

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

第二名

080118

果凍視界：看不見的頻率，看得見的「聲影」

學校名稱： 新竹縣竹北市興隆國民小學

作者：	指導老師：
小五 翁子郁	徐志宇
小四 徐境彤	楊淑鈞
小五 郭芮希	
小五 陳昶婷	
小五 鄭宇岑	
小四 曾苡菲	

關鍵詞： 果凍效應 (Jello effect)、捲簾快門 (Rolling Shutter)、影像感光元件 (Image sensor)

摘要

探討果凍效應與捲簾快門間的關係及其應用，動機源自雨刷在錄影時產生變形，研究目的包括：（一）「測量 LED 燈閃爍頻率」，作為計算感光元件掃描速度的依據。（二）「測量不同攝影設備的掃描速度」作為後續測量的依據。（三）「探討如何運用捲簾快門測量快速變化的物體」（明暗變化、轉動、振動）（四）嘗試以捲簾快門記錄聲音振動，呈現可視化聲波形狀。研究發現不同設備的掃描速度不同，也影響變形程度，選擇合適的設備可減少影像扭曲或更適合測量不同變化速度的物體，證明捲簾快門可作為測量光源閃爍頻率、亮度變化、風扇轉速、弦樂器頻率的有效工具，也能捕捉聲音的「形狀」，拓展其於科學測量與攝影領域的應用價值。

壹、前言

一、研究動機

有一天上學坐在車裡，看著雨滴落在擋風玻璃上，突然，我注意到行車記錄中雨刷快速移動時，竟然產生了一種奇怪的視覺效果——雨刷看起來好像在擺動的同時變形了，像果凍一樣晃動！這讓我感到十分困惑，因為雨刷應該是直挺挺的來回擺動，為什麼它的形狀會變得扭曲呢？我拿出手機想要拍攝這個現象，結果發現當我錄影時，畫面中的雨刷並不像肉眼看到的那樣，而是出現了更奇怪的彎曲變形。

上網搜尋發現這種現象被稱為「果凍效應」，是因為數位相機的「捲簾快門」在拍攝快速移動物體時，感光元件是逐行掃描的，導致影像產生時間差，讓雨刷看起來像果凍般晃動。我們好奇果凍效應是否會因雨刷的速度不同而變化？如果使用不同的攝影設備，這種現象是否還會發生？除了雨刷以外，生活中還有哪些地方能觀察到果凍效應呢？帶著這些疑問，我決定邀請朋友們一起進行研究，透過實驗與分析，揭開果凍效應與捲簾快門之間的奧秘！

二、研究目的

（一）研究如何測量 LED 燈閃爍頻率

要測量相機捲簾式快門的掃描速率，要先有一個「變化快且已知速度」的目標當作比較基礎，也就是「已知移動速度的物體」或「已知閃爍頻率的光源」。「已知移動速度的物體」不好找（必須速度穩定，不能忽快忽慢），所以採用已知會穩定閃爍的光源當作比較標準，將光源閃爍的慢動作錄影拆成照片，算出閃爍頻率。

實驗一：測量 LED 燈閃爍頻率

（二）用已知閃爍頻率的光源測量 CMOS 捲簾快門的掃描速度

在閃爍光源下拍照，會出現條紋，要瞭解相機快門時間和感光度設定是否會影響條紋，才能用條紋的像素計算感光元件的掃描速度（pixels /sec 或 列/sec）。

實驗二：在閃爍光源下相機快門時間和感光度對條紋的影響

實驗三：測量不同手機（相機）和數位相機 CMOS 捲簾快門的掃描速度

（三）研究如何應用 CMOS 捲簾快門測量物體變化的速度（明暗變化、轉動、振動）

實驗四：用捲簾快門測量各種光源閃爍頻率及亮度變化

實驗五：用捲簾快門的果凍效應測量電風扇的旋轉速度

實驗六：用捲簾快門的果凍效應測量琴弦振動頻率

（四）研究如何應用 CMOS 捲簾快門拍攝有趣題材

實驗七：用捲簾快門的果凍效應拍出聲音的「形狀」

三、文獻回顧

(一) 科展相關研究

表 1-3-1 科展相關研究搜尋結果 (臺灣網路科教館-科展作品檢索)

搜尋關鍵字	搜尋結果	研究探討內容
果凍效應	有趣的果凍效應-第 60 屆全國科展 (僅一筆)	手機如何能拍到柱子傾斜? 可否使用影印機, 來模擬捲簾快門? 如何推測相機快門的掃描方向? 車速是否影響目標物傾斜的角度? 光線強弱, 是否影響果凍效應的拍攝?
捲簾快門	同上	

學習心得：在臺灣網路科教館搜尋全國科展作品，只有以關鍵字「果凍效應」找到一篇相關研究，探討內容如表 1-3-1，與我們預計研究方向（測量物體變化的速度（明暗變化、轉動、振動）不同。

(二) 捲簾快門 (Rolling Shutter)

常見的相機快門有「機械快門」(Mechanical Shutter) 和「電子快門」(Electronic Shutter)。電子式快門可分為捲簾快門 (Rolling Shutter) 和 全域快門/全局快門 (Global Shutter)。Global Shutter 讓個感光元件同步讀取所有像素，而 Rolling Shutter 在曝光時逐行讀取。

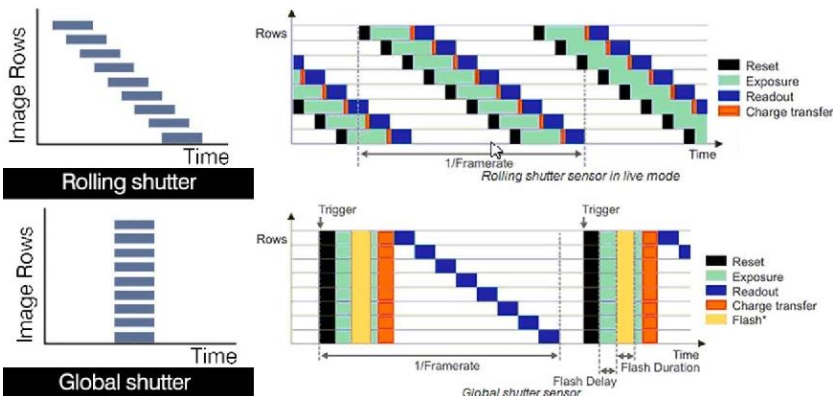


圖 1-3-1 捲簾快門(Rolling Shutter)與全域快門/全局快門(Global Shutter)比較
本圖引自「SEMANTICSCHOLAR」網站

S5ii Rolling Shutter Measurements (1-30-2023) Firmware 1.00		
Mode	Resolution + Framerate	Rolling Shutter (ms)
Full Sensor	4K UHD 24/30p	20.3
	6k, 3:2 24/30p	24.2
	6k, 17:9 24/30p	19.2
	5.9k - 16:9 24/30p	20.0
	1080p 24/30	20.3
	1080p 60	10.3
	1080p 120	5.0
Crop Mode APS-C	C4K 24/30p	19.2
	4K 24/30/60p	13.7
	3.3k 24/48p	15.8
	C4K 24/30/60p	13.3
	1080p 24/30	13.3
	1080p 60	13.3
	1080p 120	5.0
Pixel : Pixel	4K 30p	13.7
	C4K 30p	13.3
	1080 30/60p	6.7

圖 1-3-2 S5ii 捲簾快門測試資料
本圖引自「reddit」網站

(三) 果凍效應 (Jello Effect) :

果凍效應是攝影機本身特性決定的，採用 CMOS 感測器的相機使用捲簾快門逐行曝光直到所有像素點都被曝光。所有曝光動作在極短時間完成，一般不會對拍攝造成影響，但如果被拍攝物體相對於相機高速運動或快速震動時，用捲簾快門方式拍攝，逐行掃描速度不夠，拍攝結果出現「傾斜」、「搖擺不定」或「部分曝光」等情況。這種捲簾快門方式拍攝出現的現象，就是果凍效應。



圖 1-3-3 捲簾快門造成果凍效應

上圖依序引自「知乎」、「Mio ONAIR 小教室」、「程鋒科學教育工作坊彭大立」、「youtube@yoyophysics 截圖」網站

學習心得：果凍效應的成因是捲簾快門，捲簾快門會讓相片不同位置拍到影像的時間有時間差，所以可以用來測量變化快的事物，但要用捲簾快門測量要先知道捲簾快門的掃描速度，所以要先用穩定、變化快且已知變化速度的事物來測量。

(四) 頻閃 (Strobe)：

LED 燈或光源的頻閃，是指光輸出時明暗變化的波動特性，光源在交流或直流電源的驅動下，隨電流幅值周期，亮度發生相應的變化，變化主要有兩個方面，一是變化的周期特性，即頻率；另一個是變化的幅度，即振幅大小。

交流電會週期性的開關，因此連接到交流電源的 LED 燈會出現閃爍。

閃爍的光源會出現亮度的快速波動，這些波動的幅度使用稱為閃爍百分比的測量方法，而閃爍指數使用波形的積分（即曲線下面積）計算。

閃爍百分比(Percent Flicker) = $100 * (A-B) / (A+B)$

閃爍指數(Flicker Index) = 高於平均值的面積 / 總面積 = $\text{Area 1} / (\text{Area 1} + \text{Area 2})$

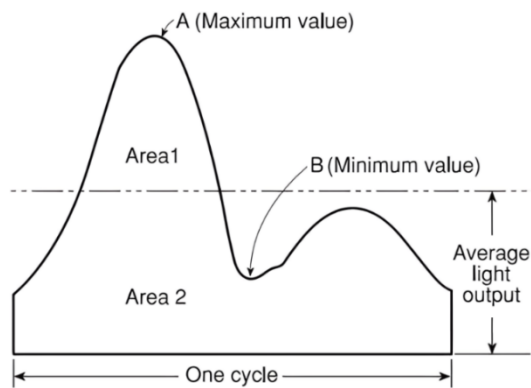


圖 1-3-4 閃爍百分比與閃爍指數

本圖引自「LEDBenchmark-Measuring Flicker」網站



圖 1-3-5 市售 LED 燈泡的閃爍標示

本圖翻攝自 LED 燈泡產品包裝



學習心得：使用交流電的 LED 燈常有頻閃現象，閃爍頻率是源自交流電的變化頻率，所以頻率穩定，可以用來比對感光元件的掃描速度，照片中一個頻閃週期造成的明暗條紋寬度，就是感光元件一個頻閃週期經歷時間內掃描過的像素列數。

(五) RGB 三原色模型 (RGB color model)：

色光三原色指的是紅(Red)、綠(Green)、藍(Blue)三種色光，稱為三原色的原因，是由於它們無法再被分解，也不能由其他色光混合出來。RGB 三原色模型 (RGB color model) 是一種加色模型，三原色光以不同的比例相加混色，生成各種色光，色光混合後，會形成比原本明亮的色彩，稱作「加法混合」。

學習心得：照片中像素的 RGB 值代表顏色是由不同強度的三原色光「混加成的」，數值越高代表色光的強度越大，我們可以透過像素的 RGB 值比較像素的亮度和顏色。

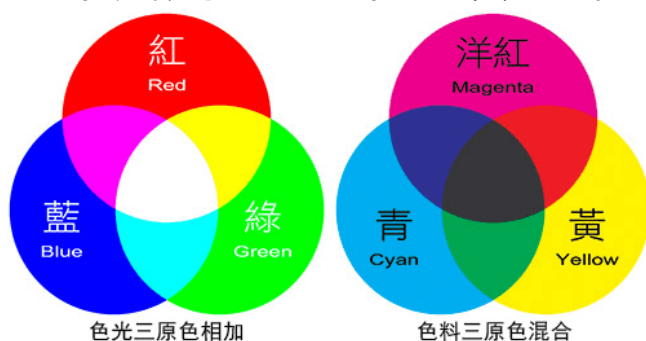


圖 1-3-6 三原色模式

本圖引自「gameislearning」網站

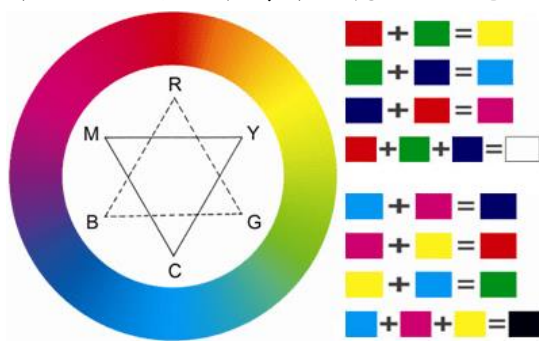


圖 1-3-7 三原色的混合

本圖引自「gameislearning」網站

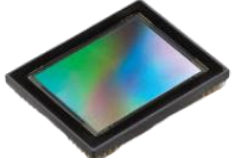
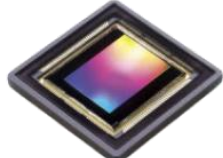
(六) 影像感光元件 (Image sensor)：

感光元件是將光學影像轉換成電子訊號的設備，主要分為感光耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 和互補式金屬氧化物半導體主動像素感測器 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 兩種。

影像感測器的曝光時間通常由傳統機械快門（如底片相機）或電子快門控制。電子快門可以是「全局」（或「全域」）的，整個影像感測器區域的光電子累積同時開

始和停止；也可以是「滾動」的，每行的曝光間隔緊接著該行的讀出，在「滾動」的過程中穿過圖像框架（通常在橫向格式中從上到下）。

表 1-3-2 CCD 和 CMOS 比較表（自行整理資料，圖片引自「TELEDYNE Vision Solutions」網站）

感光元件	 CCD Sensors CCD(電荷耦合元件)	 CMOS Sensors CMOS(互補金屬氧化物半導體)
影像品質	影像品質高，色彩準確度好，雜訊低。在某些情況下動態範圍有限。解析度通常較低。	進步縮小了差距；現代 CMOS 可以提供出色的影像品質。支援更高的分辨率。低光照條件下仍可能出現雜訊。
耗電量	較耗電。可能會產生更多的熱量	較省電。發熱往往較少，但功率效率取決於特定設計。
快門	通常具有全域快門。	可以有全域快門，但不是通用的；一些 CMOS 感測器使用捲簾快門。

學習心得：CMOS 感光元件因為成本低，影像品質接近 CCD，成為多數數位相機和手機鏡頭的感光元件，因為使用捲簾快門，所以拍攝變化快的場景時，會出現果凍效應。

（七）感光度（Light sensitivity, Film_speed）：

感光度，又稱為 ISO 值，是衡量底片對於光的靈敏程度。數位相機並不存在底片上的化學反應，感光度是類似於膠片感光度的一種指標，是一種等效感光度。ISO 值數字高一倍代表感光度提高一倍。例如，ISO200 的感光能力較 ISO100 高一倍，當所有參數和環境都一樣的狀況下，ISO200 的照片會比 ISO100 的照片亮一倍。



圖 1-3-8 曝光三要素對照片的影響
本圖引自「Tim Ting Photography」網站



圖 1-3-9 相同光圈和快門時間，不同感光度的影響
本圖引自「維基百科」網站

學習心得：相機設定的 ISO 值越高，感光能力越高，照片越亮；設定的 ISO 越低，感光能力越低，照片越暗；文獻找不到感光度對照片中頻閃條紋的影響，可以設計實驗看看二者之間的關係，如果感光度不會影響頻閃條紋寬度，就能透過照片中的條紋測出感光元件的掃描速度。

（八）全波整流和半波整流（AC/DC 轉換）

將 AC（交流電壓）轉換為 DC（直流電壓）的整流方式有全波整流和半波整流。全波整流通過二極體橋式電路結構將輸入電壓的負電壓成分轉換為正電壓後整流成直流電壓（脈衝電壓），而半波整流是使用一個二極體來消除輸入負電壓成分後整流為直流電壓（脈衝電壓）。

表 1-3-3 交流電的全波整流和半波整流(取自電子小百科-Electronics Trivia | 羅姆半導體集團-ROHM Co.)

	全波整流	半波整流
電路結構		
輸入電壓波形		
整流後的電壓波形		
整流平滑後的電壓波形		

學習心得：交流電的頻率是 60Hz，經過全波整流頻率會變為 120Hz，應該就是市電光源的閃頻是 120Hz 的原因。

(九) 脈衝寬度調變 (Pulse Width Modulation, PWM)：

脈衝寬度調變 (PWM) 是一種常用於電子和電機工程中的技術，通過調整脈衝的持續時間 (即寬度) 來調節通過電路的平均電流。脈衝 (Pulse) 是一種短暫的電流或電壓變化。脈衝寬度 (Pulse Width) 是指脈衝的持續時間。

脈衝寬度調變就是在開關上玩一個時間遊戲。如果開關打開的時間比關閉的時間長，那麼通過的平均電流就會更多，這種開和關的比例決定了電力的輸出。

如圖 1-3-11 的 high 改成 5ms，low 改成 15ms，LED 就會變成亮 5ms，熄滅 15ms。這時 LED 一秒閃爍 50 次 (因為週期是 20ms，一秒亮暗 50 次)，但是亮起來的時間只有四分之一，或是 25%。因為人眼的視覺暫留極限大概是 25Hz，或是 40ms (因此電影是每秒 24 張)，人眼就看不出燈在閃，會覺得恆亮，但亮度只有四分之一。

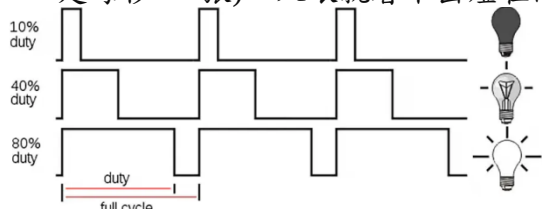


圖 1-3-10 以脈衝寬度調變調光的原理
本圖引自「Medium」網站

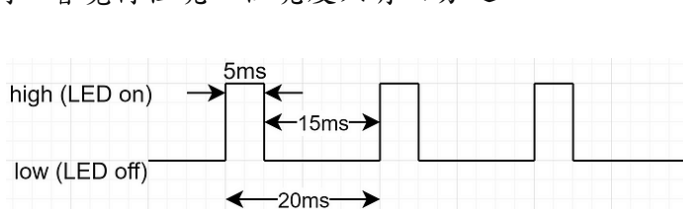


圖 1-3-11 脈衝寬度調變的時序
本圖引自「Medium」網站

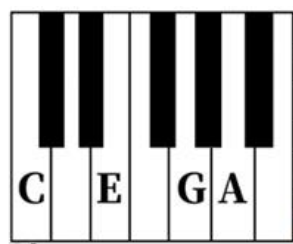
學習心得：PWM 常用在 LED 光源調光，所以 PWM 調光 LED 只要亮度調暗，有「LED off」就會出現閃爍情況，在捲簾快門拍攝下就會出現黑白分明的條紋。

(十) 烏克麗麗 (Ukulele)：

一種夏威夷的撥弦樂器，歸屬在魯特琴樂器一族，有數種尺寸：高音烏克麗麗、中音烏克麗麗、次中音烏克麗麗和男中音烏克麗麗。烏克麗麗一般有四根弦，以 GCEA 調音 (由左至右)。根據尺寸不同，有 16 至 22 個音格。

表 1-3-4 烏克麗麗分類表 (引自「Guitar to go - music company」網站)

種類	有效弦長	琴身總長	琴格	定弦	其他定弦
Sopranino	11" (28cm)	16" (40cm)	10-12	D5-G4-B4-E5	C5-F4-A4-D5
Soprano	13" (33cm)	21" (53cm)	12-15	G4-C4-E4-A4	A4-D4-F#4-B4
Concert	15" (38cm)	23" (58cm)	15-18	G4-C4-E4-A4	G3-C4-E4-A4
Tenor	17" (43cm)	26" (66cm)	17-19	"High G": G4-C4-E4-A4 "Low G": G3-C4-E4-A4	D4-G3-B3-E4
Baritone	19" (48cm)	29" (74cm)	18-21	D3-G3-B3-E4	C3-G3-B3-E4
Bass	20" (51cm)	30" (76cm)	16-18	E2-A2-D3-G3	
Contrabass	21" (53cm)	32" (81cm)	16	E1-A1-D2-G2	"Drop D": D1-A1-D2-G2



烏克麗麗	吉他
G (第四弦)	第一弦的第3格
C (第三弦)	第二弦的第1格
E (第二弦)	第一格的空弦音
A (第一弦)	第一弦的第5格

▲ 吉他對應到烏克麗麗的空弦音G·C·E·A
 ◀ 鋼琴鍵對應到烏克麗麗的空弦音G·C·E·A



圖 1-3-12 各部名稱
 本圖引自「璃思維スタジオ」
 制作 | LiSWEi 網站

圖 1-3-13 烏克麗麗調音方式
 本圖引自「Guitar to go - music company」網站

圖 1-3-14 調音方式
 本圖引自「Guitar to go - music company」網站

學習心得：烏克麗麗是常見的弦樂器，可以用果凍效應拍出波浪狀的琴弦。先將四條弦調成標準音，看看拍出琴弦形狀計算出來的頻率會不會相同。

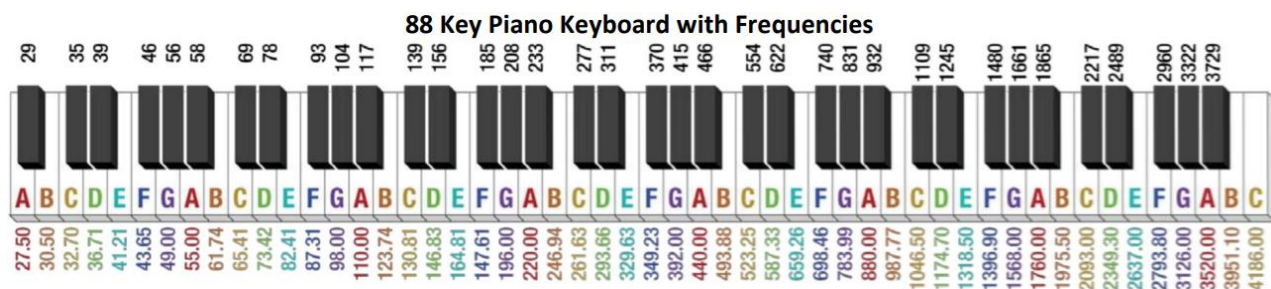


圖 1-3-15 88 鍵鋼琴各鍵音名及發音頻率 (本圖引自「All Ears Hearing」網站)

(十一) 雷射聲波杯 (國立科學工藝博物館-科學學習中心)

雷射聲波杯影像自「國立科學工藝博物館-科學學習中心」Youtube 截取。



圖 1-3-16 科工館雷射聲波杯影片



圖 1-3-17 雷射聲波杯成品



圖 1-3-18 雷射聲波杯操作

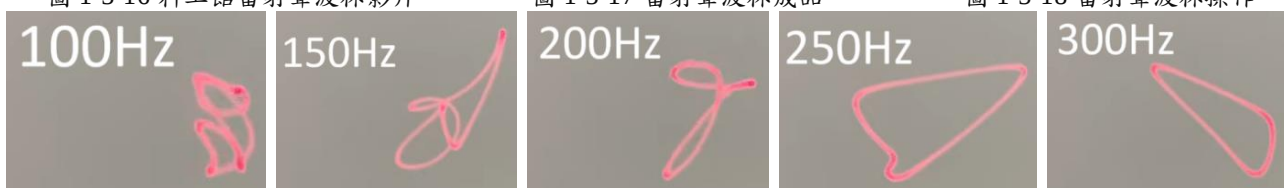


圖 1-3-19 透過雷射聲波杯拍的聲音「形狀」

(雷射聲波杯圖片引自「國立科學工藝博物館-科學學習中心」Youtube 網站影片截圖)

學習心得：透過科工館的雷射聲波杯可以看到聲音的「形狀」，我們可以修改聲波杯利用感光元件的捲簾快門效果，試著拍出聲音的「形狀」。

(十二) 雷射安全防護

CE 標誌在歐盟屬於強制性認證標誌。表明該雷射防護眼鏡符合歐盟相關指令和基本要求。這些要求涵蓋①人體安全保障②雷射防護性能達標③環境相容性。只要雷射防護眼鏡有「CE」標誌，表示防護眼鏡通過了一定的安全和品質檢驗，確保使用者的安全保障。

OD (optical density) 即光密度，OD 數值越高對雷射的阻絕能力越強，防護能力越好。OD2 對應的透射率為 1%，OD3 對應的透射率為 0.1%。

根據國際雷射安全標準，Class 2（2類）雷射功率在 1mW 以下（可見光範圍 400-700nm），其主要危害來自直視光束，因人眼的瞬目反射（約 0.25 秒）能提供足夠的保護，因此風險較低。儘管如此，仍需採取適當的安全管制措施，以確保操作安全：

- 1.標示與警示：確保雷射裝置貼有 Class2 雷射標籤，標明「雷射輻射-請勿直視光束」。在雷射工作區域設置警示標誌，提醒人員避免不必要的接觸。
- 2.使用限制：只允許受過訓練的人員操作，限制非必要人員進入雷射工作區域。
- 3.操作與安全防護：避免雷射光束對準眼睛。避免雷射光束照射鏡面或高反射物體，以防意外反射進入人眼。盡可能使用固定安裝方式，降低光束意外指向的風險。
- 4.佩戴適當防護：Class 2 雷射通常不需要特殊護目鏡，但在長時間使用或有較高反射風險時，建議使用適合波長的雷射護目鏡。
- 5.光路架設：雷射光路保持水平，設置在胸部和腰部之間高度，避免與眼睛高度重合。
- 6.遵循操作規範：受過專業培訓的人員才能操作雷射設備。啟動前檢查設備，確保光學系統、電源和控制裝置正常運作。關閉不使用的雷射，避免無意間啟動或誤傷他人。
- 7.培訓操作人員：確保所有操作人員了解雷射的潛在危害，並接受相關安全培訓。

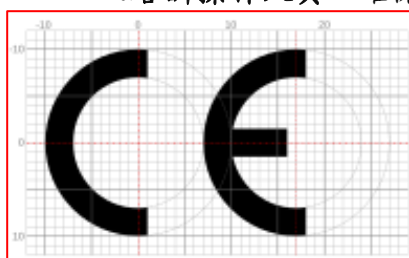


圖 1-3-20 CE 歐洲合格認證標誌
圖片引自「維基百科」網站



圖 1-3-21 不同波長輻射對眼睛的可能傷害
圖片引自「IADIY 部落格」網站



圖 1-3-22 雷射警告標籤
圖片引自「IADIY 部落格」網站

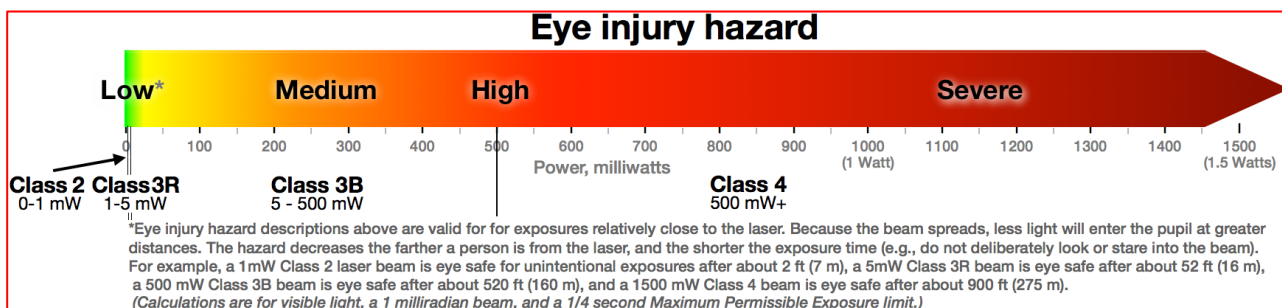


圖 1-3-23 以雷射功率分級（圖片引自「IADIY 部落格」網站）

Laser Class 2 (輸出功率 <1mW)

Class 2 laser 被認為是安全的，但如果長時間直視光束可能會導致眼睛疲勞。此分類僅適用於使用可見光（400nm-700nm）的雷射，因此紅外線或紫外線雷射無法獲得 Class 2（或 Class 2 M 級）分類。Class 2 限制在 1 mW 連續波，或如果發射時間少於 0.25 秒則可以更高。

雷射輻射
請勿直視光束
CLASS 2 LASER PRODUCT

5.6.3 雷射或雷射系統及雷射管制區警示說明標籤之用語

(1) 第 1 級雷射或雷射系統註以「第 1 級雷射器材」

(2) 第 2 a 級雷射或雷射系統註以「勿長期正對光束注視第 2 a 級雷射器材」；

(3) 第 2 級雷射或雷射系統註以「雷射輻射勿正對光束注視第 2 級雷射器材」；

圖 1-3-24 Class2 級雷射的安全性描述及作業區域警告標示
（圖片引自「IADIY 部落格」網站）

圖 1-3-25 雷射作業區域警告標示
取自中華民國國家標準
CNS11640

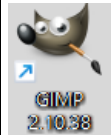
- 5.1.2.2 第 2 級的可見光雷射或雷射系統：第 2 級的可見光雷射或雷射系統需要的管制措施只是固定在雷射外殼或操作板上之適當的警告標誌，（參考第 5.6 節）以及護罩。（參考第 5.2.2 節）
- 5.1.2.3 第 2 a 級雷射或雷射系統：第 2 a 級雷射或雷射系統所需要的管制措施，只是警示標誌（參考第 5.6.3 之 (2) 節）。

圖 1-3-26 Class2 級雷射的管制措施（取自中華民國國家標準 CNS11640：雷射安全使用標準）

貳、研究設備及器材

- 一、設備與器材：E27 燈座、E27 轉 E14 轉接頭、各式燈泡、鑰匙扣燈、藍燈條、手電筒、LCD 螢幕、小風扇、烏克蘭麗、一字雷射 (Class II 1mw 650nm)、電池座、有源蜂鳴器、無段開關、電池、電池座、各型號行動電話、數位相機、行動風扇、大型量角器、三腳架、藍芽喇叭、非接觸式轉速計。
- 二、使用軟體：Free video to jpg converter、小畫家、PhotoCap6.0、GIMP2.10.38、Spectroid 聲音頻譜儀、Soundcorset Tuner 調音器、頻率聲波發生器
- 三、耗材：氣球、免洗碗、鏡面紙、紙箱、雙面膠、瓦楞板、棉線、膠帶、墨汁、噴漆。

表 2-3-1 使用軟體一覽表 (下表各軟體圖示擷取自軟體畫面)

軟體圖示							
名稱	Free video to jpg converter	小畫家	PhotoCap 6.0	GIMP 2.10.38	Spectroid 聲音頻譜儀	Soundcorset Tuner 調音器	頻率聲波發生器
用途	將影片拆成照片	截圖縮放、讀像素位置	讀像素位置、放大鏡功能，如圖 4-2-43	讀取像素 RGB 值	測量音頻、調音	烏克蘭麗調音供測量比對誤差	發生確定頻率供測量比對誤差

參、研究過程或方法

一、研究架構與流程

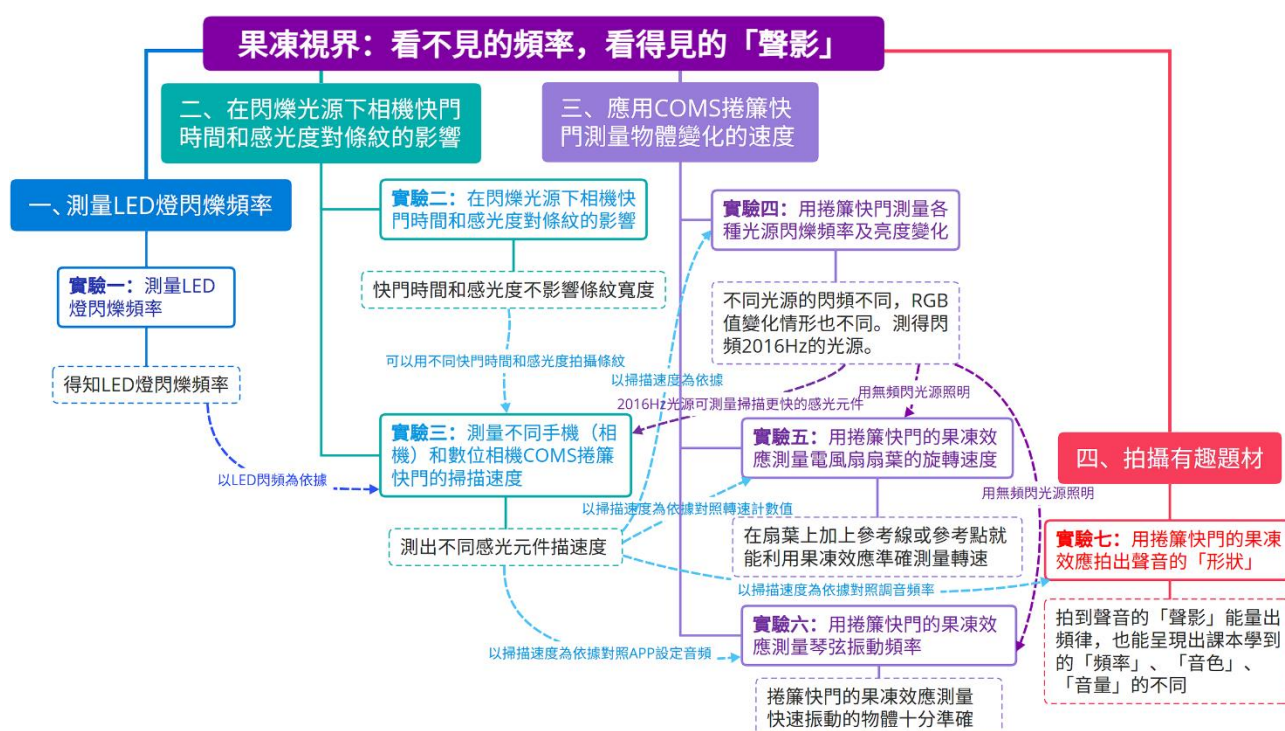


圖 3-1-1 研究架構流程圖 (本圖由作者以 GitMind 軟體繪製)

二、實驗設計 (以下「實驗設計」照片由作者及指導教師親自拍攝、擷取、裁切)

(一) 實驗一：測量LED燈閃爍頻率

1. 實驗說明：LED 閃爍頻率很快，雖然可以利用視覺暫留的現象察覺燈光閃爍，但不能測量出閃爍頻率，利用手機慢動作錄影 (960fps) 的功能，先錄下燈光閃爍情形再將影片檔分拆成照片，計算出閃爍頻率。

2. 器材準備及設定：

- (1)準備紙箱及燈泡燈座：紙箱四面噴成白色，瓦楞紙板作為蓋板挖孔安裝燈座，紙板中央圓孔作為拍攝孔。
- (2)紙上列印橫紋作為拍攝的底紙。底紙的橫紋可以提供相機對焦目標，橫紋方向也不會影響條紋辨識。
- 3.實驗操作：將底紙放入箱底蓋上蓋板，插電點亮 LED 燈，手機透過中央圓孔以 960fps 慢動作錄影。（使用 SONY Premium 手機）
- 4.讀取數據及處理：以軟體「Free video to jpg converter」開啟影片 MP4 檔，將 MP4 檔分拆為 JPG 圖片檔，以圖片檔影像明暗變化規律，計算 LED 閃爍頻率。



圖 3-2-1 賣場挑燈泡圖



圖 3-2-2 燈泡在鏡頭中的條紋



圖 3-2-3 閃爍光源下的視覺暫留



圖 3-2-4 錄影箱子



圖 3-2-5 慢動作錄影



圖 3-2-6 軟體操作畫面

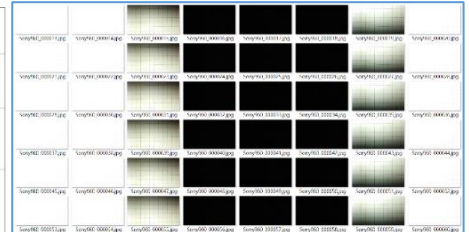


圖 3-2-7 檔案總管截圖照片

(二) 實驗二：在閃爍光源下相機快門時間和感光度對條紋的影響

- 1.實驗說明：在閃爍光源下拍照，畫面會出現條紋，這樣就能利用條紋寬度測量出感光元件的掃描速度，但相機拍攝時有許多設定，實驗二就是要瞭解相機快門時間和感光度設定是否會影響條紋（像素寬度、深淺）。
- 2.器材準備及設定：同實驗一
- 3.實驗操作：如實驗一以 Moto edge 20 pro 手機 B 顆鏡頭透過蓋板圓孔拍攝 LED 燈光下紙箱底紙，感光度設定：ISO100~3200，快門時間設定 1/6000~1/90、1/60 秒。
- 4.讀取數據及處理：
 - (1)讀出照片檔，以檔案總管縮圖比較。
 - (2)以 Photocap6.0 開啟照片，取照片中最多完整條紋（完整的一亮一暗）邊界，讀出條紋邊界像素座標數據輸入 Excel 製表，以完整條紋像素前後座標相減，除以完整條紋數，計算條紋寬度的平均像素。



圖 3-2-8 拍攝閃爍光源造成的條紋



圖 3-2-9 調整快門、感光度拍攝



圖 3-2-10 拍攝條紋照縮圖

(三) 實驗三：測量不同手機（相機）和數位相機 CMOS 捲簾快門的掃描速度

- 1.實驗說明：實驗二確認了相機快門時間和感光度設定只會影響條紋邊緣和畫面明暗，不會影響條紋寬度（一次閃爍產生的一道亮紋和暗紋的寬度），所以可以用條紋的像素寬度計算 CMOS 捲簾快門的掃描速度。利用畫面中條紋寬度（一個亮紋和一個暗紋的像素寬度）經過時間是 1/120 秒，就能計算感光元件的掃描速度（pixels /sec）
- 2.器材準備及設定：收集手機和相機（Sony Xperia XZ Premium、Apple iPhone14Pro、Apple iPhone16Pro max、iPhone8Plus、Apple iPhone7、moto edge20pro、Redmi 12、myFirst Camera 3、Alcatel OneTouch Idol X、Asus ZenFone 6、Nikon D5100），盡量設定較高感光度、較短快門時間，以能拍出清晰條紋為原則。
- 3.實驗操作：以合適感光度、快門時間設定（能拍攝清晰條紋）拍攝 LED 燈光箱底紙，盡量拍出完整條紋（完整的一亮一暗），或是至少分別拍出完整的亮紋和暗紋。
- 4.讀取數據及處理：
 - (1)以 Photocap6.0 開啟照片，取照片中最多完整條紋（完整的一亮一暗）邊界，或是分別讀出完整的亮紋和暗紋，讀出條紋邊界像素座標。
 - (2)數據輸入 Excel 製表，以最多完整條紋像素前後座標相減，除以完整條紋數，或是由兩張照片完整的亮紋暗紋像素相加，計算條紋的平均像素，再除以 1/120 秒（或是 1/2016 秒），就是感光元件的掃描速度，繪成長條圖。

表 3-2-1 測試手機及相機

					
Sony Xperia XZ Premium	Apple iPhone 16 pro max	Apple iPhone 15	Apple iPhone 14pro	Apple iPhone 13	Apple iPhone 8plus
					
Apple iPhone 7	Asus ZenFone 6	Moto Edge20pro	Redmi 12	Nikon D5100	myFirst Camera 3

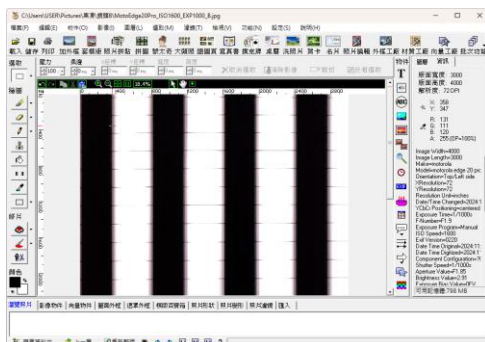


圖 3-2-11 以 PhotoCap 開啟條紋照片



圖 3-2-12 PhotoCap 資訊視窗

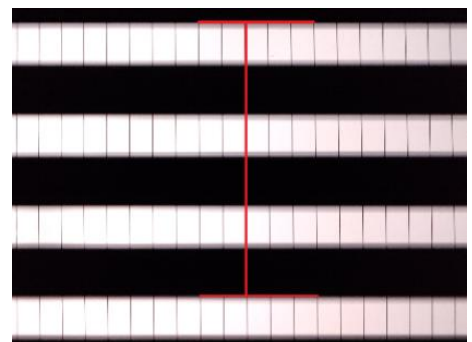


圖 3-2-13 三個完整閃爍條紋

(四) 實驗四：用捲簾快門測量各種光源閃爍頻率及亮度變化

- 1.實驗說明：利用 LED 燈 120Hz 閃爍頻率，可以測量出不同手機相機鏡頭的掃描速度，反過來也能利用已知的感光元件掃描速度測量光源頻閃（頻閃的頻率和明暗變化情形）（不同光源的閃爍頻率會一樣嗎？明暗變化會呈波浪狀嗎？）。
- 2.器材準備及設定：亮度允許時快門時間設為 1/6000 秒，亮度不足時增加快門時間（如 1/4000 秒、1/3000 秒）、ISO3200、白平衡 3991K 同實驗一
- 3.實驗操作：同實驗三。
- 4.讀取數據及處理：。

- (1)以 GIMP 開啟照片，取照片中最多完整條紋（完整的一亮一暗）邊界，讀出條紋邊界像素座標。
- (2)數據輸入 Excel 製表，以最多完整條紋像素前後座標相減，除以完整條紋數，計算條紋的平均像素，相機（moto edge20 pro B 鏡頭）掃描速度(pixel / s) 除以條紋的平均像素得到閃爍頻率，將閃爍頻率繪成長條圖。（鑰匙扣燈分 24 等份）
- (3)將條紋像素除以 20(將閃爍週期分成 20 等分)，每隔 1/20 條紋像素寬度以 Photoshop 滴管工具在條紋上以「樣本尺寸：3×3 平均像素」讀取像素 RGB 值。（鑰匙扣燈分 24 等份，因為一個完整條紋約 48 pixels）
- (4)將 RGB 值輸入 Excel，繪成長條圖、折線圖。

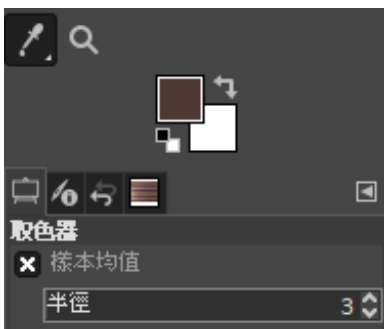


圖 3-2-14 GIMP 取色器選擇半徑 3



圖 3-2-15 讀出像素位置及 RGB 值



圖 3-2-16 手電筒與鑰匙扣燈



圖 3-2-17 燈泡包裝標示

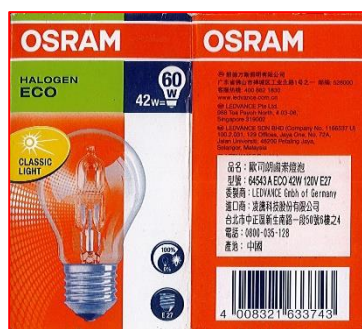


圖 3-2-18 OSRAM 鹵素燈



圖 3-2-19 億光 LED_16W



圖 3-2-20 鎢絲燈



圖 3-2-21 藍光燈條



圖 3-2-22 OSRAM LED_13.8W



圖 3-2-23 拍攝各種光源條紋



圖 3-2-24 拍攝各種光源條紋



圖 3-2-25 用 GIMP 讀出 RGB 值

(五) 實驗五：用捲簾快門的果凍效應測量電風扇的旋轉速度

- 實驗說明：利用捲簾快門造成的果凍效應可以測量快速移動物體的速度，我們也試試測量快速旋轉的風扇轉速。
- 器材準備及設定：
 - (1)準備風扇及電源
 - (2)準備光源：選用實驗四測出無頻閃的燈泡，安裝在風扇兩側提供光源照明。
 - (3)標記參考點、參考線：
 - I.方法一：在扇葉上黏貼一條經過圓心、拉直的棉線，如圖 3-2-26 的黑風扇。
 - II.方法二：在扇葉上已知圓心角差的位置標上黑點，如圖 3-2-27 的紅風扇，在四片扇葉尖端標記黑點。
- 實驗操作：使用 Moto edge20 pro B 鏡頭（方法二：紅風扇）、C 鏡頭（方法一：黑風扇），在高照度下正面拍攝運轉中的風扇，同時記錄轉速表數據，作為計算誤差的參考值。
- 讀取數據及處理：用小畫家讀取照片檔，將參考點位置像素位置讀出並和風扇圓心連線，影像顯示在電腦螢幕，以量角器量出各個角度，輸入 Excel 計算轉速。



圖 3-2-26 貼上穿過圓心的棉線



圖 3-2-27 四片扇葉尖端點上標記

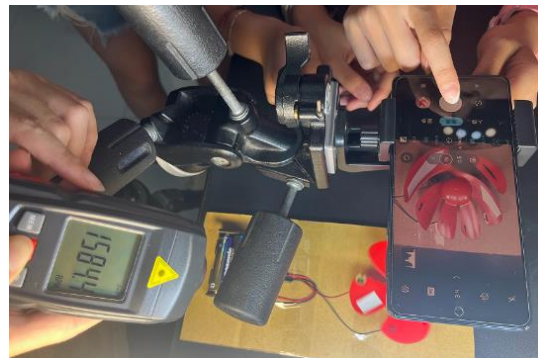


圖 3-2-28 在充足光源下拍攝旋轉中的風扇



圖 3-2-29 拍攝旋轉中的風扇



圖 3-2-30 講解轉速計算方法



圖 3-2-31 螢幕顯示並用量角器量出角度

(六) 實驗六：用捲簾快門的果凍效應測量琴弦振動頻率

- 實驗說明：網路上有人利用果凍效應把振動的琴弦拍成波浪狀，我們也來嘗試一下，並把照片拿來計算音頻，看看算出來的音頻和實際的音頻相差多少。

2. 器材準備及設定：

(1)準備光源：同實驗五。

(2)準備樂器：將選用的樂器-烏克麗麗調音完成，平放實驗桌上用適當物墊平，用手機的水平儀 app 檢查水平。

(3)準備拍攝手機：將 moto edge20 pro 裝上三腳架，在烏克麗麗響孔上方調整高度位置和水平，使 C 鏡在能夠手動對焦下盡量靠近琴弦（拍大一點），調高感光度、縮短快門時間。

3. 實驗操作：分別撥動第一至四弦，拍下波浪狀琴弦。

4. 讀取數據及處理：以波峰到波峰作為完整一次振動，用小畫家在波峰畫紅線標記讀出像素位置，輸入 Excel 並參考相機掃描速計算琴弦振動頻率。



圖 3-2-32 第四弦調音(G)



圖 3-2-33 第三弦調音(C)



圖 3-2-34 第二弦調音(E)



圖 3-2-35 第一弦調音(A)



圖 3-2-36 調整水平



圖 3-2-37 調整焦距



圖 3-2-38 亮光下撥弦拍攝

(七) 實驗七：用捲簾快門的果凍效應拍出聲音的「形狀」

1. 實驗說明：科工館的雷射聲波杯是用點狀雷射，捲簾快門拍攝畫面是一列一列像素依序掃描的，所以我們採用一字形雷射操作，參考科工館聲波杯自製新的聲波杯。

2. 器材準備及設定：

(1)製作聲波杯：瓦楞板（底座）、紙盒（調整及固定雷射位置）、PP 塑膠碗（固定氣球膜）、10 吋氣球皮（製作振動薄膜）、一字形紅光雷射筆（光源）、晾衣夾（固定雷射筆）、L 形書架貼白紙（投射雷射光）

(2)拍攝手機調整：使用 Moto edge20 pro 手機 C 鏡頭，安裝在三腳架上，鏡頭靠近雷射投射的白紙。

(3)雷射操作安全措施：

I. 操作人員接受通過安全認證人員指導，了解相關風險、控制措施。

II. 使用 Class II 紅光雷射，波長 655nm、功率小於 1mw，貼有 Class 2 雷射標籤。

III. 操作者都配戴 200~2000nm OD2 CE 雷射防護眼鏡(200~2000nm: 波長範圍; OD2: 透射率為 1%; CE: ①人體安全保障、②雷射防護性能達標、③環境相容性)

IV. 實驗設備及作業區域張貼警告標示，標明「雷射輻射—請勿直視光束」、「雷射等級、功率和波長」。

V. 避免無關人員進入雷射作業區。

VI. 雷射開啟時，使用警示燈或聲音警報提醒人員注意。

VII.使用無段開關，按下開關才通電，放開即關閉。

VIII.移除設備附近鏡面、玻璃或金屬物，避免佩戴反光飾品減少非預期反射。

IX.雷射光路遮閉，操作時無法看見光路及雷射照射處。

X.在通過安全認證人員指導，並在監看下操作實驗。

3.實驗操作：

(1)確認準確性：以頻率聲波發生器 AAP 驅動藍芽音箱發出特定頻率聲音，以 MOTO 手機 C 鏡頭拍出聲音波形，計算測量結果檢視與特定頻率是否相符。

(2)實測人聲波形：啟動雷射時，由聲波杯底發音使氣球膜振動，一字雷射經氣球膜上的鏡面紙反射，投影至白紙由手機拍攝。

4.讀取數據及處理：藍芽音箱發出特定頻率聲音拍出的波形振幅較小，所以用小畫面處理時先在振動方向放大五倍（如圖 3-2-54），方便定出波峰位置，其餘同實驗六。



圖 3-2-39 避免無關人員進入



圖 3-2-40 雷射防護護目鏡

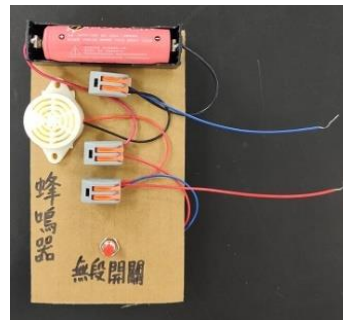


圖 3-2-41 無段開關附蜂鳴器



圖 3-2-42 APP 產生頻率

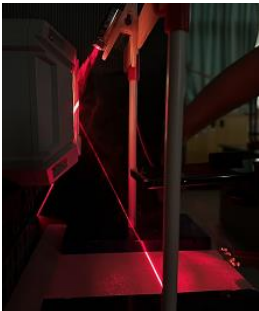


圖 3-2-43 利用煙霧觀察光路



圖 3-2-44 拍攝雷射光波形圖



圖 3-2-45 第一代聲波杯



圖 3-2-46 二代聲波杯(側)



圖 3-2-47 二代聲波杯(俯視)

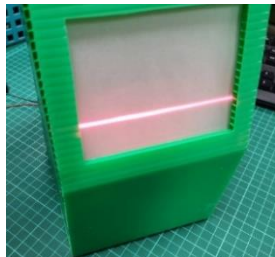


圖 3-2-48 透出描圖紙的雷射



圖 3-2-49 聲波杯噴黑



圖 3-2-50 紙箱內部塗黑



圖 3-2-51 器材設置

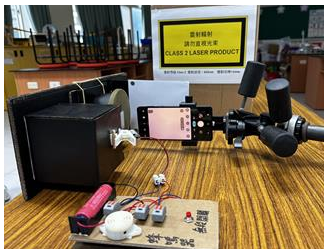


圖 3-2-52 手機對齊投影位置



圖 3-2-53 操作時手在箱內按快門



圖 3-2-54 水平方向放大五倍

肆、研究結果

(以下「研究結果」圖、表由作者及指導教師親自拍攝、擷取、製作、裁切)

一、實驗一：測量 LED 燈閃爍頻率



圖 4-1-1 慢動作錄影拆成照片在檔案總管的縮圖 (照片由作者截圖裁切)

LED 燈閃爍頻率計算：

慢動作錄影幀率 960fps，兩張照片間相差 1/960 秒，每次閃爍經過八張照片時間

所以每次閃爍經過時間為 $1/960(\text{秒}) \times 8 = 1/120(\text{秒})$

閃爍頻率： $1 \div 1/120(\text{秒}) = 120(\text{Hz})$

實驗發現：

從慢動作錄影拆出 177 張照片可以看出每八張照片有一次明暗變化，所以可以計算出 LED 燈的閃爍頻率為 120Hz，裡面有 22 次完整的閃爍週期，照片的明暗變化都很整齊，表示閃爍頻率在這段時間內很穩定，可推測 LED 燈的頻閃現象來自電源的交流頻率，並可作為後續測量相機捲簾快門掃描速度的標準光源。

二、實驗二：在閃爍光源下相機快門時間和感光度對條紋的影響

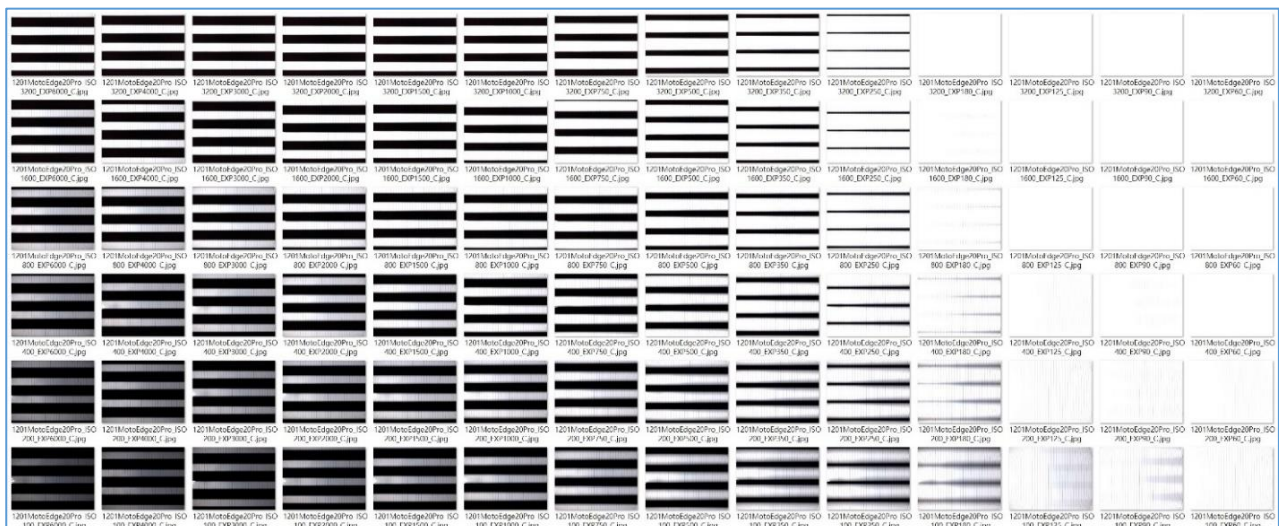


圖 4-2-1 Moto edge 20pro B 鏡頭以不同感光度、快門時間拍攝閃爍光源的條紋 (檔案總管縮圖)

表 4-2-1 Moto edge 20pro B 鏡頭以不同感光度、快門時間拍攝閃爍光源的條紋寬度 (pixels)

Moto edge20 pro B 鏡頭		快門時間 (秒)											平均
感光度		1/6000	1/4000	1/3000	1/2000	1/1500	1/1000	1/750	1/500	1/350	1/250	1/180	
	ISO3200	802.67	801.67	802.33	803.00	800.66	801.00	802.67	800.67	803.00	801.67	-	801.93
	ISO1600	803.00	802.33	802.33	802.33	803.00	802.67	803.00	803.00	801.00	802.67	-	802.53
	ISO800	802.33	801.33	803.00	801.00	802.33	803.00	801.33	801.67	801.67	802.33	802.33	802.00
	ISO400	802.67	801.00	802.00	801.00	802.00	801.00	802.00	802.67	801.33	802.33	801.33	801.80
	ISO200	801.00	802.33	802.33	801.67	802.33	803.00	801.67	801.33	802.33	801.67	802.00	801.97
	ISO100	802.67	802.00	802.33	802.33	802.33	801.67	802.00	802.33	801.67	802.33	802.33	802.17
平均		802.39	801.78	802.39	801.89	802.11	802.06	802.11	801.95	801.83	802.17	802.00	802.06

實驗發現：

計算拍攝閃爍光源照片的條紋寬度，發現條紋寬度（一次閃爍產生的一道亮紋和暗紋的像素寬度和（亮紋寬度像素+暗紋寬度像素））約為 802 pixels（A 鏡頭），而且不受感光度和快門時間影響。（A 鏡頭條紋寬度平均 694.86 pixels，C 鏡頭條紋寬度平均 980.05 pixels）

感光度對照片的影響：感光度越高，照片畫面越亮；感光度越低，照片畫面越暗。

快門時間對照片的影響：快門時間越短，畫面越暗，條紋邊緣越清晰；快門時間越長，畫面越亮，條紋邊緣越模糊。

實驗二確認了「快門時間」和「感光度」只影響條紋邊緣清晰程度和畫面明暗，不影響條紋寬度，所以可以用已知閃頻光源造成的條紋像素寬度計算 CMOS 捲簾快門的掃描速度。為了方便讀出像素寬度，後續測量時可以盡量用較高感光度和較短的快門時間。

三、實驗三：測量不同手機（相機）和數位相機 CMOS 捲簾快門的掃描速度

表 4-3-1 手機鏡頭 CMOS 捲簾快門拍攝 120Hz 閃頻光源產生的條紋

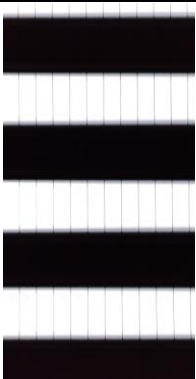
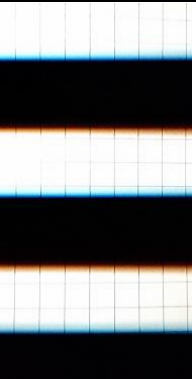
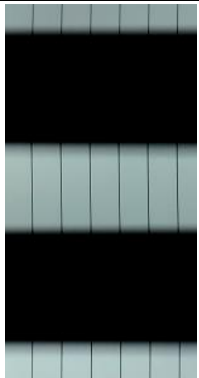
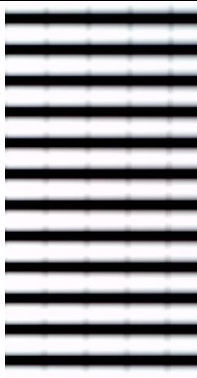
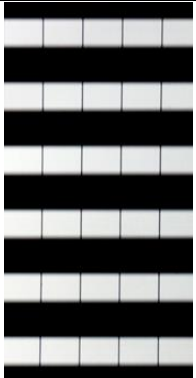
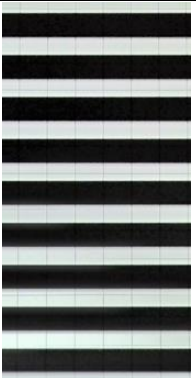
				
Moto edge20 pro A 鏡頭	Moto edge20 pro B 鏡頭	Moto edge20 pro C 鏡頭	Sony Xperia XZ Premium 主鏡頭	Redmi 12
				
Apple iPhone 8 plus 主鏡頭	myFirst Camera 3	Alcatel OneTouch Idol X 主鏡頭	Asus ZenFone 6	Apple iPhone 7

表 4-3-2 以手機鏡頭 CMOS 捲簾快門拍攝 2016Hz 閃頻光源產生的條紋

iPhone 16pro max 2-14mm	iPhone 16pro max 2-24mm	iPhone 16pro max 7-24mm	iPhone 16pro max 7-48mm	iPhone 16pro max 7-121mm	iPhone 15 plus 2-14mm	iPhone 15 plus 2-24mm
iPhone 15 plus 2-48mm	iPhone 15 plus 7-122mm	Nikon D5100	iPhone 13 主鏡頭	iPhone 14Pro A 鏡頭	iPhone 14Pro B 鏡頭	iPhone 14Pro C 鏡頭

表 4-3-3 手機拍攝 120Hz 光源，以條紋像素計算掃描速度（畫面無法顯示完整條紋，以兩張照片分別讀出黑白紋）

手機型號	鏡頭	黑白紋	(A) 起始像素	(B) 結尾像素	(C) 總像素 (B-A)	(D) 條紋像素 (黑紋+白紋)	(E) 每秒掃描列數 (D*120)	(F) 寬幅像素	掃描整個畫面的時間 (F/E)(ms)
Apple iPhone 14Pro	A 鏡頭(Wide)	白紋	508	2405	1897	3828	459360	3024	6.58
		黑紋	562	2493	1931				
Apple iPhone 14Pro	B 鏡頭(Main)	白紋	779	2283	1504	3404	408480	3024	7.40
		黑紋	595	2495	1900				
Apple iPhone 14Pro	C 鏡頭(Tele)	白紋	694	2435	1741	3460	415200	3024	7.28
		黑紋	601	2320	1719				
Apple iPhone 13	主鏡頭 (Main)	白紋	610	1950	1340	3824	458880	3024	6.59
		黑紋	50	2534	2484				

表 4-3-4 手機或相機鏡頭拍攝 120Hz 光源，以條紋像素計算掃描列數（畫面能顯示完整條紋）

手機型號	鏡頭	(A) 起始像素	(B) 結尾像素	(C) 總像素 (B-A)	(D) 完整條紋數	(E) 條紋像素 (C/D)	(F) 每秒掃描列數 (E*120)	(G) 寬幅像素	掃描整個畫面的時間 (G/F)(ms)
Moto edge20 pro	A 鏡頭	155	2240	2085	3	695.0	83400	2448	29.35
	B 鏡頭	122	2528	2406	3	802.0	96240	3000	31.17
	C 鏡頭	136	3302	3166	2	1583.0	189960	3456	18.19
Sony Xperia XZ Premium	主鏡頭	846	3583	2737	2	1368.5	164220	3792	23.09
Redmi 12	主鏡頭	119	2463	2344	3	781.3	93760	3000	32.00
myFirst Camera 3	相機鏡頭	152	4534	4382	11	398.4	47804	4896	102.42
Apple iPhone 8 plus	主鏡頭	460	2059	1599	1	1599.0	191880	3024	15.76
Alcatel OneTouch Idol X	主鏡頭	97	2032	1935	6	322.5	38700	2304	59.53
Asus ZenFone 6	主鏡頭	63	2107	2044	8	255.5	30660	2304	75.15
Apple iPhone 7	主鏡頭	1006	2067	1601	1	1601.0	192120	3024	15.74

表 4-3-5 手機或相機鏡頭拍攝 2016Hz 光源，以條紋像素計算掃描速度（畫面能顯示完整條紋）

手機型號	鏡頭	(A) 起始 像素	(B) 結尾 像素	(C) 總像素 (B-A)	(D) 完整條 紋數	(E) 條紋像素 (C/D)	(F) 每秒掃描列數 (E*2016)	(G) 寬幅 像素	掃描整個畫面 的時間 (G/F)(ms)
Apple iPhone 16 pro max	2-14mm 鏡頭	48	2957	2909	23	126.5	254980	3024	11.86
	2-24mm 鏡頭	41	2946	2905	30	96.8	195216	3024	15.49
	7-24mm 鏡頭	74	3962	3888	9	432.0	870912	4284	4.92
	7-48mm 鏡頭	34	2933	2899	19	152.6	307599	3024	9.83
	7-121mm 鏡頭	181	2894	2713	7	387.6	781344	3024	3.87
Apple iPhone 15 plus	2-14mm 鏡頭	31	2912	2881	19	151.6	305689	3024	9.89
	2-24mm 鏡頭	102	2777	2675	10	267.5	539280	3024	5.61
	2-48mm 鏡頭	223	2891	2668	5	533.6	1075738	3024	2.81
	7-122mm 鏡頭	133	2782	2649	8	331.1	667548	3024	4.53
Nikon D5100		332	3013	2681	5	536.2	1080979	3264	3.02
Apple iPhone 13	主鏡頭	68	2940	2872	13	220.9	445381	3024	6.79
iPhone 14Pro	A 鏡頭(Wide)	222	2979	2757	12	229.8	463176	3024	6.53
iPhone 14Pro	B 鏡頭(Main)	105	2944	2839	14	202.8	408816	3024	7.40
iPhone 14Pro	C 鏡頭(Tele)	52	2828	2776	13	213.5	430494	3024	7.02

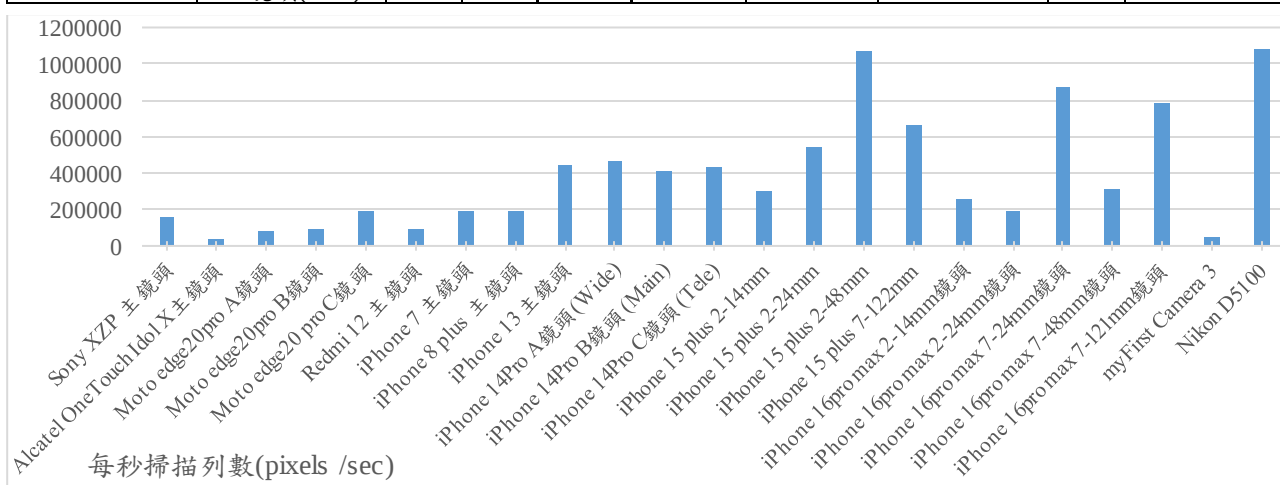


圖 4-3-1 各手機或相機鏡頭 CMOS 捲簾快門的掃描速度(pixels / sec) (iPhone 13、14 以 2016Hz 測量)

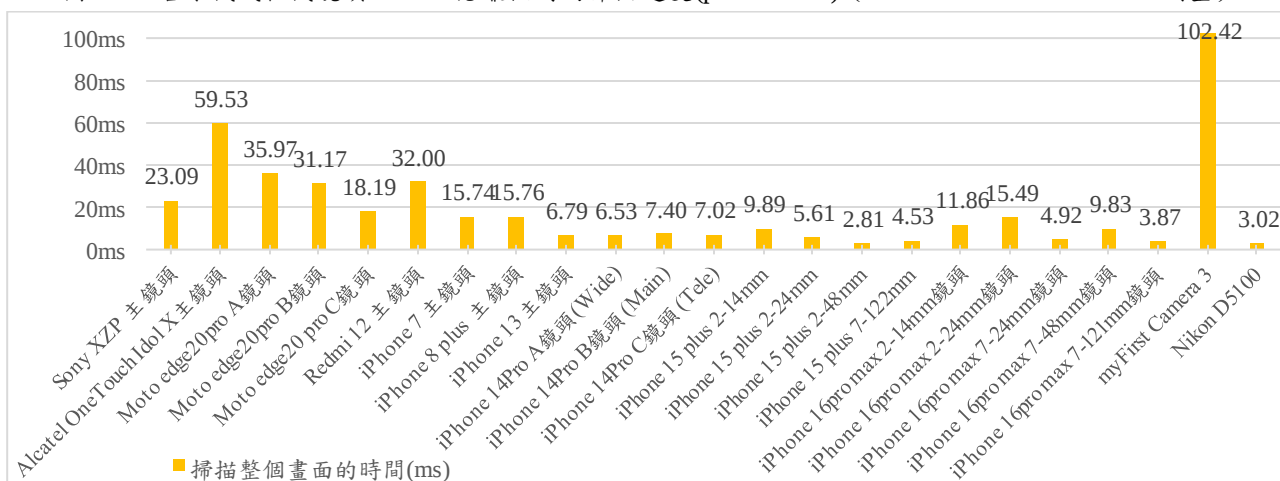


圖 4-3-2 各手機或相機鏡頭 CMOS 掃描整個畫面的時間(ms) (iPhone 13、14 以 2016Hz 測量)

實驗發現：

不同手機鏡頭感光元件的掃描速度差異很大，同手機不同鏡頭的表現也不一樣，我們測得掃描速度最快的是 Nikon D5100 相機，平均每秒 1080979 列像素，最慢的是 myFirst Camera 3 相機每秒只 47804 列像素，差距是 22.6 倍；掃描速度會影響拍攝整張畫面的時間，拍完一張照片需時最短的就是 Nikon D5100，最慢的是 myFirst Camera 3，拍一張照片的掃描時間是 Nikon D5100 的 33.91 倍，拍變化快的物體如果要減輕果凍效應可以選用掃描速度快的相機。

特別是 Nikon D5100 拍出的幾個條紋寬度不是相同的，可能是因為 Nikon D5100 是使用機械快門造成的。

四、實驗四：用捲簾快門測量各種光源閃爍頻率及亮度變化

表 4-4-1 以 Moto edge20 pro B 鏡頭拍攝各種光源產生的條紋測量閃爍頻率及亮度變化

鑰匙扣燈-亮	鑰匙扣燈-暗	藍光燈條-亮	藍光燈條-暗	LED 手電筒-亮	LED 手電筒-中	LED 手電筒-暗
特力屋金星 LED_4.5W	OSRAM 鹵素燈_42W	Philips 鎢絲燈_60W	Philips Helix_13W	TOSHIBA LED_16W	Apex LED_16W	ADATA LED_10W

表 4-4-2 以 Moto edge20 pro B 鏡頭拍攝各種光源產生的條紋測量閃爍頻率

光源	(A) 起始像素	(B) 結尾像素	(C) 像素間距 (B-A)	(D) 條紋數	(E) 條紋像素 (C/D)	(F) 掃描速度 (pixels / sec)	(G) 閃爍頻率 (F/E)
鑰匙扣燈-亮	28	2989	2961	62	47.8	96240	2015.2
鑰匙扣燈-暗	22	2981	2959	62	47.7	96240	2016.5
ViewSonic VA2445m 亮度 100	無條紋						
ViewSonic VA2445m 亮度 80	28	2842	2814	7	402.0	96240	239.4
ViewSonic VA2445m 亮度 60	91	2905	2814	7	402.0	96240	239.4
ViewSonic VA2445m 亮度 40	50	2863	2813	7	401.9	96240	239.5
ViewSonic VA2445m 亮度 20	82	2897	2815	7	402.1	96240	239.3
ViewSonic VA2445m 亮度 0	155	2969	2814	7	402.0	96240	239.4
藍光燈條-亮	無條紋					96240	
藍光燈條-暗	331	2957	2626	6	437.7	96240	219.9
ADATA LED_10W	221	2622	2401	3	800.3	96240	120.2
LED 手電筒-亮	無條紋					96240	
LED 手電筒-中	171	2568	2397	5	479.4	96240	200.8
LED 手電筒-暗	9	2884	2875	6	479.2	96240	200.8
特力屋金星 LED_4.5W	356	2759	2403	3	801.0	96240	120.1
Apex LED_16w	406	2815	2409	3	803.0	96240	119.9
OSRAM 鹵素燈_42W	432	2037	1605	2	802.5	96240	119.9
Philips 鎢絲燈_60W	428	2839	2411	3	803.7	96240	119.8
Philips Helix_13W	323	2733	2410	3	803.3	96240	119.8
TOSHIBA LED_16W	無條紋					96240	
億光 LED_16W	無條紋					96240	
OSRAM LED_13.8W	無條紋					96240	

表 4-4-3 以 Moto edge20 pro B 鏡頭拍攝 ViewSonic VA2445m 螢幕不同亮度設定產生的條紋測量閃爍頻率及亮度變化

					
螢幕設定亮度 0	螢幕設定亮度 20	螢幕設定亮度 40	螢幕設定亮度 60	螢幕設定亮度 80	螢幕設定亮度 100
					
亮度 0 照片	亮度 20 照片	亮度 40 照片	亮度 60 照片	亮度 80 照片	亮度 100 照片

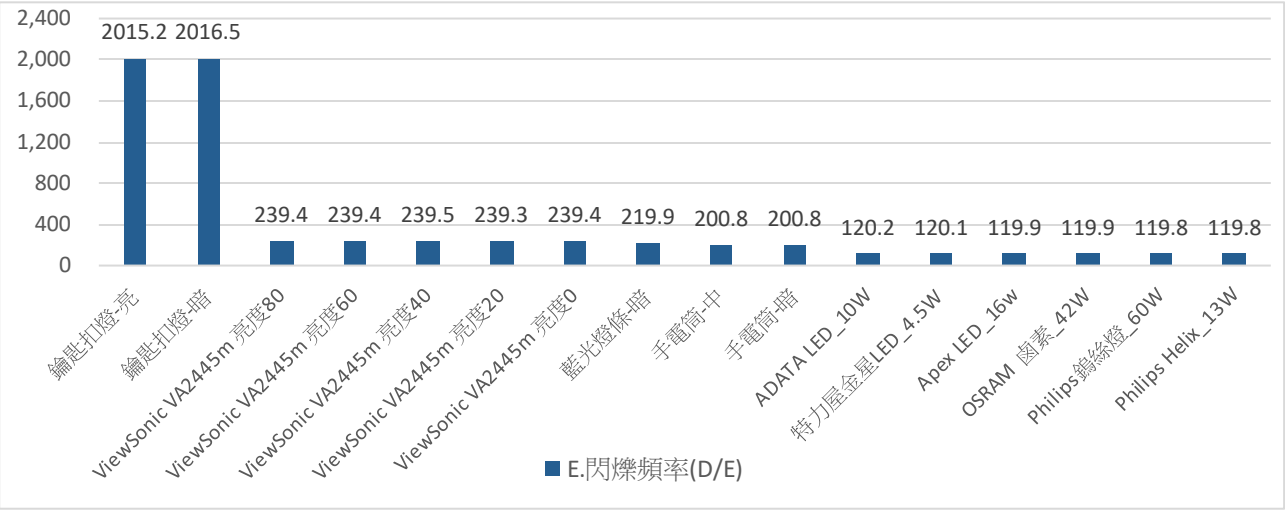


圖 4-4-1 以 Moto edge20 pro B 鏡頭測量各種光源閃爍頻率(Hz)

表 4-4-4 鑰匙扣燈-亮閃爍 RGB 值變化情形

序號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
像素位置	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110	112
R 值	143	135	141	144	119	58	107	101	25	1	16	3	0	43	34	7	68	130	78
G 值	144	137	145	146	118	53	99	95	23	0	15	3	0	42	33	6	67	130	79
B 值	169	159	166	170	144	80	123	111	30	1	17	4	2	47	35	12	86	157	112
序號	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
像素位置	114	116	118	120	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140	142	144	146	148	150
R 值	99	132	143	132	135	138	132	137	140	115	57	101	91	18	0	12	2	1	36
G 值	102	136	147	136	137	140	132	138	140	113	52	96	87	17	0	12	2	0	33
B 值	134	164	173	161	164	166	158	163	165	135	73	114	101	24	2	14	3	3	41

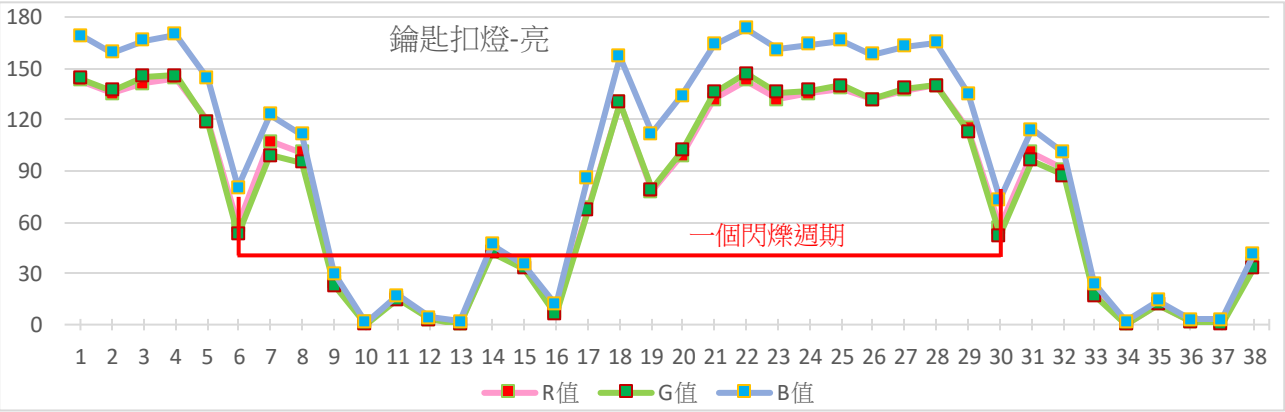


圖 4-4-2 鑰匙扣燈-亮閃爍 RGB 值變化情形

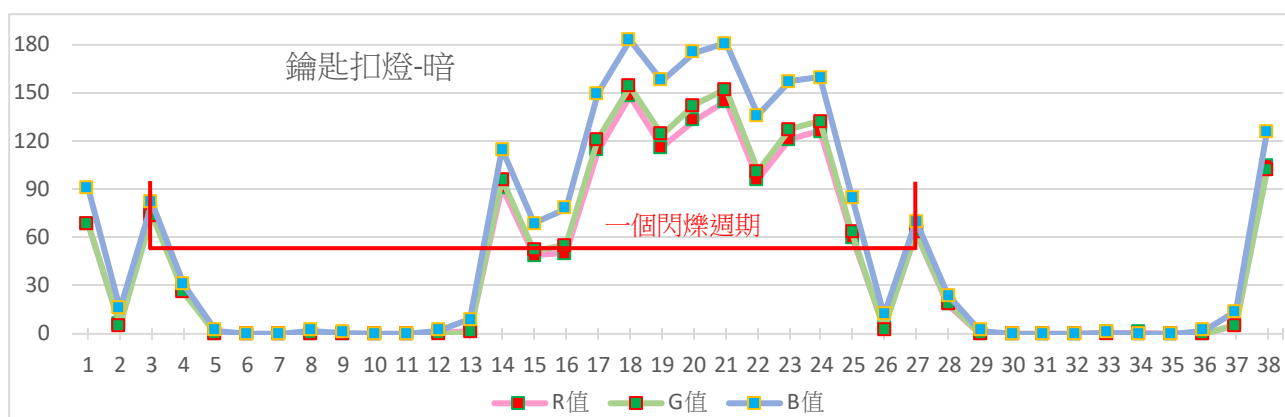


圖 4-4-3 鑰匙扣燈-暗閃爍 RGB 值變化情形

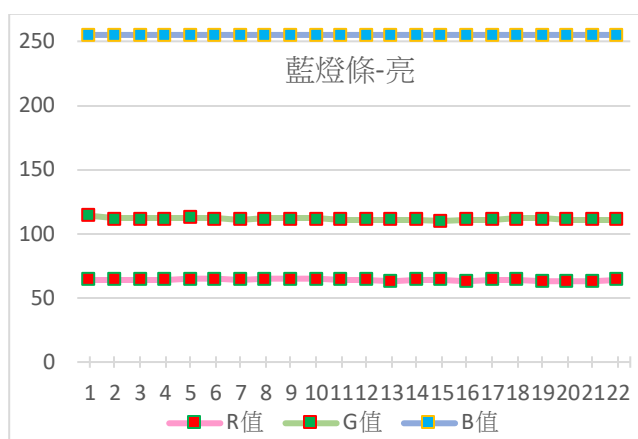


圖 4-4-4 藍燈條-亮_閃爍 RGB 值變化情形

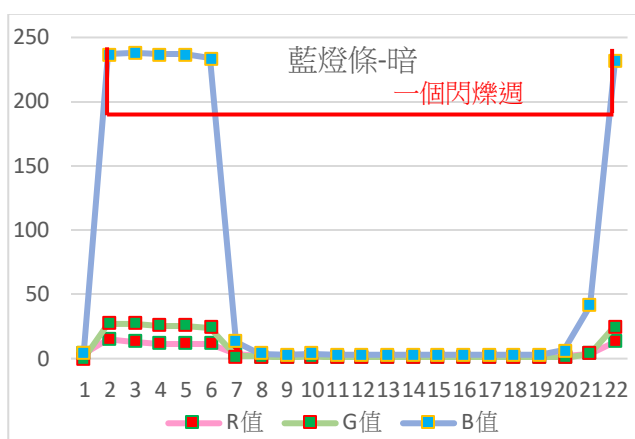


圖 4-4-5 藍燈條-暗_閃爍 RGB 值變化情形

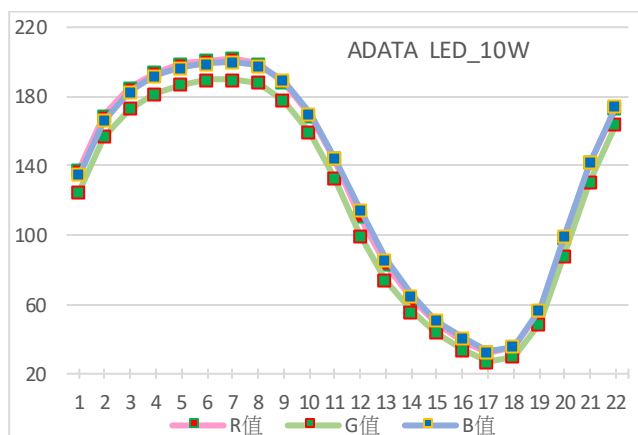


圖 4-4-6 ADATA LED_10W_閃爍 RGB 值變化情形

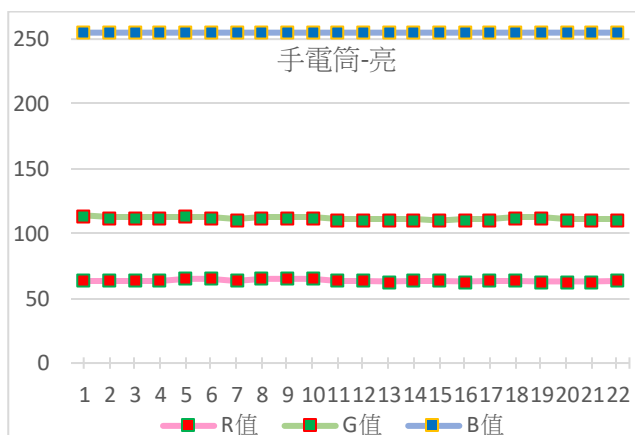


圖 4-4-7 手電筒-亮_閃爍 RGB 值變化情形

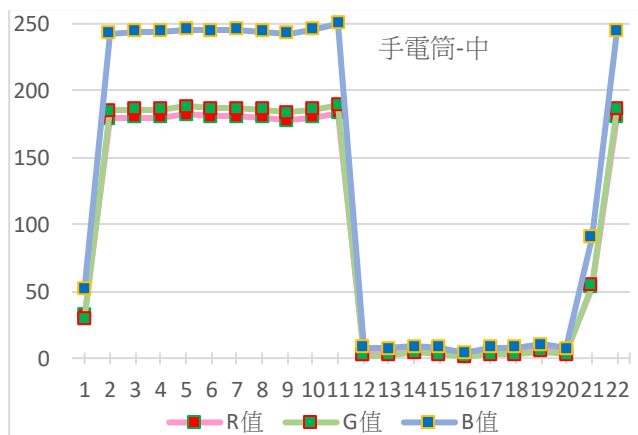


圖 4-4-8 手電筒-中_閃爍 RGB 值變化情形

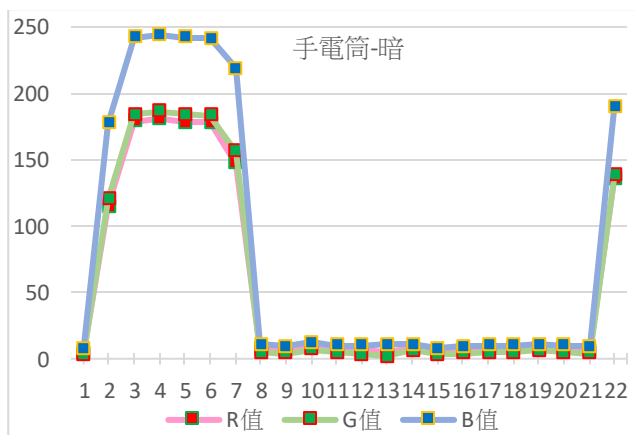


圖 4-4-9 手電筒-暗_閃爍 RGB 值變化情形

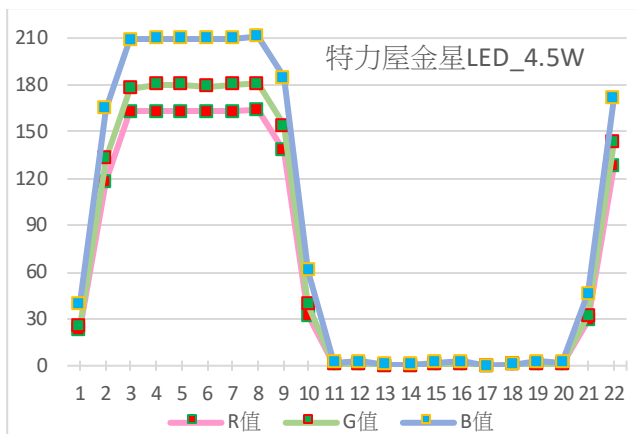


圖 4-4-10 特力屋金星 LED_4.5W_閃爍 RGB 值變化情形

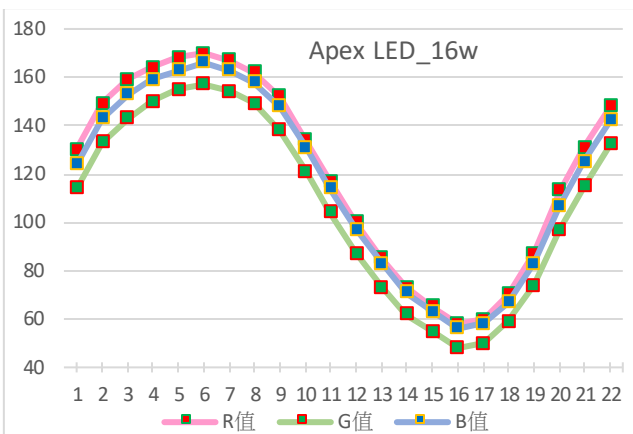


圖 4-4-11 Apex LED_16W_閃爍 RGB 值變化情形

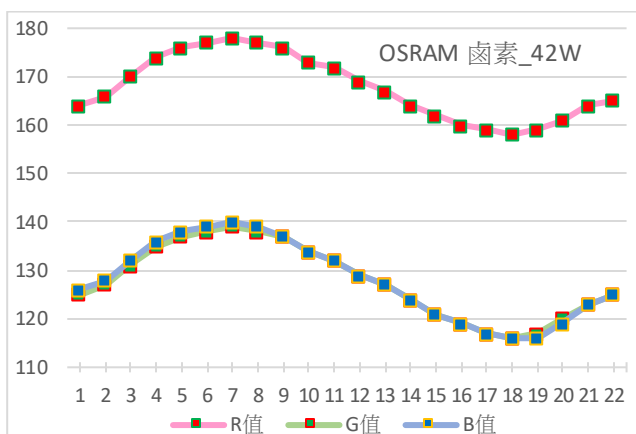


圖 4-4-12 OSRAM 鹵素_42W_閃爍 RGB 值變化情形

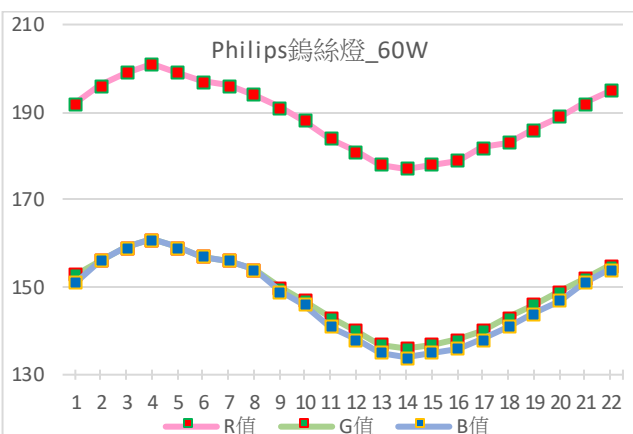


圖 4-4-13 Philips 鎢絲燈_60W_閃爍 RGB 值變化情形

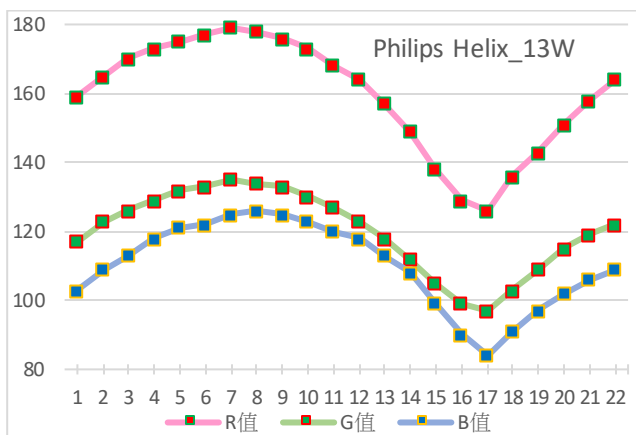


圖 4-4-14 Philips Helix_13W_閃爍 RGB 值變化情形

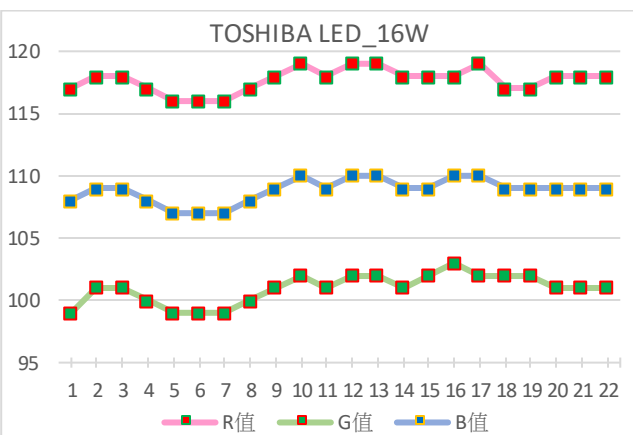


圖 4-4-15 TOSHIBA LED_16W_閃爍 RGB 值變化情形

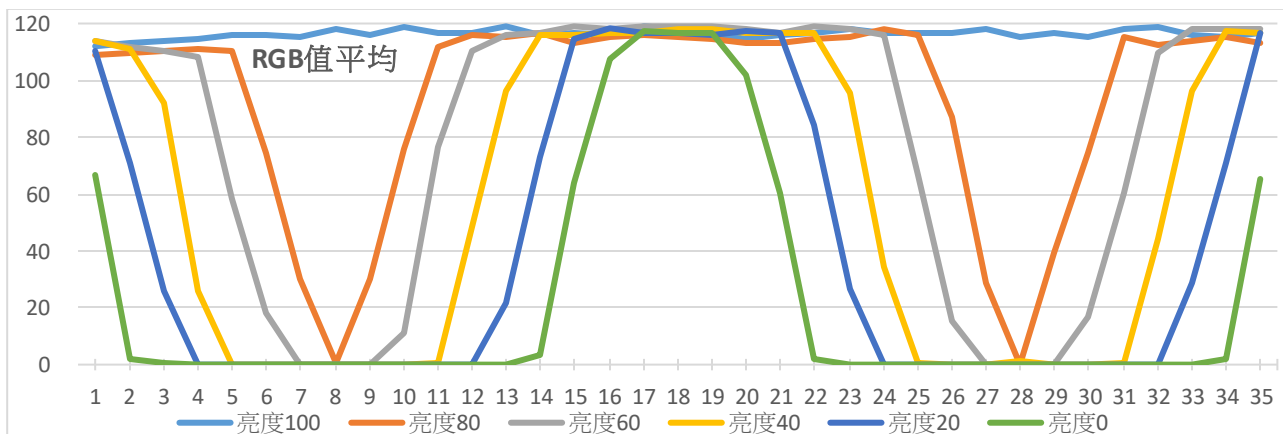


圖 4-4-16 ViewSonic VA2445m 不同亮度設定 RGB 值平均變化情形

實驗發現：

Moto edge20 pro B 鏡頭掃描速度是 96240 列像素 / 秒，就像是 96240 fps 的慢動作錄影，只是錄影時間只有短短的 31.17ms，所以很適合測量不斷重複的光源閃爍。

實驗發現 110V 60Hz 交流電源的光源閃頻都是 120Hz (除了 ViewSonic VA2445m 螢幕) 應該和交流電的頻率有關，但也有些幾乎看不出閃爍的光源，從 RGB 值變化情形折線圖來看閃爍方式差異很大，有的呈現波浪狀，有的呈雉碟形。

電池電源的光源剛好都能調亮度，亮度調最大時可能沒有閃爍情形，調暗時拍攝畫面就會出現條紋 (應該是 PWM 調光)，經計算發現這些光源的閃頻差異很大，最快的是「鑰匙扣燈」，頻率約 2016Hz 左右，畫面中的條紋又多又密，對照實驗二測試的手機鏡頭，在 120Hz 光源下不能拍出一亮一暗完整條紋的鏡頭就能改用 2016Hz 光源測試掃描速度。

五、實驗五：用捲簾快門的果凍效應測量電風扇的旋轉速度



圖 4-5-1 用果凍效應測量風扇轉速 (方法一)

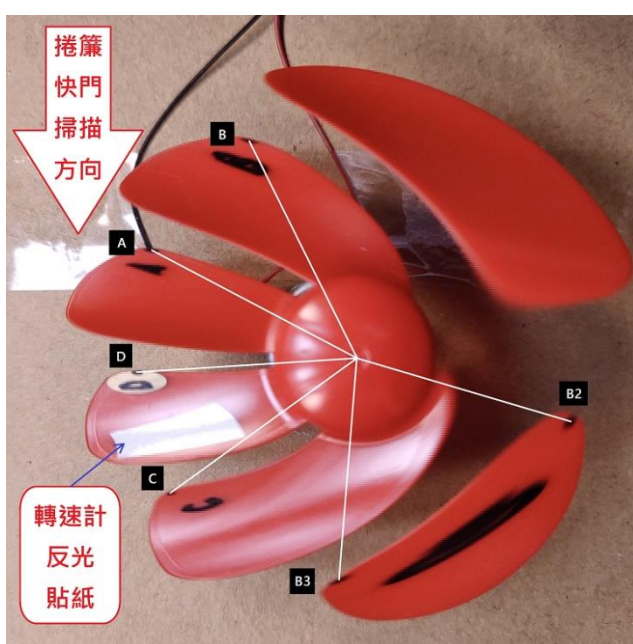


圖 4-5-2 用果凍效應測量風扇轉速 (方法二)

表 4-5-1 用果凍效應測量風扇轉速 (方法一：風扇加上參考線再取參考點)

計算項目	參考線上取的參考點					
	A	B	C	D	E	F
A. 像素位置	1856	1717	1335	1027	667	386
B. 與 A 點距離(pixels, 1856-A)		139	521	829	1189	1470
C. 掃描速度(pixels / sec)	189960	189960	189960	189960	189960	189960
D. 時間(sec, B / C)		0.000732	0.002743	0.004364	0.006259	0.007738
E. 與圓心連線與 OA 線夾角(度)		$\angle BOA=6.7^\circ$	$\angle AOC=154.6^\circ$	$\angle AOD=139.7^\circ$	$\angle AOE=122.1^\circ$	$\angle AOF=108.3^\circ$
F. 扇葉上與 D1 點角度差 (度)		0	180	180	180	180
G. 轉動圈數(圈, $\pm(F-E) / 360$)		0.01861	0.07056	0.11194	0.16083	0.19917
H. 轉速(圈/sec, F / D)		25.43	25.73	25.65	25.70	25.74
I. 轉速計讀數 (rpm)	1547.0					
J. 轉速計讀數(圈/sec, I/60)	25.78					
K. 與轉速計比較誤差(% , (H-J)/J)		-1.37%	-0.23%	-0.51%	-0.34%	-0.18%

表 4-5-2 用果凍效應測量風扇轉速（方法二：四扇葉上各標上一個參考點）如圖 4-5-2

計算項目	參考點					
	B	A	D	C	B2	B3
A.像素位置	586	1129	1715	2298	1924	2696
B.與 D1 點距離(pixels, A - 586)		543	1129	1712	1338	2110
C.掃描速度(pixels / sec)	96240	96240	96240	96240	96240	96240
D.時間(sec, B / C)		0.00564	0.01173	0.01779	0.01390	0.02192
E.與圓心連線與 OB 線夾角(度)		$\angle BOA=36.6^\circ$	$\angle BOD=68.3^\circ$	$\angle BOC=100.5^\circ$	$\angle BOB2=131.8^\circ$	$\angle BOB3=208.6^\circ$
F.扇葉上與 B 點角度差 (度)		90	180	270	0	0
G.轉動圈數(圈, $\pm(F-E) / 360$)		0.1483	0.3103	0.4708	0.3661	0.5794
H.轉速(圈/sec, G/D)		26.29	26.45	26.47	26.33	26.43
I.轉速計讀數 (rpm)	1584.4					
J.轉速計讀數(圈/sec, I/60)	26.41					
K.與轉速計比較誤差(% , (H-J)/J)		-0.44%	0.16%	0.23%	-0.28%	0.09%

實驗發現：

在風扇扇葉標記參考點（參考線，線上有很多點），搭配已知的感光元件掃描速度，就能以參考點的像素位置分別算出轉動角度和經過時間，轉動角度換算成圈數除以經過時間就是風扇轉速了。

方法一是在風扇加上參考線再取參考點計算，參考線是經過圓心的棉線，黑風扇是順時針旋轉、捲簾快門是由下而上掃描，AB 點在線上是相同角度，CDEF 點在線上是相同角度與 AB 點的角度相差 180 度；掃描到 A 點時棉線的角度就是 AO 線，掃描到 B 點時，棉線角度就是 BO 線，如圖 4-5-1 照片中（ $\angle AOB$ 角度 / 360° ） / （A 到 B 的縱向像素差 / 掃描速度）= 轉速。（ABCDEF 是拍照後在參考線上任意取的）

方法二是在風扇四片扇葉相同位置加上參考點，紅風扇是順時針轉、捲簾快門是由上而下掃描，ABCD 四點分別在四片扇葉尖端，角度分別相差 90° ；如圖 4-5-2 掃描到 B 點時，A 點會在 B 點之前 90° 位置，與掃描到 A 點時比較，轉動角度是 $90^\circ - \angle BOA$ ，經過時間是（B 到 A 的縱向像素差 / 掃描速度），所以轉速 = $((90^\circ - \angle BOA \text{ 角度}) / 360^\circ) / (\text{B 到 A 的縱向像素差} / \text{掃描速度})$ 。

六、實驗六：用捲簾快門的果凍效應測量琴弦振動頻率



圖 4-6-1 果凍效應測烏克麗麗琴弦振頻（第四弦）



圖 4-6-2 果凍效應測烏克麗麗琴弦振頻（第三弦）

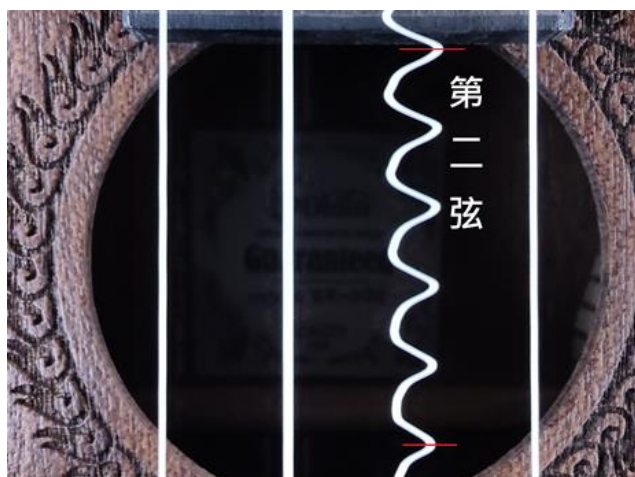


圖 4-6-3 果凍效應測烏克麗麗琴弦振頻（第二弦）



圖 4-6-4 果凍效應測烏克麗麗琴弦振頻（第一弦）

表 4-6-1 果凍效應測烏克麗麗琴弦振頻

計算項目	第四弦	第三弦	第二弦	第一弦
音名	G	C	E	A
標準頻率(Hz)	392	261	329	440
A.起始像素(pixels)	109	88	284	138
B.結尾像素(pixels)	3014	2986	3176	3157
C.總像素(pixels, B-A)	2905	2898	2892	3019
D.弦完整振動數	6	4	5	7
E.每次振動像素(pixels, C/D)	484.2	724.5	578.4	431.3
F.每秒掃描列數（列像素 / sec）	189960	189960	189960	189960
G.每次振動時間(sec, E / F)	0.002549	0.003814	0.003045	0.002270
H.振動頻率(Hz, 1/G)	392.34	262.20	328.42	440.45

實驗發現：

將烏克麗麗放在充足光源下，拍攝時手機與琴弦方向垂直就能拍出波浪狀的琴弦，以波浪波峰位置的素像作為起點終點，就能算出一次振動經歷的時間，算出琴弦振動頻率，發現測出結果與琴弦的標準音頻很接近，表示用捲簾快門的果凍效應測量快速振動的物體十分準確。

七、實驗七：用捲簾快門的果凍效應拍出聲音的「形狀」

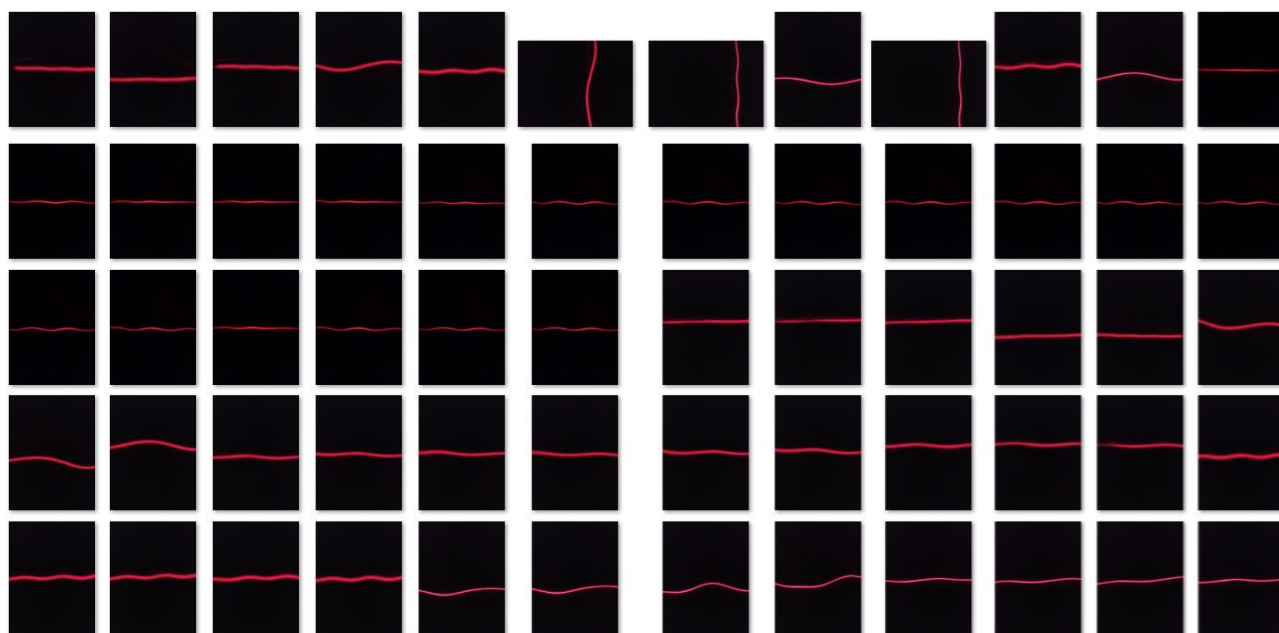


圖 4-7-1 頻率聲波發生器 AAP 驅動藍芽音箱發出特定頻率的聲音波形

表 4-7-1 頻率聲波發生器 AAP 驅動藍芽音箱發出特定頻率的音計算

計算項目	原始波形					
	拉寬處理後					
A.APP 設定頻率(Hz)	50	75	100	125	150	175
B.起始像素(pixels)	1186	151	141	277	609	572
C.結尾像素(pixels)	3058	2669	2977	3337	3158	3267
D.總像素(pixels, C-B)	1872	2518	2836	3060	2549	2695
E.波形數	0.5	1	1.5	2	2	2.5
F.每次振動像素(pixel, D / E)	3744.0	2518.0	1890.7	1530.0	1274.5	1078.0
G.每秒掃描列數 (列像素 / sec)	189960	189960	189960	189960	189960	189960
H.每次振動時間(sec, F / G)	0.01971	0.01326	0.00995	0.00805	0.00671	0.00567
I.振動頻率(Hz, 1 / H)	50.74	75.44	100.47	124.16	149.05	176.22
J.測量誤差(% , (I-A) / A)	1.47%	0.59%	0.47%	-0.67%	-0.64%	0.69%

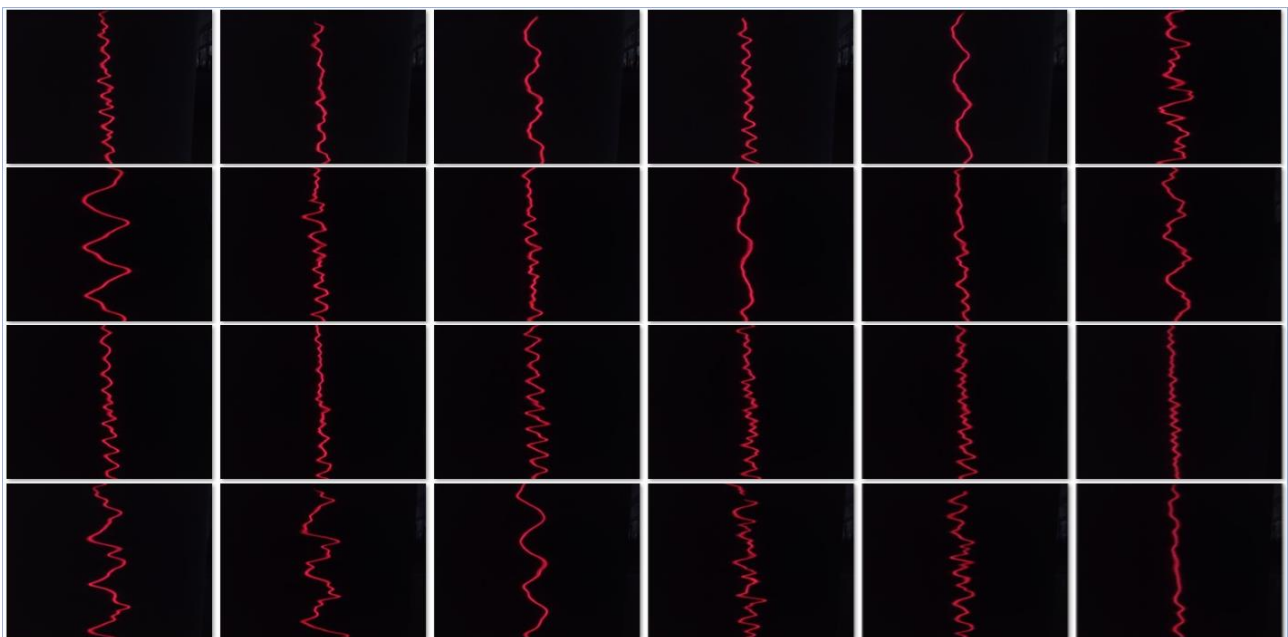
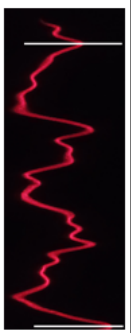


圖 4-7-2 用三代自製聲波杯拍的各種人聲「形狀」

表 4-7-2 三代自製聲波杯拍的各種人聲計算頻率

計算項目 \ 波形							
A.起始像素(pixels)	124	835	1026	335	661	384	383
B.結尾像素(pixels)	3411	2963	3272	3269	2776	3422	3125
C.總像素(pixel, B-A)	3287	2128	2246	2934	2115	3038	2742
D.完整波形數	3	2	2	8	2	3	9
E.每次振動像素 (pixels, C / D)	1095.7	1064.0	1123.0	366.8	1057.5	1012.7	304.7
F.每秒掃描列數 (列像素 / sec)	189960	189960	189960	189960	189960	189960	189960
G.每次振動時間 (sec, E / F)	0.005768	0.005601	0.005912	0.001931	0.005567	0.005331	0.001604
H.振動頻率 (Hz, 1 / G)	173.37	178.53	169.15	517.96	179.63	187.59	623.51

實驗發現：

參考科工館雷射聲波杯的概念，透過捲簾快門拍攝雷射經過振動膜反射後投射的位移變化，成功記錄聲音的「形狀」。透過聲音的「形狀」也能參考實驗六計算出聲音的頻率，比對用 APP 發出的特定音頻，發現測量結果準確，誤差約 1% 左右，各種聲音的「形狀」也能呈現出課本學到的「頻率」、「音色」、「音量」的不同，十分有趣。

伍、討論

一、結果分析與解釋

- (一) 感光元件逐行掃描的特性導致影像不同部分的記錄產生時間差，造成物體影像形變—果凍效應。拍攝高速移動物體時，如風扇葉片或琴弦，影像可能出現傾斜、彎曲或波浪狀變形。
- (二) 透過已知閃頻（120Hz、2016Hz）的 LED 光源測試不同感光元件的掃描速度，掃描速度越慢果凍效應會越明顯。受測器材中 Nikon D5100 具有最快的掃描速度，而 myFirst Camera 3 的掃描速度最慢，但 Nikon D5100 採用的是機械式捲簾快門，所以會拍出寬度不同的條紋。
- (三) 風扇與琴弦實驗中，果凍效應可用來測量轉速與振動頻率。透過捲簾快門拍攝影像，計算物體轉動角度或振動週期，結果測得的數值與設定值相近（調音後的烏克麗麗），證明方法的可行性。
- (四) 在聲音可視化的實驗中，使用雷射聲波杯與捲簾快門拍攝振動膜的反射光，成功記錄到聲音影響下的雷射變化，表示此技術可應用於聲學研究。

二、與既有文獻比較

- (一) 網路上討論的大多是捲簾快門導致果凍效應使影像變形與運動失真，本研究進一步應用於轉速與頻率測量。
- (二) 既有的聲音可視化技術，如振動膜或液體波紋成像，通常需要特殊的設備與光學條件。本研究證明捲簾快門可透過記錄雷射光受聲音影響的變化，為聲波可視化提供了更簡單的方法。

三、研究的限制

- (一) 光源限制：本研究使用 120Hz LED 燈作為標準光源測量捲簾快門的掃描速度，但高階的 CMOS 感光元件的掃描速度極高，無法拍出完整的黑白條紋（一黑一白），若要測量掃描速度極高的感光元件就須使用閃頻更快的光源。（實驗三部分感光元件測試改用 2016Hz 光源）
- (二) 設備差異：測量結果與相機解析度（畫面長邊像素與記錄形變範圍有關、畫面短邊像素與記錄時間有關）、感光元件特性（掃描速度）與影像處理機制有關（自動功能或是數位變焦-大部分 iPhone 手機）。
- (三) 測量方法：風扇與琴弦的測量是基於靜態影像（照片）進行計算，所以拍照時需在穩定且足夠照度的環境，才能獲得精確結果。
- (四) 聲波影像測試條件：雷射聲波杯實驗中的一字雷射光投射在白紙上的寬度會降低精確性，可再優化光路設計。

四、研究的應用與影響

- (一) 攝影與影像技術：本研究結果可提供攝影者減少果凍效應的設備建議。例如：在拍攝快速運動物體時，應選擇掃描速度較快的相機，獲得更清晰的影像。
- (二) 非接觸式測量運動物體：捲簾快門可用於測量移動、旋轉與振動率，適用於風扇、馬達、弦樂器等設備的測試，無需接觸物體即可獲取運動數據的方法，降低測試過程的干擾。
- (三) 測試光源與顯示技術：透過捲簾快門測量光源的閃爍頻率，可應用於 LED 燈具與顯示器的品質測試，檢查光源穩定性，減少閃爍對人眼健康的影響。
- (四) 聲音可視化：研究成功應用捲簾快門於聲波可視化，應用於聲學分析與科學教育。一字雷射光須與感光元件掃描方向垂直，只能記錄單一軸向聲音的振動，可以進一步嘗試設計雙軸以上的聲音可視化技術。

陸、結論

本研究主要探討果凍效應（Jello Effect）與捲簾快門（Rolling Shutter）之間的關係，並分析其在測量與影像應用上的潛力。研究動機來自日常生活中的觀察「錄影時，兩刷運動的影像出現明顯變形」進一步發現這種變形現象與攝影設備的感光元件掃描方式密切相關。透過實驗，包括測量 LED 燈閃爍頻率、不同攝影設備的掃描速度，以及應用捲簾快門測量快速變化的物體，如光源閃爍、風扇轉速、琴弦振動頻率。此外，我們嘗試將捲簾快門應用於聲音影像化，記錄聲波的可視化形狀，進一步驗證其在科學測量與影像分析領域的應用價值。

果凍效應主要來自感光元件逐行掃描影像的特性，當物體高速運動時，不同時間掃描的影像部分會產生時間差，導致畫面變形。我們發現不同攝影設備的掃描速度存在明顯差異。這種差異直接影響影像變形的程度，說明在高速攝影時，選擇掃描速度快的設備可以減少果凍效應，或反向應用該效應進行測量。

捲簾快門造成的影像變形測量風扇的轉速與琴弦的振動頻率，結果及數據與設定相近(調音後的烏克麗麗)，表示可作為測量轉速與振動的有效方法；利用捲簾快門結合雷射聲波杯，成功記錄到聲音的「形狀」，提供了聲音影像化的方法。

在攝影領域，理解果凍效應的成因與影響，可幫助攝影師選擇適當的設備來避免影像變形；測量應用方面，可在測量光源的閃爍頻率、物體的轉速及振動頻率，提供一種簡單有效的無接觸測量方法；聲學領域，透過捲簾快門記錄聲音波形，可發展聲波影像化技術。

未來研究方向可以進一步拓展測試條件，例如使用更高速的閃爍光源(如 2016Hz LED)來驗證捲簾快門的極限解析能力，或是反過來，使用掃描速度極快的感光元件測量閃頻極快的光源，探討不同攝影設備之間的測量誤差，提升測量準確性。聲音影像化應用上，可優化光學設計，使聲波可視化技術更為精確。

柒、參考文獻資料

一、參考文獻

有趣的果凍效應。臺灣網路科教館科展作品檢索。取自：

<https://www.ntsec.edu.tw/science/detail.aspx?a=21&cat=16344&sid=16582>

【新聞】Raspberry Pi Global Shutter Camera 出來了，樹莓派全域快門相機。取自：台灣樹莓派 - Raspberry Pi Taiwan。 https://piepie.com.tw/51606/new-raspberry-pi-global-shutter-camera/#%E4%BB%80%E9%BA%BC%E6%98%AF_Rolling_Shutter_%EF%BC%9F

S5ii Rolling Shutter Tests - All modes · reddit · 取自：

https://www.reddit.com/r/videography/comments/10p8lok/s5ii_rolling_shutter_tests_all_modes/?rdt=50869

捲簾快門和全局快門相機在光學相機通訊中的性能 · SEMANTICSCHOLAR · 取自：

<https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-of-rolling-shutter-and-global-shutter-Le-Le/d7ba5ba91a8d9bb5252c8c75d9f24896bc8ccafe>

Why rolling shutter effect is on CMOS · Anton River - YouTube · 取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=17PSgsRI09Q&t=6s>

果凍效應 rolling shutter · 知乎 · 取自：<https://zhuanlan.zhihu.com/p/72209698>

【Fun 科學】果凍效應(只要是手機都可以做到喔~)。YouTube · 取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=xCnINMxAm3M>

果凍效應是什麼？好吃嗎？ · Mio ON AIR 小教室 · 取自：

https://www.mio.com/tw/Newsletter/20180628/newsletter_web.html

果凍效應 ローリングシャッター現象 The Rog Shutter Effect 롤링 셔터 · 程鋒科學教育工作坊彭大立 · 取自：<https://www.youtube.com/watch?v=qY0o-wz9NHc>

東捷生活科技有限公司 · 取自：[https://hl-life.com/flicker-lighting-terms-and-](https://hl-life.com/flicker-lighting-terms-and-definitions/?srsltid=AfmBOoq0h75TAgW3r8PYMH8d9xudGPcWEAl2lEfW-boxa3EvpcVD7rX)

[definitions/?srsltid=AfmBOoq0h75TAgW3r8PYMH8d9xudGPcWEAl2lEfW-boxa3EvpcVD7rX](https://hl-life.com/flicker-lighting-terms-and-definitions/?srsltid=AfmBOoq0h75TAgW3r8PYMH8d9xudGPcWEAl2lEfW-boxa3EvpcVD7rX)

常見問題 - LED 照明閃爍 · LEDBenchmark-Measuring Flicker · 取自：<http://www.ledbenchmark.com/faq/LED-Flicker-Measurement.html>

LED 燈為什麼會出現頻閃 · 台灣綠能與 LED 應用協會 · 取自：<https://www.taiwanled.org.tw/industrymovement-64-page723>

如何減少印刷色差？色彩模式 CMYK 和 RGB 的差異 · 影視學院-jjfilm.com.tw · 取自：

<https://www.jjfilm.com.tw/l/如何減少印刷色差？色彩模式 CMYK 和 RGB 的差異/>

三原色光模式 · 維基百科 · 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/三原色光模式>

【色彩學】色光三原色(RGB)與色料三原色(CMY) · gameislearning.url.tw · 取自：

https://www.gameislearning.url.tw/article_content.php?getb=5&foog=9998#google_vignette

CCD vs CMOS: Difference Between CCD and CMOS Image Sensor · NEVSEMI.COM · 取自：

<https://www.nevsemi.com/blog/ccd-vs-cmos>

PIPT 感光元件 · 維基百科 · 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/感光元件>

CCD 與 CMOS 哪個更好？情況很複雜... · TELEDYNE Vision Solutions · 取自：

<https://www.teledynevisionsolutions.com/en-HK/learn/learning-center/imaging-fundamentals/ccd-vs-cmos/>

Image sensor · WIKIPEDIA · 取自：https://en.wikipedia.org/wiki/Image_sensor

Film speed · WIKI · 取自：https://en.wikipedia.org/wiki/Film_speed

感光度 · 維基百科 · 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/感光度>

曝光三要素 (曝光三角)：光圈、快門、ISO。Tim Ting Photography · 取自：

<https://timtingphotography.com/exposure-triangle/>

全波整流和半波整流 (AC/DC 轉換) · 電子小百科 - Electronics Trivia | 羅姆半導體集團 - ROHM Co。

https://www.rohm.com.tw/electronics-basics/ac-dc-converters/acdc_what2

脈衝寬度調變 (PWM) 解析 · Medium.com · 取自：<https://medium.com/@chenjessie8699/lesson1-脈衝寬度調變-pulse-width-modulation-解析-a057c0e87a15>

Ukulele · Wikipedia · 取自：<https://en.wikipedia.org/wiki/Ukulele>

烏克麗麗 · 維基百科 · 取自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/烏克麗麗>

UKU：烏克麗麗初心者講座：各部位構造介紹。璃思維スタジオ制作 | LiSWEi.com · 取自：

<https://liswei.com/tw/ukulele-info/>

烏克麗麗調音教學 · Guitar to go - music company · 取自：<https://guitartogo-music.com/learning-essentials/how-to-tune-ukulele/?srsltid=AfmBOoozeEvRU4eAnyGQG8LGb1WJYbWPLeZd46yAGUex89n0gDdmp16z>

The Sense of Hearing · All Ears Hearing · 取自：<https://hearing-aids-near-me.com/the-sense-of-hearing/>

雷射聲波杯 · 國立科學工藝博物館科學學習中心-Youtube · 取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=I3hdhI1Dv1I>

中華民國國家標準 CNS11640：雷射安全使用標準 · 中華民國國家標準 CNS · 取自：

https://www.cnsonline.com.tw/?locale=zh_TW。

雷射防護眼鏡上標示的 CE 和 OD 代表什麼意思呢 · 鐳屏科技 · 取自：<https://m.laserpair.com/nd.jsp?id=211>

歐洲合格認證 · 維基百科 · 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/歐洲合格認證>

雷射安全介紹 · IADIY 部落格 · 取自：[https://tw.iadiy.com/IADIY-](https://tw.iadiy.com/IADIY-%E9%83%A8%E8%90%BD%E6%A0%BC/laser-safety-雷射安全介紹)

[%E9%83%A8%E8%90%BD%E6%A0%BC/laser-safety-雷射安全介紹](https://tw.iadiy.com/IADIY-%E9%83%A8%E8%90%BD%E6%A0%BC/laser-safety-雷射安全介紹)

雷射防護安全的重要性 · 長豐光學科技股份有限公司 · 取自：

https://www.lasermech.com.tw/portal_c3_cnt_page.php?owner_num=c3_553497&button_num=c3&folder_id=3846&cnt_id=3654&order_field=&order_type=&search_field=&search_word=&search_field2=&search_word2=&search_field3=&search_word3=&bool1=&bool2=&search_type=1&up_page=1

【評語】 080118

C M O S 型攝影機所造成的捲簾效應，常常在高速攝影中造成困擾。特別是對影像產生的扭曲，然而該作品卻反向思考利用該現象來進行對高速運動下物體運動的量測以及攝影。這是該作品極具創意的核心觀念：將捲簾效應改良為提高了攝影機對高速運動物體的捕捉與紀錄。而且也發展出了一整套的分析方式將所記錄的扭曲影像如何還原成隨時變的高速運動。同時以琴弦的震動為例，展示了該方法。像這樣的創意發想並能夠付諸實行，而且完成一個具體的方案的作品是非常難得一見的。

作品海報

果凍視界：看不見的頻率

看得見的「聲影」

摘要

探討果凍效應與捲簾快門間的關係及其應用，動機源自雨刷在錄影時產生變形，研究目的包括：（一）「測量 LED 燈閃爍頻率」，作為計算感光元件掃描速度的依據。（二）「測量不同攝影設備的掃描速度」作為後續測量的依據。（三）「探討如何運用捲簾快門測量快速變化的物體」（明暗變化、轉動、振動）（四）嘗試以捲簾快門記錄聲音振動，呈現可視化聲波形狀。研究發現不同設備的掃描速度不同，也影響變形程度，選擇合適的設備可減少影像扭曲或更適合測量不同變化速度的物體，證明捲簾快門可作為測量光源閃爍頻率、亮度變化、風扇轉速、弦樂器頻率的有效工具，也能捕捉聲音的「形狀」，拓展其於科學測量與攝影領域的應用價值。

關鍵字：果凍效應、捲簾快門、影像感光元件

壹、前言

一、研究動機

坐在車裡，行車記錄器中的雨刷看起來變形像果凍一樣晃動！上網搜尋發現這種現象被稱為「果凍效應」，是「捲簾快門」拍攝快速移動物體時，感光元件逐行掃描使影像產生時間差。果凍效應是否會因雨刷的速度不同而變化？用不同攝影設備，這種現象是否還會發生？除雨刷以外，還有哪些地方能觀察到果凍效應呢？帶著這些疑問，邀請朋友們一起研究，揭開果凍效應與捲簾快門之間的奧秘！

二、研究目的

（一）研究如何測量 LED 燈閃爍頻率

要測量捲簾快門的掃描速率，要有「變化快且已知速度」的目標當作比較基礎。「已知移動速度的物體」不好找（必須速度穩定，不能忽快忽慢），所以採用已知會穩定閃爍的光源當作比較標準，將光源閃爍的慢動作錄影拆成照片，算出閃爍頻率。

實驗一：測量 LED 燈閃爍頻率

（二）用已知閃爍頻率的光源測量 COMS 捲簾快門的掃描速度。

在閃爍光源下拍照，會出現條紋，要瞭解相機快門時間和感光度設定是否會影響條紋，才能用條紋的像素計算感光元件的掃描速度（pixels/sec 或 列像素/sec）。

實驗二：在閃爍光源下相機快門時間和感光度對條紋的影響

實驗三：測量不同手機（相機）和數位相機 COMS 捲簾快門的掃描速度

（三）研究如何應用 COMS 捲簾快門測量物體變化的速度（移動、轉動、明暗變化）。

實驗四：用捲簾快門測量各種光源閃爍頻率及亮度變化

實驗五：用捲簾快門的果凍效應測量電風扇扇葉的旋轉速度

實驗六：用捲簾快門的果凍效應測量琴弦振動頻率

（四）研究如何應用 COMS 捲簾快門拍攝有趣題材。

實驗七：用捲簾快門的果凍效應拍出聲音的「形狀」

三、文獻回顧

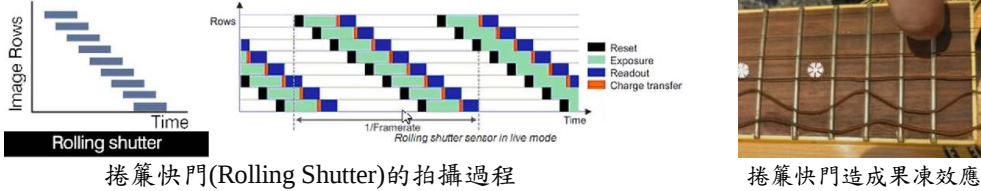
（一）科展相關研究

表 1-3-1 科展相關研究搜尋結果（臺灣網路科教館-科展作品檢索）

搜尋關鍵字	搜尋結果	研究探討內容
果凍效應	有趣的果凍效應-第 60 屆全國科展（僅一筆）	手機如何能拍到柱子傾斜？可否使用影印機，來模擬捲簾快門？如何推測相機快門的掃描方向？車速是否影響目標物傾斜的角度？光線強弱，是否影響果凍效應的拍攝？
捲簾快門	同上	

學習心得：在臺灣網路科教館搜尋全國科展作品，只有以關鍵字「果凍效應」找到一篇相關研究，探討內容如表 1-3-1，與我們預計研究方向（測量物體變化的速度（明暗變化、轉動、振動）不同。

（二）捲簾快門（Rolling Shutter）



（三）果凍效應（Jello Effect）：

用捲簾快門方式拍攝，逐行掃描速度不夠，拍攝結果出現「傾斜」、「搖擺不定」或「部分曝光」等情況就是果凍效應。

學習心得：捲簾快門會讓相片不同位置拍到的影像有時間差，所以可以測量變化快的事物，但要先知道捲簾快門的掃描速度，所以要先用穩定、變化快且已知變化速度的事物來測量。

（四）頻閃（Strobe）：

是指光輸出時明暗的變化，主要有兩個方面，一是周期特性，即頻率；二是變化幅度，即振幅大小。交流電會週期性的開關，因此連接到交流電源的 LED 燈會出現閃爍。

閃爍百分比(Percent Flicker) = (A-B) / (A+B) × 100

閃爍指數(Flicker Index) = 高於平均值的面積 / 總面積 = Area1 / (Area1 + Area2)



學習心得：使用交流電的 LED 常有頻閃現象，閃爍頻率源自交流電變化，所以頻率穩定，可用來比對感光元件掃描速度，一個頻閃週期造成的明暗條紋寬度，就是感光元件一個頻閃週期內掃描過的像素列數。

（五）RGB 三原色模型（RGB color model）：

學習心得：像素的 RGB 值代表顏色是由不同強度的三原色光「混加成的」，數值越高代表色光越強，可以透過 RGB 值比較像素的亮度和顏色。

（六）影像感光元件（Image sensor）：

表 1-3-1 CCD 和 CMOS 比較表（自行整理資料）

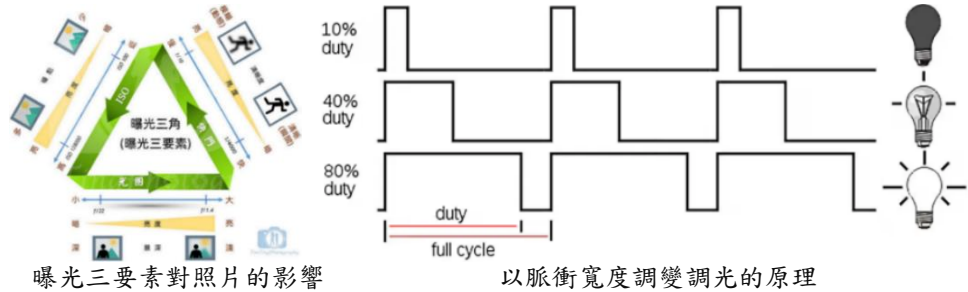
感光元件	CCD Sensors	CMOS Sensors
快門	通常具有全域快門。	可以有全域快門，但不是通用的；一些 CMOS 感測器使用捲簾快門。

學習心得：CMOS 是多數數位相機和手機鏡頭的感光元件，因為使用捲簾快門，在拍攝影像變化快的場景時，常會出現果凍效應。

（七）感光度（Light sensitivity, Film_speed）：

感光度，又稱為 ISO 值，是底片對於光的靈敏程度。當所有參數和環境都一樣時，ISO200 的照片會比 ISO100 的照片亮一倍。

學習心得：相機 ISO 值越高，感光能力越高，照片越亮；我們可以設計實驗看看感光度和頻閃條紋之間的關係，如果感光度不影響頻閃條紋，就能透過照片中的條紋測出感光元件的掃描速度。



（八）全波整流和半波整流（AC/DC 轉換）

表 1-3-2 交流電的全波整流和半波整流

	全波整流	半波整流
電路結構		
輸入電壓波形		
整流後的電壓波形		
整流平滑後的電壓波形		

學習心得：交流電的頻率是 60Hz，經過全波整流頻率會變為 120Hz，應該就是市電光源閃爍是 120Hz 的原因。

（八）脈衝寬度調變（Pulse Width Modulation，PWM）：

脈衝寬度調變（PWM）是一種常用於電子和電機工程中的技術。通過調整脈衝的持續時間（即寬度）來調節通過電路的平均電流。

學習心得：PWM 常用在 LED 光源調光，所以 PWM 調光 LED 只要亮度調暗，有「LED off」就會出現閃爍情況，在捲簾快門拍攝下就會出現黑白分明的條紋。

（九）烏克麗麗（Ukulele）：

一種夏威夷的撥弦樂器，歸屬在魯特琴樂器一族，通常有四條弦。以 GCEA 調音（由左至右）。根據尺寸不同，有 16 至 22 個音格。

學習心得：烏克麗麗是常見的弦樂器，可以用果凍效應拍出波浪狀的琴弦，可以先將四條弦調成標準音，看看拍出琴弦形狀計算出來的頻率會不會相同。



（十）雷射聲波杯（國立科學工藝博物館-科學學習中心）

學習心得：透過雷射聲波杯可以看到聲音的「形狀」，我們修改聲波杯利用感光元件的捲簾快門效果，試著拍出聲音的「形狀」。

（十一）雷射安全防護

5.1.2.2	第 2 級的可見光雷射或雷射系統：第 2 級的可見光雷射或雷射系統需要的管制措施只是固定在雷射外殼或操作板上之適當的警告標誌，（參考第 5.6 節）以及護罩。（參考第 5.2.2 節）
5.1.2.3	第 2 a 級雷射或雷射系統：第 2 a 級雷射或雷射系統所需要的管制措施，只是警示標誌（參考第 5.6.3 之 (2) 節）。

Class2 級雷射的管制措施

貳、研究設備及器材

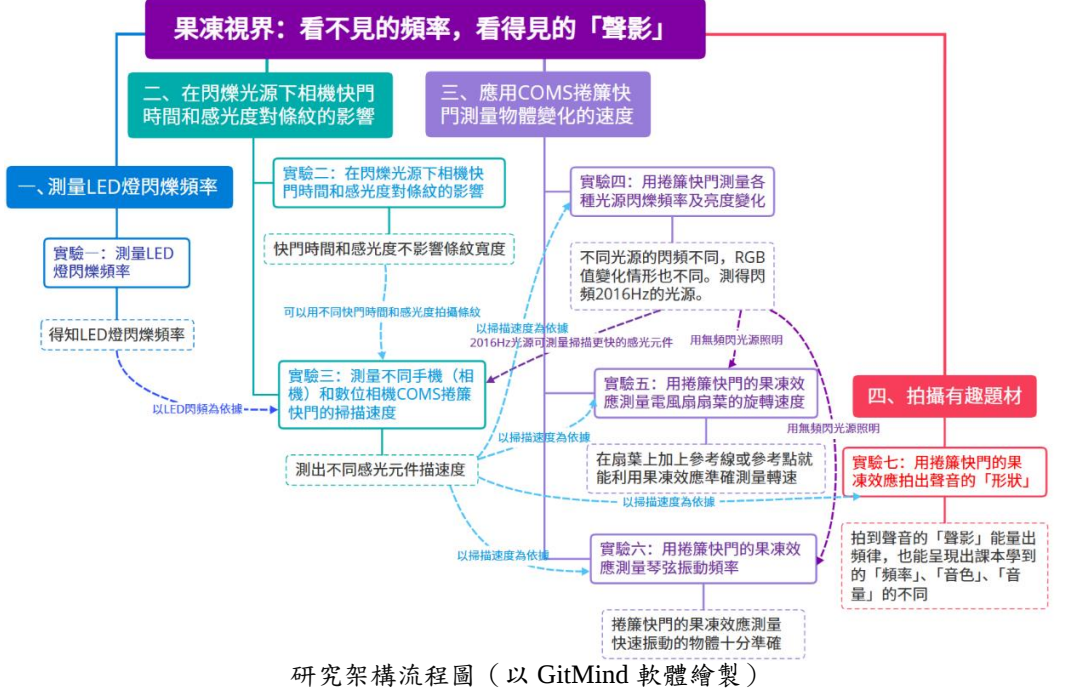
- 設備與器材：燈座、各式燈泡、鑰匙扣燈、藍燈條、手電筒、LCD 螢幕、小風扇、烏克麗麗、一字雷射（Class II 1mw 650nm）、電池座、有源蜂鳴器、無段開關、電池、電池座、各型號行動電話、數位相機、行動風扇、大型量角器、三腳架、藍芽喇叭、非接觸式轉速計。
- 使用軟體：小畫家、PhotoCap6.0、GIMP2.10.38、Soundcorset Tuner 調音器、Spectroid 聲音頻譜儀、
- 耗材：氣球、免洗碗、鏡面紙、紙箱、雙面膠、瓦楞板、棉線、膠帶、排刷、墨汁、噴漆。

表 2-3-1 使用軟體一覽表

軟體圖示	JPG 轉換器	小畫家	PhotoCap 6.0	GIMP 2.10.38	Spectroid 聲音頻譜儀	Soundcorset Tuner 調音器	頻率聲波發生器
名稱	Free video to jpg converter	小畫家	PhotoCap 6.0	GIMP 2.10.38	Spectroid 聲音頻譜儀	Soundcorset Tuner 調音器	頻率聲波發生器
用途	將影片拆成照片	截圖縮放、讀像素位置	讀像素位置、放大鏡功能	讀取像素 RGB 值	測量音頻、調音	烏克麗麗調音供測量比對誤差	發生確定頻率供測量比對誤差

參、研究過程及方法

一、研究架構與流程



研究架構流程圖（以 GitMind 軟體繪製）

二、實驗設計：

（一）實驗一：測量 LED 燈閃爍頻率

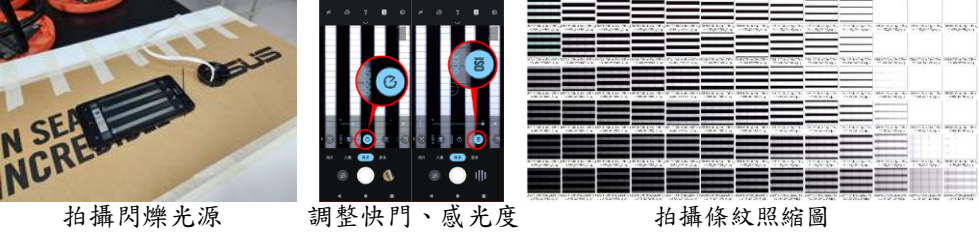
LED 閃爍頻率很快，雖然可以利用視覺暫留的現象察覺燈光閃爍，但不能測量出閃爍頻率，利用手機慢動作錄影（960fps）的功能，先錄下燈光閃爍情形再將影片檔分成照片，計算出閃爍頻率。



賣場挑燈泡 閃爍光源下的視覺暫留 慢動作錄影 軟體操作畫面

（二）實驗二：在閃爍光源下相機快門時間和感光度對條紋的影響

在閃爍光源下拍照畫面會出現條紋，就能利用條紋寬度測量出感光元件的掃描速度，但相機拍攝時有許多設定，實驗二就是要瞭解相機快門時間和感光度設定是否會影響條紋（像素寬度、深淺）。



拍攝閃爍光源 調整快門、感光度 拍攝條紋照縮圖

(三) 實驗三：測量不同手機（相機）和數位相機 COMS 捲簾快門的掃描速度

利用畫面中條紋寬度（一個亮紋和一個暗紋的像素寬度）經過時間是 1/120 秒，就能計算感光元件的掃描速度（pixels /sec）



以 PhotoCap 開啟條紋照片 PhotoCap 資訊視窗 三個完整閃爍條紋

(四) 實驗四：用捲簾快門測量各種光源閃爍頻率及亮度變化

利用 LED 燈 120Hz 閃爍頻率，可以測量出不同手機相機鏡頭的掃描速度，反過來也能利用已知的感光元件掃描速度測量光源頻閃（頻閃的頻率和明暗變化情形）（不同光源的閃爍頻率會一樣嗎？明暗變化會呈波浪狀嗎）。



取色器選擇半徑 3 用讀出像素位置及 RGB 值 手電筒與鑰匙扣燈 用 GIMP 讀出 RGB 值

(五) 實驗五：用捲簾快門的果凍效應測量電風扇扇葉的旋轉速度

利用捲簾快門造成的果凍效應可以測量快速移動物體的速度，我們也試試測量快速旋轉的風扇轉速。



貼上穿過圓心的棉線 扇葉尖端點上標記 拍攝攝旋轉中的風扇 螢幕上量出照片角度

(六) 實驗六：用捲簾快門的果凍效應測量琴弦振動頻率

有人利用果凍效應把振動的琴弦拍成波浪狀，我們也來嘗試一下，並把照片拿來計算音頻，看看算出來的音頻和實際的音頻相差多少。



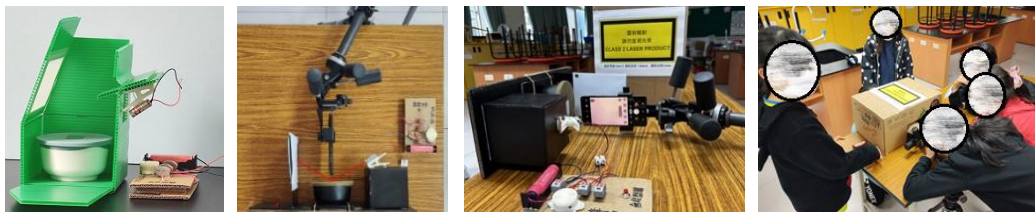
第一弦調音(A) 調整水平 調整焦距 亮光下撥弦拍攝

(七) 實驗七：用捲簾快門的果凍效應拍出聲音的「形狀」

科工館的雷射聲波杯是用點狀雷射，捲簾快門是像素成列依序掃描的，所以改用一字形雷射，參考科工館聲波杯自製聲波杯實驗。



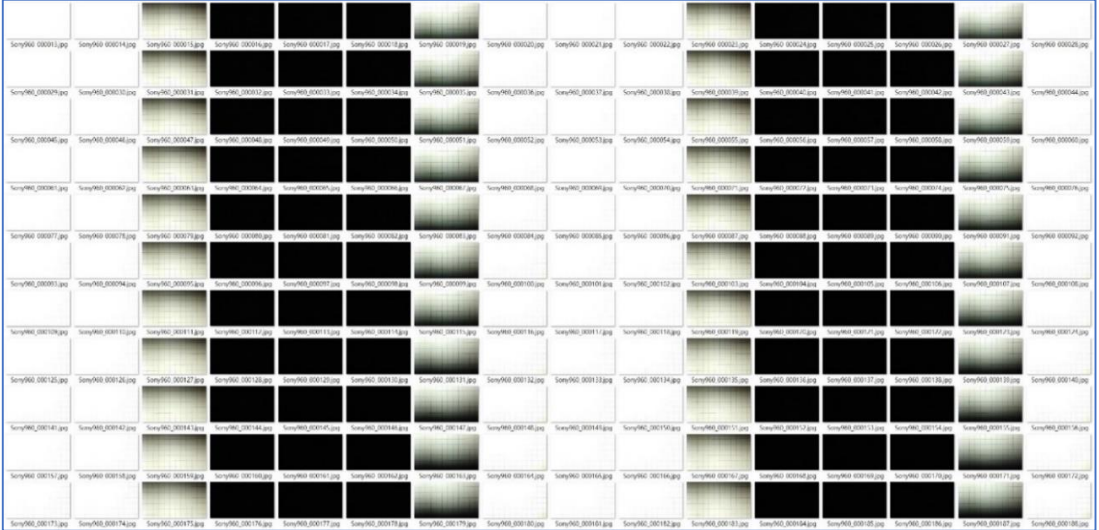
電源開關附蜂鳴器 雷射防護護目鏡 利用煙霧觀察光路 第一代聲波杯



第二代聲波杯(側) 器材設置 操作前對齊投影位置 操作時手在箱內按快門

肆、研究結果

一、實驗一：測量 LED 燈閃爍頻率



慢動作錄影拆成照片在檔案總管的縮圖

LED 燈閃爍頻率計算：

慢動作錄影祇率 960fps，照片間相差 1/960 秒，每次閃爍經過八張照片時間

每次閃爍時間為 1/960(秒) × 8 = 1/120(秒) 閃爍頻率：1 ÷ 1/120(秒) = 120(Hz)

實驗發現：

拆出 177 張照片計算出閃頻為 120Hz，且明暗變化很整齊，表示閃爍頻率很穩定，推測頻閃現象來自電源的交流頻率，可作為測量相機捲簾快門掃描速度的標準光源。

二、實驗二：在閃爍光源下相機快門時間和感光度對條紋的影響



Moto edge 20pro B 鏡頭以不同感光度、快門時間拍攝閃爍光源的條紋（檔案總管縮圖）

實驗發現：

感光度越高，照片越亮；快門時間越短，畫面越暗、條紋邊緣越清晰。快門時間和感光度不會影響條紋寬度，所以可以用已知閃頻光源造成的條紋像素寬度計算 COMS 捲簾快門的掃描速度。

三、實驗三：測量不同手機（相機）和數位相機 COMS 捲簾快門的掃描速度

表 4-3-1 手機鏡頭 COMS 捲簾快門拍攝 120Hz 閃頻光源產生的條紋

Moto A 鏡頭	Moto B 鏡頭	Moto C 鏡頭	Sony 主鏡頭	Redmi 12	iPhone 8	myFirst Camera 3	Alcatel 主鏡頭	ZenFone 6	iPhone 7

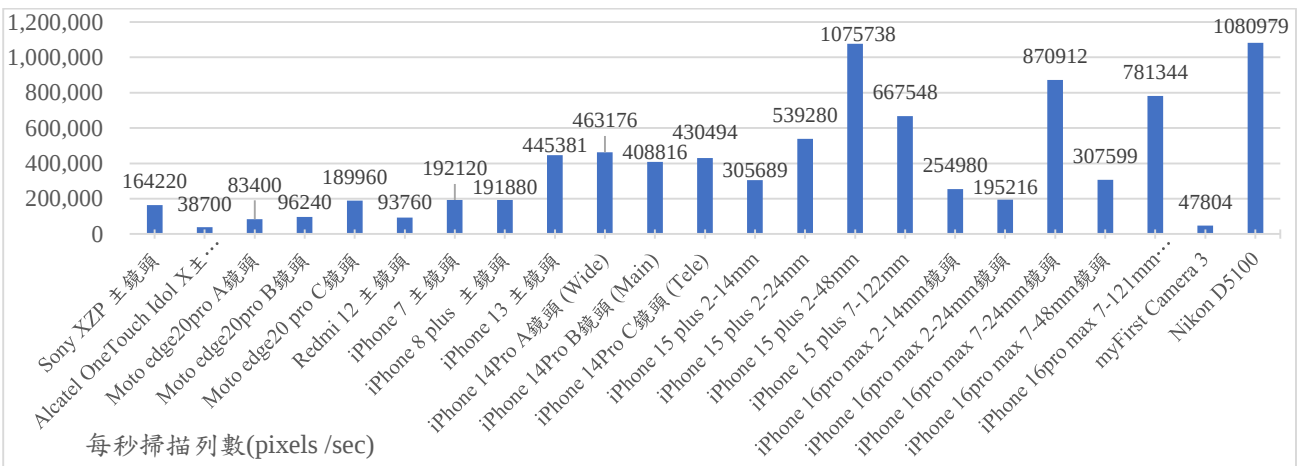
表 4-3-2 以手機鏡頭 COMS 捲簾快門拍攝 2016Hz 閃頻光源產生的條紋

iPhone 16 pro max 2-14mm	iPhone 16 pro max 2-24mm	iPhone 16 pro max 7-24mm	iPhone 16 pro max 7-48mm	iPhone 16 pro max 7-121mm	iPhone 15 plus 2-14mm	iPhone 15 plus 2-24mm	iPhone 15 plus 2-48mm	iPhone 15 plus 7-122mm	Nikon D5100

表 4-3-4 手機或相機鏡頭拍攝 120Hz 光源，以條紋像素計算掃描列數（畫面能顯示完整條紋）

手機型號	鏡頭	(A) 起始像素	(B) 結尾像素	(C) 總像素 (B-A)	(D) 完整條紋數	(E) 條紋像素 (C/D)	(F) 每秒掃描列數 (E*120)	(G) 寬幅像素	掃描整個畫面的時間 (G/F)(ms)
Moto edge20 pro	A 鏡頭	155	2240	2085	3	695.0	83400	2448	29.35
	B 鏡頭	122	2528	2406	3	802.0	96240	3000	31.17
	C 鏡頭	136	3302	3166	2	1583.0	189960	3456	18.19

以下略



各手機或相機鏡頭 COMS 捲簾快門的掃描速度(pixels / sec)

實驗發現：

不同手機鏡頭感光元件拍攝的掃描速度差異很大，同手機不同鏡頭表現也不一樣，掃描速度最快的是 Nikon D5100 相機，平均每秒 1080979 列像素，最慢的是 myFirst Camera 3 相機每秒只 47804 列像素，差距是 22.6 倍；掃描速度會影響拍攝整張畫面的時間，拍完一張照片需時最短的就是 Nikon D5100，最慢的是 myFirst Camera 3，拍一張照片的掃描時間是 Nikon D5100 的 33.91 倍，拍變化快的物體時，如果要減輕果凍效應可以選用掃描速度快的相機。

特別是 Nikon D5100 拍出的幾個條紋寬度不是相同的，可能是因為 Nikon D5100 是使用機械快門造成的。

四、實驗四：用捲簾快門測量各種光源閃爍頻率及亮度變化

表 4-4-1 以 Moto edge20 pro B 鏡頭拍攝各種光源產生的條紋測量閃爍頻率及亮度變化

鑰匙扣燈-亮	鑰匙扣燈-暗	藍光燈條-亮	藍光燈條-暗	LED 手電筒-亮	LED 手電筒-中	LED 手電筒-暗	特力屋 LED_4.5W	OSRAM 曲柔 42W	Philips 鵝綠_60W	Philips Helix13W	TOSHIBA LED_16W	Apex LED_16W	ADATA LED_10W	

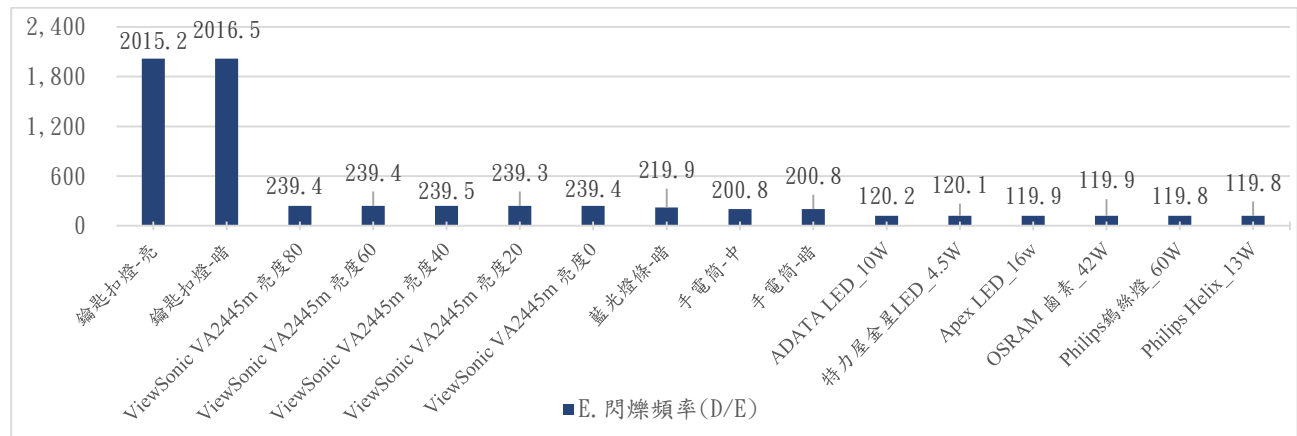
表 4-4-2 以 Moto edge20 pro B 鏡頭拍攝各種光源產生的條紋測量閃爍頻率

光源	(A) 起始像素	(B) 結尾像素	(C) 像素間距 (B-A)	(D) 條紋數	(E) 條紋像素 (C/D)	(F) 掃描速度 (pixels / sec)	(G) 閃爍頻率 (F/E)
鑰匙扣燈-亮	28	2989	2961	62	47.8	96240	2015.2
ViewSonic VA2445m 亮度 0	155	2969	2814	7	402.0	96240	239.4
藍光燈條-暗	331	2957	2626	6	437.7	96240	219.9
特力屋金星 LED_4.5W	356	2759	2403	3	801.0	96240	120.1
Philips Helix_13W	323	2733	2410	3	803.3	96240	119.8

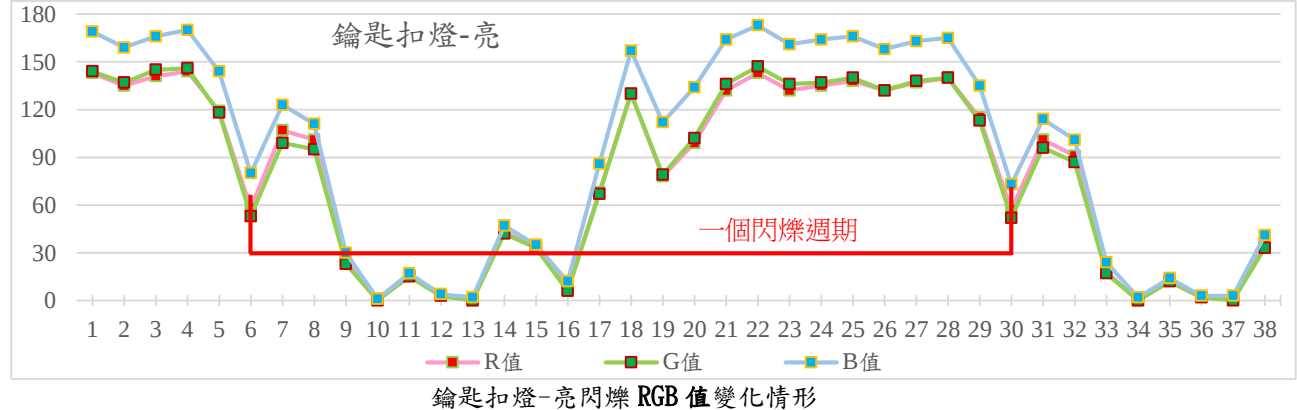
以下略

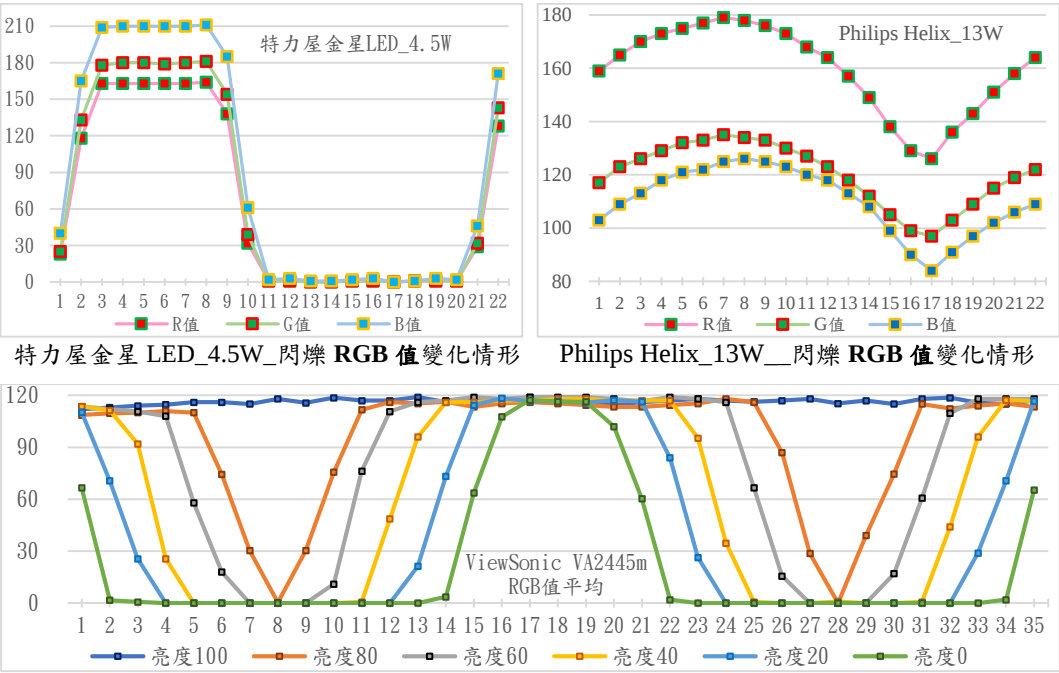
表 4-4-3 以 Moto edge20 pro B 鏡頭拍攝 ViewSonic 螢幕不同亮度設定產生的條紋測量閃爍頻率及亮度變化

螢幕設定亮度 0	螢幕設定亮度 20	螢幕設定亮度 40	螢幕設定亮度 60	螢幕設定亮度 80	螢幕設定亮度 100



以 Moto edge20 pro B 鏡頭測量各種光源閃爍頻率(Hz)





實驗發現：

Moto edge20 pro B 鏡頭掃描速度是 96240 列像素 / 秒，就像 96240fps 慢動作錄影，但錄影時間只有 31.17ms，很適合測量不斷重複的光源閃爍。

60Hz 交流電源的光源閃頻都是 120Hz（除了 ViewSonic 螢幕）應該和交流電頻率有關，也有些看不出閃爍的光源，從 RGB 值變化情形折線圖來看閃爍方式差異很大，有的呈現波浪狀，有的呈堆碟形。

電池電源的光源能調亮度，亮度調最大時可能沒有閃樂情形，調暗時拍攝畫面就會出現條紋（應該是 PWM 調光），這些光源的閃頻差異很大，實驗二測試的手機鏡頭，在 120Hz 光源下不能拍出一亮一暗完整條紋的就能改用 2016Hz 光源測試掃描速度。

五、實驗五：用捲簾快門的果凍效應測量電風扇扇葉的旋轉速度



用果凍效應測量風扇轉速（方法一）

用果凍效應測量風扇轉速（方法二）

計算項目	參考線上取的參考點					
	A	B	C	D	E	F
A.像素位置	1856	1717	1335	1027	667	386
B.與 A 點距離(pixels, 1856-A)		139	521	829	1189	1470
C.掃描速度(pixels / sec)	189960	189960	189960	189960	189960	189960
D.時間(sec, B / C)		0.000732	0.002743	0.004364	0.006259	0.007738
E.與圓心連線與 OA 線夾角(度)		∠BOA= 6.7°	∠AOC= 154.6°	∠AOD= 139.7°	∠AOE= 122.1°	∠AOF= 108.3°
F.扇葉上與 D1 點角度差（度）		0	180	180	180	180
G.轉動圈數(圈, ±(F-E) / 360)		0.01861	0.07056	0.11194	0.16083	0.19917
H.轉速(圈/sec, F / D)		25.43	25.73	25.65	25.70	25.74
I.轉速計讀數 (rpm)		1547.0				
J.轉速計讀數(圈/sec, I/60)		25.78				
K.與轉速計比較誤差(%,(H-J)/J)		-1.37%	-0.23%	-0.51%	-0.34%	-0.18%

計算項目	參考點					
	B	A	D	C	B2	B3
A. 像素位置	586	1129	1715	2298	1924	2696
B. 與 D1 點距離(pixels, A - 586)		543	1129	1712	1338	2110
C. 掃描速度(pixels / sec)	96240	96240	96240	96240	96240	96240
D. 時間(sec, B / C)		0. 00564	0. 01173	0. 01779	0. 01390	0. 02192
E. 與圓心連線與 OB 線夾角(度)		∠BOA= 36. 6°	∠BOD= 68. 3°	∠BOC= 100. 5°	∠BOB2= 131. 8°	∠BOB3= 208. 6°
F. 扇葉上與 B 點角度差（度）		90	180	270	0	0
G. 轉動圈數(圈, ±(F-E) / 360)		0. 1483	0. 3103	0. 4708	0. 3661	0. 5794
H. 轉速(圈/sec, G/D)		26. 29	26. 45	26. 47	26. 33	26. 43
I. 轉速計讀數 (rpm)		1584. 4				
J. 轉速計讀數(圈/sec, I/60)		26. 41				
K. 與轉速計比較誤差(%,(H-J)/J)		-0. 44%	0. 16%	0. 23%	-0. 28%	0. 09%

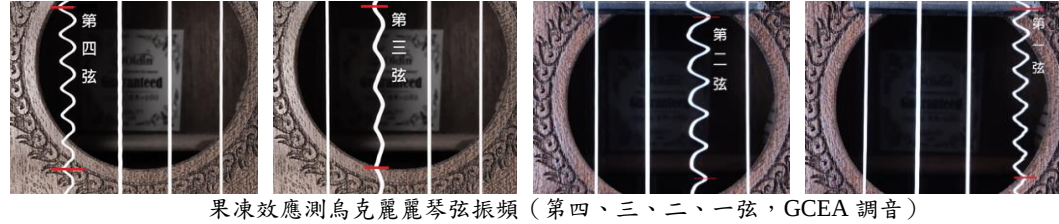
實驗發現：

在風扇扇葉標記參考點（或參考線，線上有很多點），搭配感光元件掃描速度，算出風扇轉速了。

方法一：在風扇加一條經過圓心的棉線當參考線，黑風扇是順時針旋轉、捲簾快門是由下而上掃描，AB 點在線上角度相同，CDEF 點在線上角度相同與 AB 點角度相差 180°；掃描到 A 點時，棉線角度位置是 AO 線，掃描到 B 點時，棉線角度位置是 BO 線，如圖 4-5-1 照片（∠AOB 角度 / 360°） / （A 到 B 的縱向像素差 / 掃描速度）= 轉速（圈 / 秒）。

方法二：在風扇四片扇葉相同位置加上參考點，紅風扇是順時針轉、捲簾快門是由上而下掃描，ABCD 四點分別在四片扇葉尖端，角度分別相差 90°；如圖 4-5-2 掃描到 B 點時，A 點會在 B 點之前 90°位置，與掃描到 A 點時比較，轉動角度是 90°-∠BOA，經過時間是（B 到 A 的縱向像素差 / 掃描速度），所以轉速 = （（90°-∠BOA 角度）/360°） / （B 到 A 的縱向像素差 / 掃描速度）。

六、實驗六：用捲簾快門的果凍效應測量琴弦振動頻率



計算項目	第四弦	第三弦	第二弦	第一弦
音名	G	C	E	A
標準頻率(Hz)	392	261	329	440
A.起始像素(pixel)	109	88	284	138
B.結尾像素(pixel)	3014	2986	3176	3157
C.總像素(pixel, B-A)	2905	2898	2892	3019
D.弦完整振動數	6	4	5	7
E.每次振動像素(pixel, C / D)	484.2	724.5	578.4	431.3
F.每秒掃描列數	189960	189960	189960	189960
G.每次振動時間(sec, E / F)	0.002549	0.003814	0.003045	0.002270
H.振動頻率(Hz, 1 / G)	392.34	262.20	328.42	440.45

實驗發現：

將烏克蘭麗麗放在充足光源下，拍攝時手機與琴弦方向垂直就能拍出波浪狀的琴弦，以波浪波峰位置的素像作為起點終點，就能算出一次振動經歷的時間，算出琴弦振動頻率，發現測出結果與琴弦的標準音頻很接近，表示用捲簾快門的果凍效應測量快速振動的物體十分準確。

七、實驗七：用捲簾快門的果凍效應拍出聲音的「形狀」

表 4-7-1 頻率聲波發生器 AAP 驅動藍芽音箱發出特定頻率的音計算						
原始波形						
拉寬處理後						
計算項目						
A.APP 設定頻率(Hz)	50	75	100	125	150	175
B.起始像素(pixels)	1186	151	141	277	609	572
C.結尾像素(pixels)	3058	2669	2977	3337	3158	3267
D.總像素(pixels, C-B)	1872	2518	2836	3060	2549	2695
E.波形數	0.5	1	1.5	2	2	2.5
F.每次振動像素(pixel, D / E)	3744.0	2518.0	1890.7	1530.0	1274.5	1078.0
G.每秒掃描列數（列像素 / sec)	189960	189960	189960	189960	189960	189960
H.每次振動時間(sec, F / G)	0.01971	0.01326	0.00995	0.00805	0.00671	0.00567
I.振動頻率(Hz, 1 / H)	50.74	75.44	100.47	124.16	149.05	176.22
J.測量誤差(%,(I-A) / A)	1.47%	0.59%	0.47%	-0.67%	-0.64%	0.69%

表 4-7-2 三代自製聲波杯拍的各種人聲計算頻率						
波形						
計算項目						
A.起始像素(pixel)	124	835	1026	335	661	384
B.結尾像素(pixel)	3411	2963	3272	3269	2776	3422
C.總像素(pixel, B-A)	3287	2128	2246	2934	2115	3038
D.完整波形數	3	2	2	8	2	3
E.每次振動像素(pixel, C / D)	1095.7	1064.0	1123.0	366.8	1057.5	1012.7
F.每秒掃描列數(列 / sec)	189960	189960	189960	189960	189960	189960
G.每次振動時間(sec, E / F)	0.005768	0.005601	0.005912	0.001931	0.005567	0.005331
H.振動頻率(Hz, 1 / G)	173.37	178.53	169.15	517.96	179.63	187.59
I.振動頻率(Hz, 1 / G)	173.37	178.53	169.15	517.96	179.63	187.59

實驗發現：

參考科工館雷射聲波杯的概念，拍攝雷射經過振動膜反射後投射的位移變化，成功記錄聲音的「形狀」。透過聲音的「形狀」也能參考實驗六計算出聲音的頻率，比對用 APP 發出的特定音頻，發現測量結果準確，誤差約 1%左右，各種聲音的「形狀」也能呈現出課本學到的「頻率」、「音色」、「音量」的不同，十分有趣。

伍、討論

一、結果分析與解釋

- （一）捲簾快門逐行掃描的特性導致影像不同部分的記錄有時間差，造成影像形變—果凍效應。
- （二）掃描速度越慢果凍效應會越明顯。Nikon D5100 具有最快的掃描速度，而 myFirst Camera 3 的掃描速度最慢，Nikon D5100 採用機械式捲簾快門，所以會拍出寬度不同的條紋。
- （三）風扇與琴弦實驗中，果凍效應可用來測量轉速與振動頻率。測得的數值與設定相近（調音後的烏克蘭麗麗），證明方法的可行性。
- （四）在聲音可視化的實驗中，成功記錄到聲音影響下的雷射變化，可應用於聲學研究。

二、與既有文獻比較

- （一）網路上討論的大多是捲簾快門導致果凍效應使影像變形與運動失真，本研究進一步應用於轉速與頻率測量。
- （二）既有的聲音可視化技術通常需要特殊的設備與光學條件。本研究證明捲簾快門可透過記錄雷射光受聲音影響的變化。

三、研究的限制

- （一）光源限制：用 120Hz 光源測量掃描速度時，高階 CMOS 感光元件掃描速度極高，無法拍出完整的黑白條紋（一黑一白），可使用閃頻更快的光源。（實驗三部分感光元件測試改用 2016Hz 光源）
- （二）設備差異：測量結果與相機解析度（畫面長邊像素與記錄形變範圍有關、畫面短邊像素與記錄時間有關）、感光元件特性（掃描速度）與影像處理機制有關（自動功能或是數位變焦-大部分 iPhone 手機）。
- （三）測量方法：風扇與琴弦的測量是基於靜態影像（照片）進行計算，拍照時需在穩定且足夠照度的環境。
- （四）聲波影像測試條件：雷射聲波杯實驗中的一字雷射光投射在白紙上的寬度會降低精確性，可再優化光路設計。

四、研究的應用與影響

- （一）攝影與影像技術：提供攝影者減少果凍效應的設備建議。拍攝快速運動物體時，應選擇掃描速度較快的相機。
- （二）非接觸式測量運動物體：捲簾快門可用於測量移動、旋轉與振動，無需接觸物體即可獲取運動數據，降低測試過程的干擾。
- （三）測試光源與顯示技術：透過測量光源閃爍頻率，可應用於 LED 燈具與顯示器的品質測試，檢查光源穩定性，減少閃爍對人眼健康的影響。
- （四）聲音可視化：聲波可視化應用於聲學分析研究與科學教育。一字雷射光須與感光元件掃描方向垂直，只能記錄單一軸向聲音的振動，可以進一步嘗試設計雙軸以上的聲音可視化技術。

陸、結論

研究主要探討果凍效應與捲簾快門之間的關係。透過實驗，測量 LED 燈閃爍頻率、不同攝影設備的掃描速度、應用捲簾快門測量快速變化的物體，如光源閃爍、風扇轉速、琴弦振動頻率。此外嘗試將捲簾快門應用於聲音影像化，記錄聲波的可視化形狀，驗證在測量與影像分析的應用價值。

果凍效應來自感光元件逐行掃描影像，物體高速運動時，不同時間掃描的影像部分產生時間差，使畫面變形。不同攝影設備掃描速度有明顯差異。直接影響變形的程度，對高速變動物體攝影時，用掃描速度快的設備可減少果凍效應，或反向應用該效應進行測量。用果凍效應測量風扇的轉速與琴弦的振動頻率，結果與設定相近（調音後的烏克蘭麗麗），表示是測量轉速與振動的有效方法；捲簾快門結合雷射聲波杯，能記錄到聲音的「形狀」，提供了聲音影像化的方法。

在攝影領域，理解果凍效應的成因與影響，可幫助攝影師選擇適當的設備來減輕影像變形；測量應用方面，可測量光源閃頻、物體轉速及振動頻率，提供簡單有效的無接觸測量方法。聲學領域，透過捲簾快門記錄聲音波形，可發展聲波影像化技術。

未來可以拓展測試條件，使用更高速的閃爍光源（如 2016Hz LED）來驗證捲簾快門的極限解析能力，或是反過來，使用掃描速度極快的感光元件測量閃頻極快的光源，探討攝影設備間的測量誤差，提升準確性。聲音影像化應用上，可優化光學設計，使聲波可視化技術更為精確。