

2023仰望盃全國科學 HomeRun 實作大賽

複賽作品說明書

隊伍名稱： 聲音魔法師

作品名稱： 看見聲音的魔法

隊 員： 王彥堤 馬佳慶 陳柏元

指導老師： 陳瑀妮

科學概念1： 聲音的共振可以做甚麼呢?除了飆高音時可以震破玻璃杯，還有沒有其他用途?我們想製作一個聲鉗，利用排列成行的喇叭組合，面對面輸入超聲波，利用超聲波之間的干涉形成了三維空間的駐波，在駐波的節點上，放上保麗龍小球，神奇的保麗龍球就懸浮在空中，不用手也能抓住保麗龍小球。我們想說可以用這個來玩電流急急棒，神奇又好玩。

科學概念2： 當聲波透過平鋪細沙的鐵板時，不同頻率的聲音會在表面產生類似於幾何圖形的克拉尼圖案。因為聲波在傳播過程中產生了干涉和共振效應。這些效應導致聲波在不同的位置形成了不同的波形，進而產生克拉尼圖案，是聲波與物體共振的結果。平鋪細沙的鐵板上的共振是在二維平面發生的。此外，而平鋪細沙的鐵板上的共振是由不同頻率的聲波組合，而非單一頻率而成。我們利用 Arduino 改變輸出的聲音頻率和振幅，進而產生不同的聲波形式。探究聲波在不同環境中的傳播和共振特性。

註：複賽作品說明書內文總頁數最多10頁(不含本封面)

複賽作品說明書內文

(最多10頁)

1. 發想動機：

在網路上看到關於聲鉗的新聞覺得很有趣，以前只聽到虎頭鉗、尖嘴鉗，那麼聲鉗又是甚麼？點進去看才發現，科學家利用對立的兩組喇叭，發出超音波，超音波在空間中產生共振，形成駐波節點，在節點上放入一些小物體，它就會漂浮在空中，非常有趣。我們順著這個新聞往下找，也找到一些相關的資料，例如清華大學研究漩渦式超音波聲鉗可用於醫療用途等等。最有趣的是東京大學的教授們利用比較複雜的結構，作出了隨著音樂跳舞的保麗龍小球，十分新奇，但是順著文章找進去，整個架構有點複雜，要使用電腦加上一連串的控制套件，排成行的超音波發射器，我們就在想有沒有比較簡單的辦法來做看看。



圖1. (a)懸浮在空中的保麗龍球[1]，(b)東京科學家--隨音樂起舞的物體[2]，(c)內部的電路結構[3]。

從此我們就對聲音著迷，想試試再找找更多有趣的利用聲音作出的神奇事件。結果又發現了克拉尼圖形，克拉尼在金屬薄片上鋪了一層薄薄的細沙，接著拿起小提琴琴弓，靠在金屬片邊緣拉動。細沙隨著金屬片的細微震動而上下跳動，慢慢改變位置，結果竟形成一幅對稱的幾何圖案。聲音怎麼形成這樣對稱的結構呢？而且隨著聲音的改變，形成的圖案也隨之變化，複雜，簡單，一圈又一圈，查了好多資料，都說克拉尼圖形式聲波在鐵板上共振所形成的圖案，雖然我們再課本上學到了共振，但是怎麼形成如此美麗的圖形，讓我們充滿好奇。所以這次比賽我們想嘗試做出跳動的音符，可見的美麗聲音來。

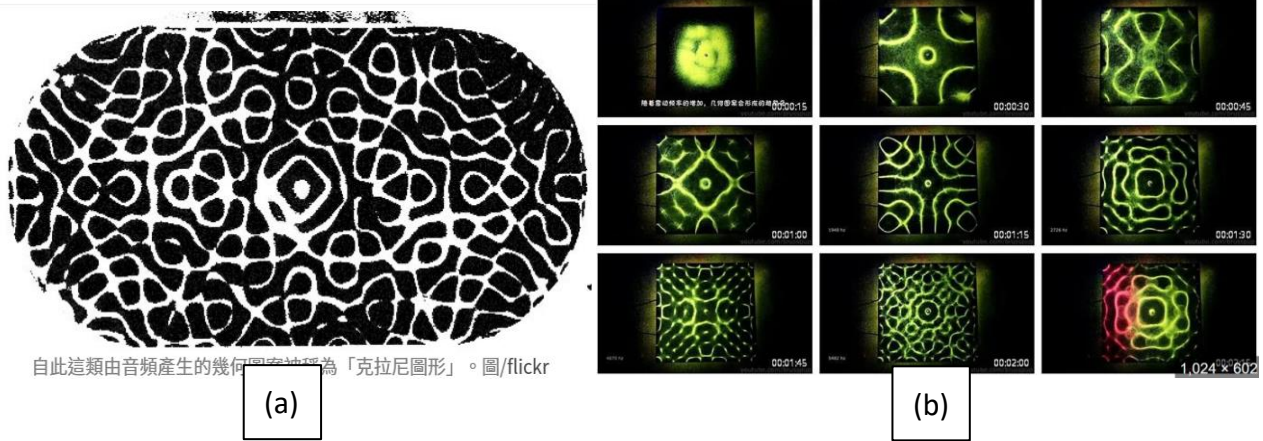


圖2. (a) 克拉尼圖形(b)隨著聲音的改變形成的克拉尼圖形也隨之變化克拉尼圖形 [4]。

2. 硬體及電路架構圖：

(1)我們需要使用 Arduino 電路板來驅動超音波模組，市面上賣的超聲波模組一個負責發射超音波一個負責接收超音波，可以用來測量距離。我們找到有單個販賣的超音波發射器，我們預計利用 Arduino uno 板來推動超音波發射器，可以用一組或兩組 Arduino uno 板推動並聯的數組超音波發射器組合，然後我們需要考慮的事情有幾個，一是 Arduino 提供的功率能不能同時推動數組並聯的超音波發射器，二是市售的超音波發射器的能量不知道夠不夠大?能不能形成駐波，並且把保麗龍小球舉起來，三是超音波發射出來後，在空間中會不會發散?而不能形成所需要的效果。所以我們需要先測試看看。

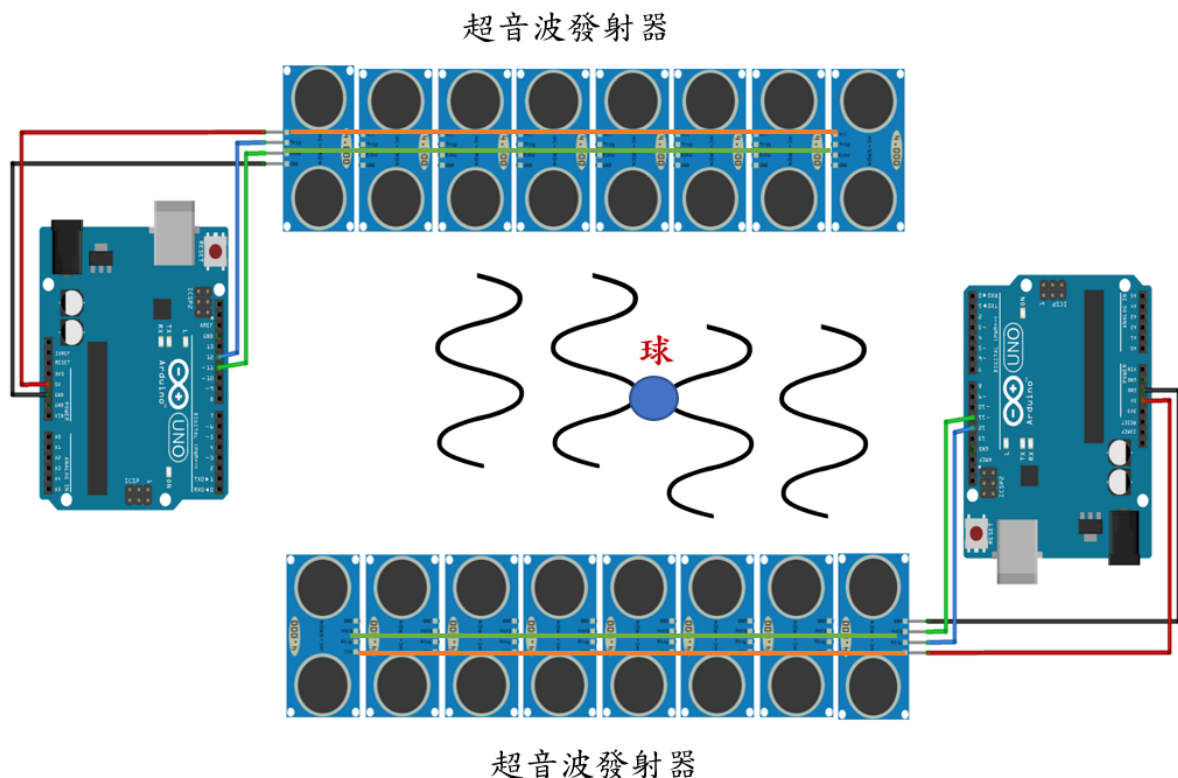


圖3 Arduino uno 電路板來趨動超音波模組組合成聲鉗示意圖。

(2)在克拉尼圖形的實驗裡，我們想把喇叭放在不同的地方，來觀測克拉尼圖形的變化，如果資料是正確的，我們僅能想像聲波在鐵板上的共振就如同水波槽實驗中所告訴我們的，每一個槽邊都會形成反射波然後形成干涉條紋，那麼在克拉尼實驗中應該也是這樣。我們用一組 Arduino uno 板推動一組8歐姆的喇叭，然後透過程式改變喇叭的聲音，用來觀測克拉尼圖形的變化，如圖4。

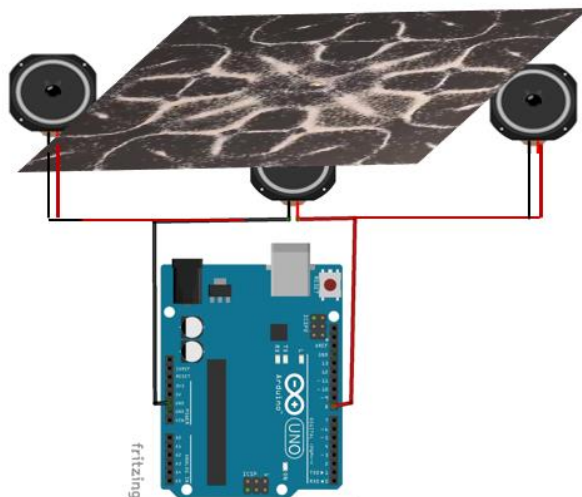


圖4 Arduino uno 推動喇叭震動鐵板和細沙，形成克拉尼圖形。

所需要的材料：

- Arduino Uno x2
- 8 歐姆喇叭 (8歐姆喇叭正極紅線接 Arduino pin 8，喇叭負極黑線接 Arduino GND)
- HC-SR04測距模組 x16 或者單顆超音波發射器 16組以上
- 連接線 數目需要足夠
- LM358運算放大器模組
- 電阻 若干 壓克力條 若干 黏著劑

3. 作品使用說明及應用：(可透過圖表或照片說明之)

(1)原理探究:不管是聲鉗或是克拉尼圖，經過我們討論與求教，都認為其原理應是聲波駐波形式的表現。駐波(standing wave)為兩個波長、週期、頻率和波速皆相同的正弦波相

向行進干涉而成的合成波。駐波形成後，在空間中形成固定的能量節點，且其能量分布在空間形成穩定態，與行進波的形式不同，故名之。在駐波中，每一個物質質點皆做簡諧運動來回擺動，在空間中各質點振盪的幅度不相等，如圖5，振幅為零的點稱為節點(Node)，振幅最大的點，稱為波腹(Antinode)。由於節點靜止不動，所以波形沒有傳播。其數學表示式可由下式敘明;(參考維基百科:[6])

$$y_1 = y_0 \sin(-kx + \omega t) \quad y_2 = y_0 \sin(kx + \omega t)$$

其中 y_1, y_2 為行進方向相反的行進波， k 為波數($k=2\pi/\lambda$)， ω 是角頻率($2\pi f$)，在空間中平行相遇後，互相干涉形成新的合成波，如下式，經過簡化後，合成的 y 波由兩項組合，一個是時間變量 $\cos(\omega t)$ ，一個是空間變量 $\sin(kx)$ ，後者滿足了在空間中特定的位置(x)令 $\sin(kx)$ 為零，此即為節點的存在，

$$y = y_0 \sin(kx - \omega t) + y_0 \sin(kx + \omega t).$$

$$y = 2 y_0 \cos(\omega t) \sin(kx).$$

(2)聲鉗:在我們原先的設想中，坊間最易取得的超音波模組，包含了發射端(T)與接收端(R)，將其組合成圖5的組合，就可以達到在空間中製作出駐波的效果，從而得到能量節點。我們利用 Arduino uno 板來推動超音波發射器，所購買的超音波模組 HC-SR04 提供 40KHz 的發射頻率，其規格如下表。可以用一組或兩組 Arduino uno 板推動並聯的數組超音波發射器組合。

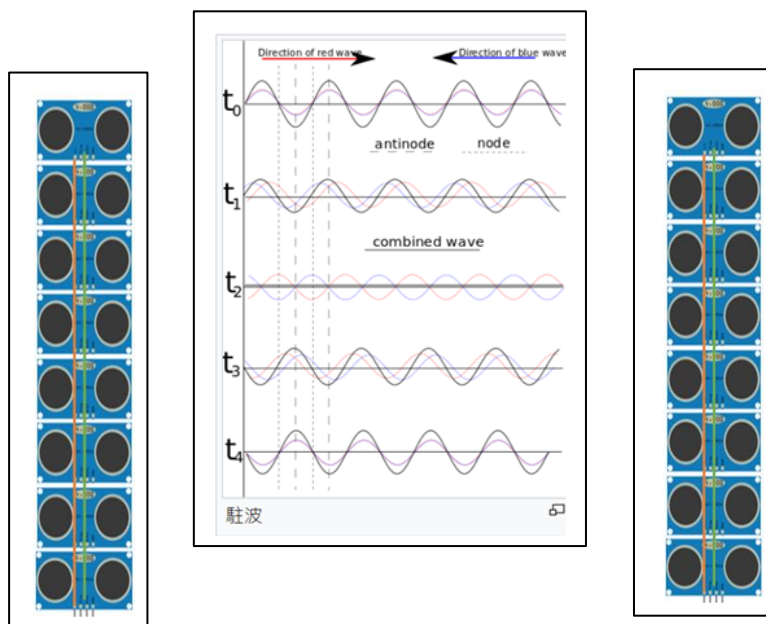


圖5 駐波原理與架構拼貼圖說明

但實際執行後我們面臨到的問題，一是 Arduino Uno 板所提供的功率能不能同時推動數組並聯的超音波發射器(依表訂一組發射器需要15mA 電流，若是並聯10組則需要150 mA，將近0.75W，但經查閱 Uno 板數位輸出能力僅40 mA，顯然是不足以推動這麼多組超音波模組)，二是市售的超音波發射器提供的能量不知道夠不夠大?能不能形成駐波，並有足夠能量將保麗龍小球舉起來(按照計算以室溫聲音速度334 m/s 計算，40kHz 超音波波長約為0.835 cm，也就是說其節點間距約0.42cm，以模組規格5V15mA 計算，假設機械能轉換效率約5成，那麼一個模組能量約37.5mW，不計空間損失，與角度發散問題，若持續發射時間可以永續，如此能量舉起1 μ l 的水珠應是足夠，但根據另項資料所示，超音波能量不易直接計算，常以超音波熱量表進行量測，其能量強度達0.35w/cm²時，則可形成負壓或真空，那麼以現有模組估計，至少需要10組以上超音波模組，且能量集中於一小範圍，方可做到。三是超音波發射出來後，在空間中會不會發散?而不能形成所需要的效果。根據規格15度的發散角，以初始發射範圍1cm 直徑計算，10 cm 後將擴散為6公分直徑($2*10\tan(15^\circ)+1$)，因此駐波模組距離應盡可能小。

(a)

Working Voltage	DC 5V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
Measuring Angle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm

(b)

ATmega328 控制器	ATmega328
工作電壓	5V
Flash Memory	32KB (已使用 2KB bootloader)
SRAM	2 KB
石英振盪器	16MHz
EEPROM	1 KB
類比輸入腳	8支
數位輸出腳	22支
PWM 輸出腳	6支
接腳輸出能力	40mA / 每支接腳
PCB 大小	68.6 x 53.4 mm

表一 (a)HC-SR04超音波模組規格 (b)Arduino Uno 規格

至今我們嘗試過並聯8組，並以圖5型態組合，現在看來是失算了，之後會再進行改善，盡量將所有模組的能量聚焦於一點，並另加驅動模組提供足夠電源驅動超音波模組。

聲鉗模組

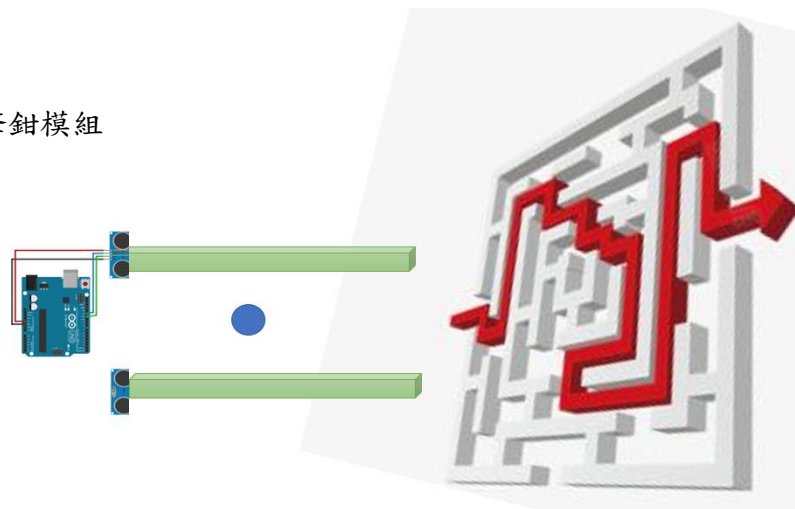


圖6 聲鉗急急棒示意圖

(3)最終理想:玩過電流急急棒嗎?如果我們可以用我們所作的聲鉗來玩一次電流急急棒，應該是滿有趣的事情，在我們最終的設計中，我們想完成這樣的挑戰試試看。在克拉尼圖形的實驗中，我們也想讓砂子聽我們的話，能夠按照我們所希望的畫出我們所希望的美麗圖案，是不是在不同的材質表面是不是也可以有同樣的效果?如果對象換成書桌，那以後我的書桌就不用擦了，隨時保持乾乾淨淨。

(4)克拉尼圖形:與聲鉗不同，克拉尼圖形的形成，是在鋼板上提供不同頻率的聲波，這

些聲波在鋼板上反覆反射震盪，由於發射源距離邊緣位置不同，形成的干涉波紋各異，適當的頻率與波長就可形成不同的漂亮圖形，但這方面的計算頗為繁雜，需要更多觀測的結果幫助我們進行驗證，初期我們僅以圖7的示意圖代表。

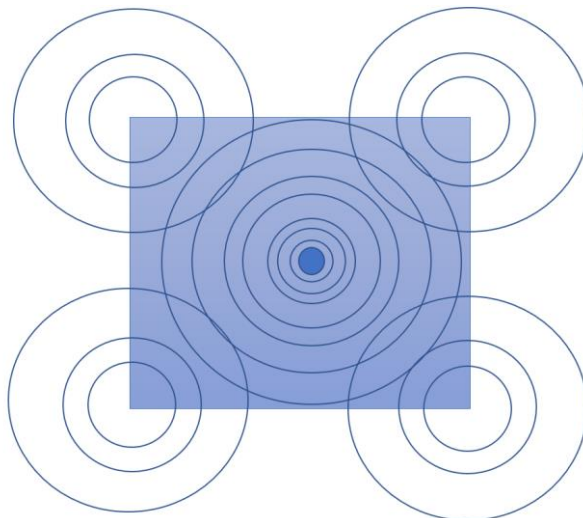


圖7 克拉尼圖形猜想示意圖

一開始我們使用市售藍芽喇叭，搭配音頻控制器想先實驗沙子在扁上的震動結果，其初步結果如圖8，最左圖我們使用紙板當載體，結果發現紙板會吸收聲音的震波能量，即使將音量調到最大，沙子還是巍然不動，於是我們更換了鐵板當載體，沙子的確依稀依照一定軌跡震動但不明顯。幾經思考我們發現。網路上做克拉尼圖形的多是使用共振喇叭作為音源的來源。共振喇叭是經過轉換後以機械波介質面（木質桌面、玻璃等），使介質整個物體產生共振，從而使物體播放出悠揚的樂曲。所以其震動點能夠有效地集中在一點，形成類似點波源的聲音源，與金屬板適當的連結後，能夠帶動整個金屬板形成很好的波紋傳遞。我們買了共振喇叭後(如圖8右圖)，進行了實驗，可惜還沒試驗，喇叭就燒毀了，我們又緊急採購，近日才拿到，準備擇期進行嘗試，希望能有好的結果。



圖8 克拉尼圖形實驗結果示意圖

4. 作品創意性：(最多300字)

我們利用聲鉗的原理，用最簡單的方法做出來，並且用它來解釋聲音的共振、干涉的理論，把看不到的聲音變成可以看見，以前覺得音量的大小變化，只能用耳朵聽，或用分貝計測量，現在使用音量大的超音波雖然聽不到，但是不是表示它可以舉起更重的物體？如果用手去碰會不會有刺刺的感覺？聲音變成可以觸摸了，是否能有更多的可能性？像是應用在空間觸控上做出特別的裝置藝術，又或者是應用在洗淨衣物上的「空洞現象」，更是有出現可以應用在醫學上透過非侵入方式精準操控生物體內帶氧微氣泡的分佈已達到治療患者的效果等等。至於克拉尼圖形，就是我們認為很有節奏性、規律感等等的旋律所震盪出來的，而特定頻率的聲音可以轉變為特殊的圖形來療癒身心，又因為它的圖形特別美麗，或許以後可以當做心理治療的工具。

5. 作品成果報告

聲鉗：如前文所述我們試驗過八組超音波，共用一組 arduino 的數位輸出 pin 腳，並將其拆成四組對四組並聯，面對面改變間距來產生駐波，希望能讓保麗龍小球可以停在波結上，形成浮在空中的景象。也嘗試過利用 arduino 的數位輸出，每一組超音波模組使用一組 pin 腳，來確保有足夠的功率推動超音波模組(如圖9(a))，經過多次嘗試，雖然現階段我們使其中一個最強的超聲波偵測到距離，並使其餘的能夠正常運作，但確始終無法使保麗龍小球能順利浮空，對此我們推論出兩點：第一，超聲波發出的力量不夠，並且未能形成足夠強勁的能量節點(或者說聲波聚集焦點不集中)，令小球浮空。第二，角度與距離不夠精確使其無法產生駐波，15度的發散角與超音波能量散失(目前無法估計超音波模組所發射的超音波能量是否足夠)，我們仍在繼續嘗試中，希望複賽時能有較好的結果。

克拉尼圖形：在完成美麗的克拉尼圖形實驗中，我們使用了共振喇叭、銅板以及鹽巴來操作實驗。放置少許鹽巴於鐵板中央，並將盛有鹽巴的鐵板放在共振喇叭上，開啟喇叭後鹽巴會漸漸移位，並形成對稱的克拉尼圖形。當喇叭發出不同頻率的聲音時，克拉尼圖形也會隨之變動。圖9(b)為頻率約523.25時喇叭所振出的圖形，而圖9(c)則為頻率約493.88時所振出的圖形，很明顯兩者區隔相當大。實驗過程中，我們發現細鹽巴的震動幅

度並不大，有可能是銅板厚度過大，能量吸收導致，後續會繼續嘗試不同厚度的金屬板，並改變震心的位置，觀測圖形的變化。

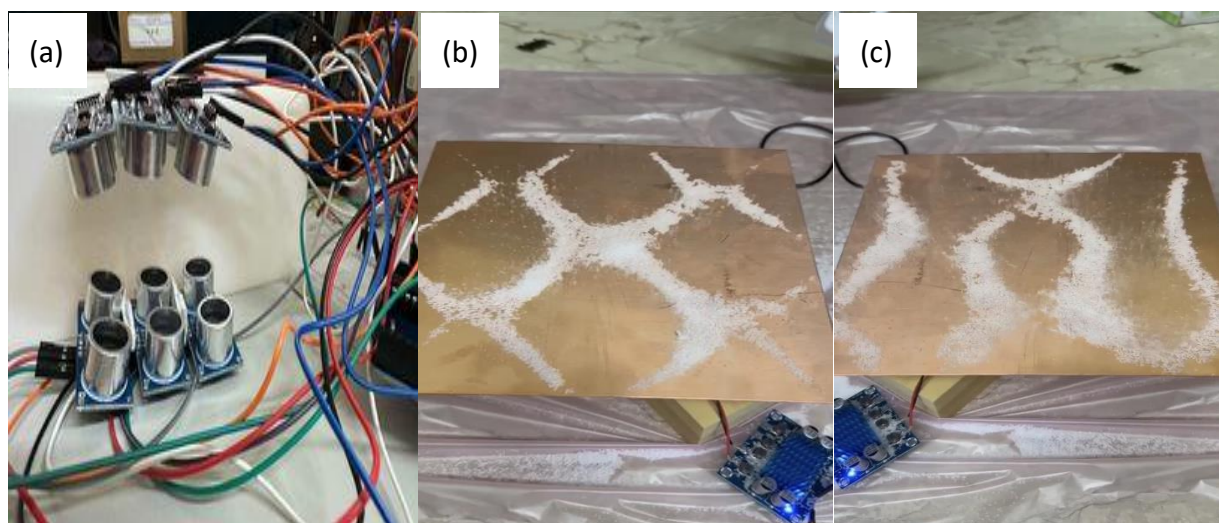


圖9 現階段結果(a)六組超音波模組聲鉗結構(b)克拉尼圖形實驗結果示意圖

6. 參考文獻：

- [1]. 無創手術再推進！新工具「聲鉗」改變你的想像 https://exp.gg/zh_tw/92560
- [2]. 用聲音讓物體飄浮，東京科學家的神奇魔術 <https://www.damanwoo.com/node/89142>
- [3]. Y. Ochiai,T. Hoshi,J. Rekimoto, 2014 Three-Dimensional Mid-Air Acoustic Manipulation by Ultrasonic Phased Arrays. PLOS ONE 9(7): e102525. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102525>
- [4]. 由音頻產生奇妙的幾何圖形：克拉尼誕辰 <https://pansci.asia/archives/129543>
- [5]. CYMATICS: Science Vs. Music - Nigel Stanford <https://www.youtube.com/watch?v=Q3oItpVa9fs>
- [6]. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/駐波>

2023仰望盃全國科學 HomeRun 實作大賽

作品設計費支出明細表(複賽用)

隊伍名稱：

項目名稱	費用	備註
磨鉢	145	
鐵板	99	
沙子一袋	150	
超音波測距儀*8	320	單一40元
麵包板*2	120	單一60元
杜邦線3組共90條	90	單一組30元
共振喇叭	450	
功放板	100	
變壓器12V3A	150	
銅板	250	
總價(新台幣)(元)	1874	

註：除了大會所提供之 Arduino UNO 外，其餘作品設計費每組花費限額3,000元(大會不補助)。若作品有使用到網際網路，提供網路的設備不計入作品設計費，該設備只作為提供網路給作品使用。

複賽時並請提供「作品設計支出明細表」。