

2010年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

編號：050006-04

作品名稱

達文西「蜜」碼－蜜蜂的視覺經驗與圖形辨識

Can visual experience enhance pattern discrimination ability
of honeybee?

得獎獎項

動物學科大會獎二等獎

學校名稱：國立高雄師範大學附屬高級中學

作者姓名：陳曦

指導老師：楊恩誠、陳桂芳

關鍵詞：蜜蜂、視覺經驗、圖形辨識

作者簡介



我是陳曦，目前為高師大附中高二生。國小時開始接觸科展，研究與做實驗開發了我對科學領域的興趣，也對生物有更進一步的認識。我從小就很喜歡在大自然中觀察小生物，飼養昆蟲是我的一大興趣。

很高興可以藉由這次國際科展，讓我開開眼界，學習更多科學知識，觀摩更多突出作品。

Abstract

By rewarding, honeybee workers can be trained and learn the difference between two patterns. However, they may not be able to discriminate one from the other if the two patterns are surrounded by similar background. Interestingly, the probability of honeybees to correctly discriminate different patterns can be increased if they are visually experienced. Such capability of experiential learning is so-called top-down processing in the visual system.

A Y-maze was used to train honeybees to discriminate alphabetical patterns. Initially, the honeybees were unable to discriminate the complicated pattern of letters. After training, by being shown simplified patterns of letters, honeybees were then able to discriminate those complicated patterns of letters which they could not do so before training. It is fair to say that honeybees can discriminate patterns through experiential information hints.

Using different features of patterns such as shape, position, correct end and wrong end to conduct experiments, we found that honeybees were able to extract the features to form more profound experiences in memory, and strengthen the ability of discrimination.

With a brain smaller than 1 mm^3 , honeybees deal with complicated visual information without difficulty. Their behavior and neural mechanism are worthy of exploring further.

摘要

蜜蜂(*Apis mellifera*) 可以透過視覺經驗的累積與學習，增加辨識影像的正確率，這種透過先前學習過的經驗而增進視覺辨識的能力，與一般所熟知在視覺上是由眼睛將影像訊號傳至大腦進行辨識的過程恰好相反，因此被稱為 top-down process。

我們以 Y 型迷宮進行蜜蜂的行為實驗，制約訓練蜜蜂辨識文字影像。蜜蜂能在訓練後成功地辨識文字，並建立所謂 top-down process 的現象：無法直接辨識複雜的文字影像→經過提出的簡單影像特徵進行訓練後→能顯著地辨識原來的複雜影像。可見蜜蜂能夠藉由經驗中的提示訊息辨識影像。

若以「提示形狀」、「提示位置」、「提示正確端」及「提示錯誤端」等不同影像特徵進行實驗，則發現蜜蜂會擷取形狀或正確影像的訊息，在記憶中形成較深刻的經驗，增強辨識能力。

蜜蜂能夠辨識文字，且能在短時間內擷取重要的影像特徵，做為執行 top-down process 的經驗。蜜蜂只用不到 1 mm^3 的腦部處理複雜的視覺訊息，牠們的行為與神經機制值得我們繼續深入探討。

壹、前言

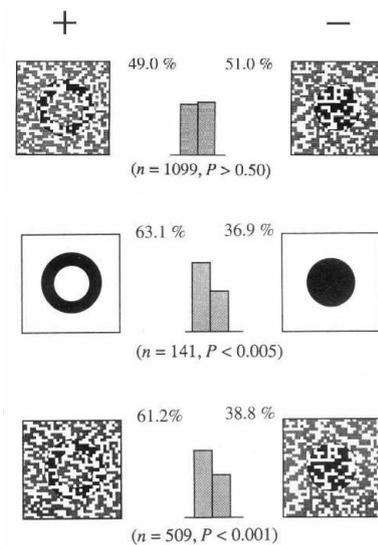
「視覺經驗」是生物辨認影像的重要因素。像是蜜蜂採蜜時，反覆看見花朵，逐漸對花朵影像產生深刻的「經驗」，則有助於蜜蜂提高採蜜的效率。

視覺經驗還能產生更進一步的能力，有些生物能藉由簡單的視覺經驗，逐漸推廣、應用於其他較複雜的影像，提高生物對影像的辨認能力，這種能力在學理上稱為“top-down process”。

有些生物具備“top-down process”的能力，一些影像也許無法被直接辨識，但牠們的視覺經驗能由淺入深地形成，透過一步一步的「引導」進行辨識影像的學習，藉由先前的視覺經驗，對後續影像產生不同的辨別能力。換句話說，當我們在看影像時，並不只會看見眼前的景物，而是受著大腦中的視覺經驗影響我們看到什麼訊息。例如：我們在尋找生物課本中具保護色的生物時，原本不容易找到目標，但若老師提示出要找的生物種名，讓我們在腦中浮現此生物的影子，就能較輕鬆地從此圖片中找到保護色生物。

Top-down process 大多出現在高等生物身上，但研究卻證實蜜蜂也具備此能力：蜜蜂原本無法辨識複雜的影像，但提示其中一些顯著的差異進行訓練後，牠們便可以辨識原本的複雜影像。Zhang 及 Srinivasan 於 1994 證實蜜蜂有 top-down process 的能力後(如上圖，蜜蜂原本無法分辨擬彩圖案，但在清晰影像訓練之後便可以辨識)，便沒有對此現象的相關研究，實際上，蜜蜂的腦部不到 1 cm^3 ，卻具備這種能力，其中的運作值得一探究竟。

要了解感官能力的最佳方法就是測試昆蟲的行為，從行為實驗，我們能直接記錄昆蟲在設計情況下的自然行為反應。從 von Frisch 在 1915 年證實蜜蜂具有分辨顏色的能力後，後續的研究包括蜜蜂辨識影像明暗、形狀、位置、運動的能力



(資料取自 Zhang 等人於 1994 年在 Nature 期刊上發表的研究報告)

也相繼被證實(Von Hateren, Srinivasan & Wait, 1990)，由此可知，蜜蜂是行為與神經科學的良好實驗材料。

蜜蜂在野外為了有效率地覓食，必須快速將飛行路徑、蜜源位置及蜂巢的影像記下(Srinivasan, Zhang & Bartsch, 1996)，這些能力都和視覺經驗的處理有關，所以我們推測蜜蜂為了執行 top-down process 的能力，只會特別記取影像的某重要特徵，並以最省記憶空間的方式儲存，有效利用擷取到的特徵，提升對影像的區別能力。由此可知，top-down process 的能力對蜜蜂而言相當重要。

目前並沒有對蜜蜂 top-down process 能力更進一步探討的研究，本實驗希望研究蜜蜂藉由 top-down process 的能力擷取了什麼影像訊息，在 top-down 過程中，替換各種複雜影像中的特徵做為提示，再測試提示之後牠們所加強的辨識能力，比較蜜蜂對不同影像特徵的擷取效果，如此一來，能對這種能力在蜜蜂腦內的運作有更深一層的了解。

貳、研究動機

考古劇情的電影中，常能見到在混亂文字中尋找特定幾個字元，拼湊成重要訊息、密碼的劇情。快速地擷取混亂文字影像中的特定訊息是必須經過學習的，而蜜蜂具備良好的學習與辨識影像能力，牠們能不能被訓練擷取文字訊息呢？

蜜蜂的相關行為實驗文獻相當充足，我們可以利用蜜蜂的制約學習能力，分析蜜蜂是否可以區分各種影像。牠們甚至具備記憶能力，能記下訓練的影像，固定不停地往返蜜源，這些能力使蜜蜂成為行為與神經科學的良好材料。

最近，在得知蜜蜂具備 top-down process 的能力後，便希望可以設計影像，探討蜜蜂是如何擷取影像的訊息，接著加強後續影像的辨識能力。或許可以藉由設計一些文字圖形進行實驗，進一步分析蜜蜂會如何擷取先前影像訊息，而執行 top-down process 的能力。蜜蜂能認字、解碼嗎？

參、研究目的

- 一、蜜蜂是否能辨別文字影像？
- 二、蜜蜂是否可以具有 top-down process 的能力，辨識複雜文字影像？
- 三、提示蜜蜂各種不同影像特徵，辨識力的增強能力為何？
 - 1.形狀 2.位置 3.正確 4.錯誤

肆、研究設備及器材

一、實驗材料：蜜蜂 *Apis mellifera*

- 1.分類地位：動物界 Animalia
節肢動物門 Arthropoda
昆蟲綱 Insecta
膜翅目 Hymenoptera
細腰亞目 Apocrita
蜜蜂科 Apidae
Apis 屬
mellifera 種



圖一：蜜蜂 *Apis mellifera*

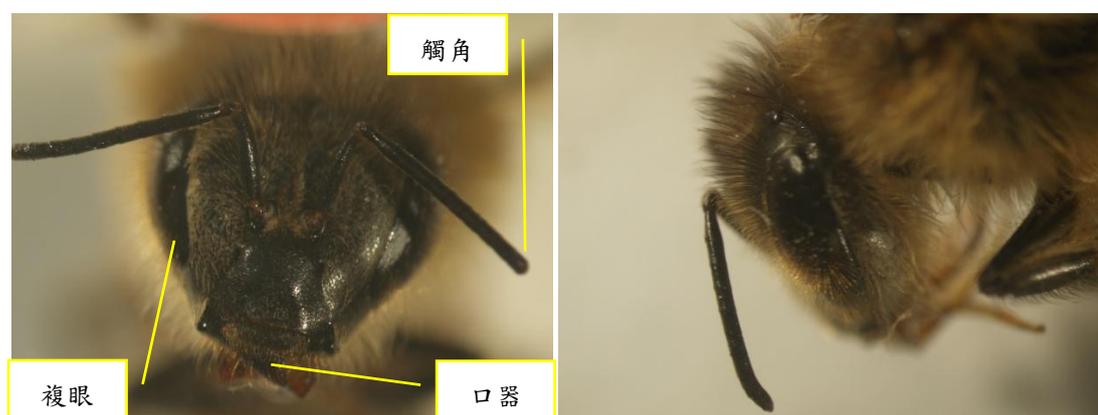
- 2.身體特徵：工蜂體長約 13~15 mm，頭、胸部佈滿黃褐色的絨毛，腹部有黃色與黑色的條紋(圖一)。前腳能清潔口器，中腳清理胸背板，後腳具有花粉籃，腹部末端有螫針。

- 3.習性：蜜蜂是完全變態昆蟲，成蟲全年可見，分布於低、中海拔，日行性，植食性，工蜂白天穿梭於花叢間採蜜。蜜蜂是社會性昆蟲，蜂巢內分為蜂后、雄蜂及工蜂三種階級，蜂后和雄蜂交尾後具有生育力，能建立群落。而工蜂為雌性，由卵到羽化約需 3 週，從羽化為成蟲後可再活約 1 個月，期間需負責蜂巢內的巢片修補、幼蟲餵食、清潔、溫控及保衛等內勤蜂的工作，而在羽化約 20 日後開始為外勤蜂，出外採蜜。本實驗以出外採蜜的工蜂進行實驗。

4.採蜜、訪花：工蜂訪花不具專一性，多半參訪鮮豔、蜜多的蟲媒花，且一次覓食只拜訪同一種花朵，直到此花的蜜水已盡才更換目標。工蜂有分食行為，負責出外採蜜的工蜂帶著食物歸巢後，就將食物分出並置於巢內，接著再繼續出外採蜜，工蜂在白天就這樣不停地來往蜂巢與蜜源，所以利用外出的工蜂進行實驗，可以去除「年齡不同」、「視覺經驗不同」與「飢餓程度不同」等變因，是制約訓練、行為實驗的好材料。

5.視覺：蜜蜂是經常使用視覺進行感官的生物(圖二)，無論應用於定位、覓食、飛行、降落或避敵，像是用光流影判斷飛行速度與姿勢調整，或透過日照亮度調整生物時鐘，這些行為都發自於牠良好的視覺系統輔助進行。蜜蜂具備許多視覺能力，無論顏色、明暗或形狀都可以辨識，這也幫助蜜蜂可以在千奇百怪的花海中尋找到想要的蜜源植物，並且有效率地往返採蜜。

儘管蜜蜂視覺的解像度很差，卻能辨認不少複雜的影像，像是布料花紋或人臉，我們相信蜜蜂這種「視覺性動物」一定具有許多神經、影像訊息處理機制，而這些機制卻能運作於幾公分大的蜜蜂內，牠們的「視界」是很值得探討的。



圖二：蜜蜂的複眼與頭部特寫

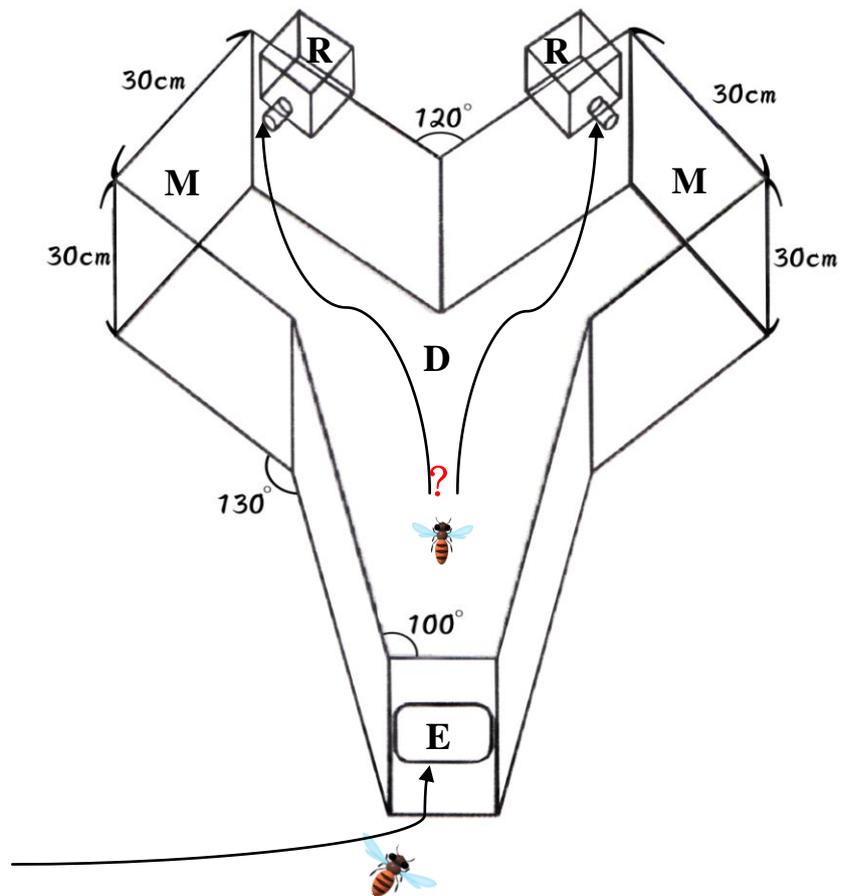
二、主要實驗用具：

1.Y 型迷宮及相關設備：

壓克力製的 Y 型迷宮(規格如右圖)一架，相關設備有掛於兩端的糖水盒(10×10×10cm，以直徑 2.5cm，長 3cm 的通道連接)，而在迷宮內部則可加入訓練蜜蜂使用的擋板(滑門)。迷宮的溫度控制在 $30\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

迷宮規格是根據蜜蜂的視野設計，此規格能確保讓蜜蜂在進入迷宮之後，同時看見兩端架設的螢幕影像，影像的規格設計也考慮到兩臂長度(皆 30cm)，才計算蜜蜂視角。

【代號:糖水盒 R(reward box)，螢幕 M(monitor)，選擇區 D(decision area)，出入口 E(entrance)】



2.顯示器：2 台 14 吋的液晶電腦顯示器、1 台筆記型電腦

三、其他實驗用具：

- 1.引蜜蜂：小塑膠碟子(直徑約 8 cm，深約 1.5 cm)、衛生紙、50%的糖水、凡士林、筒狀塑膠墊高物。
- 2.標蜜蜂：保麗龍保溫箱、碎冰、塑膠試管、尖鑷、鑷子、標籤(直徑約 2 mm 的號碼標籤)、三秒膠。
- 3.清除蜜蜂：長鑷子、酒精瓶、酒精(90%)。
- 4.影像處理：1 台筆記型電腦、2 台液晶顯示器、光譜分析儀。

四、實驗場地、樣區：

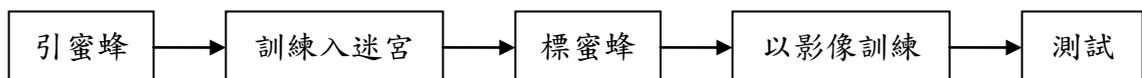
台灣大學昆蟲系、高雄縣田寮鄉(圖三)



圖三：實驗樣區在台大(左)與高雄縣(右)

伍、研究方法與過程

一、實驗過程一

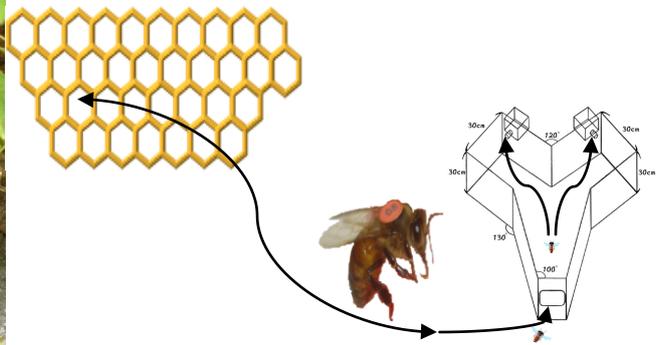


1. 引蜜蜂：

將蜜蜂由蜂箱引至實驗處。將糖水裝入小碟子置於蜂箱口，之後每隔 15 分鐘，將糖水向實驗場所移動 1~2 m，並且確認每次移動時，皆有蜜蜂在覓食(圖四)。最後將蜜蜂引至 Y 型迷宮口，使蜜蜂開始固定連續來往迷宮與蜂巢。



圖四之一：引蜜蜂



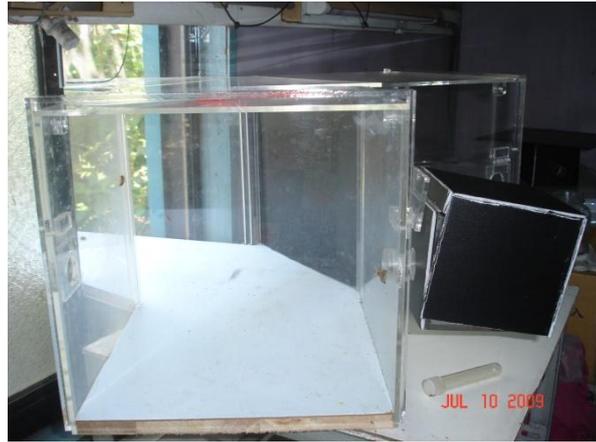
圖四之二：使蜜蜂固定來往蜂巢與實驗處

2. 訓練進入迷宮：

確認特定一批蜜蜂固定來往實驗場所後，開始訓練蜜蜂進入 Y 型迷宮兩端的蜜水盒。將小碟子移至 Y 型迷宮某一端，每 10 分鐘換邊，漸漸靠近蜜水盒通道管，蜜蜂學會進入蜜水盒後，將小碟子移出。此後蜜水盒每 10 分鐘換邊，沒有蜜水盒的一端用黑塑膠板於迷宮分岔口擋住。持續訓練蜜蜂進入兩端蜜水盒 1~2 天(圖五)。

* 給予蜜蜂的觀念：

- (1) Y 型迷宮兩端皆有可能有蜜水盒，且機率一樣。
- (2) 一端有蜜水盒時，另一端也可能有蜜水盒
(所以將另一邊擋起來，讓蜜蜂不知道另一端的狀況)。
- (3) 目的是要讓蜜蜂學會進入蜜水盒覓食，且不習慣走某一邊，讓蜜蜂認為兩端正確率皆為 50%，才不會影響後續圖像選擇實驗的結果。



圖五：訓練蜜蜂到迷宮的兩端

3.標蜜蜂：

將被訓練能夠進入兩端蜜水盒的蜜蜂貼上標籤。用尖鏷從蜜水盒將訓練過的蜜蜂取出，放入試管，插入碎冰內冷凍約3分鐘，降低蜜蜂活動力。在冰凍的蜜蜂胸背板上用三秒膠貼上號碼標籤，以區別、記錄每隻蜜蜂，每次實驗標約50隻蜜蜂(圖六)。



圖六：將標籤貼在蜜蜂的胸背板上

4.以影像訓練蜜蜂：

以各實驗所設計的影像組訓練蜜蜂。在設定為正確一端的影像旁的糖水盒加入糖水，讓蜜蜂在選擇設定的正確影像時得到獎賞，而在選擇設定的錯誤影像時沒有糖水喝。正確與錯誤的影像位置每十分鐘調換一次，且糖水也隨著正確影像調換，使蜜蜂學習選擇正確影像而非迷宮的一邊。此訓練設定進行八個階段，每個階段進行50分鐘，且每個階段中間皆有10分鐘的間隔。記錄蜜蜂訓練全程的

學習狀況，記下來訪時間、編號及選擇(圖七)。

此訓練過程中，氣味的影響可以忽視，因為蜜蜂在選擇錯誤時，仍會進入沒有糖水的糖水盒，可見蜜蜂在此裝置下，並非用氣味進行選擇，而是以影像作為分辨依據的。



圖七：在兩端放上糖水盒進行測試

5. 測試：

訓練完畢後，在兩端影像的糖水盒皆放入糖水，待測試的正確與錯誤影像位置仍每 10 分鐘調換一次。記錄蜜蜂在測試期間的來訪時間、編號及選擇對(+)或錯(-)。連續測試至總蜜蜂選擇數約過 100 次為止。

二、影像處理一

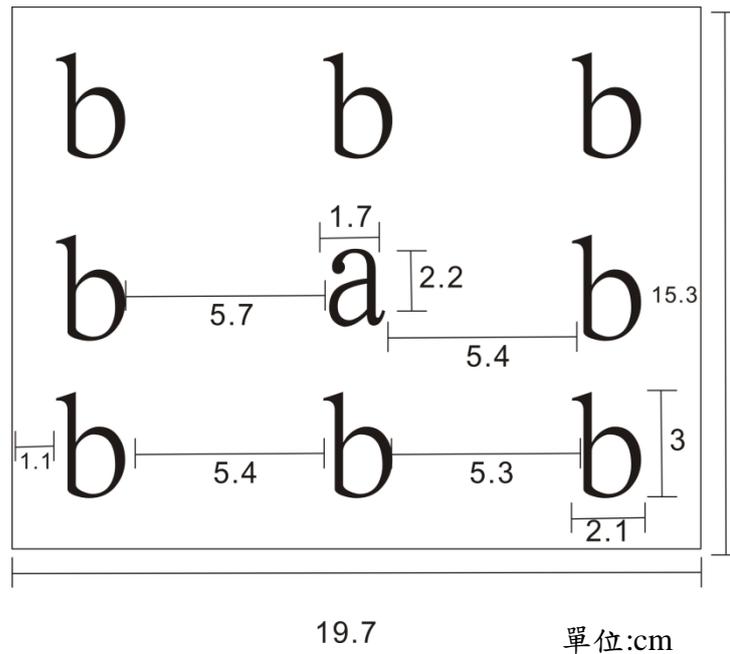
1. 設計：

設定影像規格(如下圖)，影像中的圖形、間距皆大於蜜蜂的視角限度(視角 $\geq 1^\circ$)，讓蜜蜂在進行選擇時，能夠看見影像內容。(其他實驗影像詳細規格，參見附錄)

2. 呈現：以筆記型電腦中的 ppt 全螢幕顯示影像，連接呈現於顯示器。

3. 顯示器校正：

以光譜分析儀(spectrometer)測量兩顯示器(圖八)，並計算其光亮子強度，確認兩螢幕所呈現的顏色、亮度都相同，才能去除這些區辨影像的變因，確保是用兩個完全相同的顯示器進行實驗。



圖八：以光譜儀測量並校正螢幕

三、實驗一

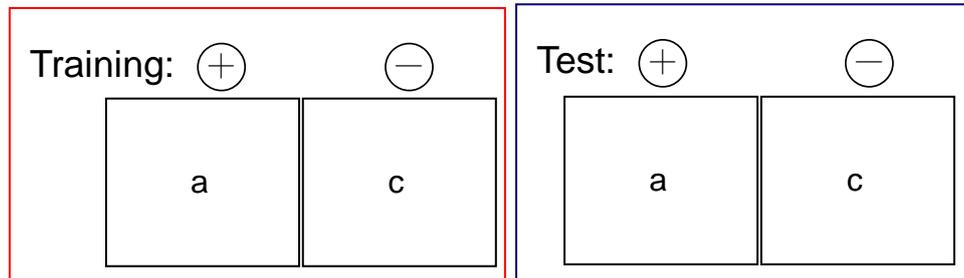
*前處理進行完畢之後，訓練(training)與測試(test)都是實驗的部分。

*訓練期間，在兩影像中所設定的正確影像旁加入糖水，而錯誤的影像則無，如此便能制約訓練蜜蜂選擇這兩影像中的正確影像。訓練過程中，需持續記錄蜜蜂的學習狀況，訓練到達所設定的時數之後，就可以進入測試階段。

*測試期間，我們要「驗收」蜜蜂被訓練的成果，所以不再給予任何訓練，而在待測的正確和錯誤影像旁都放入糖水，只繼續記錄蜜蜂被訓練之後，在沒有制約訓練條件下的選擇狀況，比較牠們對測試時設定的正確與錯誤影像選擇率。

1. 實驗一：用文字影像進行實驗

以長、寬相同大小的 a 和 c 置中影像進行，設定 a 為正確(+)影像，而 c 為錯誤(-)的影像。訓練蜜蜂選擇 a，測試訓練後的蜜蜂對 a 和 c 的區辨能力。



2. 實驗二：以文字影像完成一套 top-down process 的流程

*Top-down process 能力的基本流程是：

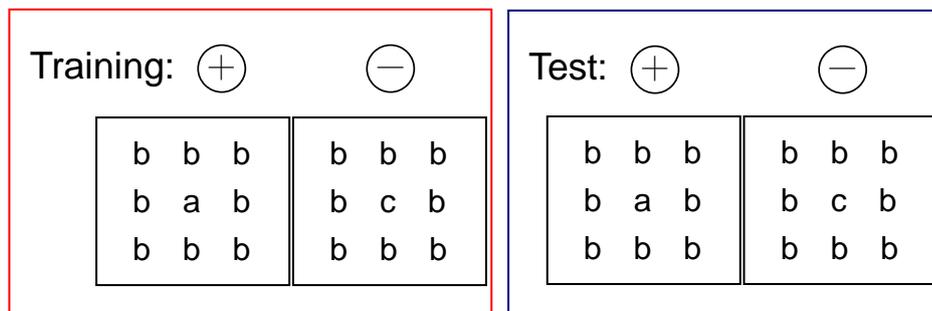
【無法在直接訓練後辨識複雜影像→提示特定的影像特徵進行訓練
→辨識複雜的影像】。

實驗二要以文字影像設計一套 top-down process 的影像組，確認文字影像也能進行實驗，才帶入實驗三研究分離影像特徵的訓練效果。

(1)複雜影像：設計一對複雜影像，其中只有少部分特徵差異。

設定在影像周圍環繞8個b字母，而在置中位置分別放上a和c字母，如此一來，這對複雜影像便只有在中央的字母影像不同。設定含有 a 的影像為+，而含有 c 的影像為-。實驗蜜蜂是否能在直接訓練(direct training)之後辨識較複雜的影像。

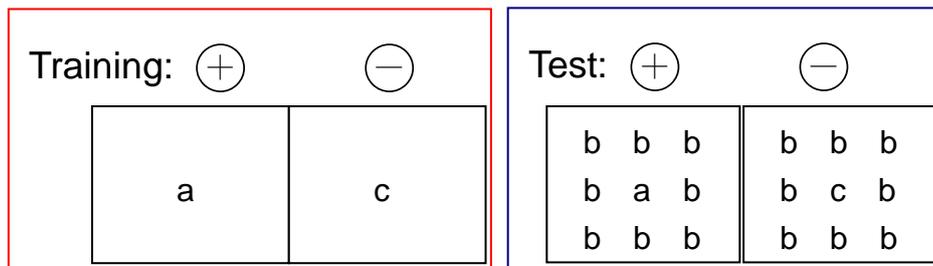
{此實驗的訓練影像定義為不給予任何提示的「直接訓練(direct training)」}



(2)提示:

若蜜蜂無法辨識複雜影像，則可以測試是否能用 top-down process 的程序，讓蜜蜂透過漸進式的提示訓練(step-by-step trainig)學會辨識。必須將訓練的影像改為更簡單的「提示」(hint)，也就是把複雜影像中的 a 和 c 提出，以 a 和 c 做為區辨影像的特徵，提示蜜蜂，實驗蜜蜂是否能經由提示辨認複雜影像。

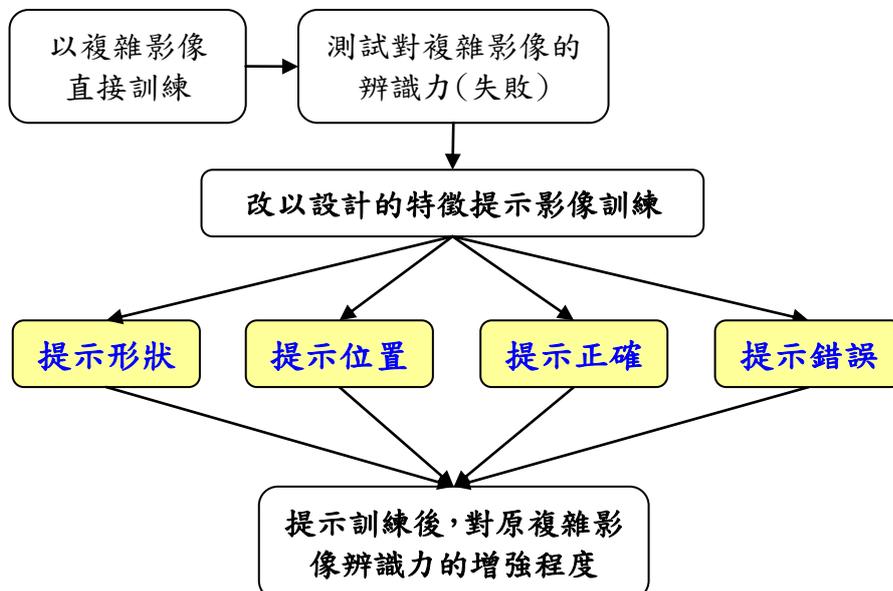
{此訓練影像定義為「提示兩端的形狀+位置特徵」，並做為實驗三的對照組}



3. 實驗三：蜜蜂對分離出的影像特徵的學習，以及其提示效果

猜測蜜蜂應能只藉由影像中所提示的某些特徵辨識影像，實驗三便要提出能辨識實驗二所設計複雜影像的一些特徵，測試蜜蜂對各提示的辨識力，以及經不同提示訓練後，由 top-down process 產生的後續辨識能力如何。

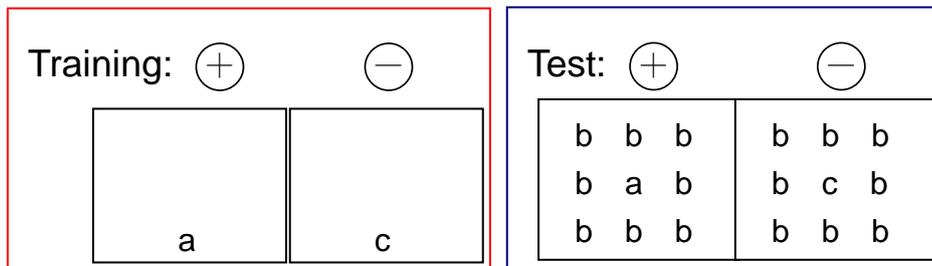
下圖是實驗三所設計的步驟，仍遵循 top-down process 的基本步驟(無法在直接訓練後辨識複雜影像→提示特定的影像特徵進行訓練→辨識複雜的影像)，但實驗三測試各種「提示」，比較這些提示在蜜蜂 top-down 經驗中增強的辨識力：



(1)形狀:

實驗二設計的複雜影像中，兩影像的差異在於中央 a 和 c 的形狀不同，所以提示形狀必須保留 a 和 c 的字元形狀，但不可以置中而連帶提示了位置，所以形狀提示必須將 a 和 c 字元位移，提示形狀而非位置，由於蜜蜂對下視角的影像較敏感，此提示設計將 a 和 c 向下位移 4.8 cm，相當於視角下移約 18°。

{此實驗的訓練影像定義為「提示兩端的形狀特徵」}

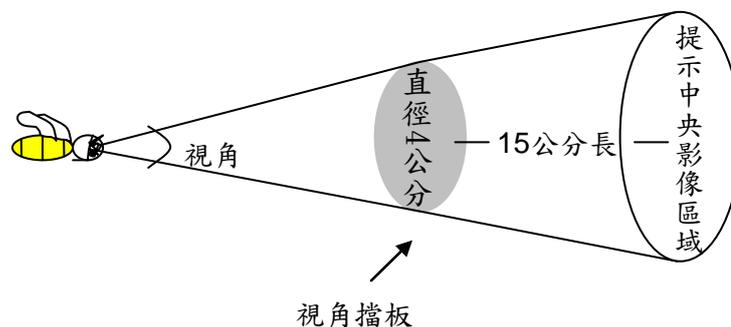


(2)位置:

實驗二的區別特徵(a 和 c)都位於正中央，若要提示位置，則必須使蜜蜂「注意」中央的差異，方法就是利用能夠控制蜜蜂視角、視野範圍的擋板(baffle)。設定蜜蜂被擋板控制所看到為「位置在中間」的提示，在螢幕前 15cm 架上擋板，擋板中央割開直徑 4 cm 的圓形入口，限制蜜蜂看到影像時，位置在正中央(圖九)，且複眼與影像形成約 9°的視角。但在提示位置的實驗中，不能以 a 和 c 影像進行而連帶提示了形狀，所以用 + 和 - 符號的影像，設定 + 為正確影像(+)，而 - 為錯誤影像(-)。

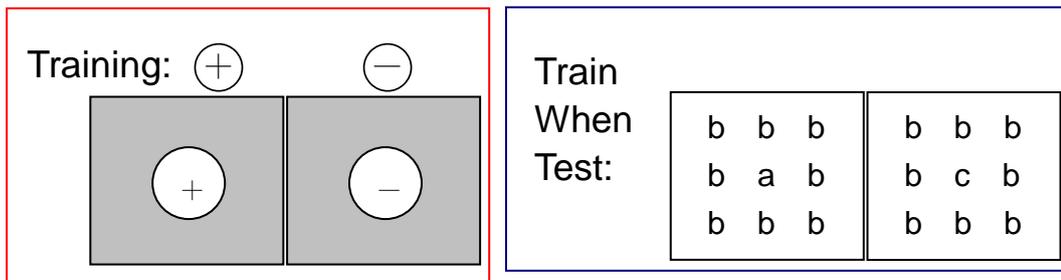
但在提示完位置之後，蜜蜂仍不知道要選擇含有 a 的影像，還是選擇含有 c 的影像，所以在提示位置的訓練之後，面對複雜影像的測試則必須一邊訓練一邊測試(train when test)，也就是一再將選擇含有 c 影像的蜜蜂驅離，讓蜜蜂知道選擇含有 a 的影像才正確，並一邊記錄選擇狀況。

{此實驗的訓練影像定義為「提示兩端的位置特徵」}





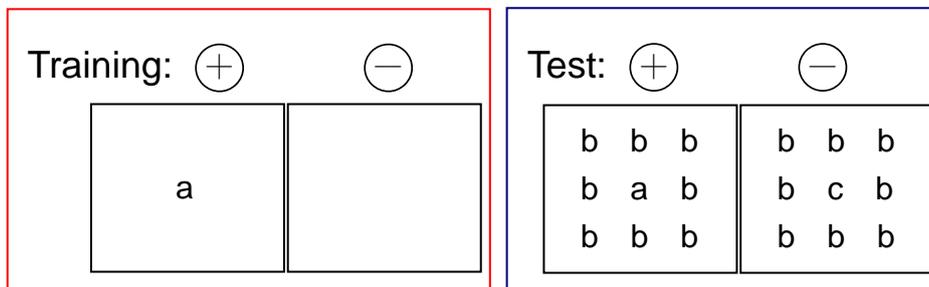
圖九：迷宮內加入擋板，提示位置



(3) 正確：

若只提示正確或錯誤影響的某一邊的特徵，蜜蜂也能藉由一邊的 top-down process 辨識實驗二的複雜影像。提示正確影像的特徵，也就是將 a 的形狀和位置都呈現出來，而錯誤一端則以空白代替(無任何相關提示功用)，測試蜜蜂能否只擷取正確一端的訊息。

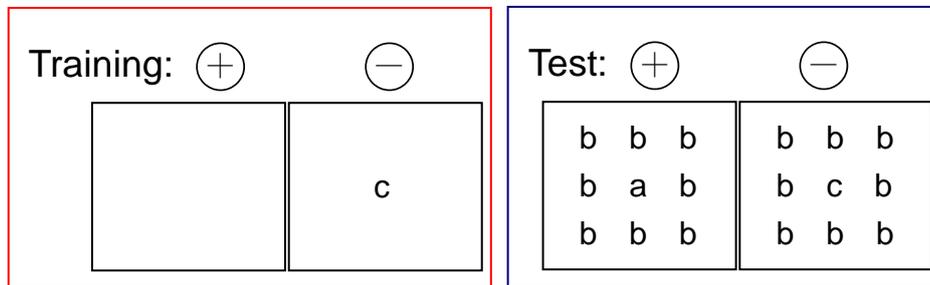
{此實驗的訓練影像定義為「提示正確一端的形狀+位置特徵」}



(4)錯誤：

提示錯誤影像的特徵，也就是將 c 的形狀和位置都呈現出來，而正確一端則以空白代替(無任何相關提示功用)，測試蜜蜂能否只擷取錯誤一端的訊息。

{此實驗的訓練影像定義為「提示錯誤一端的形狀+位置特徵」}



(四)數據統計：

本實驗利用 SPSS(10.0)軟體進行數據分析。以卡方檢定(χ^2)分析蜜蜂對各影像的選擇，比較對各實驗影像是否具備辨識能力，而表現出選擇正確的能力。

顯著度(p 值)的定義： $p > 0.05$ (NS 表示無顯著差異)

$p < 0.05$ (* 表示有顯著差異)

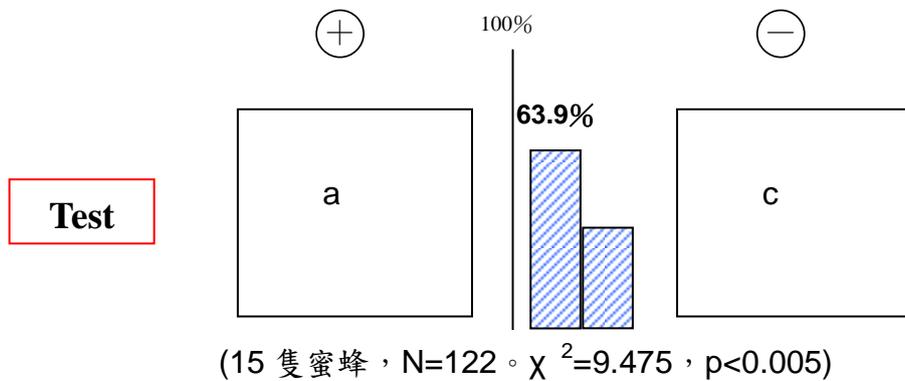
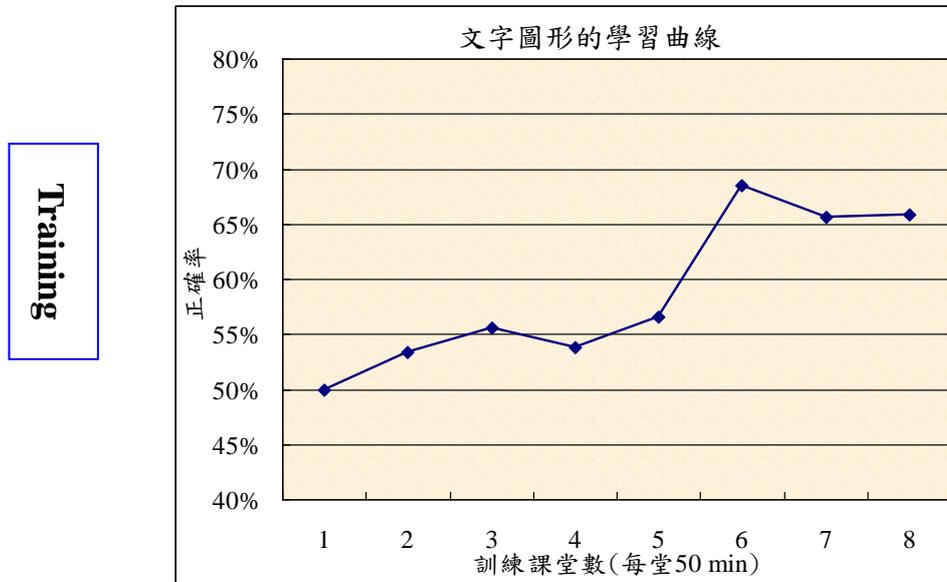
$p < 0.01$ (** 表示更顯著差異)

$p < 0.005$ (*** 表示非常顯著差異)

$p < 0.001$ (**** 表示極為顯著差異)

陸、研究結果

一、實驗一：用文字影像進行實驗

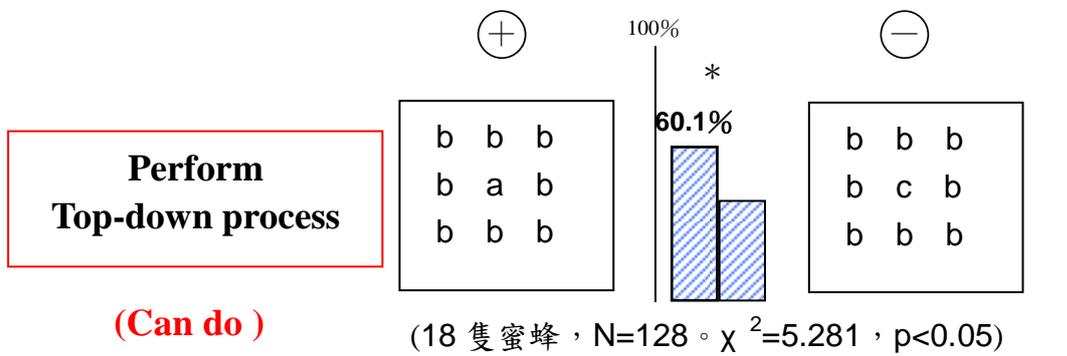
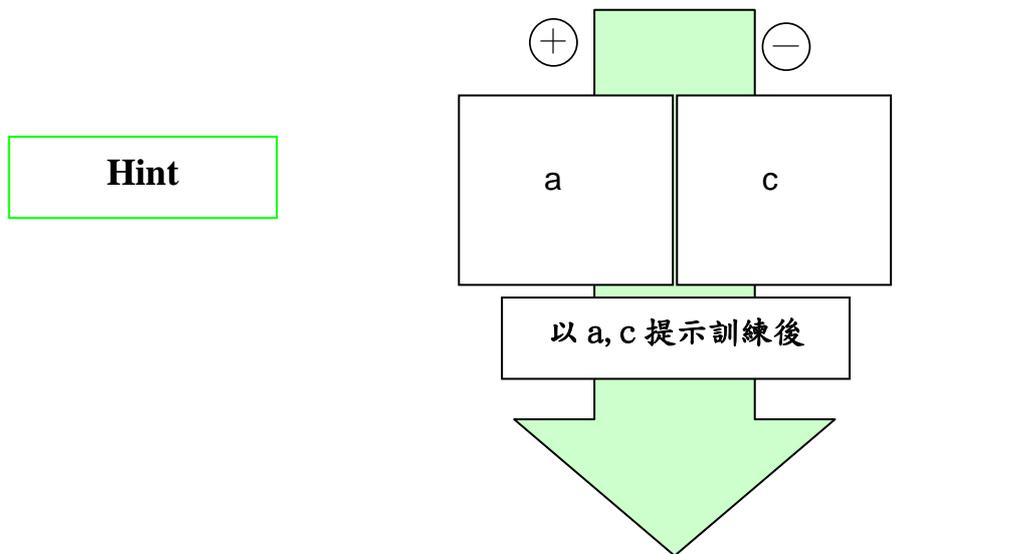
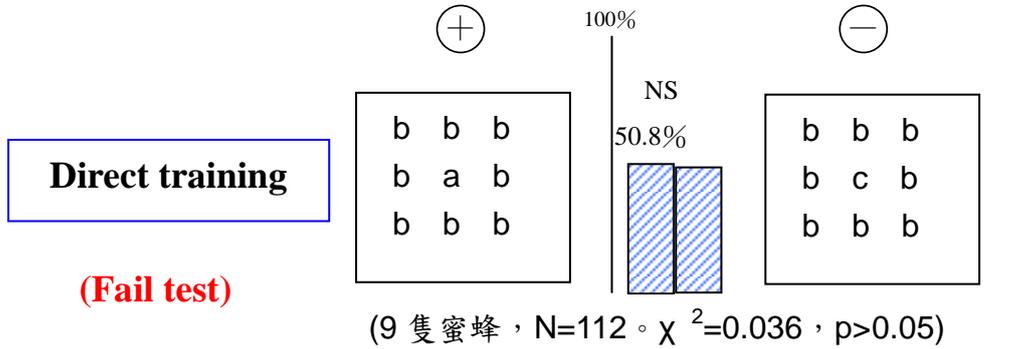


實驗一結果：

實驗一成功地訓練蜜蜂辨識 a 和 c 的文字影像。訓練的過程中，蜜蜂選擇的正確率隨著訓練時數增加而提高，能確認蜜蜂正在學習，而訓練過後，所驗收的測試結果也達到統計顯著的標準 ($p < 0.005$)，我們以學習曲線和測試的顯著性雙重確認蜜蜂是否學會。

蜜蜂的辨識能力的確很強，制約訓練之下，蜜蜂就能學習如何辨識設定的影像，即使是長、寬規格接近 a 和 c 字元。可見後續的實驗也能繼續使用文字影像進行。

(二)實驗二：給予提示進行訓練



實驗二結果：

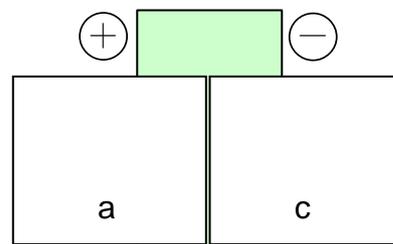
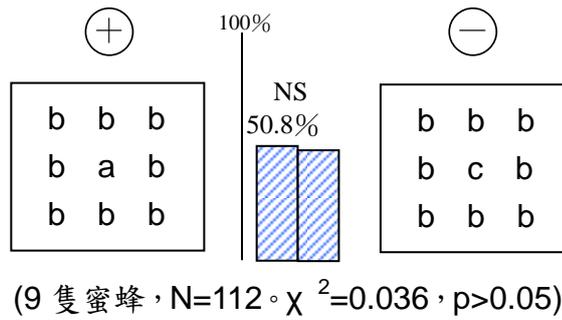
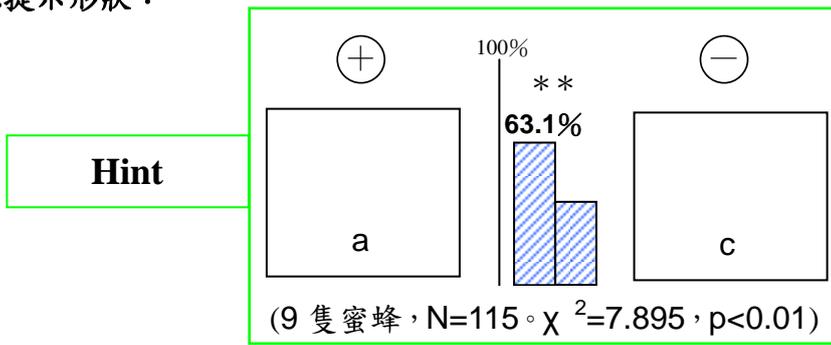
由實驗一確認蜜蜂能辨識出正確的文字影像，實驗二以設計的影像測試蜜蜂是否能執行一套 top-down process 的流程。實驗結果顯示是可行的。蜜蜂被直接訓練後，無法在測試時辨識複雜影像($p>0.05$)，測試是失敗的，可見在背景加上一環 8 個 b 字元會影響蜜蜂的擷取能力。

經過提示影像(實驗一影像)的訓練後，蜜蜂能夠被提示。因為提示影像將原本複雜影像的辨識特徵(中央的 a 和 c)獨立提出，提示影像就能成功地在蜜蜂的經驗中「點」出複雜影像的差異，而能再次以複雜影像測試蜜蜂時，完整地執行 top-down process 的能力，辨識複雜影像($p<0.05$)。

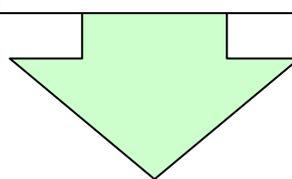
(三)實驗三：蜜蜂對分離出的影像特徵的學習，以及其提示效果

即使只提出複雜影像的某些區辨特徵進行訓練，蜜蜂還是能夠用 top-down process 增強後續的辨識能力，但是各種分離出的特徵形成的辨識能力也各有所異。其中以提示形狀、正確影像的實驗組較顯著，而提示位置與錯誤影像的實驗組較不顯著。

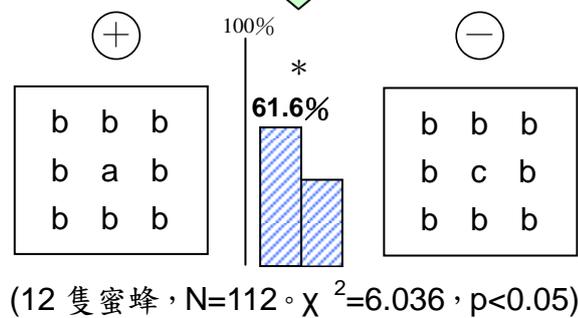
1.提示形狀：



提示形狀訓練



(Can do)



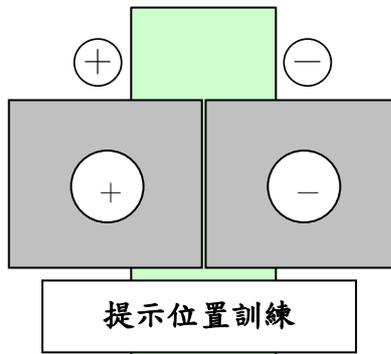
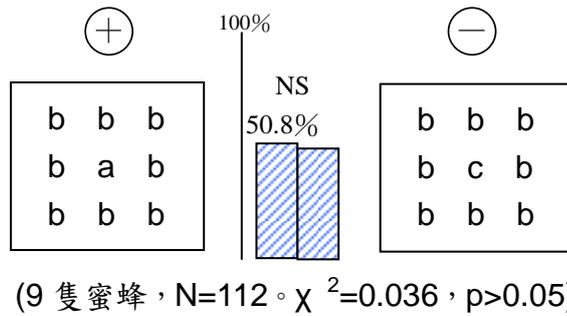
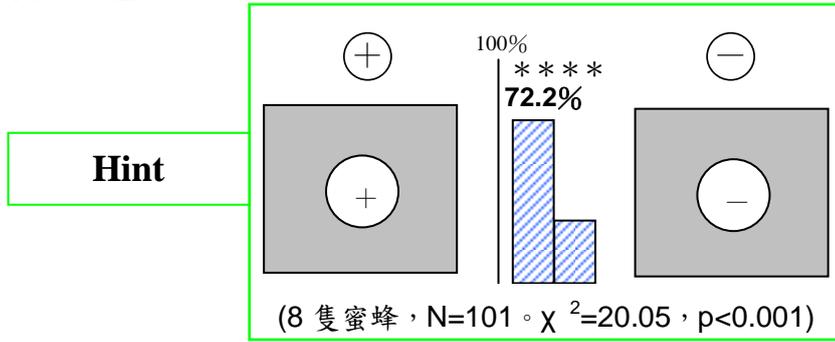
實驗三之一結果：

蜜蜂執行 top-down process 流程中，將提示影像換為「提示兩端的形狀特徵」的影像組，以此設定的影像組進行訓練。

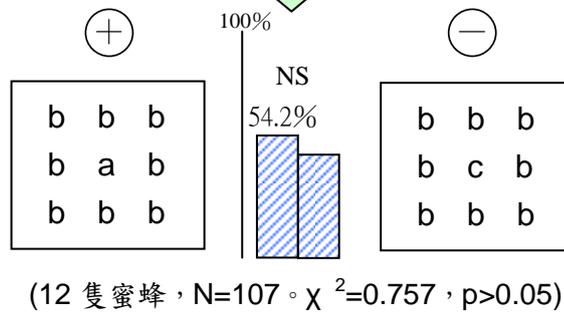
結果顯示，以設定的提示(hint)形狀影像組直接訓練，蜜蜂就已經能辨識影像($p < 0.01$)，可見即使影像中的特徵不位於正中央，蜜蜂也能辨識。而只以「提示兩端的形狀特徵」訓練，蜜蜂也能執行 top-down process，蜜蜂原本無法直接辨識複雜影像($p > 0.05$)，但透過間接的提示，給予蜜蜂影像的形狀特徵，蜜蜂就能藉由形狀訊息的 top-down process 辨識複雜影像($p < 0.05$)。

由此可知，即使經驗中的訊息位置和後續影像的訊息位置不同，蜜蜂也能夠擷取訊息，或者說，蜜蜂能只擷取經驗中的形狀訊息，就在複雜影像中搜索到可用的辨識訊息，成功達到 top-down process。

2.提示位置：



(Fail test)

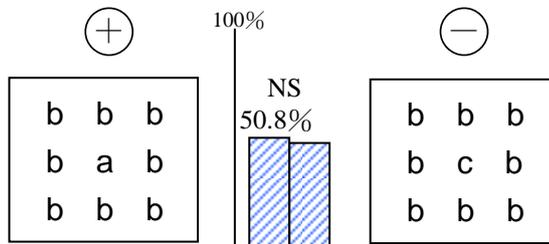
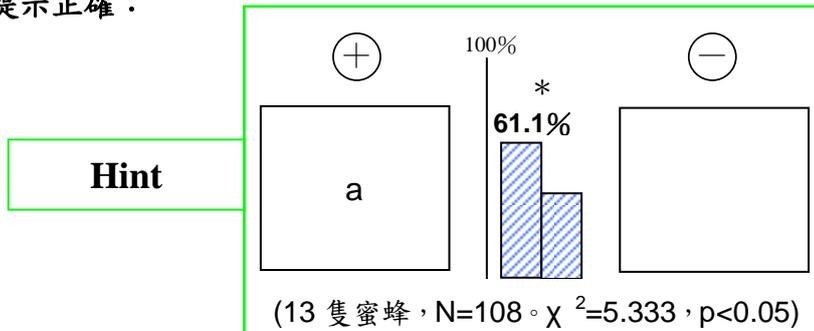


實驗三之二結果：

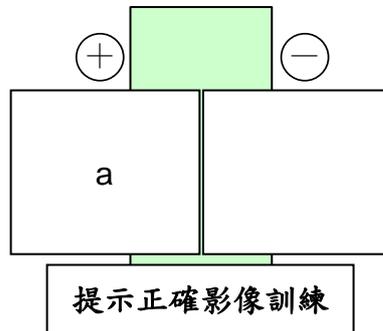
蜜蜂 top-down process 流程中，將提示影像換為「提示兩端的位置特徵」的影像組，以此設定的影像組進行訓練。結果顯示，蜜蜂對提示位置而非形

狀的影像組辨識力極高($p < 0.001$)，可能因為形狀簡單且位置較窄。而 top-down 過程中，蜜蜂原本無法直接辨識複雜影像，提示訊息位置之後，再邊訓練邊測試，引導蜜蜂選擇含 a 的影像，但蜜蜂仍無法透過給予的位置訊息辨識複雜影像($p > 0.05$)。可見蜜蜂不易在經驗中擷取位置的訊息，導致擋板抽離後，就缺乏位置的訊息了，蜜蜂便無法順利將位置訊息 top-down process。

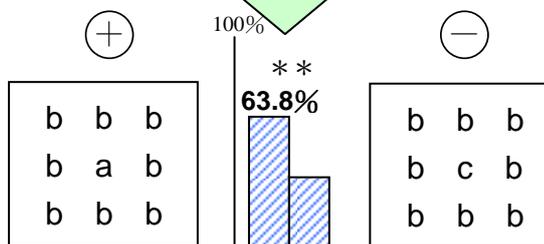
3.提示正確：



(9 隻蜜蜂, $N=112$, $\chi^2=0.036$, $p > 0.05$)



(Can do)

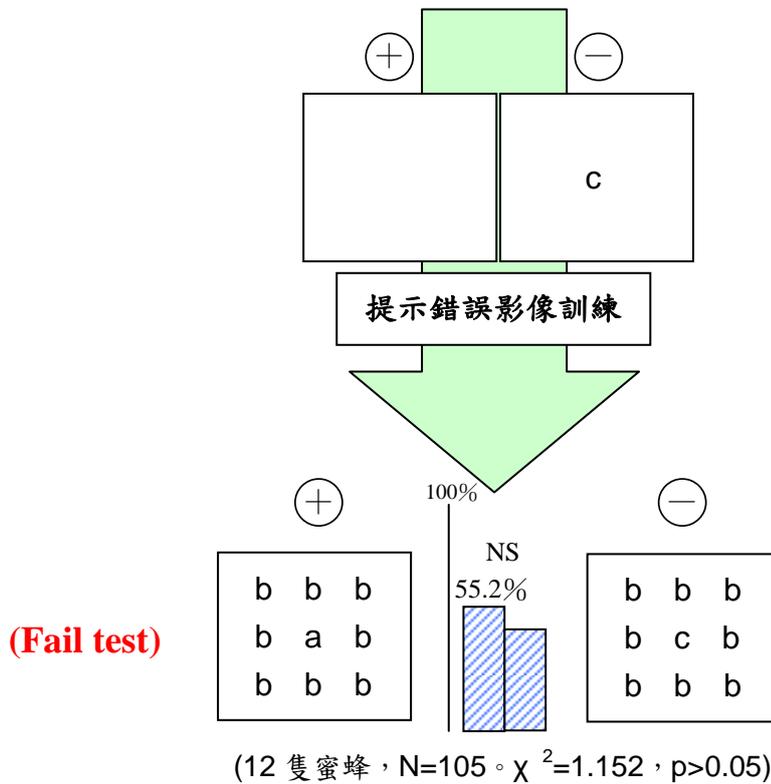
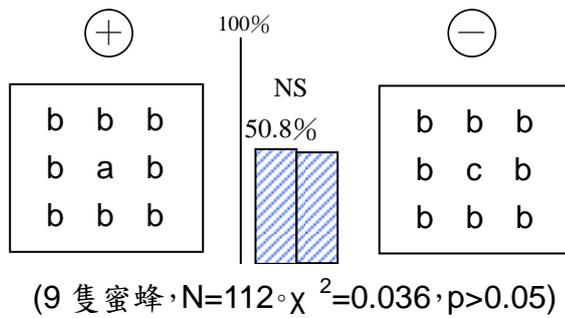
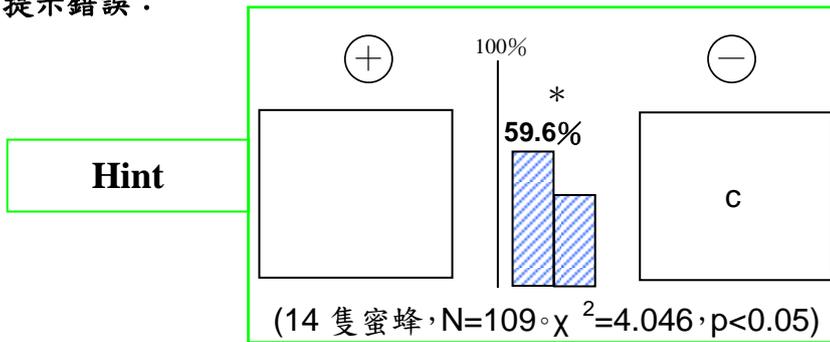


(17 隻蜜蜂, $N=105$, $\chi^2=8.010$, $p < 0.01$)

實驗三之三結果：

在 top-down process 的過程中，將提示換為「提示正確一端的形狀+位置特徵」的影像組進行訓。結果顯示，即使只剩下正確端的影像訊息進行實驗，蜜蜂仍能直接辨識正確的 a 和錯誤的空白影像($p < 0.05$)。而 top-down 過程中，一開始無法辨識複雜影像，給予提示後則能，只提示蜜蜂正確端的訊息，牠們在訓練後就能辨識複雜影像($p < 0.01$)，甚至比正確及錯誤端皆提示的影像組結果更佳。可見在蜜蜂的視覺經驗中，正確端(獎賞)的訊息是相當重要的，蜜蜂能在擷取正確端影像後成功執行 top-down process。

4. 提示錯誤：

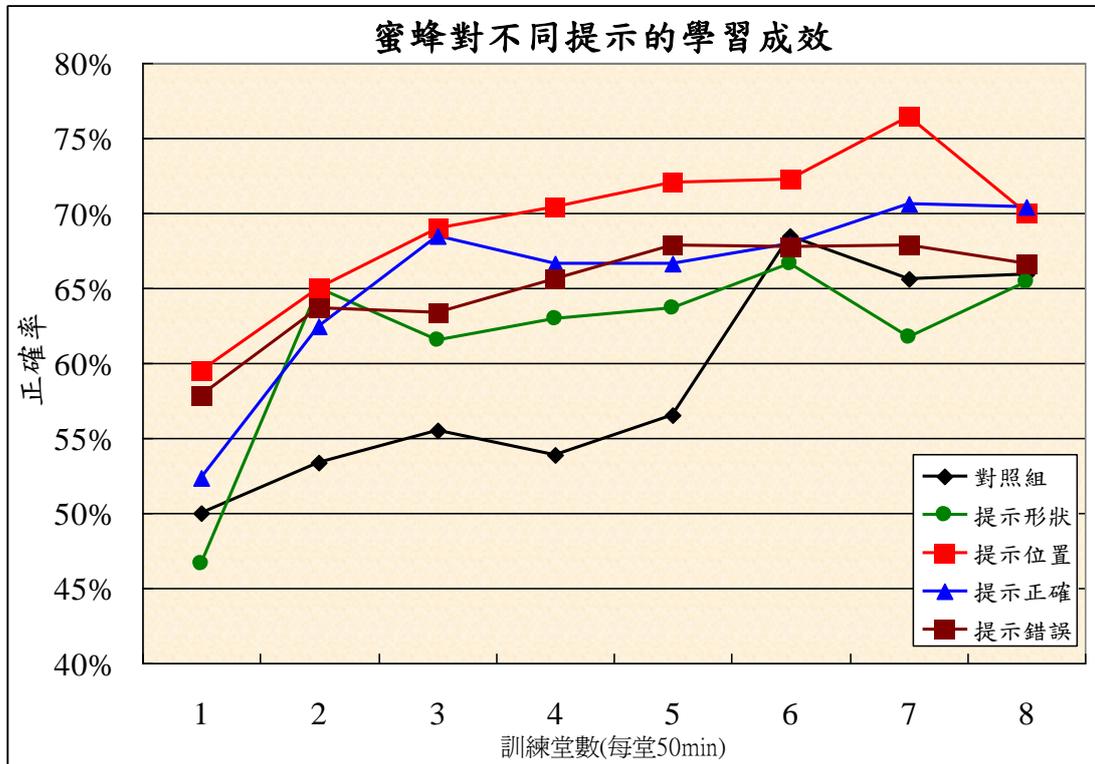


實驗三之四結果：

以「提示錯誤一端的形狀+位置特徵」做為訓練的提示影像組。結果發現，蜜蜂被提示訓練之後，能直接辨識提示的錯誤影像(c)和正確的空白影像 ($p<0.05$)。top-down 的過程中，蜜蜂無法直接辨識複雜影像，經由只提示錯

誤影像的提示訓練之後，蜜蜂仍無法辨識複雜影像($p>0.05$)。可見錯誤端影像(懲罰)在蜜蜂視覺經驗較不重要，且蜜蜂對錯誤影像訊息的擷取能力較差，所以無法利用錯誤影像訊息執行 top-down process。

*比較蜜蜂對各實驗組提示影像的學習曲線：



比較各提示影像的學習曲線數據：

對照組是實驗二的提示影像，也就是「提示兩端的形狀+位置特徵」的影像組，對照比較實驗三中的「提示兩端的形狀特徵」(提示形狀)、「提示兩端的位置特徵」(提示位置)、「提示正確一端的形狀+位置特徵」(提示正確)及「提示錯誤一端的形狀+位置特徵」(提示錯誤)等提示影像學習曲線。發現對照組的選擇正確率爬升速度最慢，最後略為大於 65%，仍能學習。提示形狀實驗組的爬升速率最快，蜜蜂能在第二個堂數就達到 65% 的正確率，不過最後結果仍略大於 65% 的正確率，可見將影像中的訊息向下平移後，有助於提升蜜蜂的學習效率，但無助於辨識能力的增強。

提示位置的影像實驗組，其學習曲線整體都高於其他實驗組，正確率能夠達到 70% 以上，可見蜜蜂對縮小範圍(擋板)中的簡單形狀的辨識力很強。

提示正確及提示錯誤影像的學習曲線相似，兩組的學習曲線都略高於對照組及提示形狀組，又低於提示位置組。提示正確與提示錯誤組的學習效率(選擇正確爬升率)都高於對照組，可見若一次將 a(+)和 c(-)兩影像都提示出來，反而容易降低蜜蜂的學習效率，也許是因為 a 對上 c 比 a 或 c 對上空白影像還難辨識。

整體而言，可以大致排序蜜蜂對各提示影像的學習能力：

提示位置 > 提示正確 > 提示錯誤 > 提示形狀 > 對照組

柒、討論

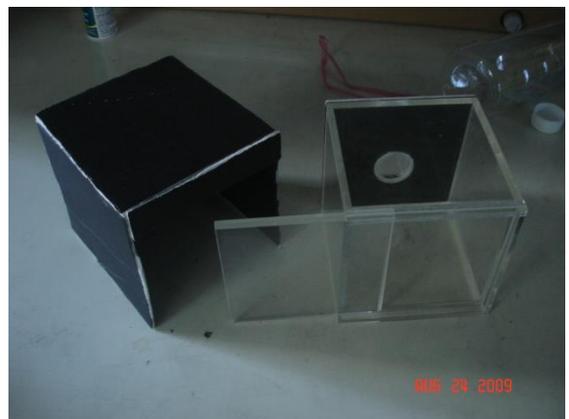
一、場地與環境、蜜蜂控制一

1.Y 型迷宮的架設：

進行此行為實驗需要找到良好的實驗場所，且環境及蜜蜂的控制也相當重要。在台大生態園，是將 Y 型迷宮的出入口伸出實驗室的窗戶，而兩螢幕及兩臂置於實驗室內，讓蜜蜂由生態園中的蜂箱直接飛到窗口，並進入迷宮，且出入口比其他迷宮內的地方明亮，所以蜜蜂可以透過趨光性順利離開。而在高雄縣田寮鄉進行實驗時，是將 Y 型迷宮的出入口伸出防火巷的一端，而儀器位於陰暗的防火巷內，雖非室內空間，但狹窄的防火巷只有正午時間受到太陽直射，其他時間仍能夠正常進行實驗(圖十)。



圖十：Y 型迷宮架設於高雄縣



圖十一：壓克力糖水盒與黑色罩子

2. 蜜蜂隻數的控制：

由於蜜蜂能夠以舞蹈交換訊息，能夠在短時間內大量的成群採蜜，但在實驗中，若蜜蜂隻數過多，則會影響標號蜜蜂(實驗中的蜜蜂)的選擇，最後會不學習影像，而是一窩蜂地跟著蜂群前進，而蜜蜂隻數若太少，則會拖延實驗時間，且較不精準。

所以蜜蜂隻數的控制是相當重要的技術，必須先以固定濃度的糖水將蜜蜂快速引至迷宮，否則速度太慢會引來過多蜜蜂，到了迷宮之後才慢慢降低濃度，降低濃度之後還會持續往返的「忠實顧客」才是最後需要標號，進行實驗的蜜蜂。

秋天時期，由於缺乏花粉，而花蜜較充足，若要用糖水引蜜蜂較困難，所以在一開始引蜜蜂時可以添加少量花粉，引至迷宮後才改為糖水。

3. 蜜蜂趨光的控制：

蜜蜂具有趨光性，所以在透明的實驗儀器中容易受到光線影響，在一開始將蜜蜂引至迷宮內時，可以利用擋光板協助訓練蜜蜂進入，但蜜蜂已經學會進出迷宮之後，在實驗進行時就不能使用擋光板，以防影響結果。另外，必須為糖水盒製作不透明的黑色罩子，讓蜜蜂能夠順利進出糖水盒，且在糖水盒中不受其他視覺因素干擾(圖十一)。由於蜜蜂是利用單眼感光而定位的，在正午時間，蜜蜂的定位能力最差，且溫度提高，來訪蜜蜂隻數便會驟降，在此時期內可以增加糖水的濃度。

4. 防螫措施：

工蜂在逆境(如腹部被擠壓)時，會伸出毒針，在實驗進行難免會不慎遭針螫，所以進行時隨身攜帶酒精及氨水。

二、實驗的進行一

1. 標蜜蜂：

一開始標蜜蜂時的回收率很低，後來發現要注意冷凍時間，且確認標號的是已學會進入糖水盒的蜜蜂，並且使用液態三秒膠較佳。

2.訓練：

蜜蜂是容易被訓練的生物，但在訓練過程中仍需注意一些外在變因的控制，像是糖水盒不能隨著影像的更換而移動，否則蜜蜂會記取糖水盒間些微的差距而影響實驗結果。

若蜜蜂一再來訪迷宮時，不慎連續進入沒有糖水的盒子，便會認為糖水已盡，而不再往返，使訓練到的蜜蜂逐漸減少，所以設定在每進行 50 分鐘後，就必須給予蜜蜂 10 分鐘的休息時間，將糖水置於迷宮中央，恢復蜜蜂來訪的興致(圖十二)。

從來訪蜜蜂的選擇就能夠大略估計蜜蜂的學習狀況，若訓練期間，已到第八階段了，但蜜蜂仍會在每十分鐘更動影像後選擇錯誤，則代表此影像較不易辨識。



圖十二：將糖水置於迷宮中央

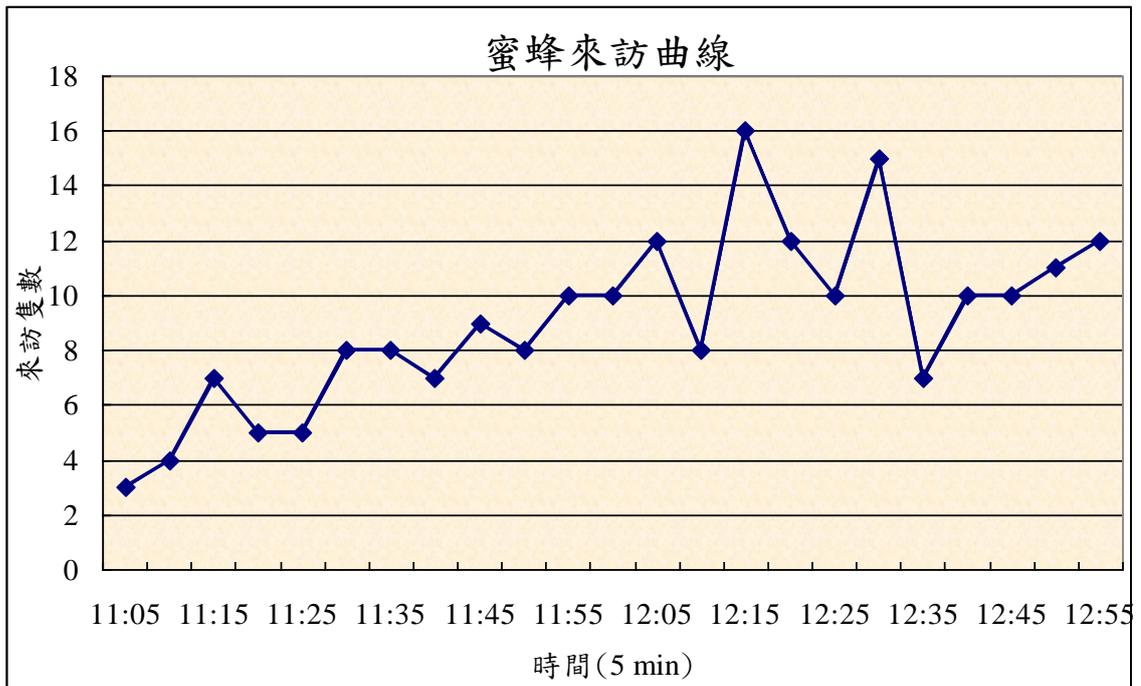
3.測試：

在實驗的測試階段中，必須小心控制兩端的糖水狀況，才能確保蜜蜂的選擇沒有受到兩端糖水的影響，而在兩端皆有糖水的測試階段中，若記錄到同一號碼的蜜蜂有規律的交錯選擇正確與錯誤，則代表蜜蜂無法辨識影響，且已經習慣飛向迷宮的某一端了。

4.蜜蜂來訪行為：

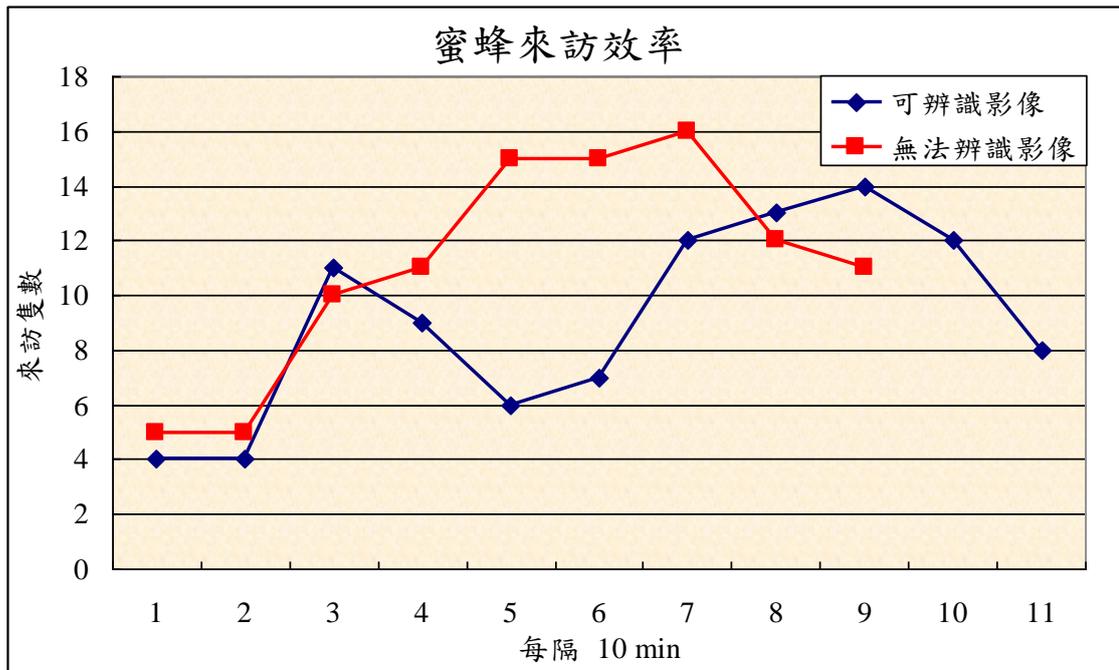
蜜蜂會固定不停地來訪同一蜜源處，直到蜜水已盡，達爾文於物種的起源中也提到“flower constancy”的概念，認為蜜蜂必須一次固定往返同一種花朵，才能成功傳粉互利、共同演化，蜜蜂的神經機制也形成如此的行為，為了高效率地採蜜，就必須有固定往返的蜜源對象，我們也就利用這個特性，能方便地一再研究蜜蜂。

另外，在實驗期間，我們記錄蜜蜂來訪的隻數與時間，整理數據後，發現蜜蜂的來訪也會隨著時間、辨識能力的不同而有異。



蜜蜂的來訪曲線：

此數據擷取自實驗一文字影像訓練蜜蜂的過程，從訓練的一開始連續記錄兩小時。發現隨著時間的增加，蜜蜂逐漸「熟悉」蜜源，所以在單位時間內(5 min)的來訪蜜蜂隻數逐漸提升，來訪效率也就提高了。



比較來訪效率：

此數據擷取自實驗三之二的提示位置(藍線，可辨識的影像)及提示位置後面對複雜影像(粉紅線，無法辨識的影像)，比較以兩影像測試時的蜜蜂來訪效率，皆擷取 100 隻蜜蜂來訪的數據。發現蜜蜂在面對不易辨識的影像時，反而來訪效率較高，其來訪曲線整體高於容易辨識影像的來訪曲線，且提早 20 min 就達到 100 隻蜜蜂了。推測，蜜蜂面對不易辨識的影像時，之所以會提高來訪效率，是為了一再嘗試，盡可能地來訪以增加學習辨識影像的機會。

三、結果討論一

1. 蜜蜂會認英文字母？

根據過去的文獻，相關研究已經成功訓練蜜蜂辨識許多影像組了，但還沒有以英文字母影像進行實驗的研究。在此，本實驗也成功訓練蜜蜂顯著地區別英文字母，但英文字母影像在實驗中只能當作一種「媒介」，純粹是為了設計出一套能夠精確控制特徵的實驗影像，就以字元作為獨立的特徵，方便探討、定義後續實驗在提示時，所給予蜜蜂的影像訊息。

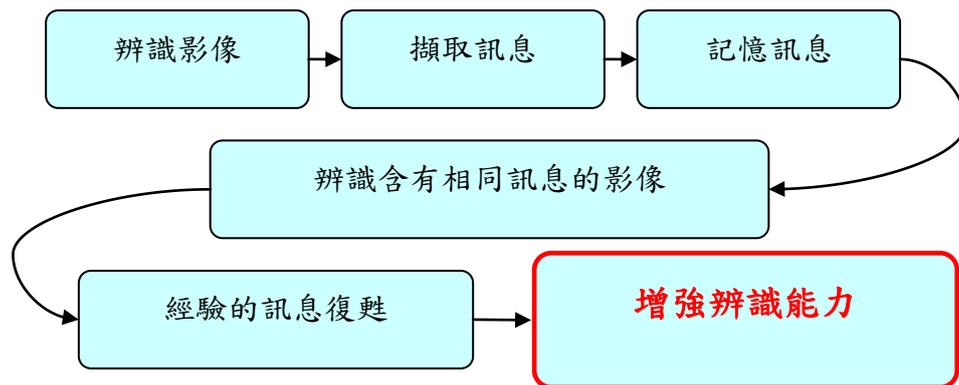
我們不能因為此研究結果就斷定蜜蜂會認得 a 和 c 影像，因為已有研究顯示，蜜蜂會為了區別眼前的不同影像組而擷取不同的訊息(Horridge,2009)，像是若以同一個影像進行兩次實驗，兩次的對應影像都不同，蜜蜂也許便會擷取不同的特徵以辨識影像，所以應該只能說蜜蜂會「區別」a 和 c 影像，而非「認得」a 和 c 影像。

2. 蜜蜂能藉由 top-down process 的能力辨認更複雜的影像

蜜蜂具備 top-down process 的能力已被證實，但本實驗更深入地以設計的文字影像進行實驗，發現蜜蜂仍能辨識複雜、在野外不常見的文字影像，還成功地將文字提示經 top-down process 使蜜蜂能辨識更複雜影像。

蜜蜂能有這種能力，我們推測是為了在野外能有效率地採蜜而發展出的一套機制，因為在 top-down process 過程中，擷取訊息、記憶訊息以及經驗的復甦都是很重要的，而蜜蜂在野外也會利用這些能力記取蜜源、路徑與蜂巢影像。

以下是根據蜜蜂 top-down process 表現出的能力，所提出的訊息路徑假說：



3.以各種特徵提示所形成的 top-down process

(1)形狀：

以 a 和 c 字元下移的影像作為提示，蜜蜂仍能擷取形狀訊息而辨識複雜影像。但在 Horridge, G. Adrian.於 2009 年出版的書中指出，透過一連串行為實驗的探討，發現蜜蜂其實並不會看見「形狀」，而只是擷取各種形狀影像中能區別的訊息(cue)，且會因為影像組合的不同而擷取不同的訊息。所以在此實驗中更精確的說法應該是提示蜜蜂「形狀中的訊息」，而蜜蜂對位移過的形狀中的訊息仍具備擷取能力，能用形狀中的訊息產生 top-down process。

位移提示的實驗結果還有其他意義，由於蜜蜂能搜尋到影像某處有 cue，可見蜜蜂具備“Active vision”(Miriam, Rtidiger,& Mandyam,1985)，蜜蜂會為了區別影像而以動態的視覺掃描影像，有目的地擷取可用的訊息，此現象也只會出現於高等生物身上，但蜜蜂也具備。而**本實驗還更進一步的發現，蜜蜂能用搜尋到的訊息再當作 top-down process 的訊息，或者說，即使是以 top-down process 辨識影像，蜜蜂仍能在複雜影像中搜尋相對應的 cue。**

(2)位置：

位置並不是很強烈的提示，在裝有擋板(baffle)時，蜜蜂總是會由正中央的洞口進入，但拿掉擋板後，蜜蜂就會發覺並不用從正中央進入，便開始隨意進入兩臂，無法分辨複雜影像，而失去了給予位置提示的用意。但此現象也能有另一種解釋，也許正因為蜜蜂具備動態視覺，能搜尋影像訊息，所以對牠們而言，位置的提示便較不重要，而沒有記取訊息的位置在哪，不過在此實驗面對複雜影像時，是需要記得位置的，牠們就沒有辦法輕易地搜尋到訊息了。

(3)正確及錯誤：

無論是只有正確或錯誤的影像組，蜜蜂皆能夠辨識，但在 top-down process 時，只有正確影像是可行的。整體而言，正確影像的學習曲線及測試結果都較佳，而蜜蜂對錯誤影像的學習能力較差，也許就因為如此，蜜蜂在後續面對複雜影像時，被提示錯誤影像的蜜蜂們就較難利用先前的經驗了。

也有其他對此實驗結果的解釋，我們猜測蜜蜂會記取正確影像的特徵，所以才能在提示正確影像之後具備 top-down process 的能力，但對錯誤影像的擷取力較

差，所以被提示錯誤影像之後，蜜蜂無法在複雜影像找到正確的訊息(空白)，且牠們對錯誤影像(c)的印象也較淺，就無法辨識複雜影像了。換言之，在蜜蜂的學習過程中，**記取獎賞(reward)比記取懲罰(punishment)重要。**

4. 蜜蜂視覺經驗 Top-down process 的推論假說

對以上的實驗結果，我們提出一套假說：**【蜜蜂可以利用影像中各種不同的訊息進行 top-down process，而不需要將所有特徵都提示出來。在擷取的視覺經驗中，為了提高辨認效率，蜜蜂只擷取形狀中的某些訊息，且可以搜尋、尋找這些訊息，但若只提示訊息的位置，蜜蜂就較無法辨識影像，因為位置對蜜蜂而言並不是必備的區辨訊息，在野外，蜜蜂也是擷取拜訪過的花朵影像訊息，而非位置訊息。另外，蜜蜂對影像 top-down process 的經驗累積、學習中，獎賞的訊息強過懲罰的印象，在野外會直接拜訪採過蜜的「獎賞花朵」，而略過不確定或曾經拜訪而沒有糖水的花。】**

四、學習能力 ≠ 擷取能力

蜜蜂對各提示影像的學習曲線代表其學習能力，能比較出蜜蜂對各訓練影像的學習狀況，而擷取能力則是指蜜蜂被提示後，因為此提示而執行的 top-down process 能力，可以比較出蜜蜂對提示能擷取多少訊息。

但經過比較便能發現，學習能力與擷取訊息進行 top-down process 的能力無關，例如：經過容易學習的「提示位置」提示影像組訓練後，蜜蜂還是無法擷取其中的訊息，無法執行 top-down process，換句話說，即使蜜蜂對位置訊息的學習能力很強，牠們依然不會擷取位置的訊息，無法 top-down process 位置的訊息。

我們原本認為，蜜蜂為了有效率辨識影像，會擷取最省記憶空間的訊息，但比較發現學習能力 ≠ 擷取能力後，應該修正為：**為了有效辨識影像，蜜蜂應該擷取省記憶空間又能有效區別影像的重要訊息。擷取的訊息不能只是容易學習的「簡單」訊息，而是同時必須是「重要」的訊息。**

五、補充“Top-down process”的定義

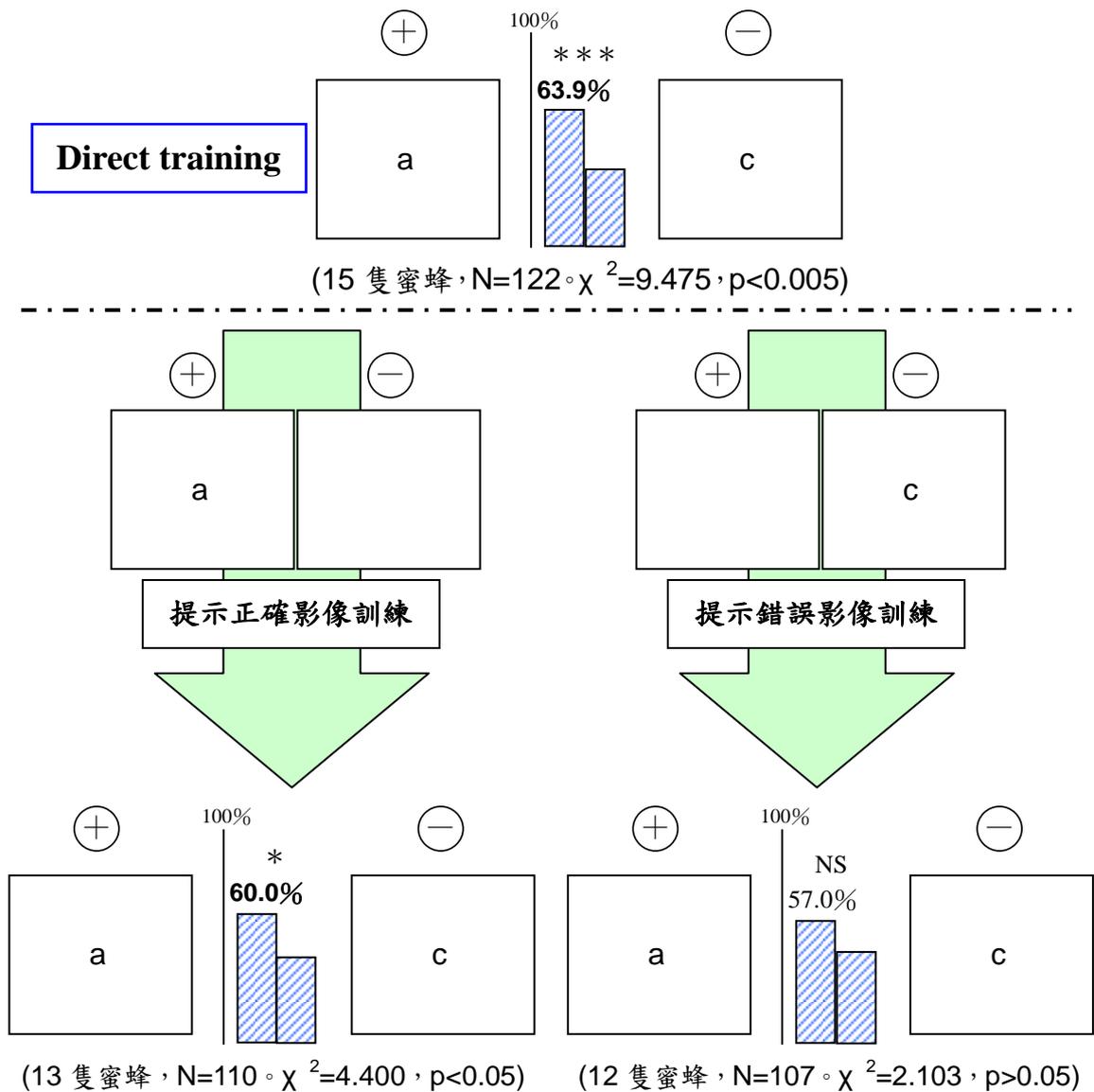
Top-down process 是許多高等生物具備的能力，但蜜蜂也具備。此本能對這些生物而言相當重要，可以藉由視覺經驗的累積，漸漸地增強辨識能力。不過，本實驗的結果發現蜜蜂所需的視覺經驗不必是完整的，而只需要擷取影像其中的一些重要訊息，且面對不同的影像組，蜜蜂也能擷取不同的訊息做為經驗。將先前學習所擷取到的提示執行 top-down process 後，就能在最後面對複雜的影像時，不受干擾地只「看到」能有效辨識複雜影像中的重要訊息，甚至能夠以「搜尋」的方式尋找影像各處中的訊息，而不需要尋找特定位置。另外，獎勵(糖水)是使蜜蜂形成經驗的重要原因，所以正確的影像經驗與複雜影像中相對應的辨識訊息，就是執行 top-down process 的來源，且執行完畢之後，這些訊息還能夠進入長期記憶，而在之後每次面對包含經驗訊息的複雜影像時，都能有效地辨識。

六、提示正確與錯誤

下圖數據是在實驗進行後增加測試的，測試了提示正確或錯誤影像訓練後，對兩端皆出現的實驗一影像(a,c)所產生的辨識力。

蜜蜂擷取正確端訊息的能力較強，無論在此數據或實驗三的結果中，蜜蜂都無法藉由錯誤影像的提示而辨識後續影像。

在以下比較中，發現雖然蜜蜂經過錯誤端訊息提示，是無法增強辨識力，但應該產生了些微的視覺經驗:若將兩端都提示出，正確率可達 63.9%，但若只提示正確端的訊息，正確率卻只達 60%，可見蜜蜂在辨識兩端影像時，同時還是會擷取一些錯誤端訊息，而這些錯誤端的訊息，是能夠幫助辨識影像的。



比較直接訓練、提示正確或錯誤影像的結果：若直接訓練而辨識實驗一的 a,c 影像組，可以達到良好的辨識能力。經過正確端訊息提示後，辨識能力會降低，但仍能辨識後續測試的 a,c 影像($p<0.05$)。若是經過錯誤端影像提示，則辨識能力會更差，甚至最後在測試時，無法辨識 a,c 影像組了($p>0.05$)。

不過，透過正確百分比的觀察，可以印證我們的想法，雖然蜜蜂由錯誤端提示後，辨識兩影像的結果不顯著，但蜜蜂仍擷取了錯誤影像的些微訊息，所以才會在錯誤影像提示後，還能夠對後續影像產生達到 57% 的正確率。

七、蜜蜂的行為

1. **飛行**：蜜蜂的飛行能力極佳，可以快速又準確地在空中改變方向。
2. **覓食**：蜜蜂是為了覓食而固定往返迷宮的，在缺乏蜜水時，蜜蜂來訪的效率便會降低，但在1~2天之內補上糖水，蜜蜂仍會記得此處曾是蜜源而再次來訪。蜜蜂是用長長的細毛口器吸食糖水的，當有糖水時，細毛便由大顎內部伸出，如此一來，即使是蜜源較深的花朵，蜜蜂也能採到蜜。
3. **「掃描」**：蜜蜂的“visual scanning behaviour”理論(Miriam, Rtidiger & Mandyam,1985)，認為蜜蜂為了幫助看見影像，會在影像前於空中快速左右搖晃，增加辨識能力、色彩對比，在本研究的實驗進行時也常見到此行為。
4. **叮咬、自衛**：在逆境中會伸出毒針，並用中腳極力掙脫，還會分泌警戒費洛蒙，使身旁的蜜蜂提高警覺，所以若在糖水盒中留有蜜蜂的費洛蒙氣味，就會影響結果，需定期清理。

捌、結論

本實驗對蜜蜂的視覺經驗、top-down process 能力有進一步的研究成果，也成功地用「密碼」訓練蜜蜂，探索蜜蜂的視覺經驗與圖形辨識能力。

1. 蜜蜂能夠在訓練之後辨識英文字母影像，即使是相似度高的a和c字母，蜜蜂仍以巧妙的辨識能力區分出來。
2. 可以利用英文字母影像進行後續實驗。發現若以設計的複雜文字影像直接訓練蜜蜂，並無法達到良好的辨識能力，但經由提出影像特徵訓練之後，蜜蜂就可以區辨原來的複雜影像，**透過擷取的訊息執行 top-down process 的能力。**
3. 若只提出影像的某些特徵進行訓練，蜜蜂也可以被提示，分辨複雜影像。而提示的訊息中以形狀較重要，而訊息位置的提示效果較差，另外，若只提示某一邊的影像，正確端的影像經驗深刻於錯誤端的經驗(如下表)。

提示影像的訊息	兩端的形狀+位置	兩端的形狀	兩端的位置	正確端的形狀+位置	錯誤端的形狀+位置
增強後續辨識力	○	○	×	○	×

蜜蜂的視覺經驗在執行 top-down process 的過程中相當重要，為了增強辨識能力，蜜蜂會以良好的擷取能力記取重要的視覺經驗。

本實驗首度以不同的影像特徵因子訓練蜜蜂，發現蜜蜂仍然可以快速地擷取提示的訊息，而且只透過這些簡單訊息經驗，便能夠完成 top-down process，增強辨識複雜影像的能力。

蜜蜂能在不到 1 mm^3 的腦部處理複雜的視覺經驗，其中的過程、能力值得探討，我們會繼續進行實驗，希望能整理一套蜜蜂處理視覺經驗的神經機制。

玖、未來展望與應用

蜜蜂是相當了不起的生物，牠們能在那麼小的大腦中記憶訊息，還執行 top-down process 一步步地學習辨識影像，只不過蜜蜂的壽命不夠長，無法累積大量經驗，但我們可以猜測，若蜜蜂的壽命更長，也許牠們甚至能認英文單字、片語呢！

在蜜蜂視覺的領域中，相關資料相當廣泛、充足，而此實驗結果，希望能為這個領域帶來一些新的發現。目前的實驗已測試 top-down process 中黑白的形狀、位置等提示，在後續研究中，我們希望還可以測試蜜蜂在視覺經驗中所擷取的其他提示，像是改變視角大小、色彩對比及影像大小等，若歸納各種提示所呈現的 top-down process 能力，並整理出一套 top-down process 的視覺訊息流程、機制，就能更了解蜜蜂在野外如何運用視覺經驗，而有更多的發現與討論空間。

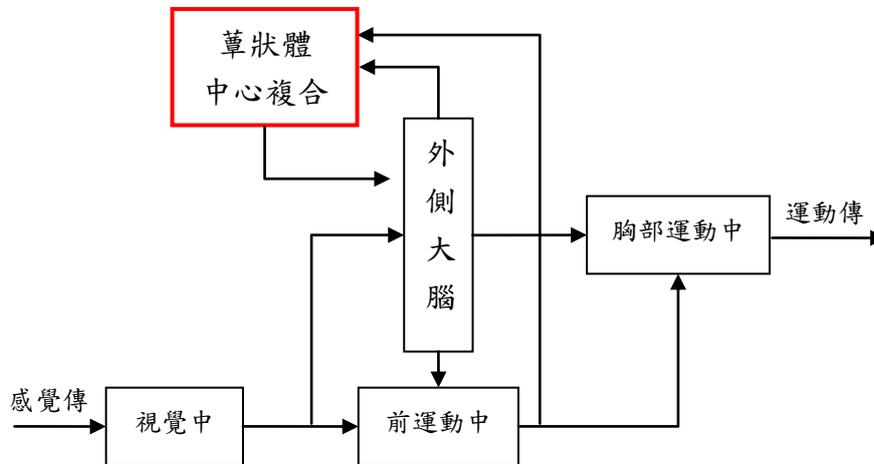
應用發展性—最近的科學發明，時常以仿生為創作來源，而視覺或影像偵查也是現在精密儀器、機器人等發明所需要發展的方向。蜜蜂的大腦不到 1 mm^3 ，卻能有高等生物的 top-down process、影像辨識能力，可見牠們一定具備精緻的神經系統、神經機制，值得我們去探索，若能更進一步開發生物視覺的領域，相信我們會得到更多啟發。

拾、參考文獻

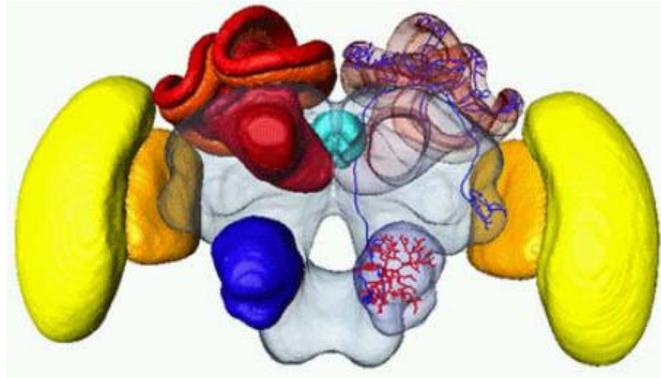
- 水波誠 (2008)。探索昆蟲微小腦。台北：世茂出版。頁 42-70, 142-160, 194-209。
- 森昭彥 (2009)。別鬧了!昆蟲。台中：晨星出版。頁 66-77。
- 楊恩誠、詹美玲 (2005)。談昆蟲眼中的形與色。科學月刊，第 36 卷，第 4 期。
- 楊恩誠、黃上銓、陳怡伶、桂佳鳳(2002)。蜜蜂之趨光行為一對比較度與視神經機制。台灣昆蟲特刊，4: 67-78。
- Benard, J., Stach, S. and Giurfa, M. 2006. Categorization of visual stimuli in the honeybee *Apis mellifera*. *Animal Cognition*. 9:257–270.
- Efler, D. and Ronacher, B. 2000. Evidence against a retinotopic-template matching in honeybees' pattern recognition. *Vision Research*. 40: 3391–3403.
- Giger, A. D. and Srinivasan, M. V. 1997. Honeybee vision: analysis of orientation and colour in the lateral, dorsal and ventral field of view. *The Journal of Experimental Biology*. 200: 1271–1280.
- Giurfa, M., Hammer, M., Stach, S., Stollhoff, N., Muller-Deisig, N. and Mizyrycki, C. 1998. Pattern learning by honeybees: conditioning procedure and recognition strategy. *Animal Behaviour*. 57: 315–324.
- Horridge, G. A. 2009. What does the honeybee see and how do we know? : A critique of scientific reason. ANU E Press.
- Lehrer, M. and Campan, R. 2005. Generalization of convex shapes by bees: what are shapes made of? *The Journal of Experimental Biology*. 208: 3233-3247.
- Lehrer, M. 1998. Review looking all around: honeybee use different cues in different eye regions. *The Journal of Experimental Biology*. 201: 3275–3292.
- Lehrer, M., Wehner, R. and Srinivasan, M. 1985. Visual scanning behaviour in honeybees. *Journal of Comparative Physiology. A*. 157: 405-415.
- Van Hateren, J. H., Srinivasan, M. V. and Walt, P. B. 1990. Pattern recognition in bees: orientation discrimination. *Journal of Comparative Physiology. A*. 167: 649–654.
- Zhang, S. W., Lehrer, M. and Srinivasan, M.V. 1999. Honeybee Memory: Navigation by Associative Grouping and Recall of Visual Stimuli. *Neurobiology of Learning and Memory*. 72: 180–201.
- Zhang, S. W., Bartsch, K. and Srinivasan, M. V. 1996. Maze learning by honeybees. *Neurobiology of Learning and Memory*. 66: 267-282.
- Zhang, S. W., Srinivasan, M. V. and Collet T. 1994. Convergent processing in honeybee vision: Multiple channels for the recognition of shape. *Proceeding of National Academy of Science* 92: 3029-3031.
- Zhang, S. W. and Srinivasan, M. V. 1994. Prior experience enhances pattern discrimination in insect vision. *Nature (London)*. 368: 330-332.

拾壹、附錄

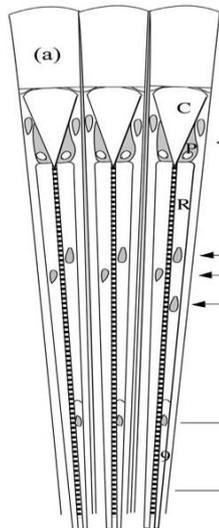
- 一、視覺訊息在蜜蜂神經網內的假說路徑圖，蕈狀體相當於蜜蜂的腦部，訊息也
就在此儲存、形成記憶，幫助 top-down process 的執行：



- 二、蜜蜂的腦部解剖圖：



- 三、蜜蜂的視小眼解剖圖：



四、螢幕校正數據:

由於蜜蜂能夠感受到光子強度的不同，實驗用的螢幕必須經過校正，確保蜜蜂不會因為兩螢幕發出的光子不同而影響實驗結果。

*方法: 以光譜分析儀(spectrometer)測量，測量兩螢幕呈現實驗用的黑色與白色時(本實驗目前是以黑白影像進行實驗)，發出的光子強度是否分別相似。

根據實驗所使用的螢幕區塊計算距離與面積，架設分析儀的探棒測量。

測量後經 Ocean Optic OOirrad 軟體呈現各 λ 的 $W(\text{Joule/s})$ ，只擷取計算 λ 為 300~700 nm 的範圍(蜜蜂的可見光譜範圍)，經換算並除以時間與面積，得測量範圍所發出的總光子數，單位為 Quantum flux (photons/cm²/s)。

換算公式: Quantum flux (photons/cm²/s) = $W \times \lambda \times 5.03402 \times 10^{11}$

*結果: 校正完畢(如下表格)。由於蜜蜂視覺的對比感度必須要有 10 倍以上的光子量差，才能夠感受到螢幕的不同，所以結果發現白色與黑色呈現於兩螢幕時，光子數能兩兩相似，所以能夠用以進行實驗。

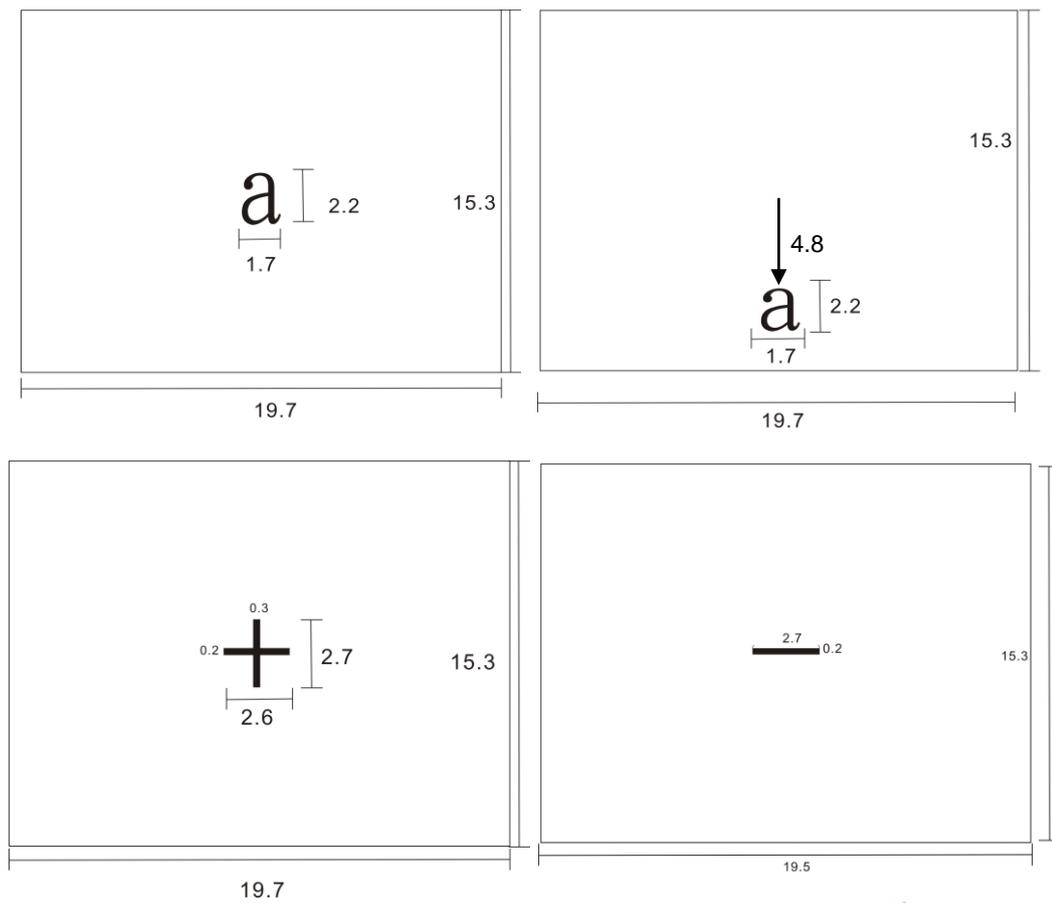
單位: Quantum flux (photons/cm²/s)

顏色 \ 螢幕	左	右
白	3.84018×10^{17}	6.45273×10^{17}
黑	5.42813×10^{15}	8.16894×10^{15}

五、其他影像設計規格

以下是實驗使用的測試影像，設計影像中的字元以及字元間距都符合蜜蜂視角的最小限度，影像中的設計長度和蜜蜂複眼的夾角 $\geq 1^\circ$ ，讓蜜蜂在選擇影像時能看見影像的內容。

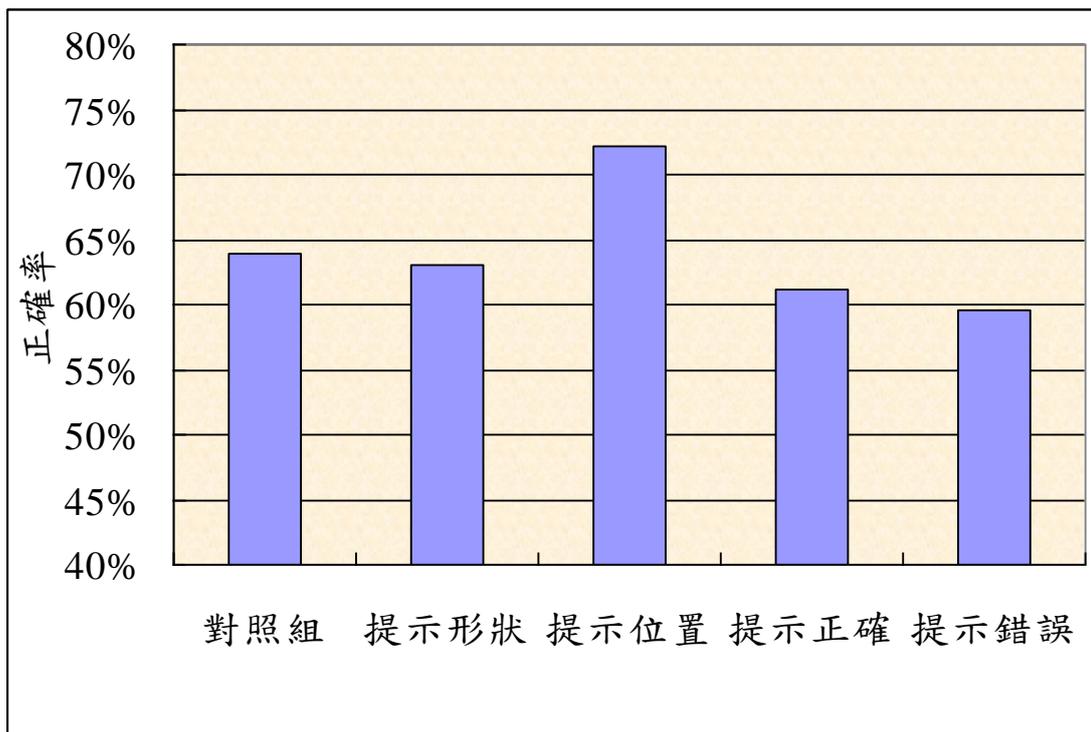
【圖形給予的視角： $a=4^\circ$ ， $c=4^\circ$ （ a 與 c 同規格）， $b=6^\circ$ ， $+4^\circ$ ， -4° ，全影像 $=36^\circ$ 】



單位:cm

六、比較辨識力數據

* 蜜蜂被各提示影像訓練後，對提示影像的辨識能力：



* 蜜蜂被各提示影像組訓練提示之後，對複雜影像的辨識能力：

