

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

佳作

080112

複眼「視」界不複雜

學校名稱：國立臺南大學附設實驗國民小學

作者： 小五 吳柏儒	指導老師： 林士揚 蔡岱芬
---------------	---------------------

關鍵詞：複眼、光學、仿生

摘要

科學報導提出蒼蠅的視覺會被斑馬條紋擾亂，生活中也發現打蒼蠅時蒼蠅總會先一步飛走，我很好奇蒼蠅用複眼看到的世界，於是動手製作透明複眼模，但每顆複眼小眼太大顆且相連處有空隙，無法模擬複眼看到影像，所以改用投影機專用複眼鏡片來實驗。首先模擬蒼蠅複眼看到的斑馬影像，並計算斑馬外觀所佔整體複眼影像中的複眼顆粒數量比例，發現蒼蠅飛近斑馬影像越來越大時，複眼看到斑馬外觀所佔的比例越來越低，此導致斑馬條紋會擾亂整體複眼的影像。而透過複眼鏡片觀察節拍器上手掌的前後和左右運動，結果發現在動態成像中複眼比人眼靈敏，而兩個複眼鏡片疊加形成的莫列條紋，在轉動 20 度與 40 度疊加時靈敏度最高。複眼真是大自然演化的精心傑作。

壹、研究動機

我常常看到蒼蠅停在食物上，靜靜地觀察蒼蠅的樣子發現牠有兩顆又圓又大的複眼，某次我看到一篇科學報導，提到蒼蠅的視力會因為斑馬的條紋而擾亂，所以靠近斑馬會直接撞上飛走，無法在斑馬身上停留，這篇報導讓我好奇蒼蠅用複眼看到的世界，為什麼接近斑馬時蒼蠅的視覺會頭昏眼花？

昆蟲的複眼是由許多小眼所組成，是否每個小眼都能聚焦看到獨立的影像？如果是這樣那約有 4000 顆小眼的蒼蠅複眼，其看到的世界就會有 4000 個重複同樣的畫面，那真是一幅不可思議的奇特影象；又或者複眼小眼並沒有聚焦的功能，只能接收到光通過與否，每個小眼只能看到全部大影像的一小點部分，透過 4000 個小眼的小影像才能組成一個大影像呢？關於複眼看到的世界充滿著想像空間，令我深深感到好奇。

另外，每次打蒼蠅總會發現蒼蠅先一步飛走，蒼蠅的複眼是不是對於移動的物體比較敏感？可以幫助牠們在大自然中偵測天敵的接近並逃跑呢？還有某次我把兩片複眼鏡片疊在一起，竟然出現奇特的不規則條紋，上網查詢才知道這是莫列條紋，也想知道透過莫列條紋可以看到怎樣的世界？為了解答這些對於複眼「視」界的疑問與好奇，決定進行一連串光學成像的實驗來找尋答案。

作品與教材關聯性：南一版三上 第三單元 昆蟲的世界

南一版四上 第三單元 光的世界

貳、研究目的

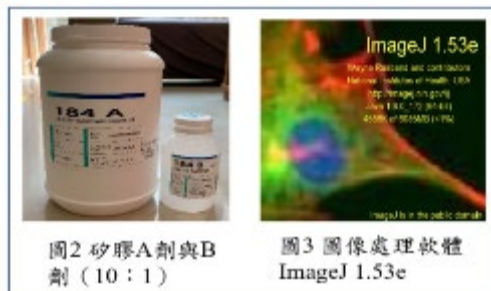
- 一、探索如何製作複眼模。
- 二、探究手電筒、斑馬圖案、複眼鏡片和布幕不同距離的成像。
- 三、分析複眼看到物體的「靜態」成像：為什麼複眼靠近斑馬會看不清楚？
- 四、分析複眼看到物體的「動態」成像：為什麼複眼對移動的物體較敏感？
- 五、探索重疊兩個複眼鏡片的莫列條紋動態成像。



圖 1 研究架構圖

參、研究設備及器材

- 一、複眼膜製作材質：彈珠、培養皿、黏土、果凍粉、果凍蠟、矽膠（圖 2）、
電磁爐
- 二、成像基本設備（P. 9 圖 16）：底座、手電筒、斑馬圖案（影印機印製斑馬圖案於透明投影片，貼在塑膠培養皿上固定）、複眼鏡片（投影機器材專用的複眼鏡片）、布幕（描圖紙放入透明塑膠架內）、手機（拍照、慢動作錄影）、節拍器、手錶
- 三、成像分析軟體：影像分析軟體
ImageJ 1.53e（圖 3）



肆、研究過程或方法

一、文獻探討

(一) 昆蟲的複眼

大部分的昆蟲都有單眼和複眼（圖 4），以蒼蠅為例，其單眼長在兩顆複眼的中間呈倒三角形排列；而與單眼相比，複眼小眼的結構更為簡單，其接收光的角度更狹小且集中於小範圍，但由許多小眼組成的複眼卻是昆蟲最依賴的視覺器官。複眼由許多小眼緊密排列組合而成，每個小眼都是一個細小的獨立感光體，但並不是有多少個小眼就能看到多少個物體，而是每個小眼能看到外界的局部影像，全部整合這些局部影像才能拼湊為一個整體的影像（維基百科，2020），昆蟲複眼看到的世界很像馬賽克的拼貼畫面，解析度差又模糊。

人類的眼睛和複眼完全不同，人眼（圖 5）有水晶體，水晶體很像凸透鏡，有聚集光線的功能，且水晶體有彈性，能透過周圍的睫狀肌調整焦距，使遠近影像都能清楚聚焦的投射在視網膜上，清楚的看到物體。但昆蟲的複眼無法調整焦距，所以只能看到模糊的影像。不同昆蟲組成複眼的小眼數量不一樣，小眼數量越多，解析度越高，視野也越寬廣，例如：螞蟻約 6-8 顆小眼、蒼蠅約 4000-5000 顆、蝴蝶約 12000-17000 顆、蜻蜓則高達 10000-28000 顆。昆蟲複眼的解析度低，但對於移動物體比較敏感，因此日常生活拍打蒼蠅時，蒼蠅總會快一步先飛走。

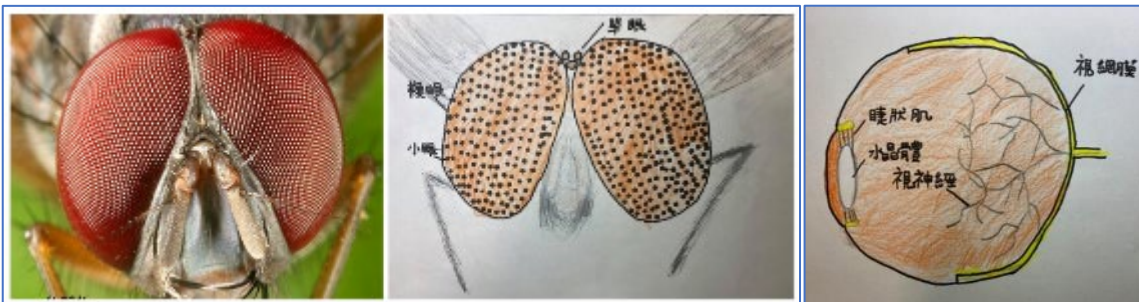


圖 4 蒼蠅的單眼與複眼（照片&作者繪圖）

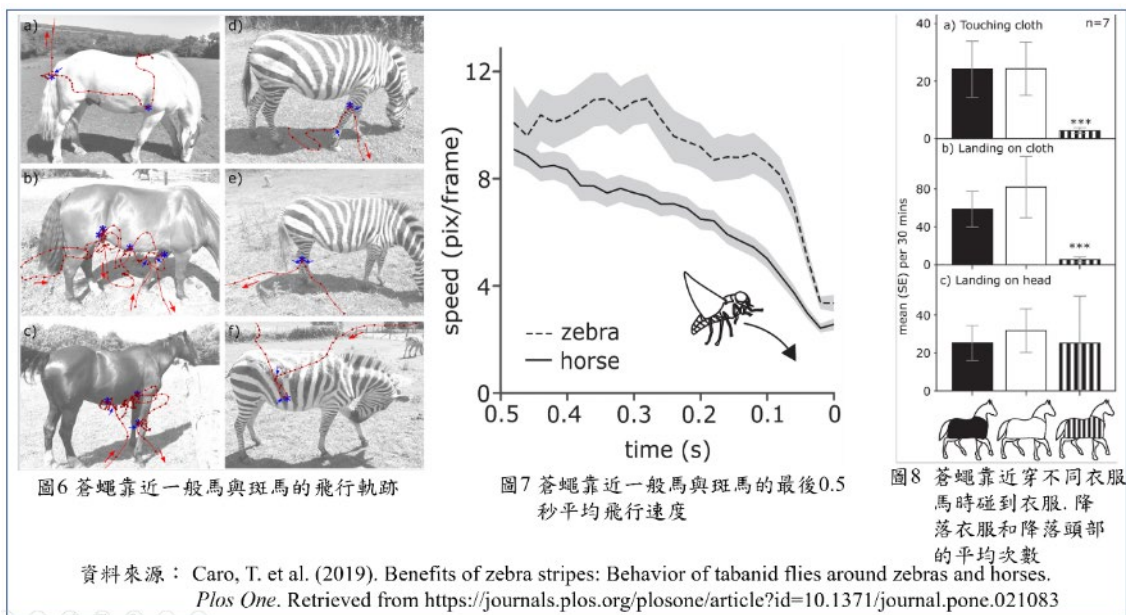
圖 5 人眼的構造（作者繪圖）

(二) 蒼蠅視覺被斑馬條紋擾亂的科學報導

斑馬身上為什麼有黑白條紋？這是科學家長久以來困擾的問題，但現在似乎快找到答案。科學家原本以為斑馬的條紋是為了迷惑獵食者的眼睛，但後來發現獵食者主要是利用嗅覺和聽覺來捕食獵物，最近他們發現斑馬條紋可能是為了趕走蒼蠅所演化出來的特徵（鄒容，2020），當蒼蠅靠近斑馬時，並不會

減速降落，而是直接撞上匆忙飛走，無法在斑馬身上停留叮咬；但靠近一般馬匹時卻會慢慢減速降落在馬身上，多次停留在不同的地方叮咬（圖 6、圖 7），推測可能是蒼蠅近距離接近斑馬時，斑馬條紋造成蒼蠅的視覺擾亂。科學家說：「斑馬身上的黑白條紋會讓蒼蠅已經很差的視力變得頭昏眼花，讓蒼蠅在關鍵的降落時刻被打亂，導致蒼蠅靠近斑馬時並不會減速，反而是直接飛過斑馬，或稍微碰一下斑馬又馬上飛離，並不會在斑馬身上停留。」黑白條紋會產生一種視覺錯覺，在蒼蠅靠近時擾亂牠們的飛行模式，使牠們無法正常降落在斑馬身上（Caro et al., 2019; 國家地理, 2019）。

科學家還為一般馬匹穿上黑色、白色、黑白條紋外套（圖 8），結果發現穿黑白條紋外套的馬能有效減少蒼蠅的干擾，蒼蠅停留在身上的次數大大減少，有趣的是衣服沒有穿在頭部，所以蒼蠅仍能降落在頭部停留叮咬（Caro et al., 2019）。斑馬條紋在人眼看來清楚明瞭，但用昆蟲的複眼觀看似乎會產生眼花撩亂的效果，這點令人十分好奇。



(三) 莫列條紋

莫列條紋是一種光學現象，當許多細小空隙的物體重疊並互相移動，這時會看到許多奇特或不規則的圖案或條紋（維基百科，2020）。由

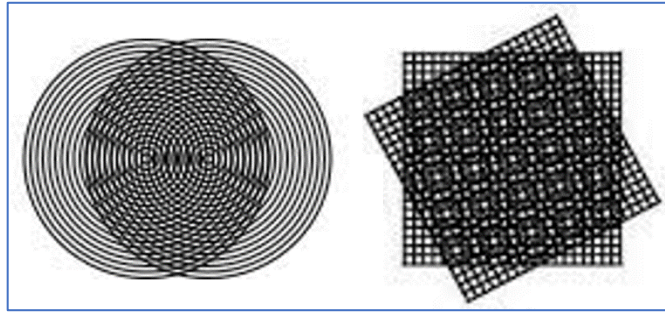


圖 9 莫列條紋

於複眼鏡片是由很小的六

角形構成，我們發現把兩片複眼鏡片重疊在一起，也可以看到有趣的莫列條紋，因此也採用莫列條紋來觀察物體的移動。

二、研究方法

這個實驗主要分為五個部分（圖 10）：首先是探索手做複眼模，接著是探究光學成像裝置中手電筒、斑馬圖案、複眼鏡片和布幕不同距離的成像結果；然後分析複眼看到物體的靜態成像，也就是複眼視覺為什麼會被斑馬條紋干擾；以及動態成像，關於複眼對移動物體的靈敏度；最後是重疊兩片複眼鏡片的動態成像，希望透過一系列的光學成像實驗，一探令人好奇的複眼「視」界。



圖 10 研究方法

伍、研究結果

實驗一 探索如何製作複眼模

(一) 實驗步驟

1. 使用一種材質製作下層凹底膜。
2. 在下層凹底膜凝固前鋪上 1.1cm 彈珠。
3. 取下彈珠後完成下層凹底膜的製作。
4. 在下層凹底膜上鋪另一種透明材質，成為凸透複眼膜。

(二) 實驗結果

1. 實驗 1-1 發現黏土作為下層凹底膜，會與上層的材質產生化學反應，使得上層凸透複眼膜成為霧霧的白色而降低透光性，且果凍粉這類食品保存不易容易壞掉。
2. 實驗 1-2 發現黏土中的空氣會跑入矽膠，使上層凸透複眼膜產生許多氣泡不夠透光。
3. 實驗 1-3 發現下層凹底膜與上層凸透複眼膜不可以是同樣的材質，因為在凝固的過程中會互相黏在一起，無法分開脫膜。
4. 實驗 1-4 得知果凍蠟和矽膠具有適當的硬度和彈性，是良好的透鏡製作材質，其中矽膠的透光度又更勝一籌，因此決定以果凍蠟為底膜，使用矽膠製作上層凸透複眼膜。
5. 由上述結果發現複眼膜的製作流程如下：
 - (1) 製作下層凹底膜：將果凍蠟以電磁爐加熱至溶化，然後倒入培養皿，趁果凍蠟未凝固前放入彈珠並鋪平，彈珠放入深度為半顆彈珠深。待半小時冷卻凝固後可取下彈珠，成為下層凹底膜。
 - (2) 製作上層凸透複眼膜：將上述的下層凹底膜作為模子，在上方倒入矽膠 A 劑與 B 劑 1：10 的比例，靜置兩天等待完全凝固，小心的脫模即完成凸透複眼膜。

實驗	下層凹底膜	圓形塑形物	上層凸透複眼膜	實驗結果	照片
1-1	黏土	1.1cm彈珠	果凍粉	黏土和果凍粉會產生化學反應，果凍的接觸面成為霧霧的白色不透光。	 ❌
1-2	黏土	1.1cm彈珠	矽膠	黏土中的空氣會跑入矽膠，使矽膠產生許多氣泡，透光度不佳。	 ❌
1-3	矽膠	1.1cm彈珠	矽膠	下層凹底膜與上層凸透複眼膜為同樣的矽膠材質，會互相黏在一起，無法分開脫膜。	 ❌
1-4	果凍蠟	1.1cm彈珠	矽膠	矽膠為製作凸透複眼模的良好材質，須靜置兩天凝固才可脫膜，透光性佳。	 ✅

圖 11 複眼模製作材質實驗結果

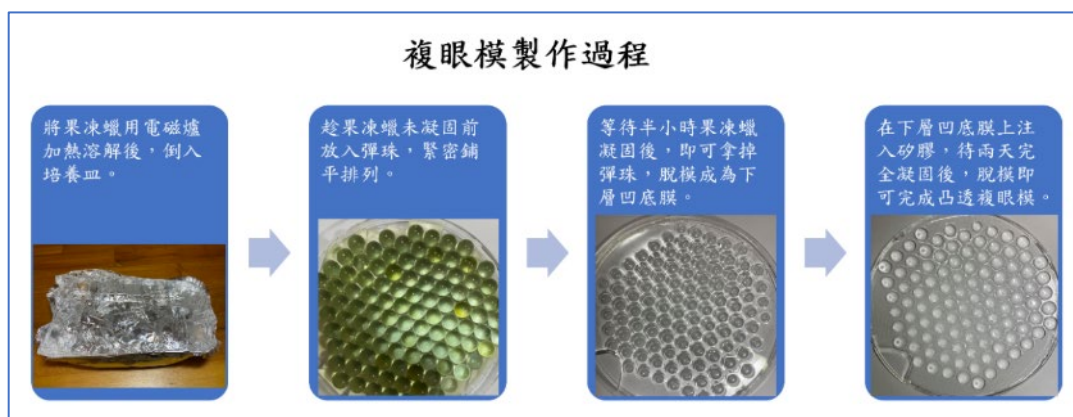


圖 12 複眼模的製作過程

(三) 實驗困難

使用矽膠製作複眼膜，必須耐心等待兩天的凝固時間，一開始為求速成，嘗試運用電磁爐加熱，希望可以加速凝固，結果反而使矽膠內的空氣無法排出，造成製膜失敗，之後學會使用矽膠製膜，須保持穩定不要搖晃的狀態，維持兩天以上的時間，就能得到完全透光的複眼膜。



圖 13 靜置兩天後脫膜的矽膠複眼膜

(四) 實驗限制

這個用矽膠製作的複眼模是由許多 1.1cm 的小眼組成，每顆小眼過於大顆，且每個圓形小眼相連處有空隙，並非真實複眼的六角形緊密排列，因此無法模擬昆蟲看到的影像（圖 14）。

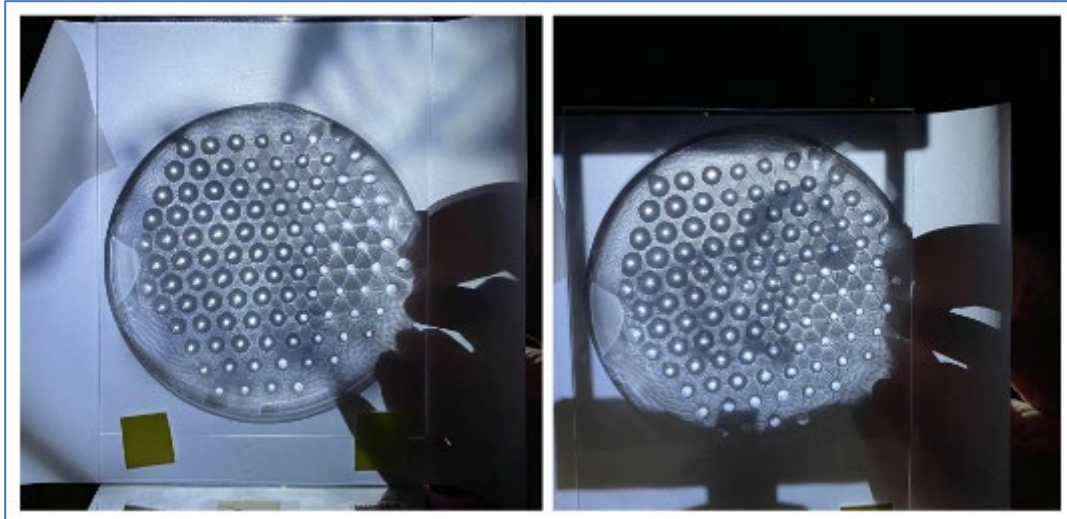


圖 14 自製複眼模投影的影像

於是我試著上網搜尋製作複眼的材料，搜尋許久終於在投影機專用的透鏡器材，找到類似複眼的鏡片，由直徑 0.2cm 的六角形緊密排列而成，與昆蟲複眼頗為近似，決定改用這種複眼鏡片進行複眼成像的實驗（圖 15）。但這個複眼鏡片小眼的曲率是固定規格，整片是平面的結構，不像真實昆蟲複眼是半球形的結構，且具非常廣闊的視野，此為本研究的限制。

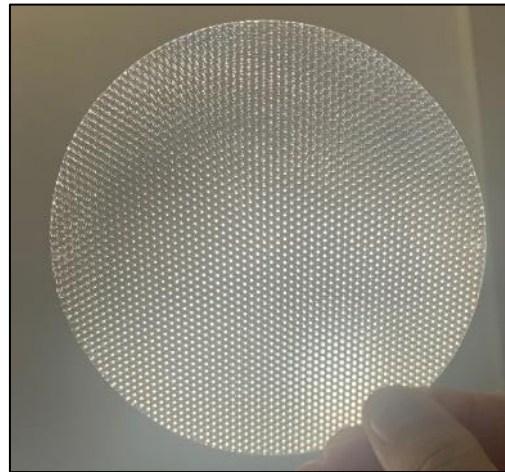


圖 15 投影機專用複眼鏡片

實驗二 探究手電筒、斑馬圖案、複眼鏡片和布幕不同距離的成像

這個實驗採用投影機專用的複眼鏡片，每個小眼為直徑 0.2cm 的正六邊形，可以初步模擬複眼的成像，由文獻（維基百科，2020；修·萊佛士，2018）得知，複眼的成像並不是有多少小眼，就能看到多少個聚焦獨立的影像，因為複眼非常小顆，每顆小眼只能接收到一小點的影像，必需透過所有小眼的影像，才能像拼圖一樣組合成一個大影像。

（一）實驗步驟

把手電筒、斑馬圖案、複眼鏡片、布幕平穩固定在底座上，調整距離 A、距離 B、距離 C 進行成像的實驗（圖 16），並由布幕後方拍攝斑馬影像。

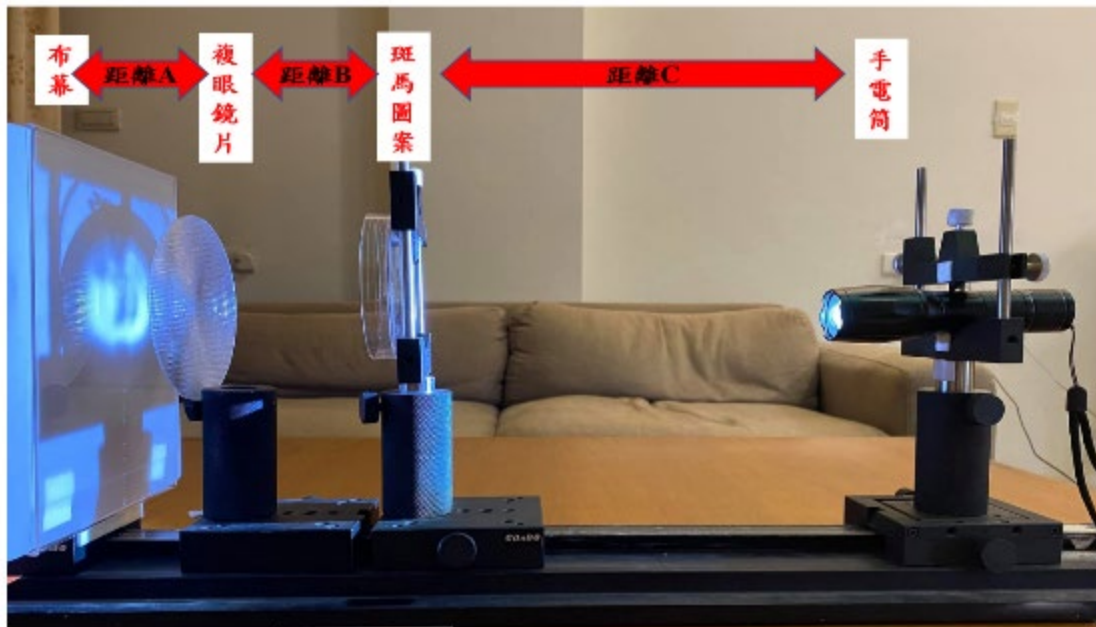


圖 16 光學成像裝置的各種距離

（二）困難解決

1. 原本使用紙箱自製光學實驗的底座（圖 17），以家中的積木架設光源、斑馬圖案、複眼鏡片和布幕，自己手做的過程很有趣，但發現光學實驗必須很精準，不能有任何晃動不穩，所以改去實驗室借用專業的光學實驗底座進行實驗。



圖 17 最早自製的光學底座與器材

2. 一開始在白天進行實驗，雖然拉下所有窗簾，還是發現成像結果不清楚，後來發現晚上關掉所有的燈，才是進行光學實驗的最佳時機。

(三) 實驗結果

1. 複眼鏡片的成像

複眼鏡片是由許多 0.2cm 的六角形小眼緊密排列而成，影像由一個一個的小點組成斑馬，透過複眼鏡片聚焦在布幕的影像有點像馬賽克拼貼的畫面。下圖是複眼鏡片的成像示意圖（圖 18），光線進入複眼鏡片後，每個小眼會在焦距處形成一個個的聚焦點，將布幕放在聚焦點上，會看到複眼影像，以簡單的「×」圖案為例，其會在布幕上的聚焦點組成「×」圖案，是由許多小眼共同組成的模糊整體大影像（圖 19）。實驗中的布幕用來模擬昆蟲複眼構造中的視桿細胞，也就是接收光的神經元，至於視桿細胞如何接收和處理光的訊號，不在這次的研究範圍，有待未來繼續探究。

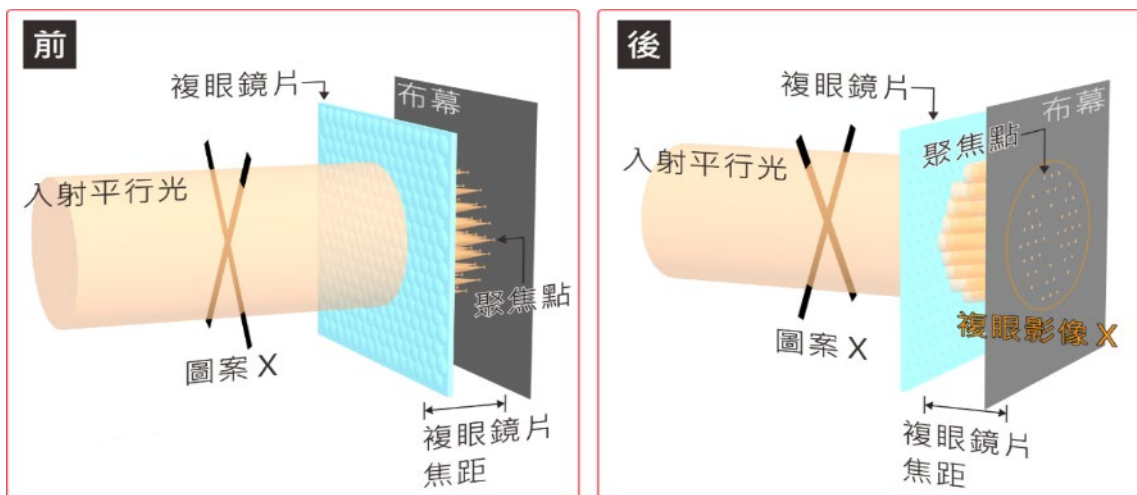


圖 18 複眼鏡片的成像示意圖

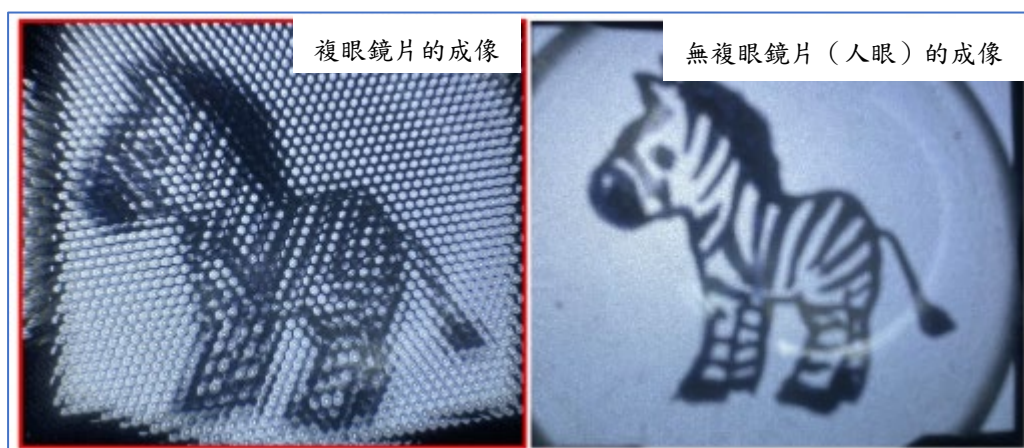


圖 19 複眼和人眼的不同成像結果

2. 複眼鏡片和布幕不同距離的成像（圖 16 距離 A）

這個實驗拿掉斑馬圖案，調整複眼鏡片和布幕的距離 A 為 1cm、2cm、3cm 和 4cm，結果發現 1cm 時布幕成像最清楚，因此之後實驗採用複眼鏡片和布幕的距離 A 為 1cm。

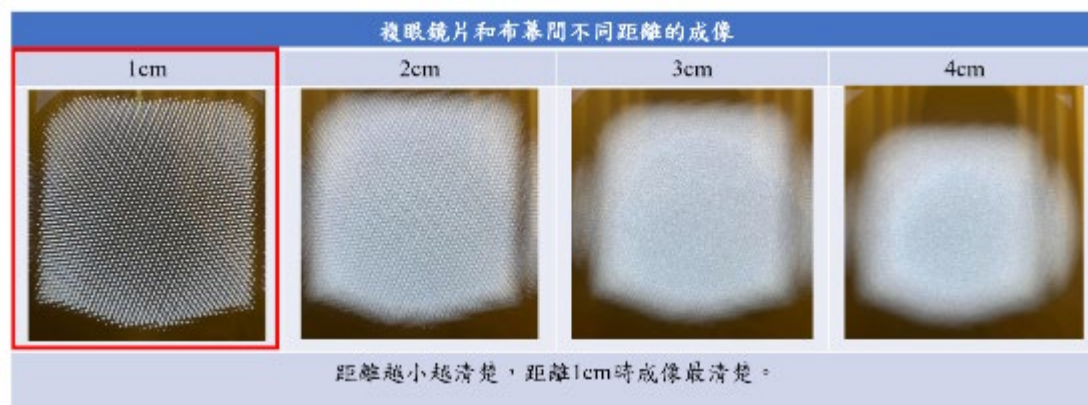


圖 20 複眼鏡片和布幕不同距離 A 的成像結果

3. 複眼鏡片和斑馬圖案不同距離的成像（圖 16 距離 B）

根據上面的實驗結果，將複眼鏡片和布幕的距離 A 固定為 1cm，接著調整斑馬圖案的距離 B 為 5cm、10cm、15cm、20cm、25cm，發現距離 5cm 時最清晰，複眼鏡片越靠近斑馬，成像越為清楚。接著每 1cm 進行微調，結果發現距離 4cm 時最能清晰成像，因此之後採用 4cm 作為距離 B 進行實驗。

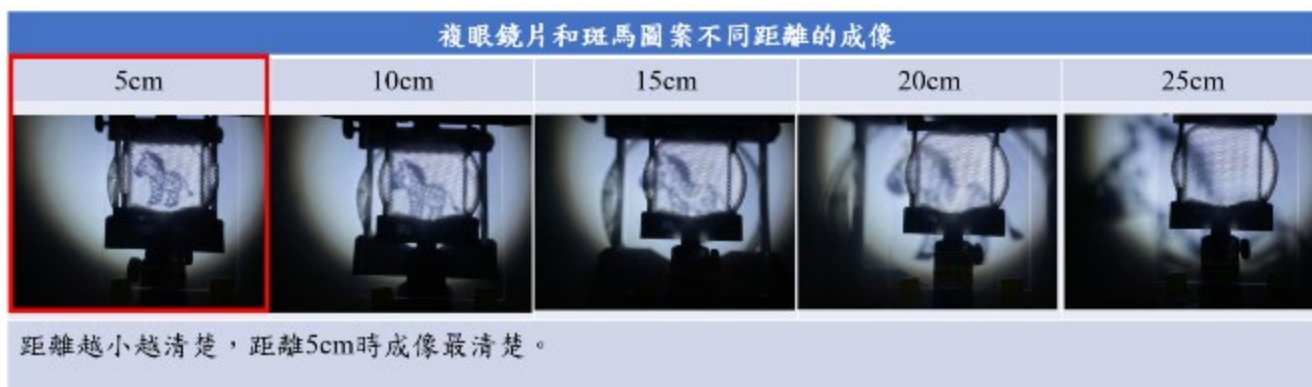


圖 21 複眼鏡片和斑馬圖案不同距離 B 的成像結果

4. 手電筒與斑馬圖案不同距離的成像（圖 16 距離 C）

根據上面的實驗結果，將複眼鏡片和布幕間的距離 A 固定為 1cm，複眼鏡片和斑馬圖案距離 B 固定為 4cm，接著調整手電筒和斑馬圖案的距離 C 為

5cm、10cm、15cm、20cm，結果發現不同距離的成像結果差不多，距離 C 為 5cm-20cm 都可清楚成像。

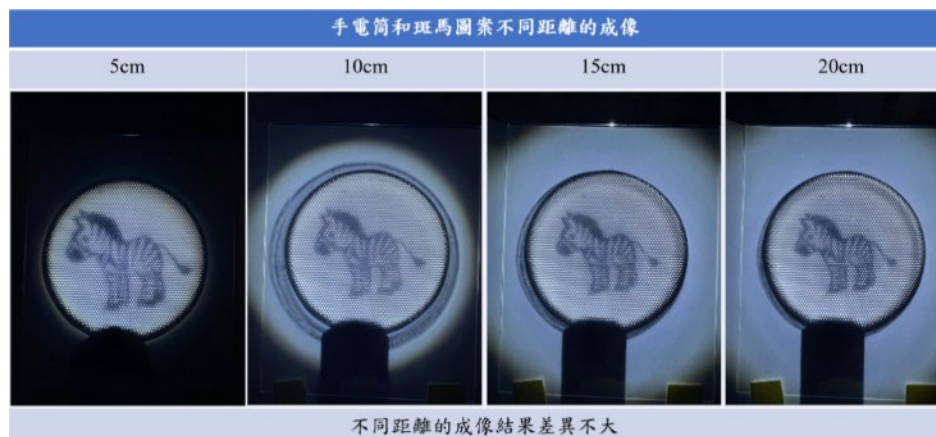


圖 22 手電筒與斑馬圖案不同距離 C 的成像結果

由實驗二的結果發現，複眼鏡片應盡量靠近布幕，距離 A 的 1-5cm 間距中，以 1cm 最清晰，得知複眼鏡片的焦距約為 1cm；斑馬圖案和複眼鏡片距離 B 每 5cm 的間距中，實驗了 5-20cm，其中以最近距離的 5cm 最為清楚，越近越能清楚成像，進一步調整 1-5cm 每 1cm 的距離成像，發現 4cm 時最清晰；而手電筒和斑馬圖案的距離 C 以每 5cm 為間距，實驗了 5-20cm，因為手電筒發出的光近似於平行光，所以距離 C 的遠近對於複眼的斑馬成像沒有明顯影響。因此本研究的光學成像裝置最後決定採用：複眼鏡片與布幕距離 A 為 1cm、複眼鏡片和斑馬圖案距離 B 為 4cm、手電筒與斑馬圖案距離 C 為 13cm，進行一系列複眼的光學成像實驗。

實驗三 分析複眼看到物體的「靜態」成像：為什麼複眼靠近斑馬會看不清楚？

這個實驗想了解蒼蠅靠近斑馬為什麼會頭昏眼花，是因為複眼的特殊構造嗎？由實驗二得知複眼看到的影像是由許多小眼所組成，有點像馬賽克的拼貼，會不會是因為複眼的特殊成像，造成近看斑馬時的視覺擾亂？複眼看到遠近不同的斑馬時，是看到怎樣的外觀和條紋比例？為什麼會看不清這是一匹馬而撞上呢？

(一) 實驗步驟

1. 用電腦印出斑馬圖案，外觀印為紅色，斑馬條紋印為黑色，方便 ImageJ 判讀外觀和條紋。
2. 調整斑馬圖片的比例，印出 1 倍大、2 倍大和 3 倍大斑馬圖案。
3. 手電筒、斑馬圖案、複眼鏡片、布幕固定在底座上，距離 A 為 1cm、距離 B 為 4cm、距離 C 為 13cm (圖 16)，手機由布幕後方拍照。
4. 使用 ImageJ 分析影像，進行斑馬外觀與條紋比例的計算。

(二) 影像分析軟體 ImageJ

為了分析複眼看到斑馬圖案的成像，使用 ImageJ 算出斑馬外觀及條紋的複眼顆粒數量，以免除手算造成的錯誤，六個步驟的操作方法如圖 23 所示。

STEP 1 選擇照片和調整照片

1. 打開複眼看斑馬圖案的成像照片和只有複眼成像的照片，將兩張照片放入 ImageJ。
2. 在 image 欄位點選 transform，然後點選 rotate right 把照片調正。
3. 在 image 欄位點選 type，然後點選 16-bit 調整灰階。

STEP 2 兩張照片相減得到只有斑馬圖案的複眼影像

1. 在 process 欄位點選 image calculator，將只有複眼成像的照片減去複眼看斑馬圖案的成像照片，成為僅有斑馬圖案的照片。

STEP 3 求取斑馬外觀和條紋的總複眼數量

1. 把斑馬圖案框出來，避免算到雜點影響實驗結果。
2. 在 image 欄位，點選 adjust threshold 調亮暗，讓每顆複眼的顆粒清楚分明。
3. 在 analyze 欄位，點選 analyze particles，由 count 數據得知斑馬外觀和條紋的顆粒總數量。

STEP 4 區分斑馬外觀和條紋的顏色

1. 打開一張複眼看斑馬圖案的成像照片，放入 ImageJ 軟體。
2. 在 image 欄位點選 adjust，然後點選 color threshold 讓紅色的外觀更明顯。
3. 在 image 欄位點選 color，然後點選 split channel 得到三張圖片後，挑出一張斑馬外觀是白色的照片。
4. 在 image 欄位點選 adjust threshold 調整亮暗，讓每顆複眼顆粒清楚分明。
5. 把斑馬圖案框出來，避免算到雜點影響實驗結果。

STEP 5 求取斑馬外觀的複眼數量

1. 在 analyze 欄位點選 analyze particles，看 count 的數據得到斑馬外觀的複眼顆粒數量。

STEP 6 求取斑馬外觀所佔比例

1. 外觀複眼顆粒佔比 = $\frac{\text{外觀複眼顆粒數}}{\text{外觀+條紋複眼顆粒數}}$

圖 23 靜態成像 ImageJ 操作方法

接著說明計算斑馬外觀佔整隻斑馬的比例，以斑馬圖案 3 倍大為例，計算方式為： $\text{外觀複眼顆粒佔比} = \frac{\text{外觀複眼顆粒數}}{\text{外觀} + \text{條紋複眼顆粒數}}$ ，得到 26% 為外觀複眼顆粒佔比

(圖 24)。另外人眼成像的部分，因為人眼成像並無顆粒，因此採用面積的方式以像素進行分析(圖 25)。

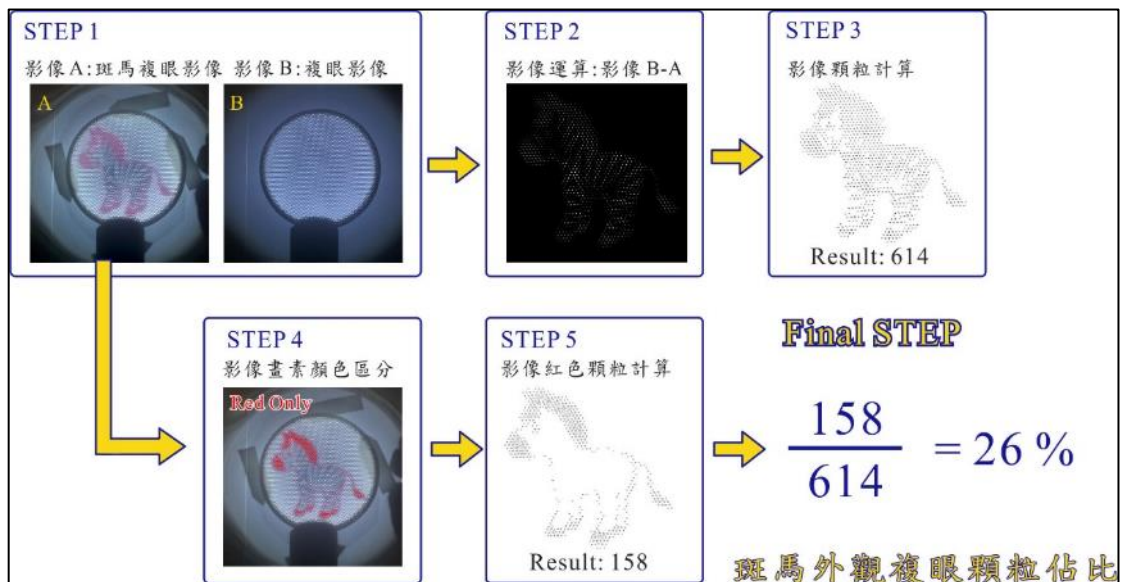


圖 24 ImageJ 複眼成像計算顆粒

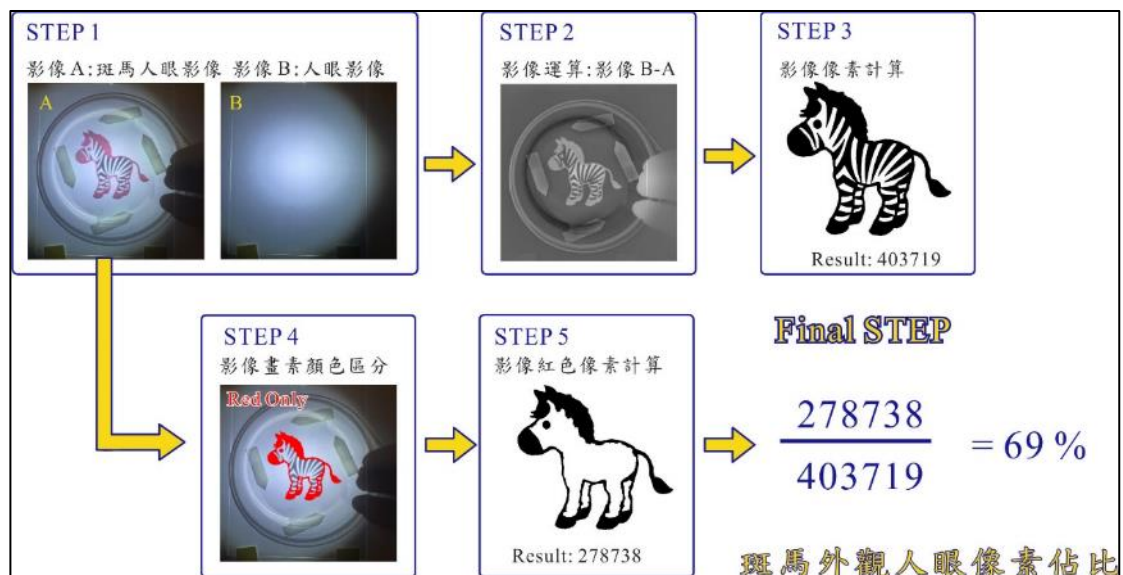


圖 25 ImageJ 人眼成像計算面積

(三) 困難解決

實驗三我們利用 ImageJ 軟體，成功分析出靜態時斑馬外觀佔整隻斑馬的比例，但在過程中其實經歷一連串的失敗，後來才都一一改進克服。

1. 複眼顆粒的數量計算



失敗	改進
<p>用手數算複眼數量： 用手算出一顆顆的複眼，費時費工且容易算錯。</p>	<p>用ImageJ計算複眼數量： 用影像分析軟體計算複眼顆粒，可以獲得較精準的結果。</p>
	

圖 26 複眼顆粒的數量計算

2. 斑馬圖案的製作

失敗	改進
<p>黑色筆畫斑馬圖案： 用黑色筆畫出斑馬的外觀和條紋，外觀和條紋都是同樣顏色，不容易進行分析計算。</p>	<p>透明投影片印製斑馬圖案： 透過電腦繪製斑馬圖案，以紅色畫出外觀，黑色畫出條紋，以區別外觀和條紋；還可輕易調整1倍到3倍大的斑馬圖案，印在透明投影片上，成功完成實驗。</p>
<p>油漆筆畫斑馬圖案： 使用紅色油漆筆畫出斑馬外觀，發現油漆筆不透光，所以外觀投影顯現不出紅色，難以分析計算。</p>	

圖 27 斑馬圖案的製作

3. 斑馬成像的清晰度



失敗	改進
<p>遠近調整斑馬圖案的大小： 正如實驗二的結果顯示距離越遠越不清楚，複眼鏡片與斑馬圖案距離B比較遠的影像模糊不清，無法數算複眼顆粒，ImageJ也計算不出複眼顆粒。</p>	<p>印製不同大小的斑馬圖案： 複眼鏡片與斑馬圖案固定在清楚成像的距離B，模擬蒼蠅由遠到近看到的斑馬大小，印製1倍到3倍大的斑馬圖案，才得到清晰的影像，可用ImageJ計算複眼顆粒。</p>
	

圖 28 斑馬成像的清晰度

(四) 實驗結果

1. 複眼看到斑馬大小之外觀比例

這個實驗利用複眼鏡片觀看斑馬圖案，模擬蒼蠅複眼在遠處看到的斑馬比較小隻，近處看到的斑馬比較大隻，製作了斑馬圖案 1 倍大、2 倍大和 3 倍大，想要知道複眼看到不同大小的斑馬圖案會有什麼不一樣。實驗也調整複眼鏡片與斑馬圖案的距離（圖 16 距離 B）為 4cm、5cm 和 6cm，想知道不同的距離會有什麼結果。


實驗結果由圖 29 得知斑馬圖案 1 倍大時，複眼可以看到外觀佔整隻斑馬的比例為 83-87%，代表複眼在遠方看到的斑馬很小隻，但外觀十分明顯；接著斑馬圖案 2 倍大時，複眼看到斑馬外觀佔整隻斑馬的比例減到 56-59%；斑馬圖案 3 倍大時，複眼看到外觀的比例再降到 26-36%，且無論距離 B 為 4cm、5cm 或 6cm，都可看到一致性的外觀佔比下降結果。這表示複眼越來越接近斑馬時，看到的斑馬圖案越來越大，但看到外觀比例卻越來越低，相對地看到條紋比例越來越高，也可以說當複眼更接近斑馬時，由於看到外觀很少，幾乎都是黑白的斑馬條紋，所以被斑馬條紋擾亂的複眼影像，已經很難由外觀辨識這是一匹馬。

斑馬圖案大小	複眼鏡片和斑馬圖案的距離 (距離B)	斑馬外觀的複眼顆粒數	斑馬條紋的複眼顆粒數	斑馬外觀和條紋的總複眼顆粒數	斑馬外觀的複眼顆粒佔比	斑馬條紋的複眼顆粒佔比	照片 (距離B: 4cm為例)
1倍大	4cm	47	7	54	87%	13%	
	5cm	47	7	54	87%	13%	
	6cm	60	12	72	83%	17%	
2倍大	4cm	107	75	182	59%	41%	
	5cm	104	82	186	56%	44%	
	6cm	116	87	203	57%	43%	
3倍大	4cm	189	329	518	36%	64%	
	5cm	168	431	599	28%	72%	
	6cm	158	456	614	26%	74%	

圖 29 複眼(複眼鏡片)看斑馬外觀所佔比例

2. 人眼看到斑馬大小之外觀比例

為了瞭解複眼看到的世界和人眼有什麼不同，為什麼同樣看到斑馬，人的眼睛不會被斑馬的條紋所混淆，所以用同樣的實驗拿掉複眼鏡片，模擬人眼看到的斑馬圖案，由圖 30 成像結果發現人眼（無複眼鏡片）無論斑馬圖案為 1 倍大、2 倍大或 3 倍大時，看到的斑馬外觀比例都是 69%-71%之間，代表人眼看到的斑馬外觀大約是 70%左右，剩下的 30%看到斑馬條紋，也就是說我們可以透過外觀看到這是一匹馬，透過條紋看到這是有斑紋的斑馬，無論遠近斑馬看起來大隻或小隻，人眼都有調節聚焦的功能，看到外觀和條紋的比例都相似，可以清楚看見這是一匹斑馬。

斑馬圖案大小	斑馬外觀的面積 (像素)	斑馬條紋的面積 (像素)	斑馬外觀和條紋的總面積 (像素)	斑馬外觀佔比	斑馬條紋佔比	照片
1倍大	30401	12425	42826	71%	29%	
2倍大	118182	51195	169377	70%	30%	
3倍大	278738	124981	403719	69%	31%	

註：人眼(無複眼鏡片)的斑馬外觀和條紋沒有一顆顆的複眼，所以改用面積 (像素) 表示成像結果。

圖 30 人眼（無複眼鏡片）看斑馬外觀所佔比例

3. 比較複眼和人眼看到斑馬大小的外觀比例

由 31 複眼與人眼的斑馬外觀佔比得知：複眼（綠、橘、黃線）是往下的斜線，而人眼（藍線）則維持水平的線條，也就是複眼看到的斑馬越大隻則看到外觀的比例越小，相對看到的黑白條紋比例越高，無論是複眼鏡片與斑馬圖案的距離為 4cm、5cm 或 6cm，都可以看到這樣的結果，但人眼則沒有這樣的差別，無論斑馬大小看到的外觀比例都維持一樣約 70%。

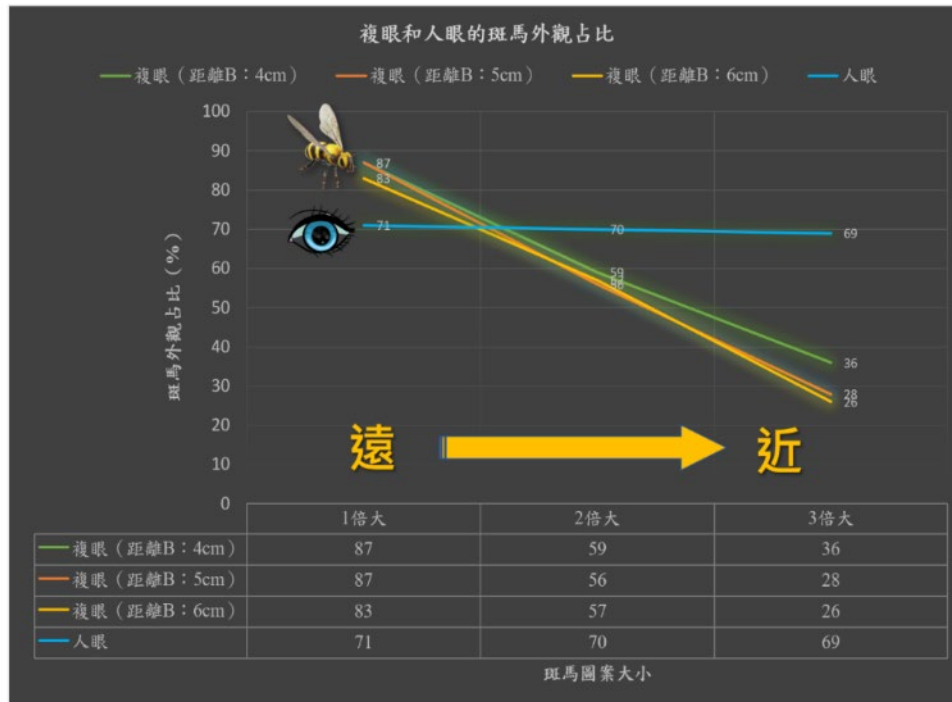


圖 31 複眼與人眼看斑馬外觀所佔比例

實驗四 分析複眼看到物體的「動態」成像：為什麼複眼對移動的物體較敏感？

這個實驗想要模擬蒼蠅為什麼對移動的物體特別敏感，每次伸手想要打蒼蠅，蒼蠅總會先一步飛走。先畫出一隻手掌代表人的手掌，貼在節拍器的搖桿上模擬前後運動和左右運動，接著用複眼鏡片觀看手掌移動，想知道複眼看移動的手掌是不是比較敏感。

(一) 實驗步驟

1. 畫出約 5cm 的手掌圖案，將畫好的手掌圖案剪下，貼在節拍器上。
2. 前後運動時，節拍器側面放置，透過節拍器的擺動做出前後的運動（圖 32）；左右運動時，節拍器正面放置，透過節拍器的擺動做出左右的運動（圖 33）。
3. 擺動節拍器，從布幕後方慢動作錄影手掌擺動的過程 10 秒。
4. 將慢動作錄影運用影片截圖軟體（Free Video to JPG Converter）轉為照片，再以 ImageJ 進行影像分析。

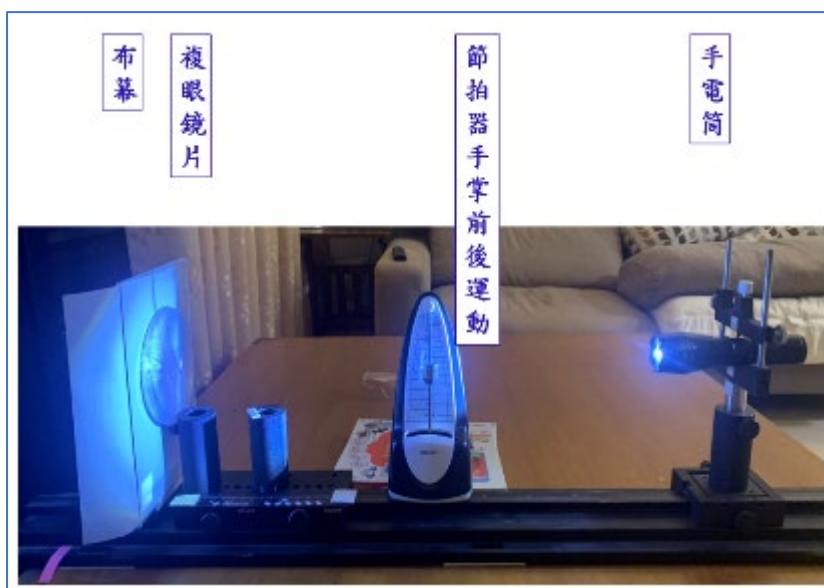


圖 32 動態成像前後運動的光學裝置



圖 33 動態成像左右運動的光學裝置

(二) 照片擷取

以手機慢動作錄影節拍器擺動，使用節拍器 $\nu=120$ 的速度，在多次擺動中選擇照片最清晰的一次擺動，節拍器由右擺到左需時 0.5 秒，共有 120 張照片記錄，每張照片的時間差約為 0.004 秒。前後運動是從中選取擺動位置的最高點為第 20 張照片，左右運動則是選取擺動位置的最低點（左邊）為第 20 張照片，都是同樣往前擷取共 20 張照片進行移動面積的分析（圖 34）。



圖 34 前後運動與左右運動的照片擷取

(三) 靈敏度計算

本研究將靈敏度定義為： $\text{靈敏度} = \frac{\text{手掌總移動面積}}{\text{手掌原本面積}}$ ，手掌原本面積在前後運動是手掌擺動位置最高點面積，在左右運動則是擺動位置最低點面積。首先在擷取出的 20 張照片中，用 ImageJ 計算第 20 張照片與第 19 張照片的移動面積，也就是第 20 張照片的面積減掉第 19 張照片的面積；然後依序把 19 次相減的面積加總，成為手掌總移動面積；最後將手掌總移動面積除手掌原本面積成為靈敏度，前後運動和左右運動都是同樣的步驟，圖 35 和圖 36 以前後運動為例，介紹使用 ImageJ 的操作步驟。

STEP 1 兩張照片相減得到移動面積

1. 將 20 張照片放入 ImageJ 軟體。
2. 在 process 欄位點選 image calculator，照順序照片 20 減照片 19、照片 19 減照片 18.....，最後到照片 2 減照片 1，然後計算兩張照片相減的影像面積，也就是移動面積。

STEP 2 計算總移動面積

1. 用 process 欄位點選 image calculator，把上述 20 張相減得到的移動面積照片，全部加總成 1 張照片。
2. 在 image 欄位，點選 adjust threshold 將這 1 張照片調亮暗。
3. 在 analyze 欄位，點選 analyze particles，由 count 得知加總移動面積。

STEP 3 計算靈敏度：靈敏度 = 手掌總移動面積 / 手掌原本面積

圖 35 動態成像 ImageJ 操作方法

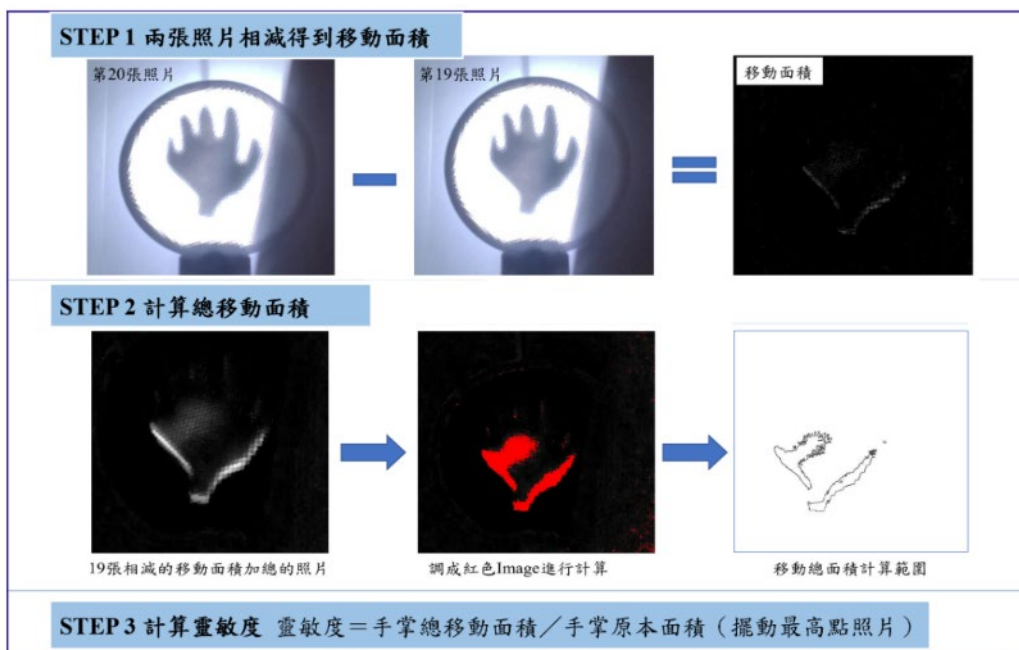


圖 36 ImageJ 計算手掌移動面積

(四) 困難解決

1. 前後與左右運動的裝置：本來使用電動牙刷實驗複眼看到的物體移動情形，但後來發現電動牙刷震動過快，且無法調整震動的速度，因此測不出影像的移動結果。某天練琴時想到可以試試節拍器，節拍器可以規律的擺動，且能調整每分鐘擺動的次數，於是改用節拍器貼上手掌圖案，終於成功完成實驗。

2. 人眼成像的比較：人眼的成像原本也和實驗三相同，一樣是拿掉複眼鏡片投影在布幕上，但發現這部分的實驗是有關前後運動與左右運動，其中前後運動會造成投影的焦距不清楚，因此布幕上的成像並非如同人眼所見，人眼具有調節遠近的功能，運動中的遠近都可看到清晰的成像。因此我拿掉布幕，改由直接錄影節拍器的擺動，錄出人眼看到的真正清晰影像作為比較。
3. 靈敏度的比較：由於複眼採用布幕投影的手掌照片，人眼則直接錄影節拍器擺動的手掌照片，在照片中兩者的手掌面積並不一樣，無法直接比較移動面積，所以利用同樣自己定義的靈敏度進行計算， $\text{靈敏度} = \text{手掌總移動面積} / \text{手掌原本面積}$ ，這樣就可以不受手掌面積不同的影響，進行兩者的靈敏度比較。

（五）實驗結果

1. 前後運動時複眼與人眼的靈敏度

在前後運動中， $\text{靈敏度} = \text{手掌總移動面積} / \text{手掌原本面積}$ ，複眼鏡片看到的手掌總移動面積為 19175 像素，手掌原本面積為 45385 像素，得到複眼的靈敏度 0.42；人眼看到的手掌總移動面積為 2507 像素，手掌原本面積為 12665 像素，得到人眼的靈敏度 0.20（圖 37）。由圖 36 可發現複眼可以看到光影的變化，白色霧霧的地方就是複眼看到的光影變化。實驗結果發現在前後運動中，複眼看到的移動面積比較大，靈敏度也較高。

2. 左右運動時複眼與人眼的靈敏度

在左右運動中，複眼鏡片看到的手掌總移動面積為 72882 像素，手掌原本面積為 59304 像素，得到複眼的靈敏度為 1.23；至於人眼看到的手掌總移動面積為 9696 像素，手掌原本面積為 13665 像素，得到人眼的靈敏度為 0.71（圖 37）。由此可見在左右運動中，複眼看到的移動面積比較大，靈敏度也比較高。

3. 比較複眼與人眼的靈敏度

由上述實驗得知無論是前後運動或是左右運動，複眼都可以看到比較大幅度的物體移動面積，靈敏度都高於人眼將近 2 倍（圖 38）。

擺動類型		手掌總移動面積 (像素)		手掌原本面積 (像素)		靈敏度
前後運動	複眼	19175	÷	45385	=	0.42
	人眼	2507		12665		0.20
左右運動	複眼	72882		59304		1.23
	人眼	9696		13665		0.71

註：靈敏度 = 手掌總移動面積 / 手掌原本面積

圖 37 複眼和人眼看前後運動和左右運動的靈敏度計算

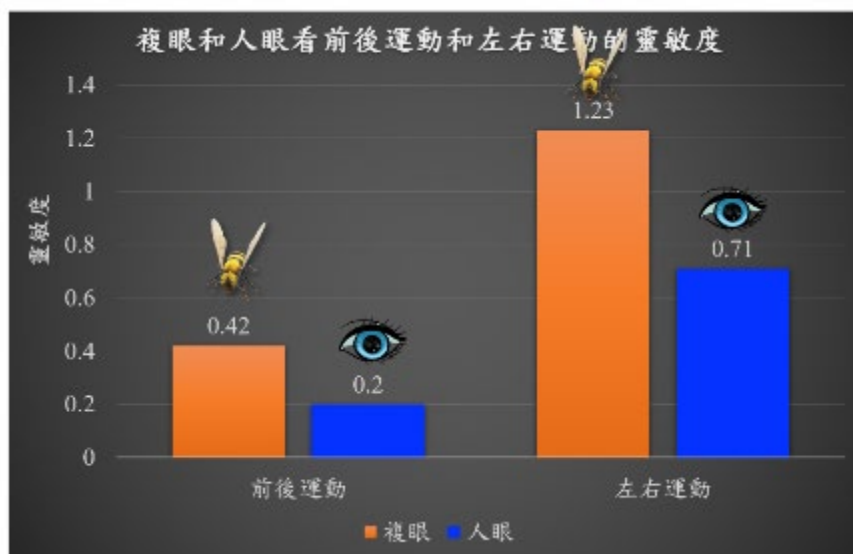


圖 38 複眼和人眼的靈敏度比較圖

實驗五 探索重疊兩個複眼鏡片的莫列條紋動態成像

(一) 實驗步驟

1. 將兩片複眼鏡片完全重疊在一起。
2. 轉動其中一片複眼鏡面，會看到複眼中每個正六邊形的小眼呈現不同角度的莫列條紋變化。
3. 旋轉重疊角度 0°、10°、20°、30°的莫列條紋，觀看手掌前後運動的動態成像。
4. 用手機錄下手掌前後運動的影像 10 秒（同實驗四）。
5. 擷取 20 張照片用 ImageJ 分析（同實驗四）。
6. 計算靈敏度（同實驗四）。

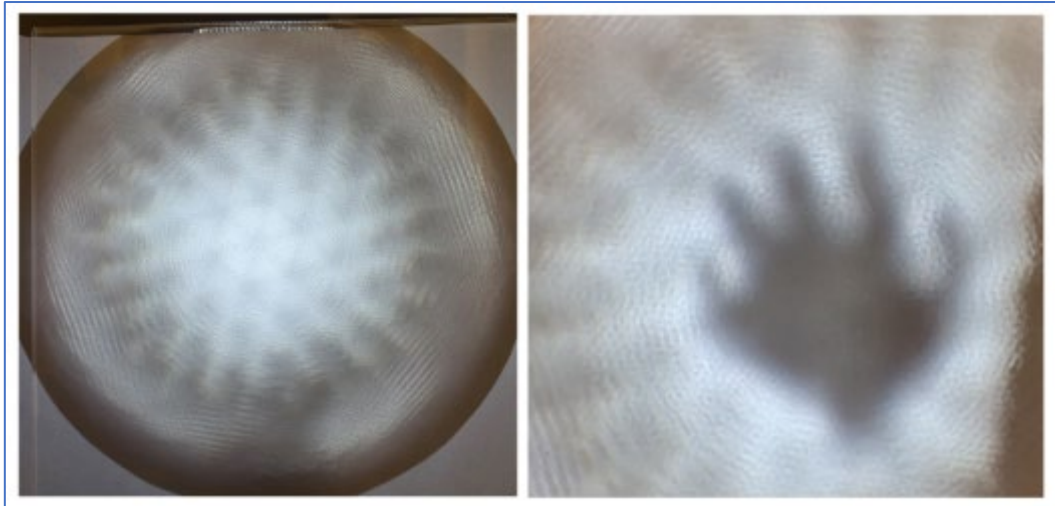


圖 39 莫列條紋和手掌影像

(二) 重疊角度

兩個重疊在一起的複眼鏡片，轉動其中一片複眼鏡面，會看到複眼中每個正六邊形的小眼會有不同角度的莫列條紋變化，呈現每 60 度又完全重疊在一起的莫列條紋，所以進行 0°、10°、20°、30°、40°、50°和 60°的莫列條紋實驗（圖 40）。接著由莫列條紋實驗發現其中 0°和 60°的莫列條紋相同，10°和 50°的莫列條紋相對稱，20°和 40°的莫列條紋相對稱（圖 41），所以進行 0°、10°、20°、30°莫列條紋看手掌前後運動的動態成像實驗。

(三) 實驗限制

莫列條紋的實驗原本打算進行前後運動和左右運動兩種運動，但在實驗的過程中發現兩片複眼鏡片重疊在一起的莫列條紋只有中間部分是清晰的，其外圍部分並不清楚，所以手掌的運動必須位在鏡片的中間部分投影才能清楚成像。由於左右運動的影像很容易落在複眼鏡片的外圍，只有前後運動的影像都是在複眼鏡片的中間部分，所以最後只進行前後運動的實驗。

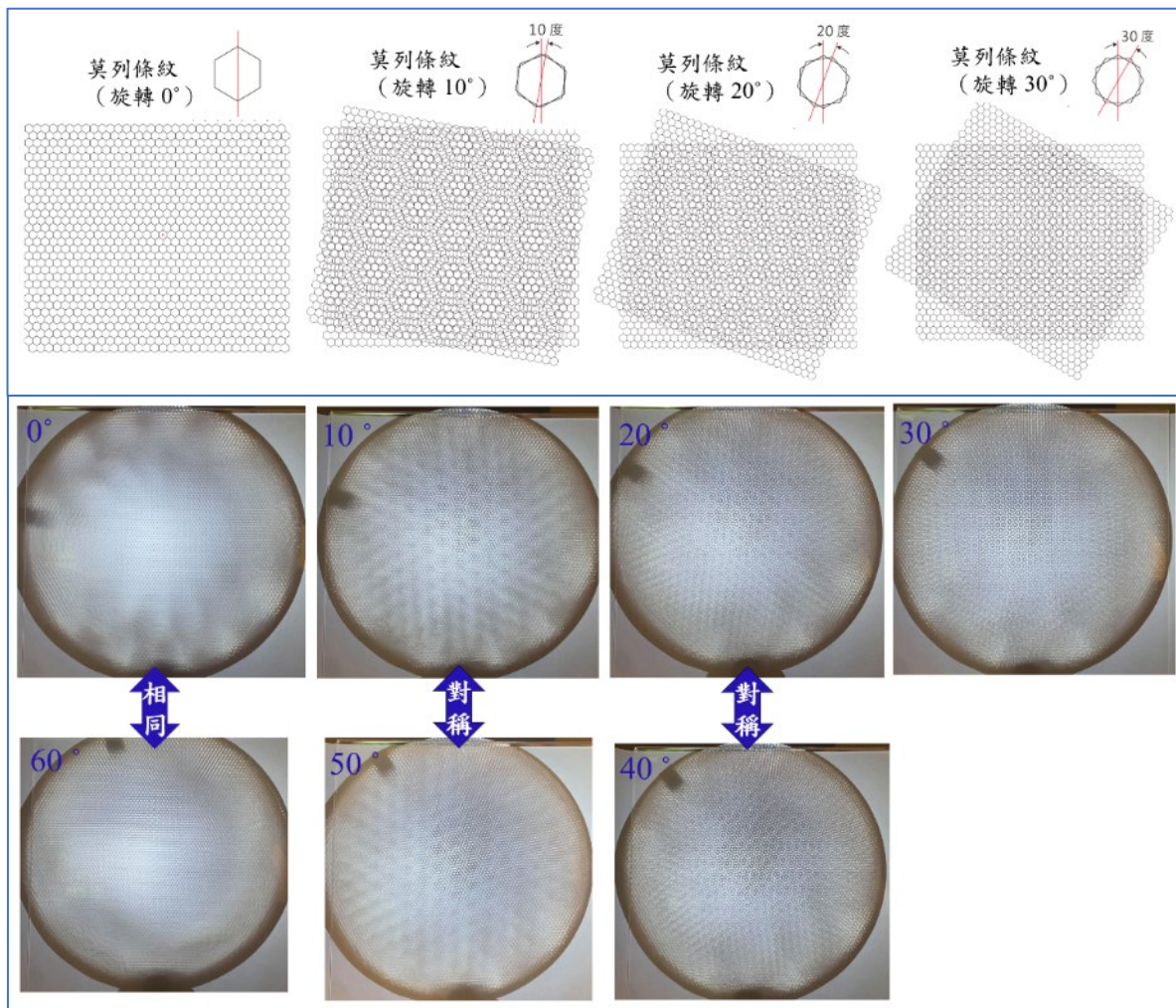


圖 40 兩片複眼鏡片不同重疊角度的莫列條紋

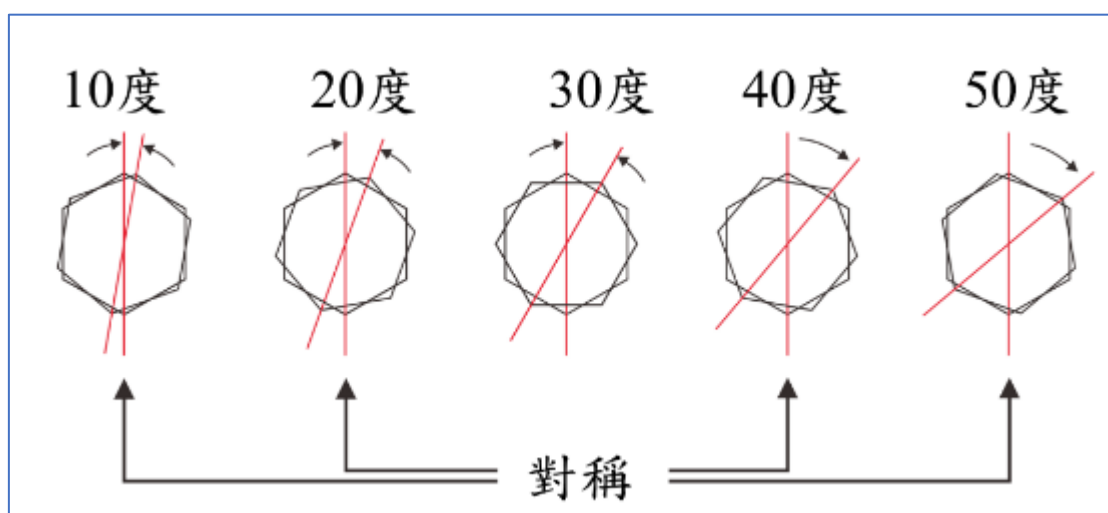


圖 41 不同重疊角度的莫列條紋對稱圖

(四) 實驗結果

運用兩片複眼鏡片不同重疊角度的莫列條紋，觀看節拍器手掌前後運動的動態成像，得到重疊角度 0°（同 60°）靈敏度為 0.40，重疊角度 10°（同 50°）靈敏度為 0.41，重疊角度 20°（同 40°）靈敏度為 0.48，重疊角度 30°的靈敏度為 0.45，可見重疊角度為 20°與 40°時，靈敏度最高，能看到最大的物體前後移動面積。



兩片複眼鏡片重疊的角度	手掌總移動面積 (像素)		手掌原本面積 (像素)		靈敏度
0° (同60°)	61494		155050		0.40
10° (同50°)	85228		209591		0.41
20° (同40°)	91158		187965		0.48
30°	81885		183656		0.45

圖 42 兩片複眼鏡片不同重疊角度的靈敏度計算

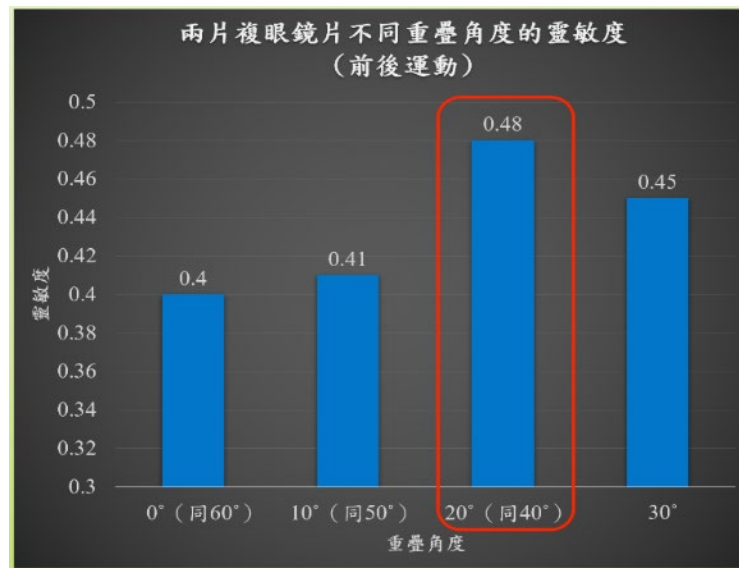


圖 43 兩片複眼鏡片不同重疊角度的的靈敏度結果

陸、討論

一、有關製作複眼模的材質

由於複眼非常小顆，且需要極佳的透光性，所以製作材質有其限制。本研究僅找出運用果凍蠟加入彈珠製作下層凹底膜，然後再加入 AB 兩劑調勻的矽

膠於上方製作凸透複眼膜，脫膜後完成複眼模，這個複眼模的優點是矽膠具有良好透光性，是未來適合製作複眼的材質，但限制是彈珠過於大顆，所以做不更小顆的複眼，且圓形小眼無法像真實複眼六角形一樣的緊密排列，圓形和圓形之間的空隙會影響成像結果，所以無法模擬複眼的成像。

二、有關複眼鏡片的成像

實驗使用網路上訂購的投影機專用複眼鏡片，由於複眼的小眼非常小顆，所以成像是由每一個小眼看到物體的一小個部分，全部組成為一個大影像，看起來就像由一個又一個的小點組成的馬賽克拼貼影像，和人眼所看到的清晰世界十分不同。



圖 44 複眼成像是由許多小點組成影像

三、有關複眼近看斑馬的視覺擾亂

科學家在最近的研究報導提出蒼蠅在飛行中，一但靠近斑馬視覺會被擾亂，所以可能會直接撞上，或者馬上離開，不太會停留在斑馬身上；但如果是一匹沒有條紋普通的馬，蒼蠅就會花比較長時間停留在馬身上（Caro et al., 2019）。但關於蒼蠅的視覺為何會被斑馬條紋擾亂卻是困擾科學家的問題，到底蒼蠅複眼看到的斑馬可能是怎樣，為什麼會造成視覺擾亂，好像可以在實驗三中找到了一些解答。

圖 45 是作者模擬蒼蠅複眼視角畫出的影像示意圖，當蒼蠅在遠距離看到前方的斑馬時，斑馬看起來還很小隻，在實驗中以斑馬圖案 1 倍大代表，複眼可以看到 83-87%斑馬外觀，斑馬條紋並不清楚；接著中等距離看到斑馬時，以斑

馬圖案 2 倍大進行成像實驗，複眼可以看到斑馬外觀降低到 56-59%，看到條紋的比例增加，透過外觀和條紋可以看出是一隻有條紋的斑馬；最後再靠近斑馬時，看到的斑馬更大隻了，以斑馬圖案 3 倍大進行實驗，發現複眼看到的斑馬外觀再降低到 26-36%，看到的幾乎都是斑馬條紋，視覺逐漸被斑馬條紋擾亂，已經難以分辨這是什麼物體。所以蒼蠅越接近斑馬時，其看到的斑馬影像越來越大，複眼看到的外觀則會越來越少，最靠近時看到一大堆黑白條紋的蒼蠅視覺已經被干擾，有可能看不出這是牠們最愛停留的馬而直接撞上或飛走。

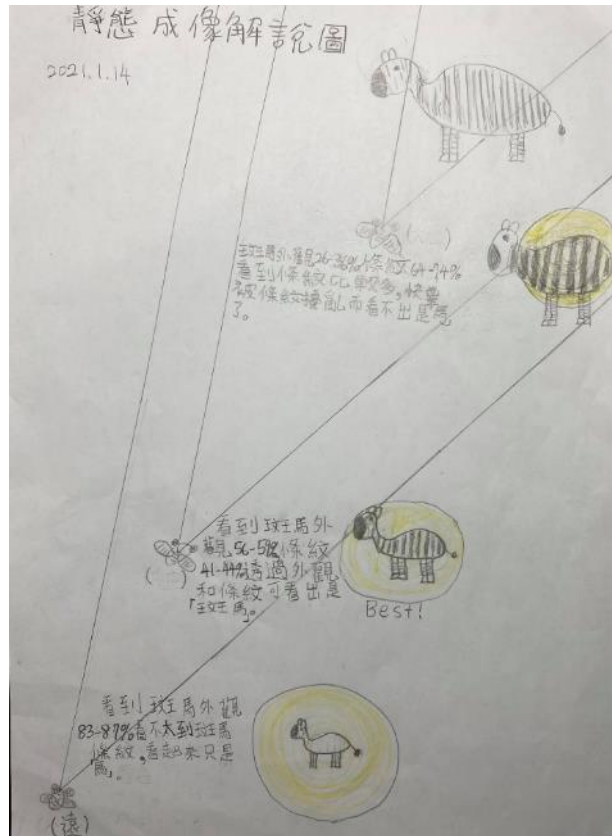


圖 45 模擬蒼蠅由遠到近看到斑馬影像的示意圖（作者畫圖）

有趣的是在這個實驗中，我們也模擬了人眼（拿掉複眼鏡片）看到的成像做為對照，結果發現人眼的水晶體具有調解焦距的功能，因此無論斑馬圖案大小，人眼都可清楚看到斑馬外觀約 70%、條紋 30%的比例，輕易地辨識這是斑馬；但複眼卻完全不樣，複眼看到的一大個拼貼組合影像，隨著距離越近斑馬影像越大，會逐漸看不清楚斑馬的外觀，被條紋擾亂而造成視覺上的錯亂。

四、有關複眼看移動的物體較靈敏

我們都有過拿蒼蠅拍想打蒼蠅時，蒼蠅總會先一步飛走的經驗，我也在實驗四發現複眼鏡片看到的物體移動面積遠遠高於人眼，也就是同樣節拍器速度為 $\nu = 120$ ，每張照片時間差 0.004 秒的成像中，複眼的靈敏度都比人眼高，可以看到比較大的移動面積，由此可知複眼雖然看到物體的解析度不高，但在觀看移動的物體時，其靈敏度遠遠高於人眼，也見證了大自然演化的神奇傑作。

複眼的功能原來不在於看清楚，而在於能敏銳看到物體的移動，幫助牠們在自然界的生存找到一席之地。

五、有關莫列條紋的影像

莫列條紋是某次玩複眼鏡片的意外發現，將兩片複眼鏡片疊在一起轉動，竟然會出現類似複眼，但又更複雜的形狀排列變化，實驗五觀察兩片疊加複眼鏡片轉動形成的莫列條紋，並運用不同角度的莫列條紋觀看手掌的前後運動，結果發現莫列條紋讓複眼的排列情況與密度變複雜，而且複眼尺寸也會因為重疊切割的關係而變小，靈敏度隨之提高，是個有趣的發現。

柒、結論

- 一、矽膠具有良好的透光性，是製作複眼的良好材質，但以目前的方式無法製作出更小顆且密集緊鄰的複眼，仍有待進一步研究。
- 二、複眼的「視」界和人眼完全不同，複眼的每一個小眼只能看到物體的一小部分，其成像是有許多顆小眼拼湊出一個大影像，有點像馬賽克的拼貼影像，解析度低。
- 三、靜態成像模擬蒼蠅複眼在遠處看到的斑馬比較小隻，近處看到的斑馬比較大隻，計算複眼看到斑馬外觀和身上條紋所佔的比例，發現斑馬圖案越來越大，複眼看到斑馬外觀所佔的比例越來越低（斑馬 1 倍大看到外觀 83-87%、斑馬 2 倍大看到外觀 56-59%、斑馬 3 倍大看到外觀 26-36%）。也就是複眼由遠而近靠近斑馬時，看到斑馬條紋的比例越來越高，複眼的視覺逐漸被斑馬條紋干擾；反觀人眼可以清晰調整焦距，無論斑馬圖案大小，看到的斑馬外觀都維持約 70%，並沒有被斑馬條紋擾亂的現象。
- 四、複眼看到物體移動的靈敏度高於人眼，無論前後運動（複眼靈敏度 0.42、人眼 0.20）或是左右運動（複眼靈敏度 1.23、人眼 0.71），同樣條件下的複眼都可以看到更大幅度的物體移動面積，也更容易接收移動中光影的變化，大自然賦予昆蟲的複眼是個奇妙的傑作，能滿足昆蟲必須敏銳察覺物體移動的生存之道。

五、兩片複眼鏡片疊在一起的莫列條紋影像，其複眼排列情況變複雜，密度也增加，其複眼結構可提高動態成像的靈敏度，當兩片複眼鏡片重疊角度為 20° 與 40° 時，觀看物體前後運動的靈敏度最高（靈敏度 0.48），也就是能看到最大的物體移動面積。

這個研究發現了複眼可以成像，且對移動物體感測靈敏，假如能在每一顆複眼後裝置一小型的光線感測器，透過組合每個感測器所感測到的光訊號，我們就可以快速的在電腦中呈現複眼影像，並可以透過複眼影像的變化，來感知物體的移動，還可更進一步藉由兩片複眼鏡片的旋轉角度變化，調整靈敏度。這樣的裝置有別於一般藉由複雜透鏡組合而成的成像裝置，雖然複眼影像是由許多複眼顆粒所組成，解析度低，但可以快速成像、具有高靈敏度等兩大優勢，未來應該是可以應用在各種無人探測的裝置上。

捌、參考文獻資料

修·萊佛士 (Raffles, H.) (2018)。蜻蜓的全視角的和蒼蠅的五倍速，複眼看見的是怎樣的世界？2021 年 5 月 2 日，取自 <https://pansci.asia/archives/138324>

國家地理 (2019)。斑馬究竟為什麼有條紋？一個困擾了科學家 150 年之久的謎題。2021 年 1 月 27 日，取自 <https://www.natgeomedia.com/science/article/content-7940.html>

游書桓、柯宇鴻、蘇汶建、陸智瑄 (2006)。昆蟲複眼對光敏感度之光學分析。第 46 屆全國中小學科展作品物理科。

鄒容 (2020)。黑白動物大揭秘。未來兒童，75。台北：遠見天下文化。

維基百科 (2020)。莫列波紋。2021 年 1 月 20 日，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8E%AB%E5%88%97%E6%B3%A2%E7%B4%8B>


維基百科 (2020)。複眼。2020 年 12 月 6 日，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E7%9C%BC>

Caro, T. et al. (2019). Benefits of zebra stripes: Behavior of tabanid flies around zebras and horses. *Plos One*. Retrieved from <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0210831>

【評語】 080112

本作品藉由投影片專用複眼鏡片來分析複眼看到物體的靜態及動態成像，並且探討莫列條紋的動態成像，實驗執行得很充實詳盡。作品總結斑馬條紋會干擾複眼影像，但是實驗的設計及最後結果(複眼/外觀顆粒佔比與人眼/外觀顆粒佔比分析的都是斑馬的外觀)與斑馬輪廓內部的條紋並無任何關聯。另外本作品經由計算總移動面積得到複眼對運動物體的靈敏度高於人眼，若實驗結果確實與總結陳述的是同一件事，則應可藉由基礎的光學理論解釋此現象。

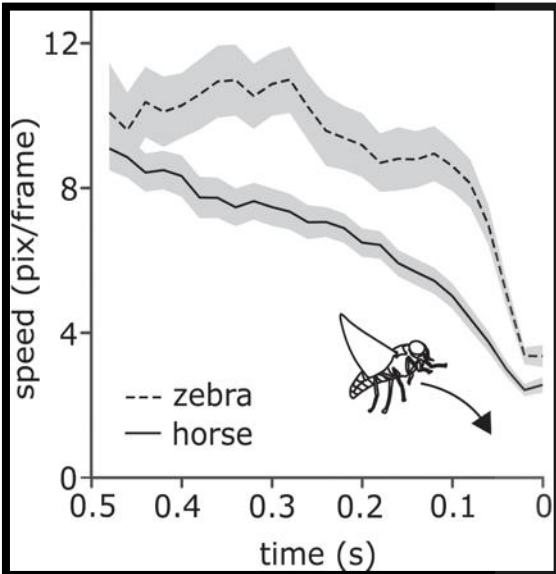
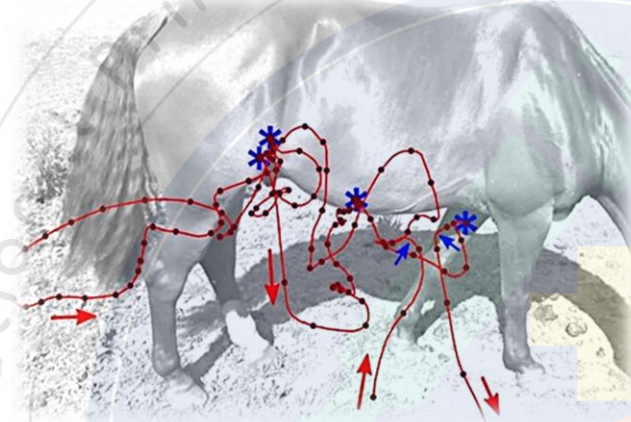
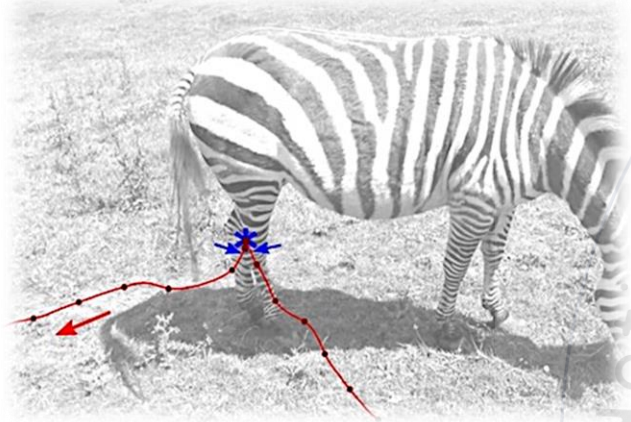
作品簡報



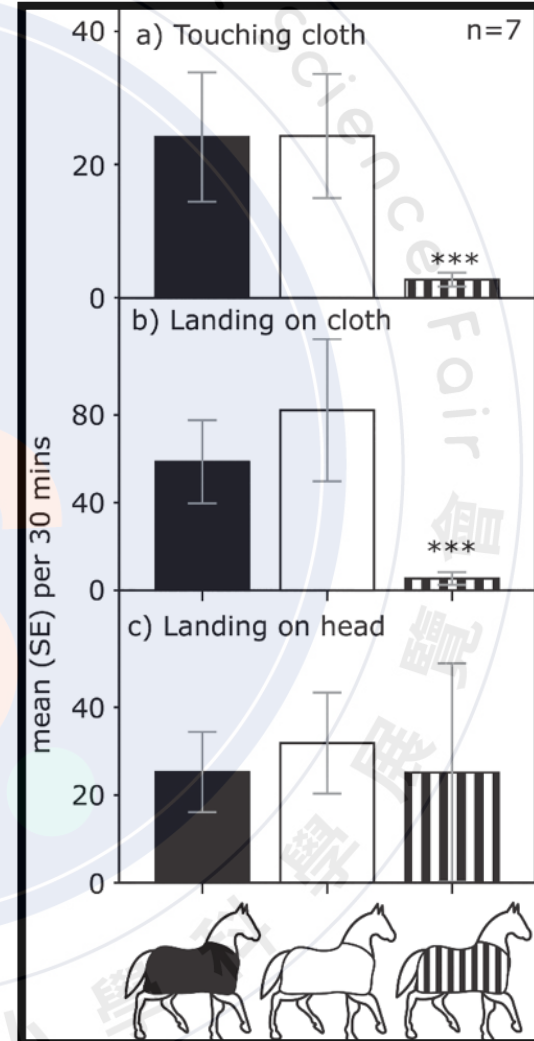
複眼「視」界不複雜

國小組 物理科

蒼蠅為何不會停留在斑馬身上？跟複眼有關嗎？



- 蒼蠅靠近斑馬時，無法降落停留叮咬。
- 蒼蠅靠近斑馬時不會減速降落，而是直接撞上飛走。



- 穿著斑馬條紋衣服的馬也能擾亂蒼蠅視覺，蒼蠅停留次數大大減少。

人眼與昆蟲複眼看到的世界到底有什麼不同？

- 大部分昆蟲都有單眼和複眼。
- 單眼：僅能感光**分辨亮暗**，無法成像。
- 複眼：由許多小眼緊密排列而成，每個小眼都是獨立的感光體，只能看到外界的局部影像，**複眼影像是由一顆顆的小眼所組成**，以蒼蠅為例約有4000多顆小眼組成複眼。
- 蒼蠅為何很難被打到？跟複眼有關嗎？



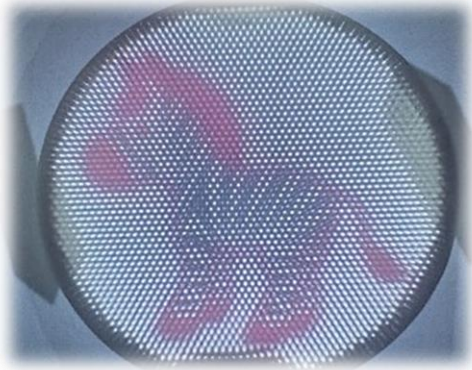
- 人的眼睛是一個**複雜且精密的光學系統**，與複眼構造很不一樣。
- 進入眼中的光線經過透光的角膜、虹膜、水晶體、和液態的玻璃體的折射，成像於視網膜上。
- 人的眼睛約有5.76億的像素。
- 人眼觀察物體運動主要依賴運動物體在視網膜上成像大小所發生變化。



研究架構

複眼「視」界

利用手機拍照與慢動作影片，輸入電腦用 ImageJ 軟體分析

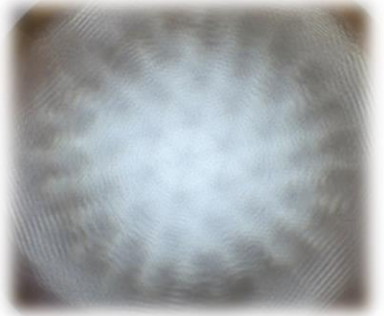


分析複眼看到物體的
「靜態」成像

實驗三

實驗四

分析複眼看到物體的
「動態」成像



實驗五

重疊兩個複眼鏡片的
「莫列條紋」成像

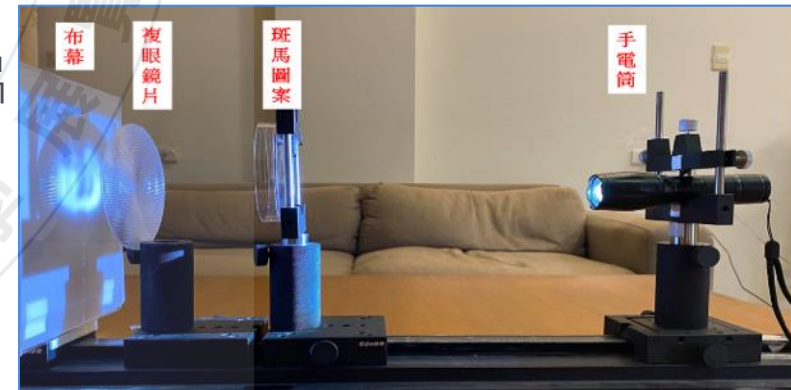
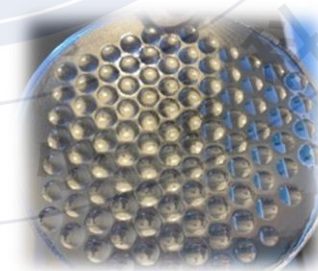


實驗二

探索手電筒、斑馬圖案、複眼鏡片和布幕不同距離的成像

實驗一

探索如何製作複眼膜



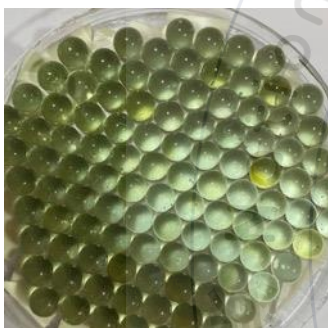
實驗一 探索如何製作透明複眼模

01



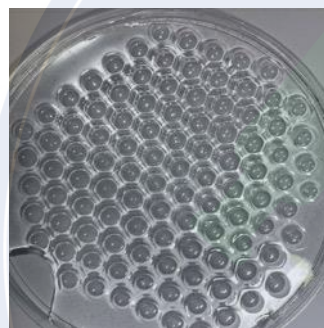
將果凍蠟用電磁爐加熱溶解後，倒入培養皿。

02



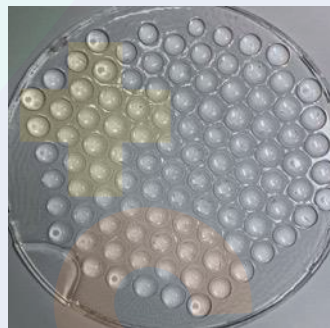
趁果凍蠟未凝固前放入彈珠，緊密鋪平排列。

03

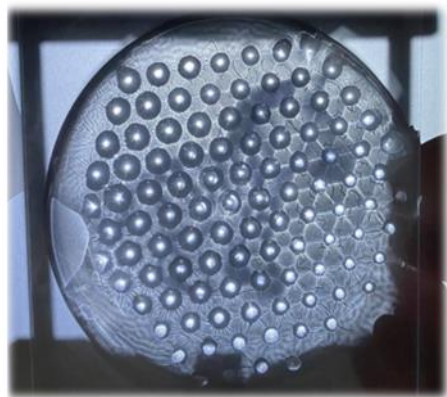


等待半小時果凍蠟凝固後，即可拿掉彈珠，脫模成為下層凹底膜。

04

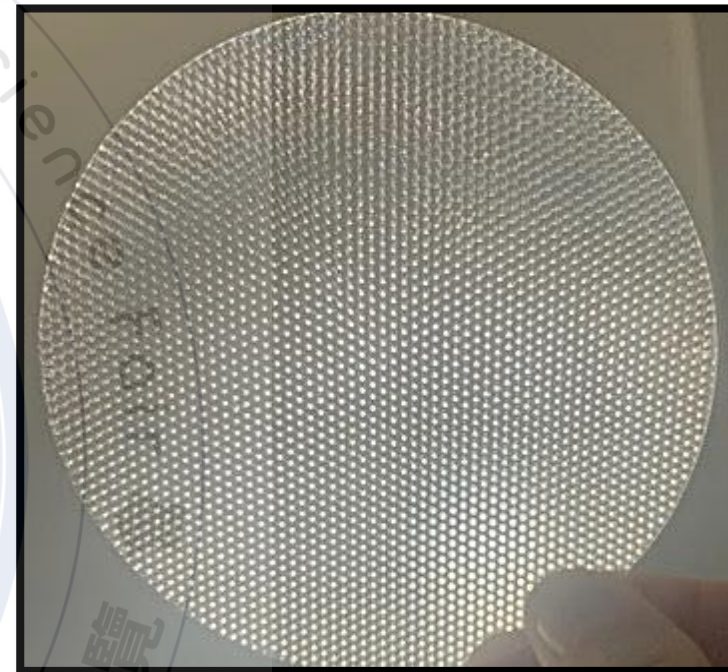


在下層凹底膜上注入矽膠，待兩天完全凝固後，脫模即可完成凸透複眼模。



自製複眼膜：

每顆小眼太大顆，且圓形小眼之間有空隙，無法模擬複眼看到的影像。

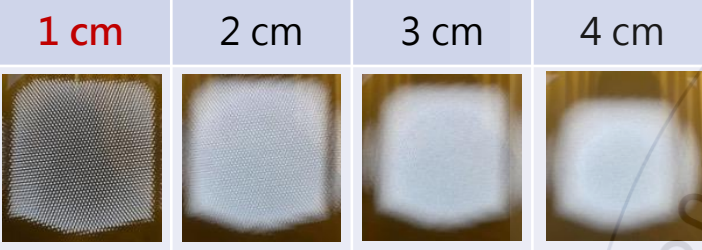


投影片專用複眼鏡片：

由許多直徑0.2 cm的六角形小眼緊密排列而成，可以模擬昆蟲複眼，進行成像實驗。

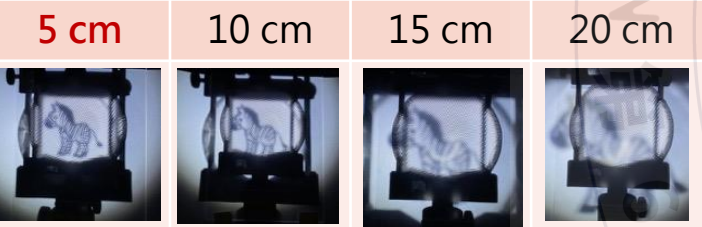
實驗二：探究手電筒、斑馬圖案、複眼鏡片和布幕不同距離的成像

複眼鏡片和布幕不同距離的成像 (距離A)



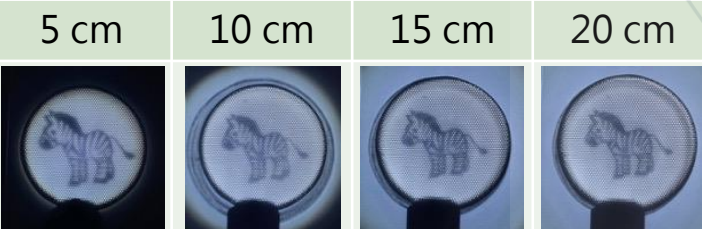
距離越小越清楚，距離1 cm時成像最清楚

複眼鏡片和斑馬圖案不同距離成像(距離B)

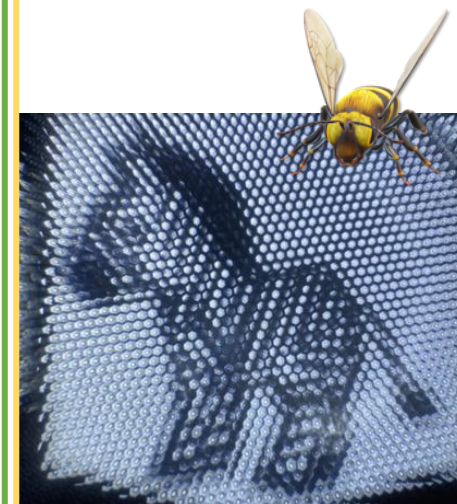
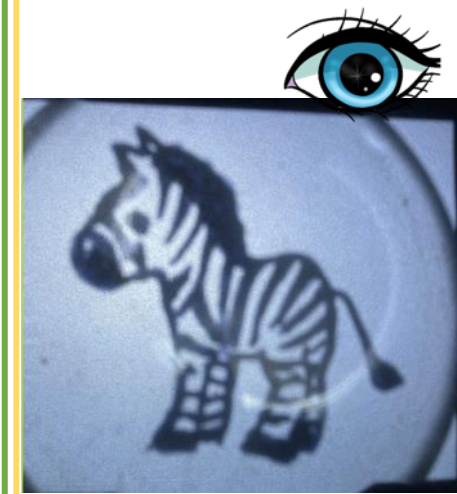
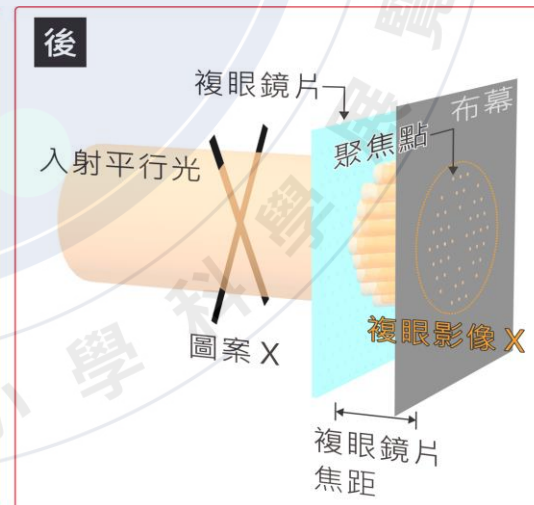
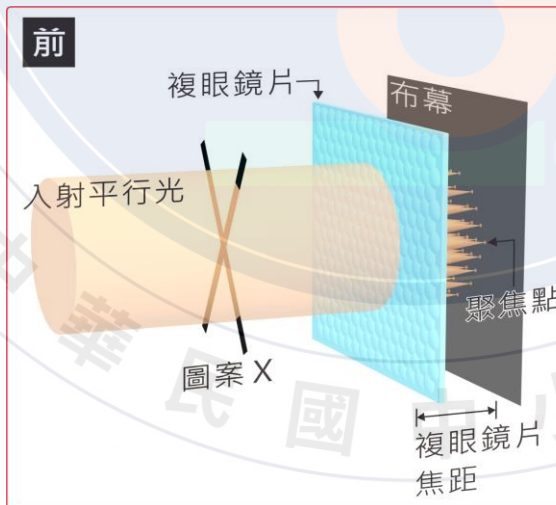
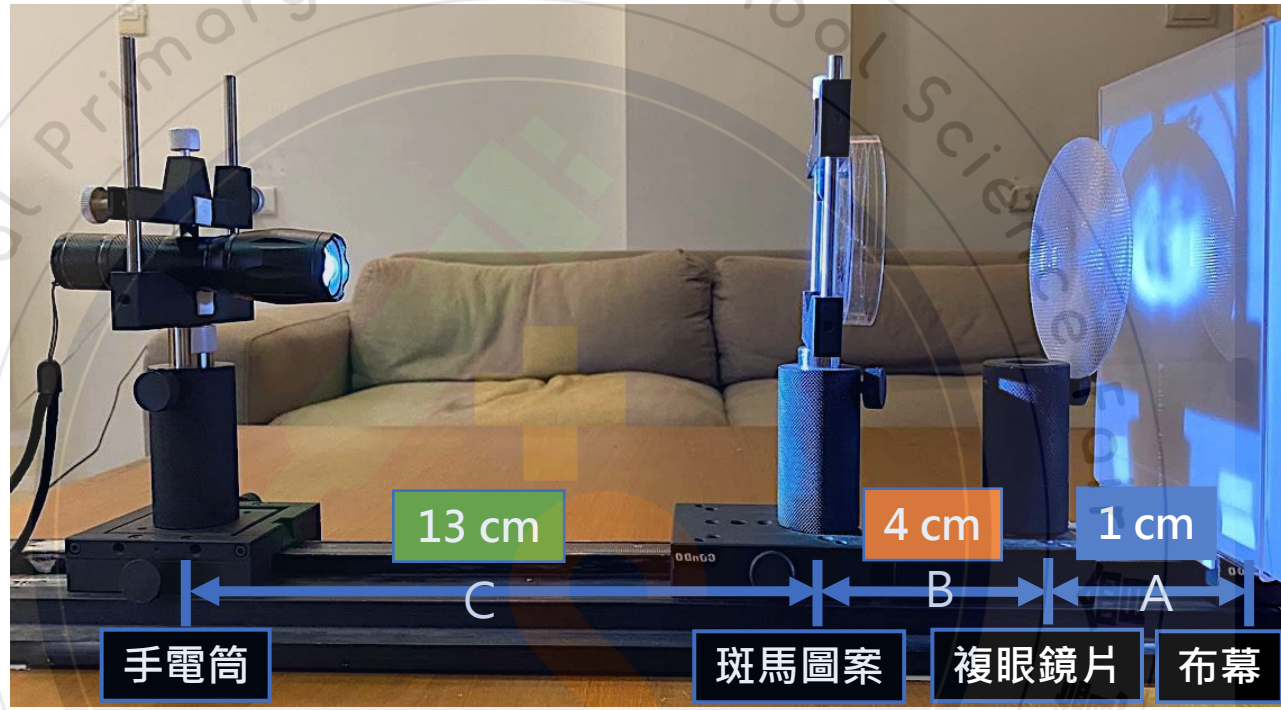


距離越小越清楚，距離5 cm時成像最清楚

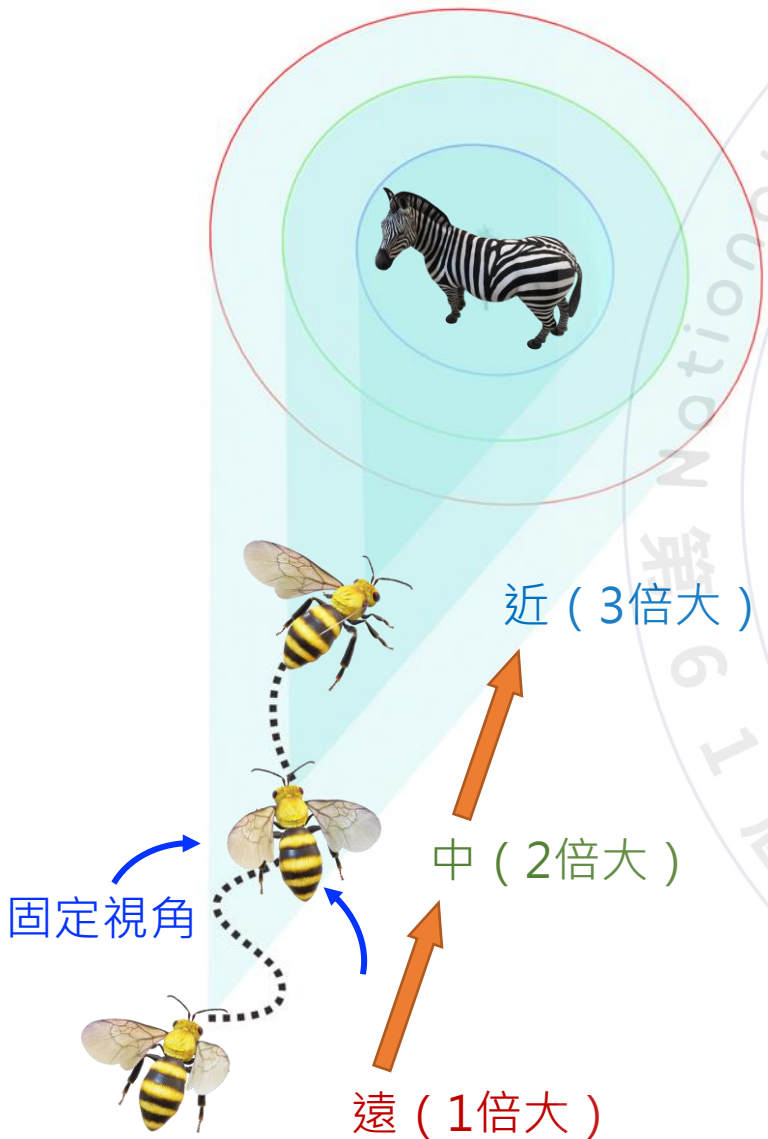
手電筒和斑馬圖案不同距離成像 (距離C)



不同距離的成像結果差異不大



實驗三：複眼看到的「靜態」成像 - 為什麼蒼蠅視覺會被斑馬條紋干擾？



研究方法



STEP 1 斑馬複眼影像 複眼影像
A B

STEP 2 影像運算: 影像 B-A


STEP 3 影像顆粒計算
Result: 614

STEP 4 影像畫素顏色區分
Red Only

STEP 5 影像紅色顆粒計算
Result: 158

Final STEP
 $\frac{158}{614} = 26\%$
斑馬外觀複眼顆粒佔比

研究方法



STEP 1 斑馬複眼影像 複眼影像
A B

STEP 2 影像運算: 影像 B-A

STEP 3 影像像素計算
Result: 403719

STEP 4 影像像素顏色區分
Red Only

STEP 5 影像紅色像素計算
Result: 278738

Final STEP
 $\frac{278738}{403719} = 69\%$
斑馬外觀人眼像素佔比

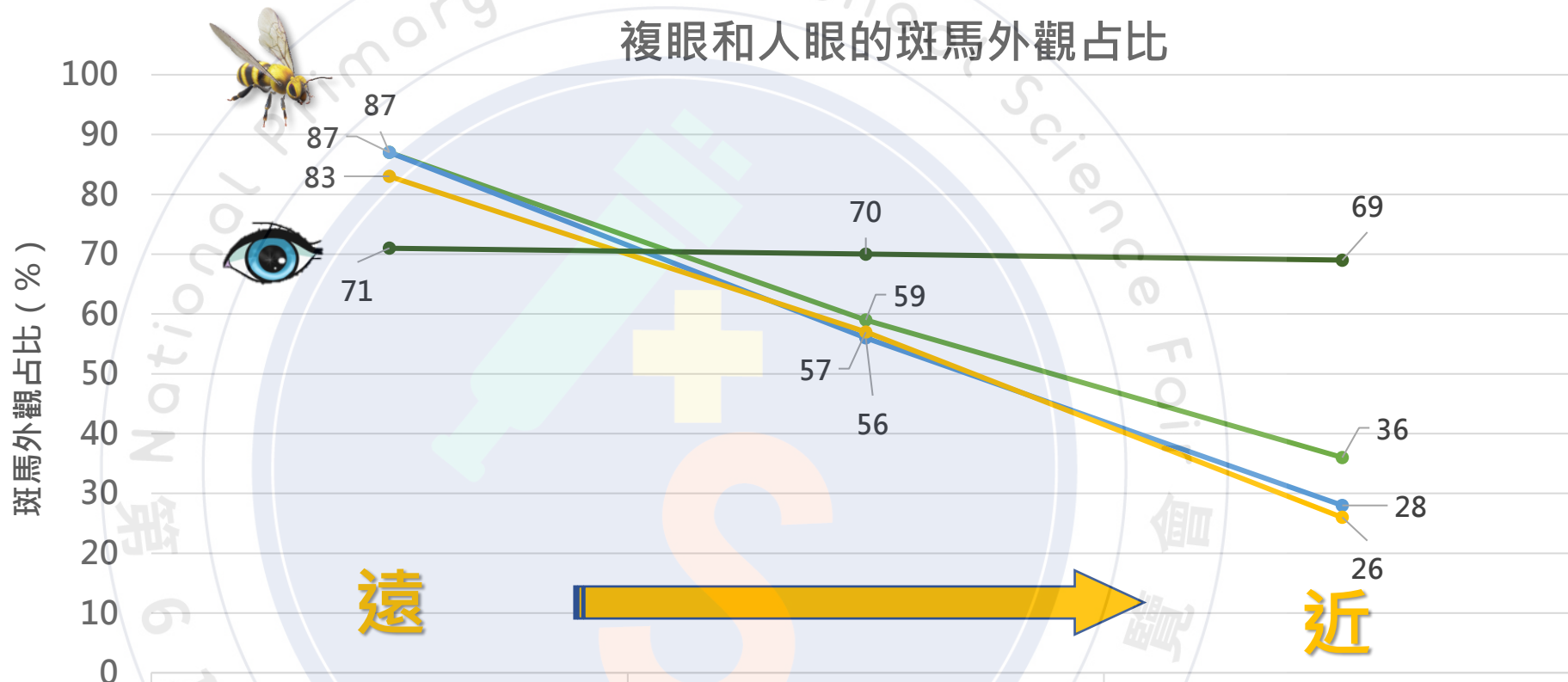
研究結果

斑馬圖案尺寸	複眼斑馬距離	外觀複眼數	總複眼數	複眼/外觀顆粒佔比	照片 (4 cm)
3倍大 (近)	4 cm	189	518	36%	
	5 cm	168	599	28%	
	6 cm	158	614	26%	
2倍大 (中)	4 cm	107	182	59%	
	5 cm	104	186	56%	
	6 cm	116	203	57%	
1倍大 (遠)	4 cm	47	54	87%	
	5 cm	47	54	87%	
	6 cm	60	72	83%	

研究結果

斑馬圖案尺寸	複眼斑馬距離	外觀像素	總像素	複眼/外觀顆粒佔比	照片
3倍大 (近)	4 cm	278738	403719	69%	
	6 cm	278738	403719	69%	
2倍大 (中)	4 cm	118182	169377	70%	
	6 cm	118182	169377	70%	
1倍大 (遠)	4 cm	30401	42826	71%	
	6 cm	30401	42826	71%	

我們發現了一個直接的證據：斑馬條紋真的會干擾複眼影像



	1倍大	2倍大	3倍大
● 複眼 (距離B : 4 cm)	87	59	36
● 複眼 (距離B : 5 cm)	87	56	28
● 複眼 (距離B : 6 cm)	83	57	26
● 人眼	71	70	69

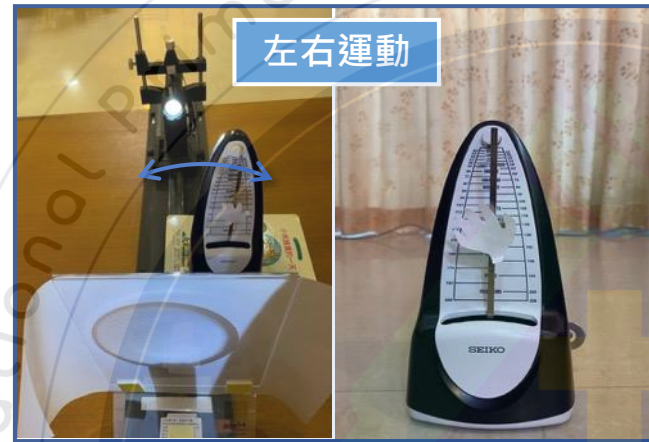
斑馬圖案大小

實驗四：複眼看到的「動態」成像 - 為什麼複眼對移動的物體較敏感？



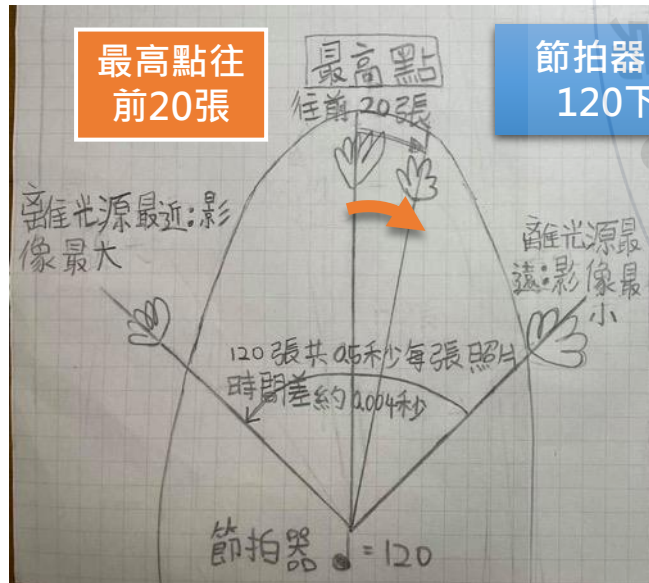
前後運動

節拍器側面放置，手掌擺動出前後運動



左右運動

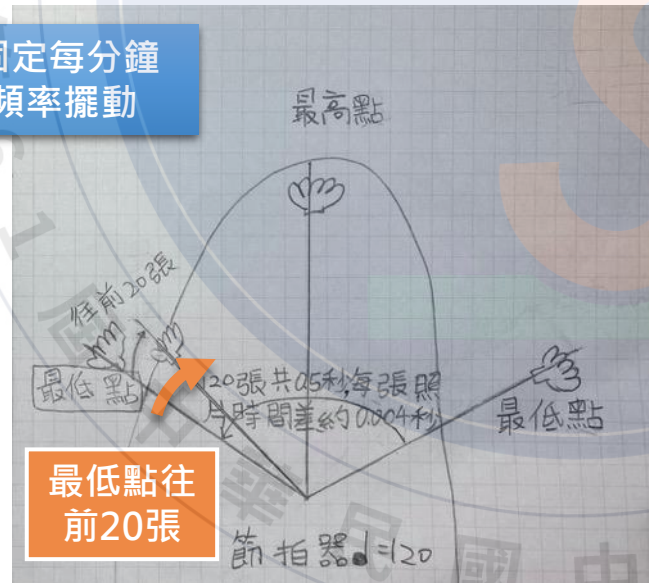
節拍器正面放置，手掌擺動出左右運動



最高點往前20張

節拍器固定每分鐘120下頻率擺動

從擺動的**最高點**往前擷取20張照片分析



最低點往前20張

從擺動的**最低點**往前擷取20張照片分析

計算動態成像的靈敏度 (前後運動)

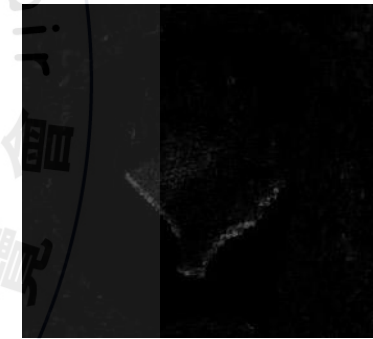


影片檔轉為圖片檔
從中擷取20張放入ImageJ分析，每張照片的時間差0.004秒

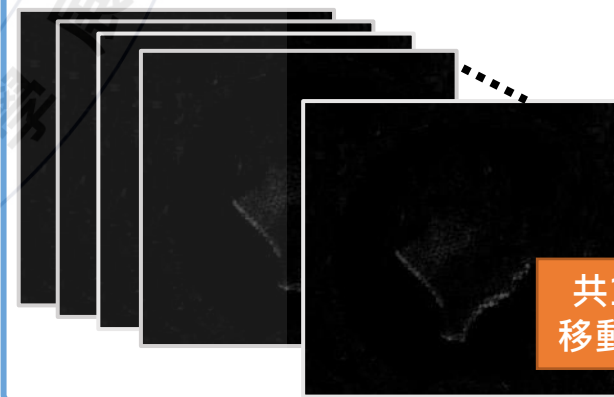
STEP 1：兩張照片相減得到移動面積



=



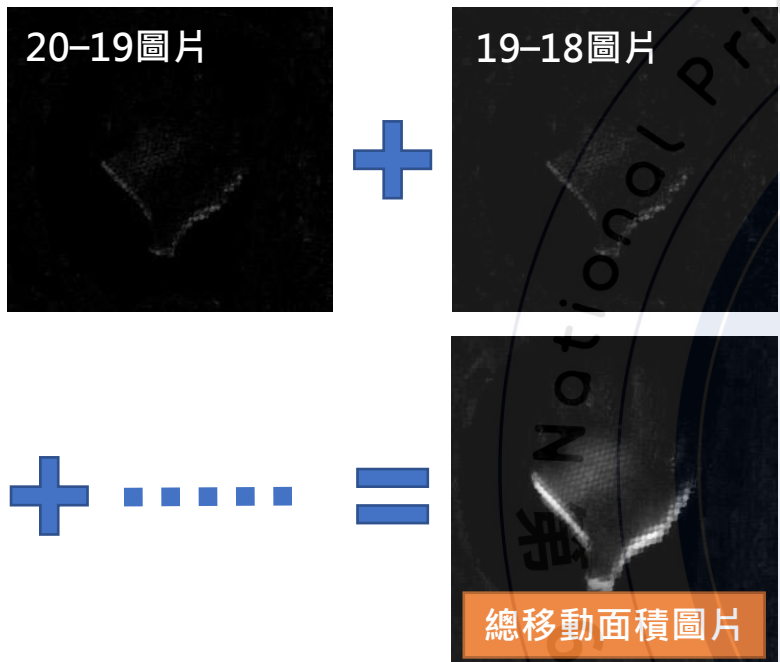
相隔0.004秒的移動面積 (20→19)



共19張手掌移動面積圖片

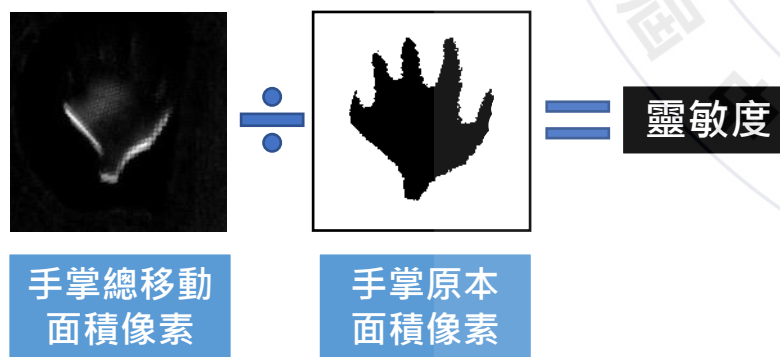
複眼的靈敏度高於人眼，無論是前後運動或左右運動

STEP 2：計算總移動面積

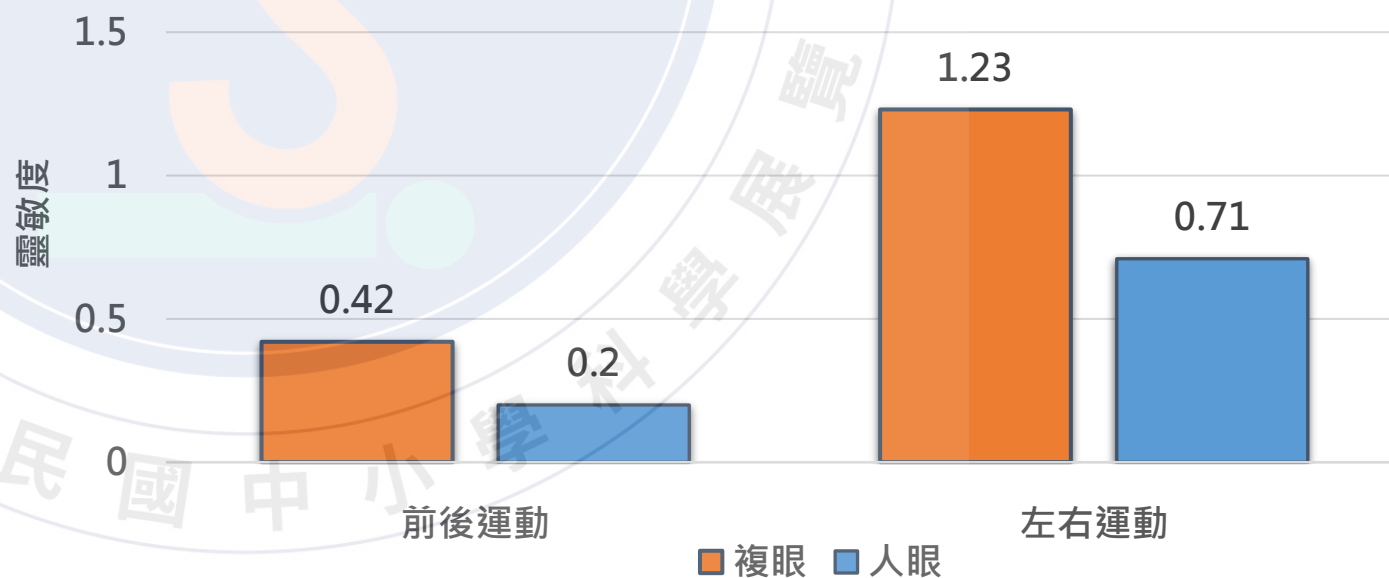


擺動類型		手掌總移動面積 (像素)	手掌原本面積 (像素)	靈敏度
前後運動	複眼	19175	45385	0.42
	人眼	2507	12665	0.20
左右運動	複眼	72882	59304	1.23
	人眼	9696	13665	0.71

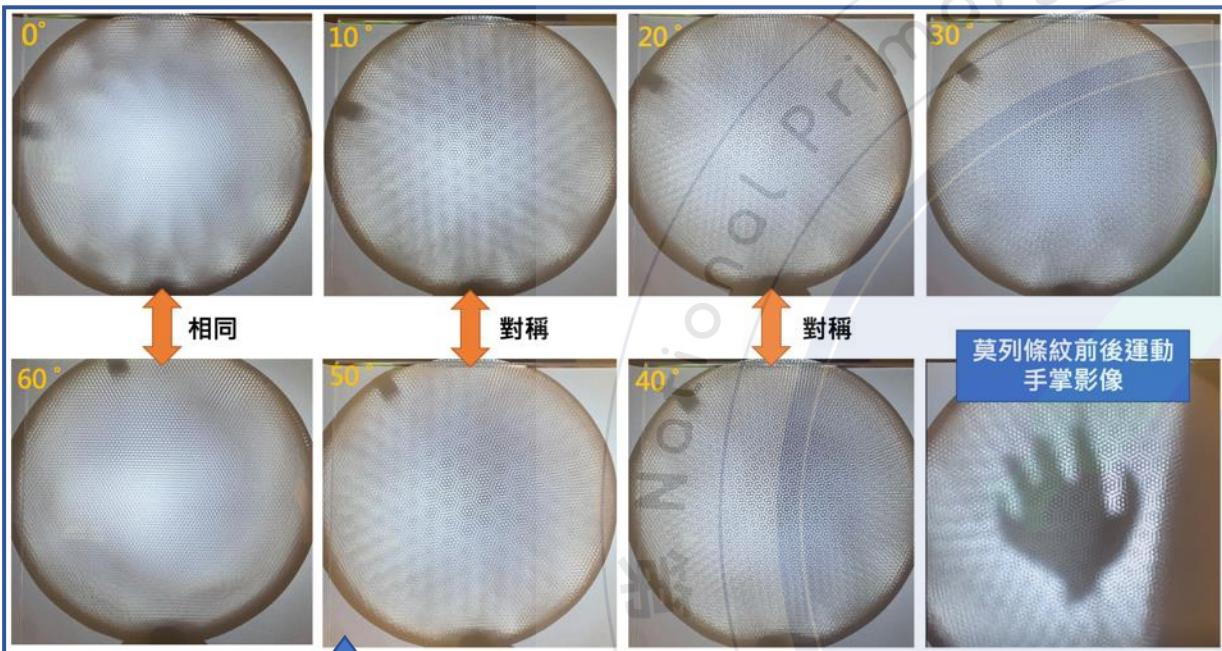
STEP 3：靈敏度計算



複眼和人眼看前後運動和左右運動的靈敏度

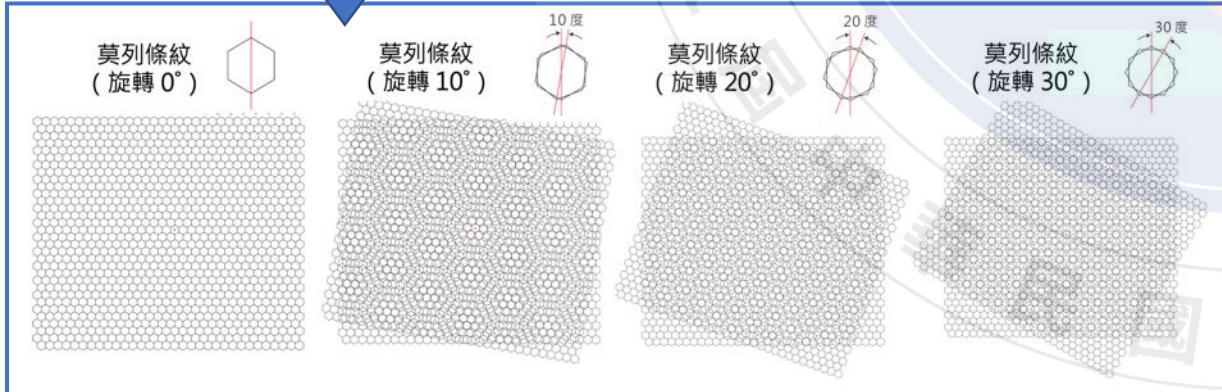


實驗五：探索重疊兩個複眼鏡片的莫列條紋動態成像

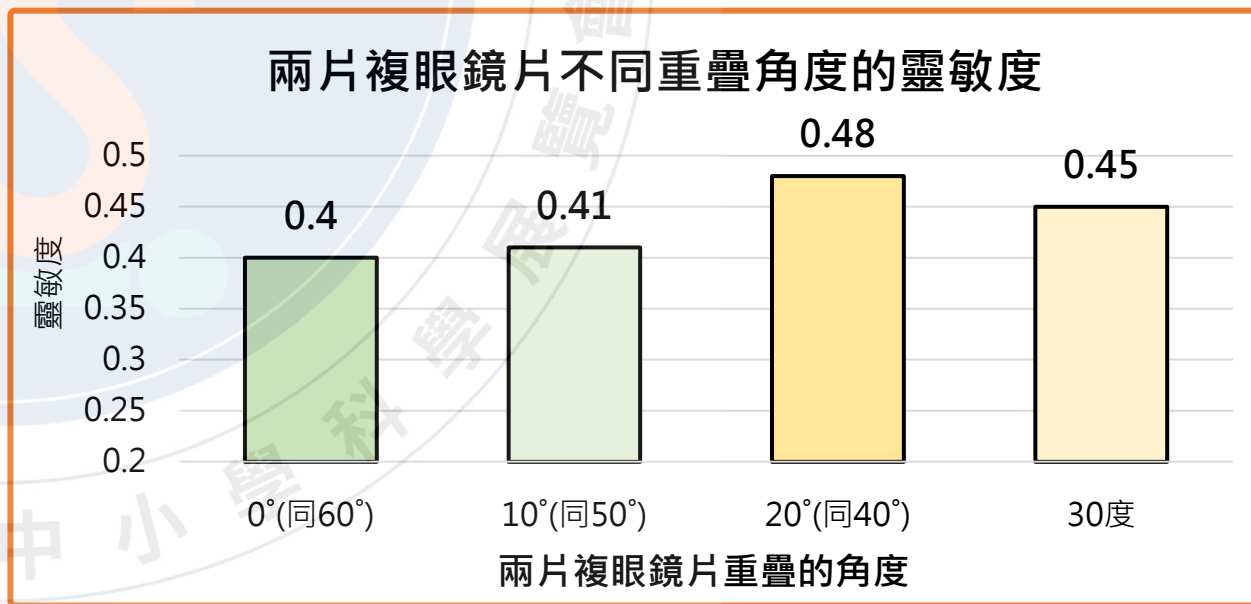


可直接對應

莫列條紋讓複眼的大小與排列變複雜



兩片複眼鏡片重疊的角度	手掌總移動面積 (像素)	手掌原本面積 (像素)	靈敏度
0° (同 60°)	61494	155050	0.40
10° (同 50°)	85228	209591	0.41
20° (同 40°)	91158	187965	0.48
30°	81885	183656	0.45



結論

- ❑ 複眼的「視」界和人眼完全不同，複眼的每一顆小眼只能看到物體的一小部分，由**許多顆小眼拼湊出一個大影像**，有點像**馬賽克的拼貼影像**。
- ❑ 我們找到**直接證據，證明斑馬的條紋確實可以干擾複眼影像**。複眼看斑馬時，越往前看到的斑馬越來越大隻，但看到斑馬外觀比例越來越低，也就是黑白條紋的比例越來越高，最後已經分辨不出眼前是一匹馬。
- ❑ 複眼可以**很靈敏的偵測到移動的物體**，複眼看移動物體的靈敏度高於人眼。也可以**利用莫列條紋來提升靈敏度**，以重疊角度 20° 與 40° 時靈敏度最高。**未來應該可以應用在各種無人探測的裝置上**。
- ❑ 原來**昆蟲複眼不是用來看清楚物體，而是用來更靈敏地偵測獵食者的移動**，複眼真是大自然演化的**精心傑作**。

參考文獻資料

- ❑ 修·萊佛士 (Raffles, H.) (2018)。蜻蜓的全視角的和蒼蠅的五倍速，複眼看見的是怎樣的世界？2021年5月2日，取自<https://pansci.asia/archives/138324>
- ❑ 國家地理 (2019)。斑馬究竟為什麼有條紋？一個困擾了科學家150年之久的謎題。2021年1月27日，取自<https://www.natgeomedia.com/science/article/content-7940.html>
- ❑ 游書桓、柯宇鴻、蘇汶建、陸智瑄 (2006)。昆蟲複眼對光敏感度之光學分析。第46屆全國中小學科展作品物理科。
- ❑ 鄒容 (2020)。黑白動物大揭秘。未來兒童，75。台北：遠見天下文化。
- ❑ 維基百科 (2020)。莫列波紋。2021年1月20日，取自<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8E%AB%E5%88%97%E6%B3%A2%E7%B4%8B>
- ❑ 維基百科 (2020)。複眼。2020年12月6日，取自<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E7%9C%BC>
- ❑ Caro, T. et al. (2019). Benefits of zebra stripes: Behavior of tabanid flies around zebras and horses. **Plos One**. Retrieved from <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0210831>