

# 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 生活與應用科學(一)科

032812

隨波逐跡

- 探討超音波感測器在冷次定律實驗的應用

學校名稱：新竹市立光武國民中學

作者：  國二 黃彥閔  國二 王潔心  國二 陳宛萱	指導老師：  林春秀  李沅達
---	-----------------------------

關鍵詞：超音波感測器、加速度、冷次定律

## 摘要

傳統冷次定律實驗，只能測量磁鐵進出鋁管的時間，得到其平均速度，極少討論磁鐵在鋁管中瞬時移動。透過 Arduino 操作超音波感測器及示波器，探討影響超音波反射波大小的因子和追蹤管內移動物體位置之可行性，發現當反射波訊號超過 40mV 即可啟動感測器，距感測器較近物體的反射波會先啟動感測器測距，因此超音波感測器具有最短測距的特性。以 Python 及 Geogebra 撰寫聲波傳播的模擬軟體，觀察到波的指向性受發射的口徑和頻率影響，可算出感測夾角。應用於自由落體及冷次定律實驗。最後，我們開發轉盤式與雙感測器式兩種超音波二維定位儀，測量半徑 50cm 內的物體，測量誤差可控制在 1.1cm 內。

## 壹、研究動機

一般的理化實驗，常以打點計時器記錄一個物體運動的軌跡，但這種方法比較難以追蹤物體的瞬時移動位置，因此我們好奇超音波既然可以定位物體的位置，是不是也可以用來追蹤物體的瞬時移動？

## 貳、研究目的

- 一、探討超音波感測器追蹤管內移動物體位置之可行性評估
- 二、Python 和 Geogebra 模擬超音波傳播
- 三、利用超音波感測器測量自由落體加速度
- 四、超音波感測器在冷次定律實驗中的應用
- 五、利用超音波感測器定位物體二維位置

## 參、研究設備及器材

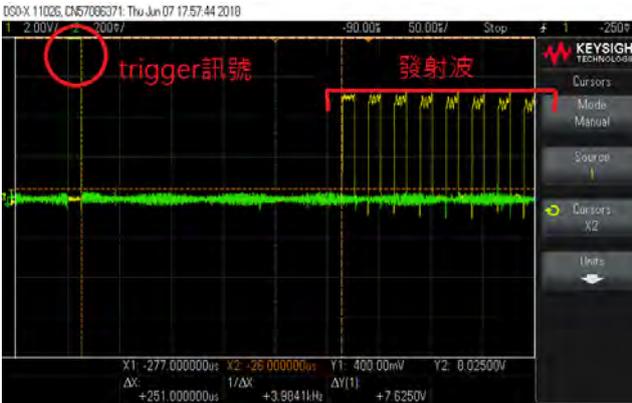
Arduino UNO R3	示波器	電腦
強力磁鐵(磁極強度 4550G)	塑膠罐子	黏土
Al 金屬管 內徑 45mm (厚度 1cm，長 93.5cm)(厚度 0.5cm，長 100cm)		超音波感測器 Hc-SR04

## 肆、研究方法與過程

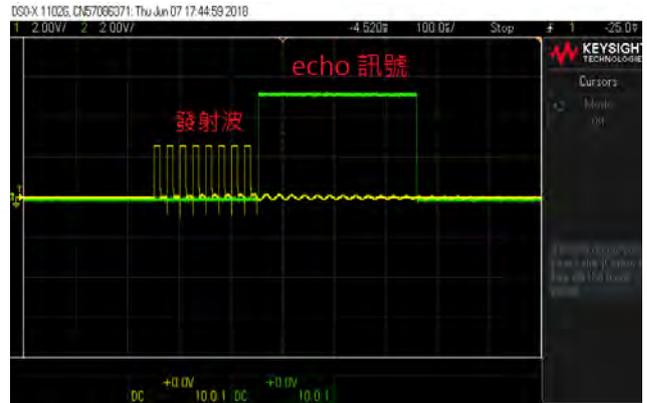
實驗裝置:

1. 超音波感測器感測原理

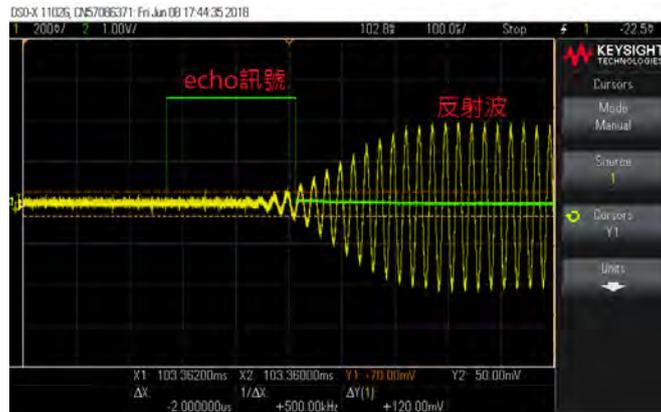
超音波感測器是由 Vcc(+5V), Gnd(接地), trig(觸發), echo(回傳)所組成，並有發射端 T 及接收端 R。將 trig 輸入 10us 的脈衝，超音波感測器內部會發射 8 個脈衝波，利用示波器測量發射波如 F1，發射後開始回傳 echo 訊號如 F2，當接收到 40mV 的反射波訊號後 echo 會結束訊號如 F3。



F1 trigger 經 251us 發射聲波



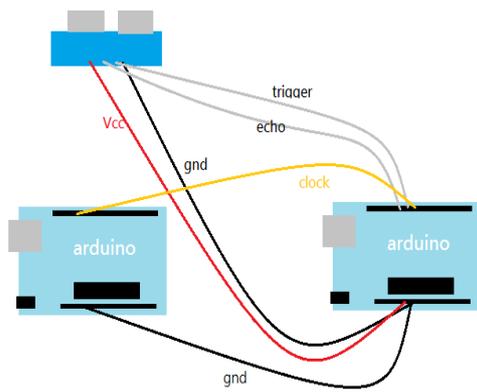
F2 發射波結束回傳 echo



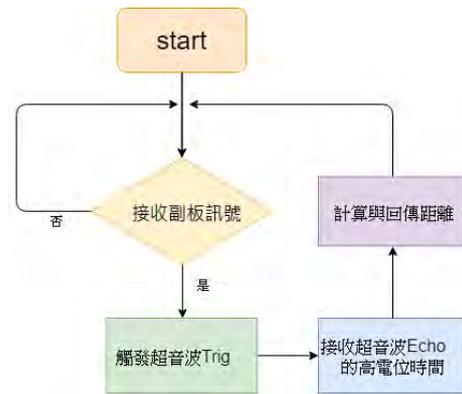
F3 接收到聲波後停止 echo

## 2. Arduino 與超音波感測器

將超音波 trig 及 echo 腳接到 Arduino 的數位接腳，以 Arduino 的 pulseIn 來計算回傳的脈衝長度得到距離，並傳回電腦達到測距的效果。超音波測距時因為距離越遠回傳脈衝的時間就會越長，所以程式控制感測器時無法用 delay 指令來等待固定秒數。為了控制取樣的時間點，我們取兩塊 Arduino 板，將兩台分別定為主板和副板(如 F4)。將主板連上超音波感測器，再將用副板以固定時間觸發主板，此固定時間稱為取樣速率。因為副板沒有其他要執行的程式，所以可以準確的在一固定的時間觸發主板，程式流程圖如 F5。



F4 超音波接線圖



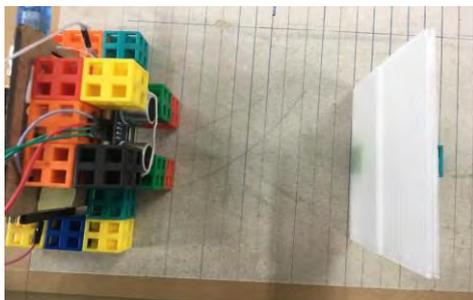
F5 超音波程式流程圖

### 實驗一 探討超音波感測器追蹤管內移動物體位置之可行性評估

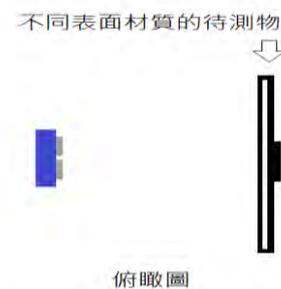
#### 實驗一-1 不同表面材質的物體對超音波測距的影響

##### 實驗步驟:

1. 製作截面為 10 x 10cm、材質分別為瓦楞板、紙、玻璃、科技泡棉表面的待測物。
2. 將待測物放在距離感測器 10cm 的地方進行測量，如 F1-1。
3. 利用 Arduino 程式驅動超音波感測器(F4)進行測距。
4. 取 100 筆數據，算出測得距離的標準差，記錄於 T1-1。



P1-1 不同表面材質對感測影響裝置

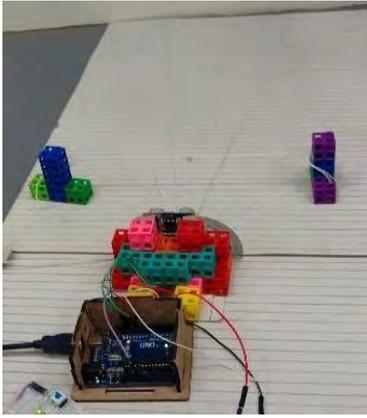


F1-1 裝置示意圖

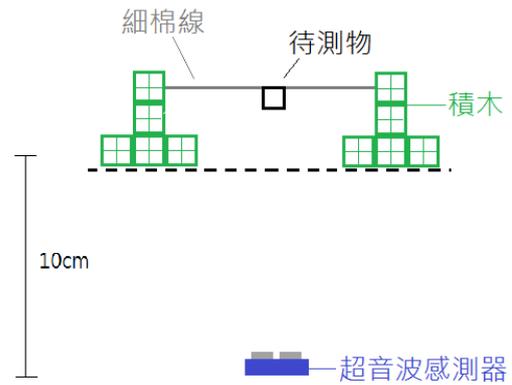
#### 實驗一-2 不同測量體大小對超音波感測器的影響

##### 實驗步驟:

1. 準備四個不同面積的待測物(分別為 0.5 x 0.5cm、0.8 x 0.8cm、1 x 1cm、2 x 2cm)、一條細棉線(超音波感測器無法偵測)及感測實驗裝置(F4)。
2. 將兩塊積木放置於距離感測器 10cm，且在超音波偵測不到的區域。
3. 將 2 x 2cm 的待測物固定於棉線中央，並將棉線兩端固定於兩側積木上，懸於與感測器同高的地方(距桌面 5cm 高)，實驗裝置如 F1-2 所示。
4. 觀察感測器所得的數據，若約為 10cm，則判斷為可測物體，是否可測紀錄於 T1-2。
5. 更換其他待測物面積大小，並且重複步驟 2 到步驟 4。



P1-2 可測的最小物體面積裝置



F1-2 裝置示意圖

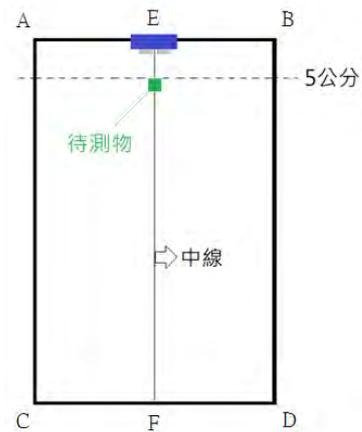
### 實驗一-3 探討超音波感測器的感測範圍

實驗步驟:

1. 準備一張 36.5cm x 105cm 的紙板及一個 2x2x10cm 的待測物及感測實驗裝置(F4)。
2. 將超音波感測器置於 AB 邊的中點位置，如 F1-3 所示。
3. 將 AB 邊和 CD 邊中點連接，在感測區域畫一條中線，使其分為左右兩邊，如 F1-3 所示。
4. 將待測物置於感測器 5cm 前的中線上，沿著橫線往左右兩側移動，直到感測器無法測到待測物為止，記錄兩側離中線距離。
5. 使待測物沿中線往 F 的方向每移動 1cm 距離，重複步驟 4 的測量，直到距離感測器 100cm 處。
6. 畫出超音波感測器的感測範圍，實驗結果記錄於 F1-6。



P1-3 超音波感測範圍裝置

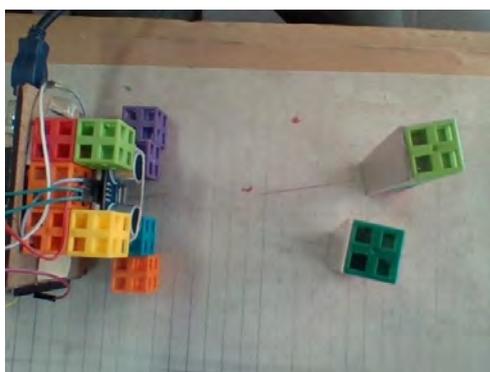


F1-3 超音波感測範圍裝置示意圖

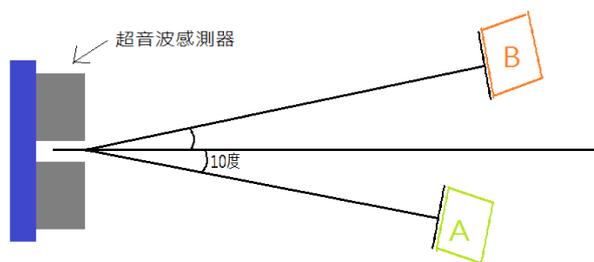
### 實驗一-4 探討超音波感測器物體選擇特性

實驗步驟:

1. 準備 2 個 2 x 2 x 10cm 的待測物及感測實驗裝置(F4)。
2. 將 A、B 兩個待測物分別置於中央往兩側 10°的延長線上，10cm 和 12cm 處,如 F1-4 所示。
3. 觀察超音波感測器測量值，將結果記錄於 T1-3。



P1-4 物體選擇特性裝置



F1-4 物體選擇特性裝置示意圖

### 實驗一-5 不同測量管子對超音波感測器的影響

實驗步驟:

1. 將紙板固定於積木上並放置於開放空間、鋁管中，一次增加一格積木(2cm 測一次)，如 F1-5 所示。
2. 觀察超音波感測器在不同管內測量準確度，將結果記錄於 T1-4。



F1-5 不同管徑對感測的影響裝置

實驗結果:

#### 實驗一-1 不同表面材質的物體對超音波感測器測距的影響:

材質	瓦楞板	紙	玻璃	科技泡棉
標準差	0.05	0.05	0.05	無法測到

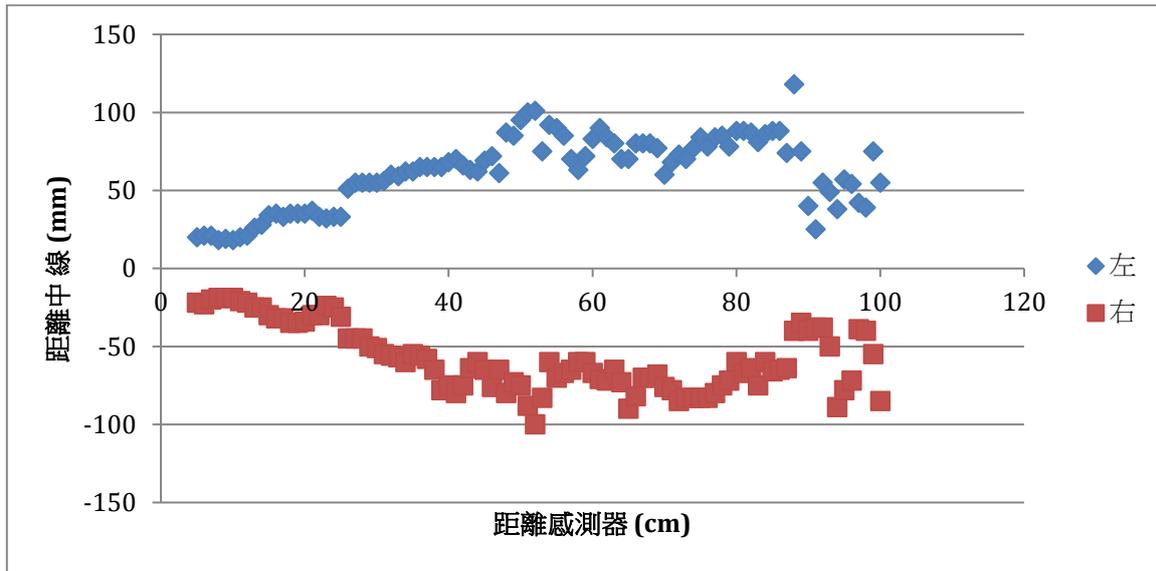
T1-1 不同測量物體材質之標準差

#### 實驗一-2 不同測量體大小對超音波感測器的影響:

待測體表面積(cm <sup>2</sup> )	0.5x0.5	0.8x0.8	1x1	2x2
是否可測	否	否	是	是

T1-2 超音波可測大小實驗結果

實驗一-3 探討超音波感測器的感測範圍:



F1-6 超音波感測範圍

實驗一-4 探討超音波感測器物體選擇特性

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值
測量結果(cm)	10.11	10.10	10.12	10.11

T1-3 超音波感測器物體選擇特性

實驗一-5 不同測量管子對超音波感測器的影響

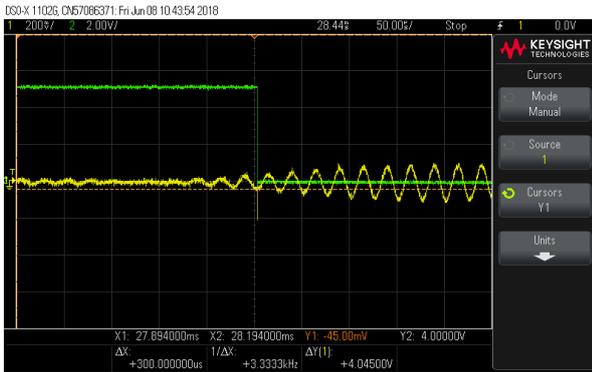
理論值(cm)	12	16	20	24	28	30	34	38
開放空間(cm)	11.52	15.50	19.58	23.26	26.81	28.74	32.68	36.34
鋁管(cm)	11.46	15.33	19.00	22.41	26.18	28.12	31.99	35.73

T1-4 不同測量環境對超音波測距的影響

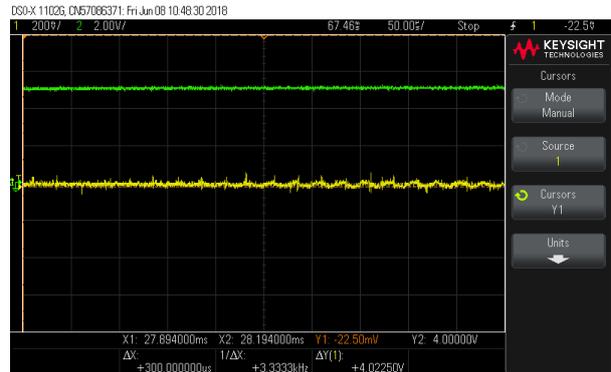
討論與分析:

1. 在實驗一-1，記錄不同測量物體材質的偵測標準差之後，發現不同物體材質並不會影響感測的精準度，如 T1-1 所示。我們認為紙、瓦楞板、玻璃都是很平坦的的反射面，波都可以反彈。而科技泡棉因為太多孔洞，波都被泡綿吸收了，所以無法被偵測到。
2. 在實驗一-2，由 T1-2 所示，Hc-sr04 最小的可測物體為 1 x 1cm 的紙板，而且須放在感測器的中間。我們認為是因為大小 0.8 x 0.8cm 以下的反射波太微弱，接收器偵測不到，而較大的物體反射波較強，所以感測器比較有機會接受到反射波。為了驗證這一點，我們將示波器接在超音波感測器的接收端(下方黃線)及 echo 腳(上方綠線)，記錄反射波的波形與 echo 的相對位置。反射波打到接收器會產生電流，利用示波器發現電壓

大於 40mV(F1-7)會被認定為偵測到反射波。我們發現 0.8 x 0.8cm 的反射波訊號最大值為 22.5mV(F1-8)，未達到觸發感測器的 40mV，所以無法被偵測到。

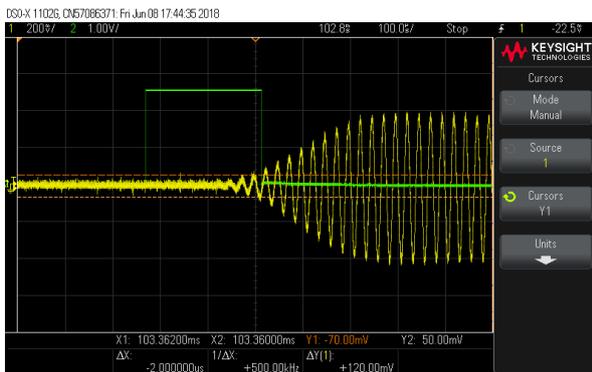


F1-7 2x2cm(45mV)

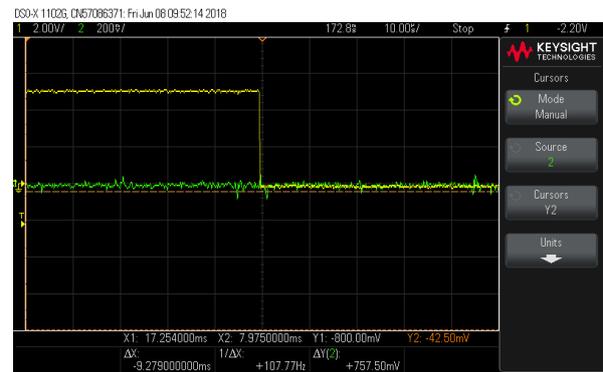


F1-8 0.8x0.8cm(22.5mV)

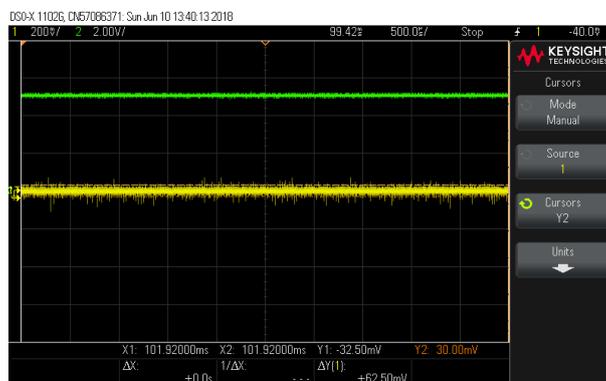
- 在實驗一-3，在探討超音波感測器的感測範圍實驗中，如 F1-6 所示，測量後發現，超音波的感測範圍是個 8.4° 扇形，而且過了 90 公分後，感測範圍越來越小越不穩定。可見超音波感測器對 2 x 2 x 10cm 大小物體在約 1 公尺處，感測範圍較小。我們也利用示波器記錄反射波波形來驗證，發現 5 公分時反射波訊號大(F1-9)，而 90cm 時訊號剛好切到 40mV(F1-10)，物體在 90cm 以後就較難被偵測到(F1-11)。



F1-9 5cm(70mV)

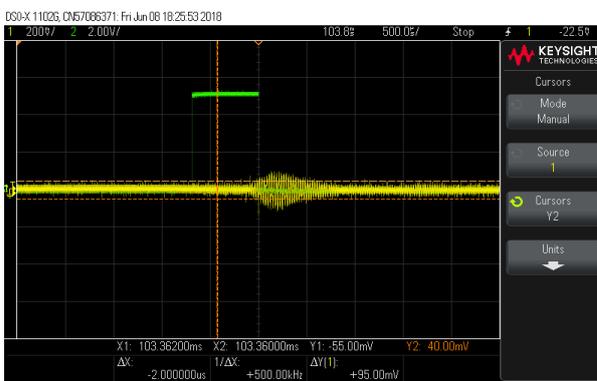


F1-10 90cm(42.5mV)

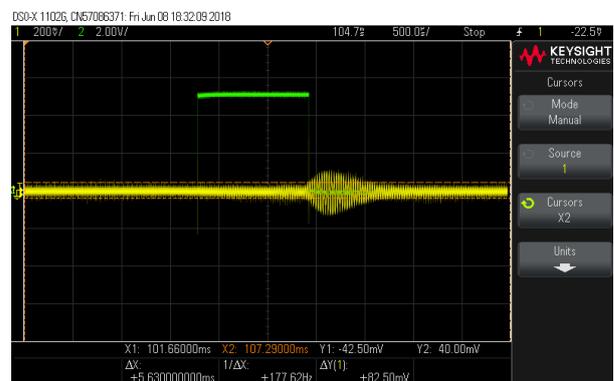


F1-11 110cm(32.5mV)

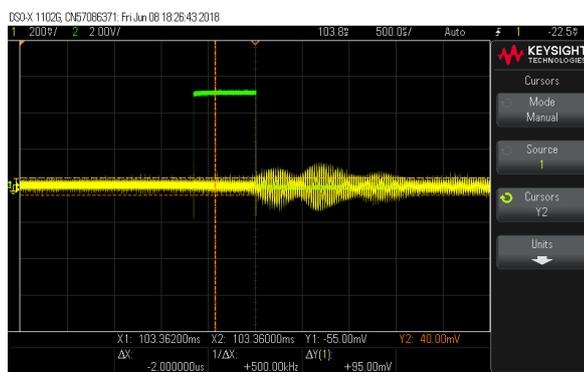
4. 在實驗一-4，感測器前放距離感測器 10cm 與 12cm 兩物體，如 T1-3 所示，測量平均為 10.11cm。我們發現當超音波感測器前有多個物體，感測器會取最短的距離，也就是最先回到感測器的波。這樣可以避免感測器讀到遠處的障礙物。為了了解超音波感測器為何有讀取最短距離的現象，我們將 A、B 兩物體放置於一平面上，利用示波器分別量出只有 A(F1-12)、只有 B(F1-13)、和 AB 同時存在的反射波形，發現 AB 同時存在時反射波為 A 和 B 的疊加結果(F1-14)，結果顯示 A 的聲波就已經可以觸發超音波感測器，所以讀取的結果為 A。比對示波器所觀察的反射波波形圖與實驗結果可發現，若超音波前兩物體同時存在時，雖兩物體都有反射波返回接收端，但只要在超音波感測距離內，距離較短的距離會首先被記錄，因此才會有 T1-3 的結果。



F1-12 只放 A(55mV)

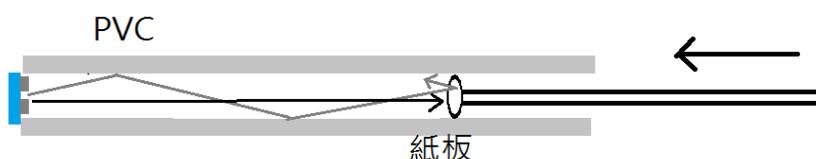


F1-13 只放 B(42.5mV)

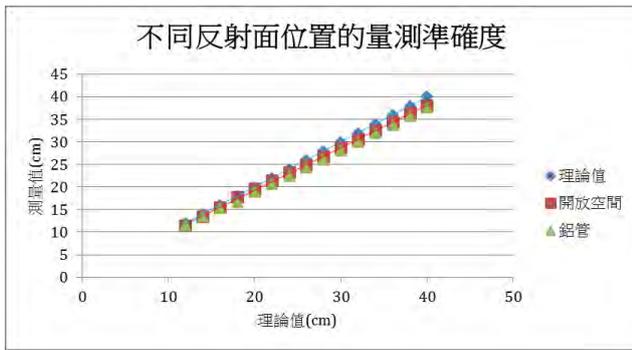


F1-14 AB 同時存在(55mV)

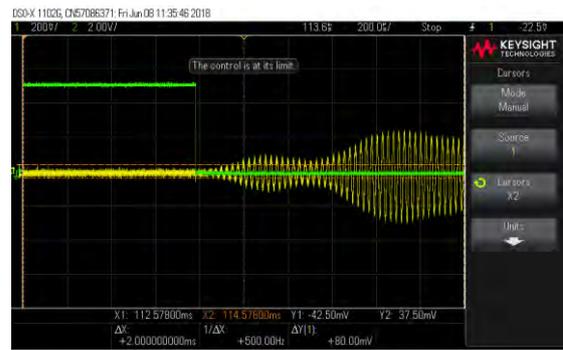
5. 在實驗一-5，由 T1-4 得知，我們發現管子會些微影響超音波測距，開放空間測距結果與實際值偏差 3.6%，而鋁管偏差 5.6%。經由趨勢線公式修正後(F1-18)，可降低實驗誤差，我們也用此方法修正接下來的實驗結果。



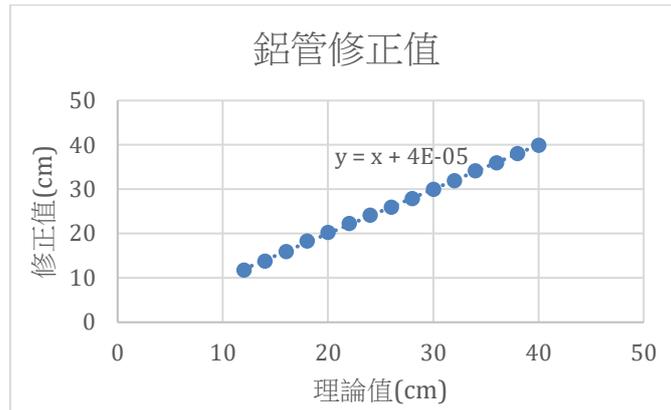
F1-15 超音波管中反射示意圖



F1-16 不同反射面位置的量測準確度



F1-17 鋁管 70cm(42.5mV)

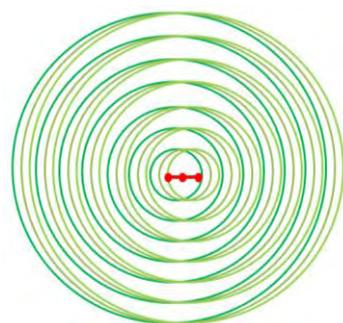


F1-18 鋁管修正值

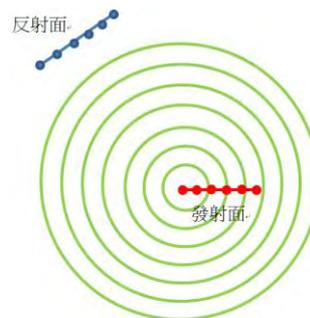
6. 比對實驗一-4 及實驗一-5 我們認為是聲波在管中會反射，管中的直線距離就是最短距離，如 F1-15 所示，因為感測器是利用的第一個回到的波來計算距離，所以才可以在偵測管中的物體。利用示波器可以觀察到，發現管中確實有多條反射波(F1-17)，而第一道波就超過 40mV，因此管中剩下的波並不影響結果。
7. 總結實驗一，要被超音波感測器有效偵測到，面積要大於 1x1cm，表面光滑，反射波大小受反射面材質、面積和距離的影響，且經過校正後能有效的在管中測距。

### 實驗二 Python 和 Geogebra 模擬超音波傳播

為了更了解聲波傳播的特性，我們利用了兩種繪圖程式，自行開發可以出模擬了聲波發射及反彈路徑的工具。



F2-1 Geogebra 聲波模擬



F2-2 Python 聲波模擬

## 實驗二-1 Geogebra 模擬超音波指向角

實驗步驟:

1. 將發射平面上每一點都當點波源，畫出超音波感測器運作的 40kHz 其 8 個脈衝波的所有波前，如 F2-1 所示。
2. 將發射波紀錄於 F2-3。

## 實驗二-2 Python 模擬超音波完整傳波路徑

實驗步驟:

1. 將發射平面上每一點都當點波源，畫出超音波感測器運作的 40kHz 其 8 個脈衝波的所有波前。
2. 分別計算出發射面上每一點到反射面上每一點所需的時間  $t_w$ ，如 F2-2 所示，也就是撞到反射面所需的時間。
3. 將發射後經過的時間  $t$  減去  $t_w$ ，當作碰到反射面後波所傳的時間，以聲波在  $t-t_w$  時間內行徑距離為半徑在反射面上的點畫圓，其為反射波的波前。
4. 將不同時間點的聲波圖形紀錄於 T2-1。

## 實驗二-3 Python 模擬頻率與發射口徑對指向角的影響

實驗步驟:

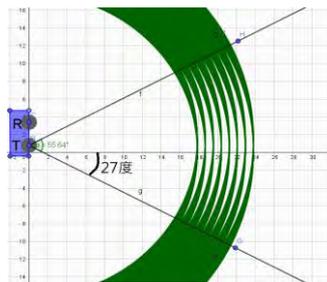
1. 利用實驗二-2 之實驗步驟 1~3。
2. 將頻率從 40k Hz 改成 30k，將發射口徑由 1.6cm 改成 0.8cm。
3. 記錄聲波圖形於 T2-2。

## 實驗二-4 Python 模擬超音波感測夾角

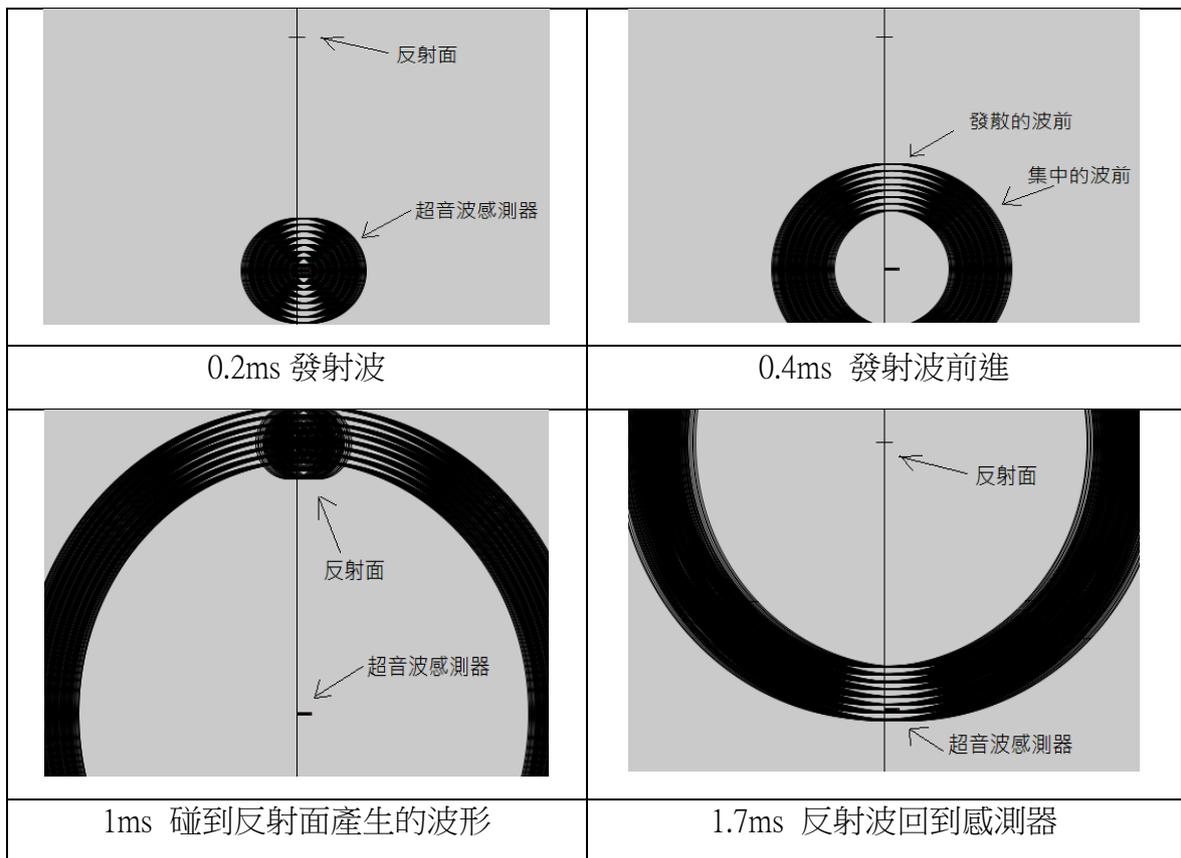
實驗步驟:

1. 利用實驗二-2 之實驗步驟 1~3。
2. 將物體移置中線距離感測器 30cm 處，向左移動直到感測器無法偵測為止。
3. 記錄聲波圖形及感測夾角於 F2-4。

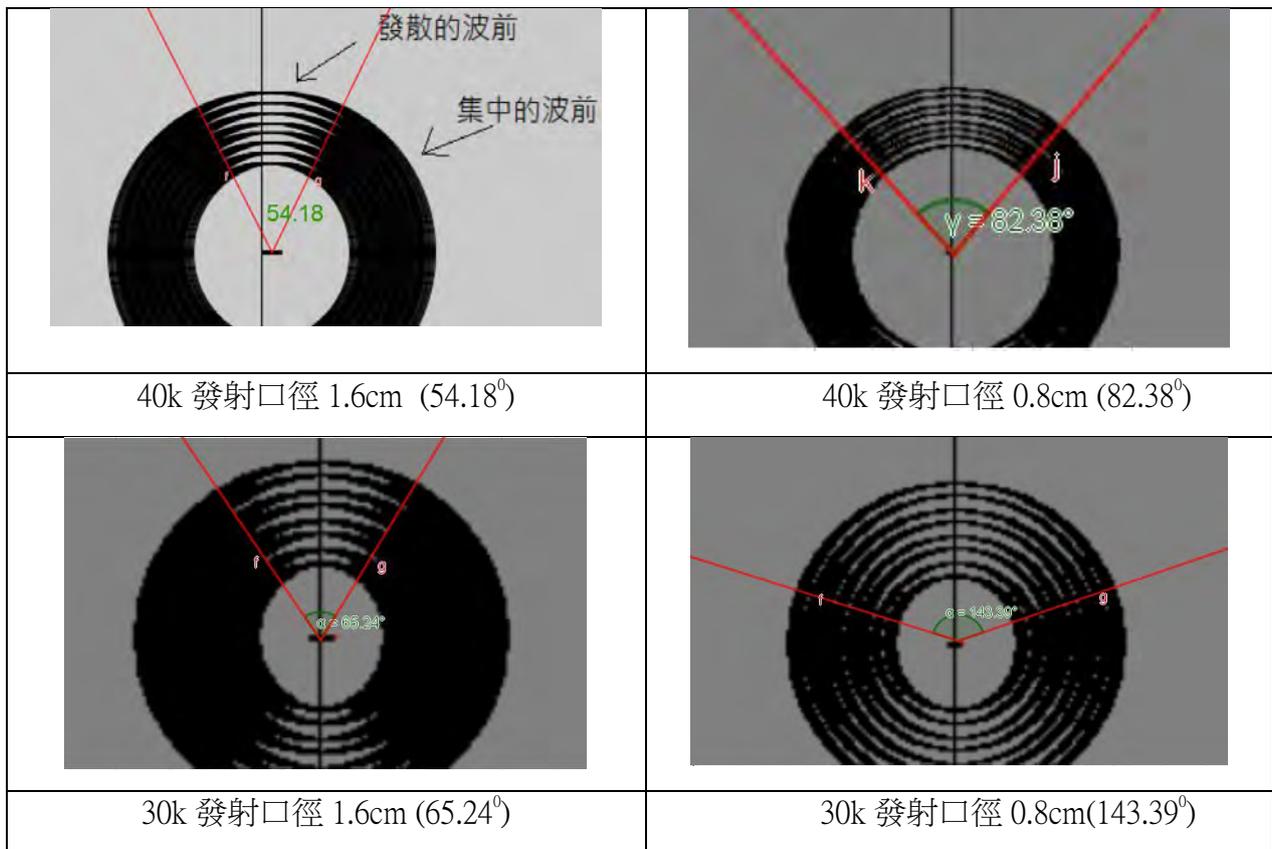
實驗結果:



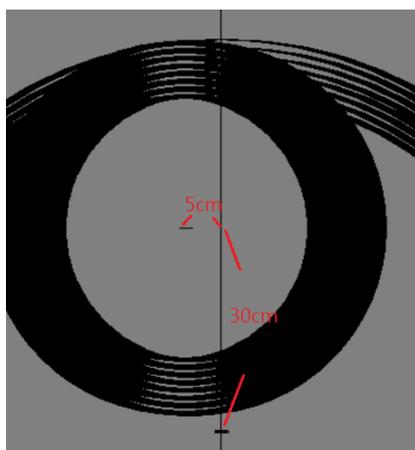
F2-3 Geogebra 模擬超音波感測範圍



T2-1 python 模擬(2cm 的物體在中線上距離感測器 30cm)



T2-2 python 模擬(發射頻率和發射口徑對發射角的影響)



F2-4 Python 模擬(Python 模擬超音波感測夾角)

討論與分析:

1. 我們利用 Geogebra 的點波源模擬，發現超音波有個指向角。由 F2-3 可知，上下兩端的波前已經模糊，而中央的波前還是集中的，反彈回感測器時還是可以被偵測出來。
2. 利用 Python，我們成功的模擬出反射波，並發現反射波也有指向角，如 T2-1 所示。超音波於 1ms 碰觸到反射面。
3. 如果將頻率減少為 30k，指向角會由原本的 54°變為 65°(T2-2)。將發射平面由 1.6cm 縮小成 0.8cm，指向角會變為 82°。如果要增加超音波的發射指向角，那就要減少超音波的頻率和發射口徑大小。
4. 我們發現在距離感測器 30cm，離中線 5cm 時，反射波剛好回到感測器，經過計算後發現感測夾角左右各 9.4°，與我們由實驗一-1 回推的左右:8.4° 有 1°的差異，如 F2-4，可能中間和左右兩側之間的模糊區域超音波無法偵測到。我們開發的這套工具可模擬大量有關波的實驗，而且準確度非常高。

### 實驗三 利用超音波感測器測量自由落體加速度

一般自由落體實驗通常是在開頭和結尾設置光電閘取得物體經光電閘的時間，但是這樣只能取得固定位置的時間，計算所得的平均速度、平均加速度、 $\Delta t$  範圍較大，而超音波感測器有機會較精確地取得物體移動的  $x-t$  圖、 $v-t$  圖。在這一個實驗中，我們測量了不同質量以及不同底面積的物體加速度。

### 實驗三 裝置及步驟

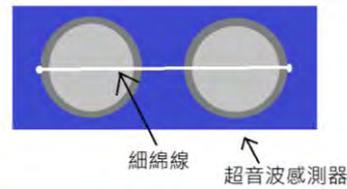
實驗三 設備&器材		
黏土	Arduino UNO R3	超音波感測器
 罐子(底面積 7.6cm <sup>2</sup> )	 罐子(底面積 3.8cm <sup>2</sup> )	鋁管(內徑 45mm，長 1m)

T3-1 實驗三器材

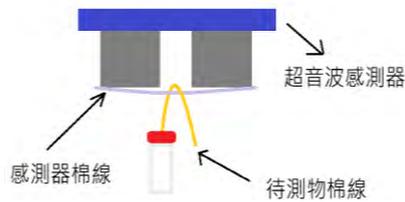
#### 實驗三-1 探討不同取樣速率對自由落體速率曲線關聯性



P3-1 自由落體實驗裝置



F3-1 中央綿線示意圖



F3-2 中央棉線示意圖

#### 實驗步驟:

1. 將黏土塞入底面積 7.6cm<sup>2</sup>的罐子裡，使其質量為 20g。
2. 將一條超音波感測器無法偵測到的細綿線兩端，分別固定於感測器的接收端和發射端兩側，如 F3-1 所示。
3. 將超音波感測器與 Arduino 放在管子上方。
4. 將罐子上方黏上棉線，並穿過感測器中央的細棉線，如 F3-2 所示。
5. 待測物由距離感測器 5cm 的地方自由落下，用超音波感測器追蹤待測物掉落時每單位時間的距離位置。
6. 改變超音波感測器的取樣速率為 50ms、65ms、80ms，取 5 筆數據，並將速率曲線的 R<sup>2</sup> 值、x-t 曲線及 v-t 曲線結果記錄於 T3-2、F3-3、F3-4。

### 實驗三-2 不同質量物體對自由落體加速度的影響

實驗步驟:

1. 將黏土塞入底面積  $7.6\text{cm}^2$  的罐子裡，使其質量分別為  $10\text{g}\sim 50\text{g}$ 。
2. 重複實驗三-1 步驟 2~5。
3. 用超音波感測器追蹤待測物掉落時每  $50\text{ms}$  的距離位置，並將加速度記錄於 T3-3。

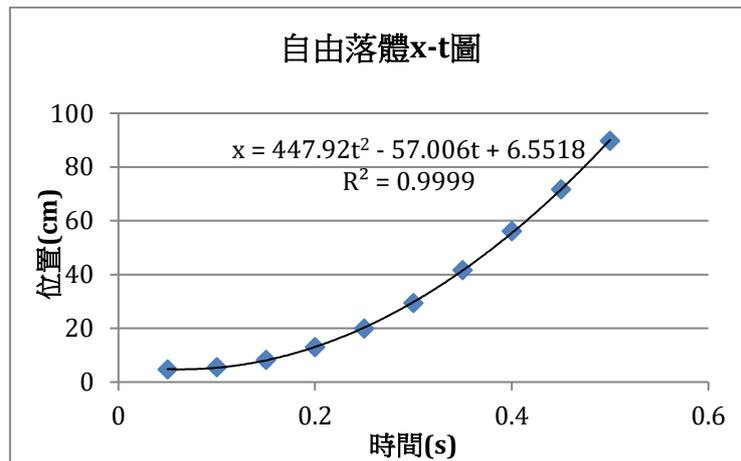
### 實驗三-3 不同底面積物體對自由落體時加速度的影響

實驗步驟:

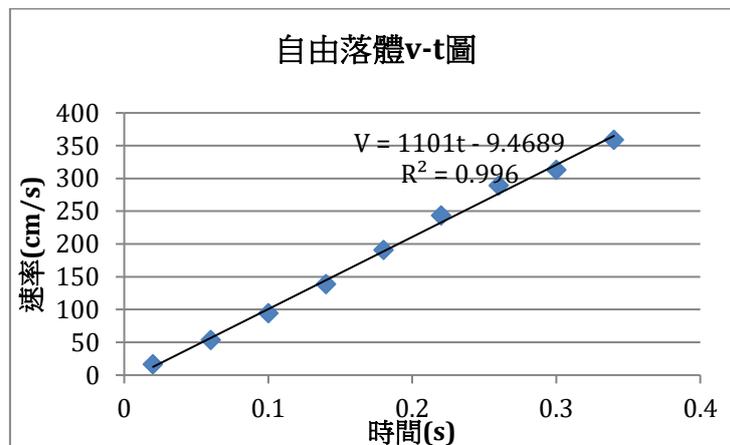
1. 將黏土塞入底面積  $3.8\text{cm}^2$ 、 $7.6\text{cm}^2$  的罐子裡，使其質量分別為  $10\text{g}$ 。
2. 重複實驗三-1 步驟 2~5。
3. 用超音波感測器追蹤待測物掉落時每單位時間的距離位置，並將結果記錄於 T3-4。

實驗結果:

#### 實驗三-1 探討不同取樣速率對自由落體速率曲線關聯性



F3-3 自由落體 x-t 圖



F3-4 自由落體 v-t 圖

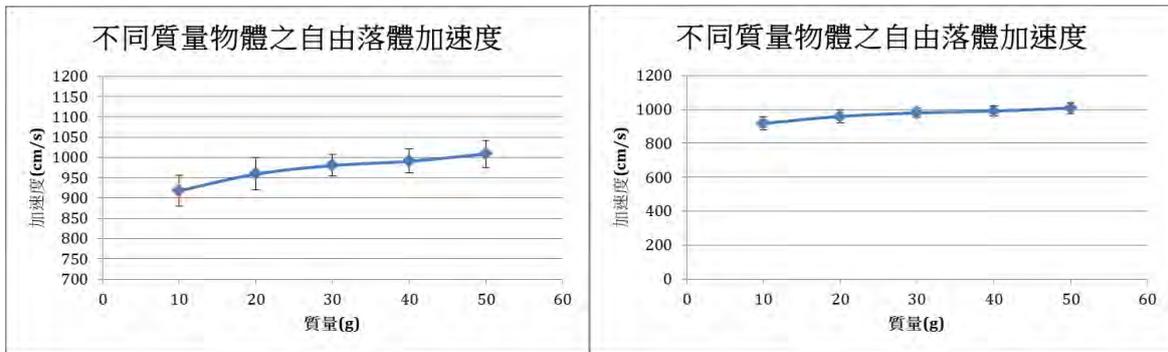
取樣速率 (ms/次)	R <sup>2</sup> 值				
	1	2	3	4	5
50	0.9977	0.9918	0.9946	0.9904	0.9926
65	0.9986	0.9968	0.9954	0.9923	0.9891
80	0.9889	1	0.9741	0.9959	0.9997

T3-2 取樣速率對自由落體速率曲線關聯性

實驗三-2 不同質量物體對自由落體加速度的影響

質量	10g	20g	30g	40g	50g
加速度 $\text{cm/s}^2$	918.05	959.17	980.26	990.71	1008.89
標準差	37.43	39.88	26.50	29.68	32.96

T3-3 不同質量物體之自由落體加速度

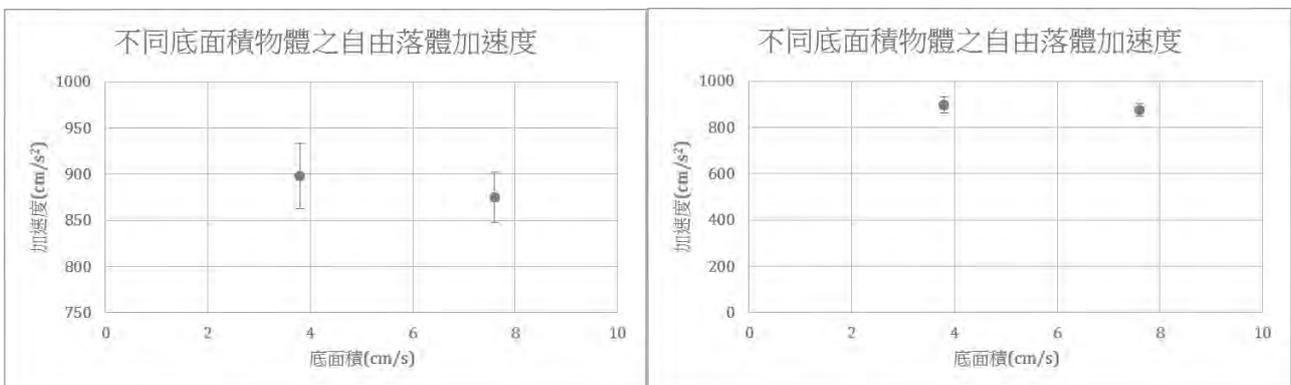


F3-5 不同質量物體之自由落體加速度

實驗三-3 不同底面積物體對自由落體時加速度的影響

底面積( $\text{cm}^2$ )	3.8	7.6
加速度 $\text{cm/s}^2$	898.14	874.90
標準差	35.38	27.45

T3-4 不同底面積物體之自由落體加速度



F3-6 不同底面積物體之自由落體加速度

討論與分析:

1. 由實驗三-1 的數據發現，x-t 曲線為二次曲線，而 v-t 曲線呈正比，如 T3-2 所示，取樣速率並不會影響速度曲線的關聯程度，我們發現其中 x-t 曲線  $R^2$  皆可達 0.9994 以上，v-t 曲線的  $R^2$  大部分都可以達 0.98 以上，但因為取樣速率快可以到更多的細節，因此我們選擇用 50ms 作為接下來實驗的取樣速率。
2. 由實驗三-2 實驗結果 T3-3 可以觀察到，50g 物體的自由落體加速度比 10g 物體的自由落體加速度還要快，且加速度增加的程度慢慢變小，如 F3-5 所示。我們推測造成此現象的原因為:重物下落過程除受重力作用，還受空氣阻力影響，受力與運動關係如(1)式所示，所以物體加速度如(2)示，因此 m 越大，a 越大。

$$ma = mg - f \quad \text{----- (1)}$$

兩邊同時除以 m 得:

$$a = g - \frac{f}{m} \quad \text{----- (2)}$$

(a 為加速度、g 為的重力加速度、f 為風阻、m 為物體質量)

3. 實驗三-3 的數據顯示(T3-4、F3-6)，物體的底面積是會影響自由落體加速度的，當物體的底面積為  $3.8\text{cm}^2$  時比物體底面積為  $7.6\text{cm}^2$  時的加速度還要大，我們推測這是因為底面積不同而產生的風阻也不同，底面積越大，產生的風阻較大，也就是 f 較大，因此加速度較小。

$$a = g - \frac{f}{m}$$

#### 實驗四 超音波感測器在冷次定律實驗中的應用

在冷次定律實驗中磁鐵在鋁管落下的過程中，受電磁感應的影響而產生加速度變化的現象，但傳統的計時裝置大部分只能掌握物體進出鋁管的時間，因此我們只知道不同變因對磁鐵在鋁管中平均運動狀況的影響，由實驗三結果顯示，超音波感測器能有效追蹤、記錄管中運動的物體，因此本實驗我們將探討超音波感測器在冷次定律實驗的應用。

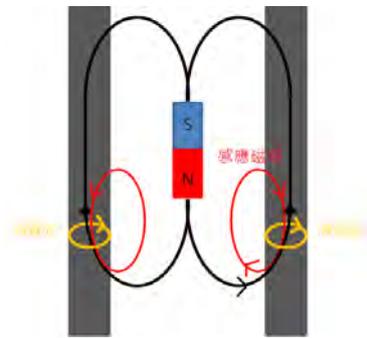
裝置及步驟:

實驗四 設備&器材		
超強力磁鐵	超音波感測器 Hc-SR04	Arduino UNO
罐子(底面積 $7.6\text{cm}^2$ )	罐子(底面積 $8.6\text{cm}^2$ )	鋁管(內徑 45mm，長 1m)

T4-1 實驗四器材

實驗原理:

1. 冷次定律的原理是當磁鐵靠近或遠離非磁性材料，因為磁場變化，導致非磁性材料上產生感應磁場，此反方向的感應磁場會降低磁鐵在鋁管中的下落速度，如 F4-1 所示。



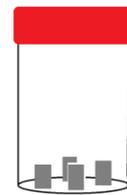
F4-1 冷次定律示意圖



P4-1 磁鐵



P4-2 磁鐵掉落物



F4-2 平面排列掉落物

#### 實驗四-1 不同磁鐵數量的速度曲線與末端速率

實驗步驟:

1. 將一個底面積  $7.6\text{cm}^2$  的塑膠罐子分別裝 4、5、6 顆強力磁鐵，如 P4-2 所示，並放在距離發射器 5cm 處。
2. 重複實驗三-1 步驟 2~5。
3. 以 50ms 為取樣速率，記錄速度曲線及磁鐵末端速率(磁鐵通過鋁管 90cm 時的速率)於 F4-3、F4-4、T4-2。

#### 實驗四-2 不同磁鐵排列的末端速率

在這實驗中，我們探討磁鐵數量固定時，磁鐵上下直線排列和左右的平面排列之速度曲線與末端速率變化。

實驗步驟:

1. 將一個底面積  $7.6\text{cm}^2$  塑膠罐子放入 4 顆磁鐵，分別以上下直線排列和平面排列放入管子(磁極方向相同)，如 F4-2 所示
2. 重複實驗三-1 步驟 2~5。
3. 以 50ms 為取樣速率，記錄速度曲線及磁鐵末端速率(磁鐵通過鋁管 90cm 時的速率) 於 F4-6 及 T4-3。

### 實驗四-3 不同鋁管厚度的末端速率

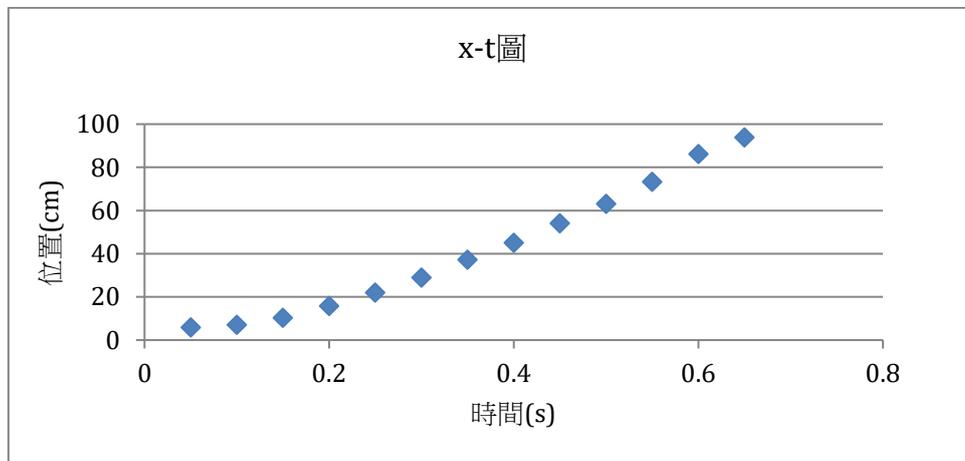
我們在實驗四-3 觀察鋁管在不同厚度時，隨著磁力線的截面積改變，是否會對磁鐵的運動產生影響。

實驗步驟:

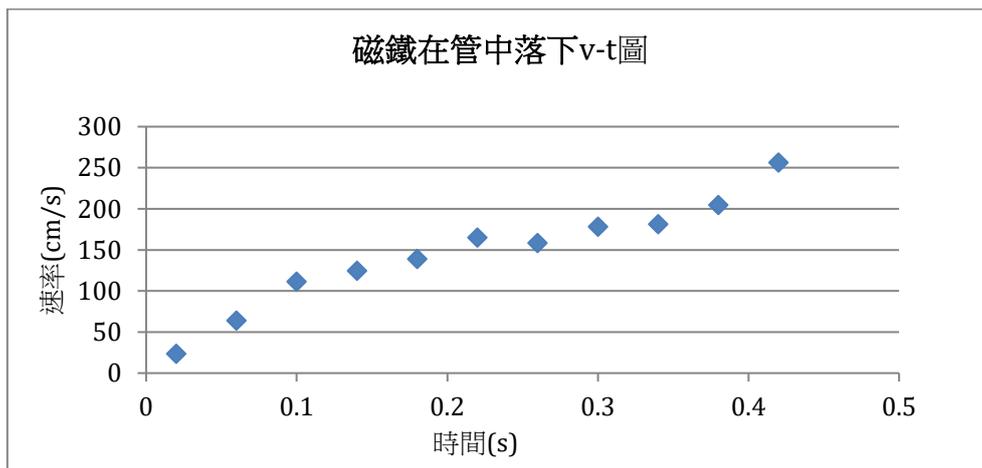
1. 準備兩個不同厚度的鋁管(分別為 0.5cm、1.0cm 厚，內徑為 45mm)。
2. 重複實驗三-1 步驟 2~5。
3. 以 50ms 為取樣速率，記錄速度曲線及磁鐵末端速率(磁鐵通過鋁管 80cm 時的速率) 於 F4-7 及 T4-4。

實驗結果:

#### 實驗四-1 不同磁鐵數量的速度曲線與末端速率



F4-3 磁鐵在管中落下 x-t 曲線

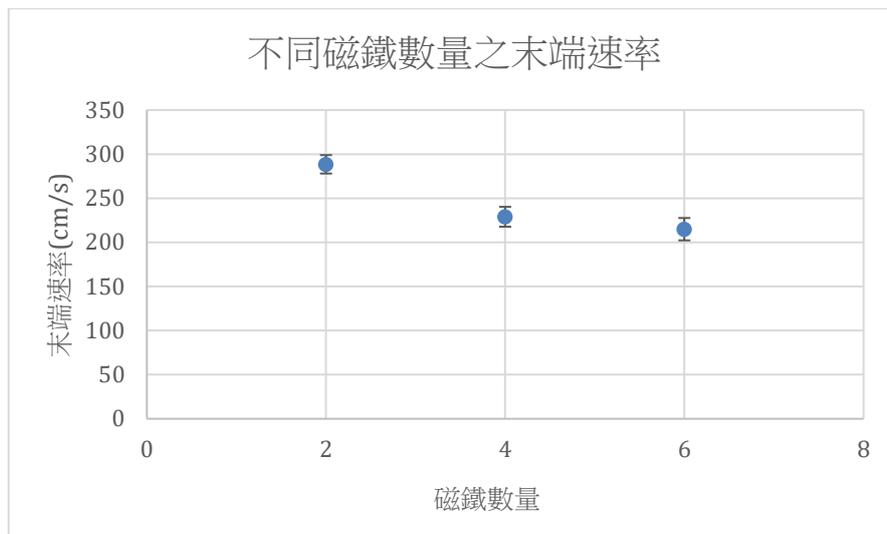


F4-4 磁鐵在管中落下 v-t 曲線

末端速率(90cm)

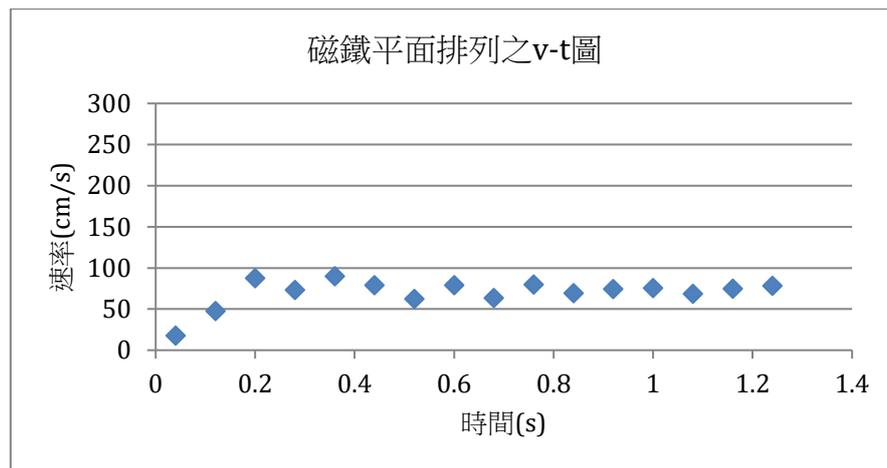
磁鐵數量	末端速率 cm/s										平均值 cm/s	標準差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
4	272.79	273.34	276.24	286.74	257.43	258.92	288.96	283.29	276.36	276.41	288.46	10.44
5	216.55	215.31	240.51	225.77	204.79	216.12	214.05	198.56	219.21	219.45	228.98	11.27
6	203.27	187.59	194.43	216.28	215.70	189.07	214.05	219.26	220.88	202.26	214.94	12.66

T4-2 不同磁鐵數之末端速率



F4-5 不同磁鐵數量之末端速率

實驗三-2 不同磁鐵排列的末端速率



F4-6 磁鐵平面排列之 v-t 圖

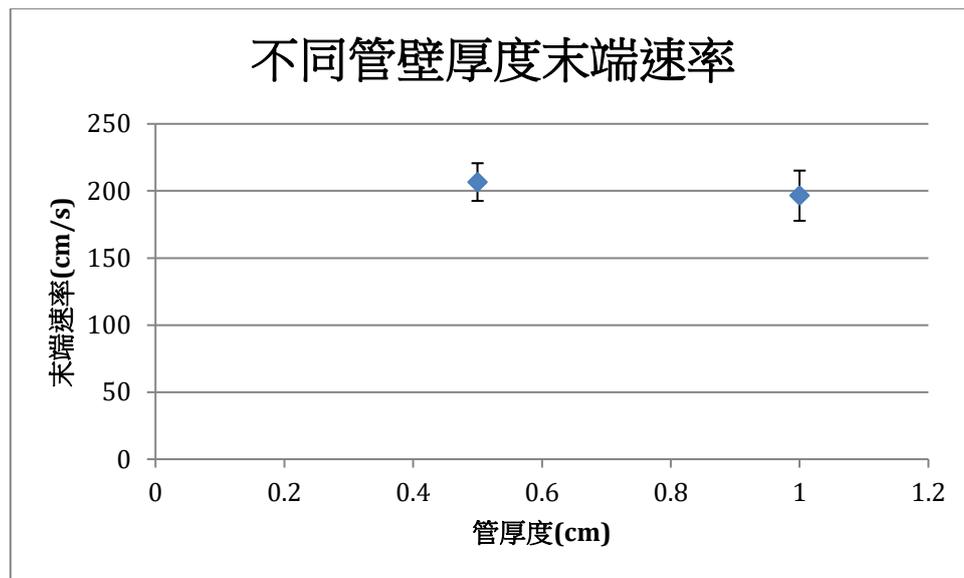
排列方式	末端速率(90cm) cm/s										平均值 cm/s	標準差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
平面排列	73.23	75.21	83.41	68.61	90.41	81.55	73.23	66.22	69.66	75.03	77.43	7.45
垂直排列	225.90	215.45	199.99	223.12	202.63	210.16	224.57	222.59	222.85	216.68	238.87	9.31

T4-3 不同磁鐵排列的末端速率

實驗四-3 不同鋁管厚度的末端速率

管壁厚度 (cm)	末端速率(80cm) cm/s										平均值	標準差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0.5	195.38	184.82	174.53	208.61	208.78	186.22	191.32	203.12	222.68	195.63	206.60	14.05
1	185.78	234.73	190.56	196.28	194.26	173.18	175.82	194.56	220.14	195.84	196.44	18.71

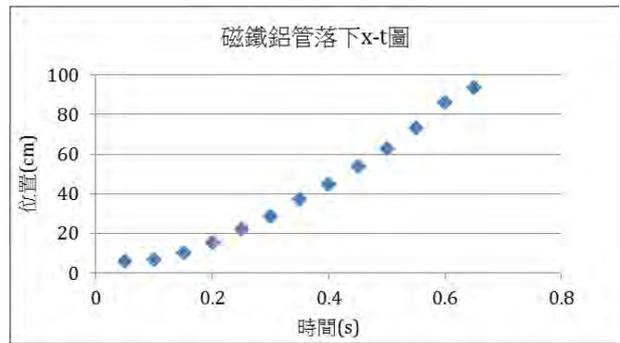
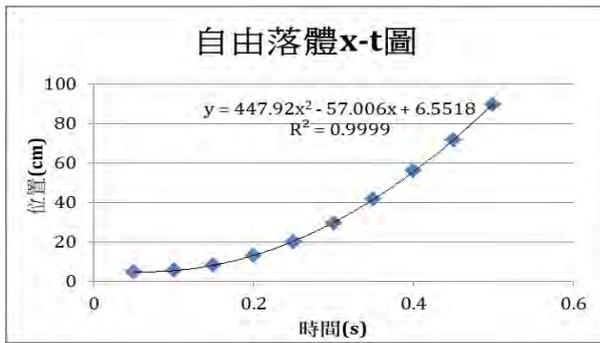
T4-4 不同管壁厚度的末端速率



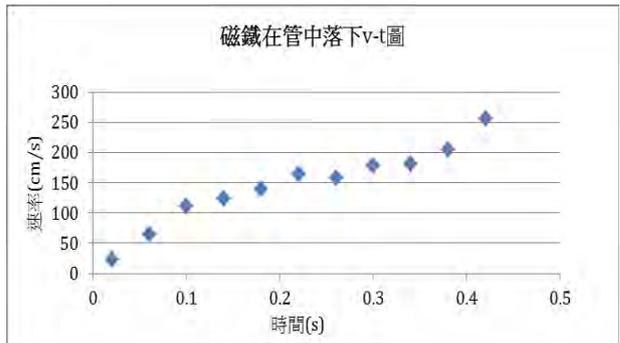
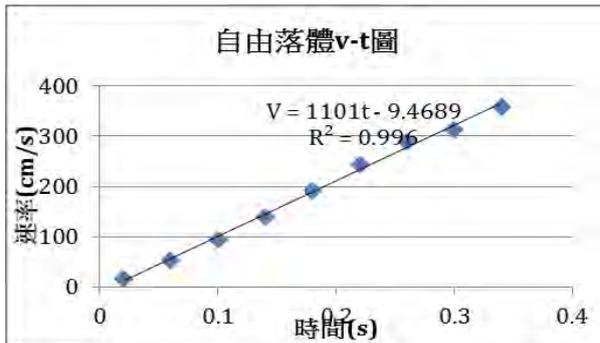
F4-7 不同管壁厚度末端速率

實驗討論:

在實驗四-1 中，經由 F4-3 與 F4-4 發現，比較自由落體實驗與冷次定律實驗的 x-t 圖沒有明顯差別(F4-8)，但是自由落體與磁鐵在鋁管中運動的 v-t 圖有明顯的差別(4-9)，磁鐵在鋁管接近 40~50cm 時呈現等速度運動，之後又出現加速現象。



F4-8 自由落體與磁鐵在鋁管中落下 x-t 對照圖



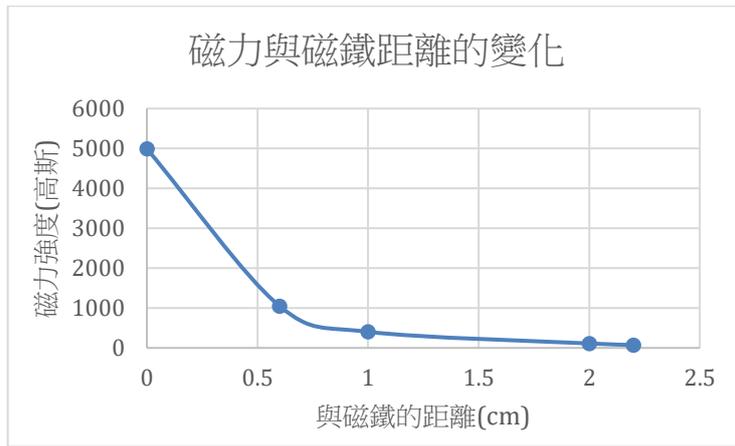
4-9 自由落體與磁鐵在鋁管中落下 v-t 對照圖

2. 利用高斯計測量不同磁鐵數目堆疊的磁極表面磁場，其結果如 T4-5 所示，磁鐵堆疊數目由 2~6，磁極強度由 4880G 增加為 5140G。其磁極強度隨堆疊數目增加，但磁極強度沒有隨磁鐵堆疊數目加倍而加倍。

磁鐵數	2	4	6
磁力強度(高斯)	4880	4990	5140

T4-5 不同磁鐵數的磁力強度

3. 不同磁鐵數的磁鐵在鋁管中運動實驗結果如 T4-2、F4-5 所示，發現隨著磁鐵數目增加，磁鐵出鋁管的末端速率有減慢，但是因為磁鐵堆疊後磁場強度增加不大，所以加速度變化的差異不大。
4. 在實驗四-2 中，經由 F4-6 之 v-t 圖發現，平面排列的磁鐵掉落物進管子後不久就呈等速運動，經由末端速率發現，平面排列的 71 cm/s 明顯比垂直排列的 204cm/s 末端速率慢。雖然平行排列的磁極強度與垂直排列相同，但是平面排列比較靠近管壁，由 F4-10 得知，隨著距離磁鐵越遠，磁力強度會明顯的衰減，如到管壁 2.2cm 時已經由原本 4990 高斯變為 73 高斯(F4-10)，也就是當磁鐵靠近一點，磁力就會大幅增加，所以平面排列比較垂直排列的還要明顯許多。



F4-10 磁力與磁鐵距離的變化

- 由實驗四-3 的數據發現，管壁 1cm 的加速度變化效果和管壁 0.5cm 差異不大。因為實驗使用的是大管徑的鋁管，所以厚管多出 0.5cm 的位置磁力已經太微弱，因此對加速度變化影響幾乎沒影響。
- 綜合以上實驗，我們發現改變磁鐵與管壁距離比改變磁鐵數目有更大加速度變化。

#### 實驗五 利用超音波感測器定位物體二維位置

實驗五 裝置及步驟:

實驗五 設備&器材			
超音波感測器	Arduino UNO	SG-90 伺服馬達	圓盤(半徑 8cm)

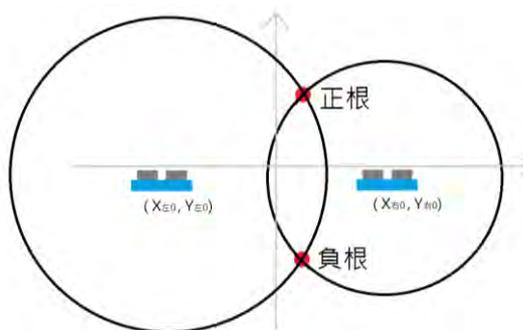
T5-1 裝置及步驟

#### 實驗五-1 二維定位

超音波感測器通常只用在一維定位，而我們希望做出二維的定位。這一種設計可以記錄一個物體在一個平面的移動軌跡。我們做出了兩種設計，分別是雙感測器式和轉盤式。

實驗裝置與原理:

雙感測器式(設計 A):



F5-1 雙感測器型二維定位示意圖

1. 利用兩台感測器，以各讀到的距離畫圓，如圖 F5-1。圓的方程式為

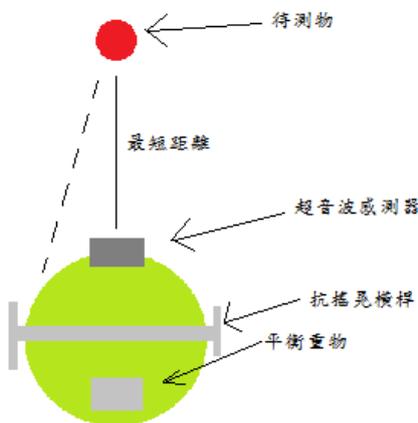
$$(x - x_{左0})^2 + (y - y_{左0})^2 = r_{左}^2$$

化簡後

$$y = \pm \sqrt{r_{左}^2 - (x - x_{左0})^2} - y_{左0}$$

2. 因為負根在後，所以不取。利用迴圈，不斷代入 x，求兩式中 y 最接近時的 x y 值。
3. 記錄直角坐標
4. 將一物體至於感測器前方 20cm、左邊 5cm 處，取 10 筆數據，並記錄於 T5-2。

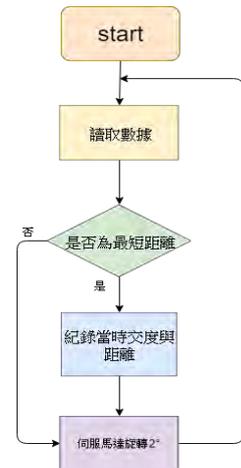
轉盤式(設計 B):



F5-2 轉盤型二維定位示意圖



P5-1 轉盤式二維定位裝置圖



F5-3 轉盤式二維定位程式流程圖

1. 將超音波感測器立著的方式裝在半徑 8cm 的轉盤上，並固定在一個伺服馬達上，如 F5-2 所示
2. 轉動伺服馬達記錄最小的距離和當時的角度，如 F5-3 所示。
3. 回算物體的極座標與直角坐標
4. 將一物體至於感測器前方 20cm、左邊 5cm 處，取 10 筆數據，並記錄於 T5-3。

實驗結果:

雙感測器式:

$r_{左}$ (cm)	22.47	22.37	22.47	22.47	22.47	22.37	22.47	22.47	22.47	22.07
$r_{右}$ (cm)	23.21	23.32	23.32	23.21	23.32	23.32	23.32	22.8	23.32	22.81
$x$ (cm)	-3.55	-4.6	-4.1	-3.55	-4.1	-4.6	-4.1	-1.55	-4.1	-3.55
$y$ (cm)	22.27	22.08	22.24	22.27	22.24	22.08	22.24	22.29	22.24	21.86

T5-2 雙感測器式

轉盤式:

$r$ (cm)	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
$\theta$ (deg)	104	104	102	102	102	102	102	104	104	104
$x$ (cm)	-4.96	-4.96	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.96	-4.96	-4.96
$y$ (cm)	19.89	19.89	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05	19.89	19.89	19.89

T5-3 轉盤式

討論與分析:

1. 在實驗五-1，將一物體至於中線 20cm 左邊 5cm 處，轉盤式  $x$   $y$  10 筆最大誤差為 0.7cm，比雙感測式的 3.4cm 還要低。雙感測器式可以隨時取數據，但是因為可測範圍是在兩台感測器感測範圍重疊的地方，所以範圍很小，而且是用圓交疊的方法，因此誤差會被放大。
2. 轉盤式的感測範圍在 50cm 以內的  $60^\circ$  的旋轉夾角，因為有較大的半徑，所以每旋轉一度的位置差就會比較大，能有精準的最小距離。我們也發現，如果將超音波在一個半徑極小的的半徑旋轉，因為超音波發射器和接收器是分開的，所以超音波面對物體時會有最大的測量值。我們將感測器立著，改善這問題。轉盤式的優點是精準度較高，但是取樣時間會受馬達轉速影響而較慢。

## 伍、 綜合討論

1. 超音波感測器的準確度不會受到可測的反射面材質影響，而可測的最小截面面積為  $1 \times 1 \text{cm}$ 。超音波感測器的感測範圍是一個扇形，且於 90~100 公分處開始縮小。由示波器發現，反射波訊號強度需大於 40mV 才能被偵測到，且超音波反射波大小受反射面材質、面積和距離的影響。
2. 由示波器發現，當超音波感測器前有多個物體，反射波是所有物體反射波疊加後的結果，但感測器會讀到第一個回到感測器的波，所以有讀最短距離的特性。因聲波會在管子中反射，最短路徑就是直線距離，所以能在管中測距。
3. 透過點波源的特性，自行撰寫的 Geogebra 及 Python 模擬軟體模擬超音波每個時間點的位置。我們發現超音波打中反射面後依然有指向性，指向性會受聲波頻率和發射口徑影響，且模擬的感測範圍和實驗一是相符的。
4. 將超音波應用在自由落體及磁鐵在鋁管中運動的實驗中。改變取樣速率後，自由落體的  $R^2$  值沒有受到影響，取樣速率快可以到更多的細節，但是曲線會比較不平穩。當自由落體的質量逐漸變大，加速度逐漸趨於一個定值。且底面積越大加速度越小。將超音

波應用在記錄磁鐵在鋁管中運動的實驗中，經由 v-t 曲線發現管子 40~50cm 處的加速度成等速運動，前後段加速度較大。將不同數量的磁鐵放入鋁管中，磁鐵數越多對加速度變化越明顯。將磁鐵從上下垂直排列改成磁鐵放在罐子底部的平面排列，經由高斯計量測得知磁力強度會隨著距離快速衰減，因為平面排列較靠近管壁，所以末端速率可降為垂直排列的  $\frac{1}{3}$ 。因垂直排列的磁鐵離管子距離太遠，所以管厚度對加速度變化沒有太大的效果。綜合以上實驗，我們發現在大管徑時，改變磁鐵與管壁距離比改變磁鐵數目對磁鐵運動有更明顯的影響。

5. 利用超音波開發出兩種二維定位儀。轉盤式二維定位儀透過轉盤的旋轉找出最小的距離和當時的角度，在一個以 50cm 為半徑的感測範圍內可以將誤差控制在 1.1cm 以內有較佳的準確度，但取樣速率慢。雙感測器二維定位儀以兩個距離當半徑，求兩個圓的交點當作物體位置，這種設計的精準度較差，感測範圍較小，但是取樣速率快。

## 陸、 結論

1. 關於超音波的感測特性:
  - (1). 超音波感測器的感測範圍為左右各  $8.4^\circ$  扇形，最小可測面積為  $1 \times 1$  cm 紙片。
  - (2). 反射面材質、面積和距離會影響超音波反射波大小。
  - (3). 可被偵測的物體其反射面材質並不會影響量測準確度。
  - (4). 當感測器前有多個物體，超音波會從多個聲波中記錄最快回到感測器的波，結果會顯示最短的。
2. 超音波管中一維定位應用:
  - (1). 超音波在管子測距會有 5% 固定誤差，修正後可在管中正常測距。
  - (2). 將一物體自由落下，x-t 二次曲線的  $R^2$  值皆可達 0.9994，v-t 線性曲線  $R^2$  值達 0.98 以上。
  - (3). 利用超音波做自由落體實驗，得到當質量會增大，加速度也會增大，且底面積越大加速度越小，都和  $a = g - \frac{f}{m}$  有關係。
  - (4). 將超音波用來測量磁鐵在鋁管中的運動情形，發現 40~50cm 時加速度較小，且將磁鐵數增加或以平面排列使磁鐵更靠近管壁皆可使加速度變化變明顯。
3. 關於二維定位的超音波設計:
  - (1). 轉盤式二維定位儀可以在一個半徑為 50cm 的範圍運作，其誤差小於 1.1cm，但取樣速率慢。
  - (2). 雙感測器式二維定位儀，使用圓交疊的方法，其誤差比前者大，但取樣速率快。

4. 關於自製 Python 模擬軟體:
  - (1). 將平面上每一點都當點波源，可以模擬聲波瞬時的位置。
  - (2). 利用計算出聲波碰到反射面多少時間可模擬反射波。
  - (3). 改變聲波頻率與發射面大小皆會影響指向角，改變反射面位置可算出感測夾角

## 柒、 未來展望

1. 將二維定位應用拓展到三維定位，記錄飛行生物的移動軌跡及習性
2. 製作二維環景偵測器，可掃描四周環境，應用在火災地震時尋找逃生路徑的工具
3. 發展不插電的電梯緩降設施

## 捌、 參考文獻

1. 趙英傑(2016年8月) • Arduino 互動設計入門(2版) • 台北市:旗標
2. 休伊特(2008年11月6日) • 觀念物理 • 台北市:天下
3. Y. Daniel Liang(2016年6月) • python 程式設計入門指南 • 台北市:基鋒

## 【評語】 032812

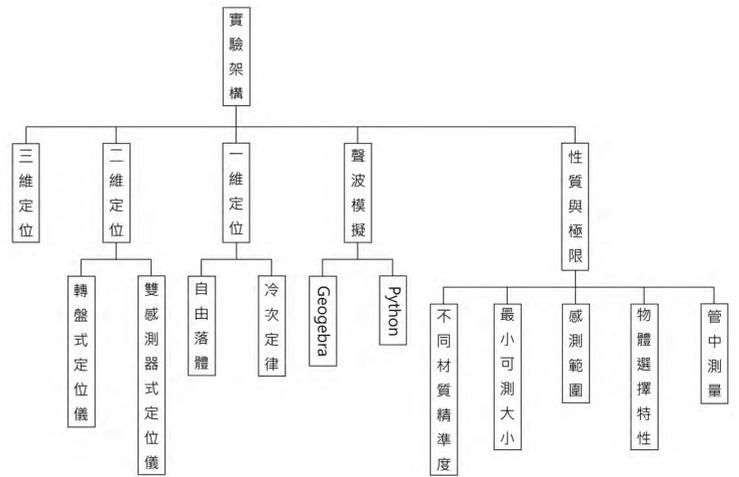
1. 該作品以 Arduino 進行超音波的發射和感測，了解不同材質與大小之反射面對其感測範圍與角度之影響，目的在於準確擷取管中自由落體運動之磁鐵的位置信號，以確認磁鐵之速度變化與冷次定律理論相吻合，其誤差已達可允許範圍。
2. 使用 Geogebra 及 Python 模擬軟體模擬，對參賽者學習成長有幫助。
3. 設計的二維定位以及加速度儀在量測精度上受到的限制如底面積等等，值得再深入討論。

# 實驗動機

一般的理化實驗，常以打點計時器記錄一個物體運動的軌跡，但這種方法比較難以追蹤物體的瞬時移動位置，因此我們好奇超音波既然可以定位物體的位置，是不是也可以用來追蹤物體的瞬時移動？

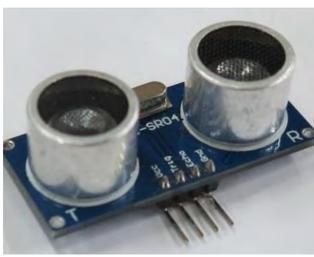
# 實驗架構

1. 探討超音波感測器的性質及極限
2. Python 和 Geogebra 模擬超音波傳播
3. 利用超音波感測器測量自由落體加速度
4. 超音波感測器在冷次定律實驗中的應用
5. 利用超音波感測器二維定位物體位置

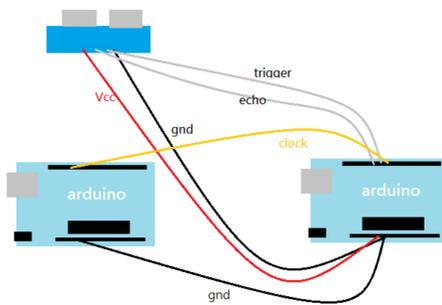


# 實驗裝置

## 超音波感測器

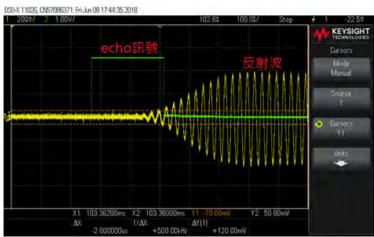


## 一維定位

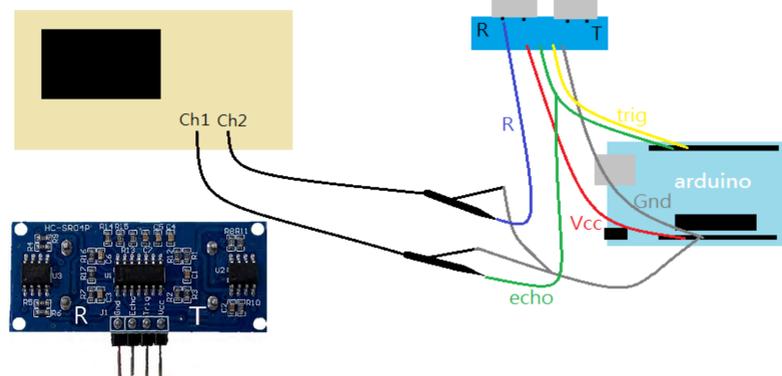


## 示波器

將示波器將上超音波感測器 echo 及背面的接收端 R，當接收到 40mV 的反射波訊號後會結束 echo 訊號。



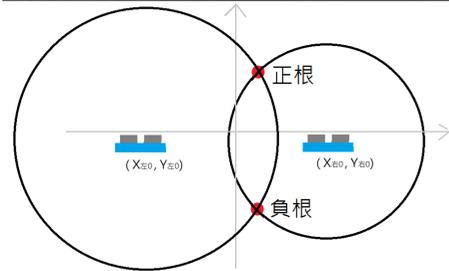
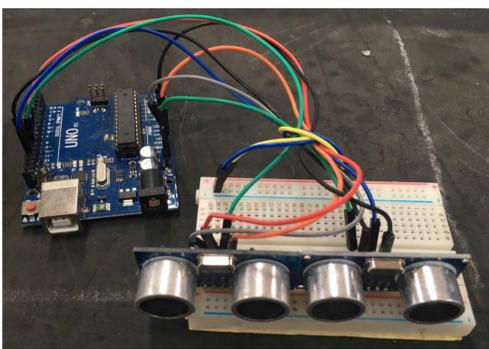
## 示波器



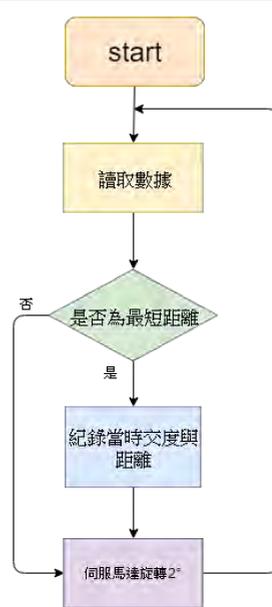
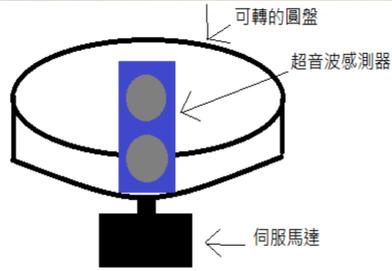
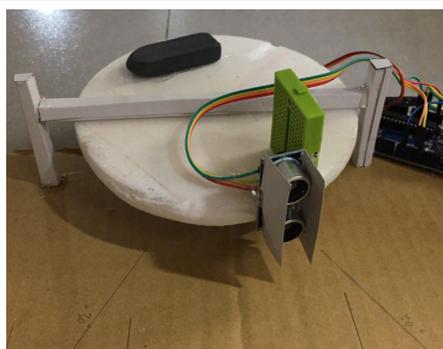
## 管中測距



## 二維定位(雙感測式)



## 二維定位(轉盤式)



# 實驗結果與討論

## 【實驗一-1】不同表面材質的物體對超音波測距的影響

將 10x10 公分不同材質的物體放置於距感測器 10 公分，取 100 比數據紀錄標準差。

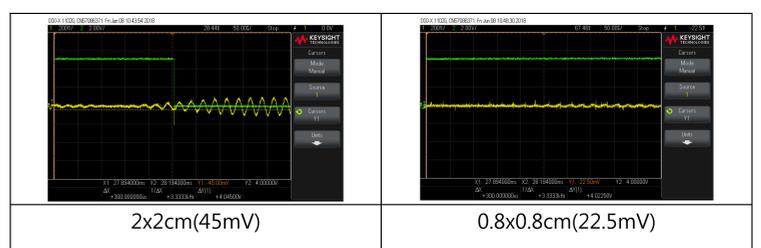


材質	瓦楞板	紙	玻璃	科技泡棉
標準差	0.05	0.05	0.05	無法測到

## 【實驗一-2】不同測量體大小對超音波感測器的影響

將不同面積的物體放置於距感測器 10 公分，與感測器同高，紀錄物體是否可測。

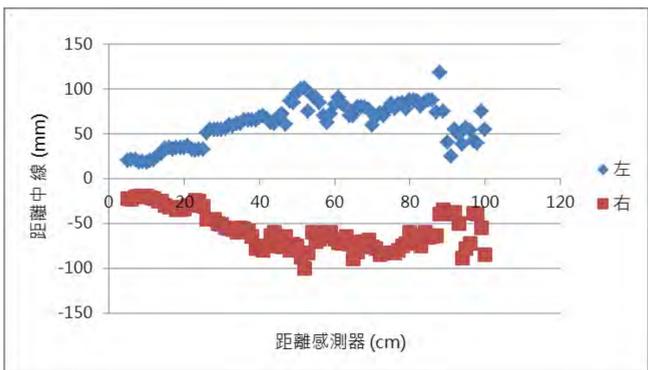
紙板面積(cm <sup>2</sup> )	2x2	1x1	0.8x0.8	0.5x0.5
是否可測	是	是	否	否



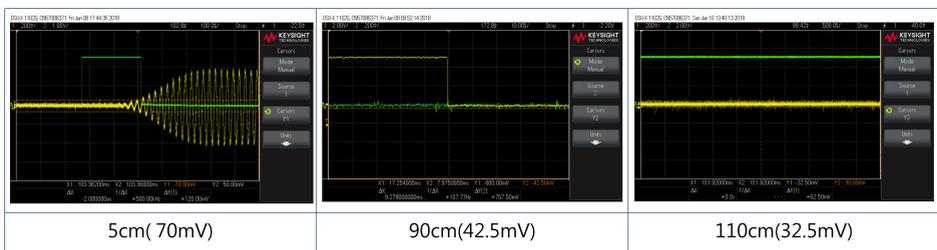
# 實驗結果與討論

## 【實驗一-3】探討超音波感測器的感測範圍

將 2x2x10 公分的塑膠物體在中線左右移動，紀錄遠可測的位置。



利用示波器記錄反射波波形來驗證，發現距離越遠反射波越弱，所以較遠時感測範圍會縮小。

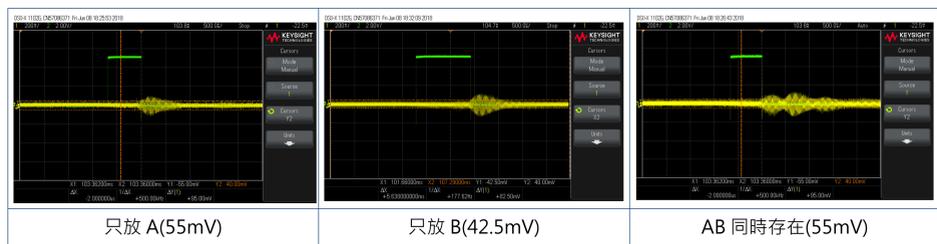


## 【實驗一-4】探討超音波感測器物體選擇特性

將兩個 2x2x10 的物體分別置於中線往兩側 10°的延長線上，10cm(A)和 12cm (B)處，記錄測量值。

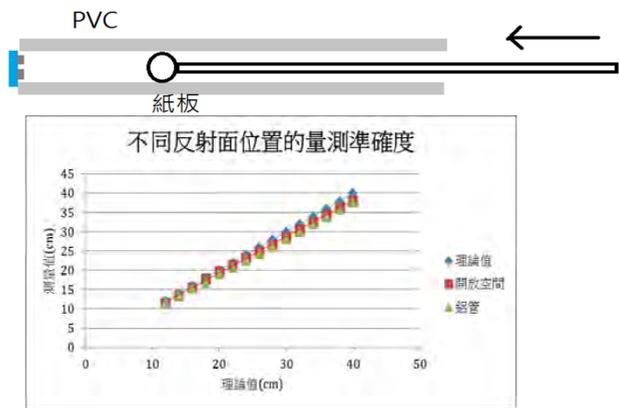
測量數據 cm			平均值 cm
1	2	3	
10.11	10.10	10.12	10.11

利用示波器分別量出只有 A、只有 B、和 AB 同時存在的反射波形，發現 AB 同時存在時反射波為 A 和 B 的疊加結果，但 A 的聲波就已經可以觸發感測器，所以讀取的結果為 A。



## 【實驗一-5】不同測量管子對感測器的影響

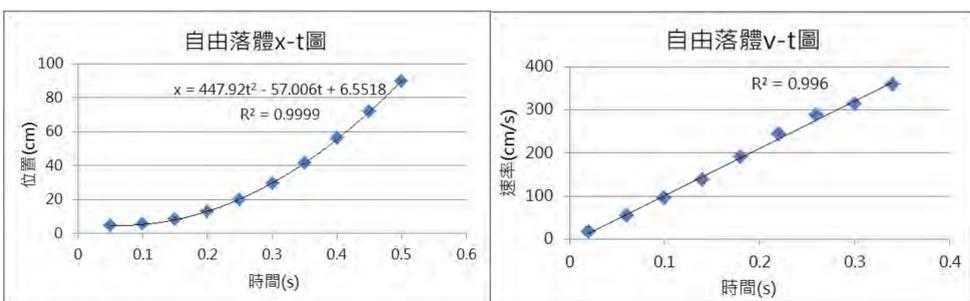
將圓形紙板放入不同管徑或不同材質的管中，記錄不同位置的測量值。



發現管子會些微影響超音波測距，開放空間測距偏差 3.6%，而鋁管偏差 5.6%。經由趨勢線公式修正降低實驗誤差，我們也用此方法修正接下來的實驗結果。

## 【實驗三-1】探討不同取樣速率對曲線關聯性

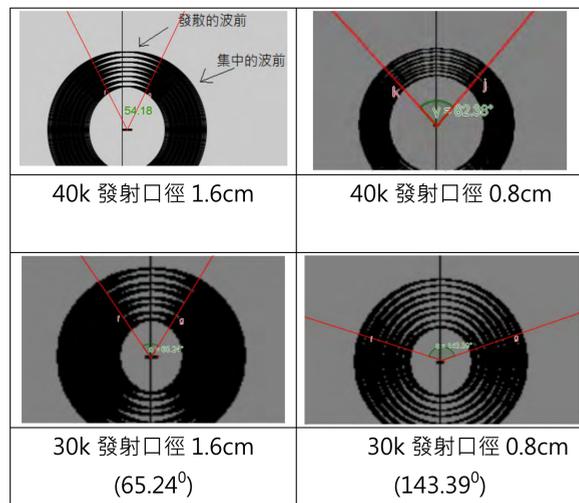
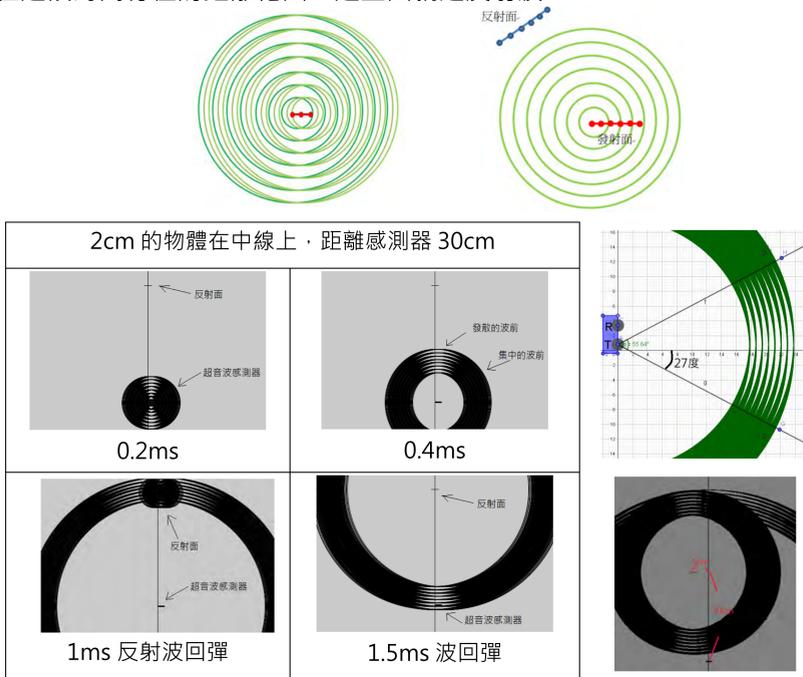
將 20 公克的罐子放入管中，記錄不同速率曲線的 R<sup>2</sup> 值及 x-t 曲線及 v-t 曲線。



取樣速率 (ms/次)	R <sup>2</sup> 值				
	1	2	3	4	5
50	0.9977	0.9918	0.9946	0.9904	0.9926
65	0.9986	0.9968	0.9954	0.9923	0.9891
80	0.9889	1	0.9741	0.9959	0.9997

## 【實驗二】Geogebra 及 Python 模擬超音波傳播

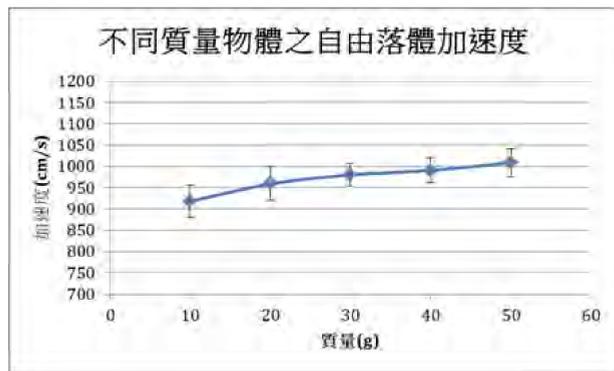
- 將發射平面上每一點都當點波源，畫出超音波感測器運作的 40kHz 其 8 個脈衝波的所有波前。
- 分別計算出發射面上每一點的波已經碰到反射面上每一點多少時間，以聲波在這段時間行徑的距離化圓，這些圓就是反射波。



## 【實驗三-2】不同質量物體自由落體加速度的影響

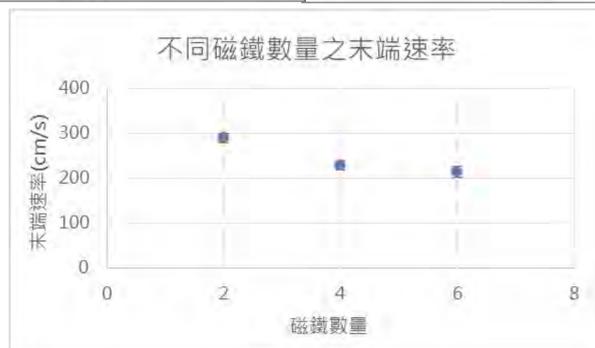
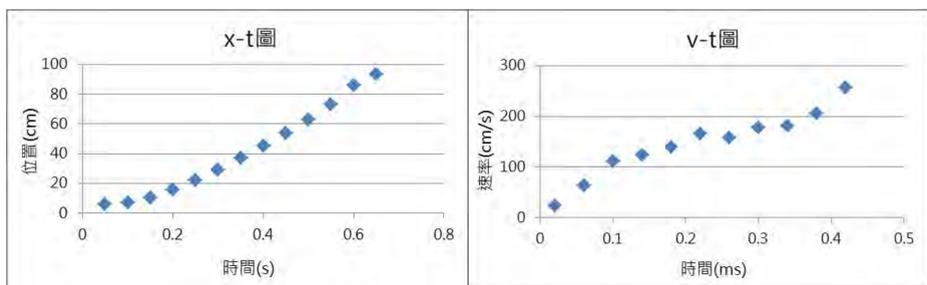
將不同質量的罐子放入管中，取樣速率 50ms，記錄不同質量時的加速度

質量	10g	20g	30g	40g	50g
加速度 cm/s <sup>2</sup>	918.05	959.17	980.26	990.71	1008.89



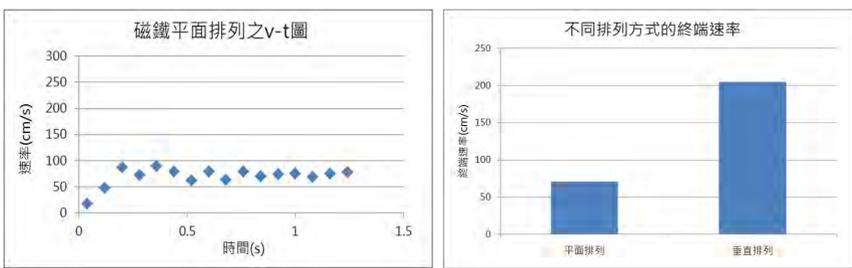
## 【實驗四-1】探討不同磁鐵數量的速度曲線

將裝有不同數量的罐子放入管中，取樣速率 50ms，記錄 x-t 曲線、v-t 曲線及 90 公分的速率。



## 【實驗四-2】不同磁鐵排列在管中的移動狀況

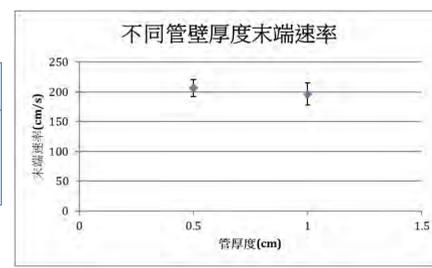
將磁鐵從上下垂直排列改成 4 顆磁鐵放在罐子底部的平面排列，紀錄 90 公分的速率及 v-t 曲線。



## 【實驗四-3】不同鋁管厚度在管中的移動狀況

比較磁鐵在鋁管厚度 0.5cm 和 1cm 的移動狀況，紀錄 80 公分的速率。

管壁厚度	0.5cm	1cm
末端速率 (cm/s)	206.60	196.44



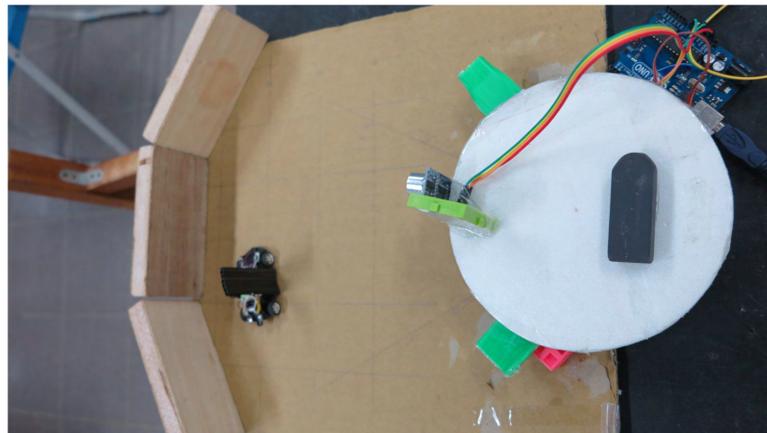
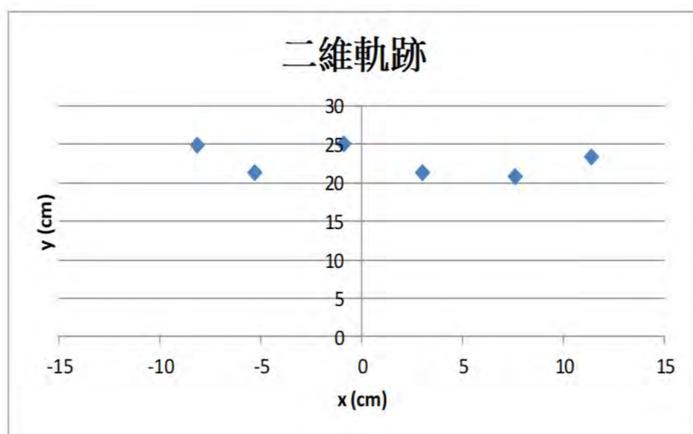
## 【實驗五】利用超音波感測器定位物體位置

轉盤式:

$r$ (cm)	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
$\theta$ (deg)	104	104	102	102	102	102	102	104	104	104
$x$ (cm)	-4.96	-4.96	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.96	-4.96	-4.96
$y$ (cm)	19.89	19.89	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05	19.89	19.89	19.89

雙感測器式:

$r_{左}$ (cm)	22.47	22.37	22.47	22.47	22.47	22.37	22.47	22.47	22.47	22.07
$r_{右}$ (cm)	23.21	23.32	23.32	23.21	23.32	23.32	23.32	22.8	23.32	22.81
$x$ (cm)	-3.55	-4.6	-4.1	-3.55	-4.1	-4.6	-4.1	-1.55	-4.1	-3.55
$y$ (cm)	22.27	22.08	22.24	22.27	22.24	22.08	22.24	22.29	22.24	21.86



## 實驗結論

關於超音波的感測特性:

- (1). 超音波感測器的感測範圍為左右各  $8.4^\circ$  扇形，最小可測面積為  $1 \times 1$  cm 紙片。
- (2). 反射面材質、面積和距離會影響超音波反射波大小。
- (3). 可被偵測的物體其反射面材質並不會影響量測準確度。
- (4). 當感測器前有多個物體，超音波會從多個聲波中記錄最快回到感測器的波，結果會顯示最短的。

超音波管中一維定位應用:

- (1). 超音波在管子測距會有 5% 誤差，修正後可在管中正常測距。
- (2). 將一物體自由落下， $x-t$  二次曲線的  $R^2$  值皆可達 0.9994， $v-t$  線性曲線  $R^2$  值達 0.98 以上。
- (3). 利用超音波做自由落體實驗，得到當質量會增大，加速度也會增大，且底面積越大加速度越小，都和  $a = g - \frac{f}{m}$  有關係。
- (4). 將超音波用來測量磁鐵在鋁管中的運動情形，發現 40~50cm 時加速度較小，且將磁鐵數增加或以平面排列---使磁鐵更靠近管壁皆可使加速度變化變明顯。

關於二維定位的超音波設計:

- (1). 轉盤式二維定位儀可以在一個半徑為 50cm 的範圍運作，其誤差小於 1.1cm，但取樣速率慢。
- (2). 雙感測器式二維定位儀，使用圓交疊的方法，其誤差比前者大，但取樣速率快。

關於自製 Python 模擬軟體:

- (1). 將平面上每一點都當點波源，可以模擬聲波瞬時的位置。
- (2). 利用計算出聲波碰到反射面多少時間可模擬反射波。
- (3). 改變聲波頻率與發射面大小皆會影響指向角，改變反射面位置可算出感測夾角

## 未來展望

1. 將二維定位應用拓展到三維定位，記錄飛行生物的移動軌跡及習性
2. 製作二維環景偵測器，可掃描四周環境，應用在火災地震時尋找逃生路徑的工具
3. 發展不插電的電梯緩降設

## 參考文獻

1. 趙英傑(2016年8月) `Arduino 互動設計入門(2版)` 台北市:旗標
2. 休伊特(2008年11月6日) `觀念物理` 台北市:天下
3. Y. Daniel Liang(2016年6月) `python 程式設計入門指南` 台北市:基鋒