

# 第九屆旺宏科學獎

## 成果報告書

參賽編號：SA9-089

作品名稱：彈無虛發—聽音辨位的研究及其應用

姓名：吳彥儀

關鍵字：音源定位、壓電式蜂鳴片、彈著點

## 壹、研究題目：

### 彈無虛發 — 聽音辨位的研究及其應用

## 貳、研究動機與目的：

相信很多人都有在夜市或軍訓課時以 BB 槍打靶過，扣發板機的感覺非常地新鮮與刺激，可是射擊結束看靶時，竟然發現靶紙上一個彈孔都沒有，會惹來一陣親友的嘻笑，心情失落的感覺頓時也油然而生。若是能夠將每次射擊的彈著點，即時地通知射擊者，不就可以作適當的修正射擊要領，以提高命中靶位之準確度了嗎？

電影「十面埋伏」中聽音辨位擊鼓的神技令人嘆為觀止，經由老師的解說後，了解到聽音辨位主要是大腦利用聲音傳遞到兩個耳朵的時間差來估測音源的方位。一對耳朵可以判定音源的方向，那兩對耳朵的音源方向交點，不就是音源位置了嗎？如果這樣的機制能夠運用在靶位感知上，彈著點的即時顯示就不成問題了。打算藉此研究，以四個聲波感測器代替兩對耳朵，以電腦代替大腦，發展出依據音源傳遞到聲音感測器的時間差，來估算音源位置的即時彈著點顯示系統。

## 參、器材及軟體：

- 一、個人電腦、筆記型電腦、無線基地台。
- 二、GoldWave 5.06、Visual Basic 6。
- 三、音叉、訊號產生器。
- 四、高感度麥克風、耳機、微型喇叭、小型蜂鳴器、廉價麥克風、壓電式蜂鳴片、震動感測器。
- 五、3.5mm Jack 音效插頭、鱷魚夾。
- 六、2mm 鉛板、3mm 鋁板、密集板、木心板。

## 肆、研究步驟與方法：

### 一、聽音辨位原理的剖析

聽音辨位主要是利用音源傳遞到兩個耳朵的時間差來估測音源的方位，時間差乘上音速後，可視為利用音源到兩耳的距離差來估測，以數學的觀點來看，音源可能的位置會形成一個雙曲面（圖 1-1），雙曲面能夠含括的方位真的是很廣泛，甚至連四面八方都還不足以形容，所以必須搖搖頭改變耳朵的位置，利用多個雙曲面的交點，才可以正確地判斷音源的方位。

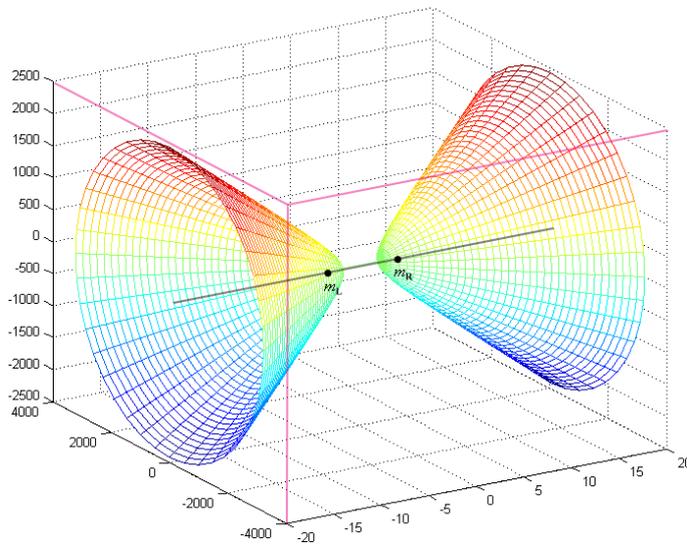


圖 1-1 到雙耳等距的可能音源位置會形成雙曲面

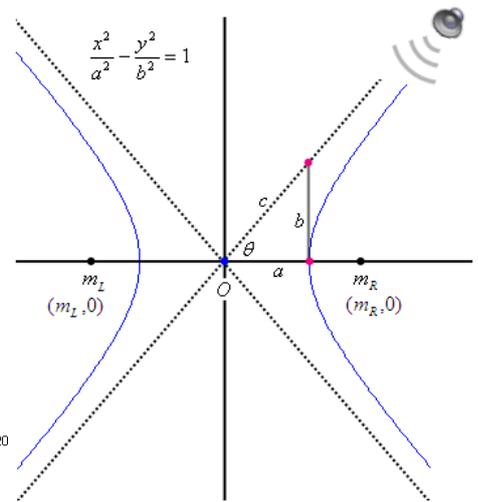


圖 1-2 雙曲線及音源方位示意圖

若是音源與耳朵在同一平面，則音源的可能位置可簡化為如圖 1-2 所示的雙曲線，其式如下：

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{c^2 - a^2} = 1$$

其中  $a$  為雙曲線上任一點至兩個焦點（耳朵）的距離差之半，其值為  $1/2$  乘上音速  $v$  再乘上  $\Delta t$ ， $\Delta t$  為左耳聽到聲音的時間  $t_L$  減去右耳聽到聲音的時間  $t_R$ ，當  $\Delta t > 0$  時，表示右耳先聽到聲音，當  $\Delta t < 0$  時，表示左耳先聽到聲音，若  $\Delta t = 0$ ，則表示兩耳同時聽到聲音， $c$  為兩個焦點（耳朵）的距離之半，其值為  $|m_L - m_R|/2$ 。當音源與耳朵的距離不是很近的話，可將雙曲線的漸近線作為音源的方位，其角度的推導方式如下：

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{2a}{2c}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{v \cdot (t_L - t_R)}{|m_L - m_R|}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{v \cdot \Delta t}{|m_L - m_R|}\right) \quad [\text{式 1}]$$

當  $\Delta t > 0$  時， $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ；當  $\Delta t < 0$  時， $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ；若  $\Delta t = 0$ ， $\theta = 90^\circ$ 。至於音源可能的位置  $(x, y)$  所形成的雙曲線為

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{c^2 - a^2} = \frac{x^2}{(1/2 \times v \times \Delta t)^2} - \frac{y^2}{(|m_L - m_R|/2)^2 - (1/2 \times v \times \Delta t)^2} = 1 \quad [\text{式 2}]$$

當  $\Delta t > 0$  時，音源位置在  $x > 0$  的曲線上；當  $\Delta t < 0$  時，音源位置在  $x < 0$  的曲線上；若  $\Delta t = 0$ ，則音源位置在  $y$  軸上。

## 二、確認聽音辨位的可行性

在實作即時彈著點顯示系統之前，必需先確認聽音辨位的可行性與正確性，先以一對麥克風及音效卡，計算出音源在空氣中傳播到左右聲道的時間差，並找到音源的方位角。若是可以很精確的計算出音源的方位角，應該可以將其推展應用到靶位彈著點的定位問題上。

由音源的方位角公式 [式 1] 看來，只要能夠知道兩個麥克風接收到聲音的時間差，

就可以確認音源的方位，因為兩個麥克風的距離 $|m_L - m_R|$ 以及音速 $v$ 是已知的。那麼，兩支麥克風及音效卡真能記錄到時間差嗎？還有，所記錄的時間差精確嗎？這兩點必需先獲得驗證，聽音辨位的可行性方可確認。

### (1) 音效卡取樣頻率的精確度

麥克風可將聲音轉換為音訊而進入音效卡，音效卡則以很快的取樣頻率紀錄著，其取樣頻率的精確度，在當作計時用途時會有很大的影響。為驗證其取樣頻率的精確度，分別利用訊號產生器及音叉來檢驗，音效卡端輸入的訊號以 Goldwave 軟體來記錄。目前市面上的音效卡常用的取樣頻率為 192,000Hz、96,000Hz、44,100Hz、22,050Hz、11,025Hz 等，由於本研究是用來測量速率極快的音速，故統一使用最快的取樣頻率 192,000Hz，GoldWave 軟體完成紀錄後，再以人工的方式計算出訊號頻率。經過測試，平均誤差為 0.107%，代表音效卡在取樣頻率為 192,000Hz 時，非常地精準。



圖 2-1 訊號產生器輸出訊號至音效卡

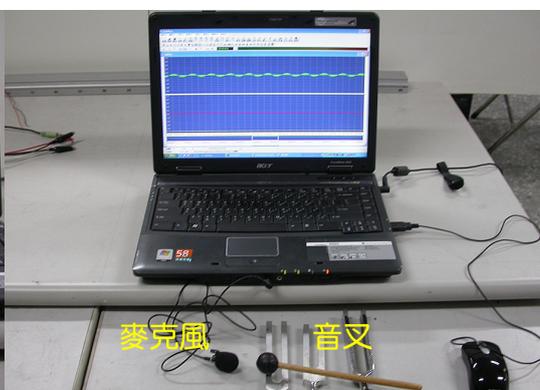


圖 2-2 音叉透過麥克風將訊號輸入音效卡

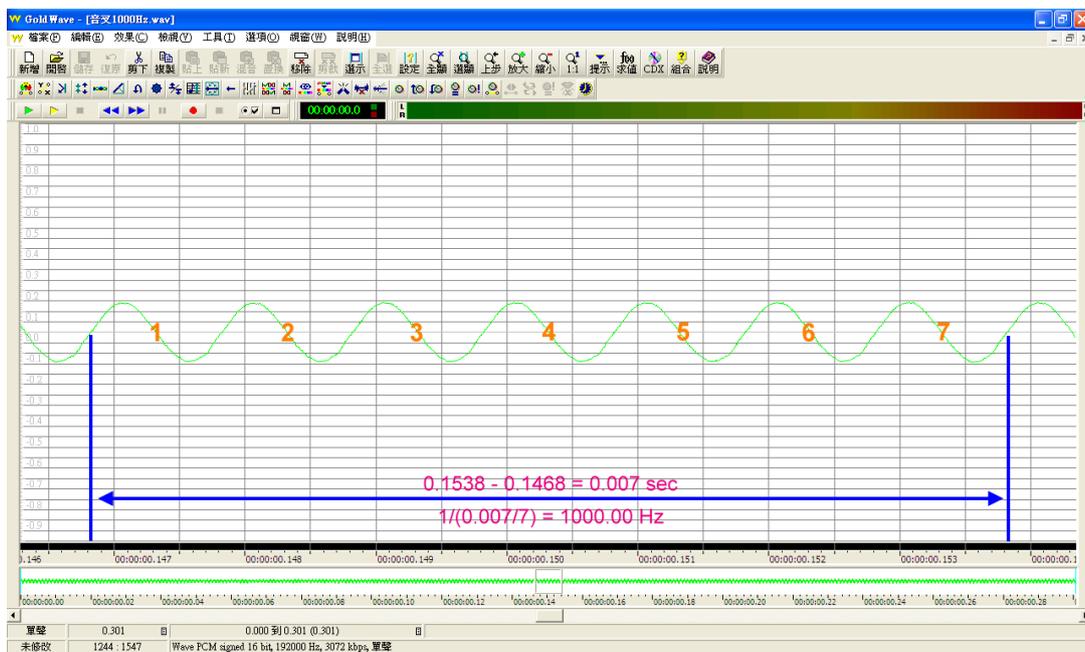


圖 2-3 利用 GoldWave 軟體計算訊號的頻率

標準頻率	音效卡紀錄值	誤差百分比	標準頻率	音效卡紀錄值	誤差百分比
訊號產生器 760Hz	758.21Hz	0.235%	音叉 350Hz	349.34Hz	0.187%
訊號產生器 5517Hz	5517.24Hz	0.004%	音叉 512Hz	512.82Hz	0.160%
訊號產生器 66080Hz	66115.70Hz	0.054%	音叉 1000Hz	1000.00Hz	0.000%

取樣頻率 192,000Hz 時音效卡所記錄的各種訊號之頻率

## (2) 由時間差推算音源的位置與方位角

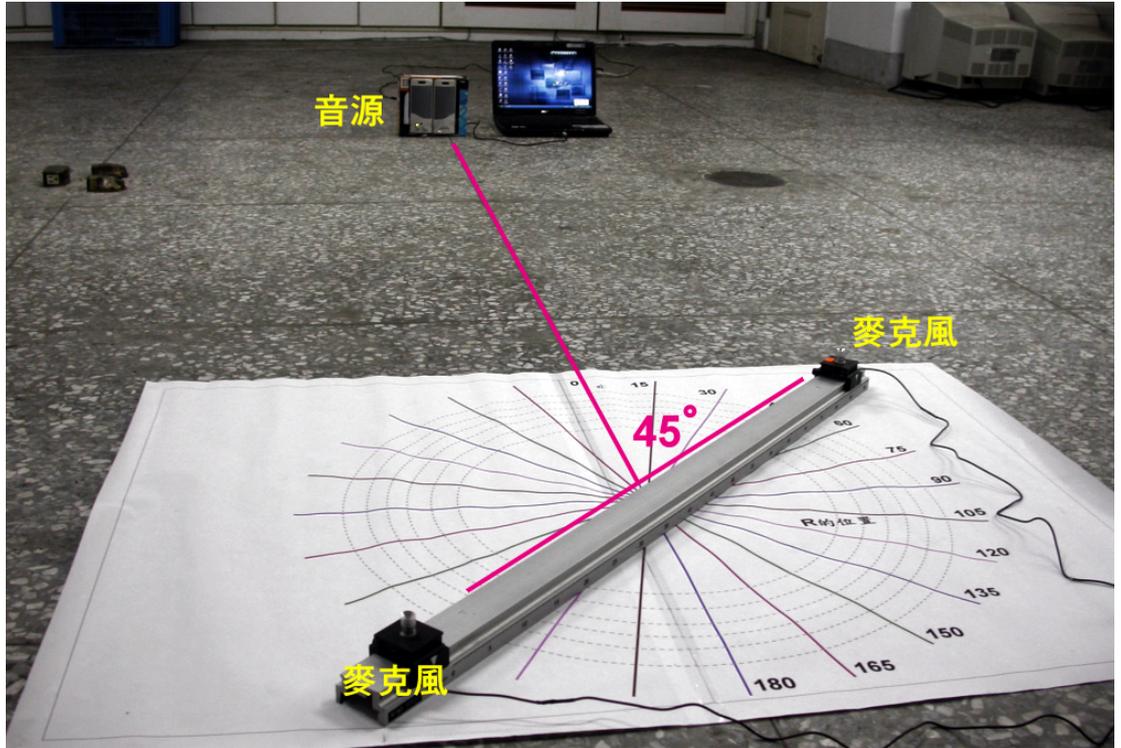


圖 3 音源方位角估算之裝置示意圖

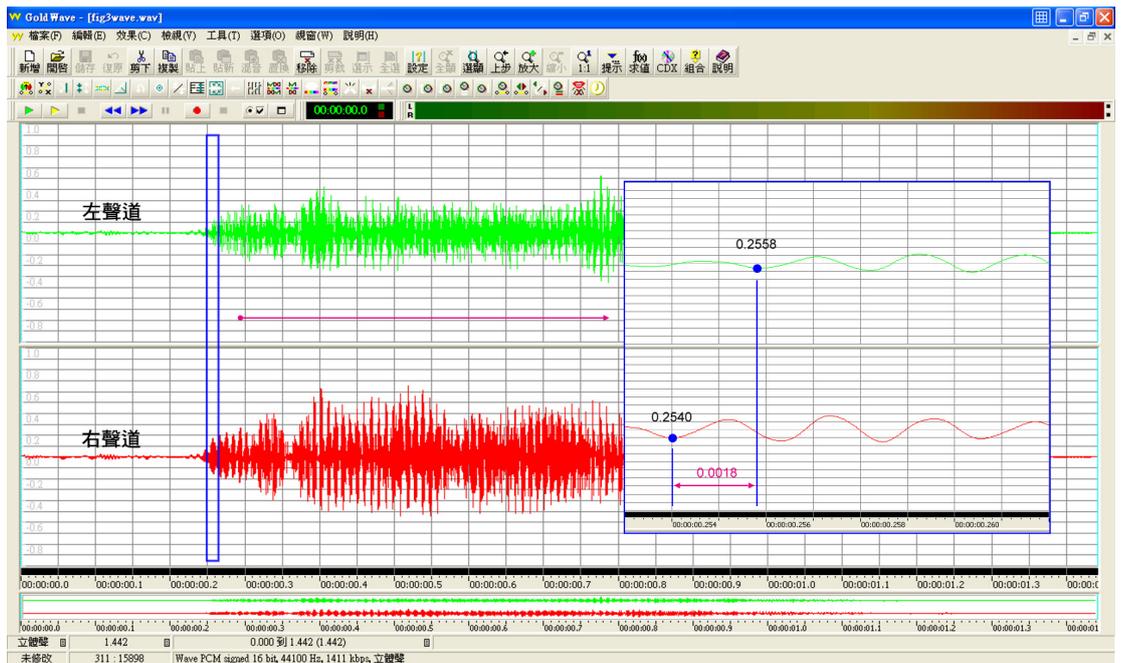


圖 4 GoldWave 軟體錄製到的左右聲道波形及時間差計算

如圖 3 所示般，將音源置 45° 角方向，啟動錄音軟體 GoldWave，喇叭發出聲音後停止錄音，圖 4 是以 GoldWave 軟體來顯示錄製到的左右聲道聲音波形，時間差為  $0.2588 - 0.2540 = 0.0018$  秒，嘗試著計算音源方位角，兩支麥克風的距離為  $0.9m$ ，氣溫  $27^{\circ}C$  時，音速約為  $347.2 m/sec$ ，代入 [式 1]，

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{v \cdot \Delta t}{|m_L - m_R|}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{347.2 \times 0.0018}{0.9}\right) = 46.02^{\circ}$$

還蠻精確的，看來聽音辨位確實可行呢。至於音源的位置則在雙曲線

$$\frac{x^2}{(1/2 \times 347.2 \times 0.0018)^2} - \frac{y^2}{(0.9/2)^2 - (1/2 \times 347.2 \times 0.0018)^2} = 1$$

$$\Rightarrow \frac{x^2}{0.31248^2} - \frac{y^2}{0.45^2 - 0.31248^2} = 1$$

右邊的曲線上（因為  $\Delta t > 0$ ）。

### 三、彈著點即時顯示系統的構想

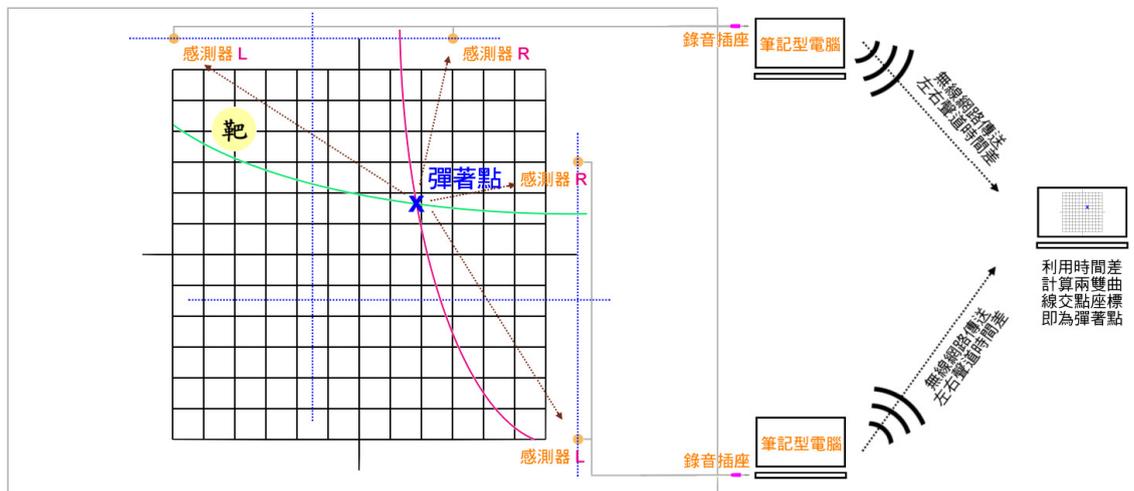


圖 5 彈著點即時顯示系統的構想

彈著點即時顯示系統的構想如圖 5 所示，在靶的上方與右邊各安置一對聲波感測器，並將接線分別連結至音效卡的 Mic In 錄音插座，當 BB 彈擊中靶之後，聲波會向四周傳播，當第 1 對與第 2 對感測器接收到聲波後，分別計算出左右聲道接收到聲波的時間差，完成後，透過無線網路傳送給射擊者旁負責顯示彈著點的電腦，該電腦利用接收到的時間差資料，立即利用 [式 2] 計算彈著點可能位置的兩雙曲線的交點座標，再利用圖形介面將彈著點顯示在螢幕上，供射擊者作適當的修正以提高命中靶位之準確度。

要達成上述的構想，需要解決下列的問題：靶的材質選取、聲波感測器的選取、靶中聲波傳播速率的測量、左右聲道接收到聲波的時間差判定、彈著點的計算與顯示。嗯！還真有不少問題有待解決呢。

### 四、靶的材質

製作靶的材料必需有穩定的聲波傳播速率，才可以利用左右聲道接收聲波的時間差來求得雙曲線之  $a$  值（雙曲線上任一點至兩個焦點的距離差之半），另外聲波的傳播

速率也不能太快，因為在同樣的距離時，傳播速率快時間就短，音效卡的取樣點數也較少，這樣會影響彈著點計算時的精確度。參考資料[5][6][7][8]提供了不少材料的平均聲波傳播速率與標準差之實驗數據，測試了鉛板、鋁板、木心板與密集板後，選擇密集板當做靶的材質，因為聲波在密集板中的傳播速率比金屬慢而且也比木心板穩定，適合於利用音效卡來判定左右聲道的時間差。

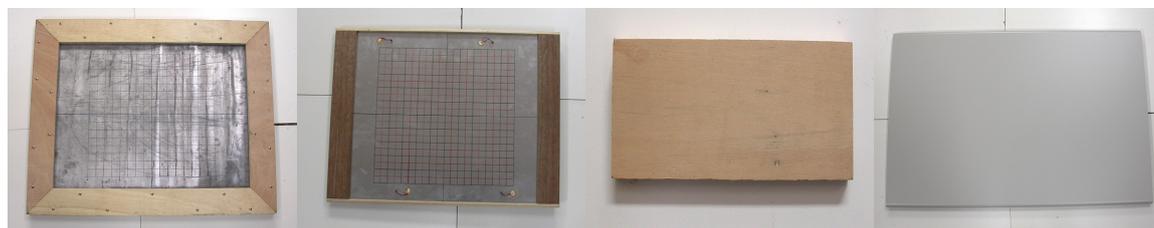


圖 6-1 鉛板

圖 6-2 鋁板

圖 6-3 木心板

圖 6-4 密集板

## 五、聲波感測器的選取



圖 7 感測器聲波記錄測試裝置

想要記錄聲波，首先想到的當然是麥克風，不過經測試後，發現麥克風太過靈敏，而且容易受到外界聲音及雜訊的影響，在 GoldWave 軟體所記錄的音訊檔中也不易判別左右聲道的時間差，所以得尋找一種不太靈敏，可以忽略外界雜訊，僅感應到靶被擊中時聲波的麥克風最好，可是真有人製造這樣的麥克風嗎？

求助於老師後得知，喇叭與麥克風的機構造與原理幾乎類似，只是動作是相反，若把喇叭當做麥克風用，可能就是一種符合需求的麥克風。真是如獲至寶，利用圖 7 的裝置，分別測試了高感度麥克風、廉價麥克風、微型喇叭、小型蜂鳴器、壓電式蜂鳴片、耳機、震動感測器 102、震動感測器 801 等，不出所料，這些元件也都能感測得到密集板中的聲波，記錄到的波形分別如下圖所示，其中以壓電式蜂鳴片的效果最佳，不易受外界聲音及雜訊的影響，對於密集板中的聲波則接收良好、反應靈敏，而且價格便宜，所以本研究就決定採用壓電式蜂鳴片當做聲波感測器。

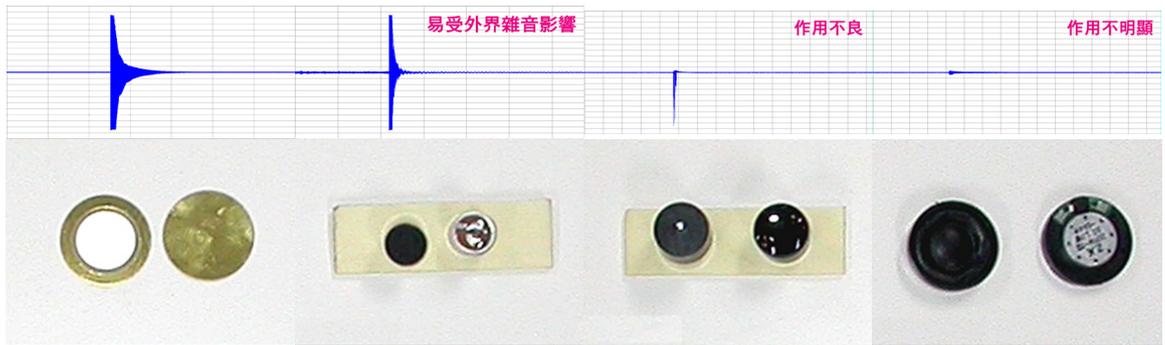


圖 8-1 壓電式蜂鳴片

圖 8-2 廉價麥克風

圖 8-3 小型蜂鳴器

圖 8-4 微型喇叭

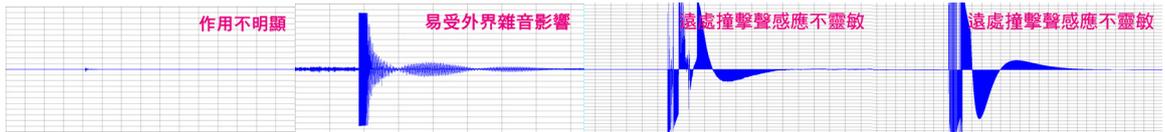


圖 8-5 耳機

圖 8-6 高感度麥克風

圖 8-7 震動感測器 102

圖 8-8 震動感測器 801

## 六、靶中聲波傳播速率的測量

以密集板製作的靶，其中心點為原點(0,0)，1cm 為 1 個單位長，在(-24,28)與(12,28)處放置第 1 對聲波感測器，在(28,12)與(28,-24)處放置第 2 對聲波感測器，然後分別接上電腦音效卡的 Mic In 錄音插座。另外，先不繪上靶的圖形，而在靶位區域以 4cm 為一個間隔，繪製了邊長 48cm×48cm 的網狀方格，以方便測試與計算。

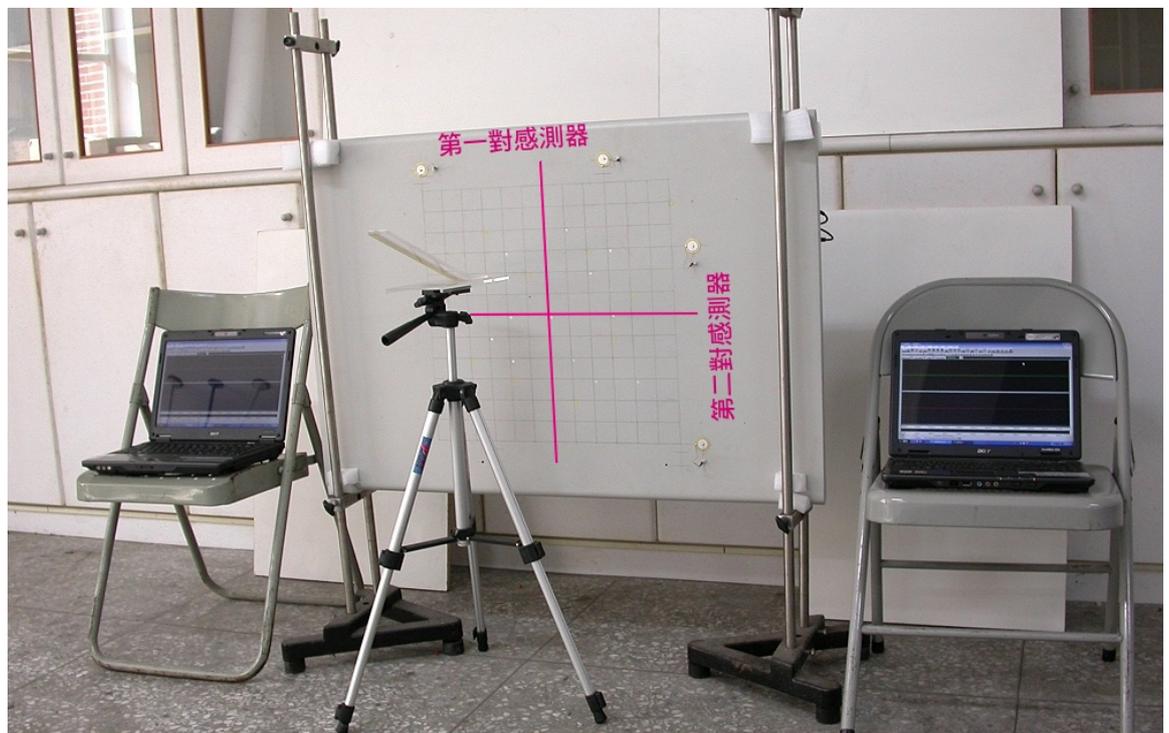


圖 9 靶中聲波傳播速率的測量裝置圖

## (1) 測量步驟

- 針對兩對聲波感測器，分別各在靶上隨機選取 5 個撞擊點，共 10 個撞擊點，記錄下座標，並以小圓貼紙標示。
- 開啓聲波感測器所連接電腦中的 GoldWave 軟體，以 192,000Hz 的取樣頻率開始錄音，使用 BB 彈循著軌道撞擊靶上的每個撞擊點 3 次，每次撞擊需間隔 3 秒以上，完成後，將記錄的音訊檔存檔。
- 利用 GoldWave 軟體，分別計算出聲波感測器所接收的撞擊聲波中左右聲道的平均時間差  $|\Delta t|$ 。
- 計算出靶中聲波的傳播速率  $v = \Delta d / |\Delta t|$ ， $\Delta d$  為撞擊點到兩個聲波感測器間的距離差。

## (2) 遭遇的困難

當使用 GoldWave 軟體打開所記錄的音訊檔，想找出撞擊聲波中左右聲道的時間差時，遭遇到了一些困難或是不方便的地方，第一，由於音訊檔的資料量非常的龐大，尤其當時間軸顯示到  $10^{-5}$  秒的時後，要在其中尋找撞擊聲波真如大海撈針般，需要不斷的縮小放大波形與拉動捲軸才能找到適當的位置；第二，聲波中混雜著外界的雜訊，使得在判定撞擊聲波的起始點上非常得困難；第三，因為 BB 彈每次擊中靶時的力道大小及彈著點距離感測器遠近的差異，所產生的聲波振幅並不一致，這樣也會影響撞擊聲波起始點上的判斷。

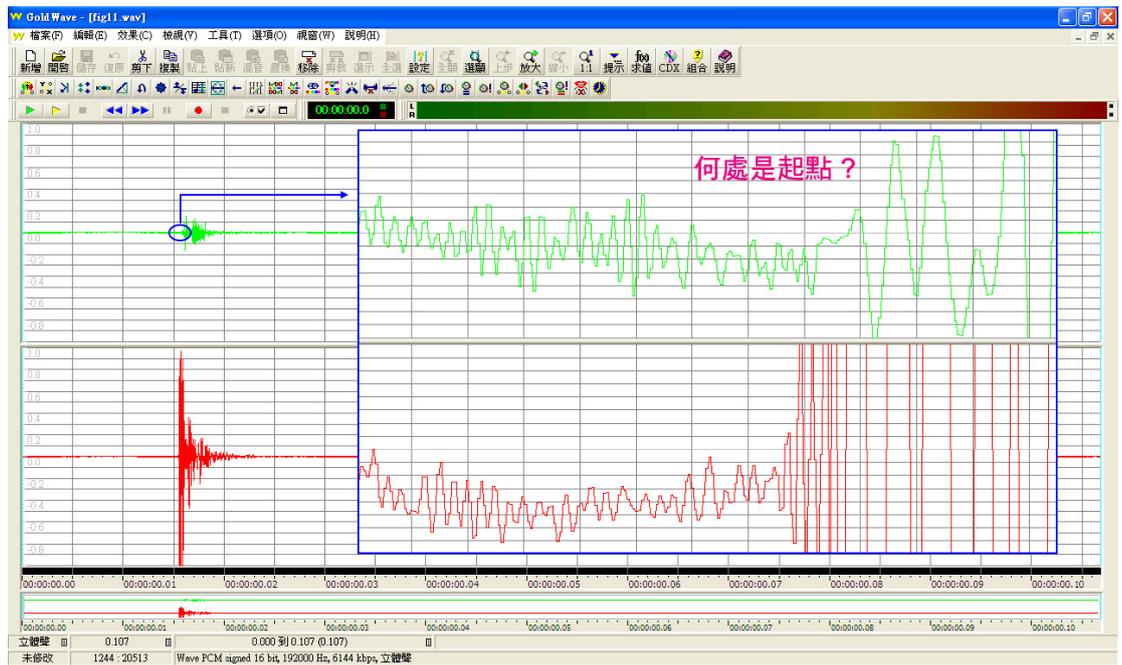


圖 10 雜訊造成撞擊聲波起始點判斷上的困難

## (3) 困難的排除

### • 取出音訊資料中 BB 彈的撞擊聲波部分

要計算左右聲道接收到 BB 彈撞擊聲波的時間差，只要將音訊檔中屬於撞擊聲波的部分萃取出來分析就好，以人工做這件事情並不困難，但會是件枯燥的工作，若能夠撰寫程式來幫忙處理，那真是太好了。依據參考資料[1][2]，

可以採用能量法來取出音訊資料中的聲音部分，先繪出聲音訊號的能量曲線，只要音量高於某個門檻值（本研究所使用的門檻值為音量最大值的0.5%），才認定是 BB 彈撞擊靶時所發出聲音，將其萃取出來，稱之為分析用音框，其他部分就屬於靜音或是雜訊。圖 11 是使用 Visual Basic 6 實作的程式執行畫面，確實能夠由音訊資料中取出 BB 彈的撞擊聲波部分。

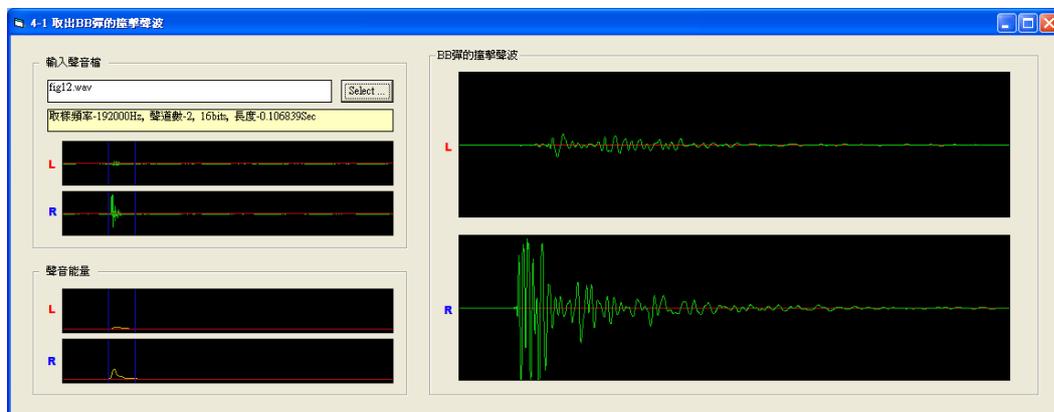


圖 11 利用能量法取出音訊資料中 BB 彈的撞擊聲部分

### · 聲波的正規化

BB 彈每次擊中靶時的力道大小、彈著點距離感測器的遠近及兩片壓電式蜂鳴片的特性不盡相同，所產生的聲波振幅並不一致，這樣會影響著撞擊聲波起始點上的判斷，所以在尋找撞擊聲波的起始點前，必需先將左右聲道的聲波做正規化的調整，調整的方法如下

$$Sound'(i) = \frac{\text{音量最大值}}{\text{音訊中最大值}} \times Sound(i)$$

音量最大值是音效卡在錄音時所能記錄的最大值（每個取樣點為 2Bytes 時，為  $2^{15} = 32768$ ；取樣點為 1Byte 時，為  $2^7 = 128$ ），音訊中最大值則是指音訊資料中的最大振幅值。圖 12 是將分析用音框波形正規化的程式執行畫面。

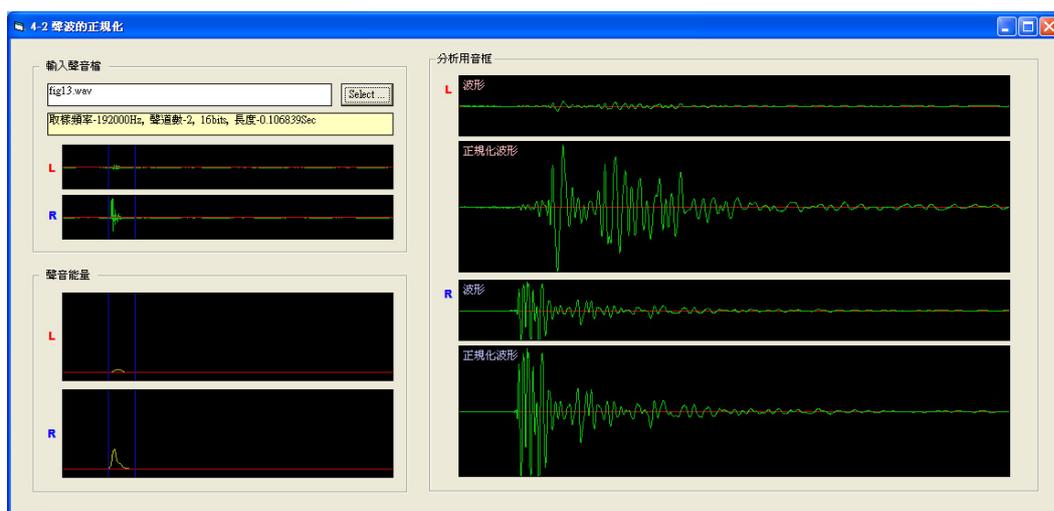


圖 12 分析用音框的波形正規化

### · 尋找撞擊聲波的起始點

有了分析用音框，感覺上應該很容易就找到撞擊聲波的起始時間，進而計算

出左右聲道的時間差，但實際上並沒有那麼簡單，主要的原因是來自外界的雜訊，會干擾撞擊聲波起始時間的判讀，非常需要一種固定標準的方法，可以明確地找到撞擊聲波的起始點，最直觀的方法就是設定某個門檻值，當聲波的振幅達到這個門檻，就是撞擊聲波的起始點。

為了訂定最佳的撞擊聲波起始點門檻，撰寫了程式，分別以音量最大值的 2.5%、5%、10%、15%、20%、25%與 30%當做門檻來尋找撞擊聲波的起始點，並計算出左右聲道的時間差及聲波的平均傳播速率，相關實驗數據詳如下表，由表格中可以看出，當門檻為音量最大值的 25%時，靶中的聲波平均傳播速率有最小的標準差，意味著以其作為門檻在撞擊聲波起始點的判別上最為穩定。

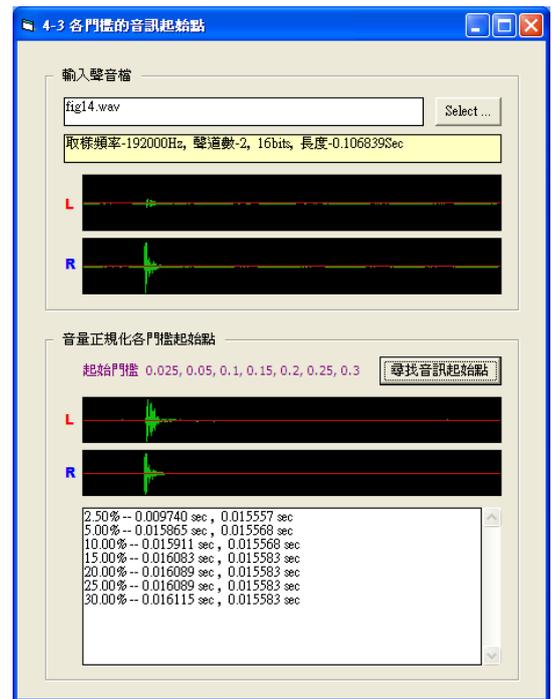


圖 13 尋找各種門檻的音訊起始點

撞擊點編號 \ 振幅門檻	2.5%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
1	5476.66	1104.99	972.09	663.29	660.67	656.34	626.39
2	2103.14	553.73	553.73	587.05	590.83	587.05	590.83
3	1107.29	646.66	704.93	651.00	603.97	611.59	603.97
4	682.75	618.10	575.19	604.23	613.70	604.23	587.74
5	599.67	710.08	759.51	665.70	640.90	604.53	595.67
6	847.26	717.59	683.39	685.80	663.85	661.60	659.37
7	694.86	641.09	612.82	631.69	631.69	631.69	631.69
8	1865.35	816.48	733.72	732.62	693.84	625.80	598.02
9	1189.76	710.08	773.96	692.49	693.57	605.35	605.35
10	1543.72	855.38	579.63	571.68	575.99	604.06	647.58
整體平均速率 (m/s)	1611.05	737.42	694.90	648.55	636.90	619.22	614.66
標準差	1452.70	157.29	126.18	50.38	41.15	24.33	25.04
標準差百分比	90.17%	21.33%	18.16%	7.77%	6.46%	3.93%	4.07%

#### (4) 測量結果

解決了困難，並有程式的幫忙，以音量最大值的 25%作為門檻，測得密集板中的聲波傳播速率平均為 619.22 m/s，相關的數據詳列於下列表格。

撞擊點編號	撞擊點座標	第 1 對感測器 $\Delta d$ (cm)	平均時間差 $ \Delta t $ (sec)	聲波傳播速率 (m/sec)
1	( 20 , 20 )	33.41	0.000509	656.34
2	( 16 , -16 )	15.28	0.000206	587.05
3	( 12 , -4 )	16.17	0.000264	611.59
4	( -16 , 12 )	14.36	0.000238	604.23
5	( -24 , -8 )	14.91	0.000247	604.53

撞擊點編號	撞擊點座標	第 2 對感測器 $\Delta d$ (cm)	平均時間差 $ \Delta t $ (sec)	聲波傳播速率 (m/sec)
6	(16, 24)	32.51	0.000491	661.60
7	(12, -16)	14.36	0.000227	631.69
8	(-4, 12)	16.17	0.000258	625.80
9	(-8, -24)	14.91	0.000246	605.35
10	(-16, 16)	15.28	0.000253	604.06

## 七、彈著點的計算與顯示

### (1) 彈著點的計算

當 BB 彈擊中靶之後，假設彈著點座標為  $(x, y)$ ，聲波會向四周傳播，當第 1 對與第 2 對聲波感測器接收到聲波後，分別計算出左右聲道時間差  $\Delta t_1$  與  $\Delta t_2$ ，並透過無線網路傳送給射擊者旁負責顯示彈著點的電腦，該電腦接收到時間差資料，便立即利用下列聯立方程式計算彈著點座標，完成後，可利用圖形介面顯示在螢幕上，供射擊者作適當的修正以提高命中靶位之準確度。

$\Delta t_1 \neq 0$ ， $\Delta t_2 \neq 0$  時

$$\begin{cases} \frac{(x+6)^2}{(1/2 \times v \times \Delta t_1)^2} - \frac{(y-28)^2}{(|-24-12|/2)^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_1)^2} = 1 \\ \frac{(y+6)^2}{(1/2 \times v \times \Delta t_2)^2} - \frac{(x-28)^2}{(|-24-12|/2)^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_2)^2} = 1 \end{cases} \quad \text{[式 3]}$$

$\Delta t_1 = 0$ ， $\Delta t_2 \neq 0$  時

$$\begin{cases} x = -6 \\ \frac{(y+6)^2}{(1/2 \times v \times \Delta t_2)^2} - \frac{(x-28)^2}{(|-24-12|/2)^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_2)^2} = 1 \end{cases}$$

$\Delta t_1 \neq 0$ ， $\Delta t_2 = 0$  時

$$\begin{cases} \frac{(x+6)^2}{(1/2 \times v \times \Delta t_1)^2} - \frac{(y-28)^2}{(|-24-12|/2)^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_1)^2} = 1 \\ y = -6 \end{cases}$$

$\Delta t_1 = 0$ ， $\Delta t_2 = 0$  時

$$\begin{cases} x = 6 \\ y = -6 \end{cases}$$

### (2) 彈著點的顯示

利用電腦程式來解 [式 3] 的聯立方程式並非件容易的事，幸好電腦的運算能力驚人，可利用窮舉法來描繪出方程式的圖形（彈著點可能位置的軌跡），再找出兩道軌跡中有最短距離的點就是彈著點了。仔細分析左右聲道時間差（ $\Delta t_1$  及  $\Delta t_2$ ）與靶上彈著點位置的關係，如圖 14 所示，靶可用  $x = -6$  與  $y = -6$  兩條直線分為四個區塊，當  $\Delta t_1 > 0$  且  $\Delta t_2 > 0$  時，彈著點位於第 1 個區塊（Part I）； $\Delta t_1 < 0$  且  $\Delta t_2 > 0$  時，彈著點位於第 2 個區塊（Part II）； $\Delta t_1 < 0$  且  $\Delta t_2 < 0$  時，彈著點位

於第 3 個區塊 (Part III);  $\Delta t_1 > 0$  且  $\Delta t_2 < 0$  時, 彈著點位於第 4 個區塊 (Part IV)。若是  $\Delta t_1 = 0$  時, 彈著點則位於直線  $x = 6$  上;  $\Delta t_2 = 0$  時, 彈著點位於直線  $y = -6$  上。

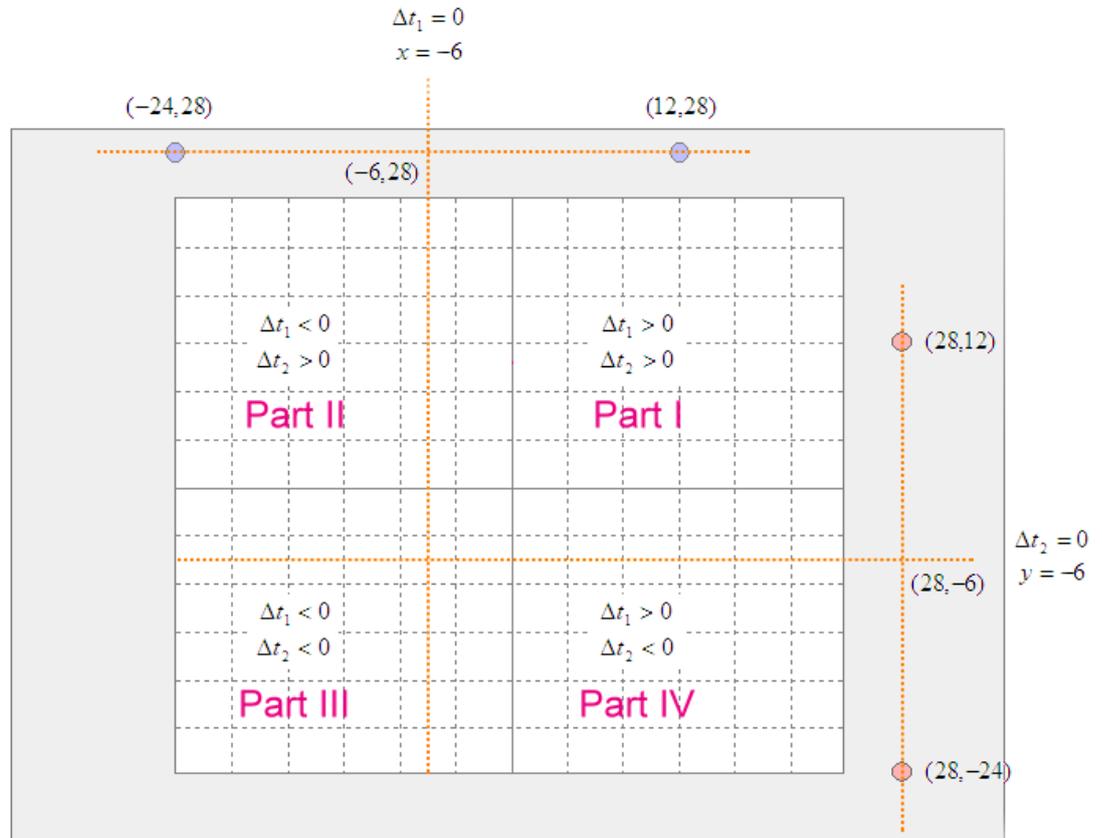


圖 14 依據  $\Delta t_1$  及  $\Delta t_2$  可用兩條直線將靶分為四個區塊

有了上述的分析, 可將 [式 3] 改寫成適合於電腦程式計算的方式, 首先, 針對第 1 對感測器來計算彈著點可能位置的軌跡, 利用窮舉法將  $y$  值設定於  $[-24, 24]$  區間, 間格為 0.1 單位, 共有 481 個點, 再利用  $\Delta t_1$  來判別該用下列何種方法來計算其  $x$  值。

$\Delta t_1 > 0$  時

$$x = -6 + \sqrt{\frac{(1/2 \times v \times \Delta t_1)^2 \times [(y - 28)^2 + 18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_1)^2]}{18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_1)^2}}$$

$\Delta t_1 = 0$  時

$$x = -6$$

$\Delta t_1 < 0$  時

$$x = -6 - \sqrt{\frac{(1/2 \times v \times \Delta t_1)^2 \times [(y - 28)^2 + 18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_1)^2]}{18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_1)^2}}$$

同樣的方法可以計算第 2 對感測器可能彈著點位置的軌跡, 由於其軌跡與雙曲線標準式互相垂直, 所以利用窮舉法將  $x'$  值設定於  $[-24, 24]$  區間, 間格為 0.1 單位, 共有 481 個點, 再利用  $\Delta t_2$  來判別該用下列何種方法來計算其  $y'$  值。

$\Delta t_2 > 0$  時

$$y' = -6 + \sqrt{\frac{(1/2 \times v \times \Delta t_2)^2 \times [(x-28)^2 + 18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_2)^2]}{18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_2)^2}}$$

$\Delta t_2 = 0$  時

$$y' = -6$$

$\Delta t_2 < 0$  時

$$y' = -6 - \sqrt{\frac{(1/2 \times v \times \Delta t_2)^2 \times [(x-28)^2 + 18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_2)^2]}{18^2 - (1/2 \times v \times \Delta t_2)^2}}$$

## 伍、研究結果：

### 一、彈著點即時顯示系統的實作

彈著點即時顯示系統是採用 Client / Server 的架構來設計 (圖 15 所示), Client 端負責不斷接收感測器所傳送過來的訊號, 同時也快速地檢視這些訊號是否有 BB 彈的撞擊聲在內, 若有則計算出左右聲道撞擊聲的時間差, 並透過網路傳送至 Server 端, 當 Server 端接收到兩個 Client 端傳送過來的時間差資料後, 即開始計算彈著點可能位置的軌跡, 並將彈著點顯示於螢幕上。

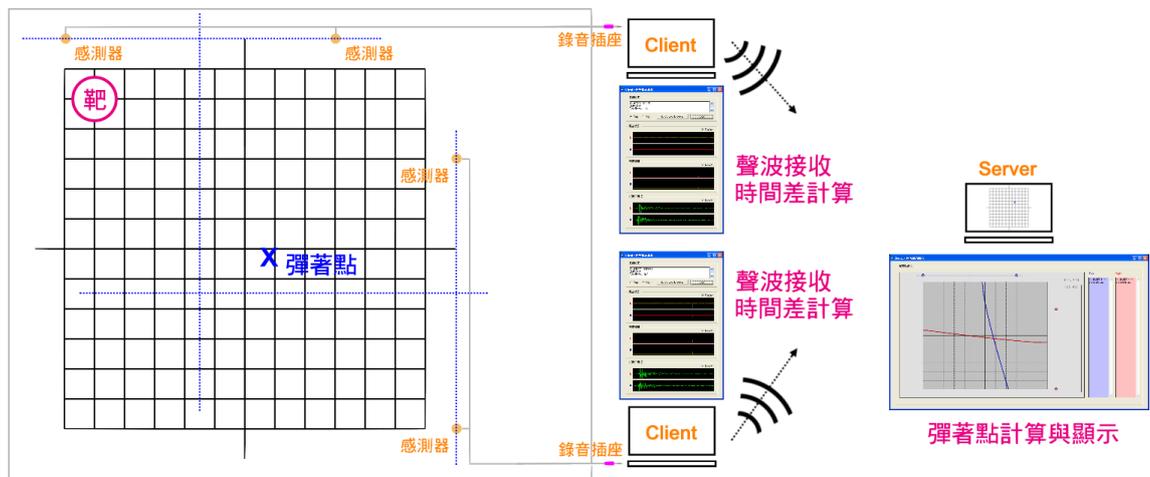


圖 15 彈著點即時顯示系統整體架構

### (1) Client 端的設計

爲了能夠連續不斷的記錄感測器傳送過來的訊號, 同時也要能夠檢視這些訊號, 並計算出其中 BB 彈撞擊聲的左右聲道時間差, 採用了 3 個記憶體緩衝區的機制, 程式一開始執行時的初始階段, 先將記錄的音訊資料存放在第 1 個緩衝區 (Buffer1), 存滿後, 換到第 2 個緩衝區 (Buffer2) 存放, 存滿後, 換第 3 個緩衝區 (Buffer3) 存放, 並由此開始同時將第 1 個緩衝區的音訊資料進行檢視, 若有 BB 彈撞擊聲在內, 則計算出左右聲道的時間差並傳送給 Server 端, 完成後, 將第 1 個緩衝區回收, 待第 3 個緩衝區填滿後, 換第 1 個緩衝區開始記錄, 同時也將第 2 個緩衝區的音訊資料進行檢視與計算, 如此交替循環直到程式終止。

依據參考資料[3][4]，要達成這樣的機制必須使用 Windows 的 API 函式，包括管理緩衝區的 GlobalAlloc、GlobalLock、GlobalFree，以及錄製聲音的 waveInOpen、waveInStart、waveInAddBuffer、waveInPrepareHeader、waveInStop、waveInClose、waveInUnprepareHeader。至於時間差的資料傳送，則需用到 Winsock 控制項，以其 Connect、ConnectionRequest、SendData、DataArrival、GetData 等方法來實作。整個 Client 端的運作流程如圖 16 所示，圖 17 為使用 Visual Basic 6 實作的 Client 端程式，分別處理兩對感測器的音訊資料。

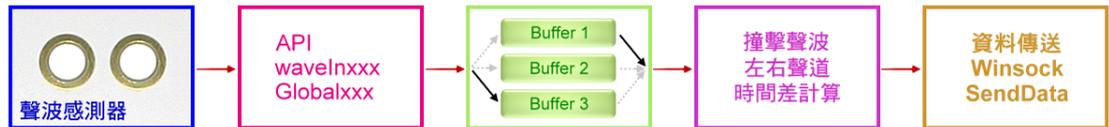


圖 16 Client 端的運作流程

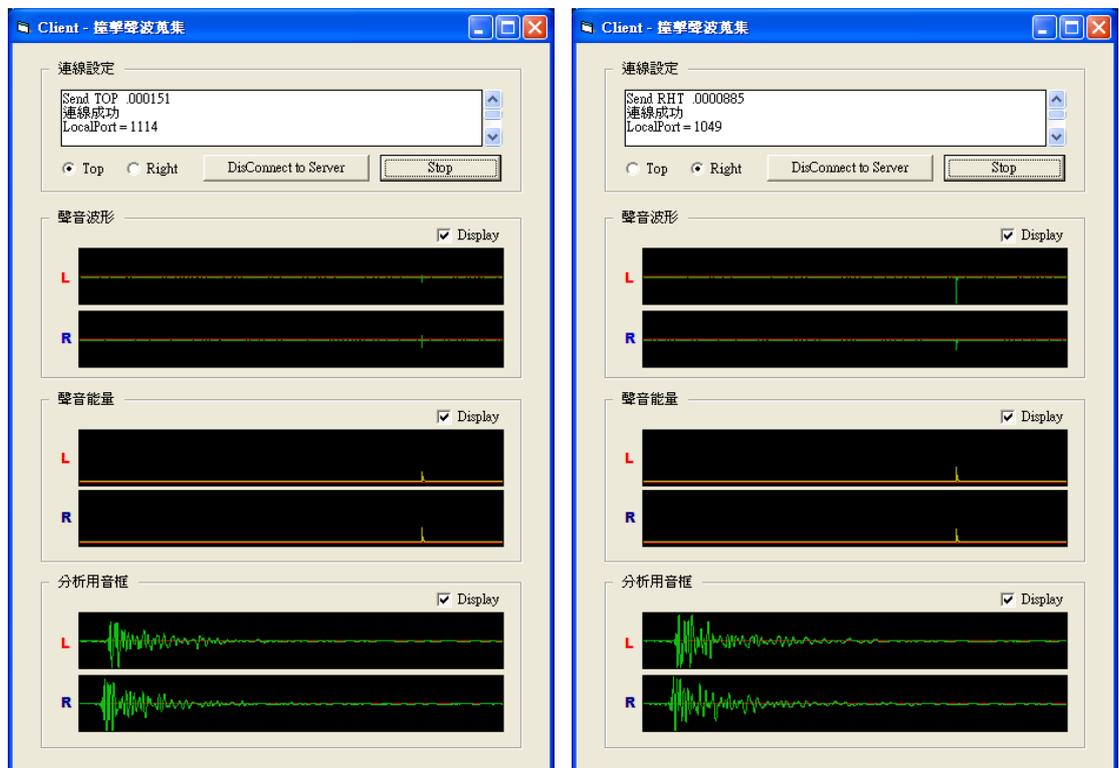


圖 17 Client 端負責音訊蒐集與 BB 彈撞擊聲波的左右聲道時間差計算

## (2) Server 端的設計

Server 端程式的工作就是等待 Client 端傳送時間差資料過來，當接收到兩個 Client 端傳送過來的時間差資料後，即開始計算彈著點可能位置的軌跡，並將彈著點顯示於螢幕上。圖 18 為 Server 端的運作流程

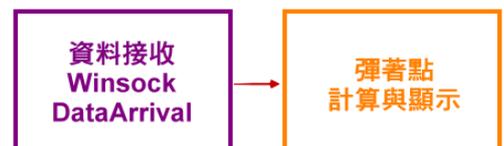


圖 18 Server 端的運作流程

以 Visual Basic 6 實作的 Server 端程式執行畫面如圖 19 所示，共使用了 3 個 Winsock 控制項、1 個圖形方塊 PictureBox、3 個文字方塊 TextBox，一個 Winsock 負責不斷的監聽是否有連線的需求，另兩個 Winsock 分別負責與不同的 Client 端的連線，圖形方塊則負責顯示彈著點可能位置的軌跡，文字方塊則用來記錄

Client 端傳送過來的時間差資料及計算出來的彈著點座標。

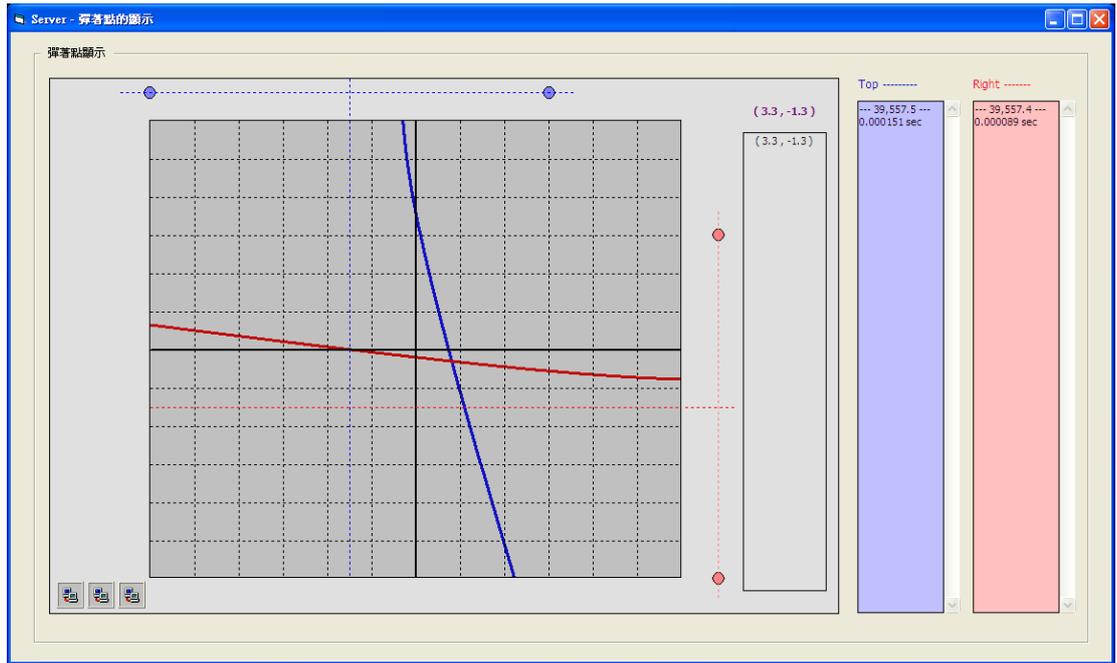


圖 19 Server 端負責彈著點的顯示與描繪可能位置的軌跡

## 二、彈著點的精確度測試

為測試系統在估測彈著點時的精確度，在靶上隨機挑選了 10 個點，並以小圓貼紙標示，再以 BB 彈循著軌道撞擊靶上這些小圓貼紙來模擬彈著點，經過分析計算後數據如下表，彈著點估測的平均誤差為 1.18cm，以長寬為 48cm × 48cm 的靶來說，還算是蠻精準的。

小圓貼紙編號	真實位置	第 1 對感測器 時間差 $\Delta t_1$	第 2 對感測器 時間差 $\Delta t_2$	估測位置	誤差 (cm)
1	( 16 , -12 )	0.000274	-0.000184	( 17.7 , -12.7 )	1.8
2	( 12 , 0 )	0.000274	0.000144	( 11.3 , 0.2 )	0.7
3	( 8 , 8 )	0.000274	0.000250	( 8.6 , 6.2 )	1.9
4	( 8 , -12 )	0.000187	-0.000090	( 8.4 , -10.2 )	1.8
5	( 4 , -8 )	0.000146	-0.000021	( 4.3 , -7.1 )	0.9
6	( 0 , 0 )	0.000099	0.000092	( -0.1 , -0.6 )	0.6
7	( -4 , 4 )	0.000034	0.000127	( -4.1 , 2.3 )	1.7
8	( -8 , 0 )	-0.000031	0.000081	( -7.8 , -0.3 )	0.4
9	( -8 , -8 )	-0.000026	-0.000026	( -7.8 , -7.8 )	0.3
10	( -16 , -16 )	-0.000130	-0.000128	( -17.2 , -17.1 )	1.6

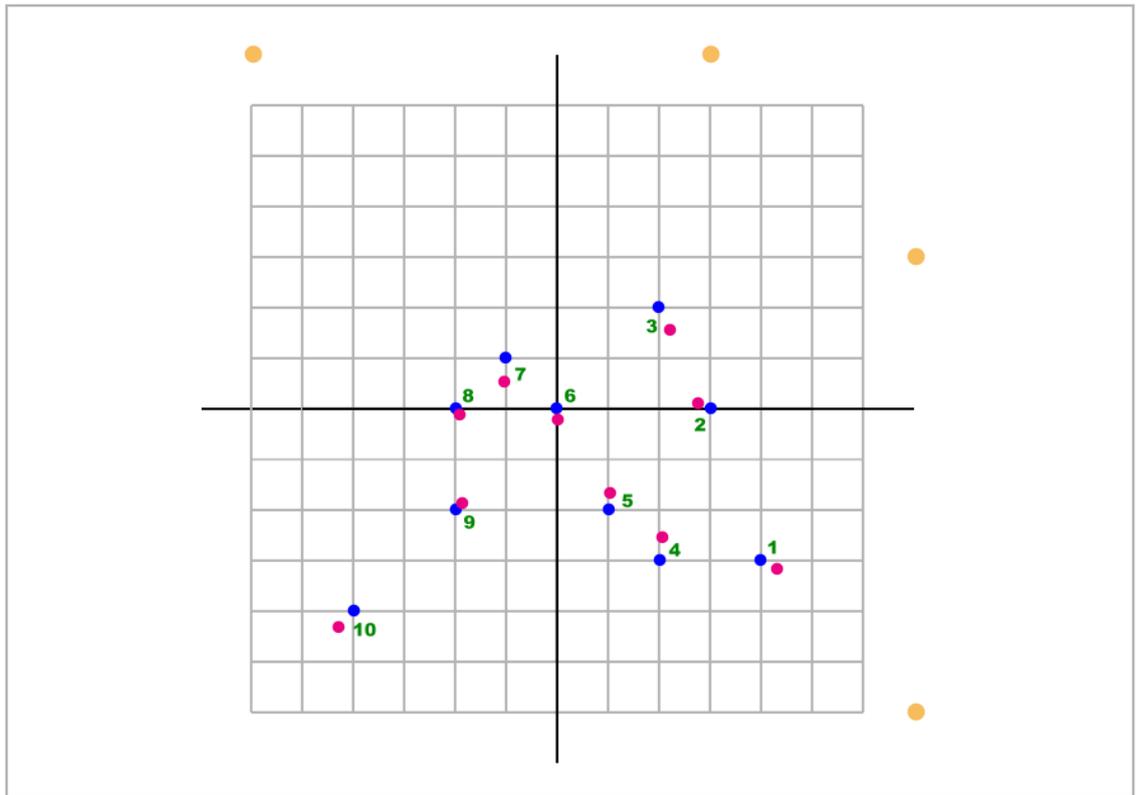


圖 20 彈著點(藍色)與估測彈著點(紅色)

## 陸、討論與結論：

### 一、如何提升彈著點估測的精確度

利用音效卡、壓電式蜂鳴片及密集板等器材，要精確的估算出彈著點位置，著實是件艱困的事，因為在固體中聲波的傳播速率真的很快，實驗測量的密集板中聲波傳播速率為  $619.22 \text{ m/s}$ ，跑完  $48\text{cm}$  寬的靶僅需  $0.000775\text{sec}$ ，而音效卡的取樣頻率被限定在最高  $192000\text{Hz}$ ，也只能紀錄到 148 至 149 個取樣點，所以左右聲道接收聲波的時間差判讀上，只要有些許的誤差，就會影響彈著點估測的精確度（每個取樣點平均間距  $0.322516 \text{ cm/sample}$ ）。另外，在實驗中並沒有針對壓電式蜂鳴片對於密集板中聲波的感測是否有延遲反應做測試，這多少也會影響著左右聲道接收聲波的時間差計算，進而影響彈著點的估測位置。

要改善上述情況以提升彈著點估測的精確度，經過討論，認為有三種方案，第一是採用百萬赫茲等級的資料擷取器（DAQ, Data Acquisition）取代音效卡，有較高且較精準的取樣頻率，對於彈著點估測的精確度上會有顯著的幫助，不過價格是非常的昂貴；第二是尋找一種能夠符合聲波傳播速率慢且穩定要求的材料來製做靶，不過由參考資料[5][6][7][8]看來，那真是有點緣木求魚了；第三就是尋找更為適合的聲波感測器或是延遲時間能夠配對的壓電式蜂鳴片，這樣或許是高中實驗室比較能夠採行的方案。

## 二、感測器是否有更好的擺放位置

本研究剛開始的時後，兩對感測器的擺放位置分別在靶的上方與下方，在描繪彈著點可能位置的軌跡時，會有圖 21-1 所示兩條軌跡幾乎重合的情形，這樣對於估算彈著點位置的精確度上有很大影響，因為只要左右聲道的時間差在判讀上有些許偏差，就會造成彈著點位置的估算上有很大的偏差，經過思考與討論後，才改爲目前圖 21-2 所示的擺放位置，在彈著點位置的估算會有較小的誤差。是否感測器還有更好的擺放位置呢？是後續值得思考的重點之一。

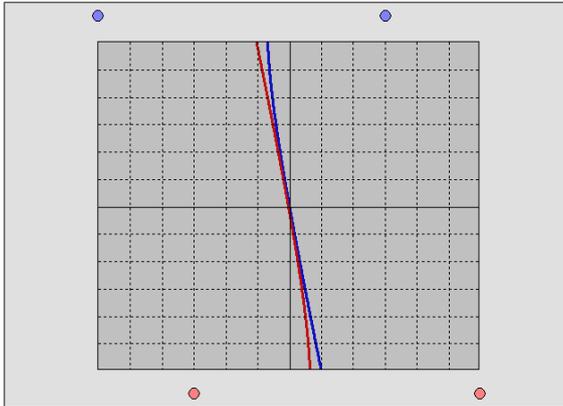


圖 21-1 幾乎重合的彈著點可能位置軌跡

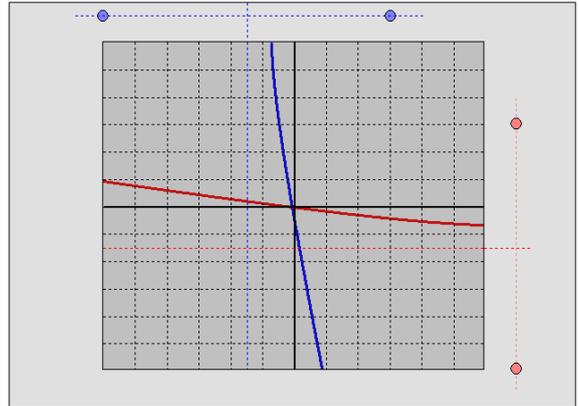


圖 21-2 較佳的感測器擺放位置

## 三、密集板中的聲波傳播速率是否就是 619.22 m/s ?

另外，密集板中的聲波傳播速率是否就是 619.22 m/s ? 這點也有待更進一步的確認，圖 22-1 是離 BB 彈撞擊點較近的感測器所紀錄的波形，圖 22-2 是距離較遠的感測器所紀錄的波形，看起來在密集板中可能有所謂的縱波 (P 波) 與橫波 (S 波) 兩種聲波，而且兩種聲波的傳播速率不同。本研究分別在音量最大值的 2.5%、5%、10%、15%、20%、25% 與 30% 當中，尋找撞擊聲波的最佳起始點門檻，其間隔略嫌大了些，未來可以將間格調整小一點，有了更精準的聲波傳播速率，對於提升彈著點估測的精確度會有不少的助益。

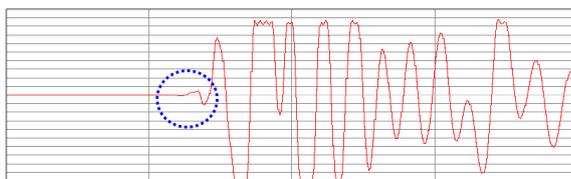


圖 22-1 撞擊點較近時所紀錄的波形

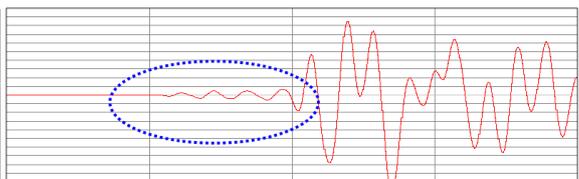


圖 22-2 撞擊點較遠時所紀錄的波形

## 柒、未來展望與應用：

本研究由電影「十面埋伏」中聽音辨位擊鼓的神技獲得啟發，進而探討聽音辨位的原理，並以一對麥克風同步錄音時所產生的左右聲道接收音訊的時間差，來印證聽音辨位的可行性，運用此原理以一般常見的電腦音效卡與廉價的壓電式蜂鳴片（當作聲波感測器使用）來實作，並將其應用在彈著點及時顯示系統上。由實作與測試的結果看來，所提出的方法可以正確的判斷出音訊資料中左右聲道的時間差，並即時地顯

示出彈著點的位置座標，在 48 公分見方的靶上，平均誤差是 1.18 公分，還不錯的成果。

後續研究方面，除了在加強彈著點估測的精確度（尋找更為適合的聲波感測器、更好的感測器擺放位置、更精準的密集板中聲波傳播速率）外，希望能夠減少電腦的使用數量，例如使用多音軌的錄音卡（像瑞麗科技的 MAYA44 V3），或是一台電腦上安裝兩片音效卡，若是可以運作，那麼相關程式是否可以配合著改寫，這些是需要經過實驗與測試方可得到印證。

## 捌、參考資料：

- 一、<http://neural.cs.nthu.edu.tw/jang/books/audioSignalProcessing/> 國立清華大學 資訊工程學系 張智星教授網站。
- 二、王小川著,“語音訊號處理,” 全華科技, 2004。
- 三、彭明柳著,“Visual Basic 6.0 中文專業版徹底研究,” 博碩文化, 1999。
- 四、<http://web.ncyu.edu.tw/~andrew/> 國立嘉義大學 資訊工程學系 洪燕竹教授網站。
- 五、<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/> 中文維基百科。
- 六、<http://en.wikipedia.org/wiki/> 英文維基百科。
- 七、周慧瑜、張詩玫、黃麗如、張靜宜著,“固體和液體中聲速的測定與探討,” 中華民國第 32 屆中小學科學展覽會高中組第二名作品, 1995。
- 八、郭思瑀、盧彥均、彭曉祺、劉幸芸著,“聲音有多快！固體、液體中聲速的探討,” 中華民國第 44 屆中小學科學展覽會高中組參展作品, 2004。