

2025仰望盃全國科學 HomeRun 實作大賽

決賽作品說明書

隊伍名稱： 有夢最美

作品名稱： 貝多芬與愛因斯坦的邂逅

科學概念1： **樂音三要素**

聲音的三個基本特徵，它們共同塑造了聲音的特性，使音樂更具表現力和辨識度。這三要素分別是：

音調是指聲音的高低，主要由聲波的頻率決定。頻率越高，音高越高；頻率越低，音高越低。**音響**是指聲音的強弱，即聲音的音量，主要由聲波的振幅決定。振幅越大，聲音越響亮；振幅越小，聲音越微弱。

音色是指聲音的特質或音質，用於區分不同聲源（例如鋼琴、小提琴或人聲）。主要由聲波的頻譜結構和波形決定，即基音與諧波的組合。

科學概念2： **光電效應**

設計紙片的孔洞位置與大小，讓 RGB LED 光穿透時能由後方的光敏電阻偵測。LED 光的強度集中，適合用於精確檢測孔洞位置，避免光線擴散造成的誤差。而光敏電阻為半導體材料，在受到光子照射時，內部電子被激發，導致材料的電阻發生變化。根據接收到的光強度變化及照射時間隨孔徑大小不同，生成相關的電子數位訊號。

決賽構想說明書內文

1. 發想動機：

隨著科技的進步，數位化音樂創作已成為日常生活的一部分，但傳統音樂盒的溫暖與手工設計的魅力，依然無法被完全取代。此外學校有許多考試後留下的答案卡，如果沒有善加利用，似乎只剩紙類回收的命運！結合傳統與現代，我們希望設計具有創新特性的音樂盒。這款音樂盒以答案卡打孔為樂曲儲存媒介，藉由光源與光敏電阻的互動，還原經典的機械式音樂盒體驗，同時結合 ESP32 和 DFPlayer Mini MP3 模組等現代化電子元件，提供高品質的音頻輸出與豐富的樂器音效選擇。學生可以透過答案卡創作屬於自己的旋律，並透過 SD 卡儲存和切換不同樂器，探索多樣化的音樂風格。這不僅是一次創意與技術的融合，也是一個能帶來情感共鳴的藝術作品。

2. 作品創意性：

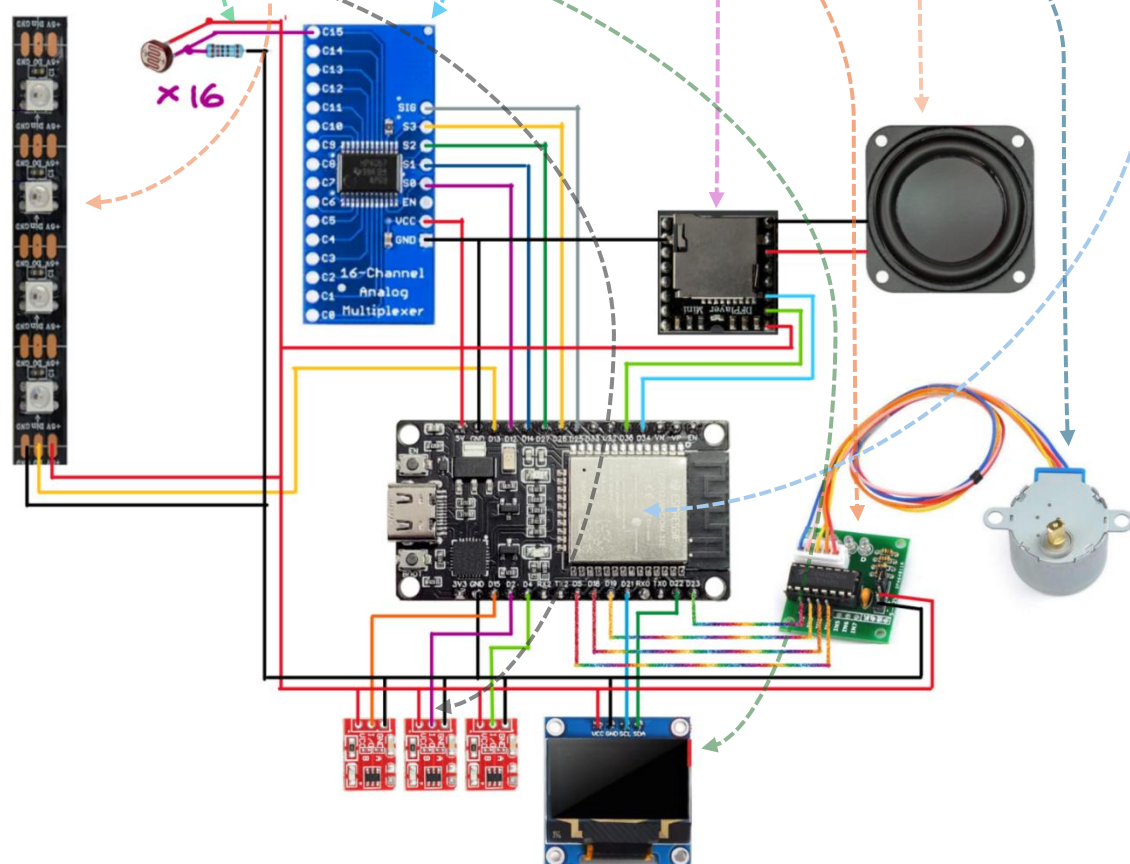
將傳統機械式音樂盒的魅力與現代數位技術相結合，製作出一個既復古又創新的音樂裝置，本音樂盒的創意如下列三點：

- 1. 傳統與數位的融合：**利用紙片上的打孔作為樂曲的儲存介質，延續了傳統音樂盒的機械特性與視覺美感。藉助現代電子技術，使用 RGB LED、光敏電阻與 ESP32 進行精確的音階判定與音頻輸出，將傳統機械結構數位化。
- 2. 模組化的樂器切換：**加入 SD 卡來儲存多種樂器音色數據，用戶可以透過按鈕切換樂器，實現不同風格的音樂演奏。這種靈活性讓音樂盒不再局限於單一音色，而是可以模仿鋼琴、小提琴、吉他等多種樂器。
- 3. 教育與藝術價值：**展示了機械、電子、光學與音樂的結合原理，適合作為 STEM 教育中的範例，啟發創意與技術思考。這是一個融合人文藝術與科技互動的音樂播放裝置。

3. 硬體及電路架構圖：

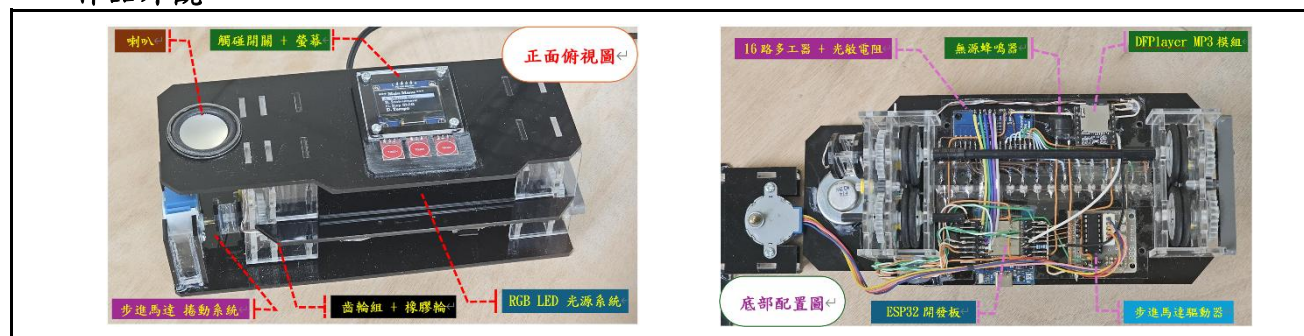
目前創新音樂盒的配置如下：

1. ESP32開發板
2. DFPlayer Mini MP3 模組
3. 4歐姆小型喇叭 (4Ω, 3W)
4. 步進馬達(28BYJ-48)
5. 步進馬達驅動模組(ULN2003)
6. 16通道類比數位訊號多工(CD74HC4067)
7. WS2812 RGB LED 燈條
8. 光敏電阻 + 10KΩ 電阻
9. 1.3 inch OLED 螢幕
10. 觸碰按鈕(TTP223)



4. 作品成果報告：

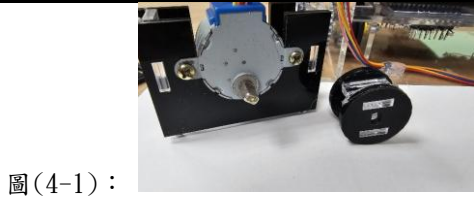
一、作品外觀



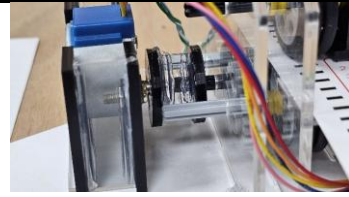
二、作品特點

[步進馬達驅動模組] + 自製連接器 與 樂高積木組[十字軸、套筒、齒輪、橡膠輪]

步進馬達適用於需要精準定位的應用。利用步進馬達加上自製連接器(圖4-1)，讓步進馬達轉軸與樂高積木十字軸連結，帶動齒輪組與橡膠輪，組成一套捲動系統(圖4-2)，用來將答案卡捲入音樂盒中，並使答案卡往前推進。



圖(4-1)：



圖(4-2)：

[16通道類比數位訊號多公器模組] 與 [光敏電阻]陣列

16通道類比數位訊號多工器模組用於控制16個光敏電阻組成的陣列(圖4-3)，如此可以大幅減少與開發板的腳位連接，只需利用五個腳位配合多工程式即可讀取16路的類比訊號。待光敏電阻接收 RGB LED 燈條的光線後，將訊號傳送回 ESP32開發板(圖4-4)。



圖(4-3)：



圖(4-4)：

三、實驗結果(一)：捲紙器機構

(一)將答案卡通過不同軸心間距測試板得到表(4-1)結果

圖(4-5)：不同軸心間距的測試板	圖(4-6)：間距過小	圖(4-7)：間距適中

表(4-1)：

軸心間距	30.0 mm	30.2 mm	30.4 mm
鬆緊度	過緊	鬆緊適中	過鬆
現象	如圖(4-6)所示，因距離過小，答案卡無法順利通過而扭曲	如圖(4-7)所示，列入選擇	因距離過大，答案卡容易滑落

(二)說明：經由數次的測量與實驗，我們選擇以 30.2 mm 作為兩輪之間的軸心距離，答案卡恰能被兩個橡膠輪夾緊，不會扭曲或滑落。

四、實驗結果(二)：光源選擇

(一)雷射光源雖產生點光源，使用多個雷射頭後，在與答案卡比對時發現，雷射頭的大小超過了一格答案卡的間距。使用上會有極大的誤差，使雷射光將無法準確投射到光敏電阻上。附加發現發熱及耗電也是其缺點。

圖(4-8)：手持測試一個雷射光投射在光敏電阻上	圖(4-9)：測量五個雷射頭尺寸，發現直線排列會大於五個光敏電阻長度，雷射頭改用交錯式排列	圖(4-10)：將五個交錯式雷射頭通電發光觀察投射現象	圖(4-11)：多數不如預期能準確投射在光敏電阻上

在交錯式的雷射排列方式下圖(4-9)，實際操作中，我們發現雷射光無法精準地照射到光敏電阻上(圖4-10、4-11)。這種情況會導致訊號判讀產生偏差，從而影響整體音樂的播放效果。由於光線無法穩定地觸發光敏電阻，可能會產生錯誤，使音樂無法順暢播放，甚至造成樂曲的節奏錯亂或音符缺失，所以我們改用 RGB

LED 燈條來嘗試解決這個問題。

(二)RGB LED 燈條只需七個至八個即有足夠亮度，搭配狹縫產生光束

圖(4-12)：RGB LED 燈條發光樣貌



圖(4-13)：加上光源狹縫



(三)說明：透過使用燈條的方式，我們不僅成功解決音樂盒光源系統的問題，還同時減少了材料的浪費，使我們以更加環保、不浪費的方式做出理想的結果。

五、實驗結果(三)：光源與狹縫寬度

(一)利用壓克力板製造出狹縫寬度 2.5 mm、2 mm、1.5 mm 和 1 mm 的寬度

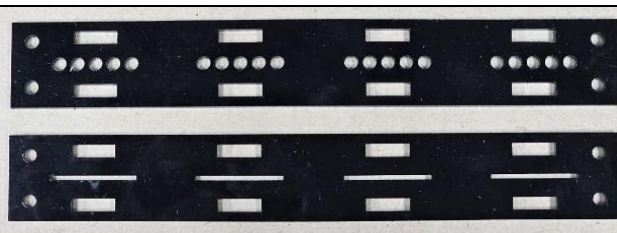
表(4-2)：

寬度	2.5 mm	2 mm	1.5 mm	1 mm
燈光狀態	分散、看不出光束	稍微集中，但無法達到預期	幾乎呈現一直線	能呈現一條線

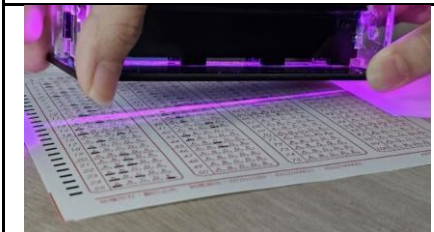
圖(4-14)：四個不同寬度的狹縫



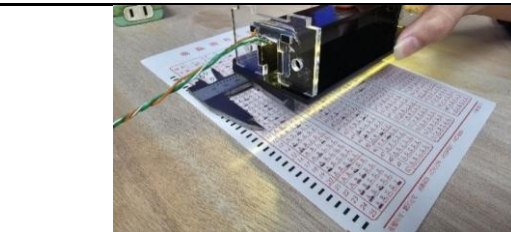
圖(4-15)：其它初期設計的狹縫或孔洞



圖(4-16)：從狹縫中透出的光束



圖(4-17)：測量光束尺寸



(二)說明：經過多次的測量，我們一致認為狹縫越小，光束越集中地落在答案格中，如此能預期也能精準落在光敏電阻上，有助於增加音樂盒播放的準確度。

六、實驗結果(四)：光源與狹縫距離

(一)實驗結果如表(4-3)，因 RGB LED 燈顆粒有間隔 1 cm，不同距離產生亮暗紋光束

圖(4-18)：其中一組光源與狹縫測試品



圖(4-19)：可以看出光束分成四區



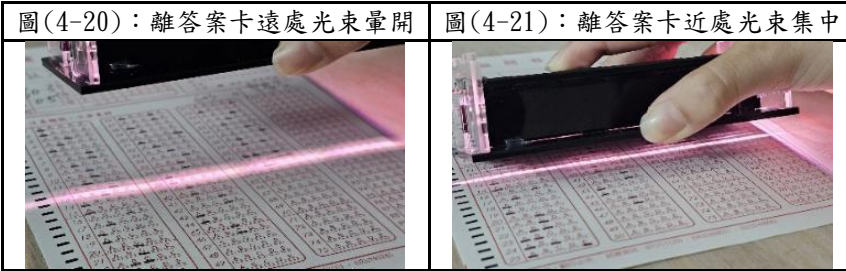
表(4-3)：觀察亮暗紋是否顯著

距離	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
燈光狀態	四個狹縫透出之亮度非均勻分布，有明顯亮暗紋	四個狹縫透出之亮度非均勻分布，有明顯亮暗紋	四個狹縫透出之亮度非均勻分布，亮暗紋較不明顯	四個狹縫透出之亮度均勻分布，肉眼無察覺亮暗紋

(二)說明：最後我們選擇了20mm 當作光源與狹縫距離，使 RGB LED 光線夠穿透狹縫後，亮度分布較為均勻，讓光敏電阻感光值落差不會太大。

七、實驗結果(五)：狹縫與答案卡距離

(一)我們控制光束能集中在答案格內，也能減少光亮度來節約耗電量



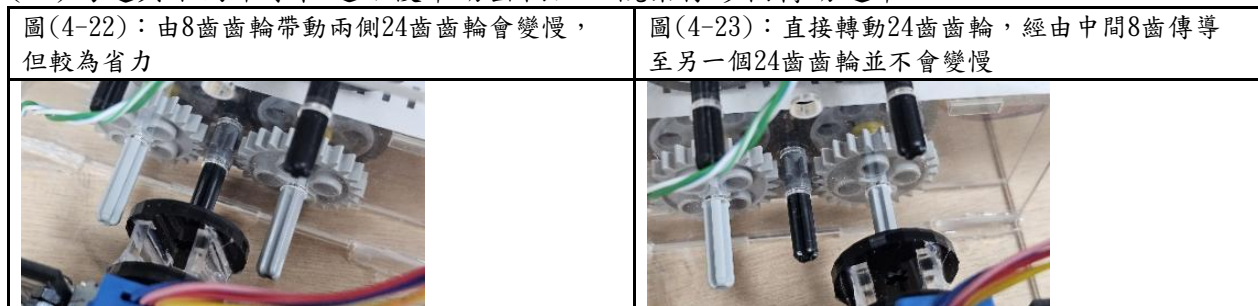
表(4-4)：

距離	1 mm	10 mm	20 mm
燈光現象	光束集中	光線稍寬	光線過寬

(二)說明：當狹縫愈靠近答案卡時，外界的光線也愈不容易影響到光敏電阻的偵測結果，並且當狹縫靠近答案卡時，我們可以降低燈條的亮度，減少燈條的耗電量。

八、實驗結果(六)：步進馬達與齒輪

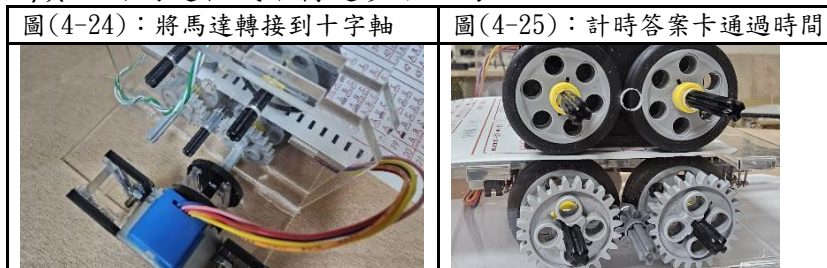
(一)馬達與不同十字軸連結後帶動齒輪組，觀察橡膠輪轉動速率



(二)說明：經過實驗後，若將馬達接在中間十字軸，便無法演奏節奏快速的歌曲，不過當我們將馬達接在側邊的十字軸時，就可以演奏出節奏較快的歌曲或提高拍速。

九、實驗結果(七)：馬達轉速與節拍

(一)實驗將馬達程式中轉速參數設為800



表(4-5)：

馬達轉速：800	接在中間十字軸	接在側邊十字軸
捲完一張答案卡費時	53 sec	18 sec

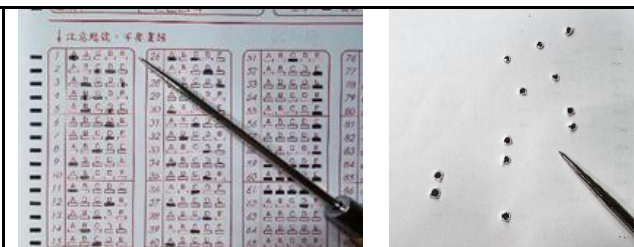
(二)說明：

1. 原先將步進馬達捲動系統與 ESP32 連接，期望在程式中能同步控制轉速與播放聲音來計算節拍，但程式在執行播放聲音時馬達就會停止轉動，於是我們將程式碼改良成多工模式，如此一來音樂播放時就不會產生停頓感。
2. 經過實驗測量後，我們發現當我們將馬達轉速參數固定在800(步進馬達的最大速率)，接在中間十字軸時捲完一張答案卡費時53秒。而當馬達接在側邊十字軸時費時18秒，證實了我們的測驗結果也符合齒輪比。

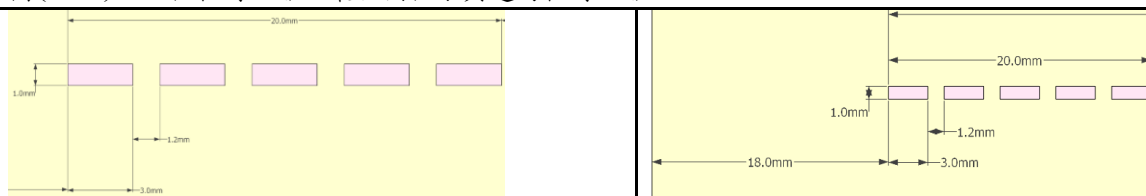
十、實驗結果(八)：答案卡與音符規則

(一)藉由游標尺及雷射切割後多次比對，找出誤差在容許範圍內的各項尺寸

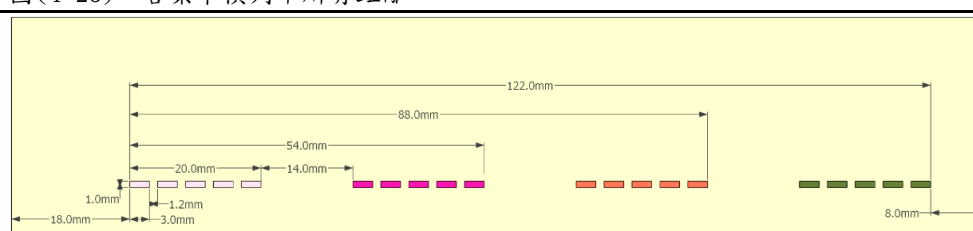
圖(4-26)：一開始嘗試用錐子戳洞，但容易把答案卡弄皺，背後的孔會凸出而不平整，擔心捲入後會有問題，因此之後實驗皆改用雷射切割來完成



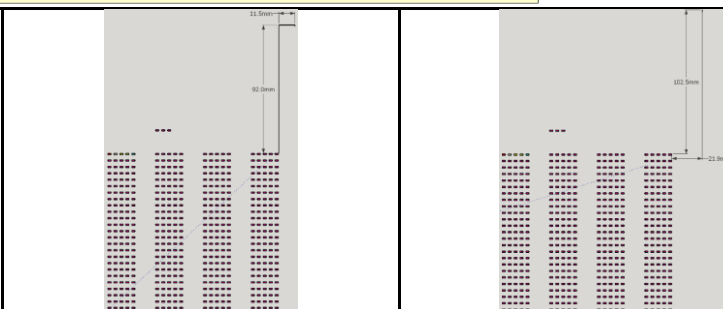
圖(4-27)：五格相對距離 &最左側格子與邊的相對距離



圖(4-28)：答案卡橫列中所有距離



圖(4-29)：
測試出裁切點與雷射切割機原點的
相對距離，分成兩種對齊方式：
(a)直接放在雷射切割機平台上
(b)使用輔助切割板對齊



(二)答案卡格子之設定

- 1.第一版設定：在原本的設計中，我們將答案卡的20格分成兩組，每組10格，並且每一格都代表一個音符。這樣的設計使得在一張答案卡中，我們可以最多安排多達50個音符。然而，這種方式雖然簡單，卻也帶來了一些限制，最主要的問題在於音樂的表現方式過於單一。由於每格僅能代表一個音符，音樂便只有十個音階和固定的音符長度，使得音樂聽起來顯得較為單調和乏味。因此經過討論後，我們決定要做出能改善上述問題的第二版。
- 2.第二版設定：在音樂中，我們會有長短不同的音，也會跨越八度音，因此我們決定要更改格子分配，使答案卡不用花費過多的格子也可以有多種拍子和音色。

表(4-6)：

在20格的答案卡中，我們受限接腳數量，只使用中間的16格，前七格是音樂中主要的七個主音。其餘的格子則可以用來表示不同的設定，使整個系統更加靈活。這樣的設計幫助使用者更清楚地標記音樂中的細節，提升辨識度與準確性。

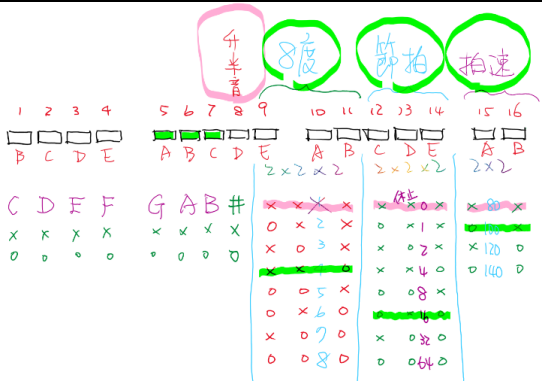
格子	1	2	3	4	5	6	7	8
主音	Do	Re	Mi	Fr	Sol	La	Si	升半音

表(4-7)：

	在9、10、11格中，我們利用排列組合，來設定音樂中的8度音(如下表)				在12,13,14格中，我們一樣使用排列組合，來達成音樂中的節拍(如下表)			
格子	9	10	11	排列組合下之定義	12	13	14	排列組合下之定義
1	X	X	X	無，無，無=1度音	X	X	X	無，無，無 = 休止符
2	0	X	X	有，無，無=2度音	0	X	X	有，無，無 = 1/16 拍
3	X	0	X	無，有，無=3度音	X	0	X	無，有，無 = 1/8 拍
4	X	X	0	無，無，有=4度音	X	X	0	無，無，有 = 1/4 拍
5	0	0	X	有，有，無=5度音	0	0	X	有，有，無 = 1/2 拍

6	0	X	0	有，無，有=6度音	0	X	0	有，無，有 = 1 拍
7	X	0	0	無，有，有=7度音	X	0	0	無，有，有 = 2 拍
8	0	0	0	有，有，有=8度音	0	0	0	有，有，有 = 4 拍

表(4-8)：

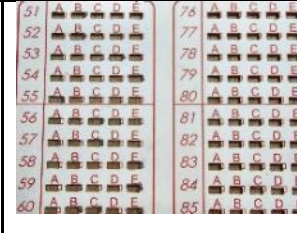
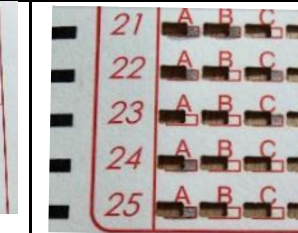
	用15, 16格做為調整歌曲的速度			圖(4-30)：小組討論的手稿													
格子	15	16	排列組合下之定義														
1	X	X	無，無 = 80														
2	0	X	有，無 = 100														
3	X	0	無，有 = 120														
4	0	0	有，有 = 140														

3.一念之間！原本的答案卡中只有25行作答區，為了讓答案卡的紙張使用率最大化，跳脫原本框架，其實只要在原16個光敏電阻的可判讀區，將全長212 mm 皆用來做為每個音符訊號，再將原本兩列距離做調整，適度縮短間距後便可提高音符資料密度，在馬達轉速固定下，也能增加節拍速率，讓音樂旋律優美流暢！

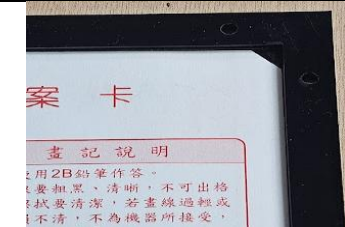
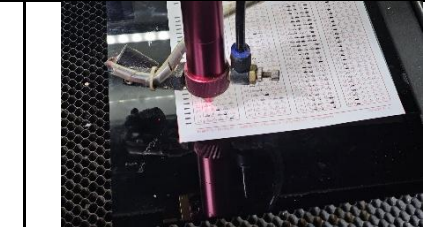
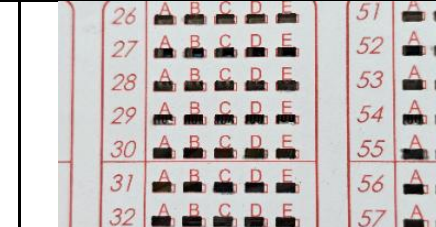
(二)說明：

1.藉由雷射切割機的輔助，製作精美的音樂答案卡，其中還是有一些問題要克服。

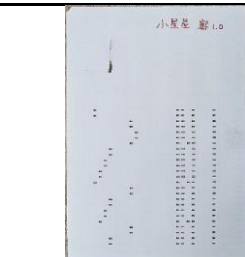
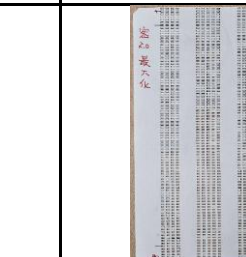
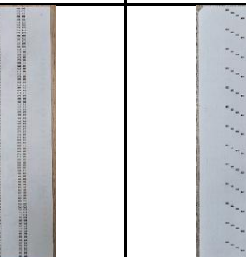
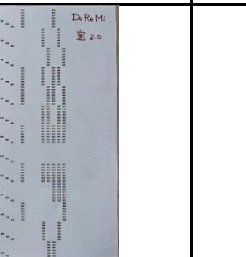
最終使用雷切機裁切孔位，但在雷射切割機的平台存在縫隙，使答案卡不容易對齊，而發生偏差歪斜，只要沒注意就會嚴重產生誤差。

圖(4-31)：右上角對齊雷切機起點	圖(4-32)：平台縫隙讓答案卡歪斜	圖(4-33)：右上角看似正常	圖(4-34)：左下角誤差頗為明顯
			

在雷射切割前，對齊的精度對最終結果至關重要。我們使用黑色的壓克力板，來製作一個專門的治具，如圖(4-35)。這個設計能夠確保每一張答案卡在放置時精確地對齊，大幅改善切割效果，當切割所有格子時，均落在範圍內，如圖(4-37)所示。

圖(4-35)：有輔助版對齊	圖(4-36)：雷射切割結束	圖(4-37)：孔洞切割結果
		

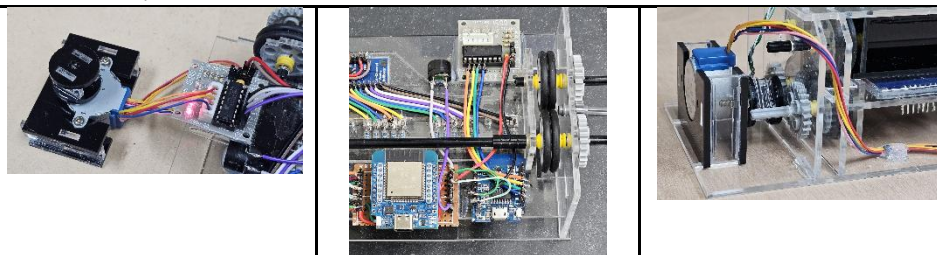
2.透過排列組合定義及增加密度，能讓聲音表現更多變化，使音樂的創作更具靈活性。

圖(4-38)：密1.0 歌曲	圖(4-39)：密2.0 測試	圖(4-40)：密2.0 音階	圖(4-41)：密2.0 歌曲
			

十一、實驗結果(九)：主要電子零件性能測試

(一)在步進馬達範例程式碼中調整參數，測試步進馬達的最大轉速。

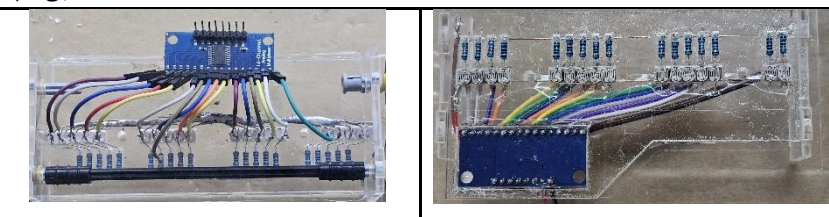
圖(4-42)：步進馬達與捲動系統



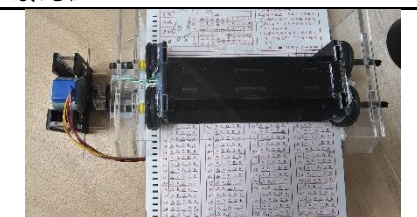
結果：與節拍實驗一併計時紀錄，最快18秒可讀取密2.0歌曲答案卡的90個音符，換算每分鐘最多可以演奏300拍。

(二)更改訊號接收裝置：由20路縮減成16路

圖(4-43)：原有20路設計，但多工器只有16路，捨棄4路，只用16路光敏電阻



圖(4-44)：捲紙過程記錄光敏電阻感光值



(三)RGB LED 燈條[RGB 組合及亮度]：測試光敏電阻感光值(每秒取樣一次取平均值)。

表(4-9)：RGB 亮度與感光值，遮光面採用答案卡背面空白處

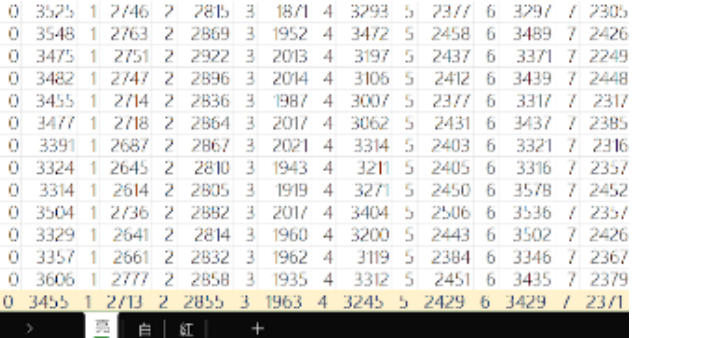
	白光 (R, G, B)	紅光 (R)	綠光 (G)	藍光 (B)	紅綠 組合光	紅藍 組合光	綠藍 組合光
亮度	250, 250, 250	250, 0, 0	0, 250, 0	0, 0, 250	250, 250, 0	250, 0, 250	0, 250, 250
無遮感光值	4387	4332	3875	3396	4387	4387	4175
遮光感光值	2814	2063	1451	1213	2514	2460	1823
相差	1573	2269	2424	2183	1873	1927	2352
亮度	150, 150, 150	150, 0, 0	0, 150, 0	0, 0, 150	150, 150, 0	150, 0, 150	0, 150, 150
無遮感光值	4375	4137	3416	2726	4340	4321	3845
遮光感光值	2329	1627	1278	938	2052	1929	1493
相差	2046	2510	2138	1788	2288	2392	2352
亮度	100, 100, 100	100, 0, 0	0, 100, 0	0, 0, 100	100, 100, 0	100, 0, 100	0, 100, 100
無遮感光值	4297	3918	2931	2332	4220	4158	3467
遮光感光值	1831	1345	934	915	1630	1582	1211
相差	2466	2573	1997	1417	2590	2576	2256
亮度	50, 50, 50	50, 0, 0	0, 50, 0	0, 0, 50	50, 50, 0	50, 0, 50	0, 50, 50
無遮感光值	3951	3071	2201	1652	3778	3710	2643
遮光感光值	1316	952	684	632	1431	1106	924
相差	2635	2119	1517	1020	2347	2604	1719

(四)16通道類比數位訊號多工器模組讀取訊號延遲時間

表(4-10)：

間隔	1000 ms	500 ms	100 ms	50 ms	0 ms
讀取每16個光敏電阻 平均所費時間	1006.67 ms	499.61 ms	99.82 ms	51.11 ms	8 ms
時間誤差	誤差(< 10 ms)，反應靈敏，因迴圈及透過 USB 傳輸顯示在序列埠監控視窗，仍有基本延遲時間				

(五)在(RGB=40,20,0)條件下，收集有無答案卡遮光的光敏電阻[感光值]數據

圖(4-45)：利用 Arduino IDE 之序列埠監控視窗讀取16個光敏電阻之感光值，待產生數據後，擷取到 Excel 中進行計算平均值	圖(4-46)：測得(1)無答案卡，光源直射光敏電阻，光敏電阻感光最大值。(2)答案卡無印刷文字線條，即背面空白處朝向光源及(3)答案卡有印刷文字線條朝向光源，光敏電阻感光值皆下降不少
 輸出 序列埠監控窗 × 訊息 (按 Enter 鍵將訊息發送到 COM5 上的 WEMOS) <pre> 0 (1131) 1 (779) 2 (976) 3 (439) 4 (772) 5 (721) 6 (976) 0 (1146) 1 (775) 2 (1039) 3 (480) 4 (825) 5 (770) 6 (976) 0 (1183) 1 (794) 2 (1001) 3 (490) 4 (848) 5 (770) 6 (976) 0 (1175) 1 (706) 2 (1007) 3 (452) 4 (732) 5 (731) 6 (976) 0 (1169) 1 (750) 2 (1001) 3 (458) 4 (814) 5 (678) 6 (976) 0 (1182) 1 (779) 2 (1011) 3 (432) 4 (752) 5 (719) 6 (976) 0 (1173) 1 (805) 2 (1009) 3 (432) 4 (753) 5 (729) 6 (976) 0 (1159) 1 (793) 2 (980) 3 (418) 4 (784) 5 (706) 6 (976) </pre>	 <pre> 0 3525 1 2746 2 2815 3 1871 4 3293 5 2377 6 3297 7 2305 0 3548 1 2763 2 2869 3 1952 4 3472 5 2458 6 3489 7 2426 0 3475 1 2751 2 2922 3 2013 4 3197 5 2437 6 3371 7 2249 0 3482 1 2747 2 2896 3 2014 4 3105 5 2412 6 3439 7 2448 0 3455 1 2714 2 2836 3 1987 4 3007 5 2377 6 3317 7 2317 0 3477 1 2718 2 2864 3 2017 4 3062 5 2431 6 3437 7 2385 0 3391 1 2687 2 2867 3 2021 4 3314 5 2403 6 3321 7 2316 0 3324 1 2645 2 2810 3 1943 4 3211 5 2405 6 3316 7 2357 0 3314 1 2614 2 2805 3 1919 4 3271 5 2450 6 3578 7 2452 0 3504 1 2736 2 2882 3 2017 4 3404 5 2506 6 3536 7 2357 0 3329 1 2641 2 2814 3 1960 4 3200 5 2443 6 3502 7 2426 0 3357 1 2661 2 2832 3 1962 4 3119 5 2384 6 3346 7 2367 0 3606 1 2777 2 2858 3 1935 4 3312 5 2451 6 3435 7 2379 0 3455 1 2713 2 2855 3 1963 4 3245 5 2429 6 3429 7 2371 </pre>

表(4-11)：1~15個光敏電阻感光值，其中第16個無訊號，故捨棄

平均值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
穿透	3455	2713	2855	1963	3245	2429	3429	2371	1868	2596	3237	3254	2983	3331	2191
空白面	1014	670	885	391	697	667	844	443	593	720	737	548	888	943	353
印刷面	1088	733	943	425	747	693	910	501	639	749	754	548	912	990	370

(六)無源蜂鳴器[音頻]：查詢相關資料，整理出各音階之發音頻率。

圖(4-47)：[八度音] & [七個音階 + 五個升半音階] 之 頻率數據建立資料陣列供程式使用

```

int melody[12][10] = {
  { 1, 0, 33, 65, 131, 262, 523, 1047, 2093, 4186 }, //C 8度
  { 2, 0, 35, 69, 139, 277, 554, 1109, 2217, 4435 }, //C#
  { 3, 0, 37, 73, 147, 294, 587, 1175, 2349, 4699 }, //D
  { 4, 0, 39, 78, 156, 311, 622, 1245, 2489, 4978 }, //D#
  { 5, 0, 41, 82, 165, 330, 659, 1319, 2637, 0 }, //E
  { 6, 0, 44, 87, 175, 349, 698, 1397, 2794, 0 }, //F
  { 7, 0, 46, 93, 185, 370, 740, 1480, 2960, 0 }, //F#
  { 8, 0, 49, 98, 196, 392, 784, 1568, 3136, 0 }, //G
  { 9, 0, 52, 104, 208, 415, 831, 1661, 3322, 0 }, //G#
  { 10, 0, 55, 110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 0 }, //A
  { 11, 0, 58, 117, 233, 466, 932, 1865, 3729, 0 }, //A#
  { 12, 31, 62, 123, 247, 494, 988, 1976, 3951, 0 }, //B
};

```

(七)說明：藉由性能測試結果與可靠的實驗數據，終能將音樂盒的執行程式碼進行最佳化。

十二、結論：

本研究透過多次測試與優化，提升了系統性能與穩定性。在**自動捲紙機構**方面，我們將兩輪間的軸心距離設為 30.2 mm。有效避免答案卡扭曲或滑落，確保答案卡捲動順暢。在**光源與訊號讀取系統**方面，採用 RGB LED 燈條做為光源，當光源與狹縫間距離 為 20 mm、狹縫寬度為 1 mm 時能提升訊號接收準確度，並透過狹縫與答案卡間距調整至 1 mm，有效降低光干擾與能耗。**馬達與齒輪**搭配方面，我們發現馬達接在中間十字軸時，雖能正常運作，但無法演奏節奏快速的歌曲。而使用側邊十字軸時，能提升演奏速度，讓系統能適應不同節奏的音樂。原本馬達接至 ESP32 會在播放聲音時停頓，讓樂曲存在停頓感。後來運用 ESP32 可以多工的特性將程式碼改良解決該問題，馬達轉速參數固定為200，可以應付簡易歌曲的節拍。在訊號儲存資料方面，**答案卡設計**使用16格儲存音符資訊，前7格對應七個主音符，其餘用於音符變化，能演奏完整旋律並提升創作自由度。整體來看，實驗有效提升播放準確性與系統穩定性，為未來功能改良奠定基礎。選單系統已完成，但未能取得優質樂器音階數位檔案，目

前仍以蜂鳴器為主要發音系統。

本次設計將傳統機械式音樂盒的魅力與現代數位技術相結合，創造出一個既復古又創新的音樂裝置。初衷是利用紙片上的打孔作為樂曲的儲存介質，延續了傳統音樂盒的機械特性與視覺美感，同時藉助現代電子技術，透過 ESP32、LED、光敏電阻與蜂鳴器進行精確的音階判定與音頻輸出，成功將傳統機械結構數位化。

此外，本系統理想為加入 SD 卡模組來儲存多種樂器音色數據，使用者可以透過按鈕切換不同樂器音色，如鋼琴、小提琴與吉他等，進一步豐富音樂表現力，突破傳統音樂盒僅能播放單一音色的限制。這樣的設計不僅提升了音樂盒的靈活性與創作可能性，也展現出傳統工藝與現代科技融合的創新成果。

未來展望：雖然本研究礙於截稿時間而告一段落，但我們還會持續研究及優化樂器的音階數位音檔，順利完善選單功能。我們也希望能將自製音樂盒推廣給一般民眾，透過這樣的方式讓大家能嘗試並親自體驗與創作自己的音樂，其實只要能使用合乎尺寸規格的卡紙皆能製作成音樂答案卡，目前我們將樂譜借助電腦製作模板，再透過雷切機對答案卡精準打孔，提高樂曲品質。

更重要的是，這項設計展示了機械、電子、光學與音樂、數學的結合原理，具備極高的教育與藝術價值，適合作為 STEM 教育中的範例，啟發使用者在藝術與科技交互領域的創意思考，充分展現人文與科技融合的無限可能。如果將來完成理想的最終版本，我們願意以開源的形式發布，建立一個從零開始的網站，將所有細節毫無保留的進行線上教學，期待成功的一天到來！

5. 參考文獻：

1. 音樂：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%9F%B3%E4%B9%90>
2. 聲音原理：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A3%B0%E9%9F%B3>
3. 音樂盒(八音盒)：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%85%AB%E9%9F%B3%E7%9B%92>
4. 光遮斷傳感器：
<https://ithelp.ithome.com.tw/m/articles/10298264>
5. [Arduino 範例] 光敏電阻的使用：<https://blog.jmaker.com.tw/arduino-photoresistor/>
6. CD74HC4067 16 Channel Analog Multiplexer Demultiplexer：
<https://www.makerslab.it/cd74hc4067-16-channel-analog-multiplexer-demultiplexer/>
7. ESP32-S3 MAX98357 SD-Card /I2S for Audio Application (Speaker Test) | 芸庭樹工作室：
<https://www.youtube.com/watch?v=Lilsr5JEMH8>
8. Arduino 結合 DFPlayer Mini MP3 模組快速實作，入門篇
<https://blog.jmaker.com.tw/arduino-dfplayer-mp3/>
9. Arduino 入門教學(6) - 控制蜂鳴器發聲 (作者：Cooper Maa)：
<https://github.com/programmermagazine/201306/blob/master/source/article1.md>
10. [Arduino 範例] SG90 Servo 伺服馬達：
<https://blog.jmaker.com.tw/arduino-servo-sg90/>
11. [Arduino 範例] ULN2003 驅動板+28BYJ-48 步進馬達：
<https://blog.jmaker.com.tw/uln2003-28byj-48/>
12. 黃琴扉、葉凡愉 (2019)。STEAM 機械摩天輪教具研發與教學。科學研習月刊，58(5)。