

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：動物學

作品名稱：昆蟲也會大小眼！？

學校 / 作者：新竹市立建功高級中學

鄒德立

目 錄

作者簡介	.....	P.1
英文摘要	.....	P.2
中文摘要	.....	P.3
壹、 前言	.....	P.4
一、研究動機	.....	P.4
二、研究目的	.....	P.4
貳、 研究過程或方法	.....	P.4
一、研究設備及器材	.....	P.4
二、研究方法	.....	P.4
(一) 研究蜻蜓的眼睛結構	.....	P.4
(二) 比較晝行性昆蟲與夜行性昆蟲的複眼之差異	.....	P.5
(三) 觀察昆蟲對光的反應	.....	P.6
(四) 昆蟲複眼的視覺遠近功能探討	.....	P.6
參、 研究結果與討論	.....	P.8
一、蜻蜓的眼睛結構	.....	P.8
二、晝行性昆蟲與夜行性昆蟲的複眼之差異	.....	P.9
三、昆蟲對光的反應	.....	P.14
四、蜻蜓複眼的視覺遠近功能探討	.....	P.17
肆、 結論與建議	.....	P.20
伍、 參考資料	.....	P.22

作者簡介



我是鄒德立，就讀新竹市建功高中國中部三年級，這次的科展研究是個偶然，原本只是單純的想去清大找個研究室當研究生的小幫手，學習一些做研究的方法與原則，並見識一下研究生“瀟灑自在”的生活。我去的研究室中的大哥哥、大姊姊是透過對一些昆蟲的觀察，再應用到深奧的微機電領域，我不懂微機電，但昆蟲是我自小就愛接觸的，小時候在爺爺的花園中跟前跟後，就啟發了我對動、植物的興趣，進而發現大自然的奧妙真是不斷的驚嘆號。

在這次的研究過程中，取樣的過程就充滿了樂趣，而觀察的結果更是充滿驚喜，我還不確定以後會走什麼方向，但我認為對生物的研究可以帶給我們很寶貴的一個基本心態，就是對所有生命的尊重，而且能更加體會人類只是生物中的一份子，無需自命為萬物的主宰。我很感謝葉哲良教授讓我使用相關設備，呂衍昇哥哥、彭巧玲姊姊和莊朝淵老師對我的指導與鼓勵，更謝謝爸爸媽媽一路的陪伴與支持。

The Compound Eye of Insects

The main purpose of this study is to understand the structure of the compound eye of insects, to compare the difference between the diurnal insect's compound eye (apposition eye) and that of the nocturnal insect (superposition eye), to explore the relationship between the vision and the structure of the compound eye, and to observe the eye's reaction to the different light wave length. In this study, a microscope (OLYMPUS BX51M) and an inverted microscope (OLYMPUS 1X71) were used to observe the structure of the compound eye and its ommatidia, as well as the resulting image. A contact angle measuring instrument (Dataphyscis OCA 20) and a microscope (Mitutoyo NAVITAR) were used to determine the connection between the vision distance and the facet curvature of ommatidia. The butterfly's reaction to the light source with different wave length was also observed in a darkroom. It was observed that the compound eye of insects is composed of more than a thousand ommatidia. Among the subject insects, the facet curvature radius of their ommatidia ranged from 25.3 μm to 117.6 μm . The radius of the top and bottom half of a dragonfly is 30.6 μm and 117.6 μm . It confirms a scientific finding that dragonfly's top compound eye focuses farther than the bottom half. The facet of each ommatidium observed is hexagonal in insects compared with the square shape found in the eye structure of shrimp. Regarding the reaction to light of the butterfly eye; the reaction decreased when the light wave length increased.

中文摘要

昆蟲也會大小眼！？

本研究目的主要在瞭解昆蟲的複眼(compound eyes)結構，比較晝行性與夜行性昆蟲複眼之差異，探討其視覺遠近和複眼結構的關連，及進一步觀察其對不同波長光源反應的差異。本實驗使用反射式及倒立式顯微鏡來觀察複眼及其小眼的結構，及觀察其成像情形，並使用攝影式接觸分析儀與放大管來探討視覺遠近和小眼表面曲率之關連，另外在暗室利用不同波長的光源照射蝴蝶以觀察其反應。實驗結果顯示複眼是由數千至數萬個小眼組成，小眼表面曲率半徑隨選用物種在 25.3 μm 至 117.6 μm 之間，蜻蜓複眼上半部和下半部小眼曲率半徑分別為 30.6 μm 、117.6 μm ，印證了蜻蜓複眼上看遠下看近的說法，也發現蝦子小眼是正方形，其他實驗物種則皆為六邊形，而蝴蝶對光的反應程度則是隨波長漸增而遞減。

壹、前言

一、研究動機

父母常提幼時在田野中抓魚、摸蝦、捉蝴蝶和蜻蜓的童年趣事，而我從小就喜歡觀察大自然，所以也偶而有這樣的機會經驗這些野趣！要空手抓蜻蜓可不是件容易的事，蜻蜓視野可達到 360 度，加上 100 公里的飛行時速，簡直是如虎添翼，英文的直譯是「龍蒼蠅」，真是一點也沒錯，牠飛在空中時，真的跟龍一樣，唯我獨尊。我很好奇為何蜻蜓的警視範圍這麼大，它是什麼樣的機制呢？而自然界中其他如翩翩起舞的蝴蝶卻飛得比蜻蜓慢，眼睛也比蜻蜓小很多，又如夜間活動的昆蟲，牠們的複眼結構與晝行昆蟲的複眼結構有何不同呢？就因為如此激起了我對昆蟲複眼的好奇心，記得國一下翰林版自然與生物科技第四章第四節的動物界中介紹到節肢動物門，及國二上第四章第四節學到透鏡的成像，都可以作為我研究昆蟲複眼結構的理論基礎。如果這些功能與現象應用到人類的生活上，又將會帶來什麼樣的助益呢？

二、研究目的

- (一)、研究蜻蜓的眼睛結構
- (二)、比較晝行性昆蟲與夜行性昆蟲的複眼之差異
- (三)、觀察昆蟲對光的反應
- (四)、昆蟲複眼的視覺遠近功能探討

貳、研究過程或方法

一、研究設備及器材

- (一)、實驗物種：薄翅蜻蜓、中國蜂、台灣紋白蝶、螢火蟲、蛾、蚱蜢、大頭麗蠅、泰國蝦*、沙蝦*、大沙公蟹*。
- (二)、實驗設備：反射式顯微鏡(OLYMPUS BX51M)、數位相機(CASIO EX-Z1000)、倒立式顯微鏡(OLYMPUS 1X71)、攝影式接觸分析儀(Dataphysics OCA 20)、放大管(Mitutoyo NAVITAR)、近拍照像機(Canon IXUS60)、放大模組(Lumos X1Loupe Series)、標尺(10 μ m/單位)、量角器、補蟲網、昆蟲箱、白光手電筒及紅光雷射筆、針筒、手術刀、酒精。

*：非昆蟲，為對照組

二、研究方法

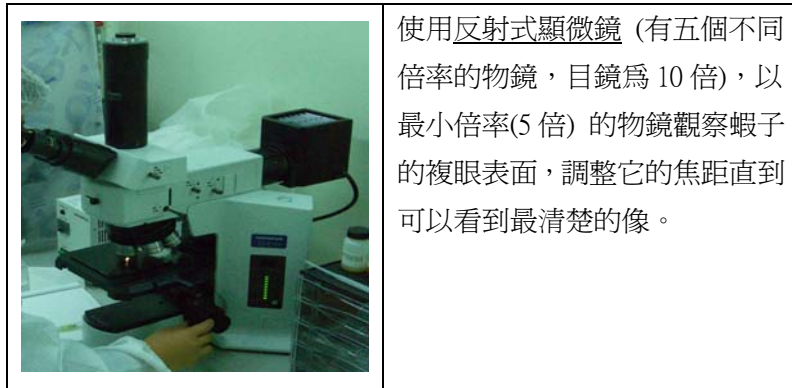
- (一)、研究蜻蜓的眼睛結構

進實驗室把在清華大學校園裡尋獲的薄翅蜻蜓的眼睛剖開，使用攝影式接觸分析儀及反射式顯微鏡來觀察其複眼的表面與橫切面結構。

(二)、比較晝行性昆蟲與夜行性昆蟲的複眼之差異

1. 觀察聯立眼(Apposition eye)與重複眼(Superposition eye)之差異

把使用重複眼的螢火蟲，泰國蝦*、沙蝦* 及大砂公蟹* 的複眼與使用聯立眼的薄翅蜻蜓、蜜蜂、台灣紋白蝶、大頭麗蠅的複眼放在反射式顯微鏡下來觀察作比較。

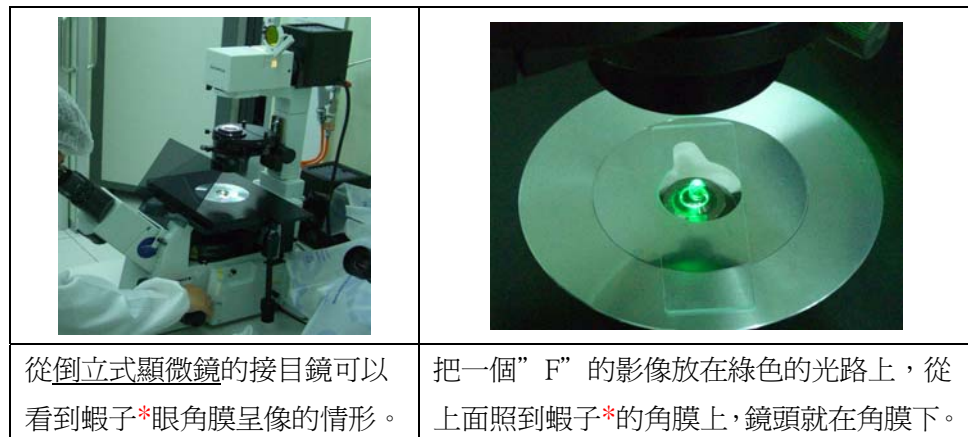


2. 觀察聯立眼與重複眼之眼角膜的成像差異

用倒立式顯微鏡觀察使用重複眼的螢火蟲、沙蝦*、泰國蝦*及螃蟹*的眼角膜與使用聯立眼的蜻蜓、蜜蜂、蝴蝶、蛾及蚱蜢的眼角膜之成像有何不同。

觀察方法如下：

- (1) 把浸泡過酒精的蝦子*、螃蟹*、蜜蜂、蝴蝶、蛾、蒼蠅及蚱蜢複眼和未浸泡過的蜻蜓和螢火蟲複眼，用手術刀剝下眼角膜，在倒立式顯微鏡下觀察其呈像情形。
- (2) 將剝下的眼角膜(cornea)放在倒立式顯微鏡下，把一個”F” 的影像放在光路上，角膜下的鏡頭拉近角膜時，從接目鏡就可以清楚看到一個個正方形排列在一起，對焦後即可出現一個個清楚的大”F” ，而鏡頭與角膜之間的距離就是「焦距」。



*：非昆蟲，為對照組

(三)、觀察昆蟲對光的反應

1. 這個實驗本是要觀察蜻蜓和蝴蝶對光的靈敏度來做個比照，但因我研究的季節已找不到蜻蜓，所以只有觀察蝴蝶，而且獲取的數量很少，前後共觀察三次。所觀察的物種是台灣紋白蝶，不過觀察結束後都馬上把牠們放走，最久不超過二天。

2. 觀察方法

(1) 實驗器材：

- a. 四隻台灣紋白蝶
- b. 小型白光手電筒，紅、黃、綠、藍、紫等色玻璃紙各一張
- c. 透明壓克力昆蟲箱

(2) 實驗設計：



(3) 實驗方法：

- a. 將 4 隻台灣紋白蝶放進透明壓克力昆蟲箱置於暗室中，並等所有的蝴蝶靜止不動。
- b. 以紅、黃、綠、藍及紫色玻璃紙罩在手電筒燈頭上，距離第一隻蝴蝶約 3 公分處照射約 10 秒，間隔 10 秒後，以相同的距離照射第二隻約 10 秒，依此類推，照完四隻，總共投射 200 次。
- c. 蝴蝶若有爬行、身體擺動或飛起來都定義有反應。

(四)、昆蟲複眼的視覺遠近功能探討

1. 使用攝影式接觸分析儀來量測蜻蜓與蝴蝶的眼球曲度之差異。

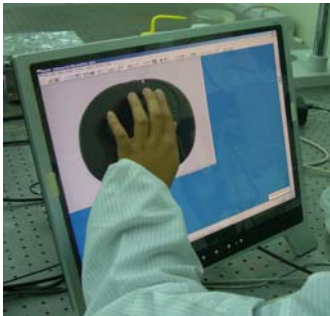
從肉眼可以看出蜻蜓的眼睛不是成圓球狀，且上下眼球的弧度也不一樣，利用攝影式接觸分析儀做更精密的測量，可以了解蜻蜓複眼的特殊曲度對視力的影響。這台攝影式接觸分析儀本是用於量測水滴的曲度、半徑等資料，內含套裝軟體，只需在圖像邊緣取三點即可自動推算出含蓋這三點的”模擬圓形”之半徑，再由這半徑資料來比較曲度的大小。

測量過程如下：

- (1) 拍出蜻蜓與蝴蝶複眼的大概輪廓。
- (2) 應用軟體，在蝴蝶複眼及蜻蜓複眼上下部分的邊緣各標上幾個點(至少 3 個點以上)，就會在複眼上下各畫出一個圓圈。

	<p>使用攝影式接觸分析儀，在蜻蜓複眼的上下部分畫圓。</p>
	<p>使用攝影式接觸分析儀，在蜻蜓複眼上部分的邊緣標上幾個點，就會在蜻蜓複眼上半部畫出一個圓圈。</p>
	<p>使用攝影式接觸分析儀，在蜻蜓複眼下部分的邊緣標上幾個點，就會在蜻蜓複眼下半部畫出一個圓圈。</p>
	<p>使用攝影式接觸分析儀，在蝴蝶複眼的側邊標上幾個點後，就畫出一個圓圈。</p>

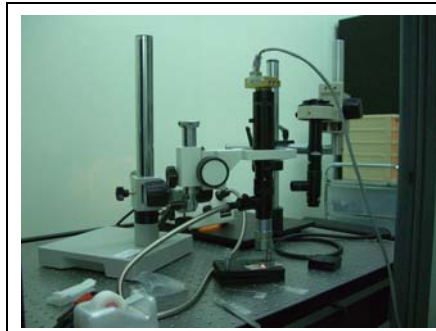
(3) 把蜻蜓的頭換一個角度拍複眼正面，用半圓形量角器如下圖，在複眼外側輪廓上每十度標上三個點，就可畫出一個圓圈，再間隔十度再標上三個點，依此類推，就可以畫出無數的圓圈，來比較不同部位曲度的大小。

	<p>我使用半圓形量角器在複眼外側輪廓上每十度標上三個點，來畫出一個圓圈。</p>
---	---

2. 測量昆蟲小眼曲度

(1) 使用放大管來測量蜻蜓複眼的上下半部小眼曲率半徑。

- 取下薄翅蜻蜓上下各一小塊複眼，複眼表面看起來有許多粉末狀物質，所以觀察前先用清水洗過。
- 使用放大管放大四點多倍來照複眼，爲了讓複眼剖面與接物鏡垂直，便於測量小眼曲度，在載玻片上用雙面膠固定複眼切片使之盡量垂直。



這是放大管

功能同放大鏡，但接物鏡可做三度空間的自由調整，且倍率調整爲漸進式而非固定式。

c. 將拍好的照片印出來，依照小眼曲度用圓規畫圓，再用標尺比對換算半徑尺寸。

(2) 使用反射式顯微鏡來照螢火蟲、蝴蝶、泰國蝦* 及沙蝦* 的複眼，將拍好的圖片印出來後，用圓規畫圓求出半徑長度，再用相同的標尺比例來比對量測，以換算牠們的小眼實際半徑尺寸，半徑愈大曲率愈小。因這些昆蟲複眼很小，放大管的倍率不夠大，所以不用放大管照。

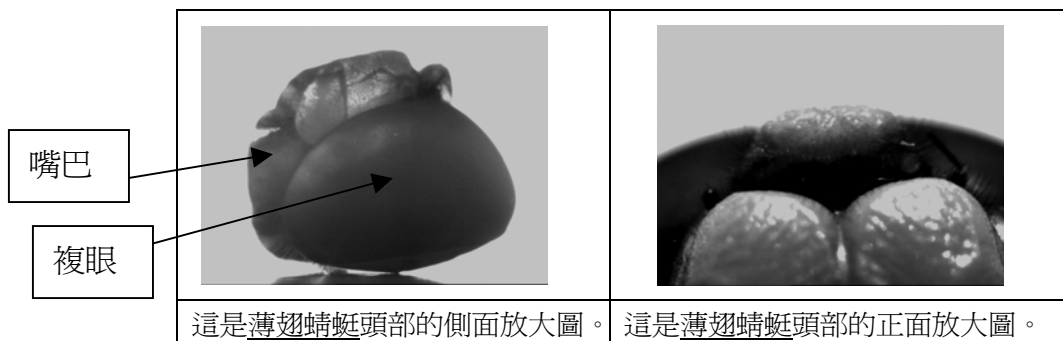
*：非昆蟲，爲對照組

參、研究結果與討論

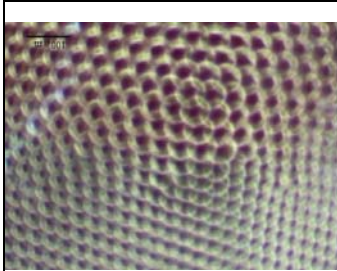

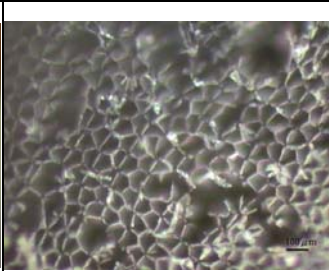
一、研究蜻蜓的眼睛結構

(一) 使用攝影式接觸分析儀來拍照薄翅蜻蜓的頭部後，發現牠的複眼佔了頭部很大的比例，也許因爲單眼太小，即使放大了 2.3 倍，也看不到牠的單眼。

薄翅蜻蜓的頭部特寫照片如下：



(二) 使用反射式顯微鏡觀察薄翅蜻蜓的複眼，發現表面的上半部是紅色，下半部是藍綠色，而複眼表面是由許多六角形的小眼緊密排列而成，且上半部的六小眼比下半部的小眼大，觀察複眼的背面與橫切面的結構時，也發現了一個個的圓柱狀細胞，但由於所觀察的薄翅蜻蜓已死多時，所以看到的圓柱狀細胞不是非常完整清晰。

		
這是薄翅蜻蜓複眼表面放大 50 倍的圖，上半部是紅色，下半部是藍綠色，這與文獻提到蜻蜓複眼分上下部份的顏色一樣。	這是薄翅蜻蜓複眼的橫切面放大 50 倍的圖，可清楚看出一條一條的圓柱狀細胞。	這是薄翅蜻蜓複眼背面放大 100 倍的圖，可看出一個一個的圓柱狀細胞。

我在科學教育網站(2003)上查到蜻蜓複眼的每個小眼都是六角形，上半部看遠處，最遠可看到 5~6 米遠，下半部看近物，而且只有下半部看得到顏色，牠也對物體的移動很敏感，可幫助補捉食物，也有利於逃脫威脅。

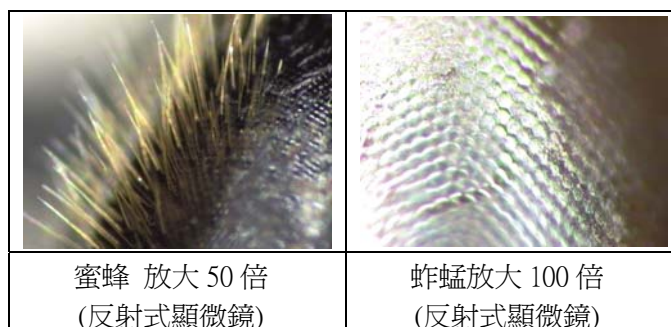
這項實驗取自蜻蜓活體的複眼，表面不是硬的，所以很難切割，但切割後可看見黃色體液存在於視桿中，我相信這些體液對影像傳導是有貢獻的。乾燥的蜻蜓複眼仍可見上半部淺紅色及下半部淺綠色，在倒立式顯微鏡下放大 50 倍~400 倍觀察，複眼表面可看到清楚的六邊形緊密組合且表面微凸的小眼，另外視桿也明顯易見，並在基層薄膜位置看到黑色膜狀，但仍可區分每一小眼區塊。

二、比較晝行性昆蟲與夜行性昆蟲的複眼之差異

(一) 觀察聯立眼(Apposition eye)與重複眼(Supperposition eye)之差異

1. 聯立眼(Apposition eye)的觀察

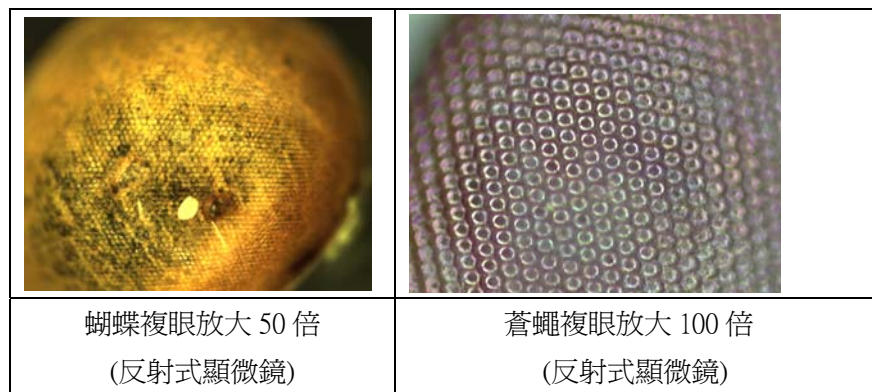
(1) 蜜蜂及蚱蜢的眼睛在反射式顯微鏡下觀察其結構及輪廓後，發現都和蜻蜓一樣是由六角形的小眼所構成，但是蜜蜂的眼睛表面有絨毛而蚱蜢沒有。



蜜蜂為何小眼排列間隙有許多的絨毛，我也不清楚，也查不到相關資料，但我大膽假設是因為避免在採蜜時花粉沾粘到複眼上，這和一些蜜蜂有身體絨毛幫助沾粘花粉是不一樣的，當然這還有待實驗證明，蜜蜂的角膜雖試多次也無法剝下，切開後也無法看到明顯的視桿結構，反而呈現透明條狀物。

蚱蜢嘗試了活體、浸泡酒精、浸泡酒精後再烘乾，都無法成功的剝下角膜，但有趣的是六邊形小眼呈現直條狀的排列，再組合成複眼和其它研究物種不同。

- (2) 台灣紋白蝶與大頭麗蠅的複眼在反射式顯微鏡下觀察，發現牠們的小眼都是由六角形的小眼緊密排列所組成，蝴蝶是黃色，而蒼蠅呈紅褐色。



蒼蠅複眼呈鮮艷的紅色，這和牠給人骯髒的印象差別很大，且角膜也異常的柔軟，在顯微鏡下觀察發現每個小眼中間帶著一些紫色。

- (3) 為了求證昆蟲小眼數目，我就以複眼長短軸當作一個正球狀直徑，各別算出其表面積後相加再除 2 [$A = (4\pi a^2 + 4\pi b^2) / 2$] 的方法，分別計算出四種物種的小眼數目如下：

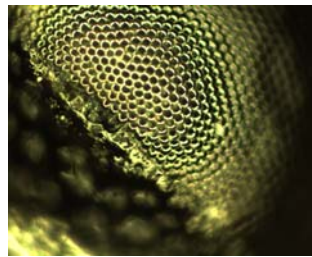
名稱	一個複眼的小眼數目	2 個複眼的小眼數目
沙蝦*	約 53,693 個	約 107,386 個
螢火蟲	約 7,623 個	約 15,246 個
臺灣紋白蝶	約 5,700 個	約 11,400 個
薄翅蜻蜓	約 2,780 個	約 5,560 個

因為量測精準度，特別是複眼面積的假設性計算，所以某種程度的誤差是必然存在的。中國科普博覽網站文獻提到蜻蜓有 1~28 萬個小眼，蝴蝶有 1.2~1.7 萬個小眼，其中我推算的臺灣紋白蝶的小眼數目與以上文獻相近，但是蜻蜓小眼數目卻與台灣蜻蜓彩色圖鑑上提到約有 2800~3000 個小眼或是蔡佰祿的蜻蛉篇由數千個到數萬個小眼較吻合，只可惜沒查到螢火蟲及沙蝦* 的小眼，所以無法驗證。

*：非昆蟲，為對照組

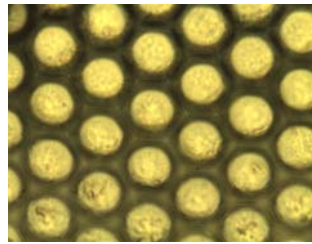
2. 重複眼(Superposition eye)的觀察

- (1) 螢火蟲的複眼在反射式顯微鏡下觀察，發現牠們的小眼是由六角形的小眼緊密排列而成，顏色接近黃褐色。



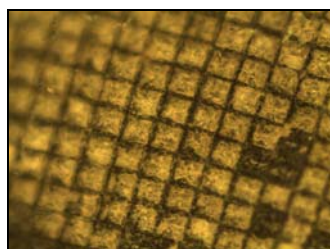
螢火蟲複眼表面放大 200 倍圖。
(反射式顯微鏡)

- (2) 蛾的複眼在反射式顯微鏡下觀察，發現是由六角形的小眼所構成，但六角形的小眼中間有一個圓形，很有趣。

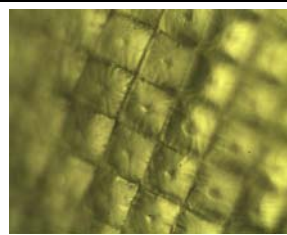


蛾放大 400 倍圖，用黃光照射，鏡頭貼近角膜的影像。
(倒立式顯微鏡)

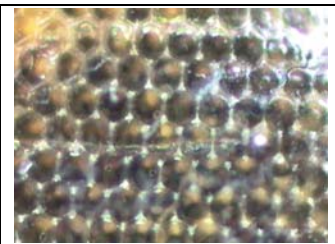
- (3) 沙蝦*、泰國蝦* 和大砂公蟹* 雖然不是昆蟲但也有複眼，所以將牠們烘乾的複睛在反射式顯微鏡下觀察，發現螃蟹* 也是成六角形的小眼，而沙蝦* 和泰國蝦* 的小眼卻是成正方形的，且每個小眼中心是呈現凹陷狀，這是一種特殊的現象。



沙蝦* 複眼放大 200 倍圖。(反射式顯微鏡)



泰國蝦* 複眼放大 200 倍圖。(反射式顯微鏡)



大沙公蟹* 放大 100 倍
(反射式顯微鏡)

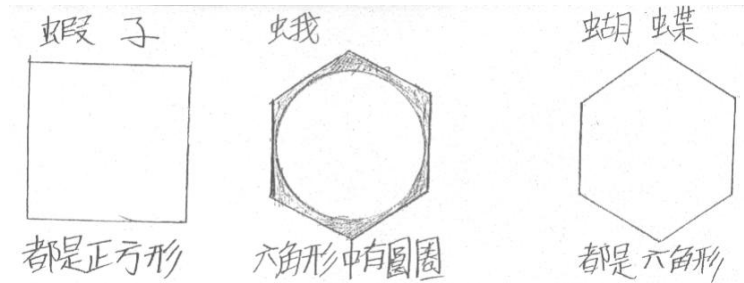
泰國蝦*的複眼浸泡於酒精後取出，很容易就有空氣進入角膜和結構之間，所以輕易就剝下完整的角膜，但沙蝦*就不行，為何泰國蝦*的角膜和結構間似乎沒有緊密連結，也是一個有待查詢或研究的方向。

因為晝夜間光線強度的大不同，所以晝行性與夜行性昆蟲視覺系統的結構也一定有明顯的差別，我也試著從書籍、或文獻去查明為何蝦子* 的每一個小眼是正方形的，但是仍查不到相關的說明資料，這是一個很特殊的發現，也是值得將來進一步研究的項目。

*：非昆蟲，為對照組

3. 有趣的發現

從這個實驗，除了發現蝦子* 的小眼是四方形且中心呈凹陷、螃蟹* 則是六角形的小眼，更有趣的發現是蛾六邊形結構小眼中間其實是正圓形，我無法查到相關文獻解釋原因，但是非常好奇，也許在未來有機會可以再進一步研究。

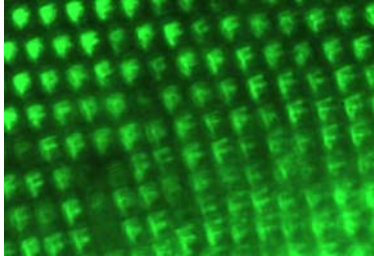

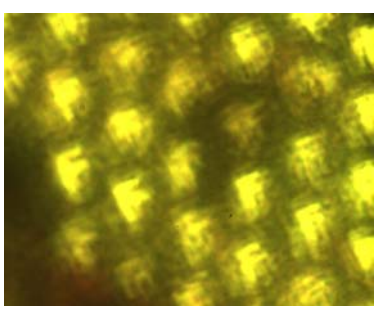

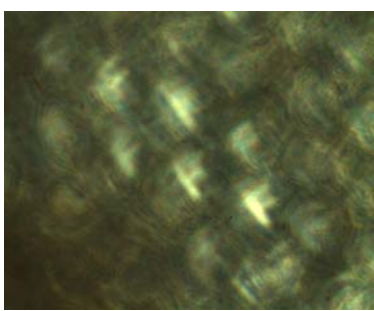



*：非昆蟲，為對照組

(二) 觀察聯立眼與重複眼之眼角膜的成像有何差異

1. 聯立眼(Apposition eye)的呈像觀察

剝下蜻蜓、蝴蝶及蒼蠅的角膜放在倒立式顯微鏡下，把一個”F”的影像放在光路上，發現角膜下的鏡頭拉遠角膜時，可以看到每個六邊形小眼都會呈現一個F的成像。

	<p>蜻蜓放大 100 倍，把一個”F”的影像放在光路上，角膜下的鏡頭拉遠角膜時，可以看到每個  形的小眼都有呈現 F 的成像。 (倒立式顯微鏡)</p>
	<p>蒼蠅放大 300 倍，把一個”F”的影像放在光路上，角膜下的鏡頭拉遠角膜時，可以看到每個  形的小眼都有呈現 F 的成像。 (倒立式顯微鏡)</p>
	<p>蝴蝶放大 400 倍，把一個”F”的影像放在光路上，角膜下的鏡頭拉遠角膜時，可以看到每個  形的小眼都有呈現模糊的 F 成像。 (倒立式顯微鏡)</p>

蒼蠅因為牠的角膜很軟，所以切下來後很容易變形，勉強用刀子刮下一小塊，在倒立式顯微鏡下觀察，還有一些紅色的色素黏在上面，所以成像較不清楚。

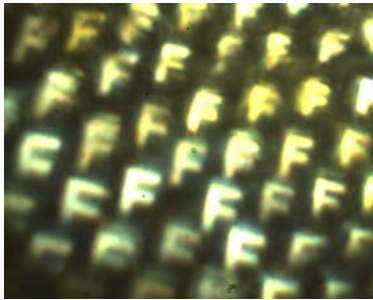
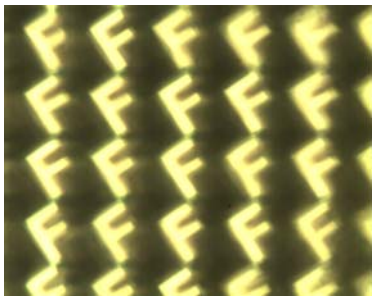


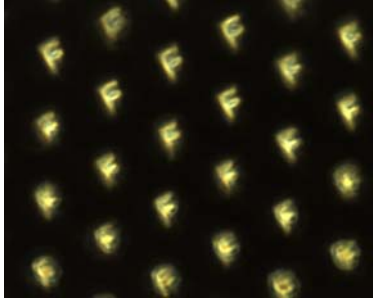
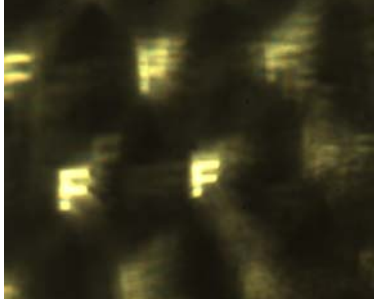


蝴蝶的小眼成像不清楚的原因，應該是剝下的眼角膜有沾粘到其他的結構吧！所以透光性很差，自然成像就比較模糊。

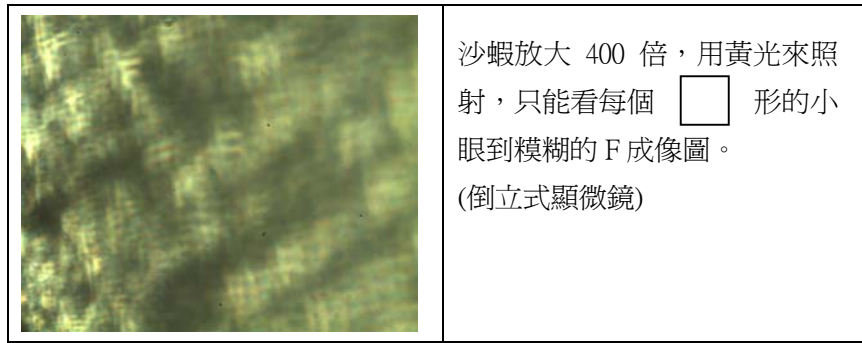
我試過幾次將浸泡在酒精裡的蜜蜂及蚱蜢的眼角膜剝下，來觀察它們成像的情形，可是都失敗了，雖然也試過烘乾的方式，也一樣剝不下來，所以很可惜無法看到牠們的角膜成像情形。

2. 重複眼(Superposition eye)的成像觀察

把螢火蟲、蛾、沙蝦*、泰國蝦*及大沙公蟹*的角膜放在倒立式顯微鏡下，把一個”F”的影像放在光路上，可以看到螢火蟲、蛾及大沙公蟹*的六邊形小眼和沙蝦*、泰國蝦*的正方形小眼都會呈現一個F的成像。

*：非昆蟲，為對照組

	
<p>螢火蟲放大 400 倍，用黃光來照射，可以看到每個  形的小眼都有呈現 F 的成像。(倒立式顯微鏡)</p>	<p>泰國蝦*放大 200 倍，用黃光來照射，可看出每個  形的小眼都有呈現 F 的成像。 (倒立式顯微鏡)</p>
	
<p>蛾放大 400 倍，把一個”F”的影像放在光路上，用黃光來照射，可以看到每個  形的小眼都有呈現 F 的成像。(倒立式顯微鏡)</p>	<p>大沙公蟹*放大 400 倍，用黃光來照射，可以看到每個  形的小眼都有呈現 F 的成像。 (倒立式顯微鏡)</p>



螢火蟲及大沙公蟹*的角膜都難剝，而且沾粘著一些結構，因為沒有辦法刮乾淨，所以是呈模糊的成像。

將蛾眼切下自然風乾角膜就會硬化，很容易剝離但也容易碎裂，雖然角膜表面局部沾到一些蛾的鱗粉，但不影響六邊形小眼的判定和成像。

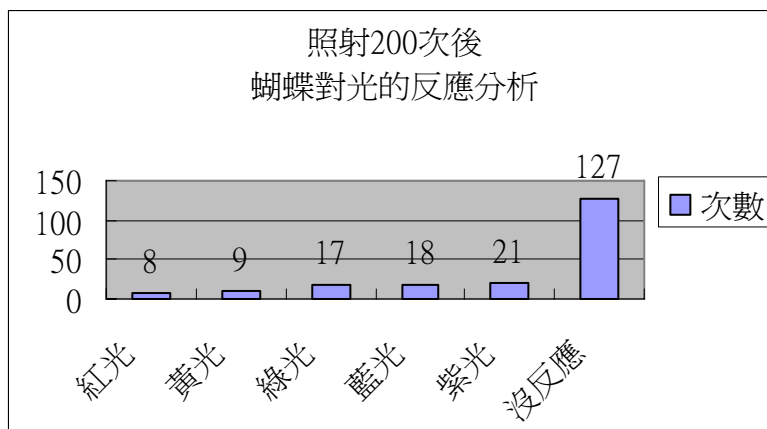
沙蝦* 的角膜表面沾粘一些結構，所以成像也不能像泰國蝦* 一樣清晰，也發現沙蝦* 的角膜是紅褐色，而泰國蝦*是透明的。除了發現泰國蝦*與沙蝦*的小眼是四方行外，且是直條狀完全相連的成像，這和其他昆蟲各小眼間成像明顯區隔開是很不一樣的，這是否和牠生活在水中需要更密集的聚光成像有關呢?而方形的小眼如何能組合成一個球狀的複眼，不但是個有趣的生物題目，數學上也應該是個有趣的現象。

*：非昆蟲，為對照組

三、觀察昆蟲對光的反應

(一) 第一次觀察結果

發現蝴蝶對綠光、藍光及紫光的反應較高，其中以對紫光(21 次)的反應最高。

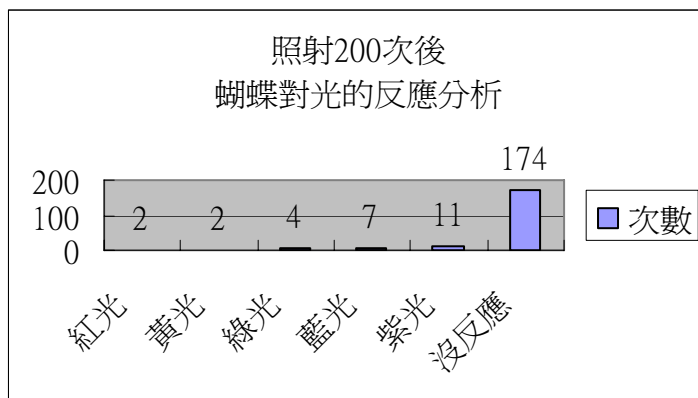


觀察數據如下：

蝴蝶編號		1	2	3	4	蝴蝶編號		1	2	3	4
次數	顏色					次數	顏色				
1	紅	V				6	紅				V
	黃				V		黃		V	V	
	綠	V	V	V			綠	V			
	藍	V	V	V			藍	V	V	V	V
	紫	V		V	V		紫		V	V	
2	紅	V		V		7	紅	V			V
	黃	V					黃				V
	綠	V		V			綠	V	V		V
	藍	V		V			藍				V
	紫	V	V		V		紫				
3	紅					8	紅				
	黃		V		V		黃			V	
	綠			V			綠			V	
	藍		V	V			藍				
	紫	V	V		V		紫	V		V	
4	紅				V	9	紅				
	黃						黃				
	綠		V		V		綠				
	藍			V	V		藍				
	紫	V	V	V	V		紫				
5	紅					10	紅				V
	黃		V				黃				
	綠		V		V		綠		V		V
	藍		V				藍		V	V	V
	紫		V		V		紫	V	V		

(二) 第二次觀察結果

反應較不為活潑，但仍對紫光反應最高，而紅光及黃光反應最差。

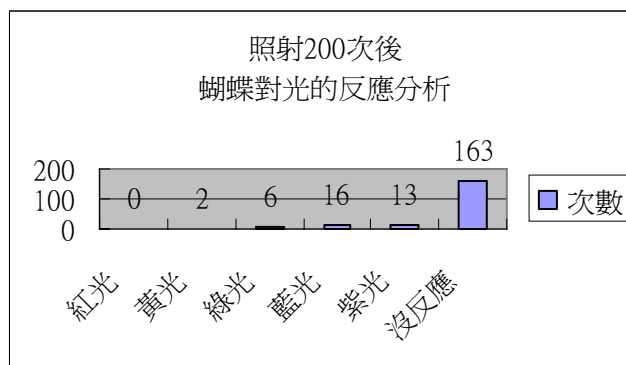


觀察數據如下：

蝴蝶編號		1	2	3	4	蝴蝶編號		1	2	3	4
次數	顏色					次數	顏色				
1	紅					6	紅				
	黃						黃				
	綠						綠		V		
	藍		V				藍				
	紫		V				紫			V	
2	紅					7	紅				
	黃						黃				
	綠		V				綠				
	藍						藍	V			
	紫	V					紫	V			V
3	紅	V				8	紅				
	黃						黃		V		
	綠						綠		V		
	藍						藍			V	
	紫			V			紫				
4	紅					9	紅				
	黃						黃				
	綠						綠		V		
	藍		V				藍			V	
	紫	V		V			紫			V	
5	紅		V			10	紅				
	黃			V			黃				
	綠						綠				
	藍		V				藍			V	
	紫			V			紫	V			

(三) 第三次觀察結果

發現蝴蝶對紅光沒有反應，藍光(16次)反應最高，其次是紫光(13次)。



觀察數據如下：

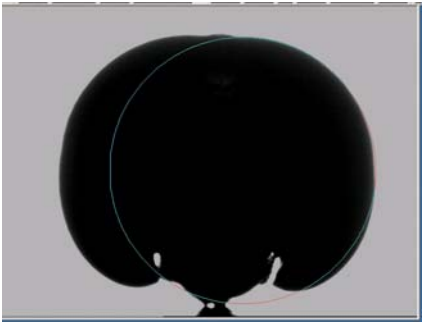
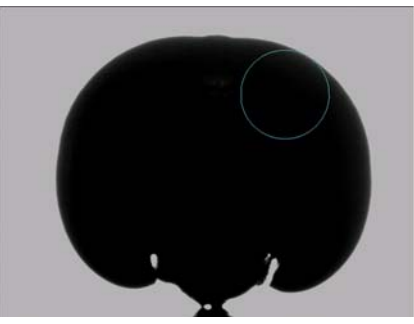
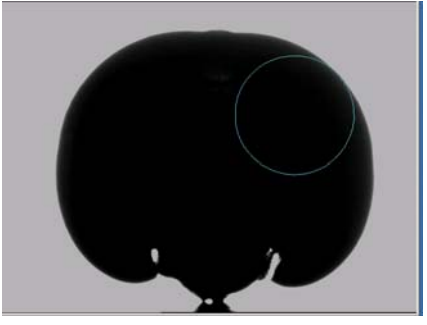
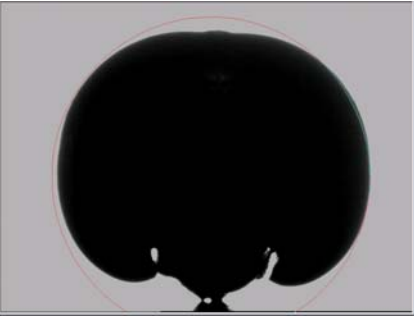
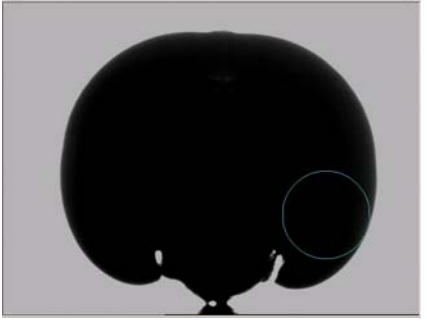
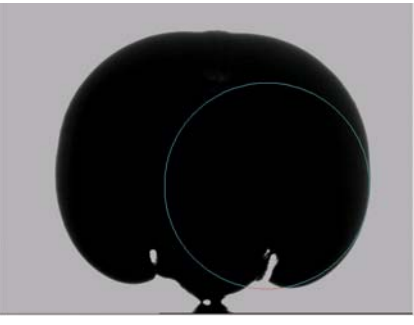
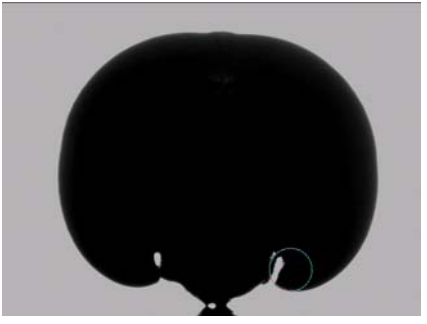
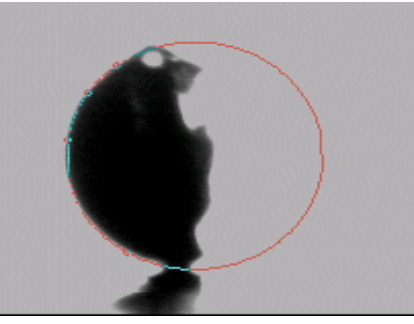
蝴蝶 編號		1	2	3	4	蝴蝶 編號		1	2	3	4
次數	顏色					次數	顏色				
1	紅					6	紅				
	黃						黃				
	綠			V			綠	V			
	藍			V	V		藍	V		V	
	紫		V	V			紫		V	V	
2	紅					7	紅				
	黃		V				黃				
	綠		V				綠				
	藍		V				藍			V	V
	紫						紫		V		
3	紅					8	紅				
	黃						黃				
	綠			V			綠				
	藍		V		V		藍	V		V	
	紫				V		紫			V	
4	紅					9	紅				
	黃	V					黃				
	綠						綠		V		
	藍	V			V		藍				
	紫			V	V		紫			V	
5	紅					10	紅				
	黃						黃				
	綠	V					綠				
	藍	V		V			藍			V	
	紫		V	V			紫			V	

綜合三次的觀察結果，發現蝴蝶對光的敏感度隨波長增加而遞減，從最高排到最低的順序是：紫光、藍光、綠光、黃光、紅光，有文獻記載昆蟲能感受的波長範圍在 300nm(紫外線)~650(黃、澄)nm,大多數的昆蟲無法感受長波長的紅色(奇摩知識網站)，所以我的觀察結果與文獻吻合。

四、昆蟲複眼的視覺遠近功能探討

(一) 使用攝影式接觸分析儀來量測蜻蜓與蝴蝶的眼球曲度之差異。

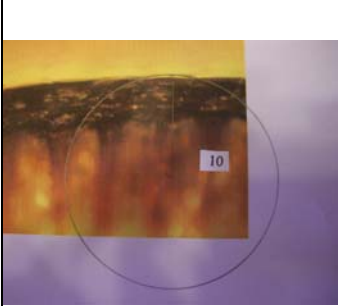
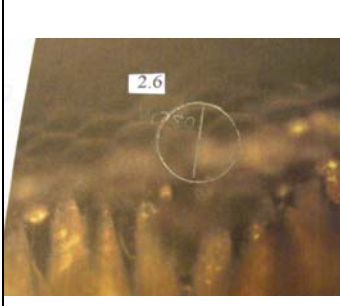
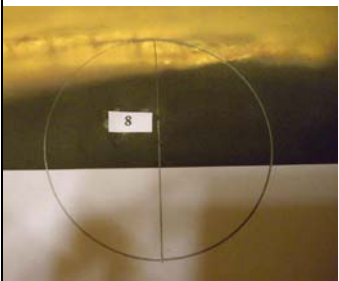
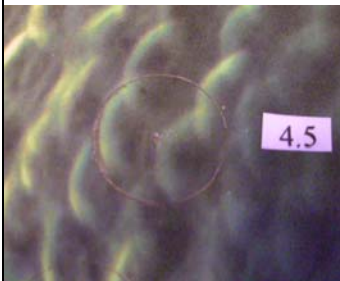
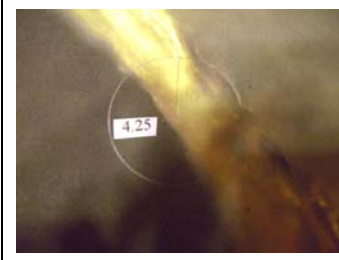
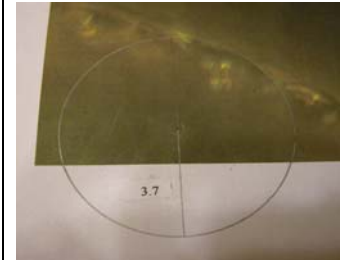

從拍出的圖片，發現蜻蜓複眼的上端、側面及下端有幾個小區域標出來的圓圈較大，也就是弧度特別的小。反觀蝴蝶的複眼是成一個半圓形，所以每一個部份的曲度都一樣，是有不同於蜻蜓的複眼形狀。

	
<p>(圖一) 蜻蜓複眼上端標上三個點，畫出的圓圈較大，表示較平坦。</p>	<p>(圖二) 這張標上三個點，畫出的圓圈比(圖一)小，表示曲度較大。</p>
	
<p>(圖三) 這張標上三個點，畫出的圓圈也比(圖一)小，表示曲度較大。</p>	<p>(圖四) 蜻蜓複眼側面標上三個點，畫出的圓圈較大，表示較平坦。</p>
	
<p>(圖五) 這張標上三個點，畫出的圓圈比(圖六)，表示曲度較大。</p>	<p>(圖六) 蜻蜓複眼下端標上三個點，畫出的圓圈比(圖五)大，表示較平坦。</p>
	
<p>(圖七) 蜻蜓複眼尾端標上三個點，畫出的圓圈較小，表示曲度較大。</p>	<p>(圖八) 蝴蝶的複眼是成一個半圓形，所以每一個部份的曲度都一樣。</p>

薄翅蜻蜓複眼並非如蝴蝶的正半球形，其上部、下部及側面有三個區域較爲平坦，在這平坦面上的小眼又都面向同一個方向，這可能代表在那三個區塊有加強視覺的功效。

(二) 測量昆蟲小眼曲度

薄翅蜻蜓、螢火蟲、蝴蝶、泰國蝦*、沙蝦*及螃蟹(大沙公)* 的複眼曲度測量結果如下：

	
蜻蜓上半部小眼 畫圓求出半徑：10 公分 換算實際半徑：117.6 μ m	蜻蜓下半部小眼 畫圓求出半徑：2.6 公分 換算實際半徑：30.6 μ m
	
沙蝦* 小眼 畫圓求出半徑：8 公分 換算實際半徑：94.1 μ m	泰國蝦* 小眼 畫圓求出半徑：4.5 公分 換算實際半徑：52.9 μ m
	
螃蟹(大沙公)* 小眼 畫圓求出半徑：4.25 公分 換算實際半徑：50 μ m	螢火蟲小眼 畫圓求出半徑：3.7 公分 換算實際半徑：43.5 μ m
	蝴蝶小眼 畫圓求出半徑：2.15 公分 換算實際半徑：25.3 μ m

綜合以上數據，依照凸透鏡的成像原理，曲率愈小焦點愈後面，所以看得愈遠，所以這五種物種的視力從遠排到近的順序為：蜻蜓(上半部小眼)、沙蝦*、泰國蝦*、螃蟹*、螢火蟲、蜻蜓(下半部小眼)、蝴蝶。

物種名稱	蜻蜓(上部)	沙蝦*	泰國蝦*	大沙公*	螢火蟲	蜻蜓(下部)	蝴蝶
小眼半徑(μm)	117.6	94.1	52.9	50.0	43.5	30.6	25.3

蜻蜓因為上下半部的小眼曲率有差異，上半部曲率小，下半部曲率大，所以印證了文獻所說的上部看遠下部看近的說法。

肆、結論與建議

一、蜻蜓複眼的觀察

這次的實驗得知蜻蜓複眼是由數千個以上的小眼排列組合而成，表面上半部是紅色負責看遠，下半部是藍綠色負責看近，對複眼結構的研究以薄翅蜻蜓為樣品，發現複眼由六邊形小眼密集組合而成，不同區域的顏色、角膜、視桿、基層薄膜都清晰可見。

二、比較晝行性與夜行性昆蟲複眼的差異

從文獻資料得知晝行性昆蟲如蜻蜓、蝴蝶、蒼蠅、蚱蜢等昆蟲使用聯立眼，夜行性昆蟲如螢火蟲、夜行蛾、蟋蟀等昆蟲則使用重疊像眼，活動於黑暗環境的昆蟲，因為夜間光源弱，其視桿可以感應臨近幾個小眼折射的光線，以吸收更多的光而產生重覆的影像，只可惜在晝行性與夜行性複眼差異的研究，礙於設備及專業技術，無法看到感受體、視桿及成像區域的不同。

泰國蝦* 與沙蝦* 的小眼是四方行且成像點成排狀緊密相連，不同於其他研究的獨立小眼成像，理論上六邊形結構最密集且適合球狀複眼，而水陸兩棲的大沙公蟹* 正球形複眼卻是由六邊形小眼組成。另外發現蜜蜂小眼間的絨毛組織及角膜和結構體的緊密結合，蚱蜢直條狀排列的小眼，夜行的蛾小眼雖也是六邊形，但中間呈現圓型狀都極為特殊。

*：非昆蟲，為對照組

三、觀察昆蟲對光的反應

綜合三次的觀察數據，發現蝴蝶對光的反應敏感度隨著波長的增加而遞減，由高排到低的順序是：紫光(390nm)、藍光(480nm)、綠光(520nm)、黃光(570nm)、紅光(700nm)，其中對紅光的反應非常差，這與文獻記載昆蟲能感受的波長範圍在 300nm~650nm 吻合，將來季節許可的話，可以增加其他物種的觀察。

四、蜻蜓複眼的視覺遠近功能探討

這次的實驗除了印證了蜻蜓上半部小眼看遠，下半部小眼看近的事實外，依照凸透鏡的成像原理，也推算出下列物種的視力從遠到近的順序為：蜻蜓(上半部小眼)、沙蝦*、泰國蝦*、螃蟹(大沙公)*、螢火蟲、蜻蜓(下半部小眼)、蝴蝶，當然視覺不只與曲率相關，對光感應敏感度、成像清晰度和視覺傳輸都息息相關，所以昆蟲視力的好壞還是值得進一步研究的有趣方向。

這次的研究發現了一些有趣的現象，雖然尚未找到原因，確是我未來可以進一步研究的目標，另外礙於技術與設備的限制，無法對存在於視桿中的液體進一步研究，若這真是視覺的傳導介質，那人類能否將這樣的功能運用到生活中呢？若人類可以人工製造達到昆蟲複眼尺寸的廣角型複合透鏡，並提升其解析度而運用於生活、醫學及軍事上，如監視系統、攝影鏡頭、救難觀測、內視鏡、偵查等，那人類將受益良多。

*：非昆蟲，為對照組

伍、參考資料

- 一、王效岳、John B. Heppner 台灣蜻蜓彩色圖鑑(Guidebook to Dragonflies of Taiwan)
初版 台北 城邦文化事業股份有限公司 p.22 2000
- 二、蔡佰祿 蜻蛉篇 初版 台北 內政部營建署陽明山國家公園管理處 p.14 1997
- 三、關崇智 昆蟲生理學 初版二刷 台北 南山堂出版社 p.430 1991
- 四、科學教育網站 取自：
<http://big5.sedu.org.cn/gate/big5/academy2003.cpst.net.cn/popul/natur/animpl/artic/10603141907.html>
- 五、奇摩知識網站 (民 93 年 12 月 7 日) 昆蟲的複眼和人類眼睛有什麼不同
取自：<http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1004120700211>
- 六、中國科普博覽網站 生命奧秘 察言觀色的複眼與單眼 取自：
http://159.226.2.5:89/gate/big5/www.kepu.net.cn/gb/lives/insect/abc/abc301_01.html

評語

該作品企圖以不同生物的複眼探討影像的形成，有其應用之價值。但作品的目標太過多樣，以致探討問題的深度不足。若能針對特定的問題探討，應該較易有重要的發現。