

使用三麥克風到達時間差及空間幾何搜尋法達成三維聲音定位

王乃堅

李中富

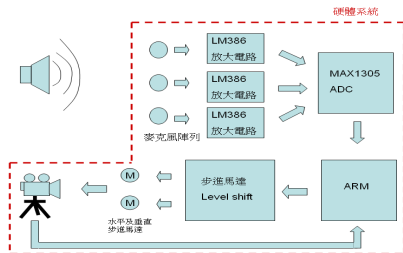
國立台灣科技大學電機系
國立台灣科技大學電機系

摘要 - 聲音定位的應用廣泛，例如會議系統，機器人聽覺系統。但是目前市面上尚無低成本之聲音三維定位攝影機，因此基於這一個利基點，本論文做出一個實際的系統來達到低成本設計。系統發展的步驟如下，先以 MATLAB 模擬進行理論驗證以確認可行性，再以實際電路完成並測試。整個系統包含硬體與軟體部分，硬體部份包含 ARM-9 微處理機板、ADC(Analog Digital Converter)電路板、步進馬達控制電路板及三個麥克風電路板。軟體的部分主要是聲音定位之到達時間差(TDOA, Time different of arrival)自相關函數計算。硬體的部分主要是將聲音的類比訊號轉成數位訊號後，經聲音定位完畢，最後透過步進馬達將攝影機轉向聲源方向。其硬體上三個麥克風成正三角形之幾何的特性主要是提供軟體做空間搜尋以達成聲音定位。

關鍵詞：離散傅利葉轉換，到達時間差，自相關函數

一. 前言

聲音定位是一個可以廣泛用在視訊會議系統，安全監控，機器人的技術。相關的研究有[1]國立清華大學涂莎莉於 1997 年提出之碩士論文”二維空間的音源定位:時域方法的實作與探討”比較各個不同的二維聲音定位的演算法。[3]國立成功大學孫正葦於 2008 年提出之碩士論文”基於 AMDF 之遠場聲源辨位系統設計與 FPGA 實現”，以上兩者提出之碩士論文聲音定位主要是在二維空間。所以應用上也受限。因此本論文嘗試完成一可商品化的三維聲音定位攝影機解決方案，系統圖為圖 1 所示。



圖一. 系統方塊圖

二. 自相關函數與 TDOA

此處以空間位置 $S(x, y, z)$ 表示實際聲源位置，而在一個三維空間的 TDOA 是表示聲源 $S(x, y, z)$ 到達麥克風 M1、M2、M3 (M1,M2,M3 表示空間中直角座標 XZ 平面上的三個麥克風)的時間差。此處定義 $S(x, y, z)$ 水平角為 ϵ 仰角為 ψ ，其對應的 TDOA 此處稱為 $TDOA_{real}$ 。

計算 $TDOA_{real}$ 的方式是用自相關函數，因為自相關

函數主要是表示兩函數的相似性。式(1)是自相關函數的定義

$$R(\lambda) = \sum_{n=1}^N w[n]w[n + \lambda] \tag{1}$$

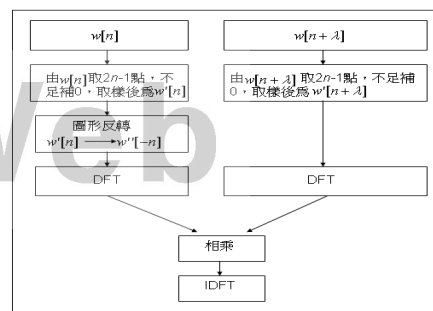
$w[n]$ 為 A 麥克風取得的聲音資料， $w[n + \lambda]$ 為 B 麥克風取得的聲音資料，依照式(1)， $w[n + \lambda]$ 平移並與 $w[n]$ 相乘後相加可以得到 $R(\lambda)$ 值。不同的 $w[n + \lambda]$ 平移會產生不同的 $R(\lambda)$ 值， $R(\lambda)$ 最大值將會產生在 $w[n + \lambda]$ 平移後最相似 $w[n]$ 的時間點。 λ 可以透過乘上取樣頻率的倒數，得到聲源到達不同麥克風的時間差 $TDOA_{real}$ 。參考式(2)。

$$TDOA_{real} = \lambda_{real} * \frac{1}{\text{取樣頻率}} \Big|_{\max(R(\lambda))} \tag{2}$$

式(2) λ_{real} 表示 $R(\lambda_{real})$ 為最大值之平移值，可以看出 $TDOA_{real}$ 與 λ_{real} 成正相關。本論文定義當 $TDOA_{S12-real}$ ($S(x, y, z)$ 到 M1,M2 的時間差的)的平移值為 $\lambda_{S12-real}$ ，當 $TDOA_{S23-real}$ ($S(x, y, z)$ 到 M2,M3 的時間差的)的平移值為 $\lambda_{S23-real}$ ，當 $TDOA_{S31-real}$ ($S(x, y, z)$ 到 M3,M1 的時間差的)的平移值為 $\lambda_{S31-real}$ 。

本論文實際上是利用 DFT (Discrete Fourier Transform) 計算自相關函數，主要是應用 DFT 與環形摺積是相等計算，經修正後可以使用 DFT 計算線性摺積。若有兩有限長訊號 $x[n]$ 與 $h[n]$ 其長度各為 l, k ，若以 DFT 計算其結果，則 DFT 需要取 $l+k-1$ 點數作計算，不足的部分補零。

而線性摺積與自相關函數計算上的差異是在計算前先將取樣到的聲音資料 $w'[n]$ 為變為 $w''[n]$ 也就是在時間軸上的反轉再套用 DFT 計算摺積的方法即可計算自相關函數。因此若聲音取樣長度為 N 的訊號是 $w[n]$ 與 $w[n + \lambda]$ ，其整個計算自相關函數的流程圖可參考圖二。



圖二. 自相關函數計算流程

實際電路必須以 FFT 實現，因為算 N 點 DFT 時，若直接計算 DFT 計算複雜度為需要 N^2 乘法器與 $N(N+1)$ 加法器，而採用 FFT(Fast Fourier transform)計算 DFT 複雜度僅為 $N \log_2 N$ 。

三. 估測聲源的空間搜尋及三角函數計算角度

此處定義空間位置 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 表示估測聲源，其水平角為 θ 仰角為 σ ，其對應的 TDOA 此處稱為 $TDOA_{gm}$ ，平移值 λ_{gm} 。因此在估測 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 可以利用空間幾何特性計算 $TDOA_{S'12-gm}$ 、 $TDOA_{S'23-gm}$ 、 $TDOA_{S'31-gm}$ 與 $\lambda_{S'12-gm}$ 、 $\lambda_{S'23-gm}$ 、 $\lambda_{S'31-gm}$ ，參考式(6)(7)(8)。而使用空間幾何特性計算 $TDOA_{gm}$ 之第一步就是要做步級累加，如同式(3)(4)(5)

$$x_n = x_{n-1} + x_{step} \tag{3}$$

$$y_n = y_{n-1} + y_{step} \tag{4}$$

$$z_n = z_{n-1} + z_{step} \tag{5}$$

而 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 在估測時，其 X 軸搜尋的區域為 $-600\text{cm} < x_n < 600\text{cm}$ ，Y 軸搜尋的區域為 $y_n < 600\text{cm}$ ，Z 軸搜尋的區域為 $-600\text{cm} < z_n < 600\text{cm}$ 。 x_{step} y_{step} z_{step} 各表示在 XYZ 方向上搜尋的步級間隔大小，當每次累加完畢後須計算聲源到麥克風 M1, M2, M3 距離 $D_{S'1}$ 、 $D_{S'2}$ 、 $D_{S'3}$ 與 $TDOA_{S'12-gm}$ 、 $TDOA_{S'23-gm}$ 、 $TDOA_{S'31-gm}$ 、 $\lambda_{S'12-gm}$ 、 $\lambda_{S'23-gm}$ 、 $\lambda_{S'31-gm}$ 。計算式子如式(6)(7)(8)。

實際上的系統運作的步驟是在聲源 $S(x, y, z)$ 到達麥克風 M1、M2、M3 後，可以利用 DFT 計算自相關函數可以得到聲源抵達兩麥克風時間差的平移值 $\lambda_{S12-real}$ 、 $\lambda_{S23-real}$ 與 $\lambda_{S31-real}$ ，參考式(1)(2)。然後利用式(3)(4)(5)做步級累加後，再利用(6)(7)(8)計算 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 的 $TDOA_{gm}$ 與 λ_{gm} 。最後計算 E_{12} 、 E_{23} 、 E_{31} 表示 λ_{real} 與 λ_{gm} 誤差如式(9)(10)(11)。當 E_{12} 、 E_{23} 、 E_{31} 三者相加 E_{all} 式(12)為誤差最小值時，表示估測聲源 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 其 θ 與 σ 就是逼近 $S(x, y, z)$ 的 ε 與 ψ 。

$$D_{sm} = \sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2} \tag{6}$$

x_m, y_m, z_m 為麥克風 M1, M2, M3 空間位址。

$$TDOA_{gm} = \frac{\text{兩麥克風與 } S'(x_n, y_n, z_n) \text{ 距離差}}{\text{聲速}} \tag{7}$$

$$\lambda_{gm} = \frac{\text{兩麥克風與 } S'(x_n, y_n, z_n) \text{ 距離差}}{\text{聲速} / \text{ADC取樣頻率}} \tag{8}$$

$$E_{12} = |\lambda_{S12-real} - \lambda_{S'12-gm}| \tag{9}$$

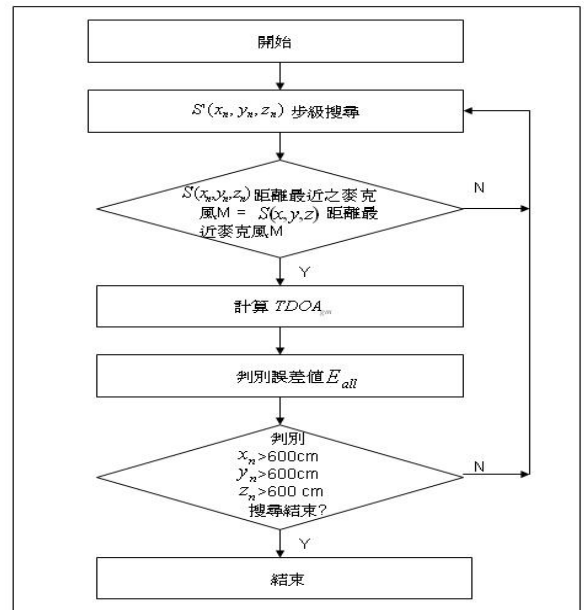
$$E_{23} = |\lambda_{S23-real} - \lambda_{S'23-gm}| \tag{10}$$

$$E_{31} = |\lambda_{S31-real} - \lambda_{S'31-gm}| \tag{11}$$

$$E_{all} = E_{12} + E_{23} + E_{31} \tag{12}$$

當搜尋到最小值的 E_{all} 的相對應搜尋空間位置

$S'(x_n, y_n, z_n)$ ，就是系統搜尋到的聲源位置。完整的空間搜尋流程圖請參考圖三。因此以圖三表示聲音定位系統的軟體流程。

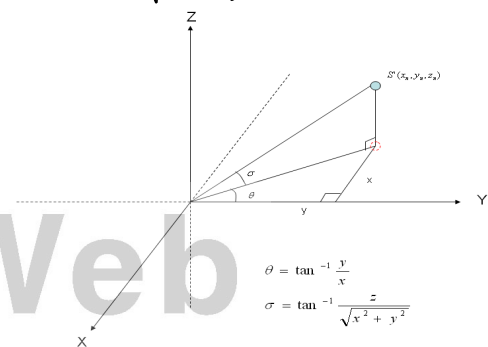


圖三. 空間搜尋流程圖

當 E_{all} 為最小值時，此時可以得到 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 的空間直角座標。因此可以利用反三角函數式(13)(14)去算 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 聲源角度。在圖四中顯示一個聲源與三角函數的關係。

$$\text{水平角 } \theta: \theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \tag{13}$$

$$\text{仰角 } \sigma: \sigma = \tan^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{14}$$

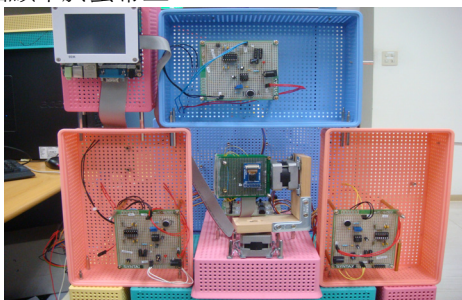


圖四. 三角函數反推角度圖

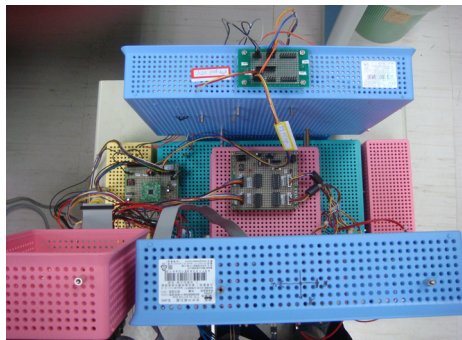
四. 硬體系統

硬體系統如圖一，完成圖則如圖四與圖五，硬體部分主要構成有 ARM 微處理機板(友善之臂公司的 Miini2440)、ADC 板(板上晶片主要是 Maxim 的 MAX1305 ADC)、麥克風板(板上主要元件是麥克風與音頻功率放大器 LM386)、步進馬達控制電路板(主要是反相器 ULN2003、74LS14 兩個晶片)，以及攝影機模組板(板上主要是 OV9650 晶片)，而各子板以杜邦線或排線連接。

麥克風板主要是取樣聲音訊號，因麥克風輸出為 100mv 以下，因此在板上以 LM386 將聲音訊號放大至 0~5V。而 ADC 板負責將麥克風板取樣的聲音訊號由類比訊號轉成數位訊號。ARM 微處理機板則是透過 GPIO 將聲音訊號的數位資料由 ADC 板讀入，並且進行以 TDOA 進行聲音定位計算，當計算完畢後再由 ARM 板的 GPIO 透過步進馬達控制板，將攝影機對正聲音來源方向，將聲源方向的畫面顯示於螢幕上。



圖五 硬體前視圖

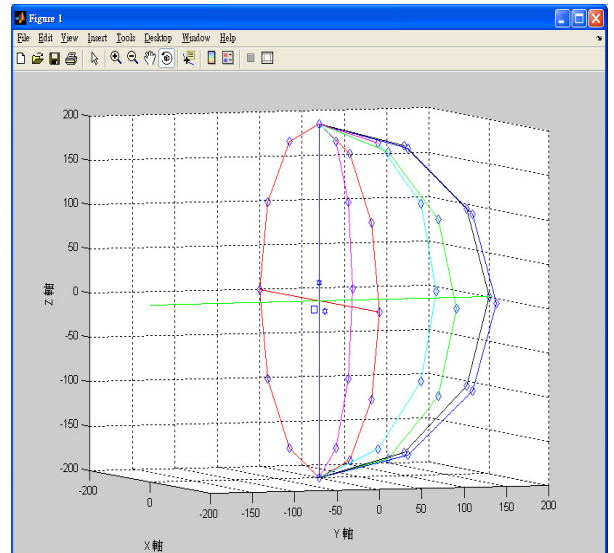


圖六 硬體俯視圖

五. MATLAB 模擬結果與實體系統量測

5.1 MATLAB 模擬結果

在模擬上 M1,M2,M3 位置各是(-10.5,0,-6.06), (10.5,0,-6.06),(0,0,12.12)。 ϵ 方位由 0 度到 180 度每次增加 30 度變化量， ψ 由 -90 度到 +90 度每次增加 30 度變化量。在考慮測試的可行性與實際的應用下，選定聲源 $S(x, y, z)$ 與原點距離 200cm 當作模擬條件。而 $S'(x_n, y_n, z_n)$ 搜尋的區域如下，X 軸搜尋的區域為 $-600\text{cm} < x_n < 600\text{cm}$ ，Y 軸搜尋的區域為 $y_n < 600\text{cm}$ ，Z 軸搜尋的區域為 $-600\text{cm} < z_n < 600\text{cm}$ ， $x_{step} y_{step} z_{step}$ 為 9cm。對聲音訊號取樣 1024 點後計算 TDOA。聲音速度為室內溫度攝氏 25 度時的每秒 340 公尺，取樣頻率 100khz。



圖七. 半球模擬圖

表 I
 ψ 固定在 60、30、0、-30、-60 度時，模擬 ϵ 在 0、30、60、90 度時的水平角 θ

$\psi \backslash \epsilon$	0		30		60		90	
	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值
60	4.64	-4.64	29.36	0.64	59.9	0.1	89.47	0.53
30	5.36	-5.36	31.39	-1.39	59.9	0.1	89.73	0.27
0	3.73	-3.73	30.29	-0.29	60	0	89.66	0.34
-30	8.53	-8.53	29.67	0.33	59.74	0.26	89.69	0.31
-60	5.04	-5.04	30.14	-0.14	60.46	-0.46	89.48	0.52

表 II
 ψ 固定在 60、30、0、-30、-60 度時，模擬 ϵ 在 120、150、180 度時的水平角 θ

$\psi \backslash \epsilon$	120		150		180	
	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值
60	120.05	-0.05	149.51	0.49	178.59	1.41
30	119.54	0.46	148.26	1.74	170.16	9.84
0	119.89	0.11	149.94	0.06	179.13	0.87
-30	120.31	-0.31	151.27	-1.27	176.57	3.43
-60	119.49	0.51	149.29	0.71	178.52	1.48

表 III
 ϵ 固定在 0、30、60、90 度時，模擬 ψ 在 90、60、30、0、-30、-60、-90 度時的仰角 σ

$\psi \backslash \epsilon$	0		30		60		90	
	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值
90	88.13	1.87	88.13	1.87	88.13	1.87	88.13	1.87
60	59.89	0.11	59.37	0.63	60.68	-0.68	60.77	-0.77
30	29.92	0.08	29.75	0.25	29.97	0.03	29.95	0.05
0	-0.62	0.62	-0.52	0.52	0.3	-0.3	0.34	-0.34
-30	-29.62	-0.38	-30.24	0.24	-29.94	-0.06	-29.61	-0.39
-60	-59.95	-0.05	-59.96	-0.04	-59.27	-0.73	-58.62	-1.38
-90	-81.19	-8.81	-81.19	-8.81	-81.19	-8.81	-81.19	-8.81

表 IV

ε 固定在 120、150、180 度時，模擬 ψ 在 90、60、30、0、-30、-60、-90 度時的仰角 σ

$\psi \backslash \varepsilon$	120		150		180	
	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值	模擬值	誤差值
90	88.13	1.87	88.13	1.87	88.13	1.87
60	60.82	-0.82	60.56	-0.56	60.65	-0.65
30	29.94	0.06	29.68	0.32	29.66	0.34
0	-0.48	0.48	-0.5	0.5	-0.58	0.58
-30	-29.92	-0.08	-30.25	0.25	-30.07	0.07
-60	-58.83	-1.17	-59.19	-0.81	-59.5	-0.5
-90	-81.19	-8.81	-81.19	-8.81	-81.19	-8.81

表 VI

ψ 固定在 60、30、0、-30、-60 度時，量測 ε 在 120、150、180 度時的水平角 θ

$\psi \backslash \varepsilon$	120		150		180	
	量測值	誤差值	量測值	誤差值	量測值	誤差值
60	118.8	1.2	151.6	-1.6	172.4	7.6
30	119.4	0.6	147.3	2.7	165.6	14.4
0	118.2	1.8	150.7	-0.7	174.6	5.4
-30	121	-1	151.7	-1.7	174.6	5.4
-60	122	-2	153.1	-3.1	171	9

表 VII

ε 固定在 0、30、60、90 度時，量測 ψ 在 90、60、30、0、-30、-60、-90 度時的仰角 σ

$\psi \backslash \varepsilon$	0		30		60		90	
	量測值	誤差值	量測值	誤差值	量測值	誤差值	量測值	誤差值
90	83.8	6.2	83.8	6.2	83.8	6.2	83.8	6.2
60	52.7	7.3	59.2	0.8	56.7	3.3	62.9	-2.9
30	23.9	6.1	27.8	2.2	30.7	-0.7	30.6	-0.6
0	-5.9	5.9	0.8	-0.8	0.7	-0.7	-0.9	0.9
-30	-23.9	-6.1	-31.5	1.5	-30.6	0.6	-31.7	1.7
-60	-51.2	-8.8	-61.7	1.7	-61.7	1.7	-63.5	3.5
-90	-84.6	-5.4	-84.6	-5.4	-84.6	-5.4	-84.6	-5.4

表 VIII

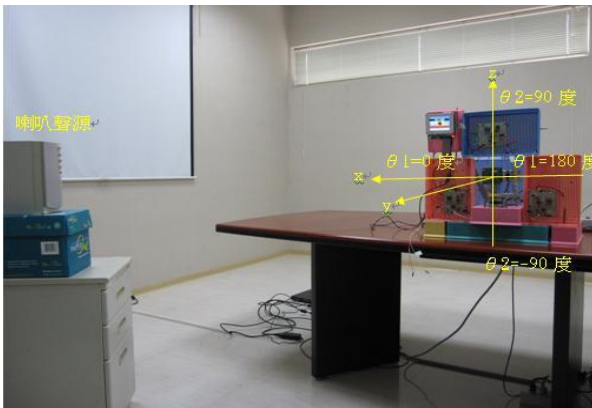
ε 固定在 120、150、180 度時，量測 ψ 在 90、60、30、0、-30、-60、-90 度時的仰角 σ

$\psi \backslash \varepsilon$	120		150		180	
	量測值	誤差值	量測值	誤差值	量測值	誤差值
90	83.8	6.2	83.8	6.2	83.8	6.2
60	56.8	3.2	58.3	1.7	51.7	8.3
30	30.6	-0.6	31.2	-1.2	35	-5
0	-1.3	1.3	0.6	-0.6	2.7	-2.7
-30	-28.9	-1.1	-28.3	-1.7	-34.5	4.5
-60	-56.4	-3.6	-62	2	-50.7	-9.3
-90	-84.6	-5.4	-84.6	-5.4	-84.6	-5.4

5.2 實體系統量測結果

實際的量測環境如圖六在一空間室內溫度攝氏 25 度空間中針對模擬的角度。直角座標原點在攝影機位置，M1,M2,M3 位置各是(-10.5,0,-6.06),(10.5,0,-6.06),(0,0,12.12)。並且喇叭聲源在相對應模擬的實際空間位置上進行測試。測試的角度有 ε 為 0、30、60、90、120、150、180 度， ψ 則為 90、60、30、0、-30、-60、-90 度。聲源 $S(x, y, z)$ 距直角座標原點的直線距離為 200cm，並取樣 1024 點計算 TDOA。ADC 取樣頻率 100khz。X 軸搜尋的區域為 $-600\text{cm} < x_n < 600\text{cm}$ ，Y 軸搜尋的區域為 $y_n < 600\text{cm}$ ，Z 軸搜尋的區域為 $-600\text{cm} < z_n < 600\text{cm}$ ， $x_{step} y_{step} z_{step}$ 為 9cm。

測試的聲音來源使用電腦播放事先錄好的聲音，經由內建放大的喇叭加以放大來進行測試。



圖八.量測環境

表 V

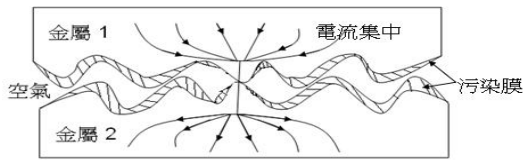
ψ 固定在 60、30、0、-30、-60 度時，量測 ε 在 0、30、60、90 度時的水平角 θ

$\psi \backslash \varepsilon$	0		30		60		90	
	量測值	誤差值	量測值	誤差值	量測值	誤差值	量測值	誤差值
60	10.2	-10.2	27.5	2.5	58.6	1.4	88.9	1.1
30	13.5	-13.5	31.8	-1.8	60.1	-0.1	89.5	0.5
0	6.5	-6.5	30.6	-0.6	59.5	0.5	89.2	0.8
-30	7.2	-7.2	26.8	3.2	59.3	0.7	91.3	-1.3
-60	13.1	-13.1	28.8	1.2	58.3	1.7	88.4	1.6

5.3 MATLAB 模擬與實測討論

在模擬上與實際上誤差的原因，是因為雜訊產生之影響，雜訊的部分又分為接觸電阻雜訊、電源雜訊、接地雜訊以及音場環境雜訊。

有關接觸電阻產生雜訊部分，在本系統上主要是在於杜邦線連接各子板，根據[4]大同大學機械工程研究所林青穆”觸動開關之接觸電阻的特性研究”碩士論文，說明電阻是與接觸面積成反比，當接觸面積增加時，電阻會減小。接觸面積減少時，電阻會增加，並且會產生電流集中的現象，因此杜邦線金屬接觸面如果因為接觸壓力的變化、接頭滑動、機構震動都將會導致接觸電阻變化進而導致電路雜訊的產生，參考圖七。而接觸電阻計算式可以以式(15)表示



圖九. 接觸電阻部份會產生電流集中現象

$$R_{cn} = \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{4} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sum_1^n a \cdot n} \right) \quad (15)$$

R_{cn} : 接觸電阻

ρ_1, ρ_2 : 金屬介電係數

a : 接觸點面積

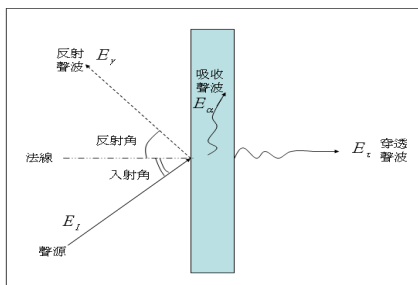
n : 接觸點數目

因此如果本系統改以 PCB (Printed circuit board) 板完成實體電路, 而非以萬用板, 將可以減少電源雜訊接地雜訊與接觸電阻雜訊所產生的聲音定位誤差。

在電源雜訊與接地雜訊產生的原因, 主要是因為數位電路在開關的瞬間會產生較大的電流變化, 而電路上電流變化會經由導線上電感產生電壓的變化進而影響電源與接地導線的訊號穩定度, 可以參考式(16)。

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (16)$$

音場空間反射聲音雜訊為在空間中聲音遇到撞擊到空間中一物體時, 可以將入射聲音能量分成三個部份來表示, 這三個部份為聲音能量被反射、吸收及穿透如圖 10 所示。因為空間中不同的物體具有不同的反射係數、吸音係數、穿透係數, 也因為物體在空間中擺放的位置影響聲波入射角與反射角, 所以會產生不同的大小及角度的聲音反射。



圖十 聲音與材料反射、吸收、穿透表示圖

$$\text{吸音係數: } \alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (17)$$

$$\text{反射係數: } \gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad (18)$$

$$\text{穿透係數: } \tau = \frac{E_t}{E_i} \quad (19)$$

E_i : 入射聲波的能量

E_a : 吸收聲波的能量

E_r : 反射聲波的能量

E_t : 穿透聲波的能量

因為不同的聲音傳遞路徑, 會有不同的延遲, 因此假設一直接聲音路徑 A 由聲源至麥克風需要 t_1 時間, 另一個反射聲音路徑 B 由聲音至麥克風需要 t_2 時間, 因為 AB 路徑延遲時間不同, 因此 B 路徑之反射聲音會疊加在 A 路徑之直接聲音, 因而影響定位準確性。

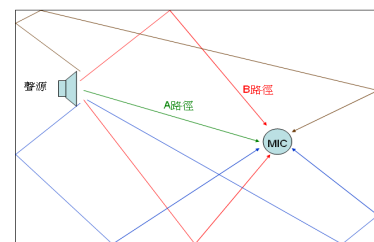


圖 11 聲音在幾何空間中聲線圖

結論

本論文以 ARM 完成一低成本聲音 TDOA 定位之攝影機系統。主要是以軟體運算來完成 TDOA 及幾何空間搜尋, 此系統以市面上現有元件完成, 因此可降低成本, 提高應用普遍性。

Matlab 模擬結果與實際電路測試結果一致, 誤差值在 3.5 度以內, 在 0 度 180 度附近誤差較大。聲音定位在距離原點 200cm 並且 $30 < \theta_1 < 150$ 與 $-60 < \theta_2 < +60$ 間, 那麼誤差值會在 3.5 度以內, 若是在 0 度 180 度附近誤差較大這部份也與模擬一致。

未來的系統改良方面可以先以降低雜訊以及處理速度為主要項目。這方面可以利用 PCB 走線, 來避免使用萬用板與杜邦線連接所造成的雜訊, 增加良率。在處理速度的改善方面可以改成使用 FPGA 做運算, 以相同的運算來說硬體運算必定較軟體運算來的快, 因此可以加快速度。

參考文獻

- [1] 涂莎莉, 二維空間的音源定位: 時域方法的實作與探討, 國立清華大學資訊工程所, 2005
- [2] 王小川, “語音訊號處理,” 全華科技圖書有限公司, 台北, 民國九十六年
- [3] 孫正葦, 基於 AMDF 之遠場聲源辨位系統設計與 FPGA 實現, 國立成功大學電機工程學系碩士論文, 民國九十七年
- [4] 林青穆, 觸動開關之接觸電阻的特性研究, 大同大學

- 機械工程研究所碩士論文，民國九十八年
- [5] 玉井輝雄，輕負荷接点における接觸抵抗特性，上智大學，電氣接點.接觸現象總合資料集，總合電子リサーチ企劃部/總合電子リサーチ,1983
- [6] 林忠逸，數位訊號處理，美商麥格羅。希爾，台北，2002
- [7] 噪音防治防治材料簡介手冊，行政院環保署，2013
- [8] 陳炯堯、張奕瑞，朝陽科技大學，以互相關檢測理論開發無響室吸音係數測試法之研究-以多孔性材料為樣本，技術學刊第二十卷第三期，民國九十四年。
- [9] Alan V.Oppenheim,Ronald W.Schafer , John R. Buck , *Discrete-Time Signal process,Second Edition* , Prentice Hall , 1999
- [10] http://datasheets.maximintegrated.com/cn/ds/MAX1304-MAX1314_cn.pdf , 2013
- [11] <http://www.doyoung.net/video/DATASHEET/PDF/ULN2003.pdf> ,2013
- [12] <http://www.nari.ee.ethz.ch/wireless/education/PPS/PPS02/doc/LM386.pdf> , 2013
- [13] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf> , 2013
- [14] <http://baike.baidu.com/view/553287.htm> , 2013
- [15] <http://wenku.baidu.com/view/71024fe95ef7ba0d4a733b92> , 2013
- [16] http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%92%B0%E5%BD%A2%E6%91%BA%E7%A9%8D#x.5Bn.5D_.E8.88.87_h.5Bn.5D_.E7.9A.86.E7.82.BA.E6.9C.89.E9.99.90.E9.95.B7.E4.BF.A1.E8.99.9F , 2013
- [17] <http://www.docin.com/p-429863580.html> , 2013

