

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生活與應用科學科

第三名

040814

複眼定位器

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 殷瑤萱 高二 胡萱庭	指導老師： 金佳龍 馮愛蓮
-------------------------	---------------------

關鍵詞：偏振光、偏光天文羅盤、昆蟲複眼

複眼定位器

摘要

蜜蜂複眼具有偏光天文羅盤的功能，他們即使沒有直接看見太陽，但只要看見一部分的天空，就可以知道方向。本實驗探討蜜蜂偏光定位的原理及構造，並了解昆蟲複眼偏光定位的運作機制，透過模擬且簡化蜜蜂小眼的構造，製作昆蟲複眼定位器，且實際至戶外操作測量天空偏振樣式，計算出太陽方位，藉此可作各種太陽定位運用。此複眼定位器因為是利用天空的偏振樣式定位，不會受到天氣狀況影響，即使看不到太陽，依然可以找到太陽方向，可應用在太陽定位的技術上。且不是利用地磁定位，因此可用於航空或航海方面。

壹、研究動機

昆蟲可以直接觀看太陽光來定位，但有些昆蟲在陰天、沒有太陽的時候卻依然可以找到方向，我們發現蜜蜂複眼的構造可接收偏光，並利用偏光來定位。古代維京人也已經知道利用水晶的雙折射性質得知太陽位置。本實驗以仿生學角度利用蜜蜂小眼接收偏光的方式製作複眼定位器，並設計實驗。

貳、研究目的

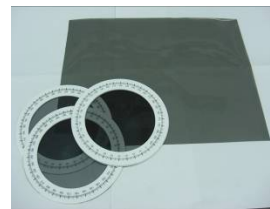
- 一、探討蜜蜂如何接收偏光及其定位機制
- 二、模擬蜜蜂小眼構造製作複眼定位器
- 三、設計複眼定位器之定位系統
- 四、實際應用複眼定位器於生活中

參、研究設備

- 一、光譜儀
- 二、光纖管
- 三、偏振片
- 四、自製導光管
- 五、單眼相機
- 六、白熾燈泡
- 七、Moticam
- 八、腳架



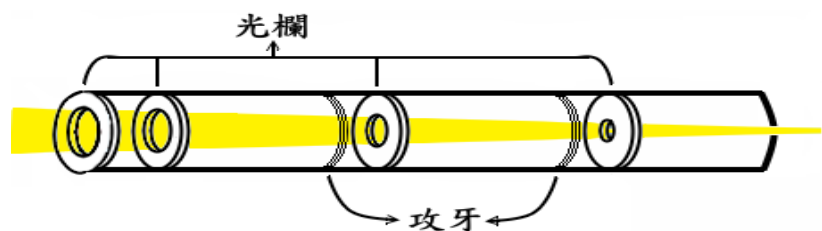
圖(1)光譜儀、光纖管



圖(2)偏振片



圖(3)Moticam



圖(4)自製導光管

肆、研究過程及方法

一、理論探討

(一)偏光定位

1.非偏振光：自然光的電磁場是向四面八方散射，為各方向性，光波的振動各方向機會均等，不出現偏光面。

2.偏振光：偏振光的電磁場有特殊方向性。非偏振光通過一片人造偏振片時，可濾掉其中 50%的偏振光，只有電場方向平行於偏振片之光波才能通過，故光強度減半。

3.偏振度：光波在某個方向上振動會最強，此時光強度會最大，稱為為 I_{MAX} ，而在其垂直方向上的光強度會最

小，稱為 I_{min} ，則此光波的百分偏振度為

$$P = \frac{I_{MAX} - I_{min}}{I_{MAX} + I_{min}} \times 100\% \dots\dots(1)$$

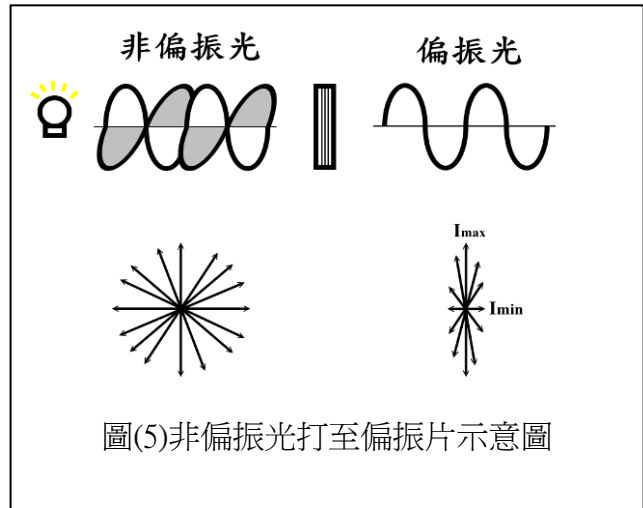
4.瑞利散射：

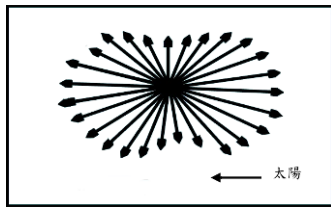
(1)半徑比光波長小很多的微粒對入射光的散射現象。瑞利散射光的光強度與方向有關，空氣分子散射之總能量與入射光波長的四次方成反比。

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{R^2 \lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) \dots\dots(2)$$

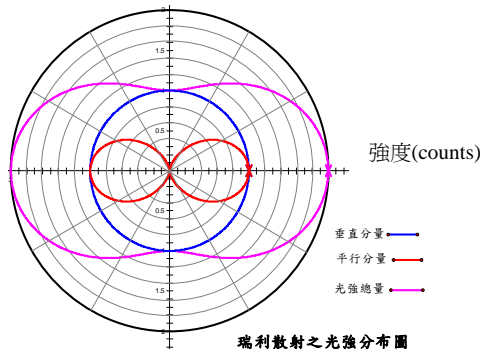
(2)上式(2)中 I 與 I_0 分別代表入射與散射光強度， R 為散射分子與觀察者距離， N 為散射分子密度，而 α 與散射氣體分子形狀及折射率有關。

(3)利用公式(2)計算出各個散射角度之光強並將光強度拆為垂直與水平兩分量，並投影在平面上，畫出瑞利散射光強度分布，並利用此圖計算出各點之偏振度。

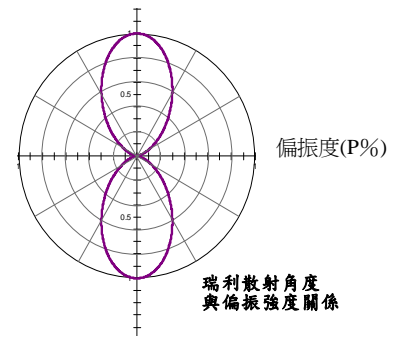




圖(6)瑞利散射光分子
散射形狀

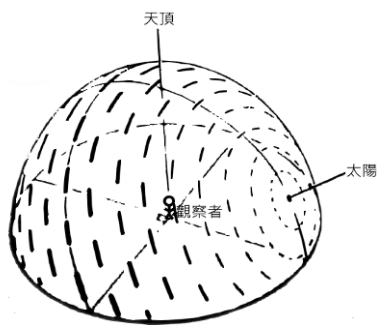


圖(7)瑞利散射光強分佈

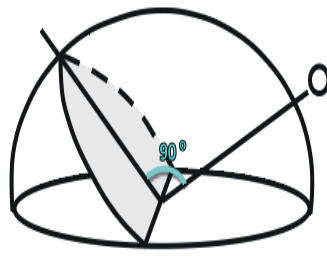


圖(8)散射角度與偏振度關係

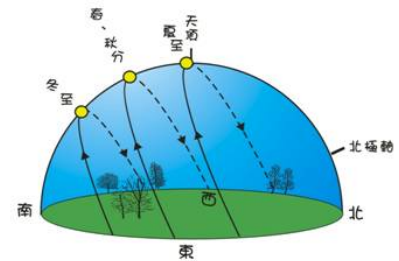
- 5.由圖(7)可知，不同角度的光強度分量不相同，因此計算出的偏振度也會不同。
- 6.圖(8)為結合公式(1)和(2)後所畫出的圖形，各角度的偏振度大小變化圖。
- 7.太陽光本身為非偏振光，當太陽光打至大氣層後會發生瑞利散射，而產生偏振效果。
- 8.太陽與天空分別至觀測者間的夾角相同者在天球中會形成一圓，由於角度相同，同一圈圓上的各個點偏振度也相同。而天空中的偏振樣式會以太陽為中心，在天球上描繪出同心圓，而偏振度在與太陽呈 90 度之天空時最強。



圖(9)太陽偏光樣式圖



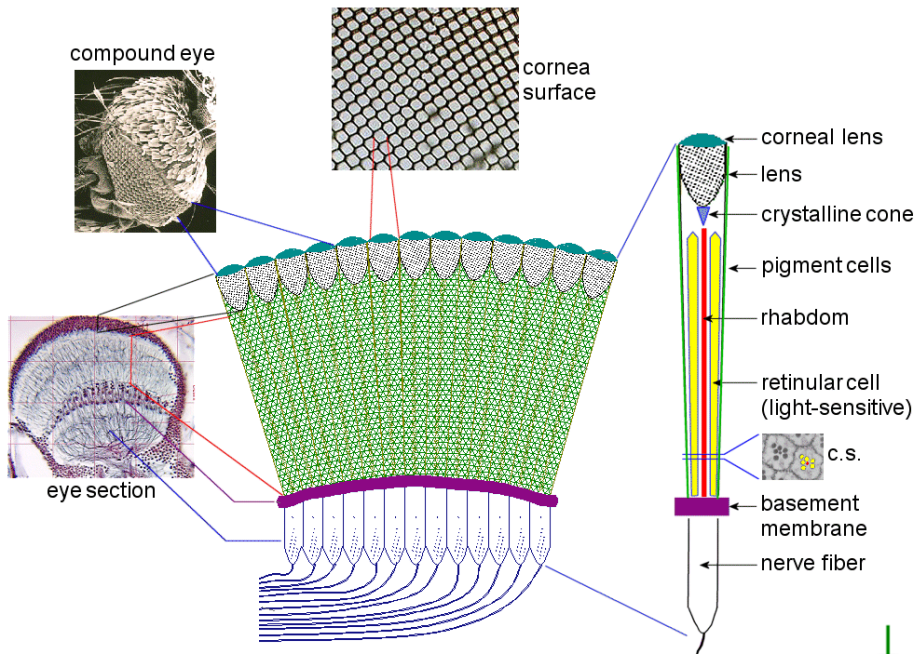
圖(10)太陽光角度示意圖



圖(11)太陽光位置示意圖

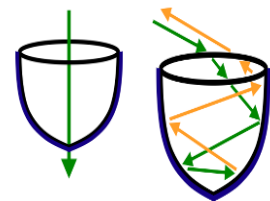
(二)複眼構造與機制

- 1.昆蟲複眼由多個六角形小眼組合而成，不同種昆蟲複眼中的小眼數目及大小皆不同，複眼本身的形狀亦不同。
- 2.昆蟲複眼內部各小眼間被色素區隔開來，避免進入各小眼的光線不會再進入相鄰的小眼，會依各種不同昆蟲而有不同顏色的色素。



圖(12)昆蟲複眼結構圖

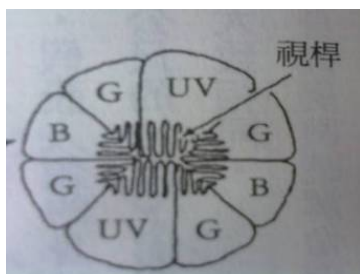
3.複眼中各小眼前端為水晶體，只有垂直入射的光才會穿透此晶體部分，進入視細胞層，其他方向進入的光則會被反射出去或被色素層吸收。



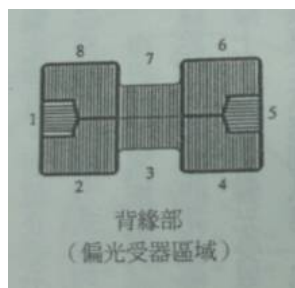
圖(13)光打至水晶體

4.小眼中視細胞層為八至九個感光細胞(又稱為視細胞)所圍成，如圖(14)所示，UV、G、B 分別代表紫外光、綠光及藍光感光細胞。其中每個感光細胞面向中心側的細胞膜會凸起形成微絨毛，這些微絨毛合稱為視桿(又稱為視官柱體)。

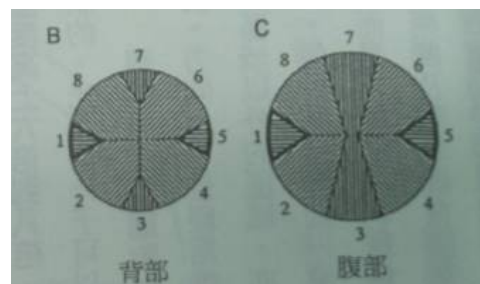
5.在複眼不同區域的小眼，微絨毛排列方式不同，大多數小眼中的微絨毛呈向心狀排列，其中沙漠螞蟻及蜜蜂等昆蟲複眼背緣部位的小眼特化為偏光受器區，此區域的微絨毛互相垂直排列如圖(15)，昆蟲會用此區域接收不同振動方向的光波，進而分析偏振光強弱。而其他區域的微絨毛排列則如圖(16)，並非成直角，因此不易用來檢測偏振光。



圖(14)視桿剖面圖



圖(15)微絨毛排列圖

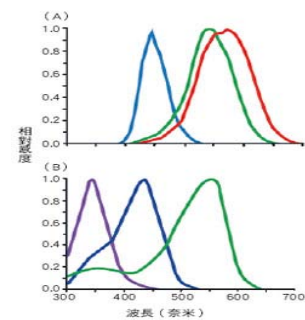


圖(16)微絨毛排列圖

- 6.背緣部位的一個小眼只能接收到單一方向天空的光，在光入射至微絨毛時，橫向與直向排列的微絨毛會分別接收光的最大值與最小值，經過這兩者的比對，即可知道該方向天空的偏振度。
- 7.昆蟲無法只用單一小眼判別方向，它需要利用整個被緣部位多個小眼同時測量天空中的偏振度，經由天空偏光樣式的比對，即可得知太陽位置。
- 8.太陽羅盤：大部分的昆蟲皆是利用此種方式定位。太陽的位置時時刻刻都在改變，但昆蟲可記得每一天每一刻太陽的位置，藉由察看太陽的角度，來確定方向，有此種功能的昆蟲，大多有相當準確的生理時鐘。但是使用太陽羅盤必須在可以看見太陽的時候，所以陰天時不適合使用。
- 9.偏光羅盤：利用太陽光穿透大氣層所造成特定的偏光樣式來決定方向。蜜蜂和沙漠螞蟻即使沒有直接看見太陽，但只要看見天空中的偏光樣式，就可以知道方向。太陽從升起落到下的期間，偏光樣式時時刻刻都在改變，但即使偏光樣式改變，天空的偏光仍會有特定的規律。所以蜜蜂、螞蟻不論在陰天或晴天時都可以準確地判斷出方向。

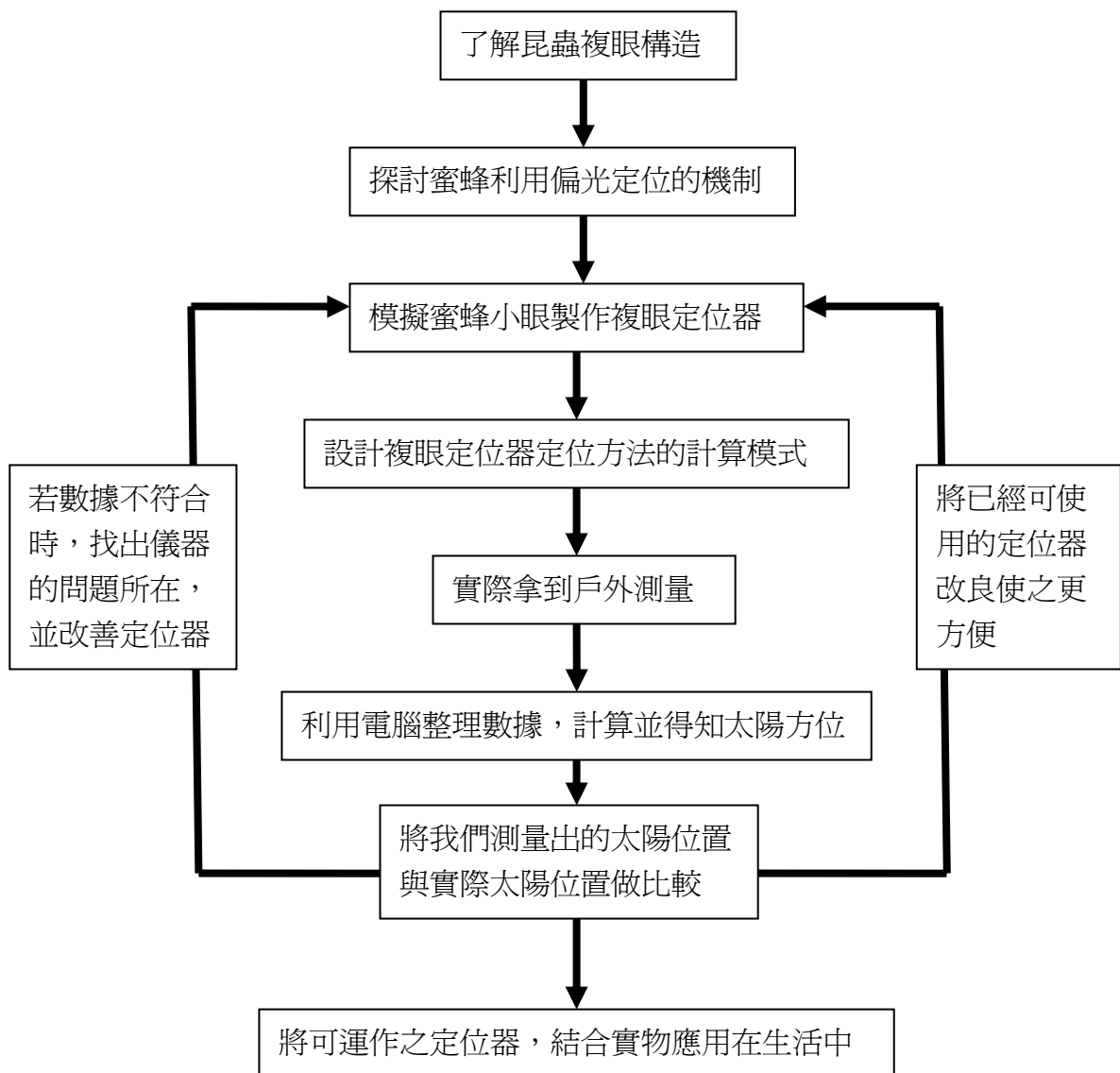
10.蜜蜂與人的光譜感度比較：

- (1).蜜蜂最敏感波長為 335nm、435nm、540nm
- (2).人類最敏感波長為 419nm、531nm、558nm



圖(17)昆蟲與人類
光譜感度

二、實驗流程圖



三、昆蟲複眼定位器製作

(一)複眼構造探討

- 1.於學校找尋已死的蜜蜂屍體(分成胡蜂科體型較大者，以及蜜蜂科體型較小者兩種)。
- 2.將取下的蜜蜂複眼晶體泡至溫水中，予以軟化。
- 3.用鑷子及衛生紙清除複眼內部的色素以利觀看。
- 4.因為本實驗是將晶體部份取下，而晶體是由幾丁質組成，並不會因生物的存活而影響其性質。

(二)探討複眼晶體是否有偏光片之效能

- 1.將前項實驗已清除好之晶體放置於顯微鏡下。
- 2.透過顯微鏡觀察複眼晶體，在顯微鏡上的燈源處加上一片偏振片，使其打出來的光為偏振光，旋轉偏振片，觀察此複眼是否具有偏振性。
- 3.利用 Moticam 接收圖像，並比對複眼單一小眼之亮度變化。



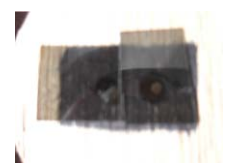
圖(18)實驗裝置圖

(三)導光管的製作

- 1.利用水管製作導光管，並將頭尾攻牙，以利組裝。
- 2.將導光管內外皆塗黑並於內部黏貼黑色毛毯避免光的反射與漫射。
- 3.由前項實驗的結果得知，晶體不會影響光的偏振性質，所以可以簡略晶體部分。
- 4.雷射切割壓克力板，製作三個由大到小的環形光欄於管內，藉此聚光。
- 5.利用相機測量並計算自製導光管的視角。

(四)微絨毛

為了模擬昆蟲複眼背緣部位小眼內部的微絨毛，剪下兩片偏振片，以互相垂直方式黏貼，以接收兩種不同方向振動的光強。



圖(19)偏光片黏貼示意圖

(五)角架

爲了使我們能測量到的天空方向固定，且可以任意旋轉方位角及仰角，在導光管下方接上角架固定，並裝上量角器，量測仰角，裝上自製大型方位盤，量測方位角。

(六) 接收訊號

在兩片互相垂直之偏振片後方分別接上兩條光纖管，在接上兩台光譜儀連接電腦讀取光強度訊號值。

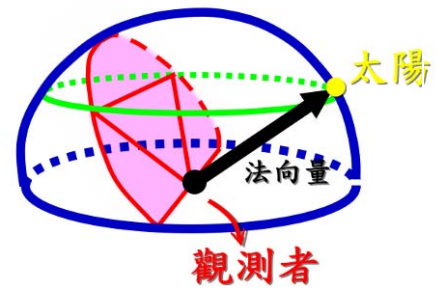
四、複眼定位器之測量與應用

(一) 實驗過程：

- 1.利用 SpectraSuite 程式之秒差校準兩台光譜儀，使兩條光譜相同。
- 2.將定位器拿到戶外測量天空偏振度。
- 3.固定仰角，方位角以北爲 0 度，向東爲正，每轉 30 度測一次數據。
- 4.讀取兩台光譜儀偵測到波長爲固定之強度值。
- 5.利用兩台光譜儀偵測到強度最大與最小的光強度計算出各方向的偏振度。
- 6.測完一圈後，會得到兩個偏振度極大值，並藉此兩點推算太陽位置。
- 7.利用天體位置自動顯示器可得知太陽的實際位置。
- 8.將測量到的太陽位置與實際位置畫在天體半球投射圖上。
- 9.比較量測到的太陽位置與實際位置的仰角誤差及方位角誤差。
- 10.拍攝每次作實驗時天空狀況的照片，比較雲層厚度是否會影響。

(二)太陽位置算法

- 1.以觀測者為座標(0,0,0)為球心,繪製出一個天體半球模型。
- 2.綠色的圓為利用複眼定位器環繞一圈後所測出來的數值。
- 3.紅色的半圓為與太陽呈 90 度偏振度最大的平面。
- 4.將綠色圓與紅色半圓相切的兩個點座標化。
- 5.可用上述三點(兩極大值與觀測者)製成一粉紅色的平面。
- 6.太陽方向即為此平面之法向量。
- 7.再經由角度換算,可得知太陽的方位角及仰角。
- 8.最後以天頂為圓心,仰角每 15 度畫一個同心圓,繪製天體半球投射圖來表示天空狀態。
(請參考結果)



圖(20)平面法向量
計算示意圖

(三)實際太陽位置

- 1.利用天體位置自動顯示器輸入時間、地點。
- 2.選取太陽為基準點。
- 3.此時的地平坐標即為太陽的方位。

觀測日期	時間設定選項	2004	年	1	時
	<input checked="" type="radio"/> 自動設定	1	月	5	分
	<input type="radio"/> 時間輸入	31	日	48	秒
觀測座標	快速選單	地理經度	地理緯度		
	台北	121	25		
	時差	31	4		
	自動選擇	37	40		
工作選項	太陽	赤經	20 h 50 m 22 s		
		赤緯	-17 ° 42 ' 10 "		
儒略日	2453035.2131439	地方恆星時	9 h 49 m 2 s		
黃道座標	+310 ° 8 ' 43 "	+0 ° 0 ' 0 "			
赤道座標	20 h 50 m 22 s	-17 ° 42 ' 10 "			
地平座標	+64 ° 28 ' 6 "	方位	-74 ° 29 ' 47 "	仰角	

天文計算實驗室 <http://www.kimo.com.tw/shpao5824/>
Copyright Reserved

圖(21)體位置自動顯示器

五、改良實驗儀器

(一)替代光譜儀

- 1.使用相機取代光譜儀接收訊號，因為光譜儀價格昂貴，一般人不易取得，相較之下相機為一般人都有的物品，且可以同時接收多方向的光。
- 2.使用單眼相機可固定相機參數：光圈、快門、焦距、ISO 值，使每次拍攝到照片的相機進光量固定。
- 3.將拍攝到的照片利用 PhotoImpact 處理並分析數據。
- 4.後來改用 Image J 程式讀取照片資料，較 PhotoImpact 準確。

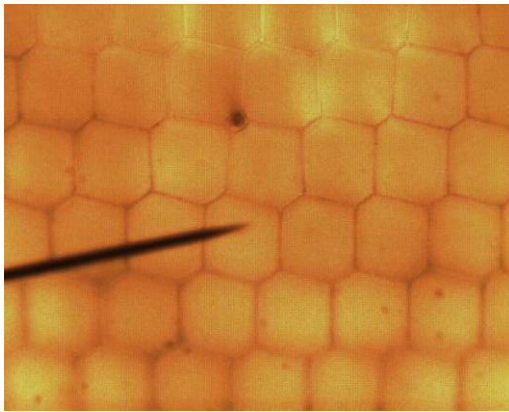
(二)改良導光管

- 1.改用粗吸管取代水管自製導光管。
- 2.在吸管的內部黏貼黑色宣紙模擬色素層。
- 3.利用相機計算視角後，得知，本實驗所使用的單眼相機每次拍攝照片時可接收四個相夾 10 度的導光管。
- 4.經由計算過後製作兩片不同大小的圓板(直徑分別為 7、10 公分)，在直徑上割上四個圓形小孔，使吸管能剛好卡住，且兩片中四個圓孔間距不同，可固定導光管的角度。
- 5.利用黑色厚紙板製作光罩，可接在相機上，也能使四個導光管固定在相機前方。

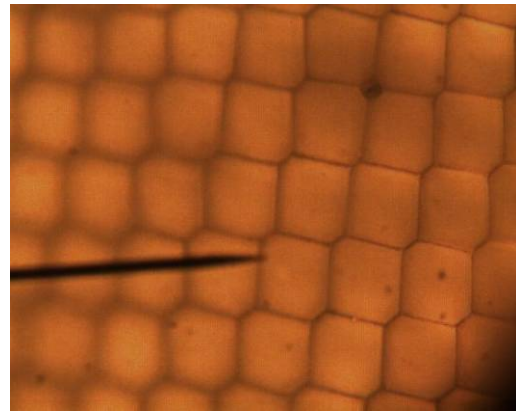
伍、研究結果及討論

一、昆蟲複眼定位器製作

(一)探討複眼睫膜晶體部分是否有偏光片之效能



圖(22)顯微鏡下的複眼圖

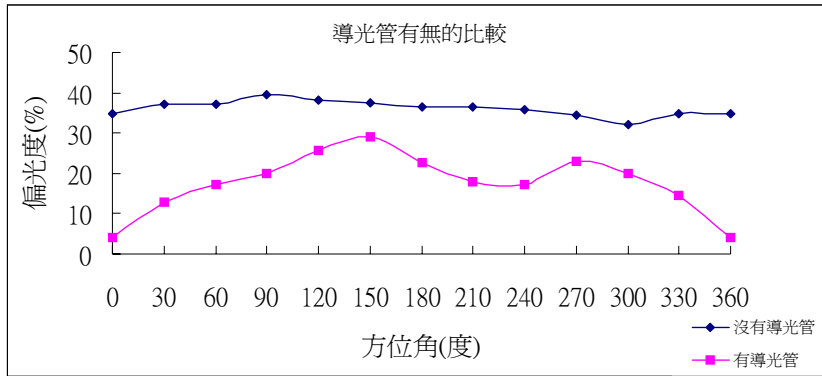


圖(23)加上偏光片的顯微鏡下的複眼圖

- 1.由圖(22)、(23)可看出晶體部分在被偏光與非偏光照射時，旋轉偏振片後每個小眼並沒有亮暗差異，而圖(23)會比較暗是因為加上偏振片，會濾掉某個方向的光，所以光強度會減弱，但其中每個小眼由肉眼和光譜儀檢測，並沒有明顯的亮暗差異，所以可推測複眼晶體不是蜜蜂判別偏振光的構造。

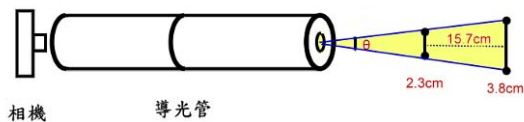
2. 因為取下來的複眼晶體很小，導致不易測量，於是我們拿了同樣為幾丁質成分的蝦殼檢測，利用光譜儀測量光強度的變化，結果發現，蝦殼也沒有偏振性。
3. 幾丁質應該不是昆蟲判別偏振光的主因，但複眼晶體仍有聚光功效。

(二) 導光管的製作

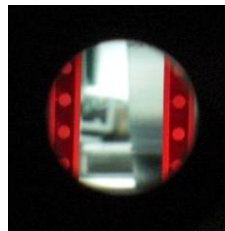


圖(24)有無導光管比較

1. 由圖(24)得知加上導光管測到的天空偏振度變化較沒有導光管時明顯。
2. 因為加上導光管使得只有單一放向的光進入到光譜儀，所以不受其他方向影響。
3. 由圖(25)可計算出導光管視角約為 5 度。



圖(25)導光管視角實驗



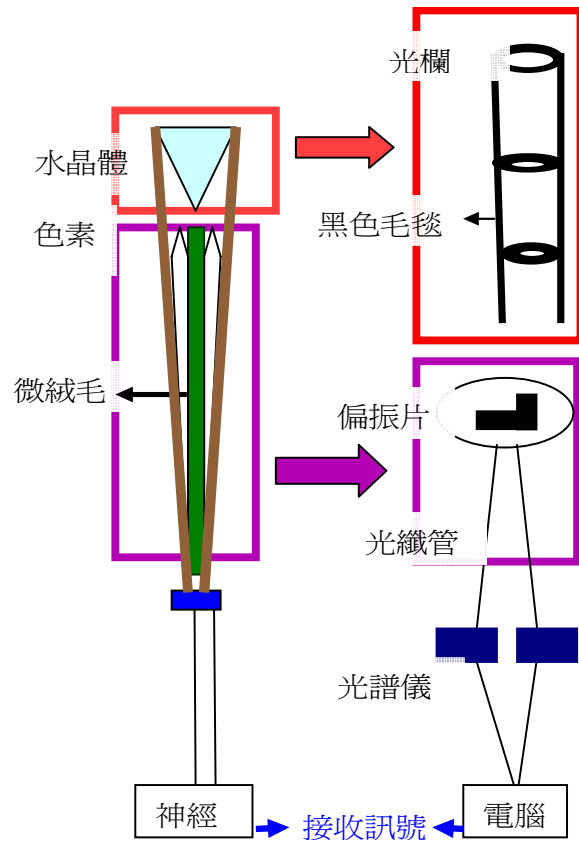
圖(26)相機拍攝導光管視角實驗圖



圖(27)複眼定位器

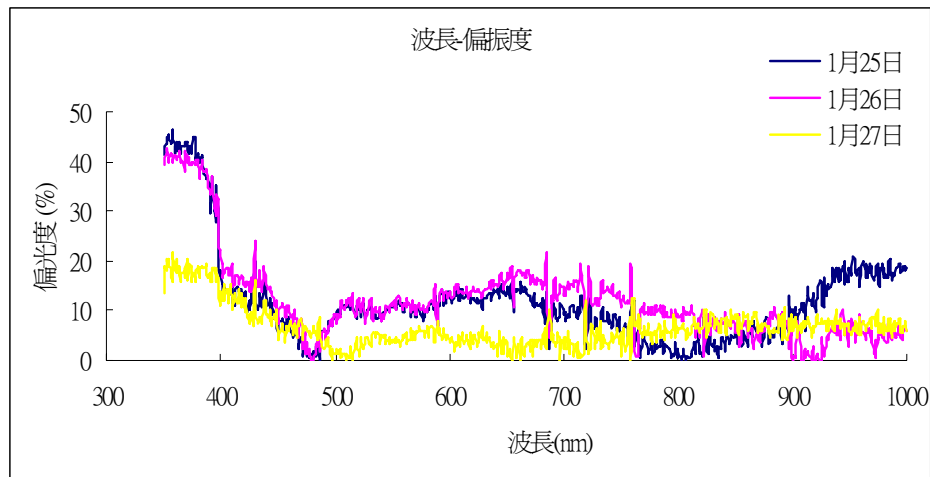
(三)複眼定位器與蜜蜂小眼之比較

- 1.導光管模擬小眼晶體，具有聚光、且只接收單一方向的光。
- 2.在導光管周圍黏貼黑色毛毯模擬複眼色素層。
- 3.黏貼兩片互相垂直的偏振片模擬複眼微絨毛排列。



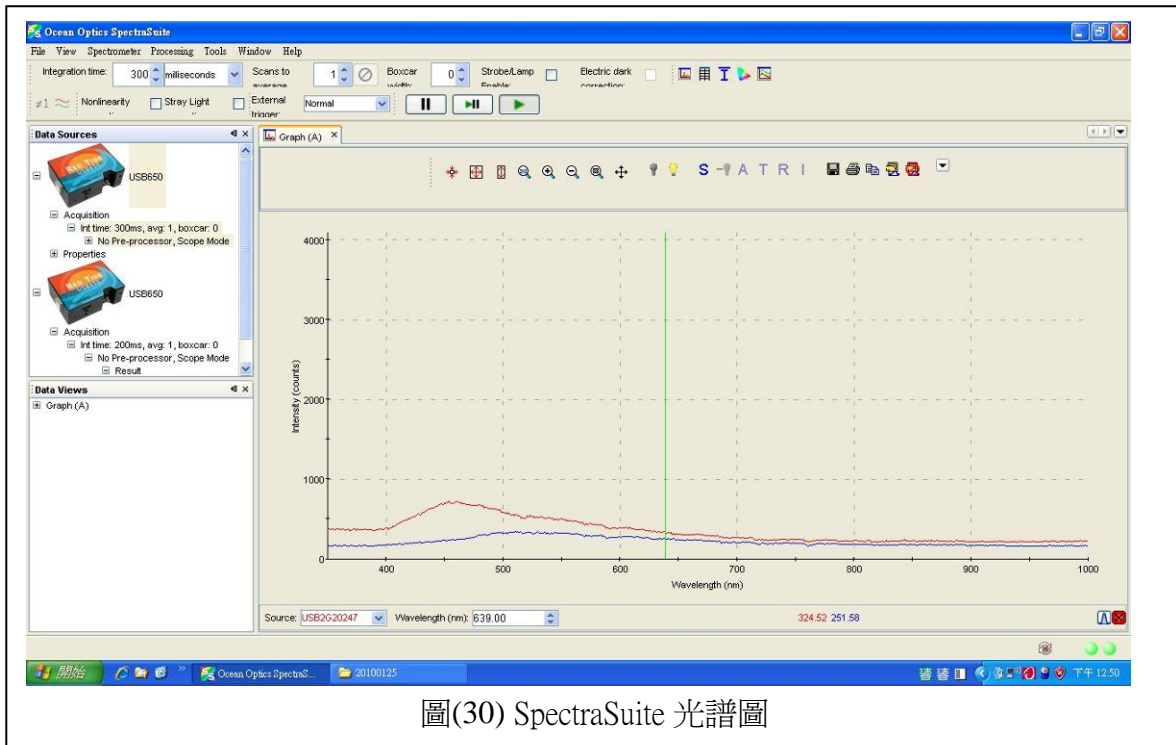
圖(28)模擬器與小眼對照圖

二、模擬複眼偏光定位實驗



圖(29)波長與偏振度趨勢圖

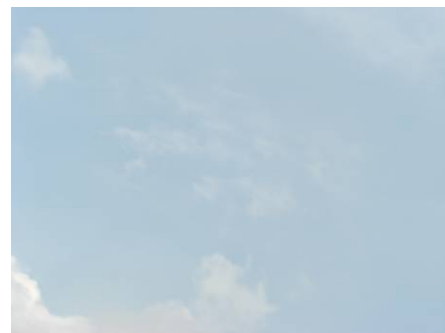
- 1.天空中的偏振度趨勢會因當時天空雲層狀況不同而改變，且不同天也會有不同的情況，但偏振度最大的地方由圖(29)可知皆介於圖中兩綠色線段，而也恰巧為昆蟲敏感光波段(350~510nm 之間)，推測蜜蜂對偏振光較人類敏感。



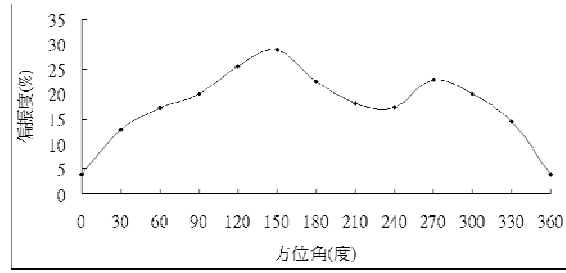
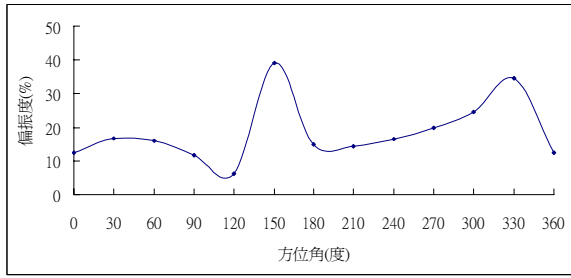
圖(30) SpectraSuite 光譜圖

表(1)方位角與光強大小偏振度計算表

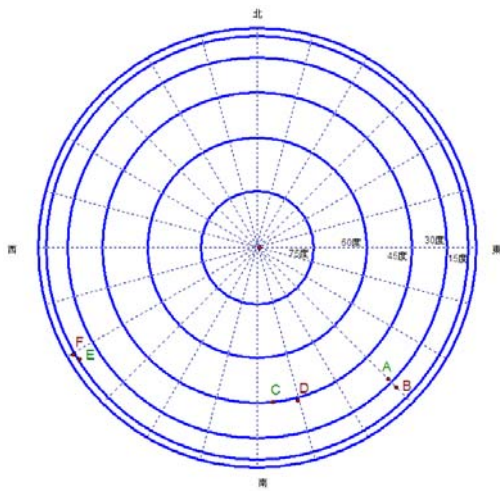
方位角 (度)	I_{MAX} (counts)	I_{min} (counts)	P(%)
0	830.48	501.26	24.72
30	898.94	449.23	33.35
60	938.72	482.90	32.06
90	1120.47	695.60	23.39
120	2154.45	1684.19	12.25
150	1341.36	164.64	78.13
180	4047.82	2193.72	29.70
210	4032.45	2238.76	28.60
240	4084.81	2060.06	32.95
270	1774.83	764.05	39.81
300	1524.50	517.92	49.28
330	666.42	122.04	69.04
360	830.48	501.26	24.72



圖(31)將每次實驗當天的天氣狀況用相機拍攝

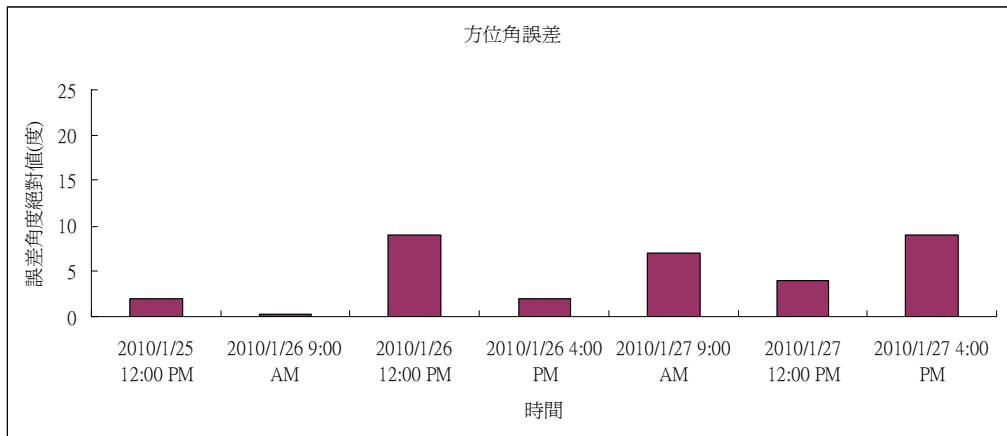


圖(32)方位角與偏振度關係圖

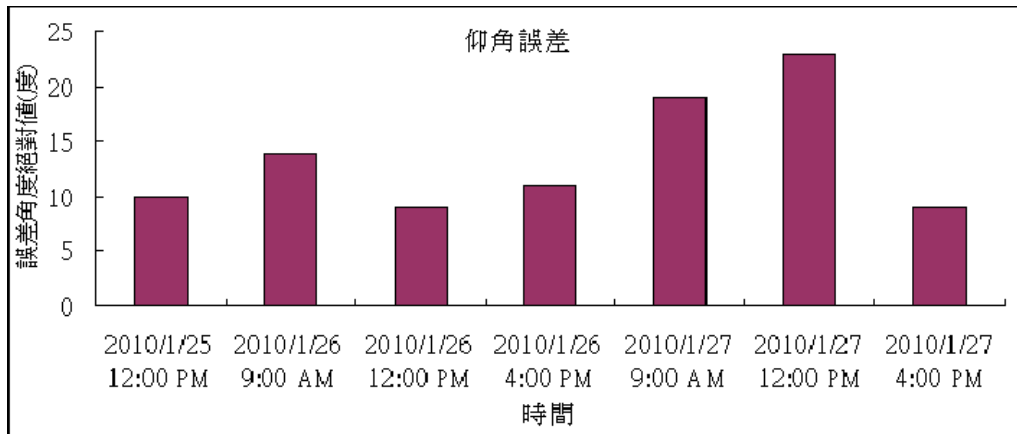


- A 10:00 實際太陽位置
仰角：32度 方位角：135度
- B 10:00 複眼定位器
仰角：26度 方位角：135度
- C 12:00 實際太陽位置
仰角：45度 方位角：174度
- D 12:00 複眼定位器
仰角：44度 方位角：165度
- E 16:00 實際太陽位置
仰角：17度 方位角：238度
- F 16:00 複眼定位器
仰角：14度 方位角：240度

圖(33)某日天空狀態—天體半球投射圖



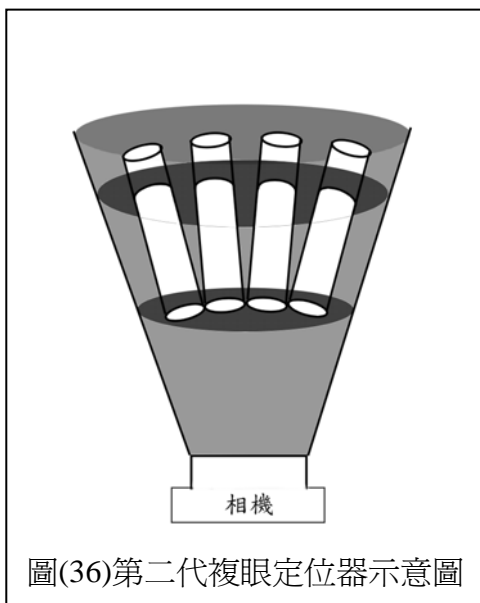
圖(34)方位角誤差

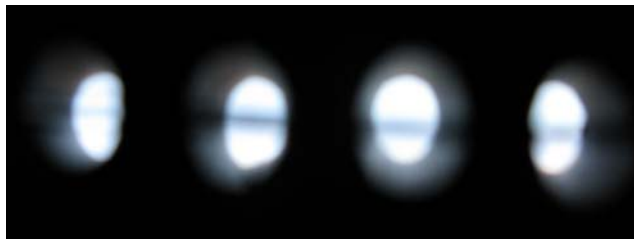


圖(35)仰角誤差

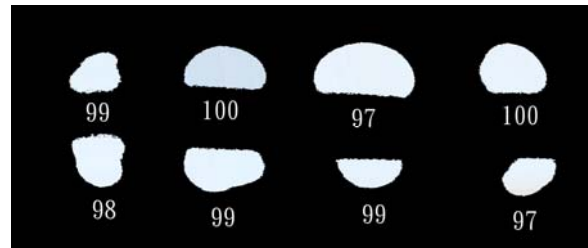
- 2.環繞 360 度後，將各方位角與偏振度之關係製成如上表(表 1)，並製成圖(如圖 34)，將兩個最大值的偏振度之方位角與仰角，利用三點法計算出太陽位置。
- 3.將實際太陽位置與複眼定位器計算出之位置繪於天體半球投射圖上(如圖 35)，並分別比較仰角誤差與方位角誤差並製作如圖 34、35，以確認精準度。
- 4.每日的雲量厚度不同，天空偏振樣式不一定會依照理論值之變化，但仍然可以找出兩個偏振度的最大值，且依然可計算出正確的太陽位置。

三、改良實驗儀器

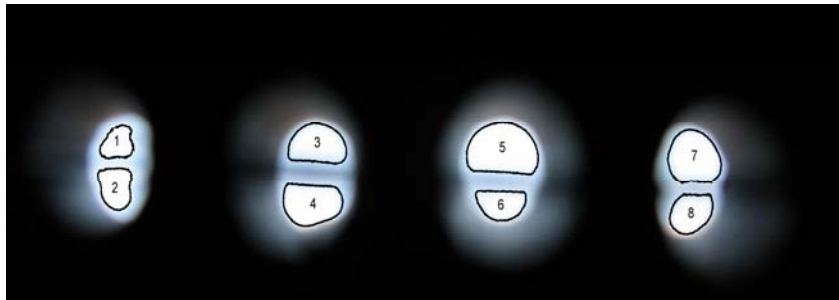




圖(38)相機拍攝天空圖



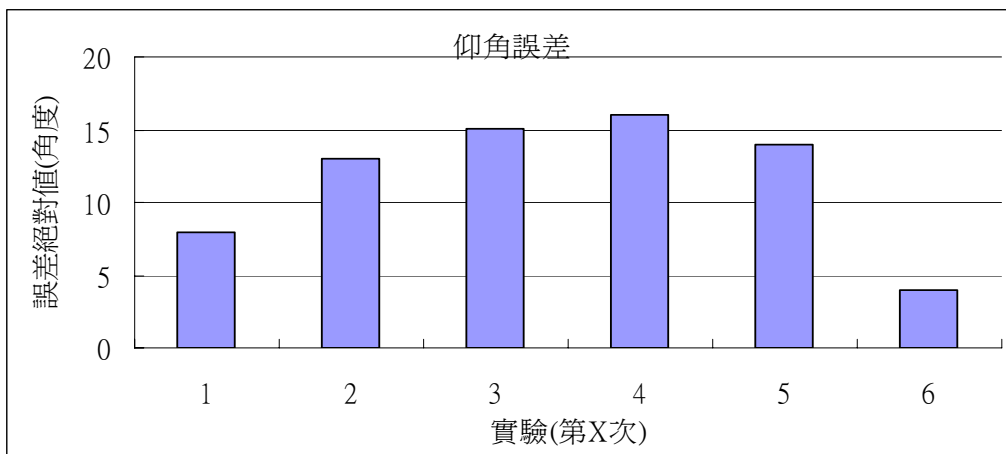
圖(39)利用 PohtoImpact 處理過後之數據圖



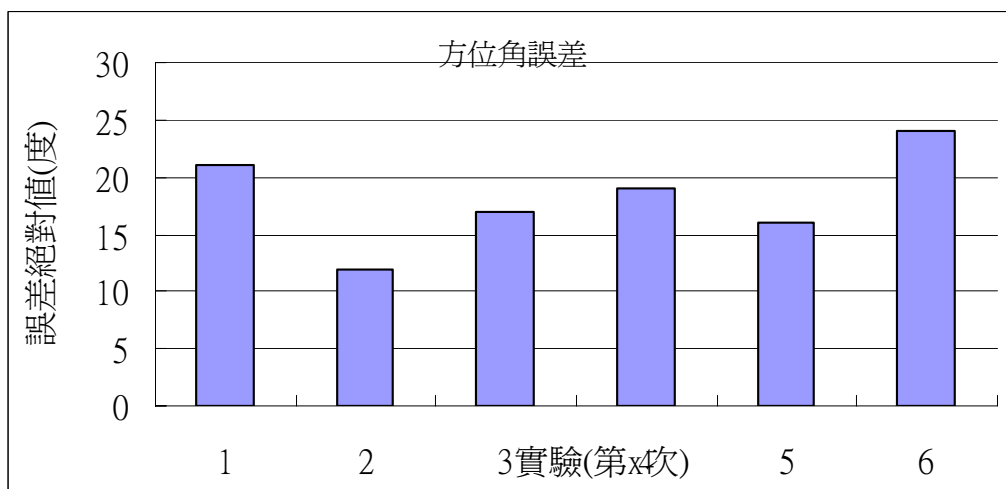
圖(40)改用 Image J 處理後之狀態

表(2) 圖(40)各點數據

	光強度		光強度
1	240	2	245
3	220	4	230
5	232	6	228
7	218	8	220



圖(41)第二代複眼定位器之仰角誤差



圖(42)第二代複眼定位器之方位角誤差

- 1.固定相機參數，使每次拍攝到照片的進光量相同，不會因為儀器而影響數據。
- 2.將複眼定位器測量到的天空範圍模擬於天體半球上，仰角固定，方位角每 30 度一個點，會形成一圓，如圖(37)。
- 3.使用相機較原來使用的光譜儀測量較不精準，因為相機的感光度比光譜儀弱。
- 4.原先使用 PhotoImpact 計算照片各處光強度值，但由於此程式只將光強分為 1~100 等級，範圍較小，使我們所拍出來照片各處光強度變化不大。
- 5.改用 Image J 計算各處光強度值，此程式將光強分為 1~255 較 PhotoImpact 精密。
- 6.改用相機代替光譜儀測量後，儀器也可運作，但在使用軟體部份會比光譜儀有更多的人為誤差，且光譜儀精密度較高，目前我們仍在找尋適當的程式來分析照片。

陸、結論

- 一、經由探討，了解蜜蜂是利用複眼背緣部位中互相垂直的微絨毛來判別天空中的偏振度，進而知道方位。
- 二、本實驗模擬蜜蜂小眼構造，製作複眼定位器，並實際拿至戶外測量，已確認可實際使用。
- 三、本實驗研究出一套計算太陽位置的方式，可實際應用於我們製作的複眼定位器上。
- 四、複眼定位器是利用太陽偏光定位，不需要利用地磁定位，可應用於各項定位技術上。

柒、未來展望

- 一、改良目前所做的複眼定位器，模擬昆蟲複眼的背緣部位，利用吸管製作多個小型導光管，即可利用多個小眼同時進行比對，使定位出的方位更精準。
- 二、結合太陽能板與複眼定位器，定位出太陽位置，使太陽能板隨著太陽的位置轉動，增加太陽能板的效能。
- 三、利用昆蟲對偏光敏感的特性，製作防蟲用品(如防蟲偏光燈)。

捌、參考資料

- 一、水波-誠 (2008)。探索昆蟲微小腦 一版 台北縣:世茂。
- 二、薛宇捷、陸智瑄、呂俊漢、陳勝崎(2009)。昆蟲複眼對光敏感度之光學分析 12。
- 三、陳冠樺、林震豪(2005)。大氣層厚度光學測量法之研究及創新 32。
- 四、黃上銓(2005)。一線曙光是昆蟲的逃生契機或死亡陷阱。
- 五、Thomas Labhart 、Eric P Meyer(1999)。 Detectors for Polarized Skylight in Insects: A Survey of Ommatidial Specializations in the Dorsal Rim Area of the Compound Eye。 11
- 六、Michael F. Land(1977)。 Visual acuity insects Annu Rev Entomol。 31
- 七、HALLIDAY RESNICK WALKER(2003)。 Fundamentals of PHYSICS 第六版 (34-12~4-16 頁)
台北市:全華科技
- 八、POLARIZATION.NET Polarized Light in Nature and Technology。 Form:
<http://www.polarization.com/index-net/index.html>

【評語】 040814

本作品基於仿生學的角度，利用蜜蜂複眼及偏光接收之機制，實現太陽定位之光學架設。作品之架構簡潔有效，並經實地測試，值得肯定。進一步思考自然界中偏光之現象與偏光之量測，可做為未來進一步之發展。