slipnet」的結構是動態而非靜態的，「Slipnet」中各個概念間的距離會隨著執行的路線(當時的情境)而改變：每個節點因為受到當時情境的激發而有不同的活化程度，將不同的活化能量散佈到鄰近的節點，活化程度亦會隨著時間而衰退。活化是連續改變而非全開或全關的，當活化程度超過某一個臨界閾值(critical threshold)，該節點就有機會跳躍至完全活化的程度，之後仍會持續衰退。總而言之，每個概念的活化程度會隨著所遭遇到的情境不斷地改變，概念距離也會隨著所知覺到的情境而動態地調整。

#### (2) 轉運站—「Coderack」

「Coderack」可以想像成隨機等待室，在「Slipnet」中活化程度超過臨界閾值的「codelets」置於其中，等候召喚進入「Workspace」中執行任務。我們可以想像是這些執行媒介排隊等待召喚，唯一不同的是召喚的次序是隨機的而非事先決定的。

### (3)工作記憶—「Workspace」

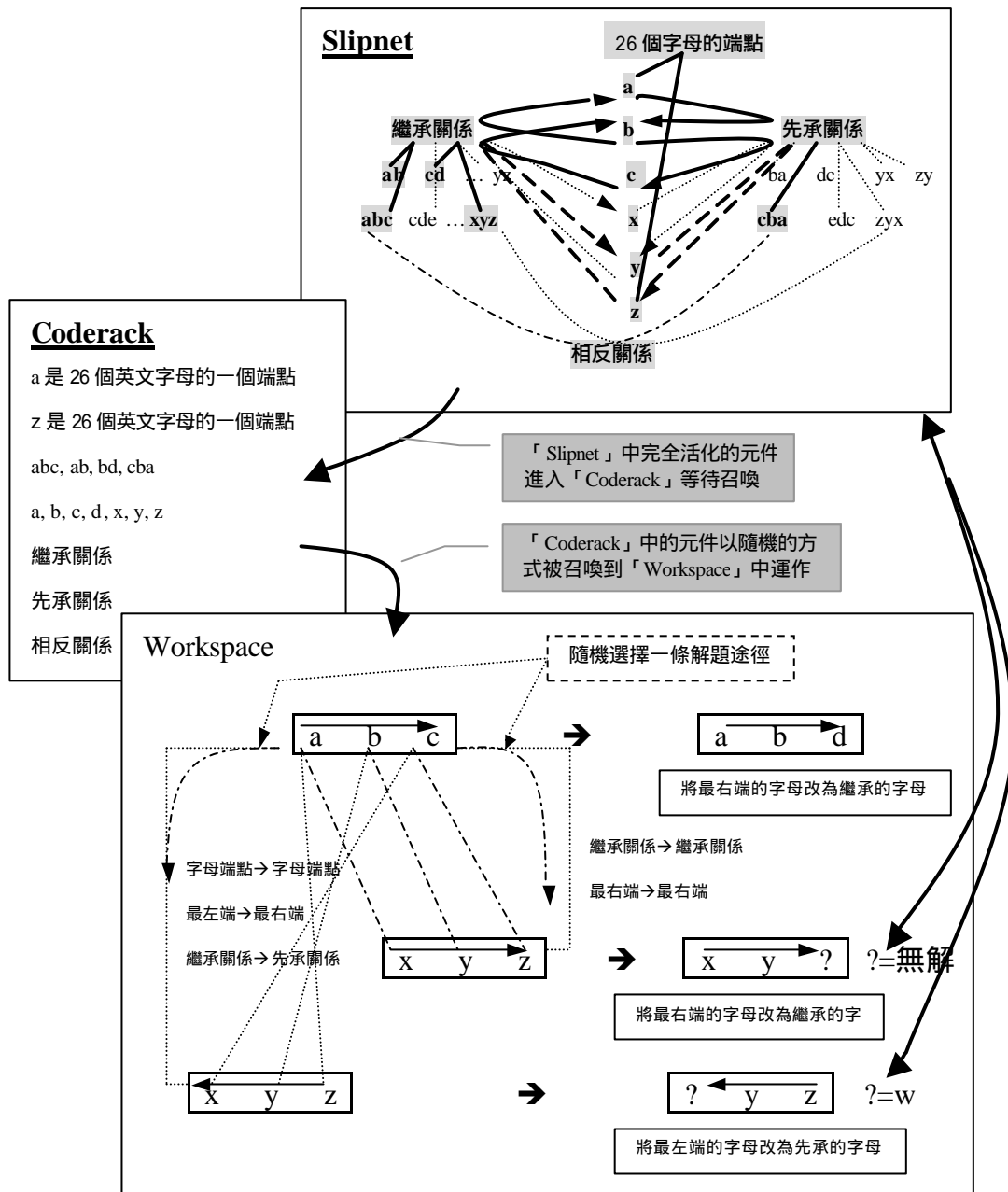
「Workspace」是知覺活動的位置，可以大略看成是 Copycat 的「短期記憶」或「工作記憶」，其中包含了「Slipnet」中各種被活化概念的例子，並組合成為暫時性的知覺結構。在「Workspace」中會同時有個別獨立的群集在不同的地方進行各種不同大小結構的建構，為了要得到更好的結構，經常會將已組成的結構拆開重組。在一開始執行的時候，「Workspace」中所有的只是所面臨情境的表徵(以字母序列來說，只是分辨字母的型態和邊界描述碼，如：最左、最右)，除此之外，完全沒有其它物件。經過執行媒介(「codelets」)的作用之後，「Slipnet」中的概念不斷的被召喚到「Workspace」，「Workspace」中逐漸形成不同的描述，並且經由不同的知覺結構連結起來。

「Workspace」中的運作有兩點特色：(1)持續的競爭以獲得注意：「Workspace」中的物件並非都能獲得相同程度的注意，而是取決於該物件的重要性或突顯性。(2)平行浮現多重層級的知覺結構：在「Workspace」中的一組物件會以某種結構方式束縛在一起，塊狀連結成為高階物件的候選元件，這種結構方式稱為「群」；例如 kk 是一個「相同群」。然而相同的物件可能會隨著知覺的不同而以不

同的結構方式束縛在一起，如 abc 這個「群」，必須視所知覺到的關係而定，可能被認定是一組從左到右「有繼承關係的群」(successor group)，或是由右至左有「先承關係的群」(predecessor group)，但不會同時承認兩種關係(雖然該程式可以很容易的在兩個觀點間作切換)。其中哪一個群的元件越突顯，那麼該結構方式就越具體化。

Copycat 利用「Workspace」中所浮現結構的連貫性作為評估的指標，這個指標稱為「溫度」。「溫度」的數值範圍為  $0^{\circ}\sim 100^{\circ}$ ，反應任何一瞬間在「Workspace」中所建立概念結構的質與量，數值越小表示所建立的概念結構之對應強度越強，連貫性越高，其中評估的標準依賴「Slipnet」中某些概念被激發的程度而定(Marshall & Hofstadter, 1997)。Copycat 的優點在於它可以解釋類比發生的機制，每次進行類比所找到的答案不見得會完全相同。

Marshall 和 Hofstadter (1997) 認為 Copycat 僅以「溫度」作為類比答案的評估判準太過薄弱，無法深入理解或解釋特定類比答案品質的好壞，並認為這是因為 Copycat 缺乏「自我監控」(self-watching)的機制所致。此外，Copycat 的另一項缺點是無法記住已找到的類比答案，如果再重新解一次相同的問題，先前的經驗完全不會提供任何的貢獻。Metacat (Marshall & Hofstadter, 1997) 是為了解決上述 Copycat 的兩個缺點而提出之改良版本，一方面增加了「記憶先前已找尋到的答案」之機制，一方面利用大量的事件基模，豐富該程式比較和對照不同答案品



圖一、以「abc:abd→xyz:?」類比推理為例，圖示 Copycat 如何藉由「Slipnet」、「Workspace」和「Coderack」的互動得到答案(整理自 Hofstadter, & Mitchell, 1993; Marshall & Hofstadter, 1997)。

質好壞的能力 (Marshall & Hofstadter, 1997)。Metacat 在每次執行一個類比問題時，可以尋找和記憶許多不同的答案，不像

Copycat 找到一個答案就停下來。Metacat 每找到一個答案，便將題目、答案以及答案的相關資訊全部像包裹一樣的儲存起來，然後

繼續尋找其它不同的答案。每個答案都代表著對該問題的不同理解和詮釋，時間久了，便形成有關該問題的一個豐富的資料庫。個別答案的相關資訊（包括所應用的「群」、「搭橋」和「概念對應」等等）即可據以比較不同答案之間的品質孰優孰劣(Marshall & Hofstadter, 1997)。

### 三、以記憶關聯為基礎的類比推理模型—AMBR

#### 基本理念

Kokinov (1989)主張應該利用一個基本的認知結構理論來整合類比和其它心理運作過程，而這個認知結構理論必須能夠解釋(或滿足)有關個別心理過程方面研究的發現。AMBR 是 Kokinov 根據認知架構理論 DUAL (Kokinov, 1994b, 1997) 發展出來的類比模型(Kokinov, 1994a, Petrov, 1998)，主要以「記憶」為基礎，整合「知覺」、「類比對應」和「推理」等心理過程，強調人工智慧的類比模型應該能夠滿足和解釋真實情境中類比和人類記憶等相關研究的發現(Kokinov, 1998; Kokinov & Petrov, 2000; Kokinov & Petrov, 2000)。

DUAL 的幾個重要的特性分別為 (Kokinov, 1994b; Kokinov & Petrov, 2000; Petrov, 1998)：(1)混合性(hybridity)：結合互補的觀點，包括符號和聯結模型觀點的統整，以及陳述性知識與程序性知識的結合；(2)整體浮現的計算方式：認知架構中，所有的程序和知識表徵都是透過一組微小的執行媒介(micro-agents)所執行。整體的行為則是

從這些微小的媒介和它們之間交互作用的組織圖像中浮現出來；(3)動態且受情境影響的：DUAL 的運作必須能夠持續不斷地反應外在環境的影響。在不同的情境之下，同樣的作業可以由不同的一組媒介來執行，或者由相同的一組媒介執行，不過參予的時間和程度不同。最終浮現的整體結果隨著情境的不同而改變。

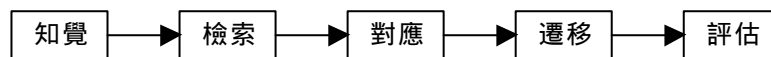
AMBR 目前仍在發展當中，雖然經過幾次不同的改良版本，但是其理念和架構是不變的。Kokinov (1997)根據 DUAL 的理念和心理學的相關研究，並結合一般性推理和類比推理的觀點，整理出三個 AMBR 發展的原則，分述如下：

- (1)統整性 (integration)：推理的過程不應該被分割成一系列相互獨立的子程序，以模組化和線性的方式進行(如圖二(a))。各個程序應該同時進行，並且相互影響(如圖二(b))，每一個運算的機制不只是產生一個結果而已，所產生的結果還會抑制或促進其它的運算機制，產生其它結果。AMBR 主要利用平行處理和整體浮現的設計來達到這個目的。
- (2)一致性(unification)：AMBR 的設計注重類比過程中的一般性推理，強調類比、演繹和歸納都是推理的一種，雖然在程序上會有些不同，但是相關的心理機制（如對問題的知覺、表徵以及運用舊知識到新的情境等等）應該都是相同的。
- (3)容易受情境影響的特性(context-sensitivity)：AMBR 發展的另一項重要目標就是能夠反應人類在推理時易於受到情境影響的

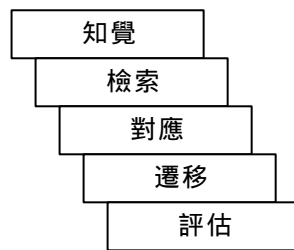
特性。人類的推理很容易受情境影響，影響推理結果的因素除了長期記憶中相關的知識以外，還包括問題情境和近期內所作過活動（提示效應）等等。

AMBR 的第一個完整版本 AMBR1 成功的整合了部分關於記憶（提示效應）、情境效應和推理（解題）之間的交互作用。為了更

能符合心理學對記憶和表徵研究的結果，Kokinov 和他的研究生提出了改良版本 AMBR2(Kokinov, Nikolov, & Petrov, 1996; Petrov, 1997)以及 AMBR3(Petrov, 1998)。下一段即將介紹的類比機制主要根據目前最新的版本 AMBR3。



(a)



(b)

圖二：(a) 圖示「序列式類比模型」：整個類比過程被拆成一系列獨立的階段，階段之間的交互作用只有將資料結果傳給下一階段。(b)圖示「互動式類比模型」：各個子程序之間在時序上相互重疊，並且相互影響(引自 Petrov, 1998, Chap 3, pp. 9-10)

### 類比運作機制

「執行媒介」是 AMBR 運作的最小單位,AMBR 最重要的三種執行媒介型態為「概念媒介」(concept-agents)、「實例媒介」(instance-agents) 以及「假設媒介」(hypothesis-agents)(Petrov, 1998)。其中「概念媒介」代表實體（物件、關係或因果關係）的類別，以分類學的架構方式將一個「概念媒介」與它的上屬類別(SUPER)和從屬類別(SUBC)關聯起來，並且可以藉由聯結指令（a-link）將此概念與其它相關概念關聯起來。「實例媒介」代表某個特定概念的實例，

其中「例示插槽」(inst-of slot)指出此媒介為哪一種概念的實例。「對應媒介」(correspondence-agents) 是將不同狀況中的實例和所屬概念相對應，而「假設媒介」就是最重要的一種「對應媒介」。每個「假設媒介」代表兩個「概念媒介」或「實例媒介」間的暫時性對應，然而對應媒介的選取至少必須滿足一個或多個理由，這些理由可以是來自於語意或語構上的相似性。AMBR 在這部分比 SME 或 ACME 更能符合工作記憶的限制(Kokinov, 1994; Petrov, 1998)，因為人們作類比思考的時候，不可能考慮所有可能的

對應狀況(Hofstadter & Mitchell, 1993; Keane, 1990)。

AMBR 主要包括六個基本的運作機制：「活化蔓延」(spreading activation)、「記號傳遞」(marker passing)、「限制滿足」(constraint satisfaction)、「結構對應」(structure correspondence)、「評比與晉級」(rating and promotion)以及「特殊化推論」(Skolemization)(Petrov, 1998)。簡單介紹如下：

- (1)活化蔓延：「活化蔓延」是 AMBR 最重要的運作機制，主要是從聯結論的觀點出發(Grossberg, 1978; Holyoak & Thagard, 1989)。每一個「執行媒介」為神經網絡中的最小單位，經由和它有交互作用且被激發的其它媒介傳遞而獲得「能量」，透過「活化函數」的轉換後，得到一個估算數值稱為該媒介的「活化能量」，再輸出給其它相關的執行媒介。最初的活化源由問題情境所決定，包括所知覺到的元素以及系統設定的目標；兩個媒介之間是否有交互作用或是相關聯結則是由「記號傳遞」機制判定。一旦「活化能量」超過某個閾值，該執行媒介則躍遷至「工作記憶」中，進行類比的各種不同運作程序。此外，「活化能量」越大，該媒介運作的速度越快。整體概念網絡活化圖像的改變會影響 AMBR 其它所有運作的機制，這也是 AMBR 具有動態、整體浮現以及受情境影響等特性的基礎。
- (2)記號傳遞：「記號傳遞」可以說是「活化蔓延」的互補機制，它是根據符號運作典範下的語意網絡模型(Hendler, 1988)所發

展出來的。這個機制決定網絡中的任何兩個節點是否有關聯，換句話說，就是決定一個節點有哪些「鄰居」。經由這個概念層次的符號規則，提供相關的資訊以便其它的機制得以運作。例如「記號傳遞」所形成的語意網絡，決定「活化蔓延」機制中能量傳遞的途徑。AMBR 的記號是由「實例媒介」開始，沿著從屬關係的插槽傳遞下去，例如由某個特定的「茶壺-1」開始，傳遞給概念媒介「茶壺」，再依次傳遞給「裝液體的容器」、「容器」到「人工製品」等等；另一條途徑由「瓶子-7」傳給「瓶子」，然後和前一條途徑在「裝水的容器」這個節點上交會。這個交會的節點會形成一個新的假設，引發「限制滿足」的機制。

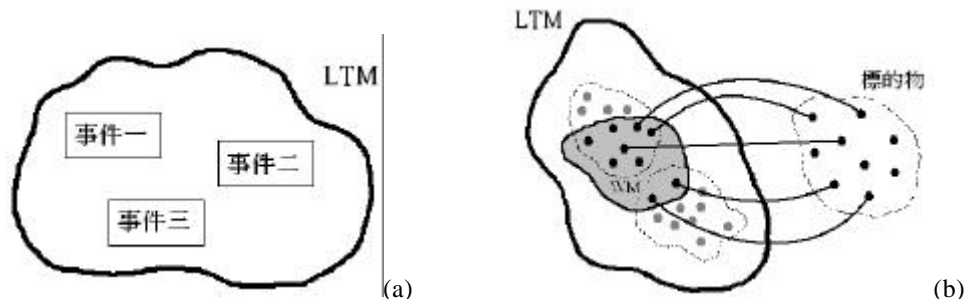
- (3)限制滿足：「記號傳遞」和「結構對應」機制根據局部的資訊產生假設，「限制滿足」機制則是藉由建立一個「限制滿足網絡」(constraint satisfaction network, 簡稱 CSN)，將相關的執行媒介(agents)關聯起來，浮現連貫一致的媒介網絡(coalitions)。「限制滿足」機制依據語意、語法和實用性等判準，將各種假設適當地關聯起來形成 CSN。AMBR 雖然採用類似 ACME (Holyoak & Thagard, 1989)限制滿足的機制，但是在許多方面和 ACME 有所不同。其中差異最大的兩點在於(Kokinov, 1994; Petrov, 1998)：(1)AMBR 的 CSN 是利用整體浮現的方式建構的，個別的假設是平行且局部建立的，以動態的方式併入整體的網絡中；(2)AMBR 的 CSN 是依附

在主要的網絡之上，判準檢核的機制分散在不同的媒介中進行，因此不必另立一個對語意和實用性判準的評估機制。ACME 和 ARCS (Thagard et al., 1990)的「限制滿足模型」的「限制滿足網絡」是以一種「檢索→建立對應網路→釋放限制法則」的序列方式進行(Thagard, 1988; Thagard et al., 1990)，將過程視為三個相互獨立的三個階段所串聯而成的，而 AMBR 中的這三種運作是同時進行且相互影響的(Kokinov, 1994a)。

- (4)結構對應：「結構對應」根據現有的一些假設產生新的假設。就微觀的角度來看，「結構對應」機制負責活化激發具有連貫性假設之間的聯結；就巨觀功能上來說，它的運作使得「限制滿足網絡」最後浮現出來的對應網絡能夠符合 Gentner(1983)所要求的「系統一致性」(systematicity)。其中「由下而上的結構對應」(bottom-up SC)與「由上而下的結構對應」(top-down SC)是兩種最主要的「結構對應」運作。「由下而上」指的是由兩個「實例媒介」之間對應的假設，推論到其上屬「概念媒介」或更高階概念之間的對應。「由上而下」

的對應，顧名思義就是經由假設高階關係的對應，推論出下屬實例或物件之間的對應。

- (5)評比與晉級：每一個假設透過「秘書」功能根據「限制滿足」和「結構對應」的判準給予評分，如果某一個假設能夠保持領先，則會晉級成為「優勝者」，同時會抑制(淘汰)分數過低的假設。此外，在評估機制的運作過程中有可能會觸發「特殊化推論」的機制。
- (6)特殊化推論：「特殊化推理」是指根據一些普遍的語意資訊，增加某個特定事件記憶的描述。例如某個事件記憶中包含了一個陳述 A：「茶壺 1 是用金屬 1 做的」，後來「茶壺 1」被對應到另一個事件情境中的「瓶子 2」，但是在該事件的相關訊息中並未指出「瓶子 2」的材質與陳述 A 相對應，此時「特殊化推論」的機制便會搜尋記憶中的「普遍陳述」，看是否有相關的資訊可以推論「瓶子 2」的材質。例如「特殊化推論」可能根據記憶中的一個普遍陳述「瓶子(通常)是用玻璃做的」，推論「瓶子 2 是由某種玻璃做的」。



圖三：(a)AMBR1 的記憶是一種集中式的而且固定存封的「事件」；(b)AMBR2 和 AMBR3 的記憶模式，隨著標的情境可能重組不同事件中的記憶元素(引自 Kokinov, 1998, p.100)。



AMBR 透過「執行媒介」和這六個運作機制，以平行和交互作用的方式模擬類比的解題過程。AMBR2 和 AMBR3 在記憶檢索的限制上比 AMBR1 更符合心理學研究的結果，其中一個最主要的差異在於 AMBR1 所採用的長期記憶模型和 ARCS 和 MAC/FAC 一樣，是一種集中式的而且固定存封的「事件」(episodes)表徵模式(見圖三(a))，在 AMBR1 的事件基模中仍舊有較重要的「領導級媒介」(leader)存在。AMBR2 和 AMBR3 打破這種集中式事件基模的限制(如圖三(b))，允許在工作記憶中，結合不同「事件記憶」的元素，能夠模擬如「記憶的曲解」和「記憶的順序效應」等有關記憶之動態特性(Kokinov & Petrov, 2000)。AMBR3 最大的突破則是「特殊化推論」機制，這個機制一方面可以打破 SME 和 ACME 要求對應關係的論述語句數目必須一樣的限制，另一方面可以為更新版本 AMBR4 的「遷移」機制奠定基礎(Petrov, 1998)。

#### 四、人工智慧類比模型的發展趨勢

Thagard(1988)在其「類比的向度」一文中，呼籲類比理論的發展應該朝著統整類比向度(表徵、檢索、遷移和學習)的方向進行。至目前為止，的確許多類比模型嘗試整合不同心理機制，其中包括了 LISA (Hummel & Thagard, 1997)和 AMBR 對於「類比」、「記憶」和「解題」的整合；Copycat 對「知覺」和「類比對應」的整合；HOTCO (Thagard, & Shelley, 2001)對「類比」和「情緒」的整合等等。

除了統整不同的心理機制之外，根據前面介紹的 Copycat 和 AMBR，可以歸納出兩者共

同具有的一些特質，這些特質很可能是目前與未來人工智慧類比模型的發展趨勢，作者認為最主要的有三點：

- (1)利用更基本的認知理論來解釋類比的運作：  
Copycat 認為類比是「高層次知覺」下的產物，AMBR 則是鑲嵌在 Dual 的認知架構中。傳統的類比模型如 SME、ACME、IAM 從類比出發，透過和其它認知過程的整合以了解人類的推理。Salvucci 和 Anderson(in press)認為這種從個別的整合去了解全體的方式會有困難，強調應該從更基本的認知架構理論來理解類比，因為類比本來就是人類基本的認知功能之一。PMT(path-mapping theory)就是 Salvucci 和 Anderson 根據 Anderson 的 ACR-T\*理論所提出的一個類比理論。
- (2)採用符號和聯結的混合模型：Copycat 與 AMBR 都結合符號和聯結模型兩種互補的觀點，利用執行媒介的運作以滿足認知神經心理學最近研究所發現的一些大腦運作特質，例如模組化(modularity)、平行運作(parallelity)與機率性活化(probabilistic activity)等(Byrne & Fox, 1998)。這種採取整合符號和聯結典範的觀點也被 LISA 和 Sapper(Veale et al., 1997)等其它的類比模型所採用。表一列出符號和連結兩種典範在表徵、組合和功能上的特質(Blank, Meeden, & Marshall, 1991)。
- (3)Copycat 和 AMBR 均強調類比的動態過程：以「表徵」為例，早期的類比模型如 SME、ACME 和 IAM 強調在概念層次的類比對應，不論是標的概念或是類比概念的「表徵」都是靜態且事先給定的，所以

表一：聯結和符號模型典範之比較(譯自 Blank, Meeden, &amp; Marshall, 1991)

	聯結的	符號的
表徵	分佈的 連續的 浮現的 使用會影響其形式	原子論的 分立的 靜態的 獨斷的
組合	平行的 受情境影響的	集中的 系統化的
功能	微觀語義的 整體論的	巨觀語義的 原子論的

在類比對應過程中，相關概念的表徵都是不變的(Chalmers et al., 1992, Kokinov, 1998)。然而研究指出當人們進行對外在事物的探究時，不僅對標的概念的表徵會不斷的改變，即使是對長期記憶中相關知識的表徵也會不斷的改變(例如 Loftus, 1979; Neisser & Harsch, 1992)。Kokinov 和 Petrov (2001)認為這就像是皮亞傑所認為的「同化」和「調適」作用，主客觀間不斷地相互影響，造成對外在事物和內在知識不斷「再表徵」(re-representation)的過程。Copycat 對「知覺」的討論，強調「概念」對「標的問題表徵」(representation of target problem)的影響，相當於「同化」的作用。AMBR 強調問題的「情境效應」對記憶的影響，相當於「調適」作用的部分，也就是對內在知識的「再表徵」(Kokinov & Petrov, 2001)。

## 五、結論—對科學教育的意涵

Copycat 所強調的高層次知覺在教學上具有重要的意義，因為每個人對問題情境(或新的概念情境)的知覺都不一樣，所以學生和

老師對相關概念的表徵可能有很大的不同，所作的類比結果也很可能不一樣，甚至導致迷思概念。歷史上許多重要的理論是經由類比而發現的，然而發現該理論的科學家對於待解決的問題情境往往是經過長時間的思考，對一個生手來說，顯然無法立刻捕捉到新面臨的概念結構。如此一來，SME, ACME 和 IAM 所強調的「結構相似性」判準的實用性不高，因為對類比物不熟悉的概念不適合經由類比作推論，對類比物太過熟悉的概念又不需要類比。這確實存在著兩難的困境。不過科學家使用類比的機會並沒有因此而減少(Dunbar, 1995, 2001)，原因之一是科學家可以經由分析標的概念系統的內在邏輯一致性，以及和外在外在表徵比較來判斷類比結果是否正確，而不是藉由評估標的概念與類比概念間的「結構相似性」來作為類比是否成功的判準。

許多類比研究學者(Falkenhainer et al., 1989; Hall, 1989; Keane, 1994; Kokinov, 1994)都提到「評估」是類比推理的一個重要向度。類比本身不能作為推論之證明，只能提供理解的範本，或是在解題過程中頓悟的來源。

雖然大部分的類比理論(如 SME、ACME、IAM、AMBR 和 PMT 等)都同意「結構相似性」或「系統性」在類比對應的內在評估上扮演重要的角色,有的還加上「實用性」或認知行為上的各種限制作為類比對應時內在評估的考量,但是這些限制都無法確保類比推論的有效性(O'Donoghue, 1997)。在進行「類比教學」時,對於標的領域和類比領域在「結構相似性」上的要求,或許能夠減少讓學生產生「迷思概念」的機會,但是這必須建立在「教學者相當了解類比概念和標的概念系統的整體結構」的基本假設上,目的是為了找一個比較接近教學概念的模型。這樣的類比教學效果可能不會比直接利用一個接近標的概念的實體模型(如圖形、實物模型或動畫等)來得更有效。Donnelly(1990)的研究指出類比只有在伴隨圖片和明顯指出相似性的情形下才會對受試者的學習有正向幫助。此外,Donnelly(1993)也發現與其讓學生作自我聯結的類比學習,其效果還不如在學習時提供精緻化的質問。

回顧類比在科學成就上所扮演的角色,類比的重要性遠超過作為教學的模型。以波爾的原子模型為例子,雖然就「結構相似性」的判準而言,波爾的原子模型和太陽系似乎在結構上非常相似,然而是否能依此評估類比品質的優劣仍然值得討論。波爾從古典物理的角度出發,類比行星運轉軌道模型,加上一些約束條件(如電子的物質波形成駐波時,不會產生電磁輻射),所計算出來氫原子光譜與實驗結果吻合。這個類比模型看似成功,但是如果以量子物理的觀點,波爾的類

比模型之所以成功純粹是幸運使然,因為用量子理論計算氫原子光譜的能量未必會和古典物理算出來的結果一致,只不過因為電磁力和距離平方成反比的關係,使得兩種理論算出來的結果剛好是一樣的(同樣的幸運也降臨在拉賽福的身上)。波爾的幸運並非來自於原子結構和太陽系結構的相似性,在猜測電子與原子核的關係之前,波爾並不知道電子繞原子核的結構是否正確,所以他不可能事先計算好太陽系模型和原子模型之間的結構相似程度,才決定是否採用太陽系作為類比模型。此外,雖然波爾的原子模型後來被證明和實際的原子結構有所差距,但是卻不會因此而減少該模型對近代物理發展的重要性。所以與其說「結構相似性」是類比對應時評估的一個標準,不如說是類比容易成功的一個要素(但非充分或必要條件)。類比推論是否成功,必須依賴標的概念系統內的檢測,這包括是否能解決標的問題、是否與標的系統的實驗結果相吻合,或者是否和標的領域內已知的知識在邏輯上相連貫。

根據以上的討論,作者建議科學教師在使用類比進行教學時,除了先了解學生對類比概念和標的概念的先備知識之外,更應該明顯告訴學生類比的結果可能發生錯誤。另一方面,積極的訓練學生的一般性思考能力才是避免由於誤用類比而產生永久性迷思概念的根本之道。

#### 參考資料：

1. 高淑芬和邱美虹(1998):類比的檢索與對應。科學教育學刊,6(1),63-80。

2. Behrens, C. E. (1943). The Early Development of the Bohr Atom. *American Journal of Physics*, 11, 135-147.
3. Boden, M. A. (1990). *The creative mind: Myths and mechanisms*. New York: Basic Books.
4. Chalmers, D., French, R., & Hofstadter, D. (1992). High-level perception, representation, and analogy: A critique of artificial-intelligence methodology. *The Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 4(3), 185-211.
5. Clement, C. A., & Gentner, D. (1991). Systematicity as a selection constraint in analogical mapping. *Cognitive Science*, 15, 89-132.
6. Dunbar, K. (1995). How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories. In R. J. Sternberg and J. E. Davidson (Eds.), *The nature of insight* (pp. 365-395). Cambridge, MA: MIT Press.
7. Dunbar, K. (2001). The analogical paradox. In D. Gentner, K. Holyoak, & B. Kokinov (Eds.), *The analogical mind: Perspectives from cognitive science* (pp. 313-334). Cambridge, MA: MIT Press.
8. Falkenhainer, B., Forbus, K. D. & Gentner, D. (1989). The structure-mapping engine: Algorithm and example. *Artificial Intelligence*, 41, 1-63.
9. Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155-170.
10. Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning. In S. Vosniadou, & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*. London: Cambridge University Press.
11. Kolodner, J. (1993). *Case-based reasoning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
12. Hendler, J. (1989). Marker-passing over microfeatures: Towards a hybrid symbolic-/connectionist model. *Cognitive Science*, 13, 79-106.
13. Hofstadter, D.(1984). The copycat project: An experiment in nondeterminism and creative analogies. *AI Memo 755*, MIT Artificial Intelligence Laboratory.
14. Hofstadter, D.(1995). *Fluid concepts and creative analogies*. New York: Harper-Collins Publishers, Inc.
15. Hofstadter, D., & Mitchell, M. (1993). The Copycat project: A model of mental fluidity and analogy-making. In K. Holyoak, & J. Barnden (Eds.), *Advances in connectionist and neural computation theory*. Norwood, New Jersey: Ablex Publishing Corporation.
16. Hofstadter, D., Mitchell, M., & French, R. (1987). *Fluid concepts and creative analogies: A theory and its computer implementation*. Publication #18, Center for Research on Concepts and Cognition, Indiana University.
17. Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1989). A

- computational model of analogical problem solving. In S. Vosniadou, & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*. London: Cambridge University Press.
18. Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1995). *Mental leaps*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
19. Keane, M. T. (1990). Incremental analogizing: Theory and model. In K. J. Gilhooly, M. T. Keane, R. Logie, & G. Erdos (Eds.), *Lines of thinking: Reflections on the psychology of thought* (Vol. 1). New York: Wiley.
20. Kokinov, B. (1994a). A hybrid model of reasoning by analogy. In K. Holyoak & J. Barnden (Eds.), *Advances in connectionist and neural computation theory, vol. 2: Analogical connections* (pp. 247-318). Norwood, NJ: Ablex.
21. Kokinov, B. (1994b). The DUAL cognitive architecture: A hybrid multi-agent approach. In A. Cohn (Ed.), *Proceedings of the Eleventh European Conference of Artificial Intelligence* (pp. 203-207). London: John Wiley & Sons, Ltd
22. Kokinov, B. (1998). Analogy is like cognition: dynamic, emergent, and context-sensitive. In K. Holyoak, D. Gentner, & B. Kokinov (Eds.), *Advances in analogy research: Integration of theory and data from the cognitive, computational, and neural sciences* (pp. 96-105). Sofia: NBU Press.
23. Kokinov, B. & Petrov, A. (2000). Dynamic extension of episode representation in analogy-making in AMBR. In *Proceedings of the twenty-second annual conference of the cognitive science society* (pp. 274-279).
24. Kokinov, B. & Petrov, A. (2001). Integration of memory and reasoning in analogy-making: The AMBR model. In D. Gentner, K. Holyoak, & B. Kokinov (Eds.), *The analogical mind: Perspectives from cognitive science* (pp. 59-124). Cambridge, MA: MIT Press.
25. Marshall, J., & Hofstadter, D. (1997). The Metacat Project: A Self-Watching Model of Analogy Making. *Cognitive Studies: Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society, special issue on similarity and analogical reasoning*, 4(4), 57-71.
26. Mitchell, M. (1993). *Analogy-making as perception*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
27. Mitchell, M., & Hofstadter, D. (1990). The Emergence of Understanding in a Computer Model of Analogy-Making. *Physica D*, 42, 322-334.
28. O'Donoghue, D. (1997). Towards a computational model of creative reasoning. *Conference on computational models of creative cognition*.
29. O'Donoghue, D. (1999). Constraining analogical inference with memory-based verification. *Artificial Intelligence and Cognitive Science (AICS-99), UCC*, pp 58-64.

30. Petrov, A. (1998). A dynamic emergent computational model of analogy-making based on decentralized representations. Unpublished doctoral dissertation, New Bulgarian University, Sofia.
31. Salvucci, D. D. & Anderson, J. R. (in press). Integrating analogical mapping and general problem solving: The path-mapping theory. *Cognitive Science*.
32. Thagard, P. (1988). Dimensions of analogy. In D. H. Helman (Ed.), *Analogical reasoning*. Dordrecht, Holland: Kluwer.
33. Thagard, P., Shelley, C. (2001). Emotional analogies and analogical Inference. In D. Gentner, K. Holyoak, & B. Kokinov (Eds.), *The analogical mind: Perspectives from cognitive science* (pp. 59-124). Cambridge, MA: MIT Press.
34. Veale, T., O'Donoghue, D., & Keane, M.T. (1997). Computability as a limiting cognitive constraint: Complexity concerns in metaphor comprehension about which cognitive linguists should be aware. In T. Verspohhr (Ed.), *Cognitive linguistics: Cultural, psychological and typological issues*. Chicago: University of Chicago Press.