

國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



麥克風陣列結合波束成型理論進行聲源定位及

應用聲學攝影機於加工系統之振噪分析

Using Microphone Arrays with Beamforming in Sound Source

Localization and Application of Sound Camera for Noise and

Vibration Analysis of Machining Systems

蘇紫茵

Tzu-Yin Su

指導教授：馬劍清 博士

Advisor: Chien-Ching Ma, Ph.D.

中華民國 109 年 7 月

July, 2020



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

麥克風陣列結合波束成型理論進行聲源定位及  
應用聲學攝影機於加工系統之振噪分析

Using Microphone Arrays with Beamforming in Sound  
Source Localization and Application of Sound Camera for  
Noise and Vibration Analysis of Machining Systems

本論文係蘇紫茵君（學號 R07522504）在國立臺灣大學機械工程  
學系完成之碩士學位論文，於民國 109 年 07 月 30 日承下列考試委員  
審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

馬劍清

馬劍清

(簽名)

(指導教授)

楊哲化

楊哲化

尹慶中

尹慶中

黃育熙

黃育熙

系主任

黃美晴

(簽名)





## 致謝

行一逝研究 ê 路，解決問題 ê 甘，感覺迷茫 ê 苦，攏是成長 ê 滋味。tiòh 按呢行--咧行--咧 mā 到站矣，不變 ê 是對聲學 ê 興趣。這兩年毋但做研究寫論文，koh 有其他 ê 人生體驗(我 tiòh 愛耍)，佇遮用這篇謝辭，兼紀念我精彩 ê 碩班生活。

頭一个愛感謝我 ê 指導教授馬劍清老師，tshut-tsāi 我四界耍，mā 予我濟濟資源家已發展研究，總是足有耐心咧聽我報告，改正我 ê 論文，予我有機會去鴻海面試，會當做您 ê 學生，我感覺足好運、足感恩--ê。第二感謝楊哲化老師、尹慶中老師恰黃育熙老師擔任我 ê 口試委員，有這個機會來恰各位老師交流，mā 感謝各位老師 ê 鼓勵，予我有一寡自信矣。

感謝破壞實驗室 ê 每一個人。感謝亦莊恰展誼 sián-pái 予我足濟足濟 ê 幫贊，恁對做學問 ê 專業恰熱情，是阮學習 ê 模範。祝福兩位菜鳥仔教授未來愈來愈好，另工一定去恁 lab 拜訪。感謝冠璋 sián-pái，逐項代誌攏愛你來負責，真正是勞力矣，感謝宇倫 sián-pái 定定佇我無信心 ê 時陣 kā 我鼓勵，感謝惠媛、柔萱、哲維、小毛、立揚幾位 sián-pái 對我 ê 關心恰照顧，綴恁學著袂少代誌。仝屆 ê 俊賢、義翔恰婉琮，阮逐工咧喝講想欲畢業，想袂到 koh 真正到這工矣。感謝義翔來 kā 我鬥做 DIC 實驗，感謝俊賢陪我耍、鬥用我 ê 論文，感謝婉琮提足濟免費便當予阮食，mā 感謝兩位恰我做伙做畢代，祝恁三个未來順順利利。感謝實驗室內底 ê 弟妹妹鬥相共準備口試 ê 物件，恁攏有夠認真甲我會驚，相信恁會有厲害 ê 研究結果，莫煩惱。

特別感謝聲學 ê 大前輩渝斐 sián-pái，若毋是你我 mā 袂入來破壞實驗室遮，兩年來分張蓋濟資源予我，tsit-má 咧揣工課 koh kā 我鬥牽線、教我做履歷，希望我會當繼續追隨 sián-pái ê 跂步，成做一个有專業 ê audio 工程師。

感謝台大台語文社，雖然干焦去過兩改社課爾爾真歹勢，毋過 mā 是起一个頭予我會當家已學台文；感謝臺大軟網，我真正毋捌想過有一工我會是校隊，出去拍

比賽 koh 挈銀牌；感謝台灣基進恰婚姻平權大平台(tsit-má 改名矣)，予我有非常特殊 ê 經驗，像講開記者會、倚選舉車拜票、佇路頂恰過路人開講宣傳理念、頭一擺去夜店(?)，mā 熟似袂少無仝背景 ê 志工朋友，拍開我 ê 眼界。

感謝交大機械 ê 同學(人傷濟寫袂了)，佇我上歹過 ê 彼陣是轉去學校覷覷、看看--ê 了後才雄雄對研究有方向，koh 有恰佇臺大 ê 人不時見面食飯 mā 攏真歡喜，希望逐家無論是佇佗位讀冊抑是做工課，攏過了有好。感謝對面 lab ê 陳芝郁，雖然這兩年遐爾仔艱苦，mā 總是結束矣是毋？對家己愛有自信，我足佩服你讀真濟轉型正義 ê 冊、聽演講，漸漸仔有家己 ê 想法矣，知影你 ê 繼續關心轉型正義、關心政治，歡迎隨時來揣我講話，咱莫放棄。

感謝上好 ê 社工謝宜恩，定定予我來 kā 你煩，無話通講 ê 時陣 koh 愛負責講話，mā 感謝你請我食足濟 mister donut，tshuā 我去耍 switch，望你活了好勢(上無有睏好 mā 好)，莫辭頭路，薪水濟濟，歡迎來阮兜看貓仔。

感謝我 ê 朋友楊韻儒、嚴俐琳、劉又禎、陳新璇，咱熟似 mā 欲十年矣，逐擺恰恁見面開講攏予我力量行落去，希望咱攏會當佇這個社會好好仔生存，mā 拜託恁繼續恰我講話恰我要~

感謝阿爸阿母予我物質上 ê 幫助，歹勢時常無好好仔回應恁對我 ê 愛；最後予我這世間上重要 ê 阿姊蘇紫瑜，感謝你對我 ê 支持恰包容(逐工攏用 messenger kā 你 lō)，因為有你佇前頭，我才行會穩當、安心。你是一個佻爾仔有能力、有想法、好運 koh 骨力 ê 人，敢若無需要 koh 講啥矣，因為你已經做甲足好，你永遠是予我景仰且驕傲 ê 姊姊。

將欲踏入去社會，小可驚惶，小可期待，毋知影半個月後 ê 我敢有頭路，五年後十年後 koh 佇佗位做啥物代誌。向望家己做為一個智識份子，著行動，著努力，替咱所愛 ê 台灣出一分力，干焦講話是無法度改變現實--ê，以此自勉。

蘇紫茵 2020/08/17 踎 140.112.46.18



## 摘要

就像人有兩個耳朵一樣，多個感測器組成陣列後可以進行聲源定位。此技術應用廣泛，從早期用於軍事科技，到現代智慧聲控裝置或輔助工業噪音檢測，皆能見到其蹤影，亦是一項發展已久的技術，研究者也努力從陣列排列方式或演算法優化追求提升定位精準度及運算速度。

本研究首先將聲音感測器以直線的方式排列建立一維等間距線性陣列系統，並使用波束成型演算法進行聲源定位，進而建構完整的自動聲源追蹤系統；接著為了追蹤空間中的聲源位置，以一維陣列系統為基礎建立二維的聲源定位陣列，利用不同的排列形式設計各種陣列幾何的配置，並探討對應的聲源辨識能力與解析度，進而找出最佳的陣列排序方式；接著將二維陣列系統與工業相機結合，建立出可視化的聲場量測系統，並設計靜止、二維移動和三維空間移動的聲源實驗，測試此系統的靈敏度與定位能力；最後將本系統與三維數位影像相關法（digital image correlation, DIC）結合可精準定位聲源的三維空間位置，並將分析結果與市售的聲學攝影機相互比對以驗證本系統之可行性。另一部份則是將聲源定位應用於振噪分析的實例研究，與傳統量測工具相互搭配，針對內藏式主軸、馬達加工系統與機械手臂三種不同加工系統進行量測，將運轉訊號分離出環境背景噪音、電子元件噪音與運轉機械噪音並分項討論，也從異常訊號特徵推論結構有零件鬆動、基座不穩等問題，並成功使用聲學攝影機找到發出異音的缺陷軸承；最後則將聲學攝影機拍攝結果相互比較，討論聲源定位技術於實例應用的可行性。

關鍵字：聲源定位、麥克風陣列、波束成型、聲源可視化、振噪分析



# Abstract



Similar to human's two ears, the sound can be "heard" and localized by the sensor array. This technology is widely used in many fields from military technology at early stages to smart voice control devices or assisting industrial noise detection. This technique has been developed for a long time. Researchers usually focus on the topics for the location of those sensors that were placed or developing the algorithm in order to improve locating accuracy, precision, and speed.

This study starts with 1-D array system with uniform arrangement, using beamforming algorithm in sound source localization and constructs an automatic source tracking system. For tracking the sound source in space, it carries on 2-D array system and discussed different geometric forms of the array with their locating ability and resolution, therefore finding out the best arrangement. Next combines this 2-D system with industrial camera to practicing an acoustic source visualizing system and then tests its sensitivity and locating ability by tracking a steady sound source, moving in a plane and in space. Lastly, combines this 2-D sound source tracking system with 3-D digital image correlation can locate the sound source in a 3-D space and compare the experimental results with those from a commercially available product, sound camera, to evaluate the system.

The other part of this thesis is noise and vibration analysis, which cooperates this sound source localization technology with traditional measurement tools such as microphone and accelerometer. In these 3 cases, which include built-in high-speed spindle, machining system, and robotic arm, this study separates the operation signal for background noise, electronic components noise and mechanical noise from the machines. Finally, the capability of the practical application of sound source localization technology

is discussed by the measuring results of the sound camera in these cases.



Keywords: Sound source localization, microphone array, beamforming, acoustic source visualizing, noise and vibration analysis

# 目錄



致謝 .....	I
摘要 .....	III
Abstract.....	V
目錄 .....	VII
表目錄 .....	XI
圖目錄 .....	XII
第一章 前言 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	2
1.3 論文內容簡介 .....	5
第二章 波束成型原理、訊號分析方法及實驗設備介紹 .....	7
2.1 波束成型 .....	7
2.1.1 Delay and Sum Beamforming .....	7
2.1.2 Array pattern 與 Beam pattern .....	9
2.2 數據分析方法 .....	10
2.2.1 快速傅立葉轉換 .....	10
2.2.2 短時傅立葉變換 .....	10
2.3 實驗設備儀器介紹 .....	11
2.3.1 MATLAB.....	11
2.3.2 PCB 1/2” 自由聲場麥克風.....	11
2.3.3 加速規 .....	11
2.3.4 資料擷取裝置 .....	12
2.3.5 動態訊號分析軟體 FLEXDSA .....	12

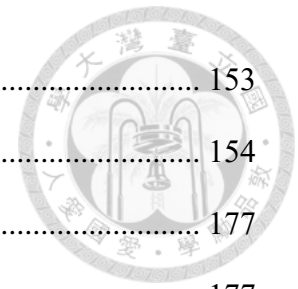


2.3.6	無響室 .....	13
2.3.7	Bose SoundLink Mini 藍芽無線喇叭.....	13
2.3.8	KINYO MPS-372 讀卡喇叭.....	13
2.3.9	聲學攝影機 .....	14
2.3.10	數位工業相機 .....	14
2.3.11	相機鏡頭 .....	14
第三章 一維等間距直線麥克風陣列 .....		23
3.1	一維等間距直線麥克風陣列之 Array Pattern .....	23
3.2	相位差實驗 .....	24
3.2.1	理論值計算及實驗設計 .....	25
3.2.2	實驗結果與討論 .....	25
3.3	聲源追蹤系統 .....	26
3.3.1	程式計算流程 .....	26
3.3.2	程式參數對運算時間之影響 .....	27
3.4	靜止聲源追蹤實驗 .....	27
3.4.1	陣列麥克風數比較 .....	28
3.4.2	麥克風間距比較 .....	29
3.4.3	單單體與雙單體喇叭比較 .....	30
3.4.4	本節小結 .....	30
3.5	一般環境量測結果 .....	31
3.5.1	距離一公尺以上之定點量測 .....	31
3.5.2	近場實驗 .....	32
3.6	即時聲源追蹤系統 .....	33
3.7	本章結論 .....	34
第四章 二維等間距正圓形麥克風陣列 .....		81
4.1	二維等間距正圓形麥克風陣列之 Array pattern.....	81



4.2 陣列設計與實現 .....	83
4.2.1 計算相機視角 .....	83
4.2.2 可觀測頻率範圍 .....	84
4.3 商用聲學攝影機 CAE SoundCam .....	84
4.3.1 硬體規格、量測資訊與操作功能介紹 .....	85
4.3.2 內部計算參數 .....	85
4.4 聲源平面定位實驗 .....	86
4.4.1 運算程式設定 .....	86
4.4.2 靜止聲源 .....	87
4.4.3 平面移動聲源 .....	87
4.4.4 三維空間移動聲源 .....	88
4.4.5 靈敏度測試 .....	89
4.5 本章結論 .....	89
第五章 高速內藏式主軸之振噪分析 .....	119
5.1 以聲學攝影機拍攝高速主軸之聲源定位結果 .....	119
5.2 待機狀態噪音及振動訊號量測分析 .....	120
5.3 變轉速實驗之噪音及振動訊號量測分析 .....	120
5.3.1 麥克風訊號分析 .....	120
5.3.2 加速規訊號分析 .....	122
5.4 使用自行開發之二維聲源定位系統進行量測 .....	124
5.5 本章結論 .....	124
第六章 小型馬達加工系統之振噪及瑕疵分析 .....	151
6.1 馬達加工系統介紹與實驗架設 .....	151
6.2 待機狀態之噪音分析 .....	152
6.3 定轉速之噪音分析 .....	152
6.3.1 旁波 .....	152

6.4 瑕疵軸承置換後比較 .....	153
6.5 本章結論 .....	154
第七章 機械手臂之異音問題研究 .....	177
7.1 機械手臂系統構造 .....	177
7.2 問題描述 .....	177
7.3 減速機 .....	177
7.4 使用聲學攝影機確認產生異音之部位 .....	179
7.4.1 電路板之噪音 .....	179
7.4.2 手臂動作設計與實驗結果 .....	179
7.5 使用聲學攝影機確認異音產生的轉速區間 .....	180
7.6 J2 馬達於各轉速之振動與噪音分析 .....	180
7.6.1 量測結果 .....	181
7.6.2 訊號分析與討論 .....	181
7.7 本章結論 .....	182
第八章 結論與未來展望 .....	205
8.1 結論 .....	205
8.2 未來展望 .....	208
參考資料 .....	210





## 表目錄

表 3 - 1 相位差實驗結果 (訊號入射角 $+90^\circ$ ) .....	35
表 3 - 2 相位差實驗結果 (訊號入射角 $+30^\circ$ ) .....	35
表 3 - 3 相位差實驗結果 (訊號入射角 $-45^\circ$ ) .....	36
表 3 - 4 相位差實驗結果 (訊號入射角 $-90^\circ$ ) .....	36
表 3 - 5 訊號入射角 $+90^\circ$ 與 $+30^\circ$ 之相位差誤差與計算角度誤差 .....	37
表 3 - 6 訊號入射角 $-45^\circ$ 與 $-90^\circ$ 之相位差誤差與計算角度誤差 .....	37
表 3 - 7 麥克風間距 $d = 0.1m$ , 使用 BOSE 喇叭播放白噪音之聲源定位結果統計	38
表 3 - 8 麥克風數 $M = 4$ , 使用 BOSE 喇叭播放白噪音之聲源定位結果統計 .....	38
表 3 - 9 麥克風數 $M = 4$ , 麥克風間距 $d = 0.1m$ 播放白噪音之聲源定位結果統計.	39
表 3 - 10 一般環境之定點量測結果分析統計 .....	39

## 圖目錄



圖 2 - 1 Delay and sum 原理.....	15
圖 2 - 2 聲源、參考點與麥克風位置關係示意圖.....	15
圖 2 - 3 Array pattern.....	16
圖 2 - 4 直角坐標 Array pattern .....	16
圖 2 - 5 自由聲場麥克風 (PCB Piezotronics 378B02) .....	17
圖 2 - 6 PCB Piezotronics 加速規 (a) 352C22 (b) 352C23 (c) 352C33.....	17
圖 2 - 7 加速規規格.....	18
圖 2 - 8 資料擷取卡 (NI 9234) .....	18
圖 2 - 9 DAQ 機箱 (cDAQ-9174) .....	19
圖 2 - 10 動態訊號分析軟體 FLEXDSA 操作介面.....	19
圖 2 - 11 無響室.....	20
圖 2 - 12 Bose SoundLink Mini 藍芽無線喇叭.....	20
圖 2 - 13 KINYO MPS-372 讀卡喇叭.....	21
圖 2 - 14 聲學攝影機.....	21
圖 2 - 15 數位工業相機 (GS3-U3-32S4C-C) .....	22
圖 2 - 16 相機鏡頭 (computar V0814-MP) .....	22
圖 3 - 1 一維等間距麥克風陣列.....	40
圖 3 - 2 不同 $kd$ 值之 array pattern .....	40
圖 3 - 3 相同麥克風數不同訊號波數之 array pattern.....	40
圖 3 - 4 相同 $kd$ 不同麥克風數比較 .....	41
圖 3 - 5 相位差示意圖.....	41
圖 3 - 6 相位差實驗架設示意圖.....	42
圖 3 - 7 相位差實驗實際架設照片.....	42

圖 3 - 8 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角 +90°) .....	43
圖 3 - 9 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角 +30°) .....	44
圖 3 - 10 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角 -45°) .....	45
圖 3 - 11 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角 -90°) .....	46
圖 3 - 12 $\theta$ 對 $\sin \theta$ 之關係曲線.....	47
圖 3 - 13 聲源追蹤程式運算流程圖.....	48
圖 3 - 14 實驗用掃頻訊號.....	49
圖 3 - 15 靜止聲源追蹤實驗架設示意圖.....	49
圖 3 - 16 麥克風陣列照片 ( $M = 4$ , $d = 0.1m$ ) .....	50
圖 3 - 17 靜止聲源追蹤實驗架設照片.....	50
圖 3 - 18 $M = 4$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之麥克風原始訊號與聲源定位結果....	51
圖 3 - 19 $M = 4$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果 (三維) .....	51
圖 3 - 20 $M = 4$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果 (能量對時間) .....	52
圖 3 - 21 $M = 4$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果 (瞬時聲源方位) ....	52
圖 3 - 22 $M = 2$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果.....	53
圖 3 - 23 $M = 2$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果 (三維) .....	53
圖 3 - 24 $M = 4$ , 聲源位置 $+30^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果.....	54
圖 3 - 25 $M = 4$ , 聲源位置 $+30^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 (計算精度 $0.01^\circ$ ) ...	54
圖 3 - 26 $M = 2$ , 聲源位置 $+30^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果.....	55
圖 3 - 27 $M = 2$ , 聲源位置 $+30^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 (計算精度 $0.01^\circ$ ) ...	55
圖 3 - 28 $M = 4$ 與 $M = 2$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果.....	56
圖 3 - 29 $M = 4$ 與 $M = 2$ , 聲源位置 $-45^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果.....	56
圖 3 - 30 $d = 0.1m$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果 .....	57
圖 3 - 31 $d = 0.1m$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果 (三維) .....	57
圖 3 - 32 $d = 0.05m$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果.....	58
圖 3 - 33 $d = 0.05m$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 掃頻訊號之聲源定位結果 (三維) .....	58

圖 3 - 34	$M = 4$ , $d = 0.1m$ 之 array pattern .....	59
圖 3 - 35	$M = 4$ , $d = 0.05m$ 之 array pattern .....	59
圖 3 - 36	$d = 0.1m$ 與 $d = 0.05m$ , 聲源位置 $+30^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 .....	60
圖 3 - 37	$d = 0.1m$ 與 $d = 0.05m$ , 聲源位置 $0^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 .....	60
圖 3 - 38	$d = 0.1m$ 與 $d = 0.05m$ , 聲源位置 $-45^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 .....	61
圖 3 - 39	BOSE 喇叭之單體位置 .....	61
圖 3 - 40	聲源位置 $0^\circ$ , BOSE 喇叭播放掃頻訊號之麥克風原始訊號與定位結果 .	62
圖 3 - 41	聲源位置 $0^\circ$ , KINYO 喇叭播放掃頻訊號之麥克風原始訊號與定位結果 .....	63
圖 3 - 42	BOSE 與 KINYO 喇叭 , 聲源位置 $+30^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 .....	64
圖 3 - 43	BOSE 與 KINYO 喇叭 , 聲源位置 $0^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 .....	64
圖 3 - 44	BOSE 與 KINYO 喇叭 , 聲源位置 $-45^\circ$ , 白噪音之聲源定位結果 .....	65
圖 3 - 45	平面波與球面波入射示意圖 .....	65
圖 3 - 46	一般環境量測實驗架設示意圖 .....	66
圖 3 - 47	一般環境量測實驗架設照片 .....	66
圖 3 - 48	實驗結果 ( $X = 0$ ) .....	67
圖 3 - 49	實驗結果 ( $X = 0.2$ ) .....	67
圖 3 - 50	實驗結果 ( $X = -0.2$ ) .....	68
圖 3 - 51	實驗結果 ( $X = 0.4$ ) .....	68
圖 3 - 52	實驗結果 ( $X = -0.4$ ) .....	69
圖 3 - 53	以麥克風連線中心為原點 .....	69
圖 3 - 54	近場實驗聲源移動路徑示意圖 .....	70
圖 3 - 55	實驗整體架設 .....	70
圖 3 - 56	實驗整體架設 .....	71
圖 3 - 57	路徑 1 之麥克風原始訊號 .....	71
圖 3 - 58	路徑 1 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果 .....	72



圖 3 - 59 路徑 1 之聲源定位結果與聲源距離.....	72
圖 3 - 60 路徑 2 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果.....	73
圖 3 - 61 路徑 2 之聲源定位結果與聲源距離.....	73
圖 3 - 62 路徑 3 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果.....	74
圖 3 - 63 路徑 3 之聲源定位結果與聲源距離.....	74
圖 3 - 64 路徑 4 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果.....	75
圖 3 - 65 路徑 4 之聲源定位結果與聲源距離.....	75
圖 3 - 66 聲源座標 (0,1) 之定位計算結果.....	76
圖 3 - 67 四種路徑結果與聲源距離比較.....	76
圖 3 - 68 即時聲源追蹤程式運算流程圖.....	77
圖 3 - 69 機械手臂.....	78
圖 3 - 70 安裝於第六臂上之工業相機.....	78
圖 3 - 71 一維陣列結合機械手臂控制系統示意圖.....	79
圖 3 - 72 實際架設照片.....	79
圖 3 - 73 即時聲源定位過程截圖.....	80
圖 4 - 1 二維等間距正圓形麥克風陣列.....	91
圖 4 - 2 觀測方向.....	91
圖 4 - 3 $M=4$ ，不同 $kD$ 之 array pattern.....	92
圖 4 - 4 縮小範圍至俯仰角及水平角 $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ ( $M=4$ ， $kD=3\pi$ ).....	93
圖 4 - 5 縮小範圍至俯仰角及水平角 $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ ( $M=4$ ， $kD=5\pi$ ).....	93
圖 4 - 6 相同 $kD$ ， $M=8$ 與 $M=12$ 之 array pattern.....	93
圖 4 - 7 二維陣列聲源追蹤程式運算流程圖.....	94
圖 4 - 8 理想針孔成像模型.....	95
圖 4 - 9 理想針孔成像模型之上視圖與側視圖.....	95
圖 4 - 10 含校正板之影像.....	96



圖 4 - 11  $M = 4$ ，觀測範圍水平角  $\theta_x = -22^\circ \sim +22^\circ$ 、俯仰角  $\theta_y = -17^\circ \sim +17^\circ$ ，  
 $kD = 2\pi$  之 array pattern ..... 96

圖 4 - 12  $M = 4$ ，觀測範圍水平角  $\theta_x = -22^\circ \sim +22^\circ$ 、俯仰角  $\theta_y = -17^\circ \sim +17^\circ$ ，  
 $kD = 3\pi \sim 7\pi$  之 array pattern..... 97

圖 4 - 13 各陣列直徑對應最佳觀測頻率範圍 ..... 97

圖 4 - 14 二維陣列實體 ( $M = 4$ ， $D = 0.2m$ ) ..... 98

圖 4 - 15 CAE SoundCam 硬體外觀 ..... 99

圖 4 - 16 CAE SoundCam 量測介面 ..... 99

圖 4 - 17 Auto 模式 ..... 100

圖 4 - 18 Smart 模式 ..... 100

圖 4 - 19 Off 模式 (閾值模式) ..... 101

圖 4 - 20 調整觀測頻率範圍 (頻率濾波) ..... 101

圖 4 - 21 以機械手臂夾持聲源 KINYO 喇叭 ..... 102

圖 4 - 22 整體實驗架設 ..... 102

圖 4 - 23 相機擷取影像原圖 ( $2048 \times 1536 pixels$ ) ..... 103

圖 4 - 24 以內差法取點之影像 ( $410 \times 308 pixels$ ) ..... 103

圖 4 - 25 靜止聲源之定位計算點與影像疊合 ..... 104

圖 4 - 26 移動聲源之定位計算點與影像疊合 ..... 104

圖 4 - 27 模擬聲源由正中央入射之結果 ..... 105

圖 4 - 28 陣列輸出能量矩陣俯視圖 ..... 105

圖 4 - 29 與影像疊合結果 ..... 106

圖 4 - 30 靜止聲源定位結果 ..... 106

圖 4 - 31 SoundCam 拍攝結果 ..... 107

圖 4 - 32 陣列能量矩陣最大值與喇叭中心之距離 ..... 107

圖 4 - 33 修正座標後之靜止聲源定位結果 ..... 108

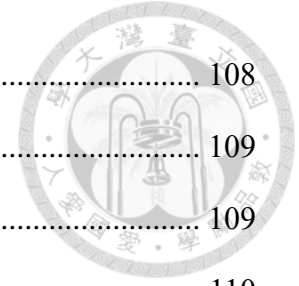


圖 4 - 34 手臂夾持聲源移動路徑.....	108
圖 4 - 35 影像與波束成型時間對應示意圖.....	109
圖 4 - 36 每幀畫面示意圖.....	109
圖 4 - 37 斜直線移動聲源定位結果.....	110
圖 4 - 38 斜直線移動聲源定位結果（時間軸修正後）.....	111
圖 4 - 39 半圓路徑移動聲源定位結果（時間軸修正後）.....	112
圖 4 - 40 三維空間移動路徑.....	113
圖 4 - 41 坐標軸方向示意圖.....	113
圖 4 - 42 三維空間移動聲源之定位結果.....	114
圖 4 - 43 三維 DIC 架設.....	115
圖 4 - 44 三維 DIC 定位結果.....	115
圖 4 - 45 靈敏度測試之麥克風原始訊號.....	116
圖 4 - 46 計算結果（第 14.26 秒至 14.46 秒）.....	116
圖 4 - 47 麥克風原始訊號與時頻譜.....	117
圖 4 - 48 聲壓均方根植.....	117
圖 5 - 1 內藏式高速主軸.....	126
圖 5 - 2 變頻器.....	126
圖 5 - 3 轉速控制器.....	127
圖 5 - 4 聲學攝影機拍攝結果(上方孔洞之一).....	127
圖 5 - 5 聲學攝影機拍攝結果(上方孔洞之二).....	128
圖 5 - 6 聲學攝影機拍攝結果(下方末端).....	128
圖 5 - 7 主軸上部兩孔洞.....	129
圖 5 - 8 主軸下方末端處.....	129
圖 5 - 9 實驗架設（麥克風）.....	130
圖 5 - 10 實驗架設（加速規）.....	130
圖 5 - 11 開關打開前後麥克風原始訊號及時頻譜.....	131



圖 5 - 12 開關打開後麥克風訊號之頻譜.....	131
圖 5 - 13 開關打開前後加速規 352C22 原始訊號及時頻譜.....	132
圖 5 - 14 開關打開後加速規 352C22 訊號之頻譜.....	132
圖 5 - 15 開關打開前後加速規 352C33 原始訊號及時頻譜.....	133
圖 5 - 16 開關打開後加速規 352C33 訊號之頻譜.....	133
圖 5 - 17 6kHz 訊號聲源拍攝結果.....	134
圖 5 - 18 變轉速實驗之麥克風原始訊號及時頻譜.....	134
圖 5 - 19 主軸轉速 6000rpm 之麥克風訊號分析結果.....	135
圖 5 - 20 主軸轉速 9000rpm 之麥克風訊號分析結果.....	135
圖 5 - 21 主軸轉速 12000rpm 之麥克風訊號分析結果.....	136
圖 5 - 22 主軸轉速 15000rpm 之麥克風訊號分析結果.....	136
圖 5 - 23 麥克風變轉速實驗頻譜圖(振幅經對數處理)[41].....	137
圖 5 - 24 主軸各轉速麥克風訊號之頻譜 (0-400Hz).....	137
圖 5 - 25 環境背景噪音之頻譜 (0-400Hz).....	138
圖 5 - 26 變轉速實驗之加速規 352C22 原始訊號及時頻譜.....	138
圖 5 - 27 變轉速實驗之加速規 352C33 原始訊號及時頻譜.....	139
圖 5 - 28 加速規 352C33 之新舊架設位置.....	139
圖 5 - 29 新架設變轉速實驗之加速規 352C33 原始訊號及時頻譜.....	140
圖 5 - 30 主軸各轉速之加速規 352C33 訊號分析結果.....	141
圖 5 - 31 敲擊實驗之敲擊位置.....	142
圖 5 - 32 主軸共振頻率敲擊實驗結果.....	142
圖 5 - 33 變轉速實驗之加速規 352C33 第 0 ~ 20 秒訊號 (6000rpm) 原始波形..	143
圖 5 - 34 變轉速實驗之加速規 352C33 第 70 ~ 90 秒訊號 (9000rpm) 原始波形	143
圖 5 - 35 變轉速實驗之加速規 352C33 第 130 ~ 150 秒訊號 (12000rpm) 原始波形 .....	143
圖 5 - 36 變轉速實驗之加速規 352C33 第 200 ~ 220 秒訊號 (15000rpm) 原始波形	

.....	143
圖 5 - 37 主軸各轉速加速規 352C22 訊號之頻譜 (0-400Hz) .....	144
圖 5 - 38 主軸各轉速加速規 352C33 訊號之頻譜 (0-400Hz) .....	145
圖 5 - 39 新架設位置主軸各轉速加速規 352C33 訊號之頻譜 (0-400Hz) .....	146
圖 5 - 40 使用自行開發二維聲源定位系統進行量測之實驗架設.....	147
圖 5 - 41 使用自行開發二維聲源定位系統進行量測之實驗結果.....	147
圖 5 - 42 實驗結果之陣列能量完整曲面俯視圖.....	148
圖 5 - 43 麥克風陣列量測所得原始訊號.....	148
圖 5 - 44 各麥克風訊號頻譜.....	149
圖 5 - 45 自製陣列於觀測訊號頻率 10300.7Hz 的 array pattern.....	150
圖 5 - 46 將 array pattern 平移後與實驗結果比對.....	150
圖 6 - 1 馬達加工系統構造.....	155
圖 6 - 2 馬達加工系統實體照片.....	155
圖 6 - 3 三菱電機 HG-KN73 伺服馬達詳細規格.....	156
圖 6 - 4 NSK 6004Z 滾珠軸承.....	157
圖 6 - 5 伺服馬達控制器實體照片.....	157
圖 6 - 6 伺服馬達控制軟體介面.....	158
圖 6 - 7 噪音量測實驗架設.....	158
圖 6 - 8 待機時麥克風訊號分析結果.....	159
圖 6 - 9 待機狀態噪音之聲學攝影機拍攝結果.....	159
圖 6 - 10 馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 之麥克風原始訊號.....	160
圖 6 - 11 馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 之麥克風原始訊號.....	161
圖 6 - 12 馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 之麥克風原始訊號 (0~0.2 秒)	
.....	162
圖 6 - 13 馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 之麥克風原始訊號 (0~0.2 秒)	
.....	163

圖 6 - 14 馬達各轉速之麥克風訊號頻譜.....	164
圖 6 - 15 馬達於各轉速之麥克風訊號時頻譜.....	165
圖 6 - 16 馬達各轉速之麥克風訊號頻譜 (8700 ~ 9300Hz) .....	166
圖 6 - 17 馬達各轉速之麥克風訊號頻譜 (12.5 ~ 14.5Hz) .....	167
圖 6 - 18 瑕疵軸承.....	167
圖 6 - 19 含有瑕疵軸承之馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 麥克風原始訊號 .....	168
圖 6 - 20 含有瑕疵軸承之馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 麥克風原始訊號 .....	169
圖 6 - 21 含有瑕疵軸承之馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 麥克風原始訊號 (4 ~ 4.2 秒) .....	170
圖 6 - 22 含有瑕疵軸承之馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 之麥克風原始訊 號 (4 ~ 4.2 秒) .....	171
圖 6 - 23 含有瑕疵軸承之馬達各轉速麥克風訊號時頻譜.....	172
圖 6 - 24 含有瑕疵軸承之轉速 600rpm 麥克風原始訊號與時頻譜 (0-4000Hz) .....	173
圖 6 - 25 加入加速規及聲學攝影機之實驗架設.....	173
圖 6 - 26 含有瑕疵軸承之轉速 2200rpm 麥克風及加速規原始訊號 .....	174
圖 6 - 27 異音發生時之聲學攝影機拍攝結果.....	175
圖 6 - 28 無異音發生時之聲學攝影機拍攝結果.....	175
圖 7 - 1 機械手臂的構成.....	184
圖 7 - 2 第二軸結構示意圖.....	184
圖 7 - 3 諧波齒輪減速機結構示意圖.....	185
圖 7 - 4 諧波齒輪減速機傳動原理.....	185
圖 7 - 5 轉矩—扭轉角線圖.....	186
圖 7 - 6 Harmonic Drive CSF 系列減速機彈簧常數對照表.....	186
圖 7 - 7 聲學攝影機實驗架設.....	187

圖 7-8 電路板產生之約 9kHz 噪音及其倍頻 .....	187
圖 7-9 機械手臂第四臂 .....	188
圖 7-10 手臂動作示意圖 .....	188
圖 7-11 聲學攝影機拍攝結果 (觀察頻率 9800~14600Hz) .....	189
圖 7-12 聲學攝影機拍攝結果 (觀察頻率 4000~7200Hz) .....	189
圖 7-13 J2 馬達轉速 20%~30%拍攝結果 .....	190
圖 7-14 J2 馬達轉速 30%~40%拍攝結果 .....	190
圖 7-15 馬達轉速對時間圖 .....	191
圖 7-16 拉長加速時間 (a) 加速度 9% (b) 加速度 15% (c) 加速度 100% ....	192
圖 7-17 設定不同加速度拍攝結果 .....	192
圖 7-18 設定轉速 40%，加速度 15%之轉速對時間圖 .....	193
圖 7-19 設定轉速 40%，加速度 15%之拍攝結果 .....	193
圖 7-20 設定轉速 40%，加速度 11%之轉速對時間圖 .....	194
圖 7-21 設定轉速 40%，加速度 11%之拍攝結果 .....	194
圖 7-22 實驗架設 .....	195
圖 7-23 實驗架設 (加速規 352C22) .....	195
圖 7-24 實驗架設 (加速規 352C33 及麥克風) .....	196
圖 7-25 麥克風、加速規 352C22 及 352C33 原始訊號 .....	197
圖 7-26 麥克風訊號 STFT 結果 .....	198
圖 7-27 加速規 352C33 訊號 STFT 結果 .....	199
圖 7-28 加速規 352C22 訊號 STFT 結果 .....	200
圖 7-29 J2 馬達各轉速之麥克風訊號 FFT 結果 .....	201
圖 7-30 J2 馬達各轉速之加速規 352C33 訊號 FFT 結果 .....	202
圖 7-31 J2 馬達各轉速之加速規 352C33 訊號 FFT 結果 (低頻段) .....	203
圖 7-32 J2 馬達各轉速之加速規 352C22 訊號 FFT 結果 (0-500Hz) .....	204







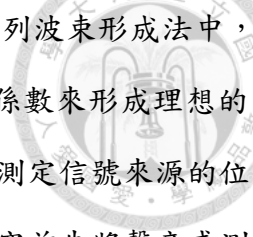
# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

「聽音辨位」是人類的本能，但在這個自然的反應背後是經由一連串身體的機制運轉結果，大腦憑著兩耳聽到聲音的時間及強度差，加上心理聲學的作用，就能辨識出聲音所在的方位。人體是如此精密又複雜，使得聽覺不完全是波的力學現象，那麼使用單純的機械是否能做到同樣、甚至人耳所不能及之事呢？

為了使機械系統可以辨別環境中的聲源方向和距離，聲源定位技術便應運而生；早期聲源定位技術多應用於聲納系統中，因水下的電磁干擾非常劇烈，使聲納系統的探測精度受距離影響極大，所以聲源信號追蹤法便顯得格外重要，並且大量的應用於國防科技上；隨著電腦運算速度的提升，數位訊號處理、人工神經網路、自我調節陣列處理與訊號處理技術之速度皆顯著地成長，因此帶動了聲源定位系統的再次發展，並於航太科學、語音增強、聲音辨別與生物醫學等領域上有了進一步的實際應用；目前的工業化社會中亦有許多與聲源定位有關的問題，因無法利用人工的方式解決，故須建立一套自動化的聲源定位系統來輔助日常與工業的需求；依照聲源的種類可以分為兩類，一種是與人聲相關的語音定位，例如智慧音箱、服務型機器人若能辨識出說話者的方位，便可以人性化地轉向與其互動，同時針對此方向調整收音方式，得到更好的聲音品質，對語音處理的相關技術研究有很大的幫助；另一類是工業噪音定位，在工業中，噪音與異響通常意味著產品不合格或是發生故障，若要解決這些問題，必須進行噪音檢測；通過聲源定位技術確定產生問題的位置，從而幫助工程師快速而有目標性地解決問題，具體問題則例如工具機異音故障檢測、管線洩漏查找，或是在汽車結構設計過程中，若能以聲源定位快速找出噪音來源，就能進行結構改善。

近年來利用多個麥克風排成陣列（Microphone array），以波束成型法



(Beamforming) 進行聲源定位的技術日漸成熟，基於麥克風陣列波束形成法中，陣列輸出是由各個陣列元素輸出的加權總和，並通過調整加權係數來形成理想的波束，藉由分析空間波束能量可確定聲源信號的方向資訊，以此測定信號來源的位置，目前此方法已漸漸商品化並運用在不同的領域中；因此本研究首先將聲音感測器以直線的方式排列建立一維等間距線性陣列系統，並使用波束成型演算法進行聲源定位，進而建構完整的自動聲源追蹤系統；接著為了追蹤空間中的聲源位置，以一維陣列系統為基礎建立二維的聲源定位陣列，利用不同的排列形式設計各種陣列幾何的配置並探討對應的聲源辨識能力與解析度，進而找出最佳的陣列排序方式；接著將二維陣列系統與工業相機結合，建立出可視化的聲場量測系統，並設計靜止、二維移動和三維空間移動的聲源實驗，測試此系統的靈敏度與定位能力；最後將本系統與三維數位影像相關法 (digital image correlation, DIC) 結合可精準定位聲源的空間位置，並將分析結果與市售的聲學攝影機相互比對以驗證本系統之可行性。

## 1.2 文獻回顧

一般較為準確的聲源定位均需仰賴麥克風陣列，而現有使用麥克風陣列的聲源定位技術主要有以下幾類：第一類為直接計算聲源到達兩麥克風之間的時間差 (Time difference of arrival, TDOA)，透過麥克風陣列和聲源之間的幾何關係求得聲源的方向角[1]或位置座標[2]；而計算 TDOA 的方式中最傳統且廣泛被使用的為交互相關技術 (Cross correlation)，將兩個麥克風收到的訊號不斷的位移後再相乘，當乘積為最大值時的時間位移量就是訊號到達此兩麥克風所產生的時間差，此方法優點為計算複雜度低，因此可以快速運算，但缺點是會因雜訊影響而大幅下降準確率。為了改善在雜訊下的準確率，Knapp 等人在 1976 年提出 Generalized Cross Correlation (GCC) [3]，利用權值降低雜訊對訊號的影響並提升訊號強度以增加準確度。Carter 在 1987 年將以前的各種 GCC 方法統整於[4]中，包含 Smoothed Coherence Transform (SCOT)、Roth Processor、Wiener Processor、Phase Transform

(PHAT) 與 Maximum Likelihood (ML) 等五種方法，目前以 PHAT 和 ML 兩種方法較為常見。

第二類為利用波束成型處理陣列訊號[5-7]，此方法是利用傳感器陣列的指向性抑制非觀測方向的訊號，也可以說是一種空間濾波器 (Spatial filtering)，此方法除了能夠進行聲源定位與追蹤，也應用於強化信號、降噪與聲場識別等技術領域。在聲源方位估測中主要是基於遠場假設，當聲波波前傳至陣列時為平面，而 delay and sum 為當中最基本的算法，以補償每個麥克風訊號的時間延遲來估算聲源入射方向[8]，此方法需要麥克風數量較多的陣列才能達到較好的效果，因為越多麥克風指向性越強，減少其他方向訊號的干擾。後來以 delay and sum (DAS) 為基礎慢慢衍生出很多演算法，Capon 提出了可以消除干擾源的 MVDR[9]，透過改變各訊號的權重讓非聲源角度之聲音接收達到最低，因此不需要很多麥克風即可達到高解析度的效果；Schmidt 提出的 MUSIC[10]將訊號做特徵值分解，分離出訊號子空間與雜訊子空間，利用這兩個子空間的正交性產生聲源方位向量的最佳預測值；Roy 等人提出的 ESPRIT[11]演算法則是同樣分解出訊號與雜訊子空間後利用訊號子空間旋轉後不變的特性，比較兩個子空間的關係來估測訊號方向。雖然這些方法有較高的準確率，但是缺點為計算較複雜，所需時間較長。

第三類為聲音全像法 (Acoustic holography)，是把全息技術引進聲學領域而形成的新學科，利用波陣面重建的原理進行成像，能夠重構被測物周圍的整個聲場，相較於波束成型法的優勢是對於低頻聲源也能保持很好的分辨力。1960 年代末期 Graham 和 Watson 首先致力於長波之聲音全像及平面聲場的輻射問題[12, 13]，E.G. Williams 等人在 1980 年首次應用聲音全像法重構聲源[14]，並於 1985 年及 1987 年提出更完整的近場聲音全像法 (Near field Acoustics Holography, NAH) 理論基礎與重構計算方法，改善了聲場解析度[15, 16]；1987 年 Hald 與 Ginn 利用交互頻譜 (Cross spectrum) 方法改良全像法的量測技術，提出了聲場空間轉換法[17, 18]，隔年 Loyau 等人以聲強 (Sound intensity) 觀點建立全像法量測技術，將量測範圍擴展至寬頻，稱之為寬頻全像法 (Broadband Acoustic Holography from Intensity



Measurement, BAHIM) [19]。

第四類則是用學習的方式得到聲源位置[20]，在每個偵測點錄製訊號後，將所得麥克風訊號以傅立葉轉換將兩訊號中各頻率的振幅比例及相位角學習成高斯分布作為資料庫，之後偵測到訊號時利用 maximum likelihood 演算法比對資料庫和接收到的訊號吻合度求出聲源位置。

麥克風的擺放設計也是研究主題，因為陣列元素的幾何排列方式對聲源定位的效果有很大影響，各自適用的觀測頻段與空間特性皆不相同；聲音及振動量測設備公司 Brüel & Kjær 即於 2004 年提供了一系列陣列元素幾何排列圖形的研究與建議，包含規則陣列與不規則陣列對於解析度與聲源辨識能力的影響[21]；劉冠良、白明憲於 2009 年以數值模擬的方式來最佳化麥克風的配置，並結合模擬退火法和蒙地卡羅法可有效的找出一個良好的配置，並得到相應的波束圖和相對均勻的麥克風分布[22]；蔡傑名、胡竹生則於 2010 年以估測麥克風陣列接收之訊號所組成的矩陣奇異值對估測變動量的影響計算麥克風的最佳擺放方式[23]。

關於二維聲源定位與影像結合成聲源可視化分析系統的實現與實例應用則有以下幾篇相關研究：P.A. Ravetta 等人用 32 支麥克風排成螺旋型陣列，在風洞環境內對飛機起降輪的噪音源檢測[24]；M.G. Smith 等人討論麥克風陣列應用於戶外遠場、風洞及室內工廠三種不同環境下，如何設計增加量測效能[25]；H.E. Camargo 等人利用 121 支麥克風組成陣列，對篩煤機的噪音進行量測，針對各頻率進行音源可視化分析，計算出各頻率下的主要噪音源[26]；卓昭成與鄭泗東將 16 支麥克風排列成正圓形二維陣列，比較 DAS 與 MV 兩種演算法在即時聲源定位計算中的效果[27]。

針對工業噪音研究大致分為噪音改善[28-32]以及故障診斷與監測[33-37]，國內應用聲源定位技術於加工機械噪音源查找的相關研究則有李枝煌、白明憲於 1995 年利用聲學相位陣列雷達系統判定工業噪音源[38]，以及陳勁誠、白明憲於 2013 年應用近場與遠場麥克風陣列於鑽床與車床等工具機噪音源識別[39]，然而此兩篇論文偏重於自行開發系統於實際案例的應用測試，沒有針對產生的噪音原



因與發聲之位置進行探討。有鑑於此，本研究不但利用聲源定位系統進行音源位置的探討，更將此系統推廣於振噪分析與系統整合上，期望有效的將聲源定位技術與傳統量測工具相互結合，以建構更完整且可靠的振噪分析技術。

## 1.3 論文內容簡介

### 第一章 前言：

詳述本論文之研究動機及文獻回顧，並針對各章節論文內容簡敘其研究重點。

### 第二章 波束成型原理、訊號分析方法及實驗設備介紹

介紹本研究中計算聲源定位使用的演算法原理，接著介紹快速傅立葉以及短時傅立葉轉換兩種數據處理方法，是聲源定位演算法中重要的部份，同時也是振噪訊號分析常用的方法。第三部分介紹研究中使用到的儀器設備規格及特性。

### 第三章 一維等間距直線麥克風陣列

首先以理論探討等間距線性陣列的特性，以及聲源擺放角度對計算結果誤差有放大效應，並以實驗相互驗證，同時探討不同參數對定位實驗結果之影響，接著於一般環境中進行實驗，並且因為演算法皆假設聲源為遠場，因此透過將聲源由近至遠移動，觀察其定位結果角度變化，可獲得在使用此演算法下的適用距離，最後將此定位系統設計一個初步的應用，將其與機械手臂控制系統結合，利用陣列即時計算並控制手臂轉向追蹤聲源。

### 第四章 二維等間距正圓形麥克風陣列

本章呈實現二維聲源可視化系統的過程與實驗結果，與前一章同樣先以理論探討等間距正圓性陣列的特性，整理出陣列設計規則，此外在本章中詳細介紹商用聲學攝影機 SoundCam，並以其規格作為自開發系統的程式設定參考，最後將實現之系統進行靜止聲源定位以及移動聲源追蹤測試實驗，討論實驗結果中的誤差問題並將其進行修正，由於此系統僅能進行平面聲源追蹤，若進行三維聲源追蹤，缺乏的深度位置資訊可由本實驗室開發之數位影像相關法提供。



## **第五章 高速內藏式主軸之振噪分析**

針對實驗室的高速內藏式主軸使用聲學攝影機、麥克風及加速規進行振噪分析，討論主軸構造對聲源查找的影響，接著探討待機狀態時的噪音振動訊號來源，並且針對變轉速實驗中出現的異音深入研究找出問題成因，此外也使用第四章中自行開發的二維聲源定位系統進行量測。

## **第六章 小型馬達加工系統之振噪及瑕疵分析**

針對實驗室的小型馬達加工系統使用聲學攝影機、麥克風及加速規進行量測，觀察運轉中的聲音與振動訊號，探討訊號出現的現象，並且故意將軸承中其中一個滾珠進行破壞，發現破壞後的軸承於運轉過程中出現異音，利用聲學攝影機成功找出此異音來源。

## **第七章 機械手臂之異音問題研究**

針對上銀科技 RT605-710-GB 關節式機械手臂之固有異音問題進行量測分析研究，利用聲學攝影機找出發出異音的零件部位與產生異音的轉速區間，針對各轉速使用麥克風與加速規進行振噪分析，並且探討減速機共振與此異音之關係。

## **第八章 結論與未來展望**

針對本論文各章節之研究成果進行回顧與統整，進而提出實驗的改善方式與未來可深入研究的方向。

## 第二章 波束成型原理、訊號分析方法及實驗設備介紹

本研究除了應用波束成型演算法 (beamforming) 建立聲源定位系統，亦應用既有的量測儀器對加工設備進行振噪分析，本章將介紹波束成型演算法理論及研究中所應用的訊號分析方法，並針對實驗中使用的儀器設備進行性能及規格簡介。

### 2.1 波束成型

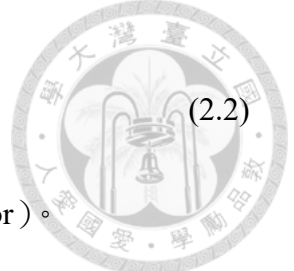
兩個以上的傳感器即可稱為陣列 (array)，而波束成型是一種使用傳感器陣列定向發送或接收訊號的訊號處理技術。因陣列具有指向性，透過調整陣列的參數可以形成不同的指向特性，使得某些角度的訊號獲得建設性干涉，而另一些角度的訊號獲得破壞性干涉。波束成型既可以用於訊號發射端，也可以用於訊號接收端，除了可以用來估測訊號來源方向，也可以用於強化訊號、聲場識別等其他技術領域，在本研究中用於訊號接收端，也就是麥克風陣列，來進行聲源方向估測。

#### 2.1.1 Delay and Sum Beamforming

Delay and sum 是波束成型中最古老又簡單的陣列處理演算法，但至今仍然被廣泛使用。假設有一麥克風數為  $M$  的陣列，當一個已知訊號被陣列所接收，則此  $M$  支麥克風所收到的聲音訊號為  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、...、 $x_M(t)$ 。因為每支麥克風與聲源距離不同，因此接收到的訊號與某一參考點就會有不同的已知時間差  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、...、 $\tau_M$ 。若將每個訊號進行時間補償，使其變為  $x_1(t-\tau_1)$ 、 $x_2(t-\tau_2)$ 、...、 $x_M(t-\tau_M)$ ，再將這些訊號相加後除以麥克風數  $M$  即為陣列輸出  $y(t)$ ，因補償後的各訊號都是相同相位，所以相加後應是最大的建設性干涉。陣列輸出  $y(t)$  可以下式表示：

$$y(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_m(t-\tau_m) \quad (2.1)$$

此過程即為 delay and sum，原理示意如圖 2 - 1。而在計算上須轉至頻域做分析，因此將式(2.1)改寫為頻域的形式：



$$Y(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X_m(\omega) e^{-j\omega\tau_m} \quad (2.2)$$

其中  $e^{-j\omega\tau_m} = SV_m$ ，稱為第  $m$  個麥克風的引導向量 (steering vector)。

來自某一方向的訊號源到達陣列中每支麥克風的時間差可由聲速與麥克風的位置向量計算而得。考慮一陣列其麥克風數為  $M$ ，其中第  $m$  個麥克風的相對參考點位置向量為  $\mathbf{r}_m$ ，如圖 2-2 所示。現有一未知方向的單頻遠場聲源，其波前為平面波，聲速為  $c$ ，假設以單位向量  $-\mathbf{k}_s$  的方向往參考點傳播，則波前抵達第  $m$  個麥克風相對參考點的時間延遲為  $\tau_m^* = -d/c$ ，距離  $d$  可由聲源位置之單位向量  $\mathbf{k}_s$  與麥克風位置向量  $\mathbf{r}_m$  內積而得，表示為  $d = \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_m$ ，代入後得

$$\tau_m^* = -\frac{\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_m}{c} \quad (2.3)$$

若此聲音訊號角頻率為  $\omega$ ，則訊號時間延遲  $\tau_m^*$  在頻域上會表示成  $e^{-j\omega\tau_m^*}$ ，代入式(2.3)可得

$$e^{j\omega \frac{\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_m}{c}} \quad (2.4)$$

又因  $k = \frac{\omega}{c}$ ，而此訊號之波向量為  $\mathbf{k}_s = -k\mathbf{k}$ ，所以式(2.4)可再寫成

$$e^{jk\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_m} = e^{-jk\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m} \quad (2.5)$$

則第  $m$  個麥克風所接收到的聲音訊號可表示為

$$X_m(\omega) = B_m e^{-jk\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m} \quad (2.6)$$

其中  $B_m$  為第  $m$  個麥克風接收之聲音訊號的振幅。

由前式得到了每個麥克風接收到的聲音訊號，但因為聲源方向  $\mathbf{k}_s$  為未知，所以可以假想另一個相同波數  $k$ ，波向量為  $\mathbf{k} = -k\mathbf{k}$  的聲源，對此假想聲源方向做 delay and sum。與前述概念相同，式(2.2)中引導向量  $e^{-j\omega\tau_m}$  可寫為

$$e^{-j\omega \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m}{c}} = e^{-jk\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m} = e^{jk\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m} \quad (2.7)$$

將式(2.6)及式(2.7)代入式(2.2)可得陣列輸出：

$$Y(\mathbf{k}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X_m e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M B_m e^{-j\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_m} e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M B_m e^{j(\mathbf{k}-\mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r}_m} \quad (2.8)$$

以矩陣表示陣列輸出能量為：

$$P = \sum |Y|^2 = SV^H \cdot R_{xx} \cdot SV \quad (2.9)$$

其中  $SV(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} SV_1 \\ \vdots \\ SV_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1} \\ \vdots \\ e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_M} \end{bmatrix}$ ，稱為引導向量矩陣，不同的陣列擺放方式會有各自

的引導向量矩陣， $SV^H$  為  $SV$  的共軛轉置矩陣， $R_{xx} = XX^H$ 。

由式(2.8)可知，當  $\mathbf{k} = \mathbf{k}_s$ ，也就是陣列觀測方向等於聲源方向時陣列輸出為最大。換句話說，將 delay and sum 的概念運用在未知訊號來源方向估測上，可以透過反算的方式，對估測範圍內所有方向都做一次 delay and sum，陣列輸出最大時此方向即為訊號來源方向，不過所謂的「所有方向」是連續的，但實際計算上必須離散化，也就是設定計算精度，例如  $-90^\circ \sim +90^\circ$  每一度做一次計算，則其計算精度為  $1^\circ$ ，隨著計算精度的提高，運算所需的時間也會增加。

## 2.1.2 Array pattern 與 Beam pattern

在陣列技術中經常使用陣列圖形 (array pattern) 來談討陣列對於不同方位的響應。將式(2.8)中的  $\sum_{m=1}^M e^{j(\mathbf{k}-\mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r}_m}$ ，令  $\mathbf{K} = \mathbf{k} - \mathbf{k}_s$  後寫為  $W(\mathbf{K}) = \sum_{m=1}^M e^{j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_m}$ ，對角度作圖即為陣列圖形。例如圖 2 - 3 為兩麥克風間距 0.1m，訊號頻率 2000Hz 所形成的陣列圖形，其軸向座標為角度，徑向座標則為正規化後的陣列輸出能量，由於 array pattern 為對稱圖形，在後續討論中僅考慮右半邊之圖形；或是也可以畫成直角坐標，如圖 2 - 4，也可以理解為當已知輸入訊號方向為  $0^\circ$  時，對各方向做 delay and sum 所得的陣列輸出能量。

圖中最大的響應稱為主瓣 (main lobe)，兩旁次大的響應稱為旁瓣 (side lobe)，若調整不同的參數，例如麥克風數  $M$ 、波數  $k$  等會呈現不同的陣列圖形，就能以此觀察不同陣列的特性，根據需求來設計陣列。在後續的章節中將針對一維直線等間

距麥克風陣列以及二維等間距正圓形麥克風陣列的陣列圖形做討論。

而實際上對未知方向  $\theta$  訊號做波束成型計算後所得的陣列輸出能量對角度作圖結果則稱為波束圖形 (beam pattern)，其圖形應為該陣列的 array pattern 旋轉  $\theta$  角度的結果，也就是主瓣將指向訊號入射方位，以此判斷聲源方向。

## 2.2 數據分析方法

分析振噪訊號常用的兩種方法為頻譜分析以及時頻譜分析，能夠呈現訊號的頻率域資訊。本研究分別使用快速傅立葉轉換以及短時傅立葉變換對訊號進行計算分析，本小節將說明此兩種分析方法之計算方式以及原理。

### 2.2.1 快速傅立葉轉換

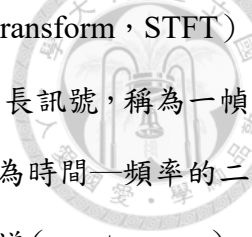
傅立葉轉換能將訊號從時域轉換到頻域的表示，由於時域波形會以離散值的形式儲存，因此無法使用標準的傅立葉轉換來轉換成頻域。而離散傅立葉轉換 (Discrete Fourier Transform, DFT) 是傅立葉轉換的變形，用來將離散時域波形轉換成離散頻域頻譜。本研究使用的快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 則是快速計算 DFT 的方法，能夠降低 DFT 的計算複雜度。若  $x(n)$  為長度為  $N$  的離散時域訊號，轉換後的頻域訊號  $Y(k)$  定義如下：

$$Y(k) = \sum_{j=1}^N X(j) W_n^{(j-1)(k-1)}$$

其中  $W_n = e^{-2\pi i/n}$ ，而根據取樣定理，對於一個給定的取樣頻率  $f_s$ ，完全重建訊號所允許的最高訊號頻率為  $f_s/2$ ，因此所呈現的頻譜範圍為  $0 \sim f_s/2$ ，另外本研究只探討各頻率的量值部分，因此會再將頻域訊號  $Y$  取絕對值以比較各頻率訊號強度大小。

### 2.2.2 短時傅立葉變換

當分析的訊號是非平穩的訊號時，頻譜分析無法完整表達訊號特徵。若要呈現



時間和頻率的變化，可使用短時傅立葉轉換 (Short-time Fourier transform, STFT) 來作分析。短時傅立葉轉換是將長時間訊號切割成數個較短的等長訊號，稱為一幀 (frame)，再分別將每一幀做傅立葉轉換。此種方法能使訊號轉為時間—頻率的二維函數，同時提供訊號發生的時間和頻率資訊，繪製後稱為時頻譜 (spectrogram)。然而時間與頻率的解析度受每幀的長度 (frame length) 限制，長度越短代表時間切割越細，但相對地頻率解析度就越小，長度越短則頻率資訊較精確，但時間解析度越小。此外前後幀的訊號可以重疊，重疊長度稱為 overlap，overlap 越大代表時間步進越小，因此時間解析度也越大。

## 2.3 實驗設備儀器介紹

### 2.3.1 MATLAB

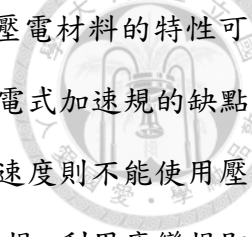
本研究中所有數據處理運算平台皆使用版本為 R2017b MATLAB 程式語言運作，MATLAB 由美國 The MathWorks 公司發行，是一款專精於矩陣操作的數學運算軟體，在工程計算上的演算法開發、數值分析和計算、影像的處理運作、使用者介面邊寫、呼叫其他軟體或控制周邊儀器，以及聲音訊號的分析處理都能達成。

### 2.3.2 PCB 1/2” 自由聲場麥克風

本研究中使用之四隻麥克風皆為自由聲場電容式麥克風，由美國 PCB Piezotronics 公司生產，型號為 378B02，尺寸為 1/2 inch 並搭配型號為 426E01 的前置放大器。其靈敏度分別為 51.94 mV/Pa、49.21 mV/Pa、52.14 mV/Pa 及 48.72 mV/Pa，量測頻率 3.15 Hz ~ 20 kHz，動態範圍 146 dB，實體如圖 2-5。

### 2.3.3 加速規

本研究實驗所使用之加速規 (Accelerometer) 有三種，皆由美國 PCB Piezotronics 公司所生產，型號分別為 352C22 (見圖 2-6 (a))、352C23 (見圖 2-6 (b))、352C33 (見圖 2-6 (c))。此加速規為壓電式加速規，相關規格如圖 2-7 所示。



壓電加速規為現今常見的一種加速規，其作用原理為利用壓電材料的特性可以得知所承受的力，並由力平衡的方式計算出加速度之值，但壓電式加速規的缺點在於無法量測 0 ~ 10Hz 時的加速度，因此若要量測低頻時的加速度則不能使用壓電式加速規，一般常見且可量測低頻訊號的加速規為應變式加速規，利用應變規即可推算所承受的力並進而計算出加速度之值，然而在本論文中因為都是進行動態實驗，因此選用壓電式加速規對於實驗量測結果是沒有問題的。

### 2.3.4 資料擷取裝置

麥克風將空氣中的音壓變化轉為電訊號後需使用資料擷取裝置將此電訊號輸入至電腦。資料擷取 (data acquisition, DAQ) 乃利用不同形式的感測器進行量測時，作為電腦與感測器之間的橋梁，將類比訊號數位化，交給電腦做後續分析。本研究使用美商國家儀器 (National Instruments, NI) 所開發之裝置，包含 DAQ 介面卡及搭配之機箱。DAQ 介面卡型號為 NI 9234 (見圖 2-8)，此介面卡擁有 4 個同步取樣類比輸入通道的動態訊號擷取模組，而每通道以最高 51200Hz 取樣速度同步進行訊號的數位化作業，內建抗交疊濾波器可自動調整所需的取樣率，動態範圍為 102 dB，並具有軟體選擇 IEPE 訊號處理功能，適用於加速規與麥克風。與介面卡搭配之機箱型號為 cDAQ-9174，其具有四個插槽，並有 USB 隨插即用的便利性，實體見圖 2-9。

### 2.3.5 動態訊號分析軟體 FLEXDSA

本研究使用巨克富科技公司的動態信號分析軟體 FLEXDSA 配合 DAQ 裝置儲存聲壓及振動訊號。FLEXDSA 是一套可攜式的動態信號分析軟體，可使用在各種研究與開發的應用上，包括機械振動、噪音問題或一般的頻譜分析。優點在於可即時顯示量測訊號，並進行初步的訊號處理如頻譜分析，能迅速檢驗量測結果是否符合實驗者預期。相較過去擷取時域訊號至電腦轉換頻域訊號，再針對實驗架設進行調整後重新進行實驗，節省下許多處理過程與時間。軟體操作介面見圖 2-10。



### 2.3.6 無響室

在進行聲學量測實驗時，為了要避免背景噪音的干擾，需要一間隔音性能優良的聲學實驗室以隔絕外部噪音。因為隔音材料質地堅硬，會形成良好的反射面，反射音對量測的精確性會造成很大的影響；若聲波在介質中傳遞時於各個方向都沒有反射，介質中任意點的聲波皆直接來自於音源，是為自由聲場 (Free Field)。為了完成一個符合自由聲場的測試環境，必須在室內壁面包括地板都安裝吸音材料吸收反射音。因此精密等級高的聲學實驗室會安裝符合 ISO 規範要求之吸音楔 (Wedge)，並且進行室內背景噪音以及自由聲場特性檢驗確認合格後，才能進行如 ISO、ANSI、JIS、CNS 等標準的產品聲音特性的量測。本論文所使用之無響室內部淨空間為  $300\text{cm} \times 520\text{cm} \times 200\text{cm}$ ，其四周、地板以及天花板皆為三角錐形狀的吸音材料排列而成，外部隔音的材質則由鋼板建製而成，其吸音楔截止頻率為 100Hz，設備整體自然頻率為 8Hz，無響室位於台大工科海洋所音響實驗室。實際照片見圖 2 - 11。

### 2.3.7 Bose SoundLink Mini 藍芽無線喇叭

本研究之波束成型理論相關實驗使用市售揚聲器播放測試訊號作為聲源，其中一種揚聲器為 Bose SoundLink Mini 藍芽無線喇叭 (見圖 2 - 12)，擁有兩個單體，及橢圓形被動式輻射單體以增強中低頻，音色澎湃雄厚。此揚聲器重量 655g，尺寸為  $50.8 \times 180.3 \times 58.4\text{mm}$ 。

### 2.3.8 KINYO MPS-372 讀卡喇叭

本研究使用的另一個揚聲器為 KINYO MPS-372 讀卡喇叭，其特點為體型輕巧，並且為立方體，因此非常適合以機械手臂夾持，並做特定軌跡的運動，方便實驗。此揚聲器有一個單體，響應頻率 40Hz~18kHz，尺寸為  $50 \times 50 \times 50\text{mm}$ ，重量 140g，實體如圖 2 - 13。



### 2.3.9 聲學攝影機

除一般使用的加速規及麥克風做相關量測外，本研究加入了市售的商用聲學攝影機進行振噪量測及分析。聲學攝影機可以即時進行聲源定位，並與影像結合，達成聲音可視化的效果，廣泛應用於各種機械之故障、異音噪音及洩漏診斷檢測。本研究使用的聲學攝影機為德國公司 CAE Software & Systems 開發之 SOUNDCAM 聲音攝影機，其陣列共具有 64 個麥克風、四個照明用 LED 燈與記錄畫面用之攝影機，重量約 3kg，可以手持或架於腳架上進行量測，並且其聲源定位演算法原理為波束成型法，分析結果可用圖片或影片呈現。實體如圖 2-14 所示，詳細使用方法與量測畫面資訊將於第四章中詳細介紹。

### 2.3.10 數位工業相機

本研究開發之聲源二維定位系統所使用的工業相機為加拿大公司 Point Grey Research Inc. 產品，型號為 GS3-U3-32S4C-C，此相機之感光元件 (CMOS sensor) 解析度為  $2048 \times 1536 \text{ pixels}$ ，最大解析度下最高幀率可達 121FPS (frame per second)，圖像深度 12-bit，搭配 USB 3.0 傳輸介面，實體如圖 2-15 所示。

### 2.3.11 相機鏡頭

本研究搭配數位工業相機所使用之相機鏡頭為日本公司 computar 之產品，型號為 V0814-MP，其焦距長 (focal length) 8mm，光圈 (aperture) F1.4~F16.0，工作距離 (work distance) 為 0.1m ~ Inf，手動變焦。實體如圖 2-16 所示。

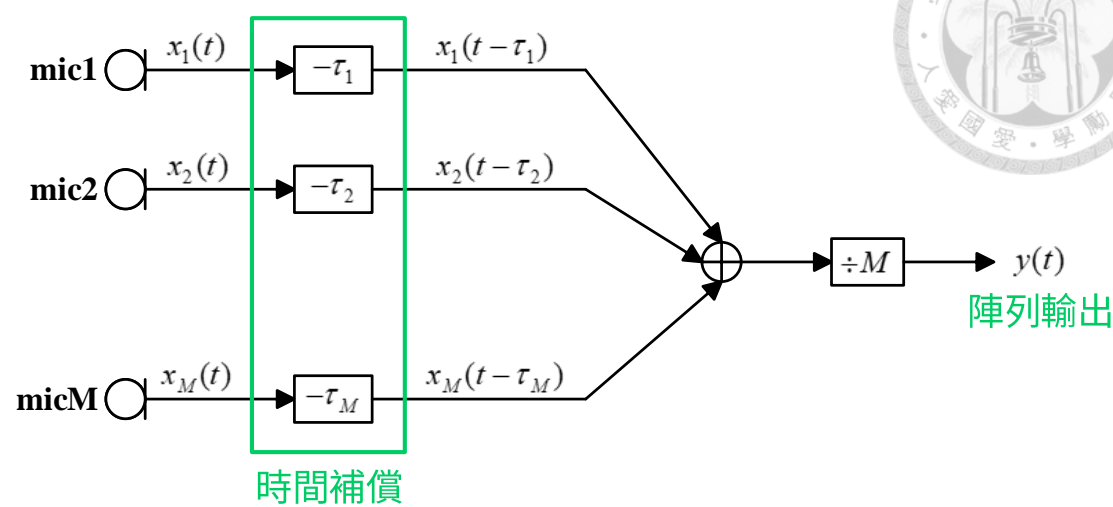


圖 2 - 1 Delay and sum 原理

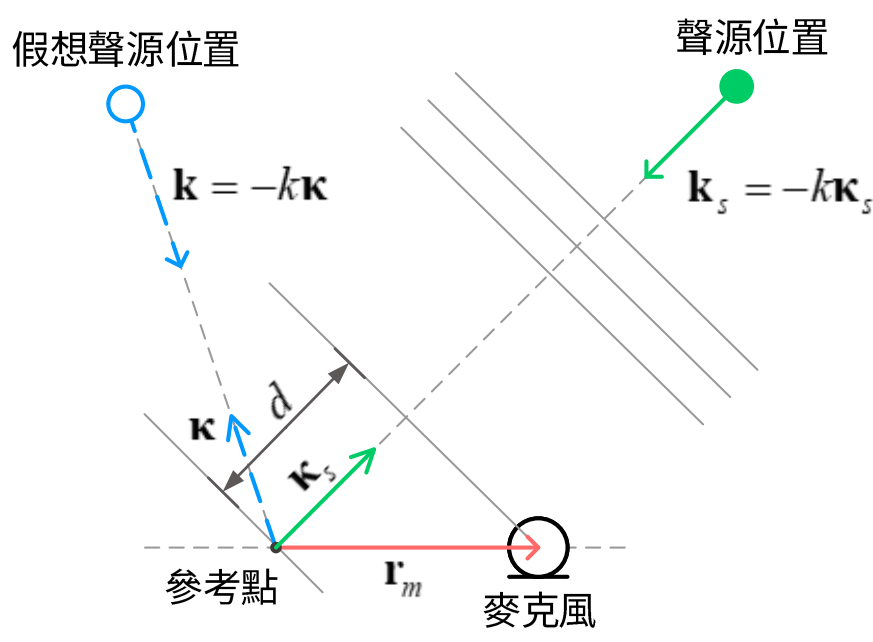


圖 2 - 2 聲源、參考點與麥克風位置關係示意圖

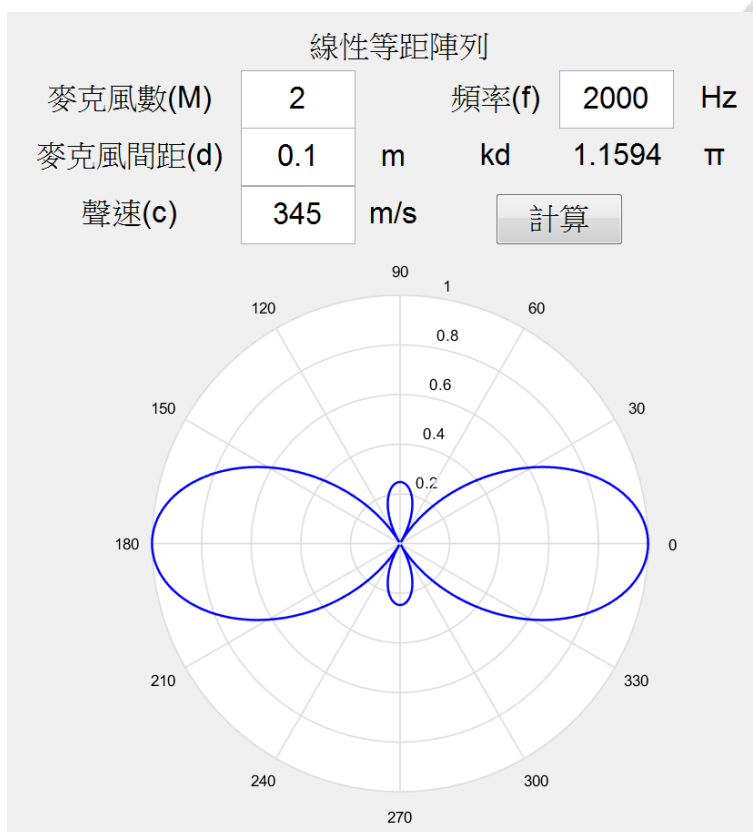


圖 2 - 3 Array pattern

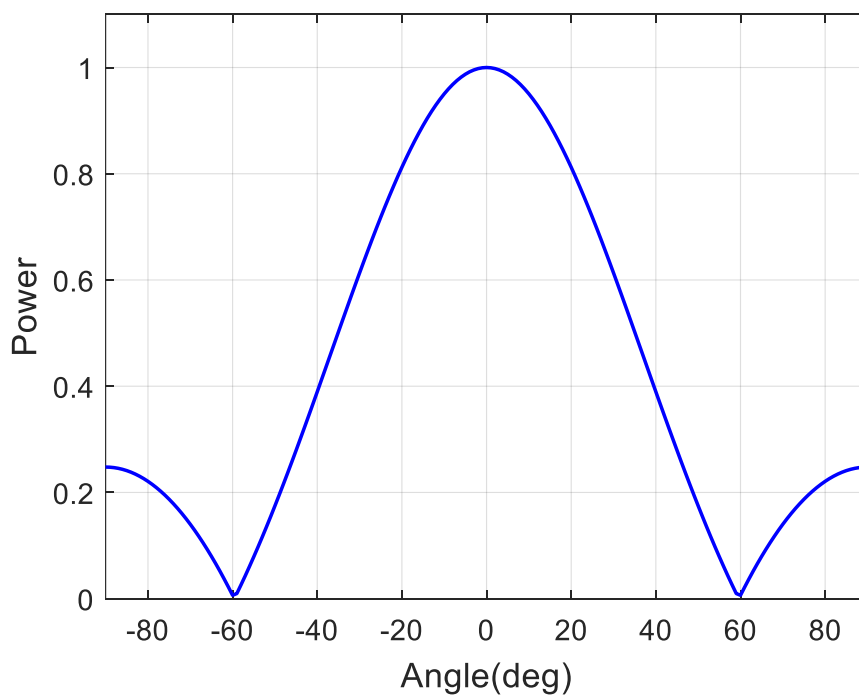


圖 2 - 4 直角坐標 Array pattern



圖 2 - 5 自由聲場麥克風 (PCB Piezotronics 378B02)

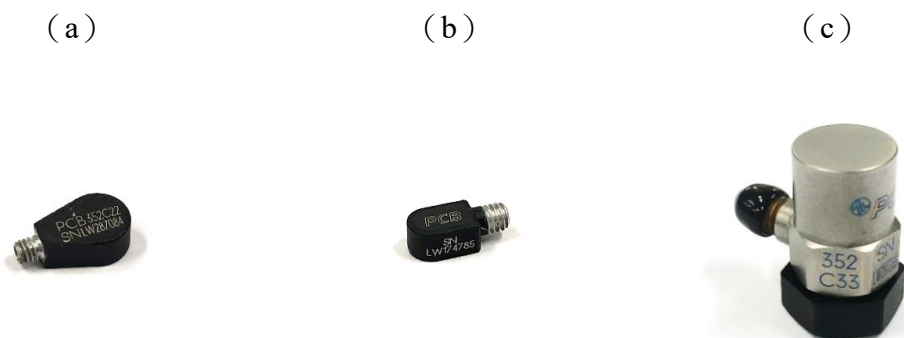


圖 2 - 6 PCB Piezotronics 加速規 (a) 352C22 (b) 352C23 (c) 352C33

型號	352C22	352C23	352C33
靈敏度	10 mV/g	5 mV/g	100 mV/g
量測範圍	±500 g	±1000 g	±50 g
響應頻率	1 to 10 kHz	2 to 10 kHz	0.5 to 10 kHz
重量	0.5 gm	0.2 gm	5.8 gm

圖 2 - 7 加速規規格



圖 2 - 8 資料擷取卡 (NI 9234)



圖 2 - 9 DAQ 機箱 (cDAQ-9174)

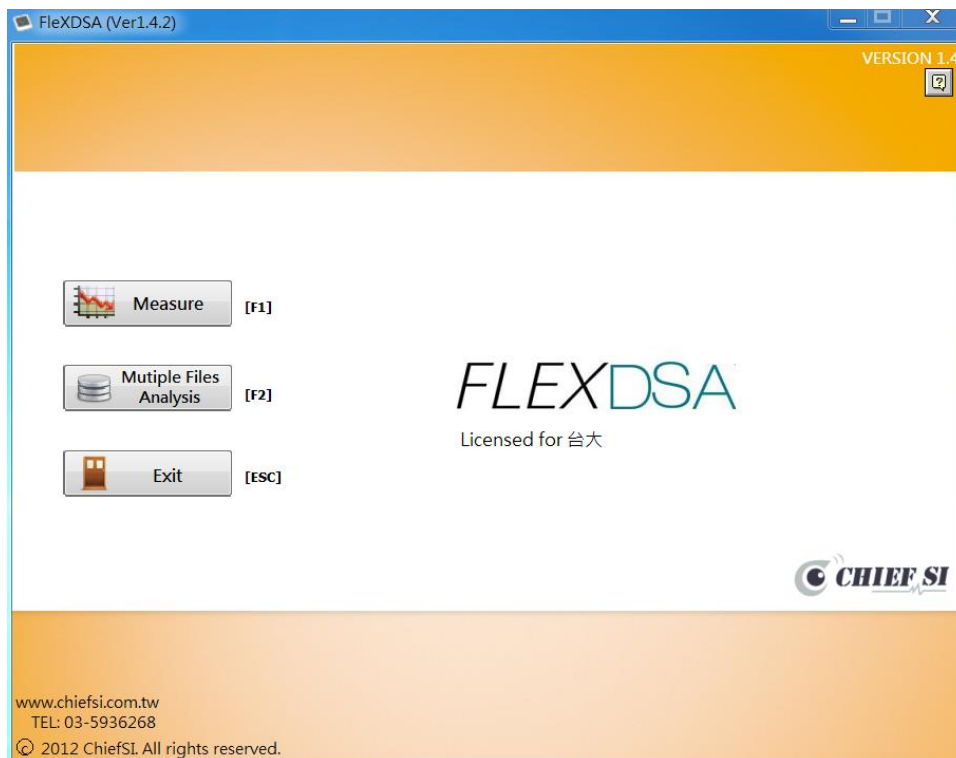


圖 2 - 10 動態訊號分析軟體 FLEXDSA 操作介面

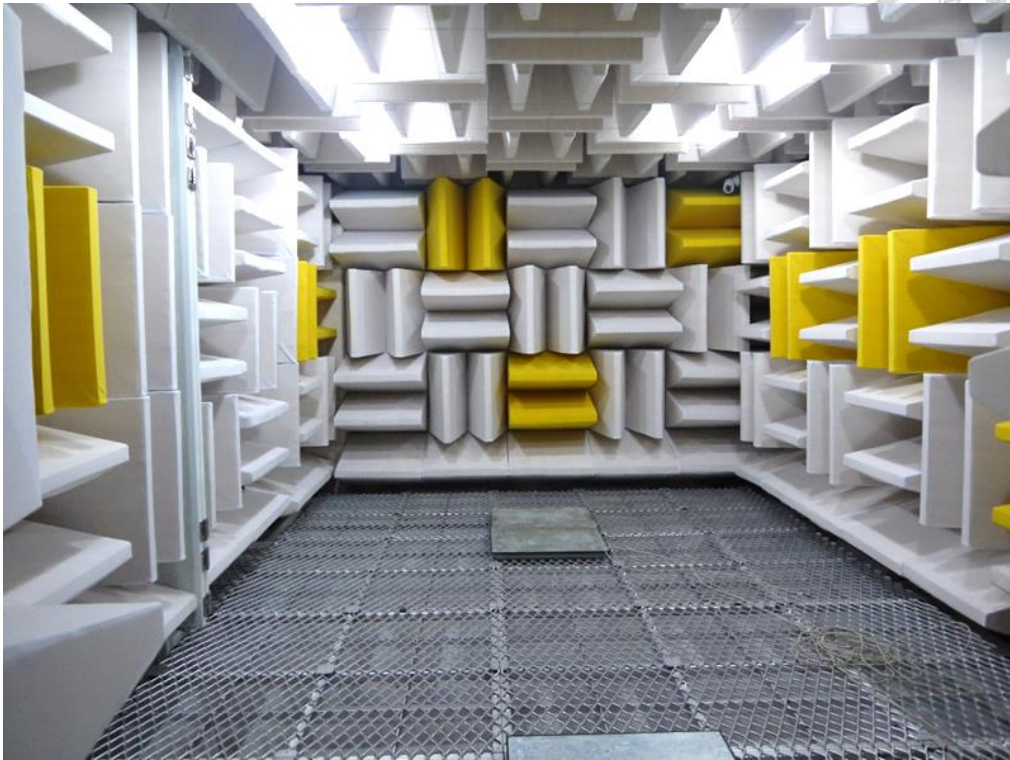


圖 2 - 11 無響室



圖 2 - 12 Bose SoundLink Mini 藍芽無線喇叭



圖 2 - 13 KINYO MPS-372 讀卡喇叭



圖 2 - 14 聲學攝影機



圖 2 - 15 數位工業相機 (GS3-U3-32S4C-C)



圖 2 - 16 相機鏡頭 (computer V0814-MP)



### 第三章 一維等間距直線麥克風陣列

感測器等間距排成一直線的陣列稱為一維等間距線性陣列 (uniform linear array, ULA)，使用波束成型演算法可進行一維的聲源定位。本章從推導一維等間距直線陣列的 array pattern 開始，探討不同麥克風數量與間距的陣列特性，並透過實驗探討單頻訊號相位差與計算結果之關係，接著介紹使用 delay and sum 演算法寫成的自行開發一維陣列聲源追蹤系統，並以此系統進行實驗測試，首先在無響室中確認此系統具有聲源定位之能力，並控制不同參數探討對定位結果所造成的影響，進而移至一般環境中進行實驗，並且利用機械手臂移動聲源觀察聲源由近至遠的定位結果，最後將其與機械手臂控制系統結合成一個有趣的即時聲源追蹤應用。

#### 3.1 一維等間距直線麥克風陣列之 Array Pattern

由 2.1.2 小節得陣列之 array pattern 為

$$W = \sum_{m=1}^M e^{j(\mathbf{k}-\mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r}_m} = \sum_{m=1}^M e^{jk(\boldsymbol{\kappa}-\boldsymbol{\kappa}_s) \cdot \mathbf{r}_m} \quad (3.1)$$

而一維等間距麥克風陣列如圖 3-1 所示，其麥克風數為  $M$ ，間距為  $d$ ，並以座標

原點為參考點，則第  $m$  個麥克風之位置向量為  $\mathbf{r}_m = \left[ \left( \frac{M+1}{2} - m \right) d \quad 0 \right]$ 。假設聲源

皆由正前方入射，則聲源位置之單位向量為  $\boldsymbol{\kappa}_s = [0 \quad 1]$ ，觀測方向單位向量為

$\boldsymbol{\kappa} = [\sin \theta \quad \cos \theta]$ 。代入式(3.1)可得一維等間距麥克風陣列之 array pattern 為

$$W = W(\theta) = \sum_{m=1}^M e^{jk \sin \theta \left( \frac{M+1}{2} - m \right) d} = \sum_{m=1}^M \left( e^{jkd \sin \theta} \right)^{\left( \frac{M+1}{2} - m \right)} \quad (3.2)$$

由式(3.2)可知一維等間距麥克風陣列的 array pattern 為訊號波數  $k$ 、麥克風間距  $d$  及麥克風數量  $M$  的函數，因此給定此三項參數的值即可計算出 array pattern，其中訊號波數麥克風間距可一併以乘積值  $kd$  討論。

在探討此三項參數是如何影響陣列特性之前，須先介紹空間取樣定理。在時域中的取樣定理是指將連續訊號轉為離散訊號的過程中為了避免混疊現象（aliasing）發生，取樣頻率至少要大於訊號頻率兩倍以上。若應用上述觀念於空間中，將麥克風間距  $d$  視為空間上的取樣週期，訊號波長  $\lambda$  對應時間取樣定理中的訊號週期，則可寫為  $\frac{1}{d} \geq 2 \cdot \frac{1}{\lambda}$ ，整理可得  $\lambda \geq 2d$  或寫成  $kd \leq \pi$ 。

當  $kd \geq \pi$  時會產生空間的混疊現象（spatial aliasing），此即空間的取樣定理。空間混疊現象為在 array pattern 中出現兩處以上的極值，如圖 3-2 (a)，此時稱為旁瓣（side lobe），當  $kd$  值繼續增加，旁瓣也隨之增長，而當  $kd = 2\pi$  時，旁瓣會成長至與主瓣相同，如圖 3-2 (b)，會導致無法判斷真實聲源的方向，稱為假聲源（ghost image），因此可以說不產生假聲源的限制為  $kd \leq 2\pi$ 。

在麥克風數固定的情況下，若要避免假聲源的出現，除了限制觀測訊號頻率上限或縮小麥克風間距之外，還有一種方法是縮小觀測範圍。如圖 3-3 (a)，雖然在約  $\pm 60^\circ$  有假聲源的出現，但是若限制觀測範圍為  $\pm 45^\circ$  內（綠色範圍），就不會出現假聲源了。不過隨著觀測頻率的上升，假聲源會越來越密集，如圖 3-3 (b) 所示，當觀測頻率為 3000Hz 時，假聲源位置已進入觀測範圍內。

其次探討麥克風數量之影響，圖 3-4 (a) 及 (b) 分別具 2 支與 8 支麥克風陣列，相同  $kd$  下的 array pattern。由圖可知麥克風數量的增加可以使主瓣變窄並使旁瓣變小，主瓣變窄意即對角度的辨識度增強，而旁瓣變小代表來自非目標方向的雜訊被抑制，了解這些資訊有助於設計陣列以及量測結果現象的解釋。

## 3.2 相位差實驗

由基本原理可知波束成型是利用訊號之間的相位差估測聲源方位，而在雙麥克風陣列的情況下，可由算式推得兩麥克風訊號之間相位差與聲源方位的關係，因此本小節將使用兩支麥克風的陣列進行相位差的量測計算，驗證理論並且探討聲源擺放方位與波束成型計算結果的關係。



### 3.2.1 理論值計算及實驗設計

若兩麥克風間距為  $d$ ，考慮一單頻訊號  $e^{j\omega t}$  以入射角  $\theta$  傳播，如圖 3-5，則相位差可表示為

$$Phase_{Mic1} - Phase_{Mic2} = \Delta\phi = -\omega\tau = -2\pi f \frac{d \sin \theta}{c} \quad (3.3)$$

為了去除環境噪音的影響，實驗於無響室進行，麥克風間距  $d$  為 0.1m，將聲源（BOSE 喇叭）置於四種入射角： $+90^\circ$ 、 $+30^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $-90^\circ$ ，為理論入射角  $\theta_{theo}$ ，如圖 3-6 所示，實際架設照片如圖 3-7。由喇叭播放七段不同頻率  $f$  的單頻訊號，分別為 250Hz、500Hz、1000Hz、1500Hz、2000Hz、2500Hz 及 3000Hz。將兩支麥克風各自錄得的訊號做快速傅立葉轉換，可以得到該頻率的量值及相位，相位相減後即為相位差  $\Delta\phi_{exp}$ ，並將每段訊號使用波束成型 delay and sum 演算法計算出訊號入射角  $\theta_{das}$ ，計算精度設為  $1^\circ$ 。透過式(3.3)可以由理論入射角  $\theta_{theo}$  推出理論相位差

$\Delta\phi_{theo}$ ，也可以從實驗值相位差  $\Delta\phi_{exp}$  反推出一個角度  $\theta_{exp} = \sin^{-1}\left(\Delta\phi_{exp} \cdot \frac{c}{-2\pi fd}\right)$ ，其

中聲速  $c$  在本研究中皆設定為 345m/s，以下將呈現實驗計算結果與誤差比較。

### 3.2.2 實驗結果與討論

表 3 - 1 至表 3 - 4 分別為入射角  $+90^\circ$ 、 $+30^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $-90^\circ$  的相位差實驗結果，而圖 3-8 至圖 3-11 為不同入射角各段訊號的波束圖形（beam pattern）。在入射角為  $-90^\circ$  的實驗中，訊號頻率 250Hz 及 2000Hz 的相位差實驗值  $\Delta\phi_{exp}$  無法反推

角度  $\theta_{exp}$ （因  $\left|\Delta\phi_{exp} \cdot \frac{c}{-2\pi fd}\right| > 1$ ），因此以—表示。由圖可以發現低頻的 beam pattern

較為平緩，無法清楚辨認最大值及聲源方向為何，隨著訊號頻率增高，主瓣益加明顯，但是也將伴隨著假聲源的出現。相對高頻的 2500Hz 與 3000Hz 就出現了混疊現象，因此造成表 3 - 4 中 2000Hz 訊號的計算結果在尋找輸出最大值時判斷錯誤

(參考圖 3-11 (g))。觀察各表中的相位差實驗值，可發現皆與理論值相當接近，誤差大部分都在  $0.1\pi$  以內，而反推的實驗值角度  $\theta_{\text{exp}}$  與波束成型計算角度  $\theta_{\text{das}}$  也很相近，代表此演算法的確是以相位差估測聲源方位；但是與入射角理論值的誤差卻有大有小，整體來說越往左右兩邊擺的聲源 ( $\pm 90^\circ$ ) 的角度誤差越大。重新將相位差誤差與計算角度誤差整理成表 3-5 及表 3-6，甚至可以發現入射角  $+30^\circ$  的 2500Hz 與入射角  $-90^\circ$  的 2000Hz 有著接近的相位誤差 (分別為  $-0.0529\pi$  及  $-0.0559\pi$ )，但是計算角度的誤差卻分別是  $2^\circ$  及  $25^\circ$ ，差異甚大。

觀察式(3.3)可發現當聲速  $c$ 、頻率  $f$ 、麥克風間距  $d$  固定時， $\Delta\phi$  與  $\sin\theta$  成正比 ( $\Delta\phi \propto \sin\theta$ )，因此可以將  $\Delta\phi$  對  $\theta$  的關係類比為  $\sin\theta$  對  $\theta$  的關係。將  $\theta$  對  $\sin\theta$  的關係曲線畫出 (如圖 3-12)，可以發現當  $\sin\theta = 0.5$  時  $\theta = 30^\circ$ ，若此時  $\sin\theta$  減少 0.02，則  $\theta$  減少約  $1.31^\circ$ ；而當  $\sin\theta = 1$  時  $\theta = 90^\circ$ ，若  $\sin\theta$  減少 0.02， $\theta$  卻減少了約  $11.48^\circ$ 。這代表若相位差  $\Delta\phi$  有一點誤差，則當訊號來源方向角度越大時，計算出的角度誤差也會隨之放大。

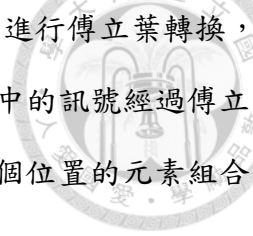
### 3.3 聲源追蹤系統

在 3.2 小節中，因聲源為穩定單頻訊號，並且處於靜止狀態，因此可以將整段訊號計算出一個方位角的結果，但是若訊號是隨時間變化或為移動狀態，則需要算出每個時間點的聲源方位。本小節將呈現本研究開發的一維等間距麥克風陣列聲源追蹤程式運算流程，並討論其中參數對運算時間的影響。

#### 3.3.1 程式計算流程

此計算流程為利用短時傅立葉 (STFT) 轉換切割訊號的概念，將每個 frame 都做一次聲源定位。計算流程圖如圖 3-13，假設麥克風陣列共有  $M$  支麥克風，位置

向量為  $[r_1 \ \cdots \ r_M]$ ，則引導向量矩陣為  $SV(\mathbf{k}) = SV(k, \theta) = \begin{bmatrix} SV_1 \\ \vdots \\ SV_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{jk \cdot r_1} \\ \vdots \\ e^{jk \cdot r_M} \end{bmatrix}$ 。將此



$M$  個訊號都拆成  $N$  個 frame，並將各自訊號的第  $n$  個 frame 分別進行傅立葉轉換，每個轉換結果都是一個一維矩陣，矩陣中每個元素代表此 frame 中的訊號經過傅立葉轉換後每一個頻率的資訊。將此  $M$  個一維矩陣分別取出同一個位置的元素組成訊號矩陣  $X(f_n)$ ，並與自身共軛轉置矩陣相乘得  $R_{xx}(f_n) = XX^H$ 。有了  $R_{xx}$  和  $SV$  即可代入式(2.9)計算陣列輸出能量，此時計算的結果為各頻率的 delay and sum 結果，因此最後再將各頻率對同一個角度進行的 delay and sum 相加即為最終結果。以上為計算一個 frame 的步驟，完成後再計算下一個 frame，以此類推。

### 3.3.2 程式參數對運算時間之影響

了解計算流程後發現此方法就是將每一個 frame 的訊號中拆解出各個頻率訊號後，對各個方向都做一次 delay and sum，計算整段訊號需要做 frame 數量、頻率解析度及角度計算精度三者相乘次數的 delay and sum，因此運算時間受這三者影響。frame 數量與頻率解析度為短時傅立葉變換方法中的參數如 frame length 及 overlap 所控制，而角度計算精度也可自由設定，若想減少運算時間，可以降低角度計算精度或是縮小角度計算範圍，如此就能維持角度計算精度。

## 3.4 靜止聲源追蹤實驗

本節將以實驗比較陣列麥克風數量、間距以及單單體與雙單體喇叭對定位結果之影響。本實驗於無響室進行，聲源分別擺放於  $+30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-45^\circ$  的方向，並且由於此計算系統假設訊號為平面波（遠場聲源），因此喇叭擺放位置均距離陣列中心超過 1.5m。播放訊號有兩種，分別為由 MATLAB 編寫及運算產生的改良掃頻訊號（swept sine）及頻寬 0-16kHz 之白噪音（white noise）。改良的掃頻訊號為一段由低頻播放至高頻的單頻訊號，其頻率並非連續，而是只有七種頻率，分別為 250Hz、500 Hz、1kHz、2 kHz、4 kHz、8 kHz、16 kHz，每個頻率播放時長 1 秒，中間休息 0.5 秒，此外由於實驗時需同時操作兩台電腦，因此在前面設定了 2 秒的準備時間，整體訊號如圖 3-14 所示。圖 3-15 為實驗架設示意圖，麥克風陣列實體見圖



3-16，實際架設則如圖 3-17 所示。

### 3.4.1 陣列麥克風數比較

首先固定陣列麥克風間距  $d$  固定為 0.1m，使用 BOSE 喇叭播放訊號，比較麥克風數  $M=2$  及  $M=4$  時對定位結果之影響。在程式計算參數設定中，角度計算範圍為  $-90^\circ \sim +90^\circ$ ，精度設為  $0.5^\circ$ ，短時傅立葉轉換所使用的 frame length 為 2048 點，因麥克風之採樣頻率為 51200Hz，因此 frame length 換算時長為 0.04 秒，overlap 則設為 0。

圖 3-18 為陣列之麥克風數  $M=4$ 、播放訊號為掃頻訊號、聲源擺放角度為  $0^\circ$  之聲源定位結果，其中上圖為其中一支麥克風的原始訊號 (mic0) 的原始訊號做為比對用，下圖是每個 frame 做聲源定位後所得之 beam pattern，按照時間排列繪製成圖，橫軸為時間，縱軸為角度，第三軸為陣列輸出能量 (Power)，若將下圖以三維方式呈現則如圖 3-19，顯示陣列輸出能量與訊號聲壓振幅呈正相關 (見圖 3-20)。將圖 3-18 下圖中每個時間點判斷最大的輸出能量所對應的角度並繪製則如圖 3-21，可以理解為每 0.04 秒做一次定位所得之瞬時聲源方位角。結果顯示在喇叭播放單頻訊號時判斷結果大部分都是穩定的，但整體會與理論值產生一個固定的偏移 (bias)，例如 250Hz 偏移約  $-3.5^\circ$ ，500Hz 偏移約  $+4^\circ$  等，而訊號間休息時間的判斷結果則是不規則跳動。由圖 3-19 可發現頻率為 4kHz 時已發生混疊效應，更高頻率的 8kHz 及 16kHz 則是出現更多更密集的假聲源，因此導致圖 3-21 中 8kHz 部份訊號以及 16kHz 整段訊號出現判斷錯誤的結果。

將同樣的實驗數據只使用中間兩支麥克風 (mic1 及 mic2) 的訊號進行聲源定位計算，可視為雙麥克風陣列之定位結果。圖 3-22 與圖 3-23 為  $M=2$ ，播放訊號為掃頻訊號之聲源定位結果，發現同樣在 4kHz 開始發生混疊效應，但是 beam pattern 中的主瓣與假聲源所形成的柵瓣 (grating lobe) 比較寬，符合本章 3.1 節中由 array pattern 所得出麥克風數量對定位結果的影響。

圖 3-24 為  $M=4$ ，聲源位置  $+30^\circ$ ，播放訊號為白噪音之聲源定位結果，結果

顯示相較於掃頻訊號，以白噪音做定位的結果更為準確及穩定，浮動範圍僅在  $30 \pm 1.5^\circ$  內。白噪音是由所有頻率組合而成的訊號，因此定位結果也是由各頻率疊加，只有主瓣能量會一直疊加上去，高頻率的假聲源則會在疊加過程中消除。而因為程式設定角度計算精度為  $0.5^\circ$ ，所以計算結果就是以  $0.5^\circ$  為單位跳動。為了更詳細地呈現結果，將角度計算精度重新設定為  $0.01^\circ$ ，並且將計算範圍限縮為  $+28^\circ \sim +32^\circ$  以減少運算時間，結果如圖 3 - 25 所示。這些資料點的平均值 (mean) 為  $29.70^\circ$ ，與理論值誤差  $-0.3^\circ$ ，標準差 (standard deviation) 為  $0.44^\circ$ ，最大值減最小值也就是分布範圍 (range) 為  $2.47^\circ$ 。圖 3 - 26 為  $M=2$ ，播放訊號為白噪音之聲源定位結果，發現浮動範圍為  $+28.5^\circ \sim +29.5^\circ$ ，因此將計算範圍限縮為  $+28^\circ \sim +30^\circ$ ，角度計算精度重新設定為  $0.01^\circ$  進行計算，結果如圖 3 - 27，均值为  $29^\circ$ ，與理論值誤差  $-1^\circ$ ，標準差為  $0.2^\circ$ ，分布範圍為  $1.07^\circ$ 。

圖 3 - 28 與圖 3 - 29 分別為聲源擺放角度  $0^\circ$  與  $-45^\circ$  之白噪音聲源定位結果，將  $M=4$  與  $M=2$  之結果繪製同一圖中比較，並將此六筆數據計算均值等進行統計分析結果如表 3 - 7，結果顯示麥克風數對誤差並沒有顯著影響，但是標準差和分布範圍都是  $M=4$  時比較大一些。

### 3.4.2 麥克風間距比較

接下來比較麥克風間距  $d$  為  $0.1m$  與  $0.05m$  時量測結果的不同，因此固定陣列麥克風數  $M=4$ ，使用 BOSE 喇叭播放訊號。麥克風間距  $d=0.1m$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號的結果如圖 3 - 30、圖 3 - 31，而麥克風間距  $d=0.05m$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號的計算結果如圖 3 - 32、圖 3 - 33 所示。由結果可發現  $d=0.1m$  在  $4kHz$  即出現混疊現象，而  $d=0.05m$  是在  $8kHz$  及  $16kHz$  才出現混疊現象。如同 3.1 所述，麥克風間距越小，出現混疊現象的頻率門檻越高，在此試由公式計算頻率門檻並與實驗結果比對。出現混疊現象的條件為  $kd = \frac{2\pi f}{c}d = 2\pi$ ，整理後可得  $f = \frac{c}{d}$ ， $c$  代入本研究設定聲速  $345m/s$ ，麥克風間距  $d$  分別代入  $0.1m$  與  $0.05m$ ，得出  $d=0.1m$  時會在訊號頻率超過  $3450Hz$  時出現混疊現象，而  $d=0.05m$  的頻率門檻則為  $6900Hz$ ，

與實驗結果相符。再計算 array pattern 如圖 3 - 34 及圖 3 - 35，可發現出現的假聲源數目也與實驗結果相符。

圖 3 - 36、圖 3 - 37 及圖 3 - 38 分別為聲源位置  $+30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-45^\circ$ ，麥克風間距  $d = 0.1m$  及  $d = 0.05m$ ，播放訊號為白噪音之聲源定位結果，統計分析結果如表 3 - 8，顯示麥克風間距對誤差沒有顯著影響，而標準差和分布範圍都是  $d = 0.1m$  時比較大一些。

### 3.4.3 單單體與雙單體喇叭比較

目前為止的實驗皆為使用 BOSE 喇叭播放訊號，但因後續實驗需使用另一種喇叭 (KINYO MPS-372 讀卡喇叭)，這兩種喇叭最大的差別為 BOSE 喇叭是雙單體喇叭 (見圖 3 - 39)，而 KINYO 喇叭則只有一個單體，因此本小節固定陣列麥克風數  $M = 4$  及麥克風間距  $d = 0.1m$ ，分別使用此兩種喇叭播放訊號進行聲源定位計算，探討喇叭之單體數目是否會對定位結果造成影響。

圖 3 - 40 及圖 3 - 41 分別為 BOSE 與 KINYO 喇叭播放掃頻訊號之麥克風原始訊號與定位結果，由原始訊號可發現由於 KINYO 喇叭本身特性，導致 250Hz 單頻訊號振幅太小幾乎與環境訊號無異，因此在圖 3 - 41 中圖看不出能量曲線峰值，但在圖 3 - 41 下圖仍能定位出聲源方向。此兩結果皆在 4kHz 以上發生混疊現象，這是由於使用同一個陣列接收訊號，其麥克風間距為  $d = 0.1m$ 。圖 3 - 42、圖 3 - 43、圖 3 - 44 分別為聲源位置  $+30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-45^\circ$ ，使用 BOSE 與 KINYO 喇叭播放白噪音之聲源定位結果，統計分析結果如表 3 - 9，結果顯示由 KINYO 喇叭播放訊號之定位結果其分布範圍相對 BOSE 喇叭皆明顯較小，因此可以推論雙單體喇叭確實會使判斷結果浮動範圍變大，若能拉遠喇叭與陣列之距離應能減少此現象。

### 3.4.4 本節小結

本節操控不同陣列參數及聲源設備進行實驗，以探討定位計算結果之影響，結果顯示針對單頻訊號麥克風數的增加能使主瓣變窄，角度的辨識度增強；縮小麥克風間距能提高發生混疊效應的頻率門檻，但若使用白噪音訊號進行計算，會因為各

頻率的結果疊加而不會出現混疊效應。麥克風之數量與間距兩項變因對量測之精確度與準確度並無顯著影響，雖然在本實驗結果中  $M=4$  相對  $M=2$ ，以及  $d=0.1m$  相對  $d=0.05m$  分布範圍皆較大，推論可能原因為近場球面波所影響。以聲源角度  $0^\circ$  的情況為例，理想平面波入射後，如圖 3-45 (a)，不管幾個麥克風其訊號間應該都不會有相位差，但實際實驗中因聲源相對陣列距離不夠遠，波前為球面波，所以陣列中外側與內側之麥克風所收到的訊號就會產生相位差，如圖 3-45(b)，因此對於計算結果會產生影響，若麥克風間距越近則其相位差越小，或者說越近似平面波入射；而對於量測精確度來說使用的聲源設備更具影響力，由實驗結果可以發現單單體喇叭明顯使定位結果更加穩定。雖然本實驗因架設問題存在聲源之擺放誤差，但定位結果之平均誤差皆在  $1^\circ$  以內，顯現此聲源追蹤系統在無響室中已有頗優的聲源定位能力。

### 3.5 一般環境量測結果

接著在一般環境進行量測，以比較此系統是否受環境影響嚴重。本節實驗皆於一般實驗室中進行，並利用機械手臂精準移動的功能進行定量量測。

#### 3.5.1 距離一公尺以上之定點量測

本實驗設計如圖 3-46 所示，使手臂夾持聲源 (KINYO 喇叭) 水平移動至五個不同的點，使  $X=0$ 、 $\pm 0.2$ 、 $\pm 0.4(m)$ ，於定點播放白噪音 10 秒，使用陣列之麥克風數  $M=4$ ，間距  $d=0.1m$ ，整體實際架設如圖 3-47。由於手臂為水平移動，因此只要量測陣列與聲源之垂直距離  $Y$ ，即能透過計算得出聲源角度為  $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{Y}\right)$ 。使用捲尺量測得  $Y=1.33(m)$ ，因此五個定點相對陣列之角度約為  $0^\circ$ 、 $\pm 8.55^\circ$  及  $\pm 16.74^\circ$ 。在程式設定方面由於為定點量測，因此可以將角度計算範圍縮小，本實驗設定角度計算精度為  $0.005^\circ$ 。

實驗結果如圖 3-48 至圖 3-52 所示，並且將誤差與分布範圍等統計分析結果整理如表 3-10，其結果與前一節使用相同陣列與喇叭之結果 (表 3-9) 相比，可



發現不論是誤差、標準差或是分布範圍皆增加，其原因可能來自環境噪音干擾，並且誤差皆大於 0，代表計算出的聲源位置皆往右偏移，此外左半邊 ( $X < 0$ ) 之結果誤差皆超過  $1^\circ$ ，則可能為擺放誤差所造成。

### 3.5.2 近場實驗

本研究使用之演算法皆假設聲源為遠場 (平面波)，所以之前實驗皆將聲源與陣列保持至少 1 公尺以上的距離，然而在 3.5.1 小節中，因手臂有移動距離限制，因此必須將陣列以腳架架設，也造成了可能的擺放誤差。而本小節欲測試此演算法於近距離 (1 公尺內) 之定位效果，因此利用機械手臂定點定量移動之特性，並將陣列鎖固在光學桌上，應能降低擺放誤差。如圖 3-53 所示，以麥克風連線中心也就是陣列中心為原點，控制手臂由原點出發，直線等速移動至不同的四個點，如圖 3-54 所示，觀察聲源遠離陣列的過程中聲源定位計算角度的變化，路徑由近至遠以路徑 1、2、3、4 代稱，各路徑之角度分別為  $57.99^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $33.69^\circ$  以及  $21.80^\circ$ ，即為聲源擺放角度理論值。實際整體架設如圖 3-55 及圖 3-56 所示。

圖 3-57 為路徑 1 之麥克風原始訊號，可發現運動開始時聲源移動時對各麥克風距離遠近所造成的聲壓振幅變化非常明顯，因此實驗結果中陣列輸出能量是以聲壓振幅最大的 mic2 所主導 (見圖 3-58)。圖 3-59 為路徑 1 之聲源定位結果 (藍色)、聲源擺放角度理論值 (紅色) 與聲源距離 (黑色)，由結果可以發現在聲源接近 mic2 時，計算之聲源角度會逐漸增加同時呈現大幅度跳動，但是開始遠離的時候會重新歸零而後增加，隨著聲源距離拉遠而漸漸穩定。而路徑 2、3、4 之結果如圖 3-60 至圖 3-65，皆有同樣的現象。

當計算結果趨於穩定後，皆仍低於理論角度，因此另外嘗試將聲源置於  $0^\circ$  (座標 (0,1)) 進行定位計算，結果如圖 3-66，可發現平均誤差約為  $-0.86^\circ$ ，同樣低於理論角度值，因此推論此偏差可能來自聲源喇叭本身，在實驗中皆將喇叭中心點當作聲源點，但因其並非完美點聲源，所以實際上可能會出現一些偏差。

觀察比較各路徑定位結果與聲源距離之曲線，如圖 3-67，可以發現路徑 1 在

大約聲源距離為 0.3m 時，計算結果曲線趨於平緩，而路徑 2、3、4 則皆在聲源距離約 0.5m 時計算結果不再增加而趨於穩定，因此可知此陣列系統適用於聲源距離 0.5m 以上，若在此距離以內將會受近場（球面波）效應影響結果。與無響室之結果相比，雖然量測精確度與準確度皆下降，但仍能指出聲源方向。

### 3.6 即時聲源追蹤系統

前述之聲源追蹤系統為離線運算，也就是錄好訊號後再執行程式做計算，但若要再經過簡單的修改即可成為即時的運算系統。程式計算流程如圖 3-68，控制程式只要每接收到 frame length 長度的訊號就進行快速傅立葉轉換 (FFT)，其後與離線運算流程相同，輸出結果後再計算下一段訊號。只要參數調整得當使得運算速度夠快，就能即時運算輸出定位結果。

由於本研究使用之 DAQ 系統及本實驗室機械手臂控制系統皆可由 MATLAB 程式控制操作，因此以 MATLAB 為平台串接從接收聲音訊號輸入、定位運算及輸出端控制手臂，整合為一個自動化聲源追蹤系統，可具體展現此即時運算系統的效果。機械手臂之組成見圖 3-69，首先架設一維陣列使陣列中心點與 J6 中心軸共線，之後設計將一維定位結果角度輸出至機械手臂第六軸（見圖 3-69 之 J6），使其轉至此角度，另外在軸上安裝一工業相機（如圖 3-70），回傳影像作為視窗的功能，則當第六軸跟隨聲源方位轉動時，視窗也會跟著聲源移動，整體架設如圖 3-71，實際架設照片則如圖 3-72 所示。程式設計方面，則有為了安全設定一些限制：若計算角度結果超過  $\pm 45^\circ$  則一律輸出  $\pm 45^\circ$ ，意即限制 J6 只在  $\pm 45^\circ$  範圍內轉動，同時調降手臂運轉速度，並且使定位系統每 0.5 秒輸出一角度給手臂。

系統完成後由研究人員持手機播放一般音樂，依序停留左中右三個位置，查看手臂是否真的能跟隨聲源移動。實驗結果影片截圖如圖 3-73 所示，上方為相機影像，下方圖為當下之 beam pattern 及輸出角度，當聲源移動到左中右三個點時，手臂皆能正確轉向聲源，並且雖然在程式中設定為每 0.5 秒控制手臂轉向一次，但是由於此程式需跨系統溝通，程式運行需花費較多時間，實際上大約每 1 秒手臂會

依照運算結果轉向一次。



### 3.7 本章結論

本章透過理論探討與實驗得到的諸多結果可整理為以下幾點：

1. Array pattern 為陣列本身的特性，在一維陣列中與麥克風數  $M$ 、麥克風間距  $d$  及訊號波數  $k$  有關，若觀測範圍為  $-90^\circ \sim +90^\circ$ ，則當  $kd > 2\pi$  時會產生假聲源（混疊現象），將無法判斷聲源方向，在設計陣列時可先以此為參考，再決定使用的陣列大小。
2. 在 3.2 節中透過實驗直接計算相位差，以此推算聲源方位角並與 delay and sum 演算法所得之角度比較，發現有其對應關係，同時當訊號來源方向角度越大時，計算出的角度誤差也會隨之放大。
3. 聲源追蹤程式可進行時變訊號或移動聲源的定位計算，由計算流程結構可發現運算時間與所設定之角度計算精度及 STFT 參數所決定，因此可根據計算對象設定不同的參數。
4. 在靜止聲源追蹤實驗中，比較不同麥克風數的實驗結果可發現增加麥克風數能使角度的辨識度增強，但是兩者皆在相同頻率的單頻訊號發生混疊效應，導致誤判聲源方向，縮小麥克風間距則能提高發生混疊效應的頻率門檻，而使用之聲源設備則會影響量測精確度，本實驗中由於 BOSE 喇叭為雙單體喇叭，因此造成定位精確度大幅下降。
5. 在一般環境的實驗結果顯示因為相較於無響室多了環境噪音的影響，導致定位結果誤差提升至最大  $1.31^\circ$ ，而透過將聲源由近移動至遠處的實驗可得此陣列系統在約 0.5m 以內會因球面波效應而影響定位結果。
6. 最後將此定位系統與機械手臂控制系統結合，可使手臂即時轉向聲源方向，此技術可應用至機器人等聲控裝置。

表 3 - 1 相位差實驗結果 (訊號入射角 +90°)

頻率 $f$	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
相位差實驗值 $\Delta\phi_{\text{exp}} (\pi)$	-0.14	-0.26	-0.56	-0.86	-1.12	-1.29	-1.62
相位差理論值 $\Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	-0.14	-0.29	-0.58	-0.87	-1.16	-1.45	-1.74
相位差誤差 $\Delta\phi_{\text{exp}} - \Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	0.00	0.03	0.02	0.01	0.04	0.16	0.12
反推實驗值角度 $\theta_{\text{exp}} (\text{deg})$	81.95	63.28	75.21	82.59	75.02	62.46	68.33
訊號入射角理論值 $\theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	90						
波束成型計算角度 $\theta_{\text{das}} (\text{deg})$	81	63	75	82	75	62	69
計算角度誤差 $\theta_{\text{das}} - \theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	-9	-27	-15	-8	-15	-28	-21

表 3 - 2 相位差實驗結果 (訊號入射角 +30°)

頻率 $f$	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
相位差實驗值 $\Delta\phi_{\text{exp}} (\pi)$	-0.08	-0.13	-0.30	-0.41	-0.42	-0.78	-0.75
相位差理論值 $\Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	-0.07	-0.14	-0.29	-0.43	-0.58	-0.72	-0.87
相位差誤差 $\Delta\phi_{\text{exp}} - \Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	-0.01	0.02	-0.01	0.03	0.16	-0.05	0.12
反推實驗值角度 $\theta_{\text{exp}} (\text{deg})$	34.84	26.63	31.45	28.09	21.42	32.44	25.59
訊號入射角理論值 $\theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	30						
波束成型計算角度 $\theta_{\text{das}} (\text{deg})$	35	27	31	28	21	32	26
計算角度誤差 $\theta_{\text{das}} - \theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	5	-3	1	-2	-9	2	-4

表 3 - 3 相位差實驗結果 (訊號入射角  $-45^\circ$ )

頻率 $f$	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
相位差實驗值 $\Delta\phi_{\text{exp}} (\pi)$	0.11	0.17	0.39	0.70	0.78	1.04	1.01
相位差理論值 $\Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	0.10	0.20	0.41	0.61	0.82	1.02	1.23
相位差誤差 $\Delta\phi_{\text{exp}} - \Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	0.01	-0.04	-0.02	0.09	-0.04	0.02	-0.22
反推實驗值角度 $\theta_{\text{exp}} (\text{deg})$	-49.62	-34.89	-42.70	-54.08	-42.19	-46.02	-35.62
訊號入射角理論值 $\theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	-45						
波束成型計算角度 $\theta_{\text{das}} (\text{deg})$	-50	-35	-43	-54	-42	-46	-37
計算角度誤差 $\theta_{\text{das}} - \theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	-5	10	2	-9	3	-1	8

表 3 - 4 相位差實驗結果 (訊號入射角  $-90^\circ$ )

頻率 $f$	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
相位差實驗值 $\Delta\phi_{\text{exp}} (\pi)$	0.16	0.29	0.52	0.82	1.21	1.35	1.73
相位差理論值 $\Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	0.14	0.29	0.58	0.87	1.16	1.45	1.74
相位差誤差 $\Delta\phi_{\text{exp}} - \Delta\phi_{\text{theo}} (\pi)$	0.01	0.00	-0.06	-0.05	0.05	-0.10	-0.01
反推實驗值角度 $\theta_{\text{exp}} (\text{deg})$	—	-81.02	-64.63	-70.78	—	-68.21	-85.43
訊號入射角理論值 $\theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	-90						
波束成型計算角度 $\theta_{\text{das}} (\text{deg})$	-90	-81	-65	-70	42	-68	-84
計算角度誤差 $\theta_{\text{das}} - \theta_{\text{theo}} (\text{deg})$	0	9	25	20	132	22	6

表 3 - 5 訊號入射角 +90° 與 +30° 之相位差誤差與計算角度誤差

訊號入射角	+90°		+30°	
頻率	相位差誤差 ( $\pi$ )	計算角度誤差 (deg)	相位差誤差 ( $\pi$ )	計算角度誤差 (deg)
<b>250</b>	0.0014	-9	-0.0103	5
<b>500</b>	0.0310	-27	0.0150	-3
<b>1000</b>	0.0192	-15	-0.0126	1
<b>1500</b>	0.0073	-8	0.0253	-2
<b>2000</b>	0.0394	-15	0.1563	-9
<b>2500</b>	0.1642	-28	-0.0529	2
<b>3000</b>	0.1229	-21	0.1184	-4

表 3 - 6 訊號入射角 -45° 與 -90° 之相位差誤差與計算角度誤差

訊號入射角	-45°		-90°	
頻率	相位差誤差 ( $\pi$ )	計算角度誤差 (deg)	相位差誤差 ( $\pi$ )	計算角度誤差 (deg)
<b>250</b>	0.0079	-5	0.0108	0
<b>500</b>	-0.0392	10	-0.0036	9
<b>1000</b>	-0.0168	2	-0.0559	25
<b>1500</b>	0.0893	-9	-0.0485	20
<b>2000</b>	-0.0412	3	0.0486	132
<b>2500</b>	0.0181	-1	-0.1036	22
<b>3000</b>	-0.2169	8	-0.0055	6

表 3 - 7 麥克風間距  $d = 0.1m$ ，使用 BOSE 喇叭播放白噪音之聲源定位結果統計

麥克風數	聲源擺放角度 (deg)	平均值 (deg)	誤差(deg)	標準差 (deg)	分布範圍 (deg)
$M = 4$	30	29.7	-0.3	0.44	2.47
	0	0.45	0.45	0.5	2.72
	-45	-44.82	0.18	0.12	0.74
$M = 2$	30	29	-1	0.2	1.07
	0	-0.02	-0.02	0.13	0.73
	-45	-44.98	0.02	0.13	0.73

表 3 - 8 麥克風數  $M = 4$ ，使用 BOSE 喇叭播放白噪音之聲源定位結果統計

麥克風 間距	聲源擺放角度 (deg)	平均值 (deg)	誤差(deg)	標準差 (deg)	分布範圍 (deg)
$d = 0.1m$	30	29.7	-0.3	0.44	2.47
	0	0.45	0.45	0.5	2.72
	-45	-44.82	0.18	0.12	0.74
$d = 0.05m$	30	30.68	0.68	0.14	0.93
	0	-0.15	-0.15	0.14	0.86
	-45	-45.25	-0.25	0.16	0.86

表 3 - 9 麥克風數  $M = 4$ ，麥克風間距  $d = 0.1m$  播放白噪音之聲源定位結果統計

使用喇叭	聲源擺放角度 (deg)	平均值 (deg)	誤差(deg)	標準差 (deg)	分布範圍 (deg)
BOSE	30	29.7	-0.3	0.44	2.47
	0	0.45	0.45	0.5	2.72
	-45	-44.82	0.18	0.12	0.74
KINYO	30	29.52	-0.48	0.04	0.3
	0	-0.09	-0.09	0.02	0.12
	-45	-44.95	0.05	0.03	0.19

表 3 - 10 一般環境之定點量測結果分析統計

$X(m)$	聲源擺放角度 (deg)	平均值 (deg)	誤差(deg)	標準差 (deg)	分布範圍 (deg)
0	0	0.63	0.63	0.09	0.47
0.2	8.55	8.67	0.12	0.13	0.88
-0.2	-8.55	-7.30	1.25	0.11	0.65
0.4	16.74	16.88	0.14	0.15	0.96
-0.4	-16.74	-15.43	1.31	0.12	0.66

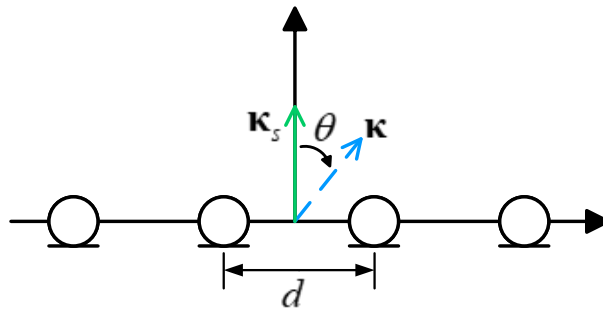
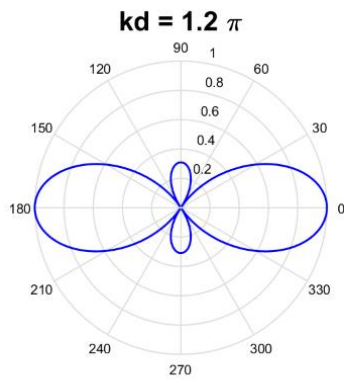
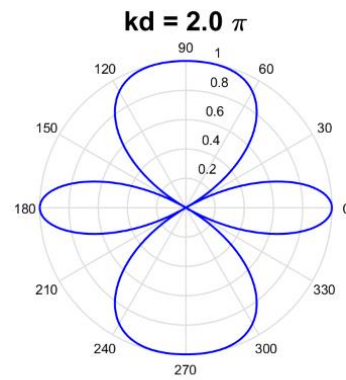


圖 3 - 1 一維等間距麥克風陣列

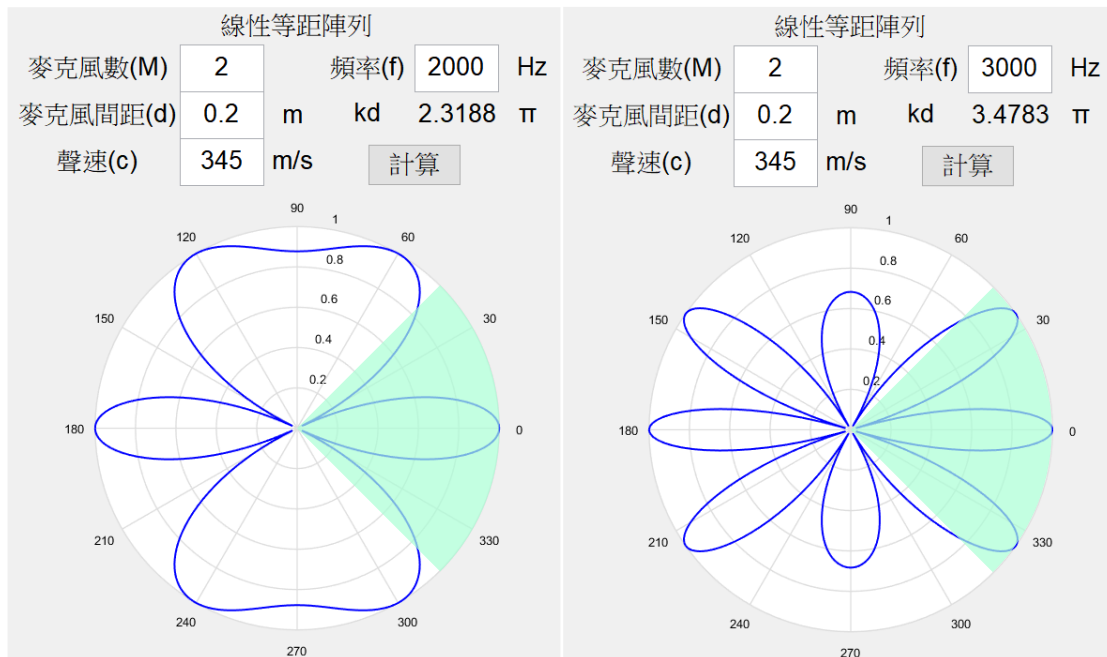


(a)  $kd = 1.2\pi$



(b)  $kd = 2\pi$

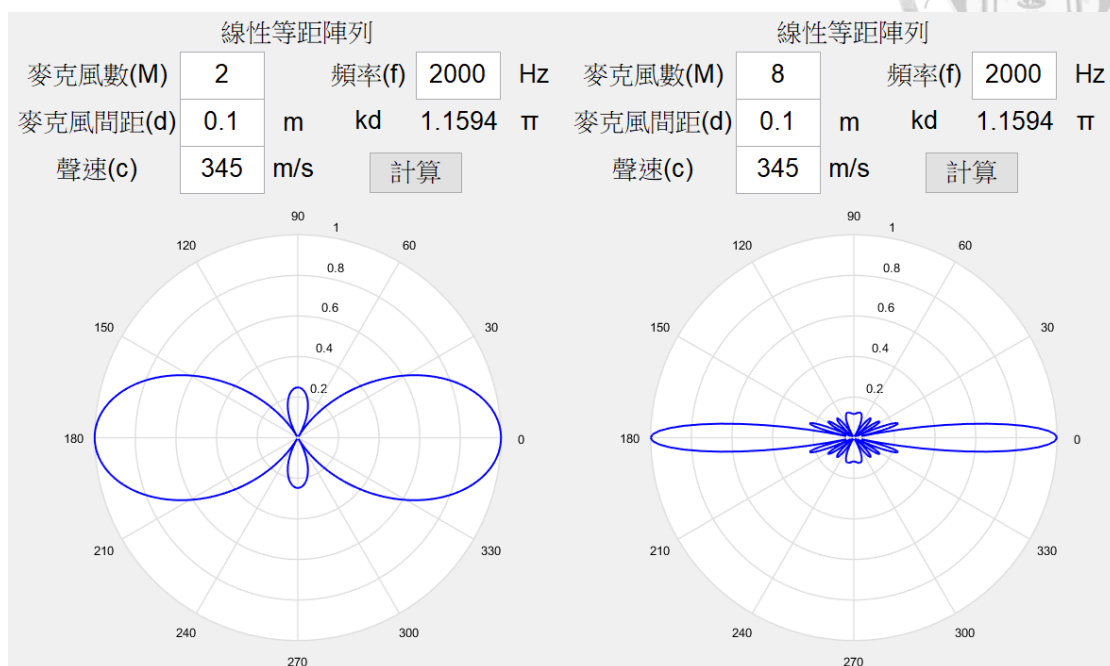
圖 3 - 2 不同  $kd$  值之 array pattern



(a)  $f = 2000\text{Hz}$

(b)  $f = 3000\text{Hz}$

圖 3 - 3 相同麥克風數不同訊號波數之 array pattern



(a) 麥克風數為 2 支 ( $M=2$ )

(b) 麥克風數為 8 ( $M=8$ )

圖 3 - 4 相同  $kd$  不同麥克風數比較

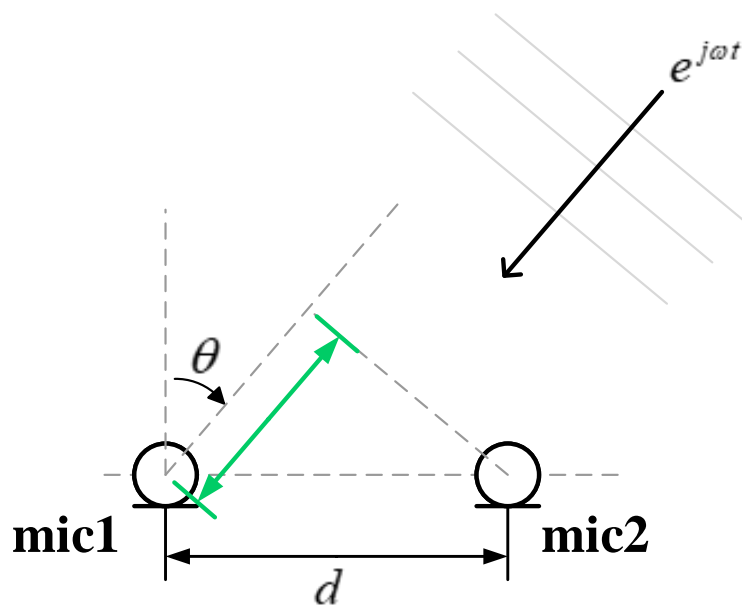


圖 3 - 5 相位差示意圖

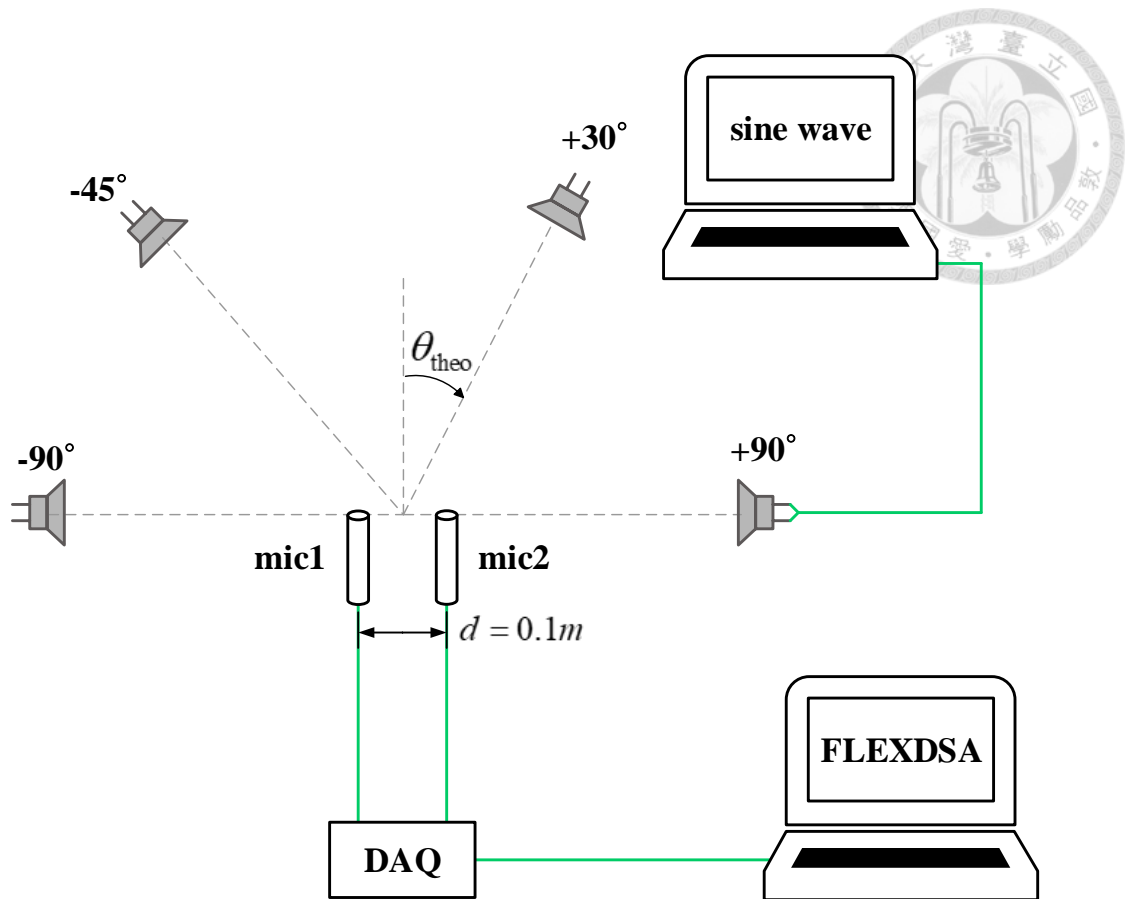
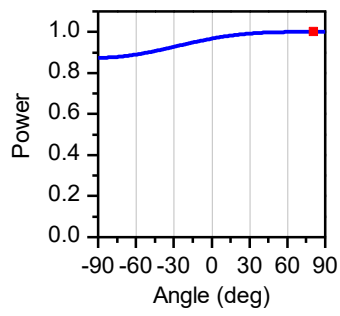


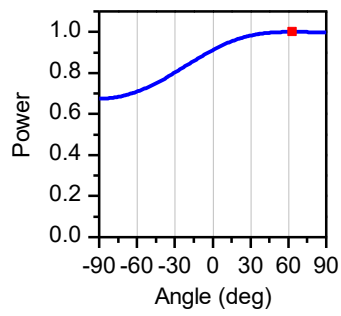
圖 3 - 6 相位差實驗架設示意圖



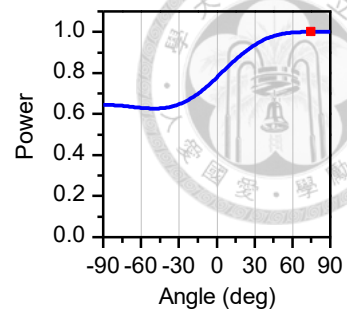
圖 3 - 7 相位差實驗實際架設照片



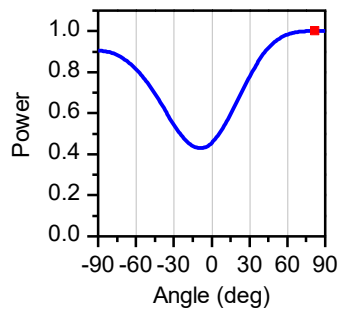
(a) 250Hz



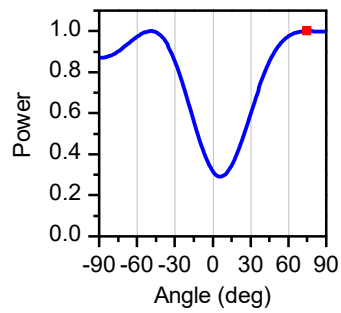
(b) 500Hz



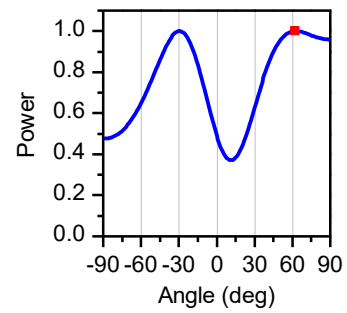
(c) 1000Hz



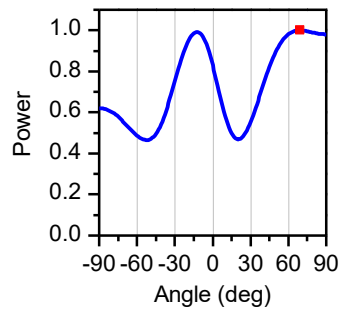
(d) 1500Hz



(e) 2000Hz

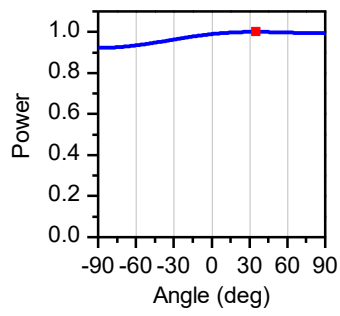


(f) 2500Hz

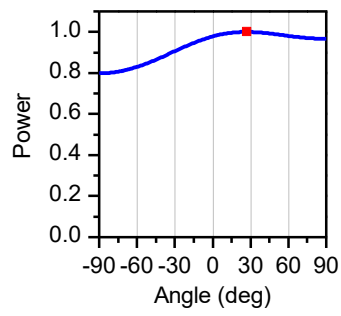


(g) 3000Hz

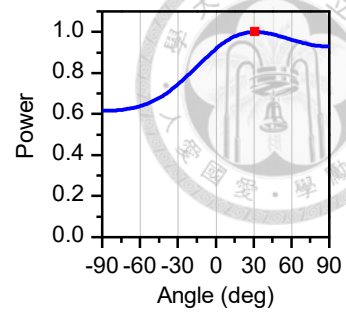
圖 3 - 8 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角  $+90^\circ$ )



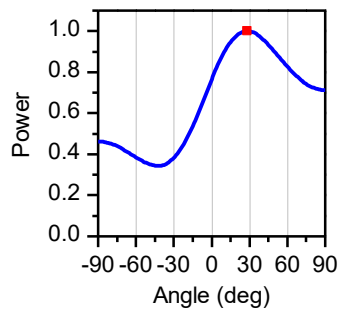
(a) 250Hz



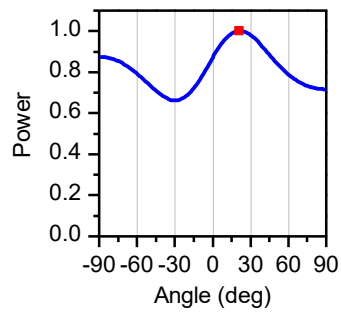
(b) 500Hz



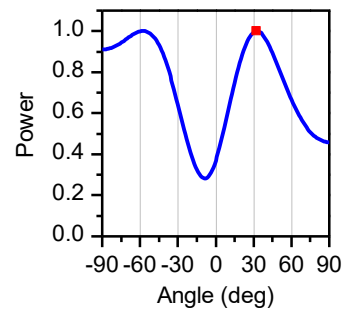
(c) 1000Hz



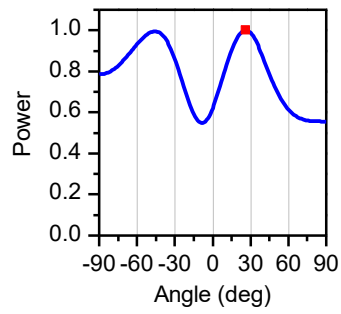
(d) 1500Hz



(e) 2000Hz

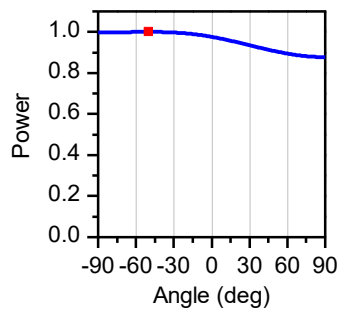


(f) 2500Hz

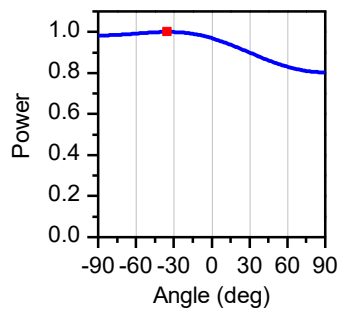


(g) 3000Hz

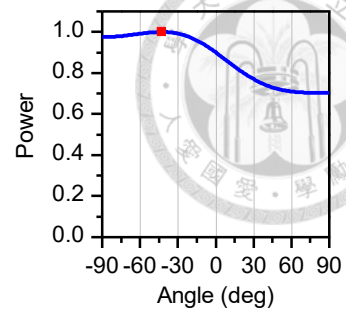
圖 3 - 9 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角  $+30^\circ$ )



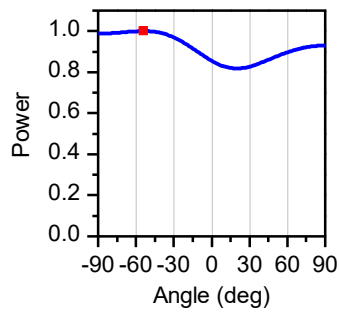
(a) 250Hz



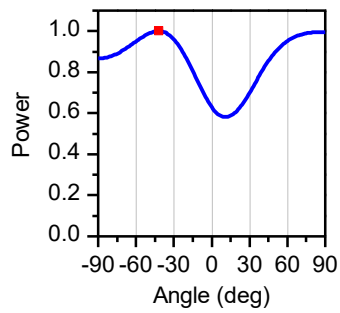
(b) 500Hz



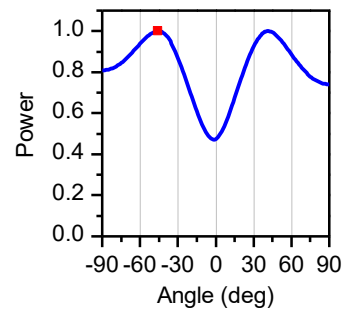
(c) 1000Hz



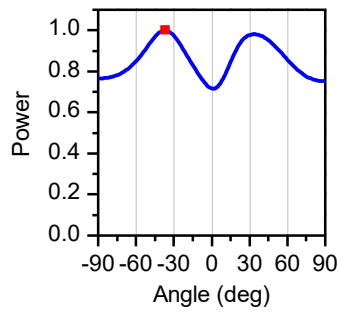
(d) 1500Hz



(e) 2000Hz

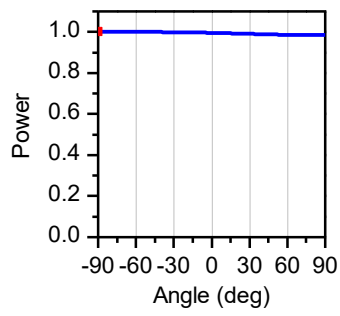


(f) 2500Hz

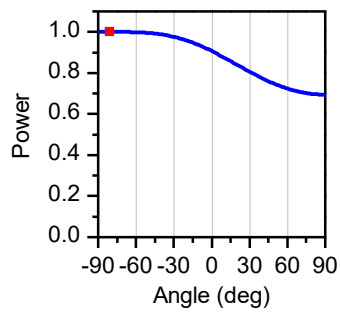


(g) 3000Hz

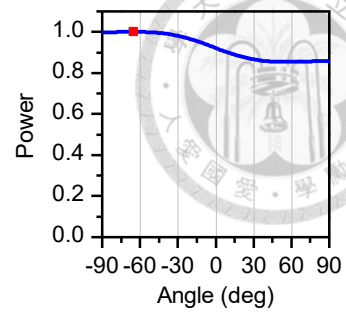
圖 3 - 10 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角  $-45^\circ$ )



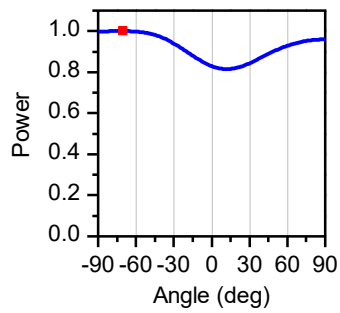
(a) 250Hz



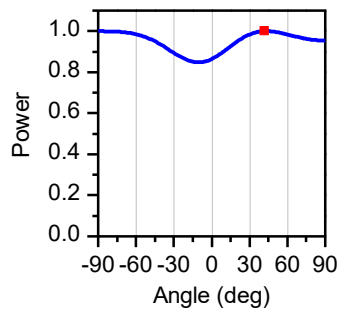
(b) 500Hz



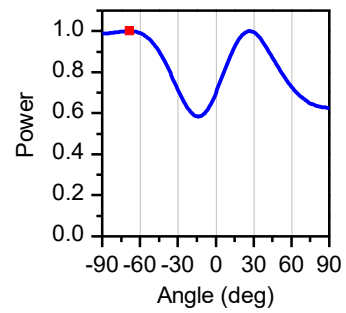
(c) 1000Hz



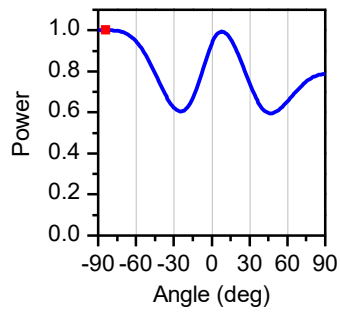
(d) 1500Hz



(e) 2000Hz



(f) 2500Hz



(g) 3000Hz

圖 3 - 11 各段訊號波束成型結果 (訊號入射角  $-90^\circ$ )

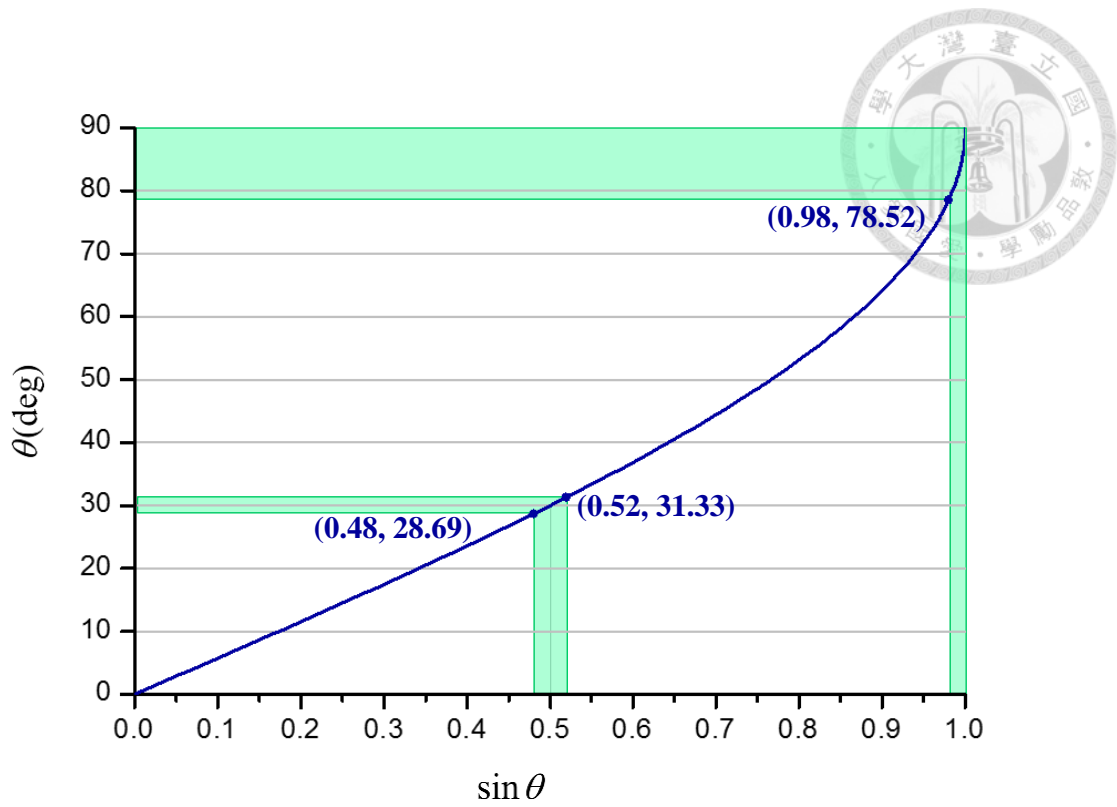


圖 3 - 12  $\theta$  對  $\sin \theta$  之關係曲線

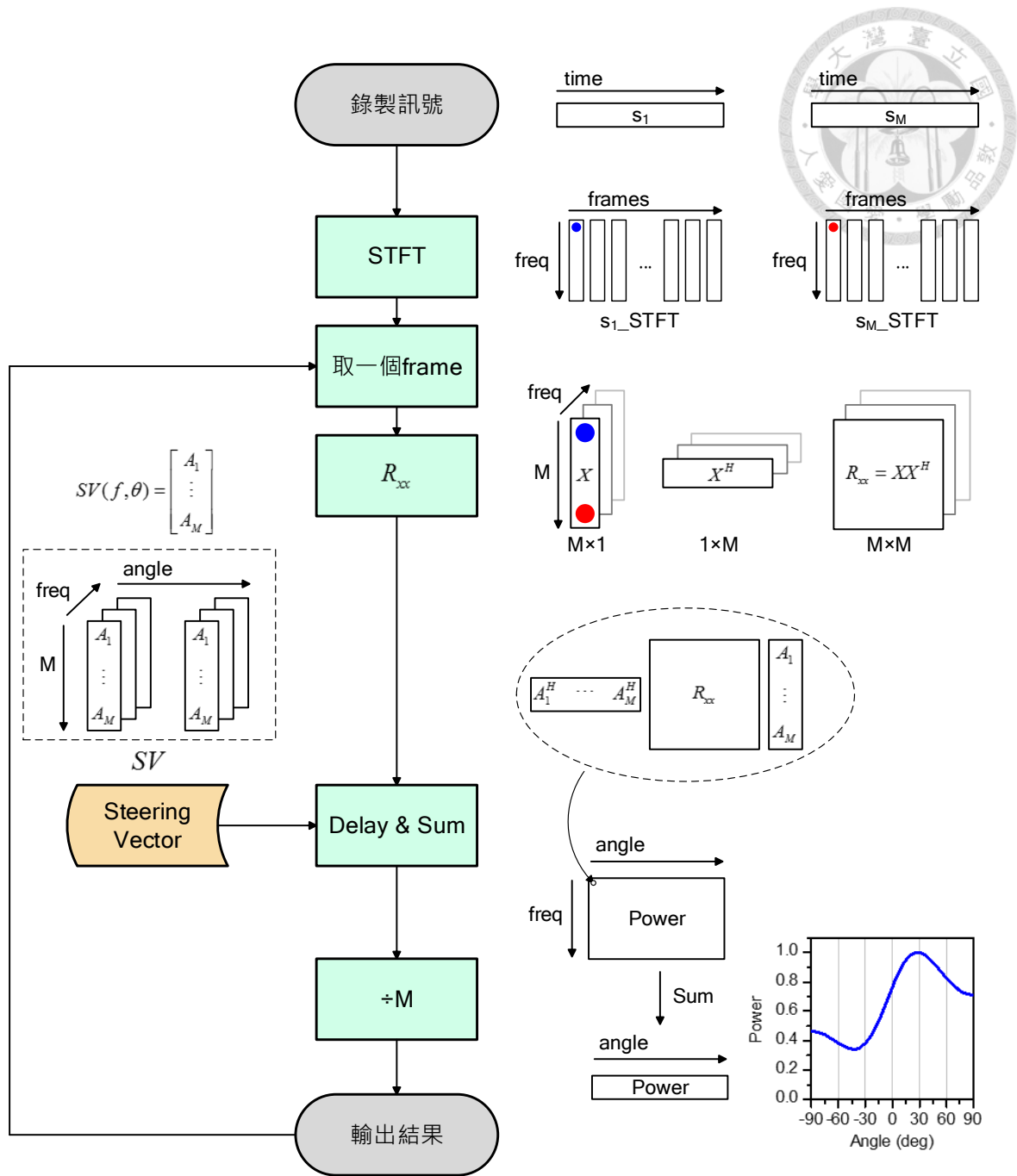


圖 3 - 13 聲源追蹤程式運算流程圖

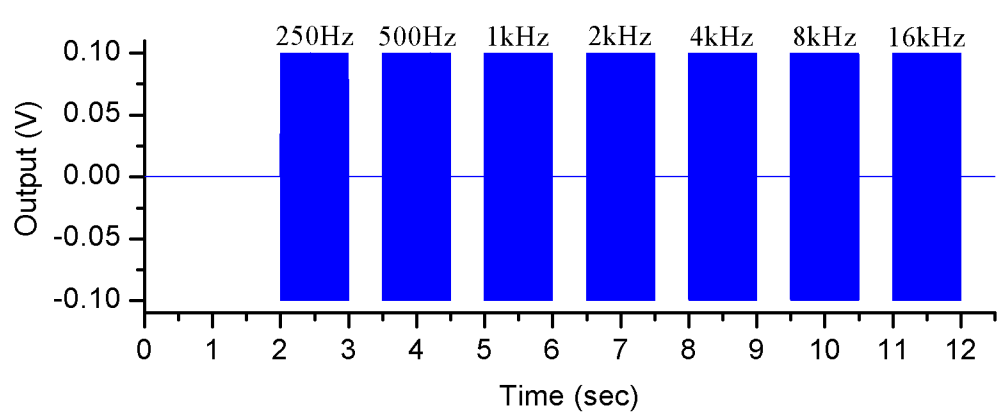


圖 3 - 14 實驗用掃頻訊號

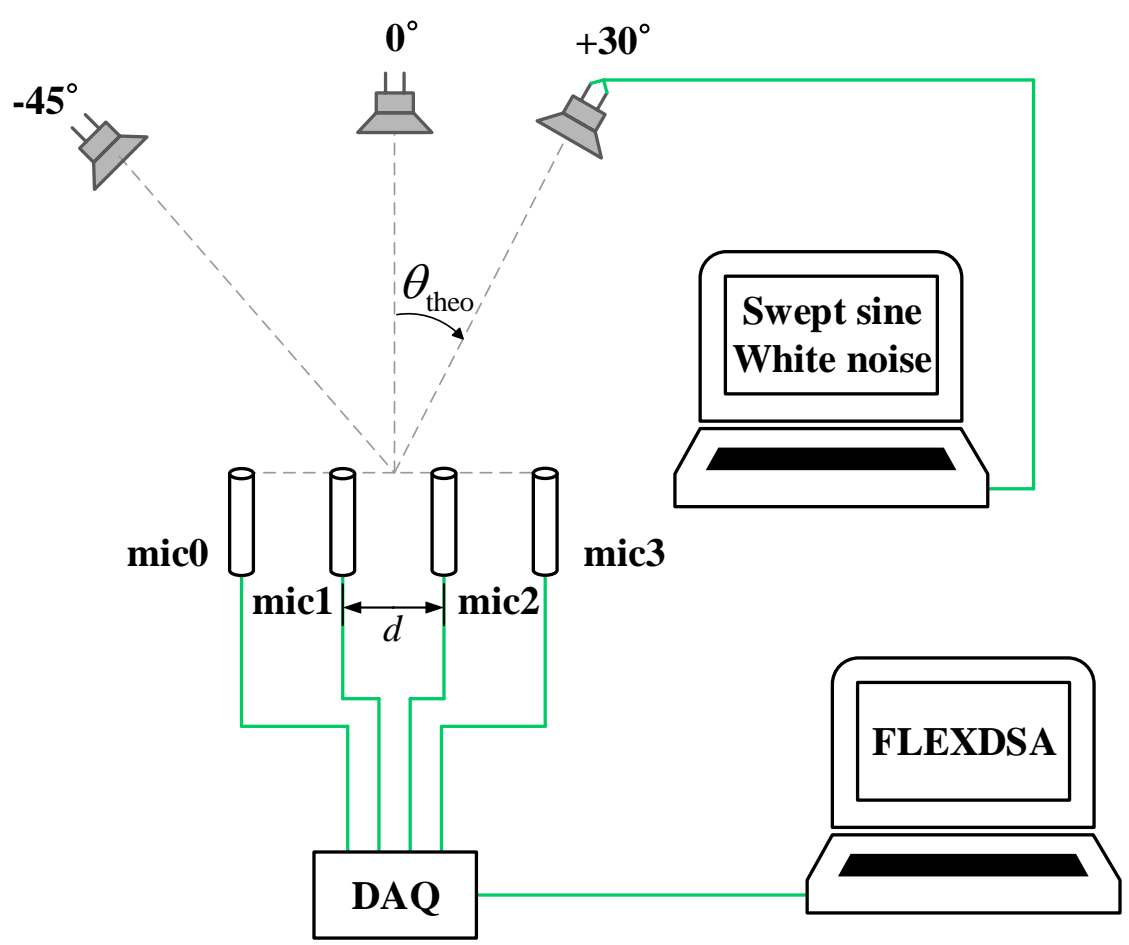


圖 3 - 15 靜止聲源追蹤實驗架設示意圖



圖 3 - 16 麥克風陣列照片 (  $M = 4$  ,  $d = 0.1m$  )

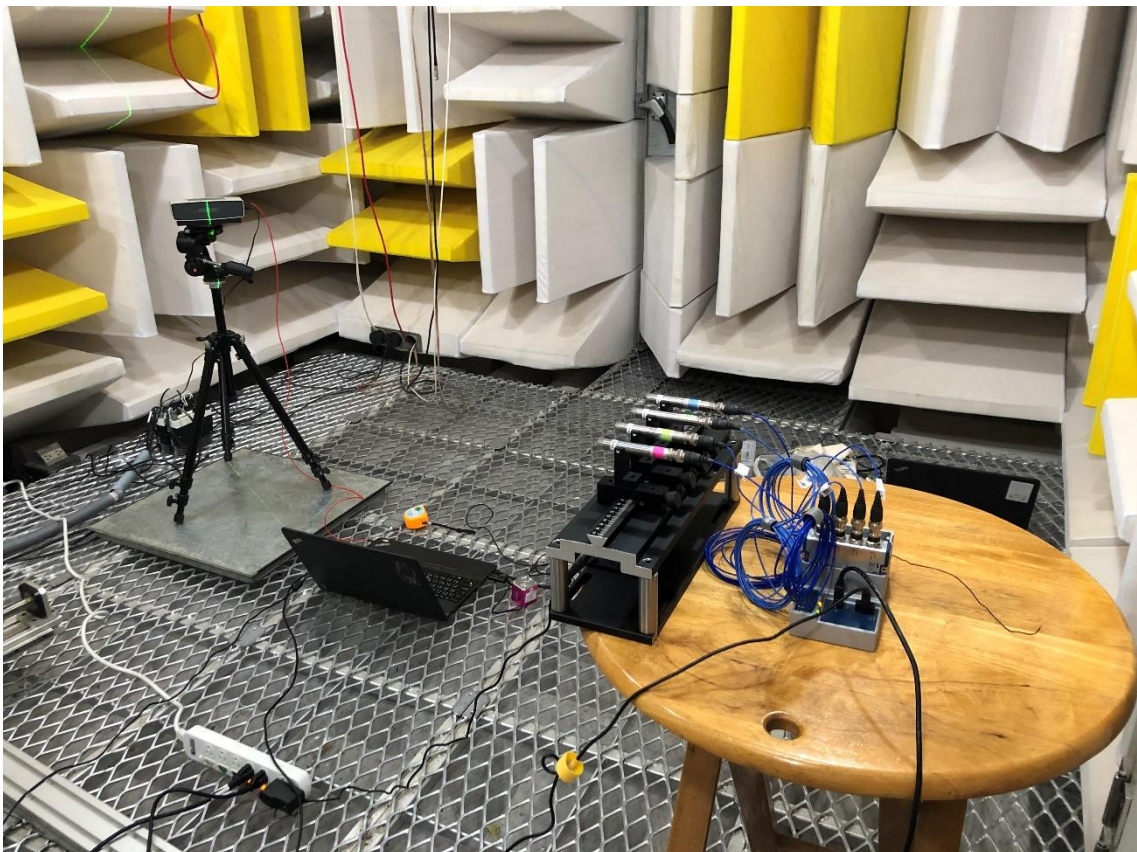


圖 3 - 17 靜止聲源追蹤實驗架設照片

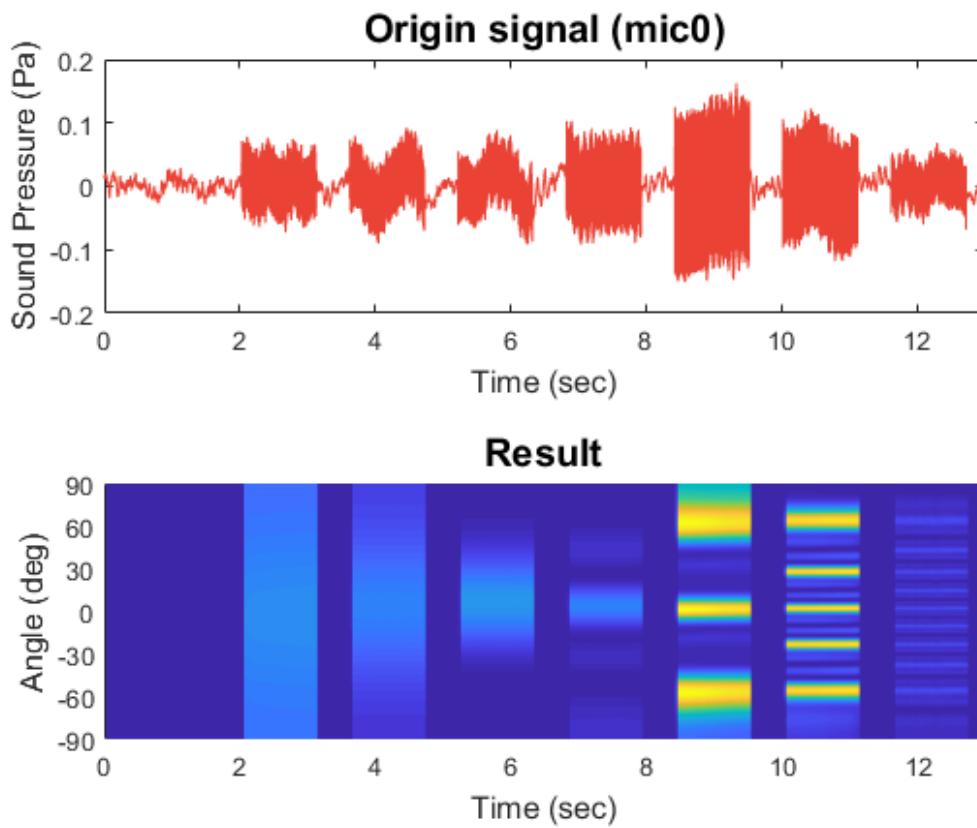
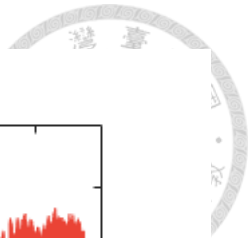


圖 3 - 18  $M = 4$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之麥克風原始訊號與聲源定位結果

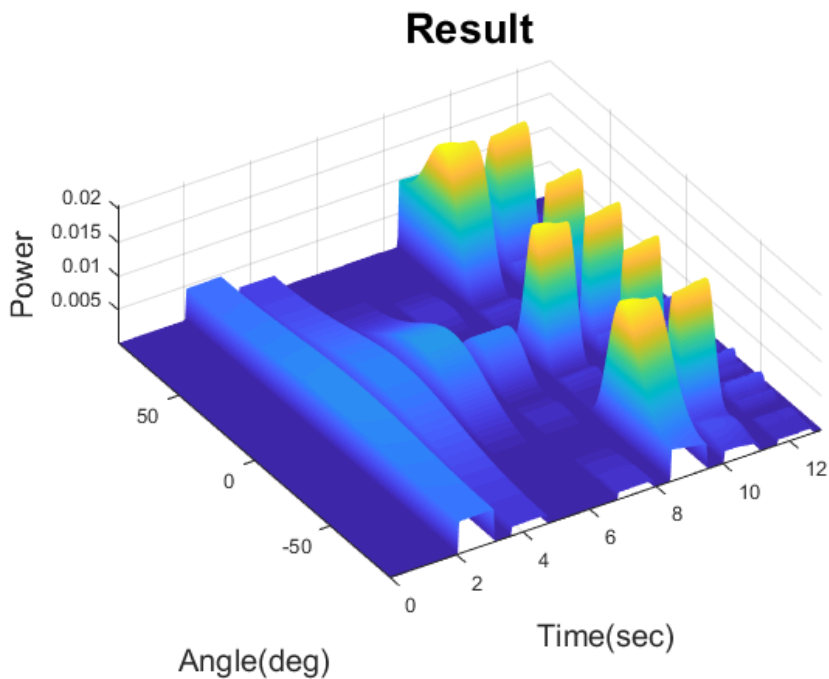


圖 3 - 19  $M = 4$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果（三維）

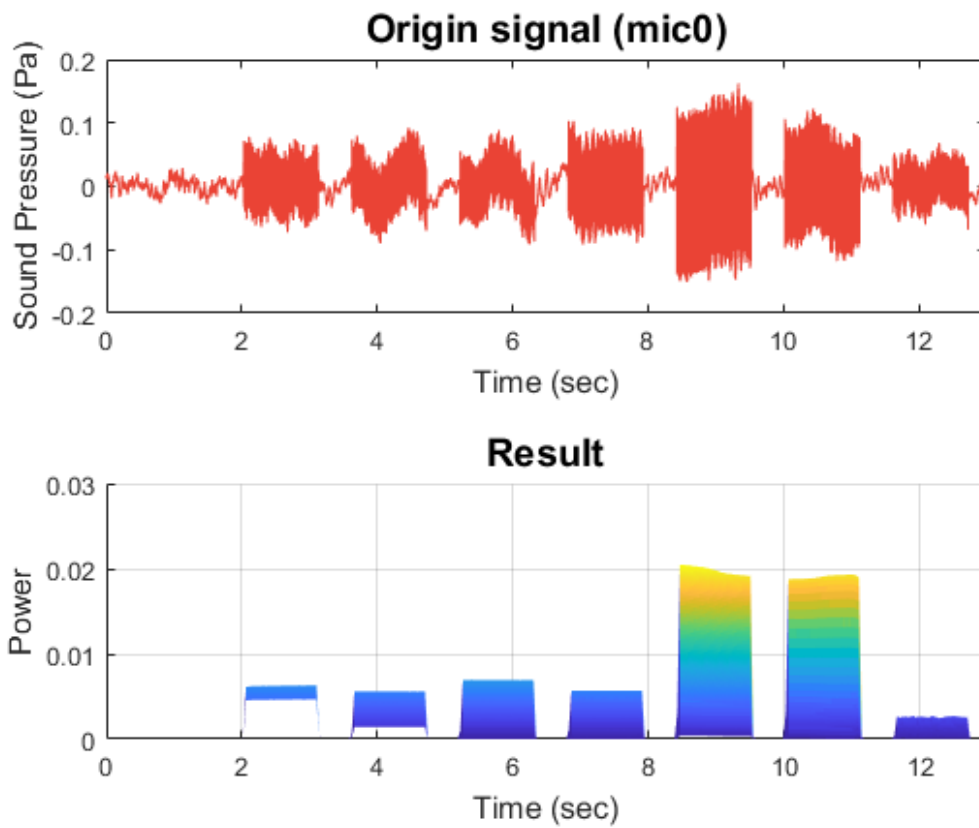
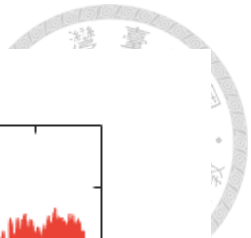


圖 3 - 20  $M = 4$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果（能量對時間）

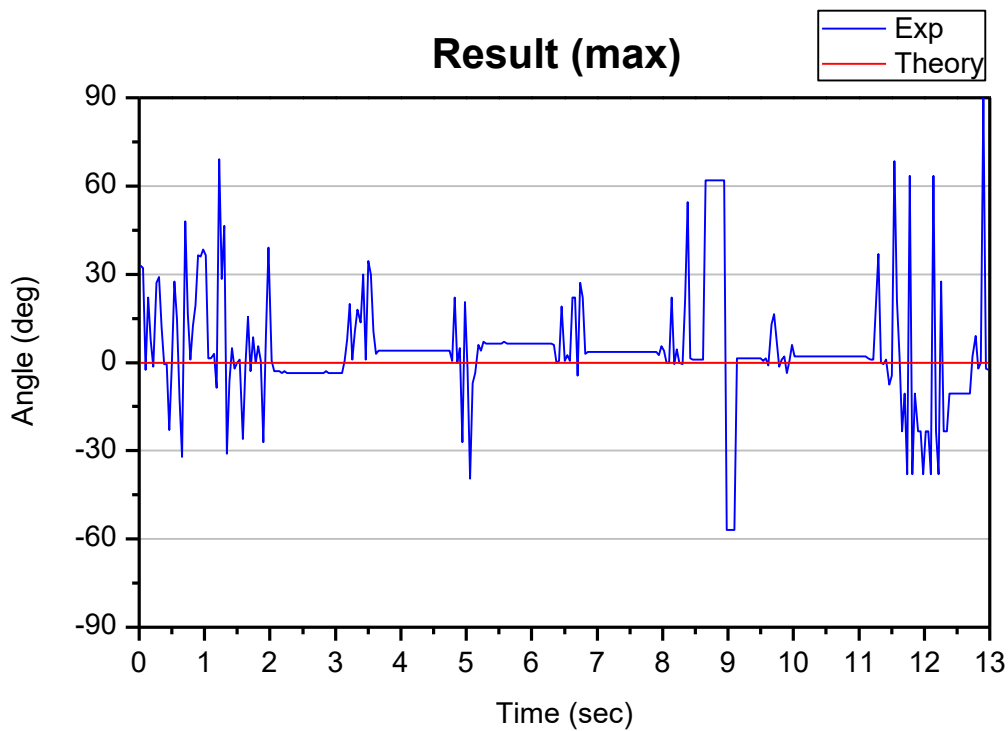


圖 3 - 21  $M = 4$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果（瞬時聲源方位）

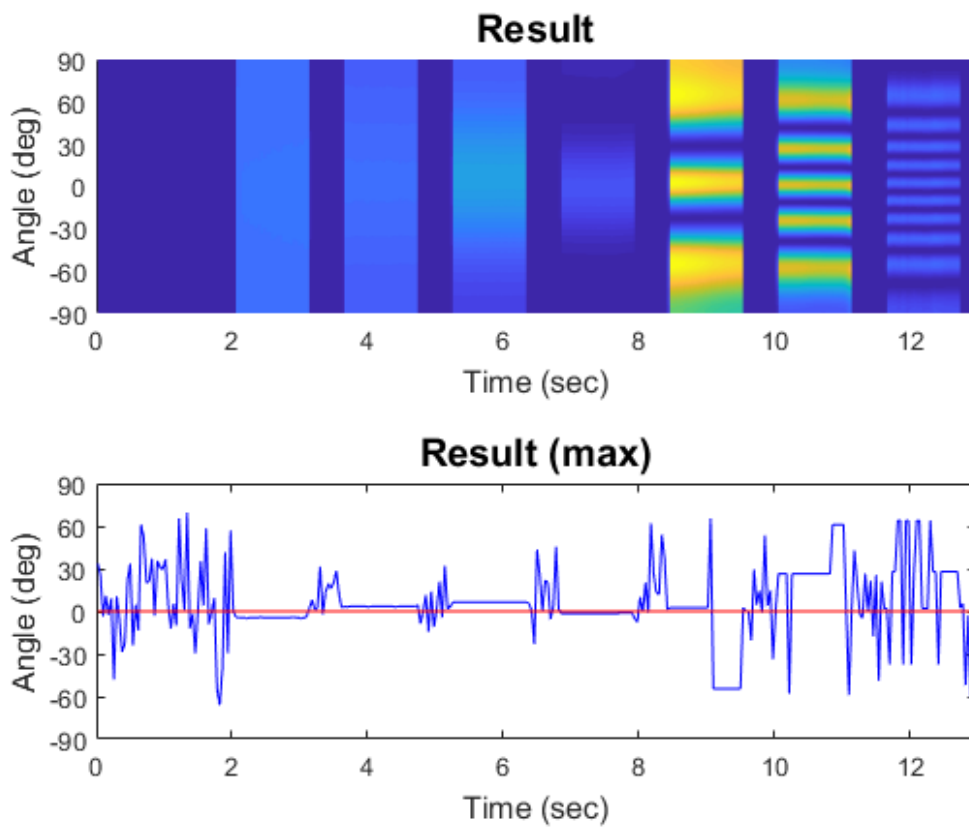
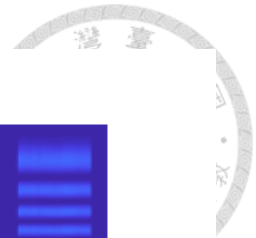


圖 3 - 22  $M = 2$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果

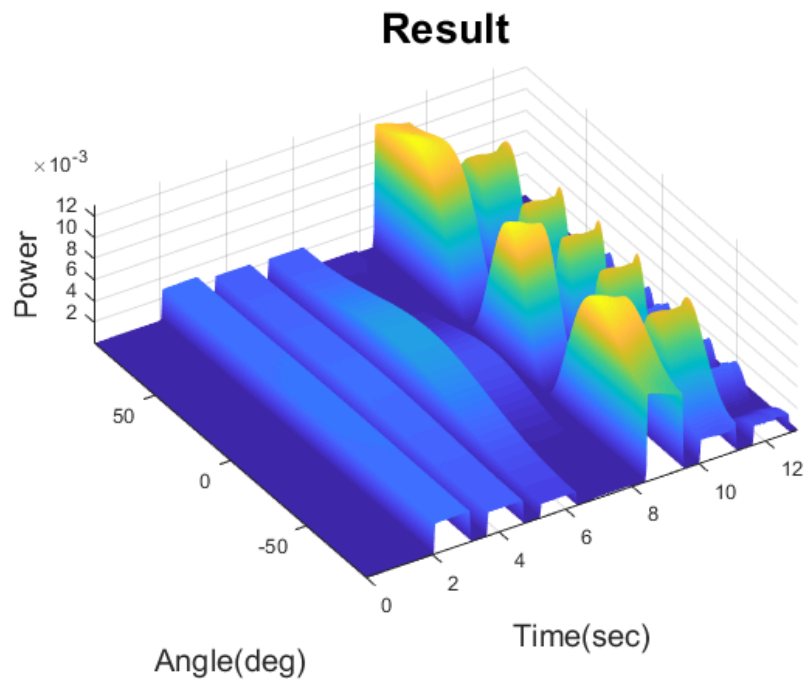


圖 3 - 23  $M = 2$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果（三維）

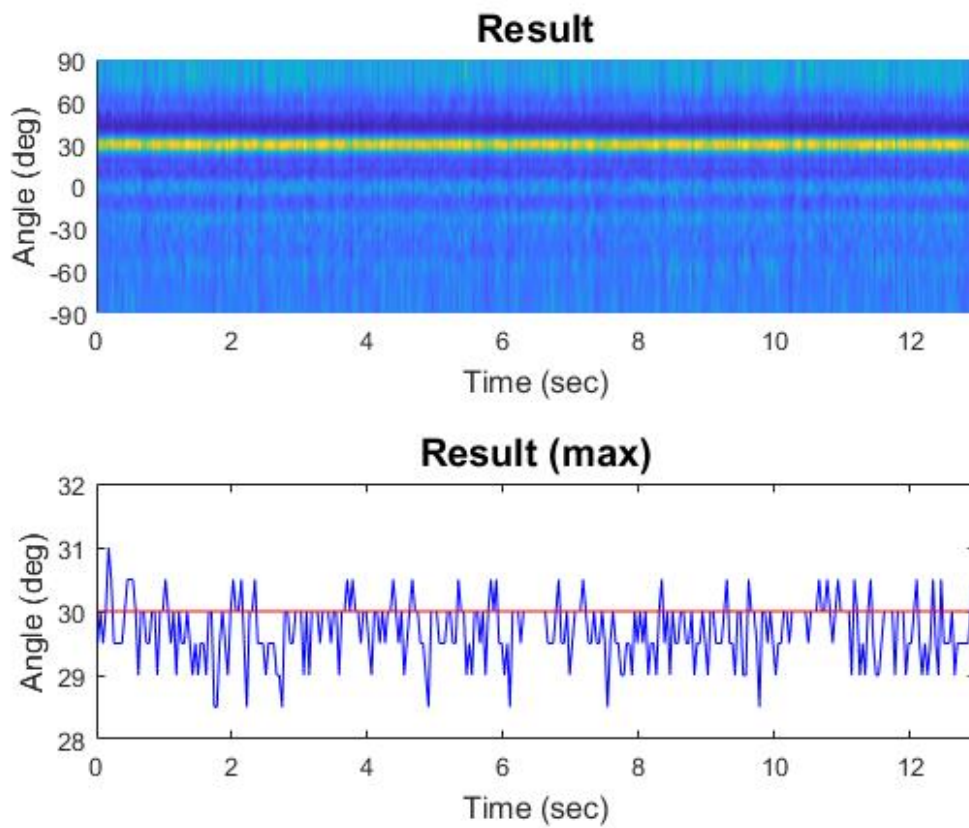
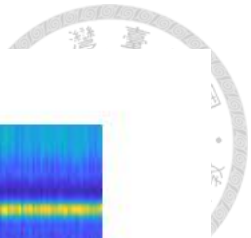


圖 3 - 24  $M = 4$ ，聲源位置  $+30^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

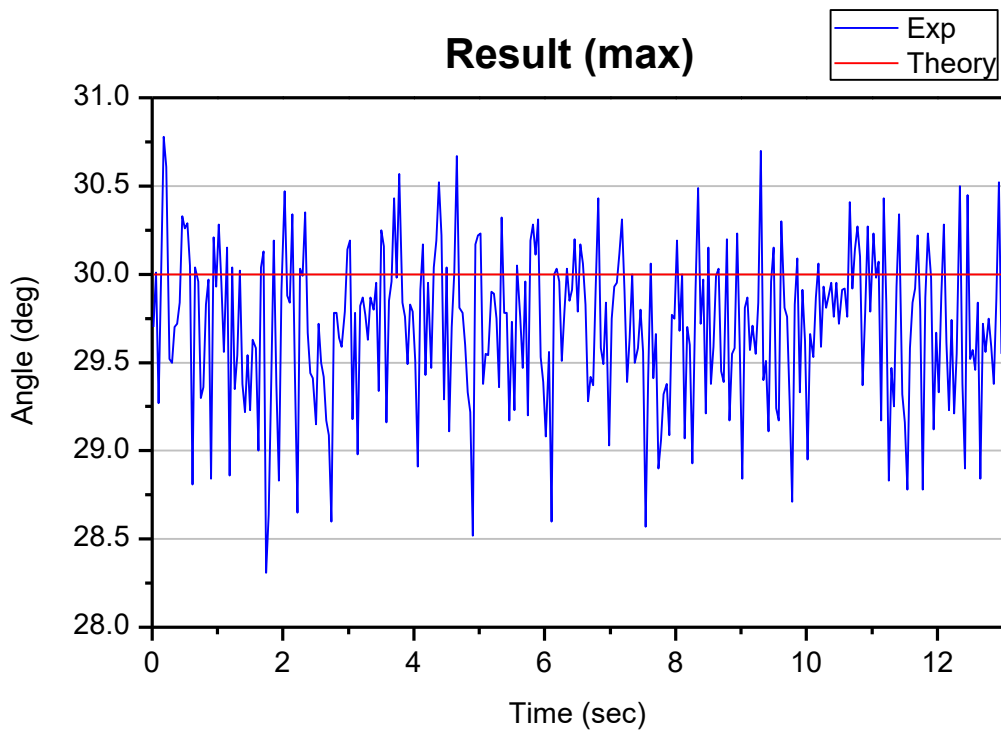


圖 3 - 25  $M = 4$ ，聲源位置  $+30^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果 (計算精度  $0.01^\circ$ )

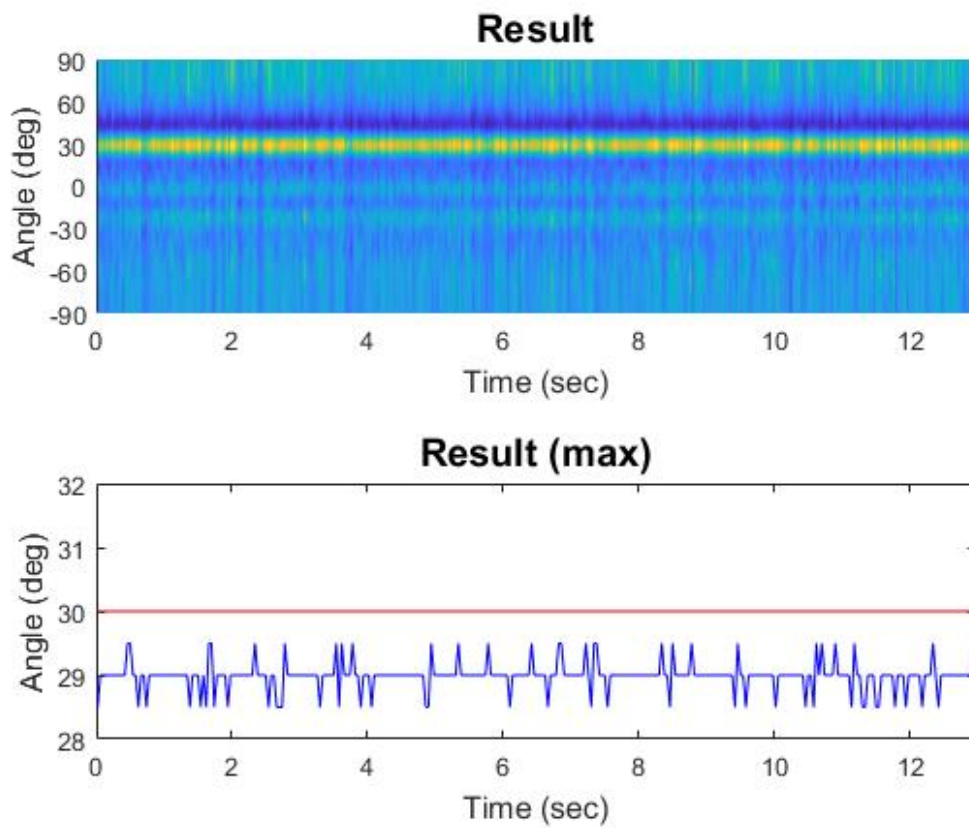
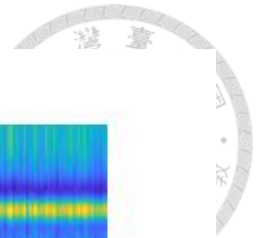


圖 3 - 26  $M = 2$ ，聲源位置  $+30^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

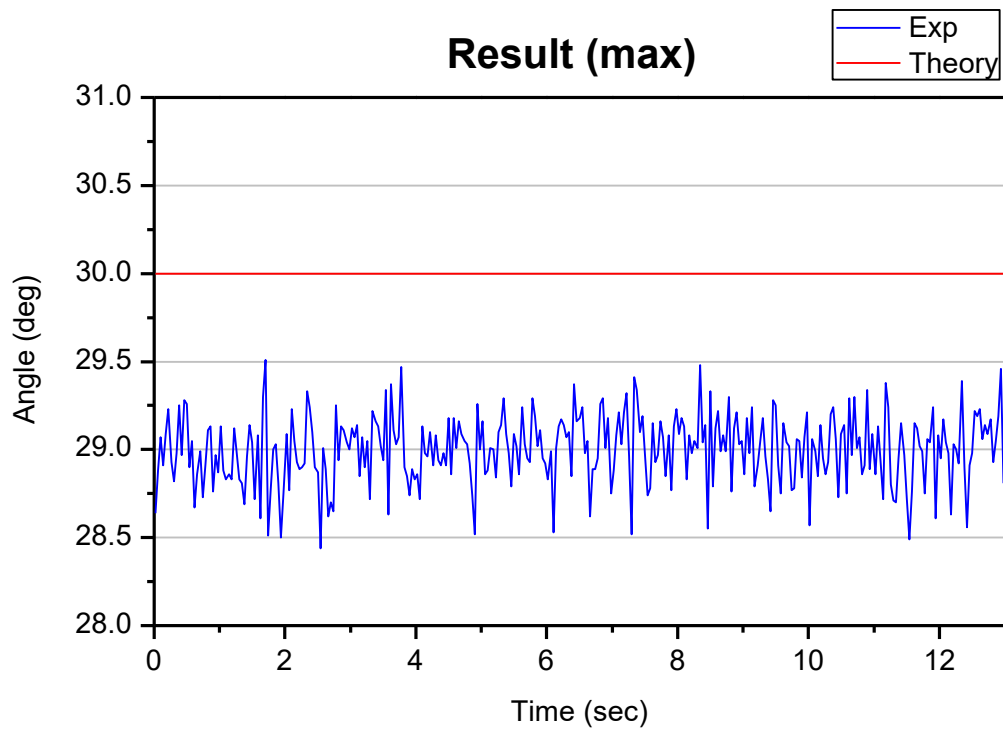


圖 3 - 27  $M = 2$ ，聲源位置  $+30^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果（計算精度  $0.01^\circ$ ）

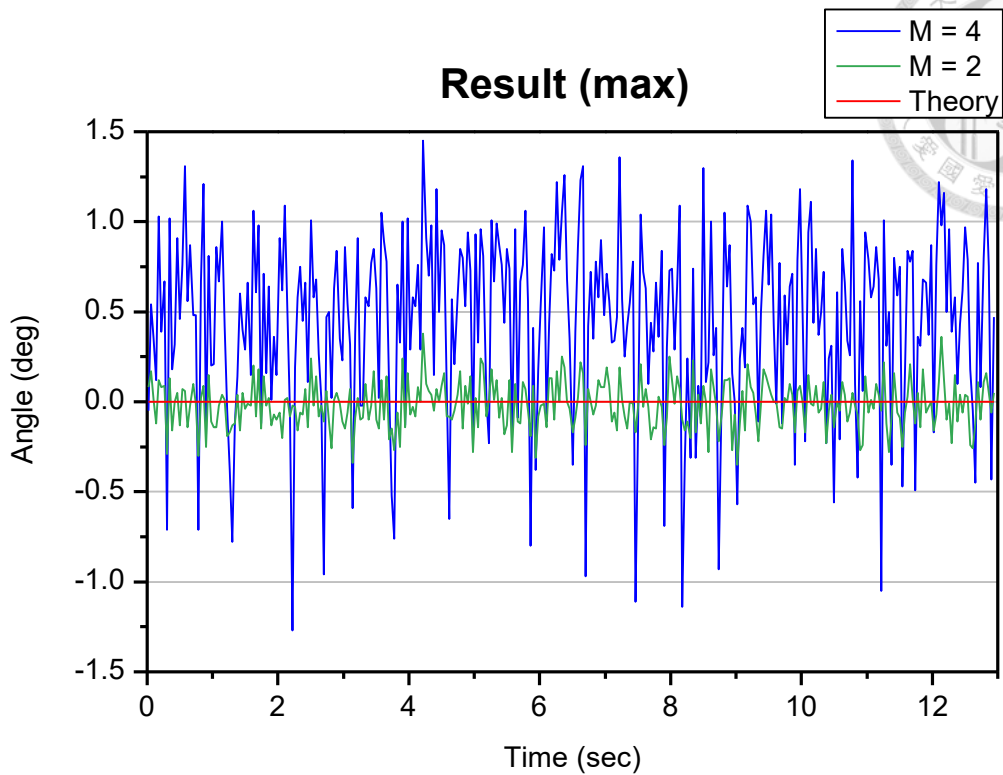


圖 3 - 28  $M = 4$  與  $M = 2$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

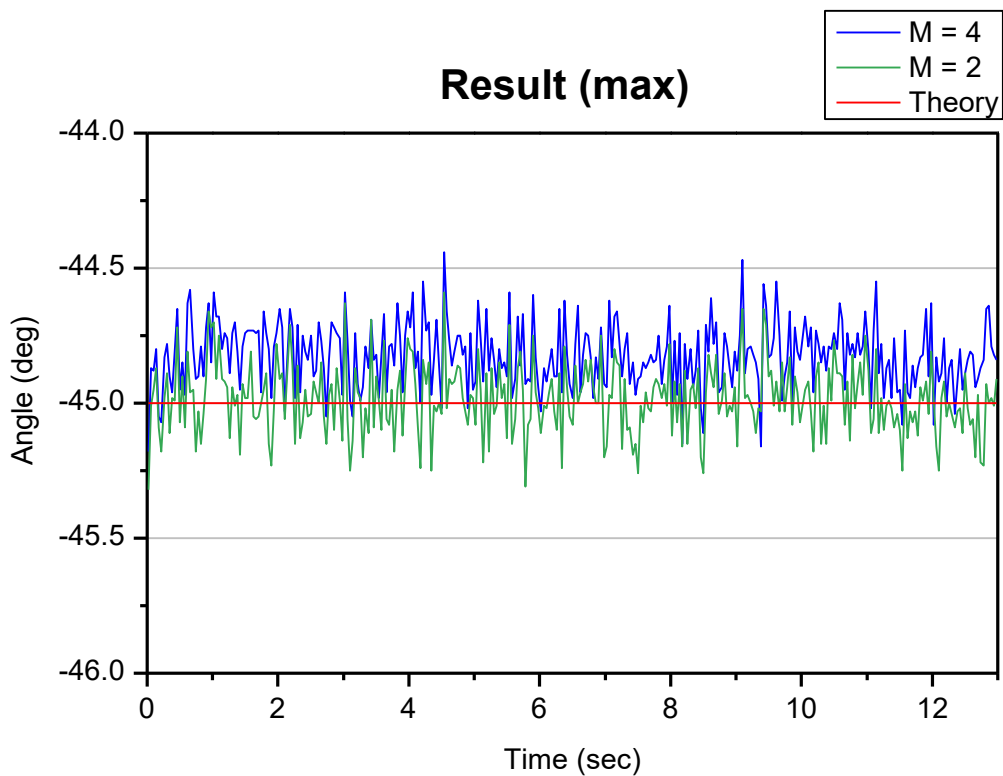


圖 3 - 29  $M = 4$  與  $M = 2$ ，聲源位置  $-45^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

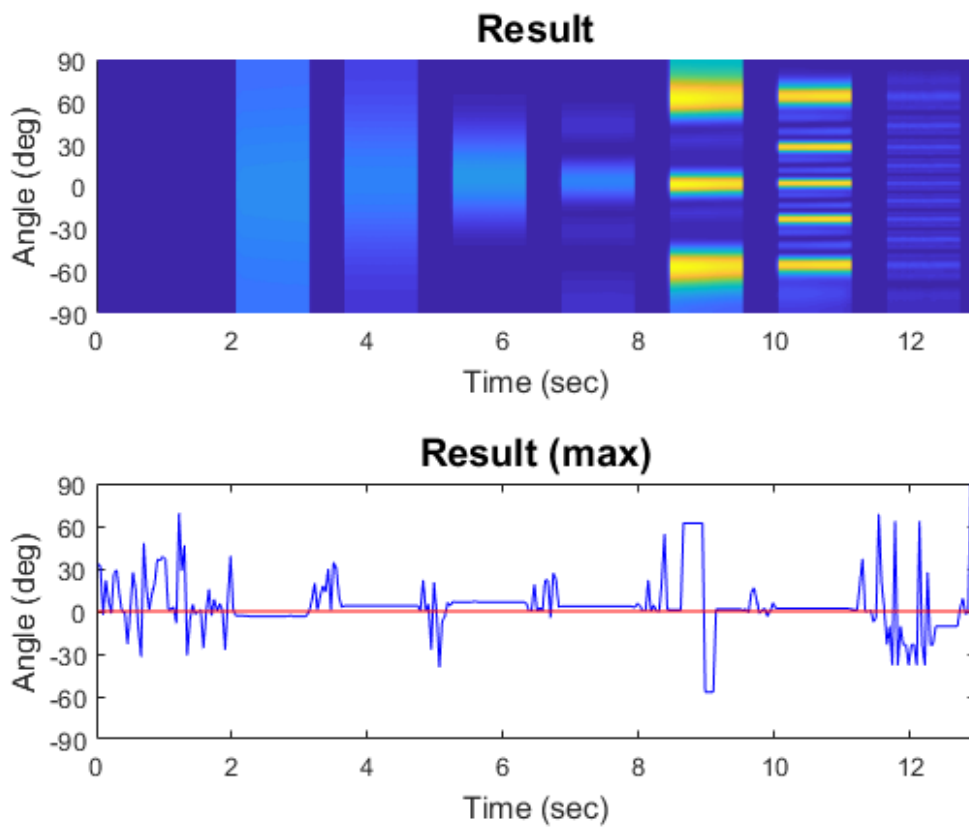
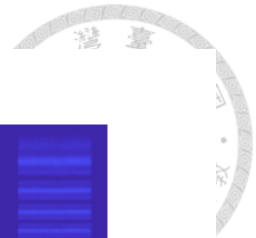


圖 3 - 30  $d = 0.1m$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果

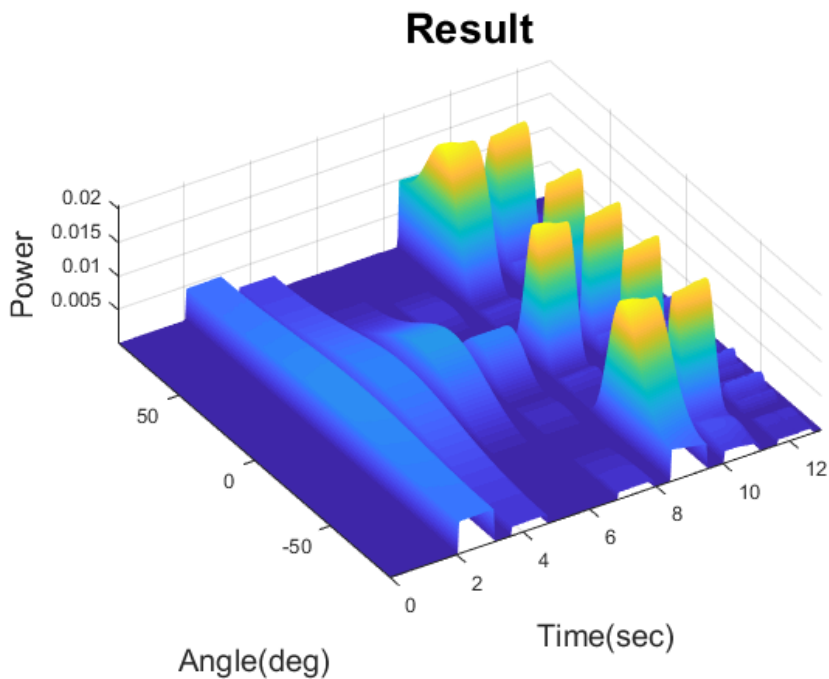


圖 3 - 31  $d = 0.1m$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果（三維）

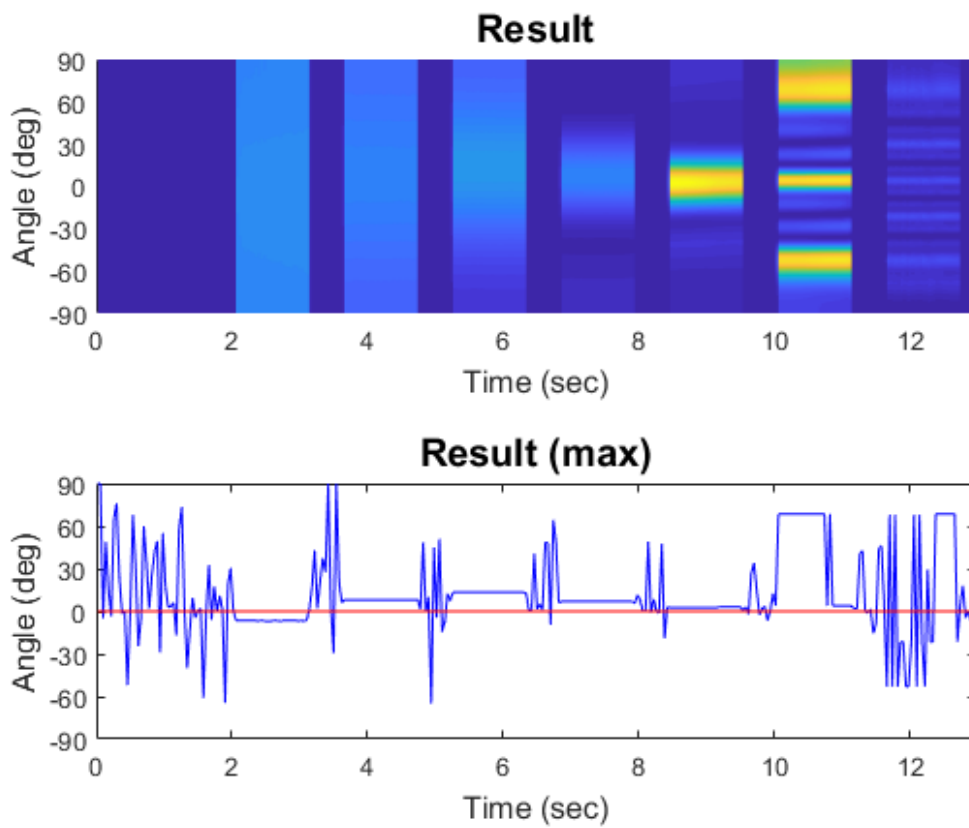
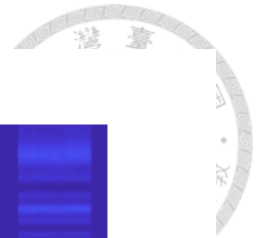


圖 3 - 32  $d = 0.05m$ ，聲源位置 $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果

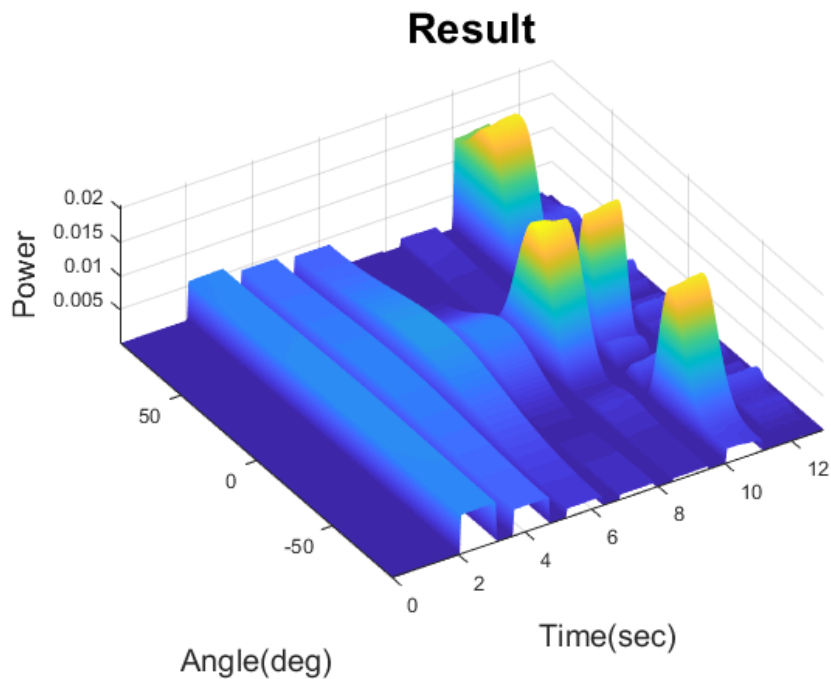
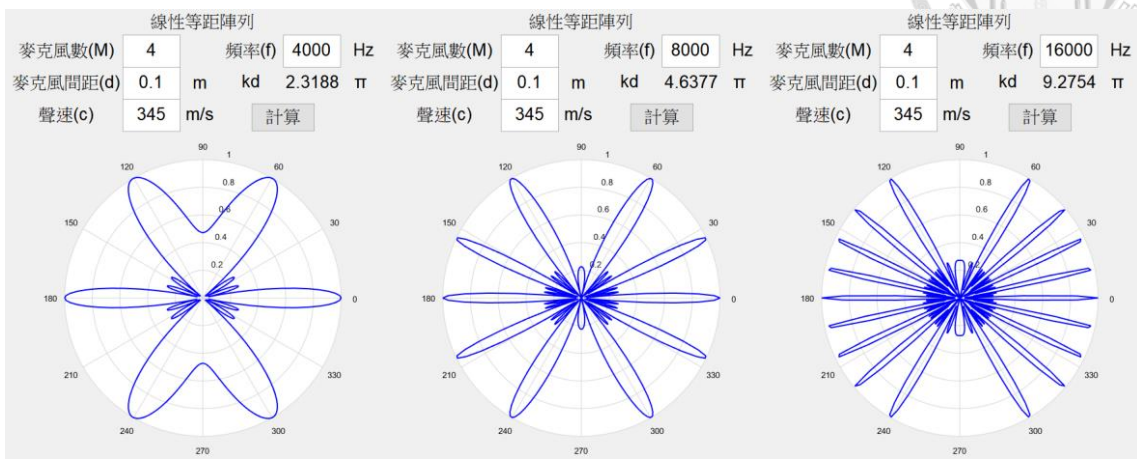


圖 3 - 33  $d = 0.05m$ ，聲源位置 $0^\circ$ ，掃頻訊號之聲源定位結果（三維）

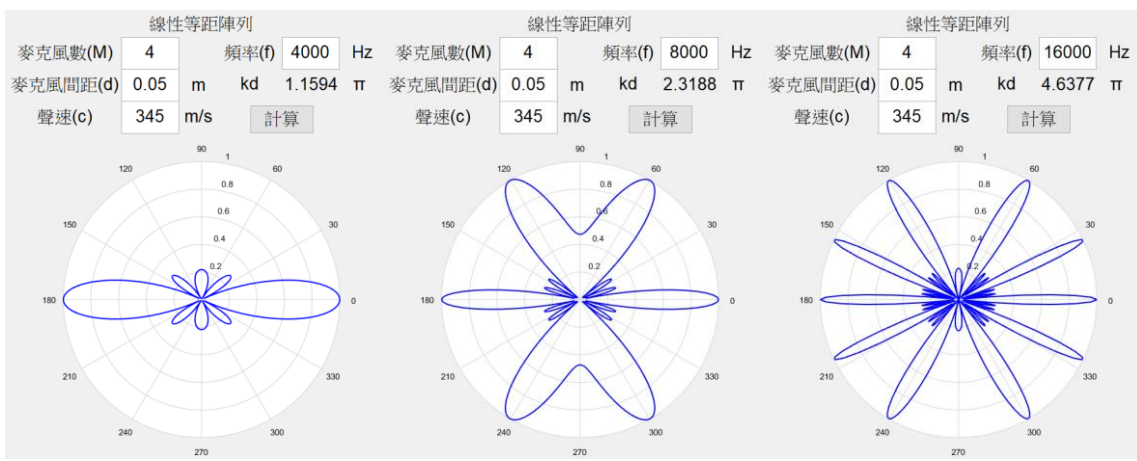


(a) 4kHz

(b) 8kHz

(c) 16kHz

圖 3 - 34  $M = 4$  ,  $d = 0.1m$  之 array pattern



(a) 4kHz

(b) 8kHz

(c) 16kHz

圖 3 - 35  $M = 4$  ,  $d = 0.05m$  之 array pattern

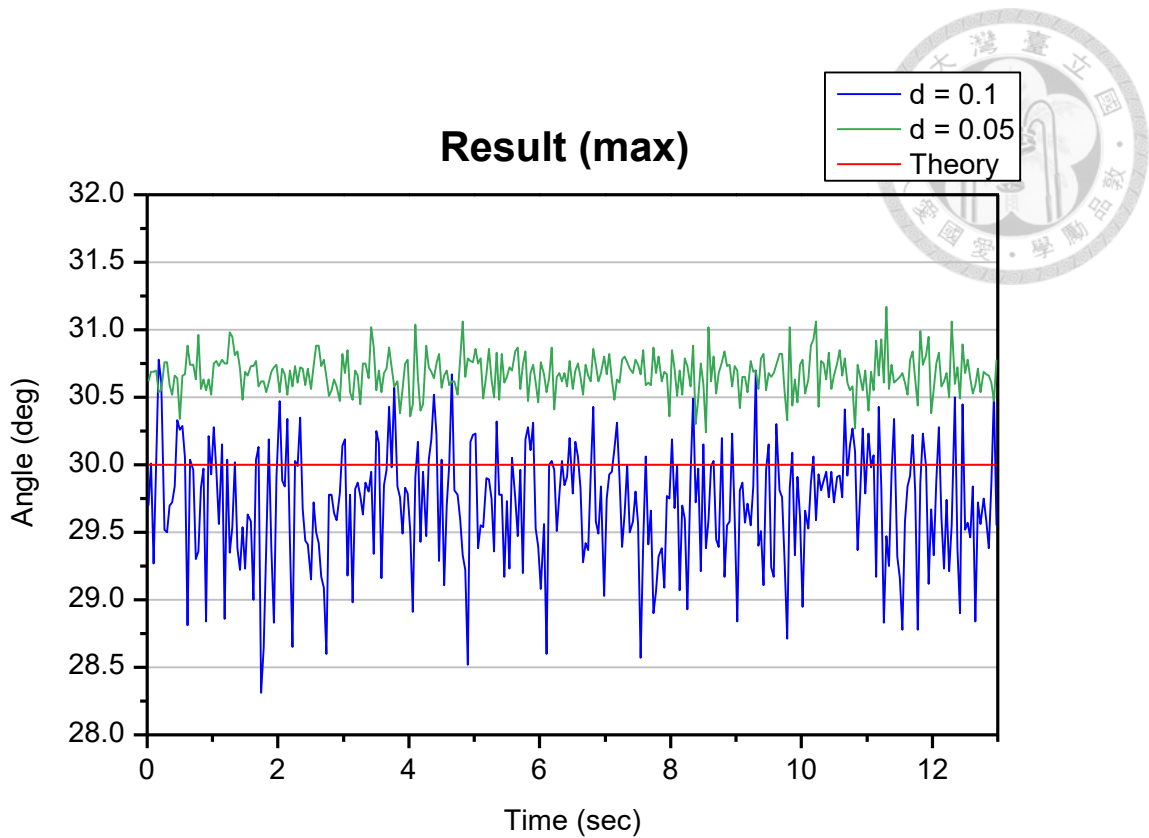


圖 3 - 36  $d = 0.1m$  與  $d = 0.05m$ ，聲源位置  $+30^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

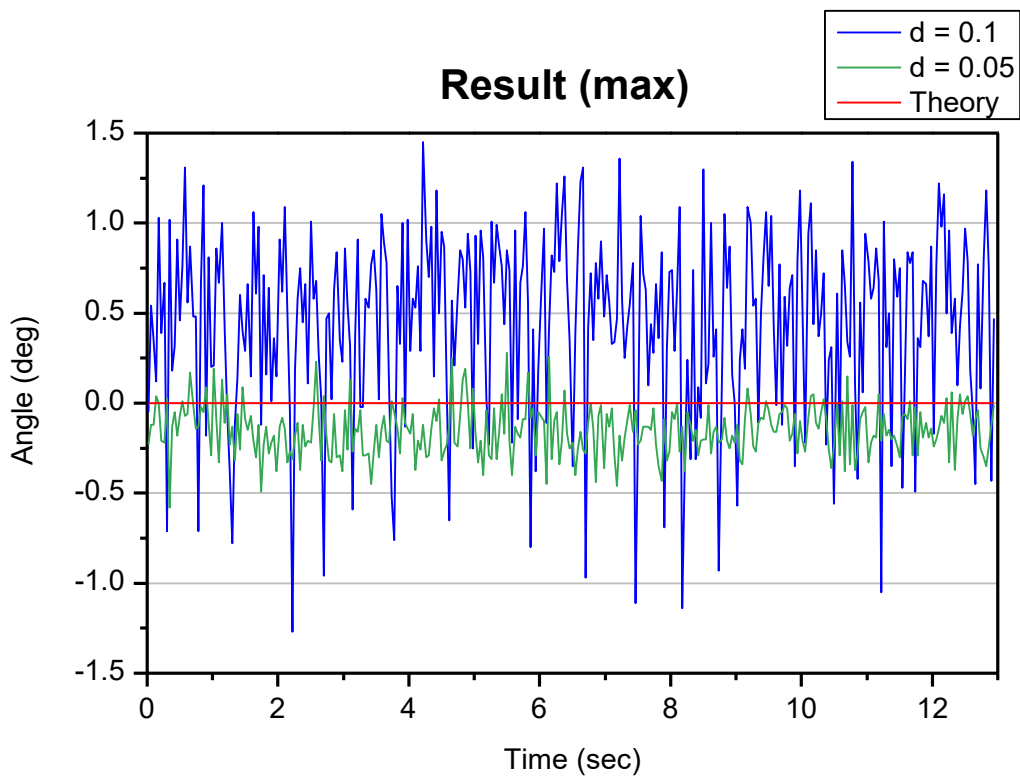


圖 3 - 37  $d = 0.1m$  與  $d = 0.05m$ ，聲源位置  $0^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

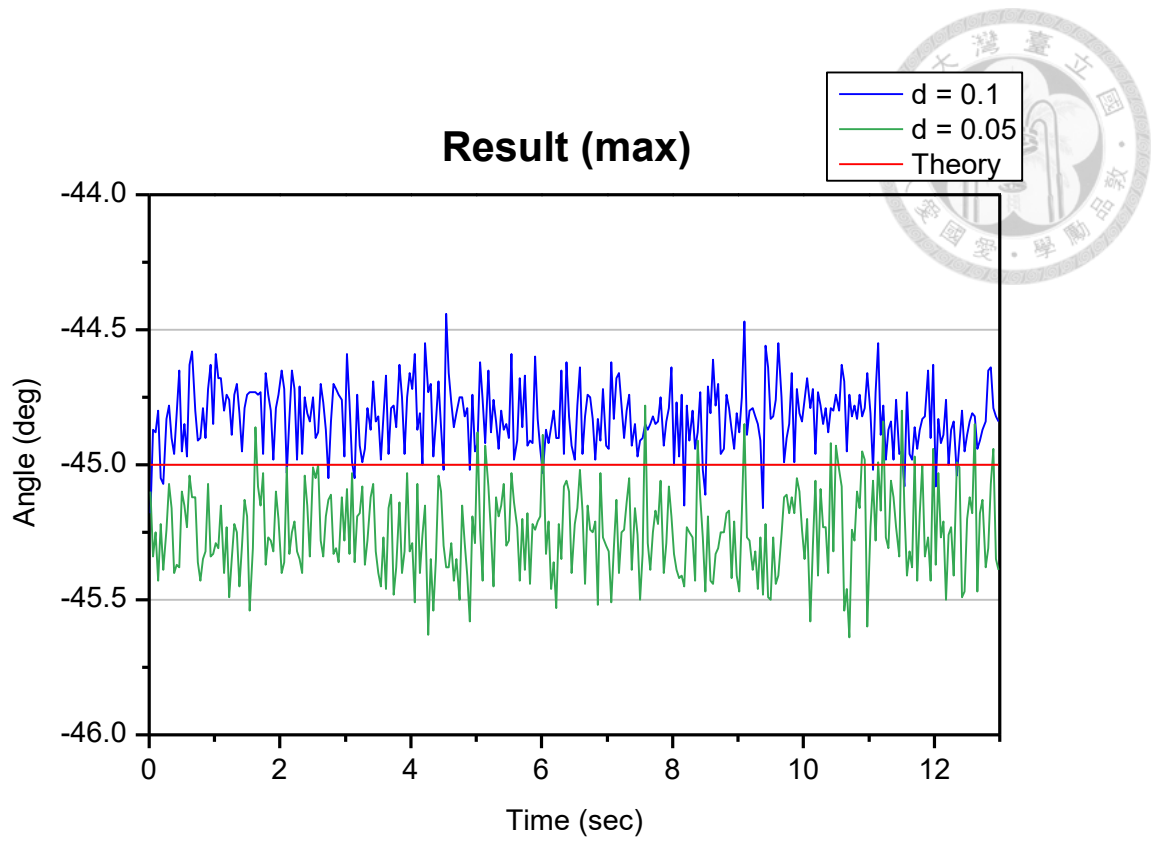


圖 3 - 38  $d = 0.1m$  與  $d = 0.05m$ ，聲源位置  $-45^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果



圖 3 - 39 BOSE 喇叭之單體位置

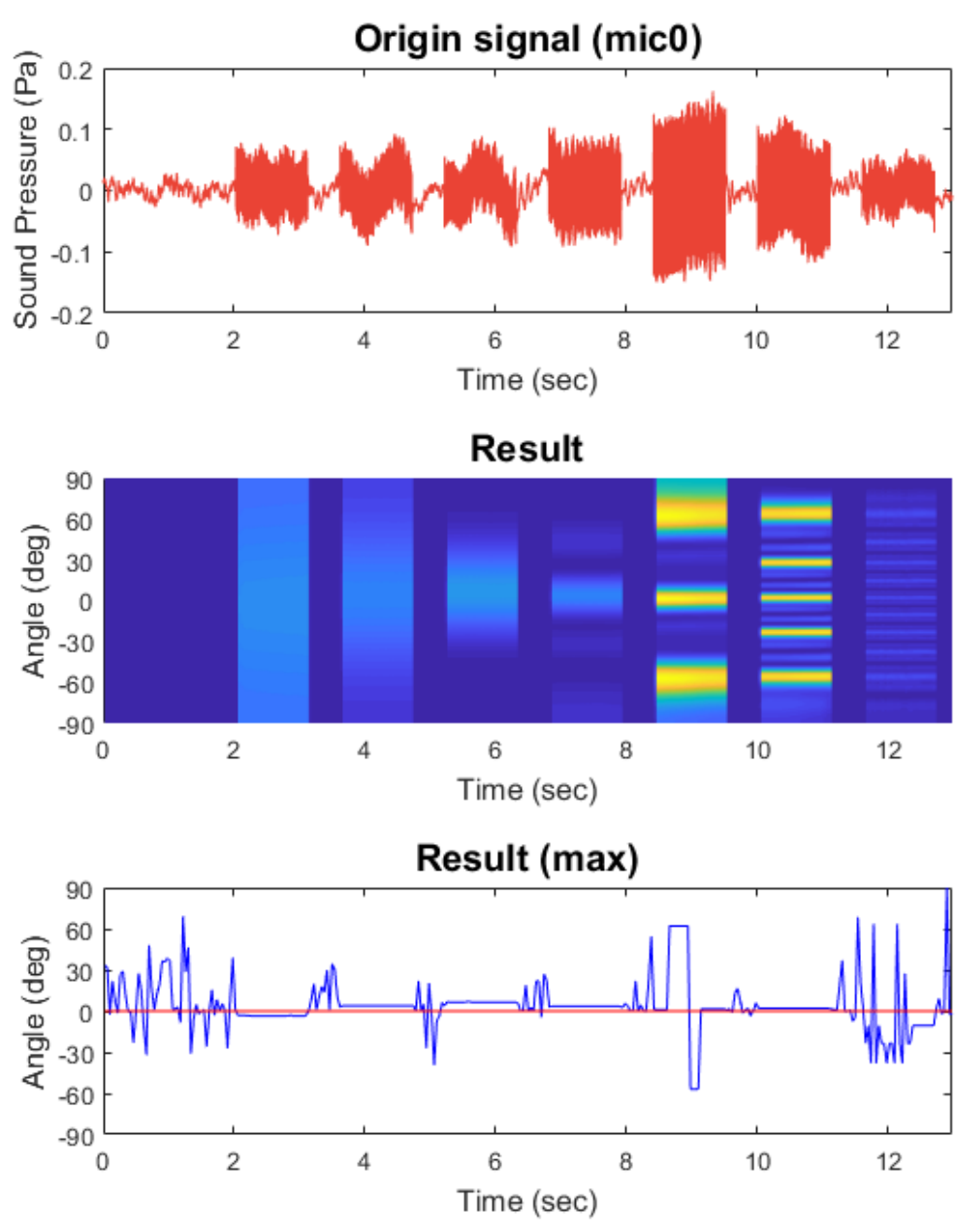
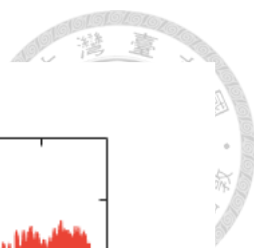


圖 3 - 40 聲源位置  $0^\circ$ ，BOSE 喇叭播放掃頻訊號之麥克風原始訊號與定位結果

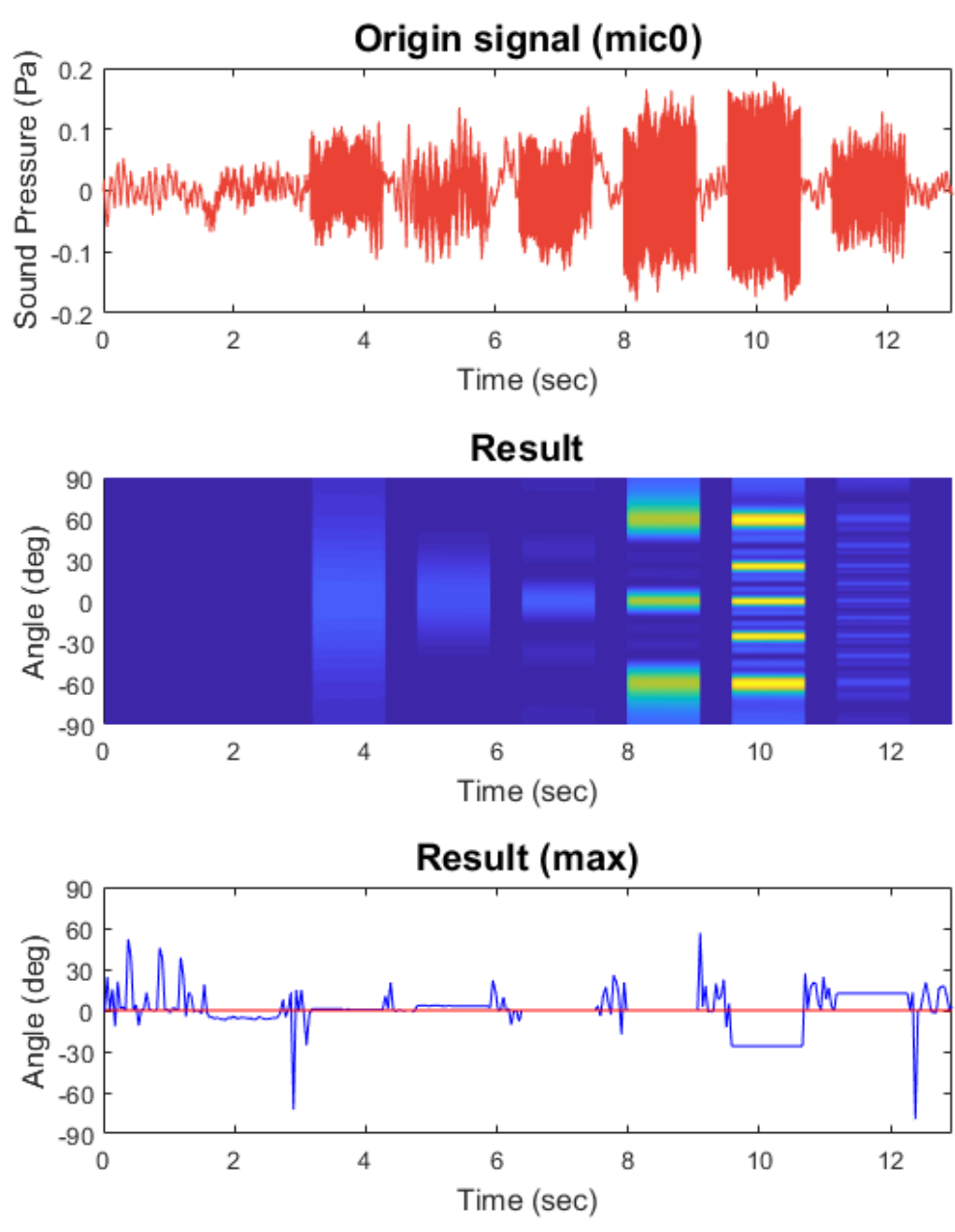
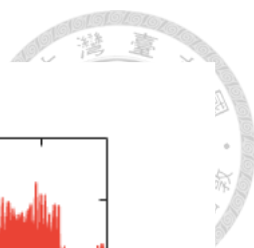


圖 3 - 41 聲源位置 0°，KINYO 喇叭播放掃頻訊號之麥克風原始訊號與定位結果

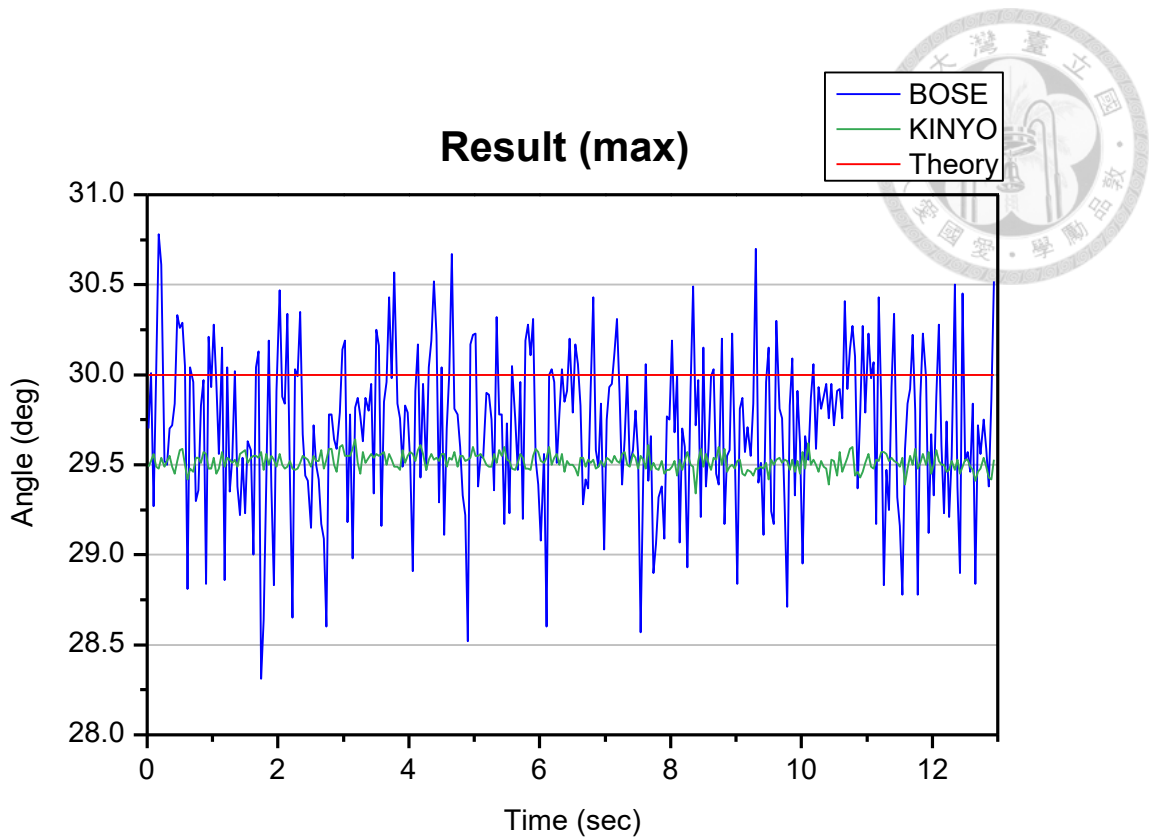


圖 3 - 42 BOSE 與 KINYO 喇叭，聲源位置  $+30^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

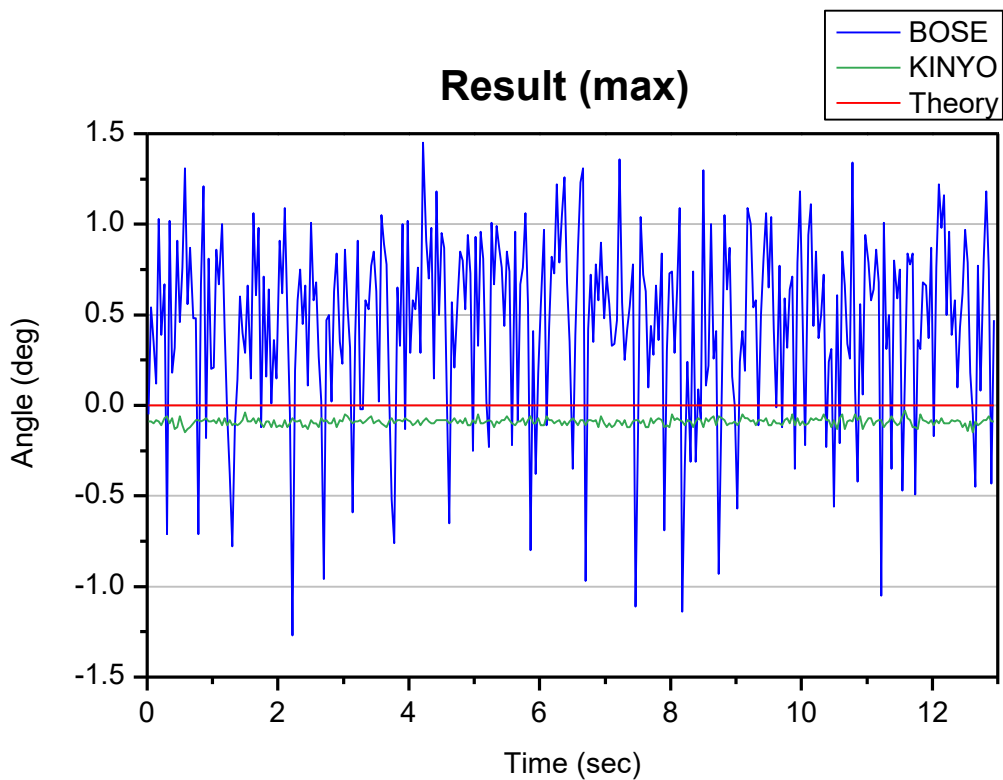


圖 3 - 43 BOSE 與 KINYO 喇叭，聲源位置  $0^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

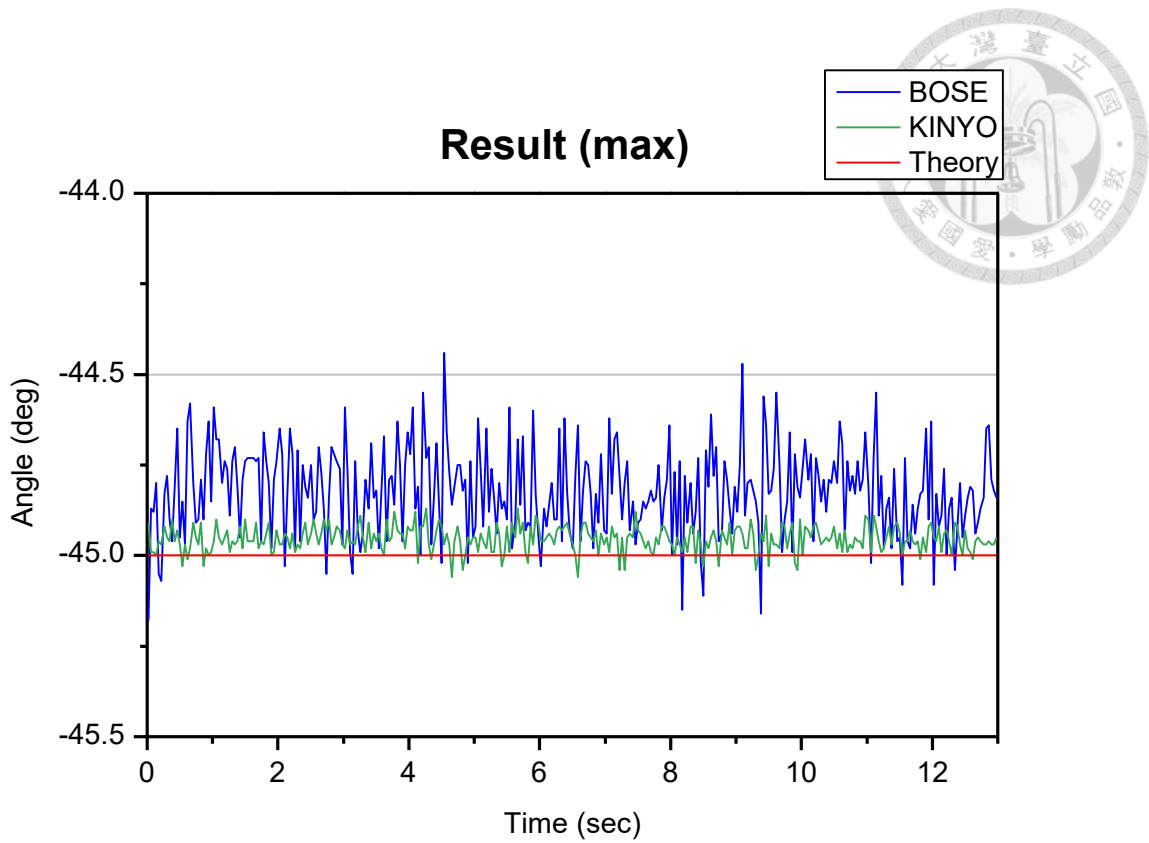


圖 3 - 44 BOSE 與 KINYO 喇叭，聲源位置  $-45^\circ$ ，白噪音之聲源定位結果

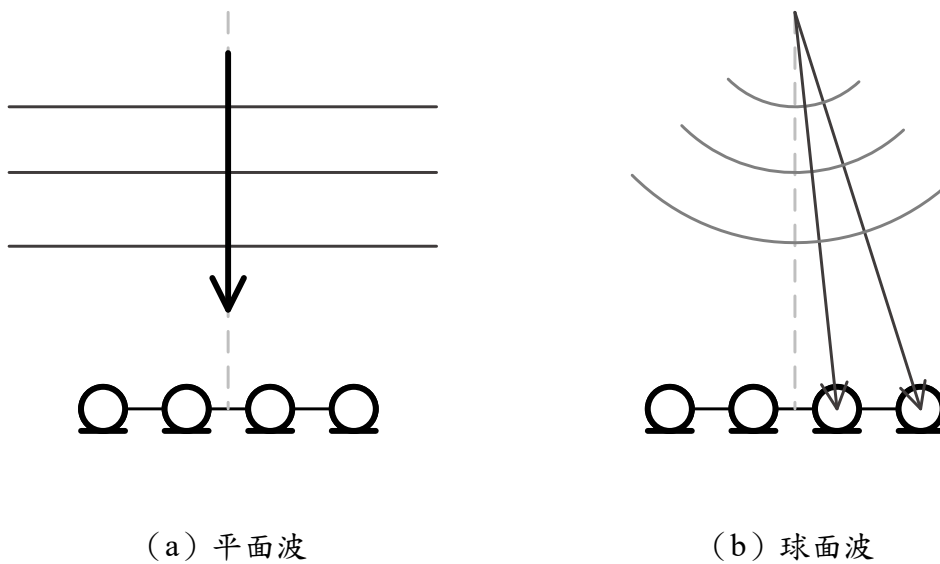


圖 3 - 45 平面波與球面波入射示意圖

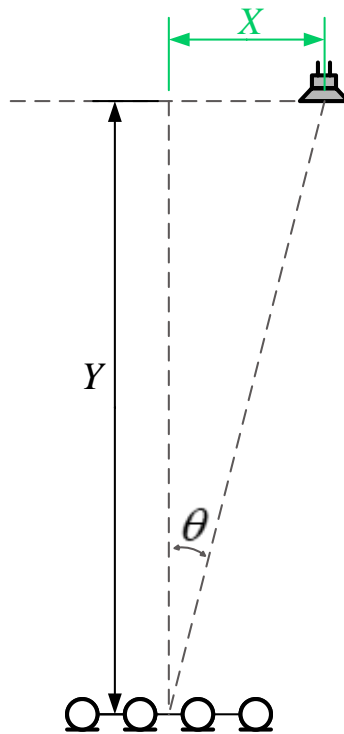


圖 3 - 46 一般環境量測實驗架設示意圖

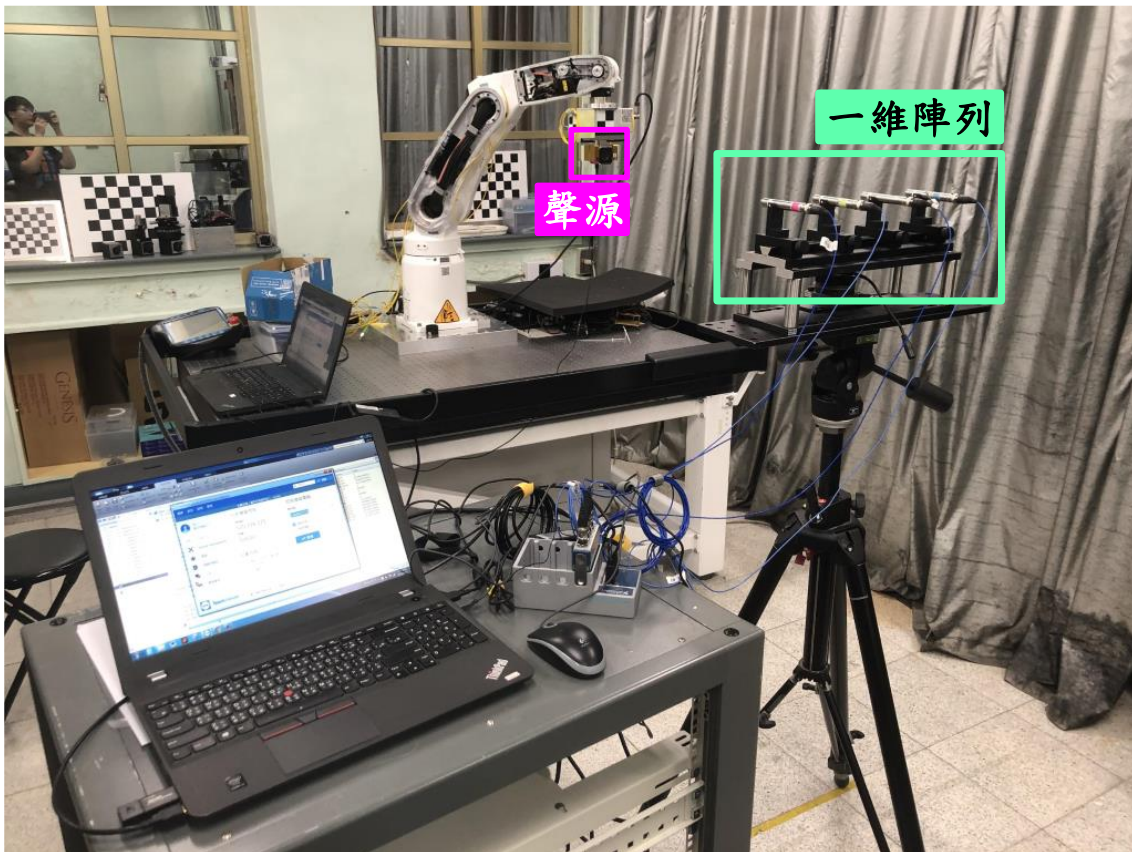


圖 3 - 47 一般環境量測實驗架設照片

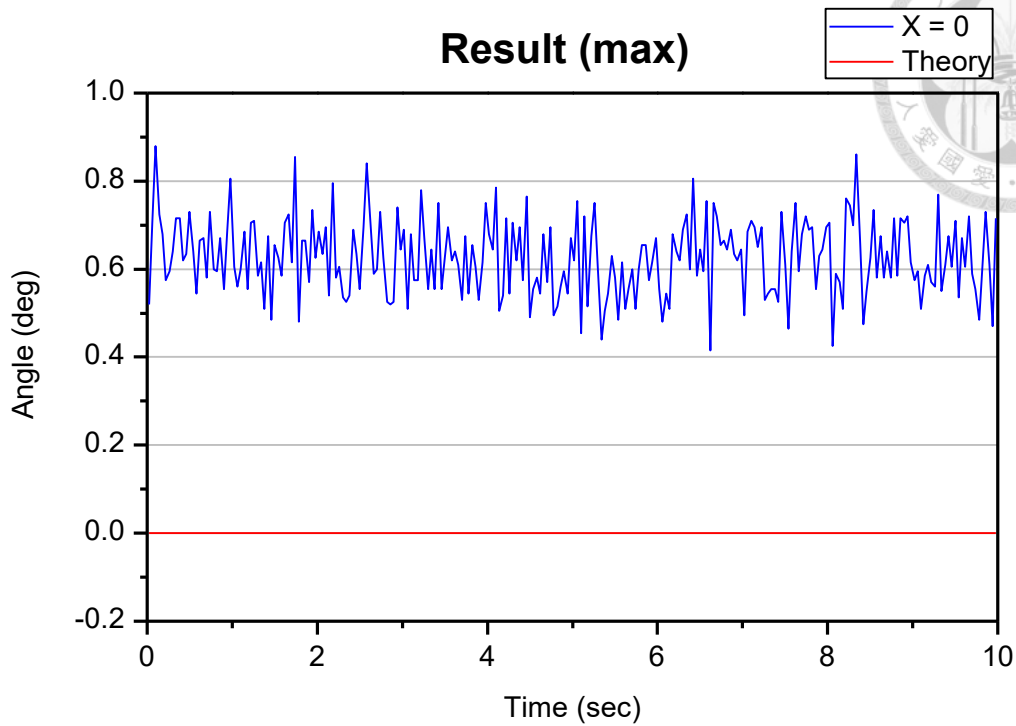


圖 3 - 48 實驗結果 (  $X = 0$  )

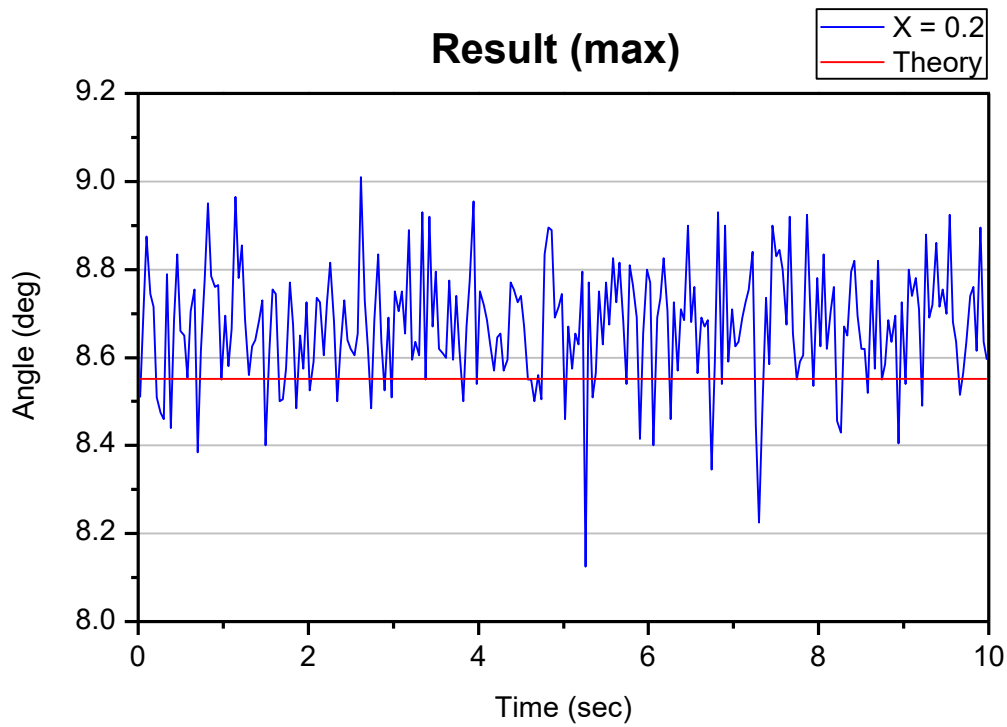


圖 3 - 49 實驗結果 (  $X = 0.2$  )

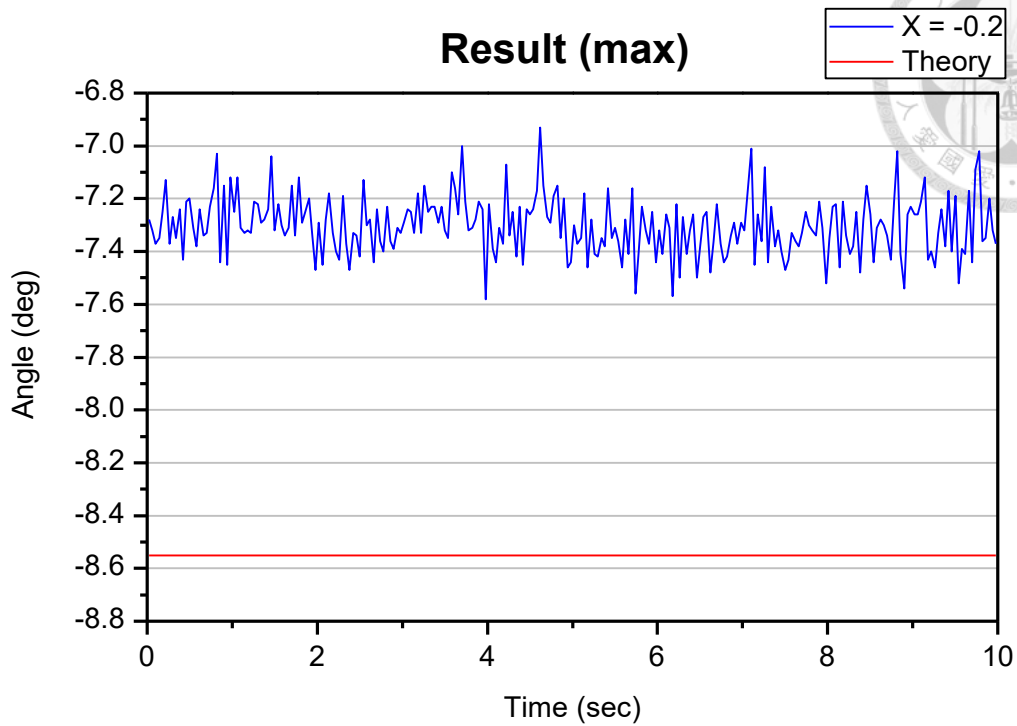


圖 3 - 50 實驗結果 (  $X = -0.2$  )

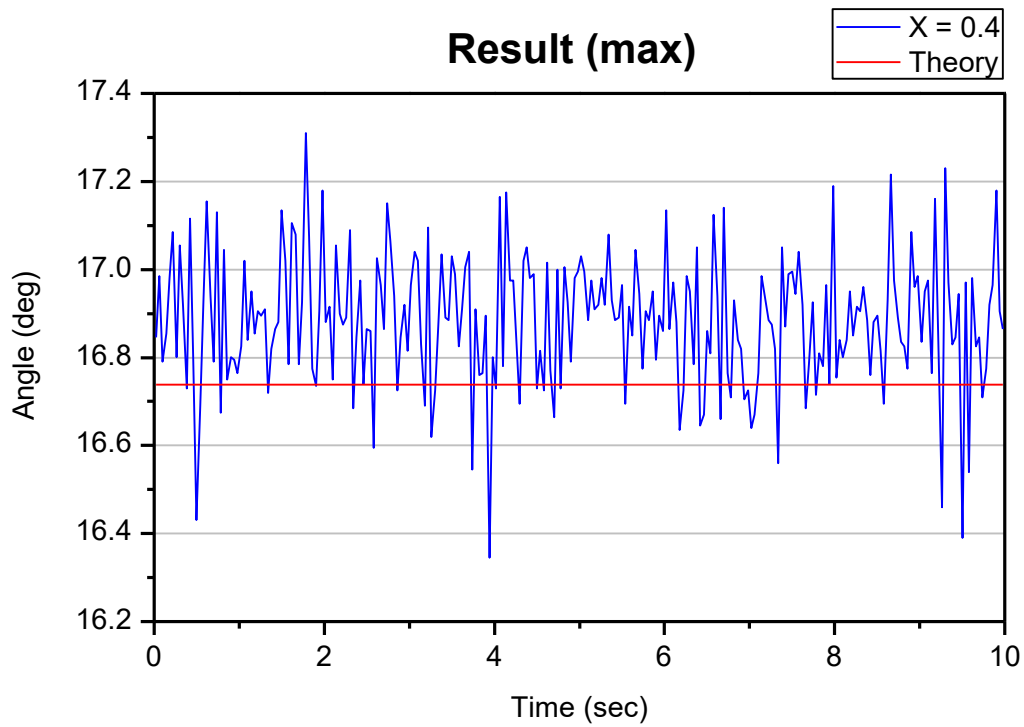


圖 3 - 51 實驗結果 (  $X = 0.4$  )

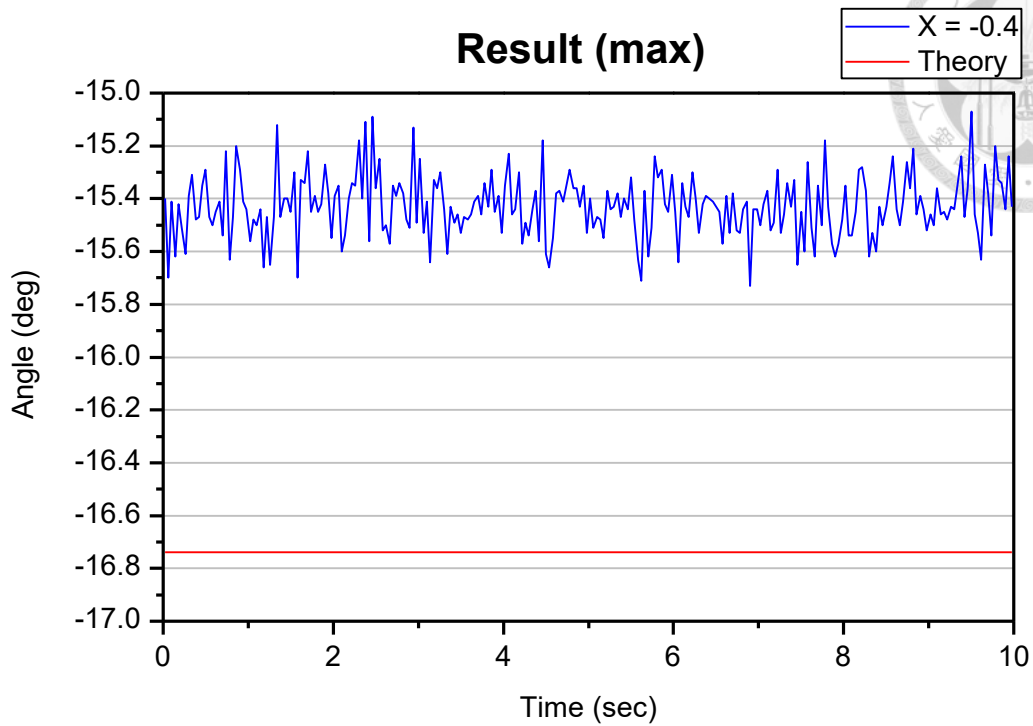


圖 3 - 52 實驗結果 (  $X = -0.4$  )



圖 3 - 53 以麥克風連線中心為原點

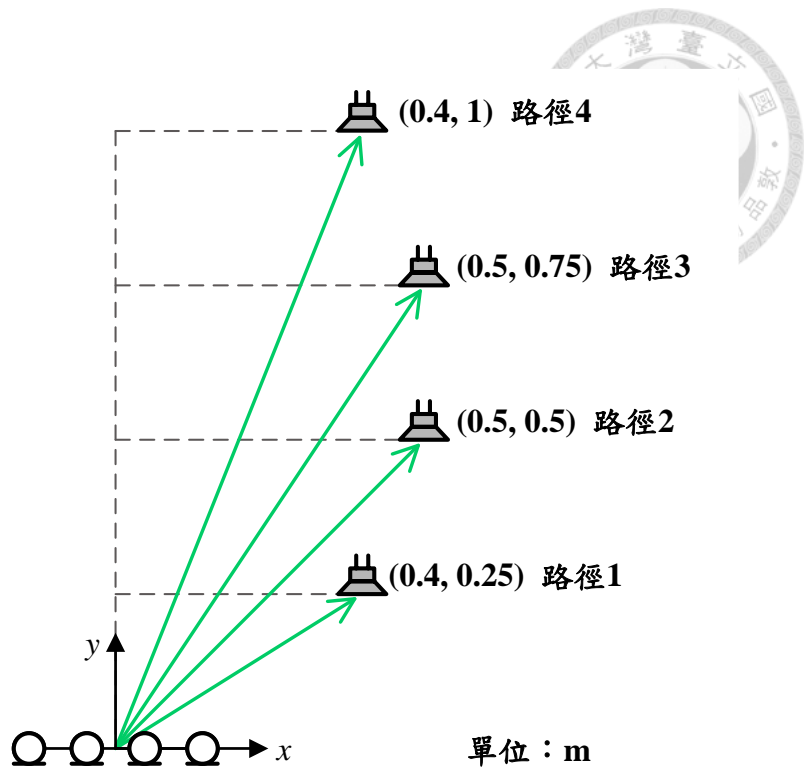


圖 3 - 54 近場實驗聲源移動路徑示意圖

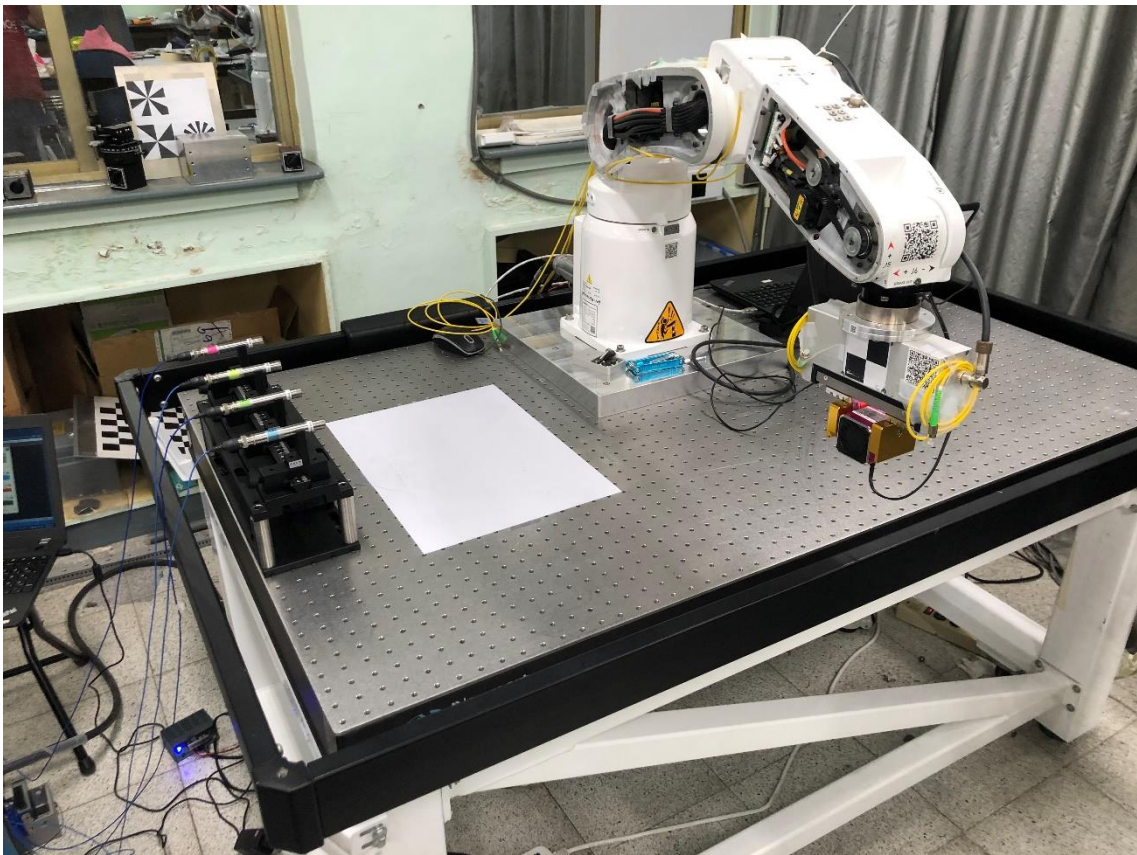


圖 3 - 55 實驗整體架設

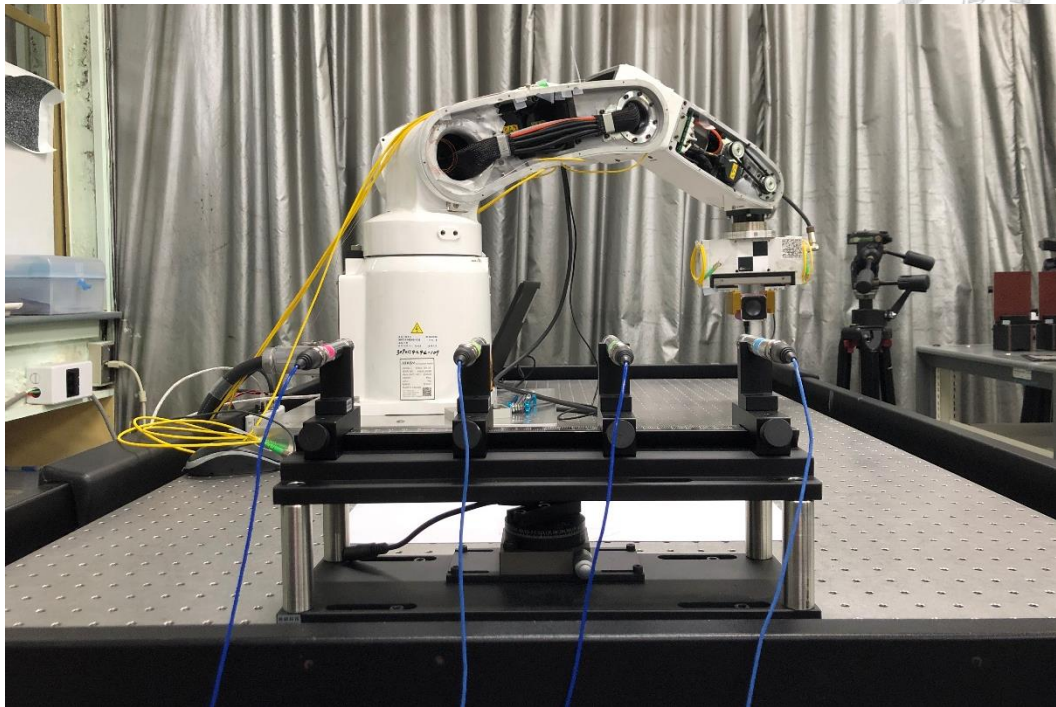


圖 3 - 56 實驗整體架設

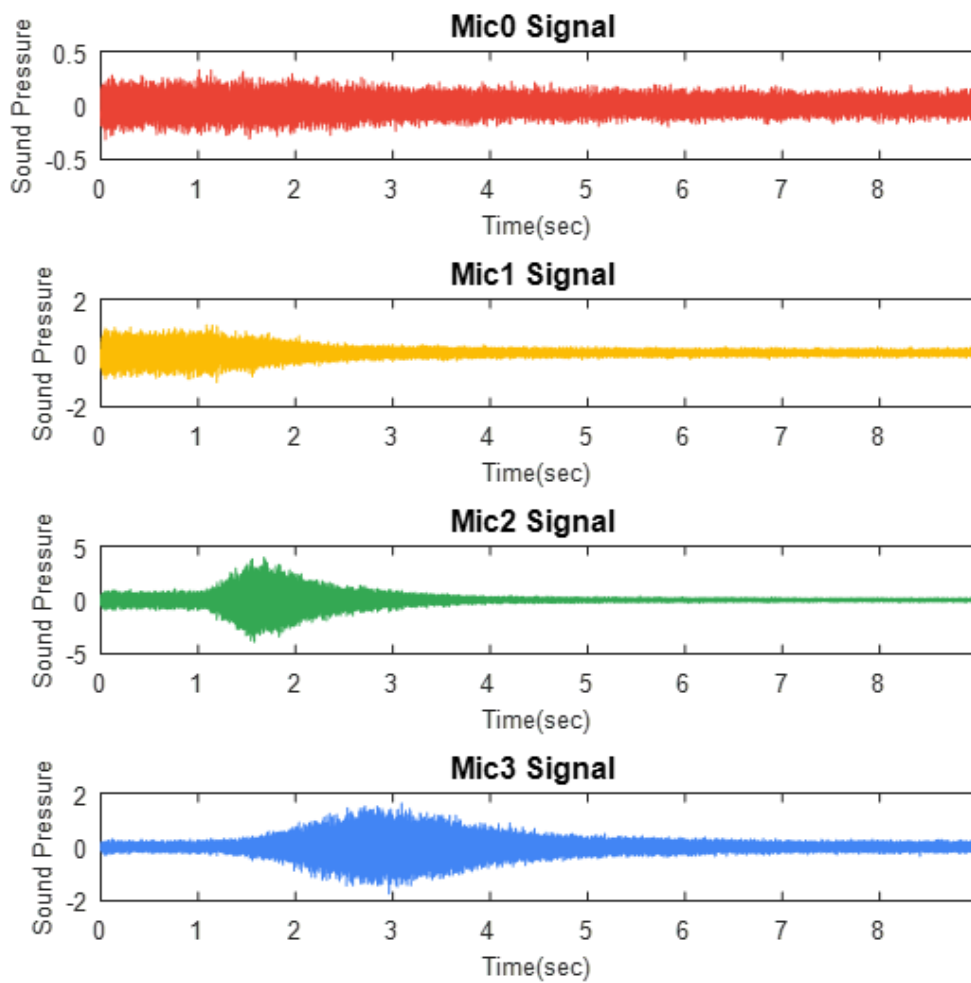


圖 3 - 57 路徑 1 之麥克風原始訊號

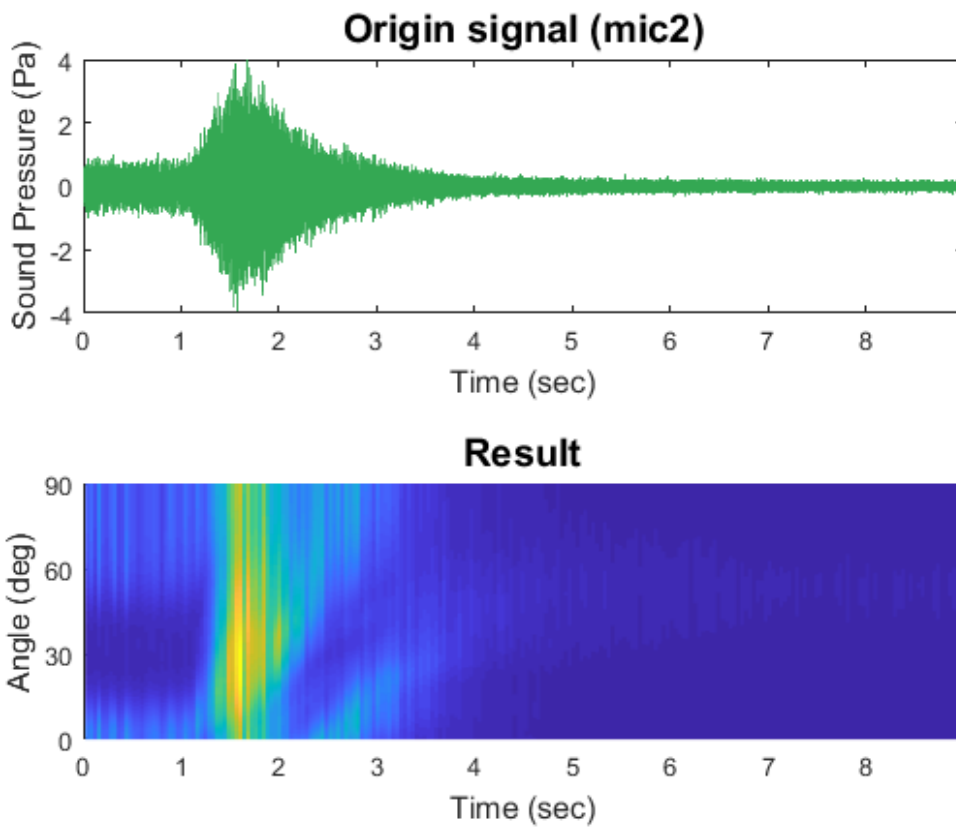
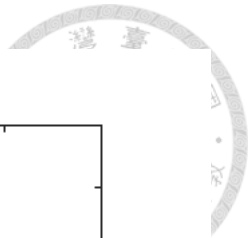


圖 3 - 58 路徑 1 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果

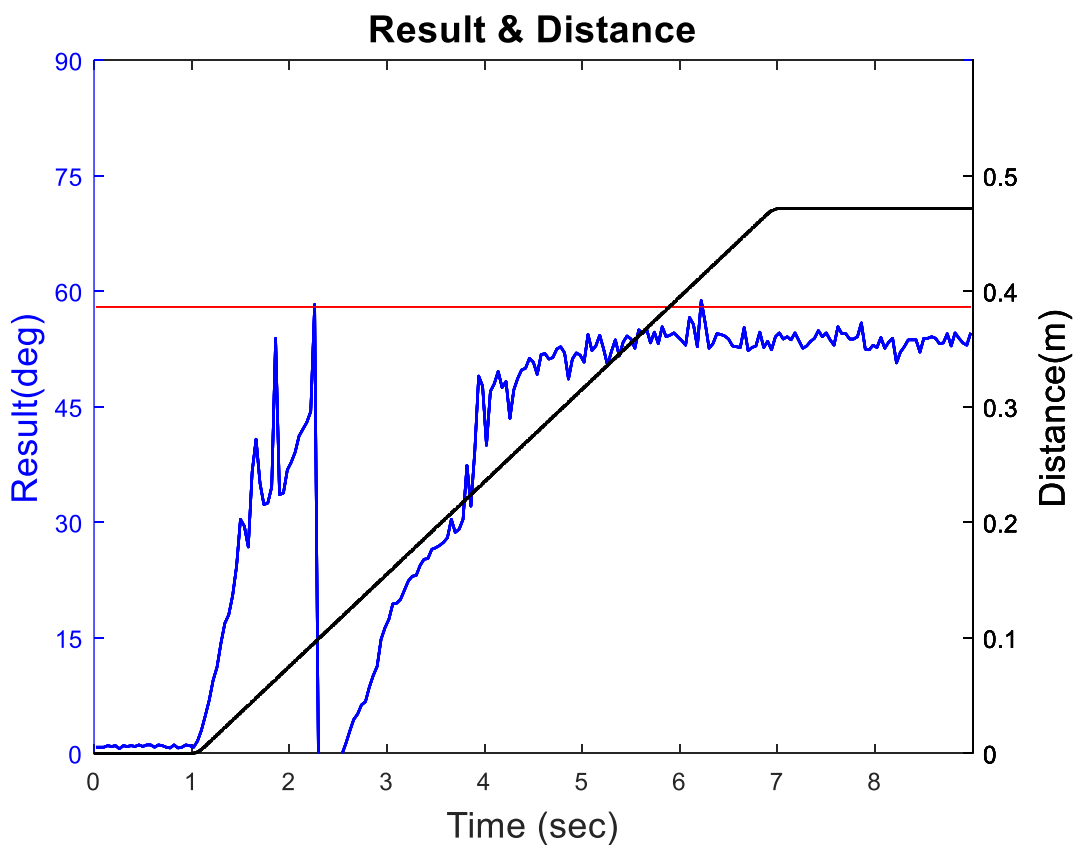


圖 3 - 59 路徑 1 之聲源定位結果與聲源距離

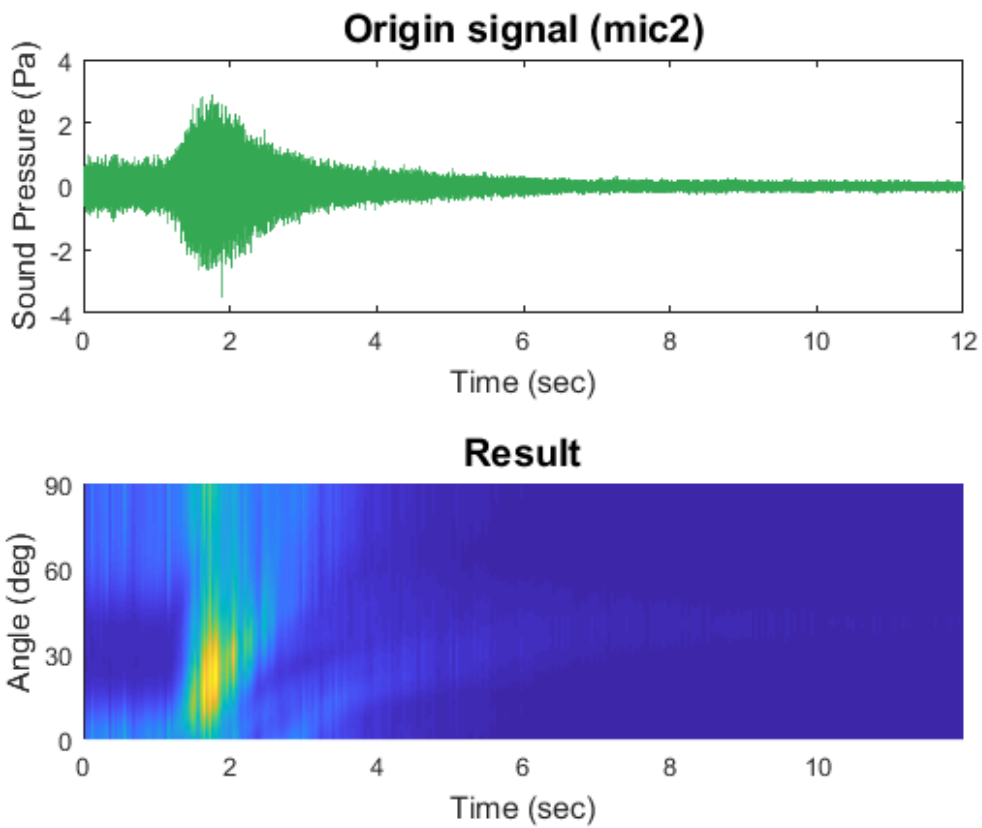
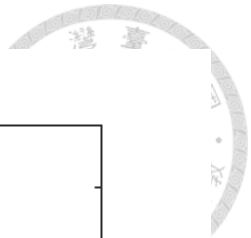


圖 3 - 60 路徑 2 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果

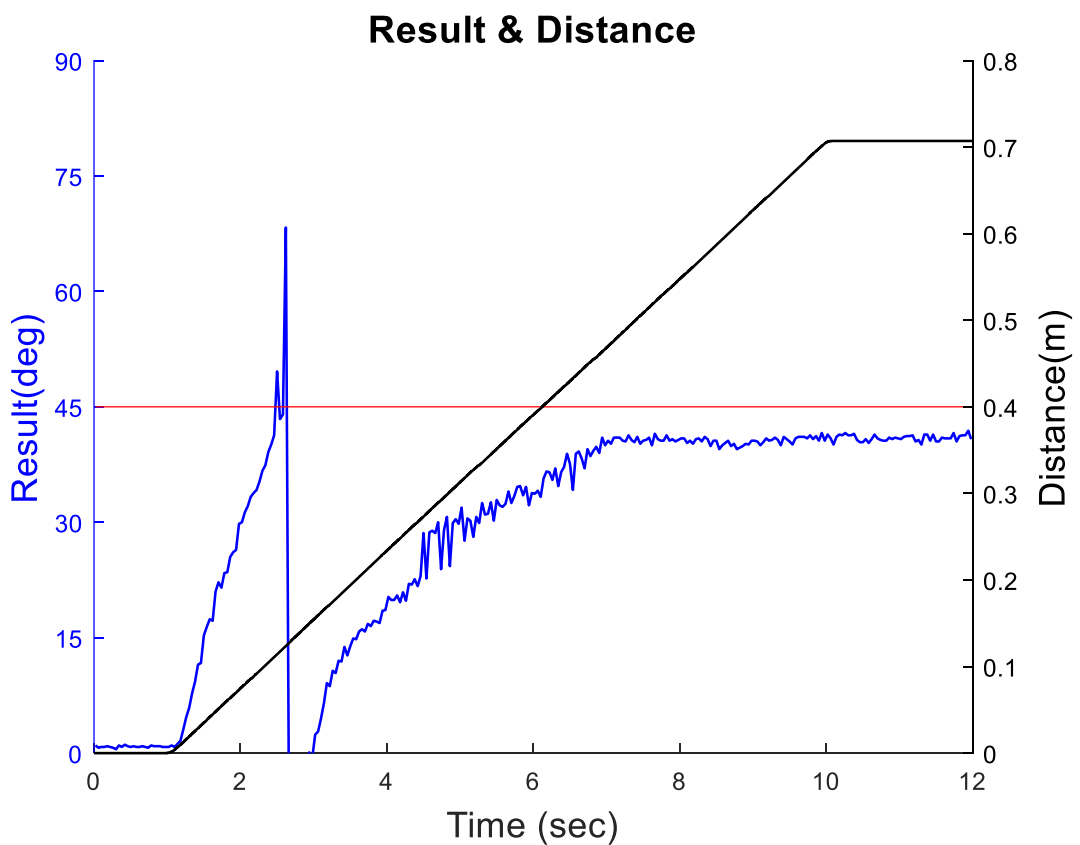


圖 3 - 61 路徑 2 之聲源定位結果與聲源距離

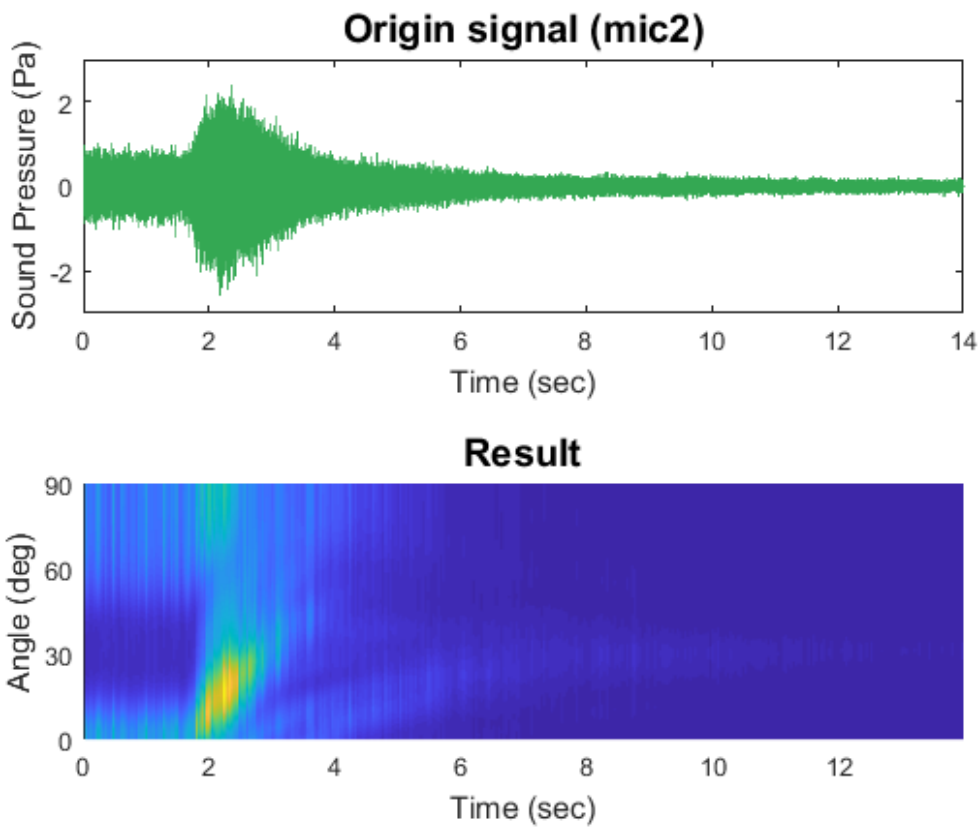
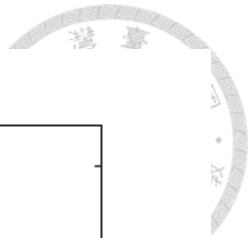


圖 3 - 62 路徑 3 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果

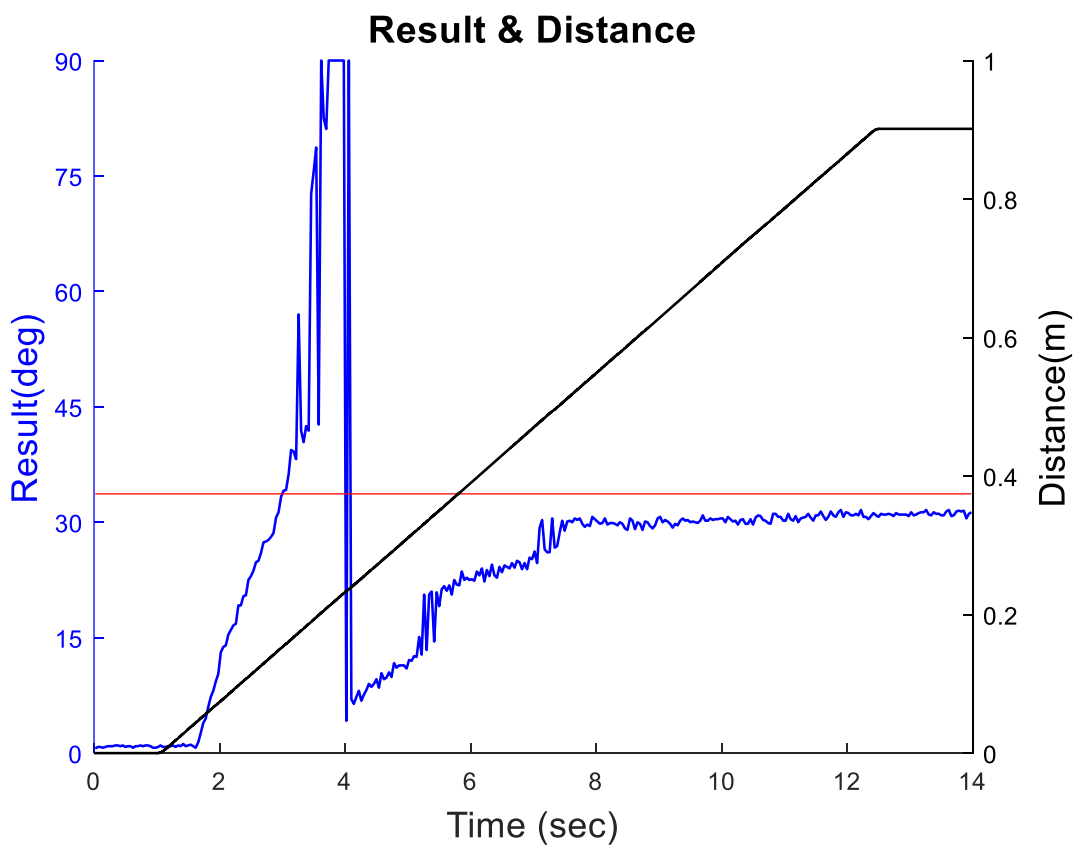


圖 3 - 63 路徑 3 之聲源定位結果與聲源距離

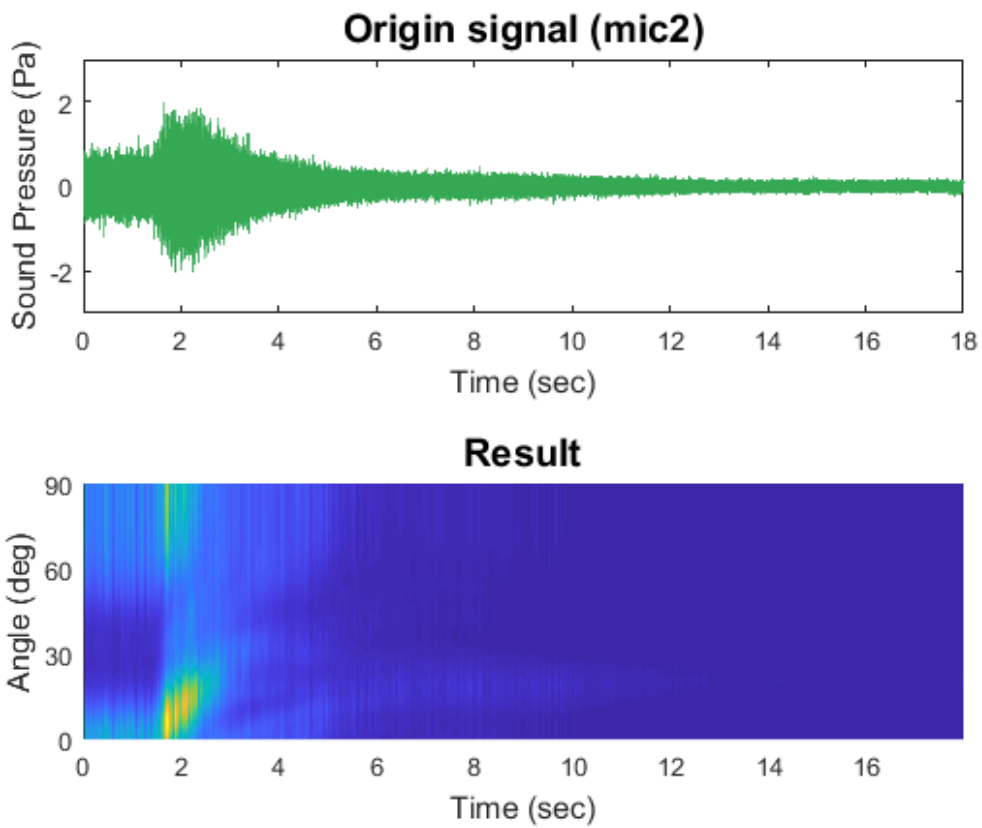
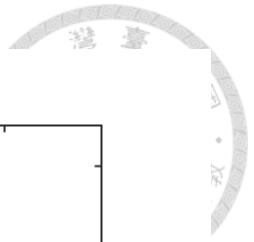


圖 3 - 64 路徑 4 之 mic2 原始訊號與聲源定位結果

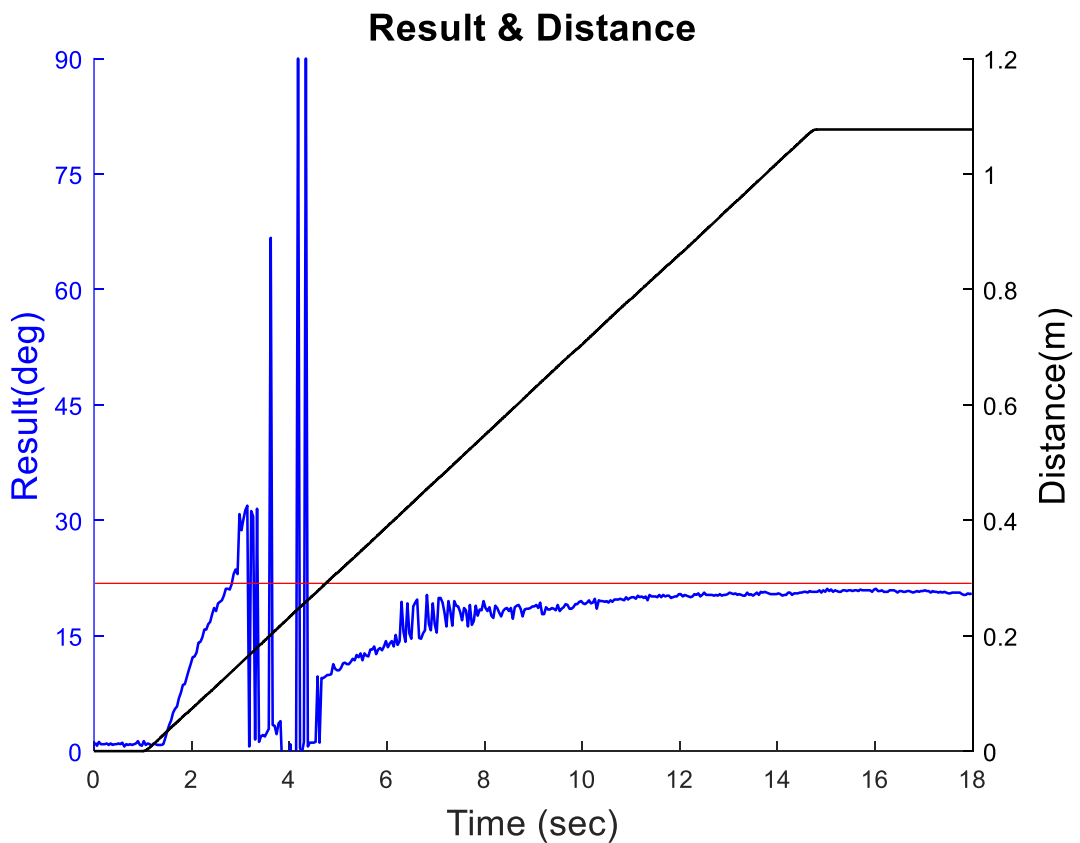


圖 3 - 65 路徑 4 之聲源定位結果與聲源距離

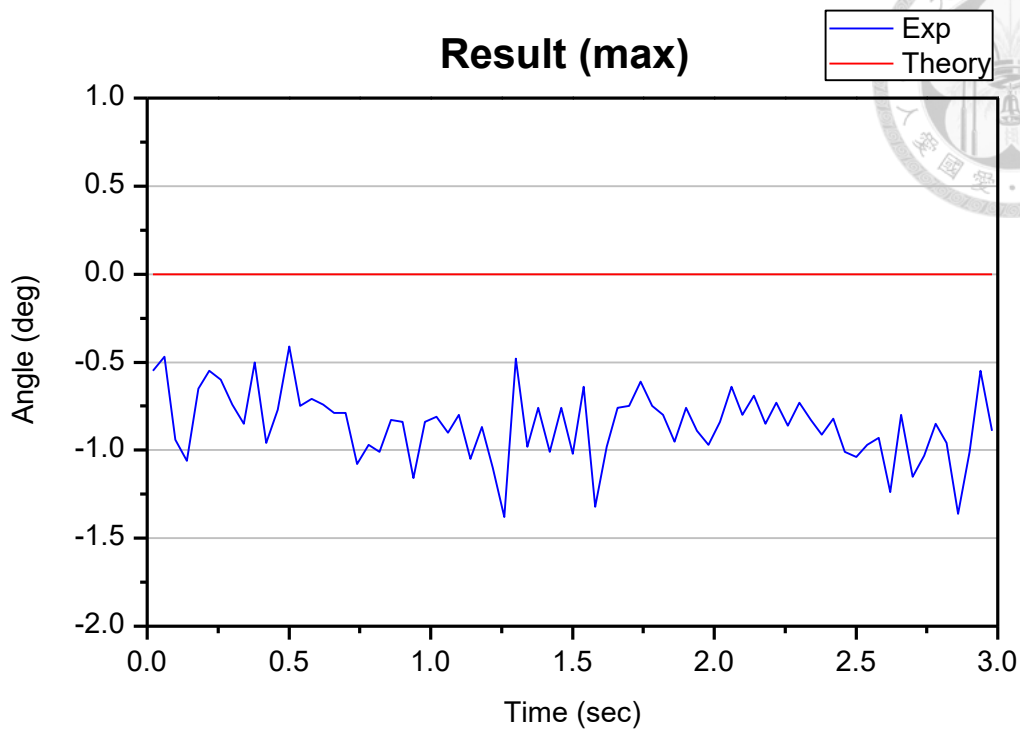


圖 3 - 66 聲源座標 (0,1) 之定位計算結果

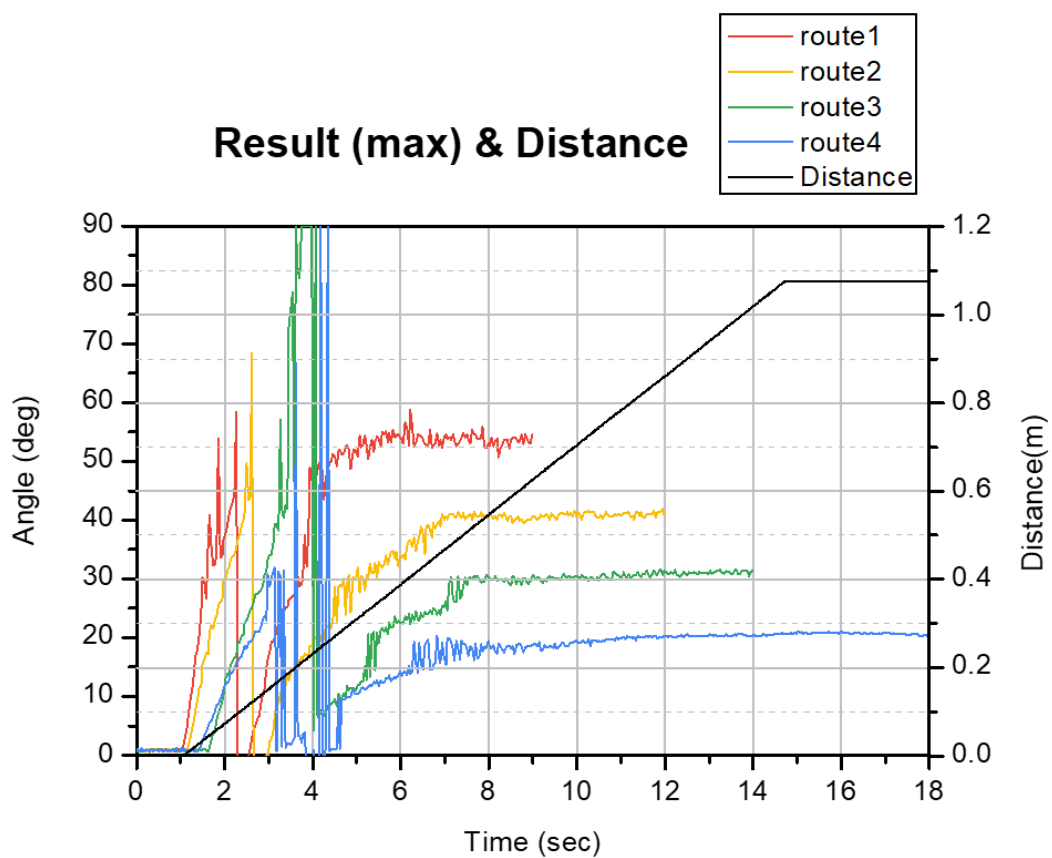


圖 3 - 67 四種路徑結果與聲源距離比較

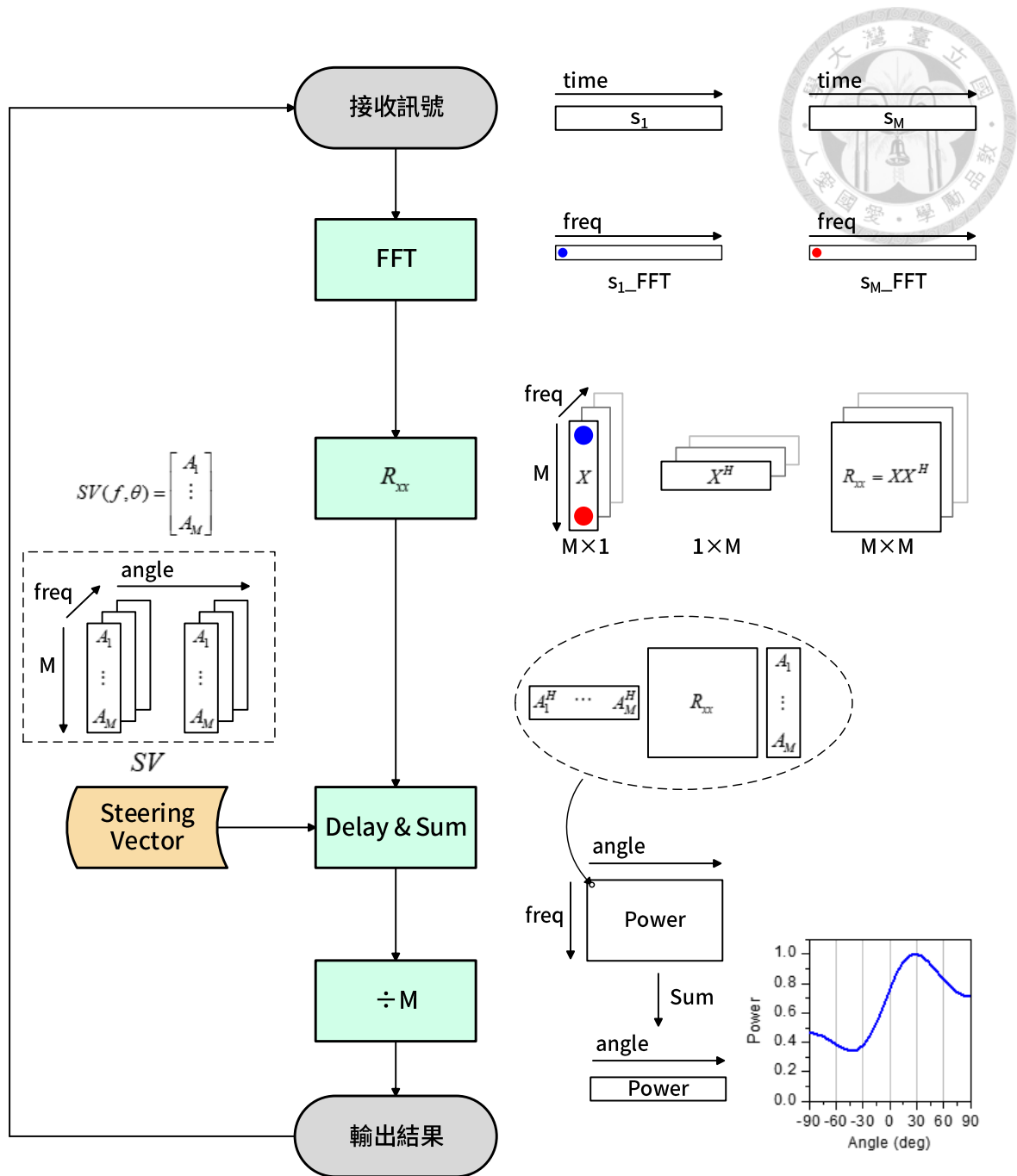


圖 3 - 68 即時聲源追蹤程式運算流程圖

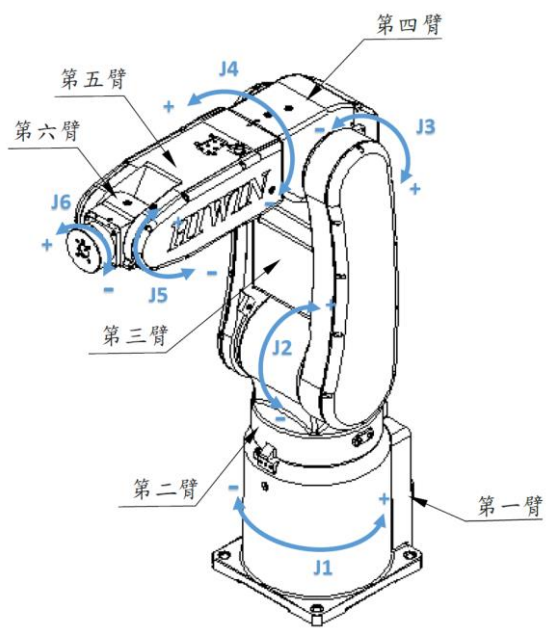


圖 3 - 69 機械手臂

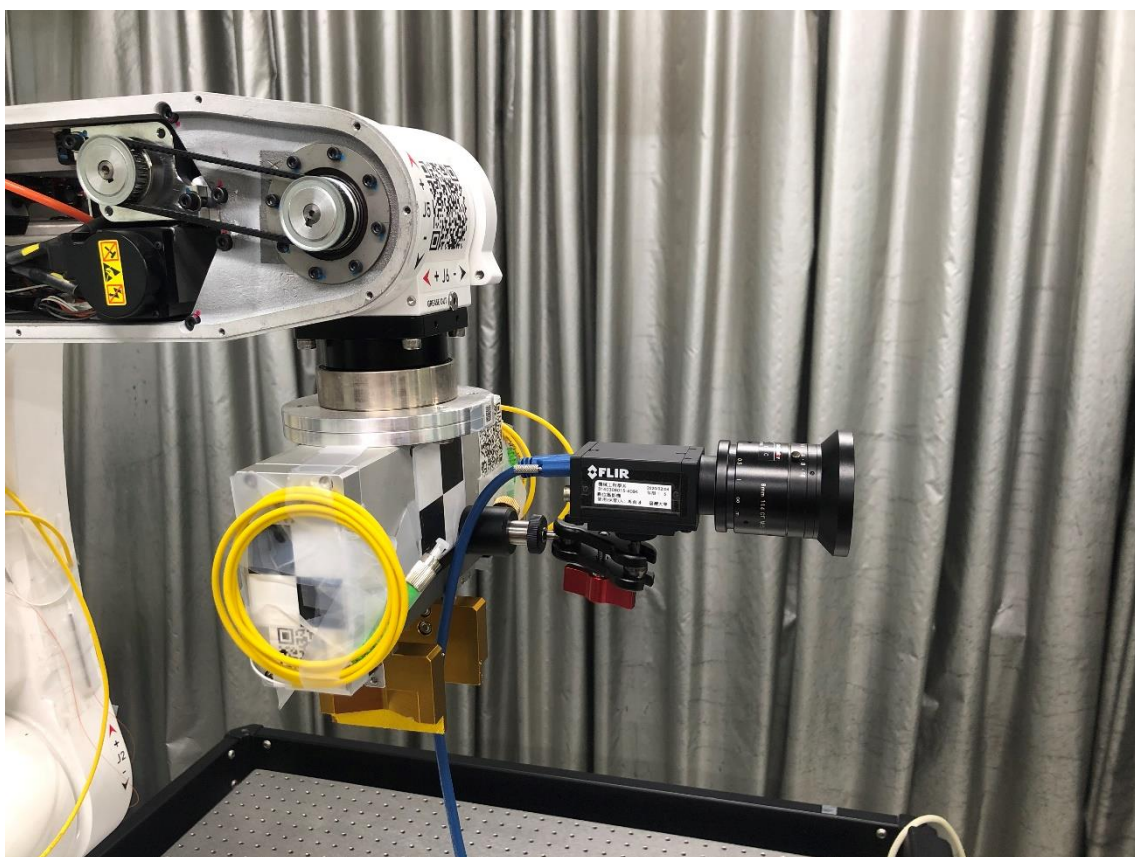


圖 3 - 70 安裝於第六臂上之工業相機

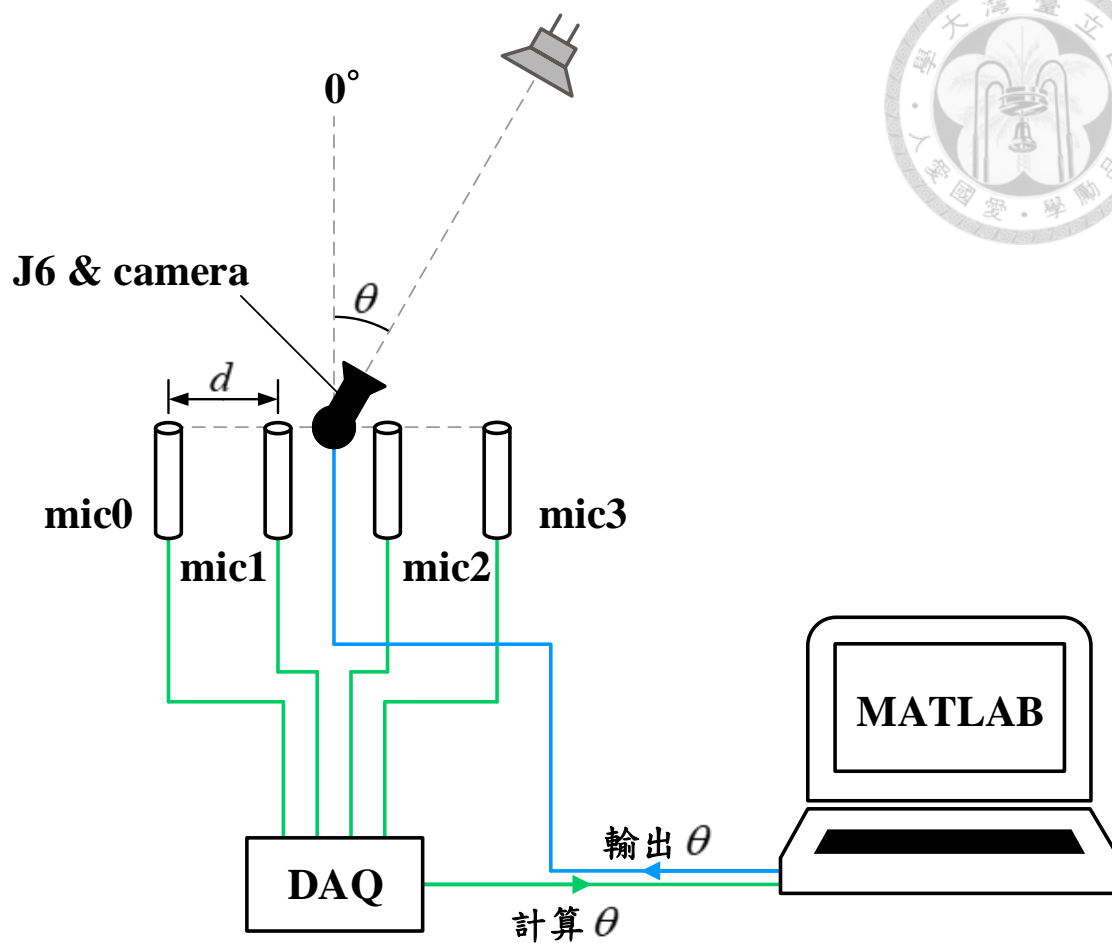


圖 3 - 71 一維陣列結合機械手臂控制系統示意圖

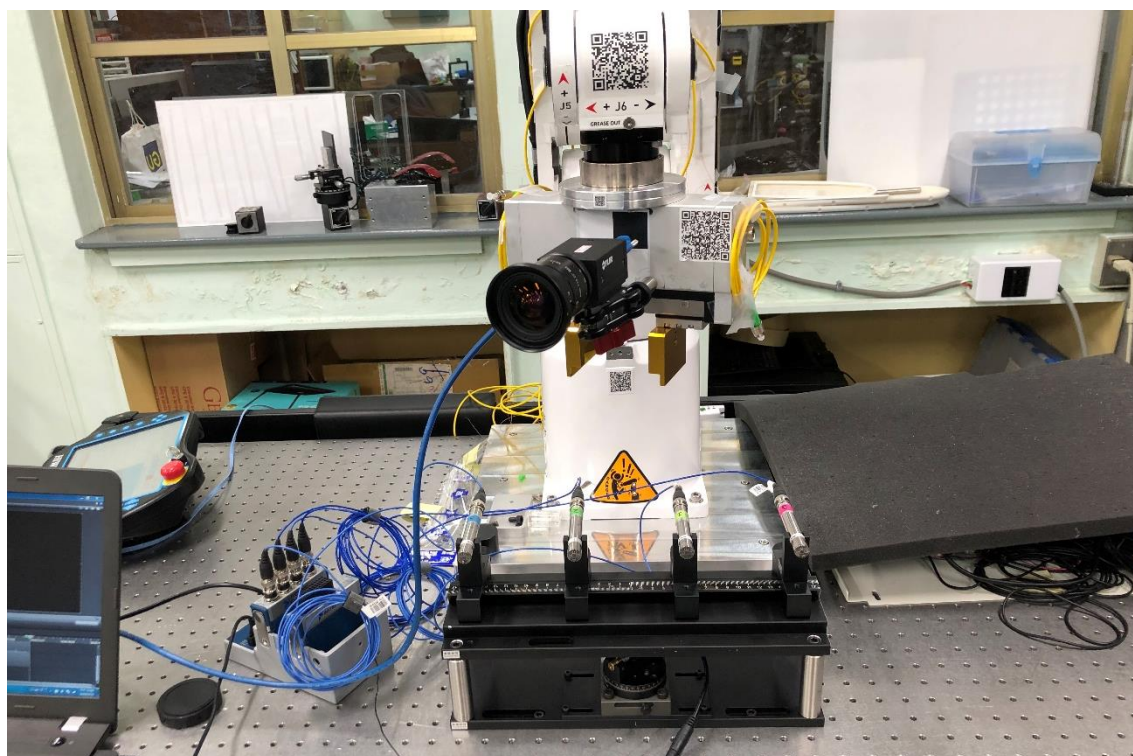
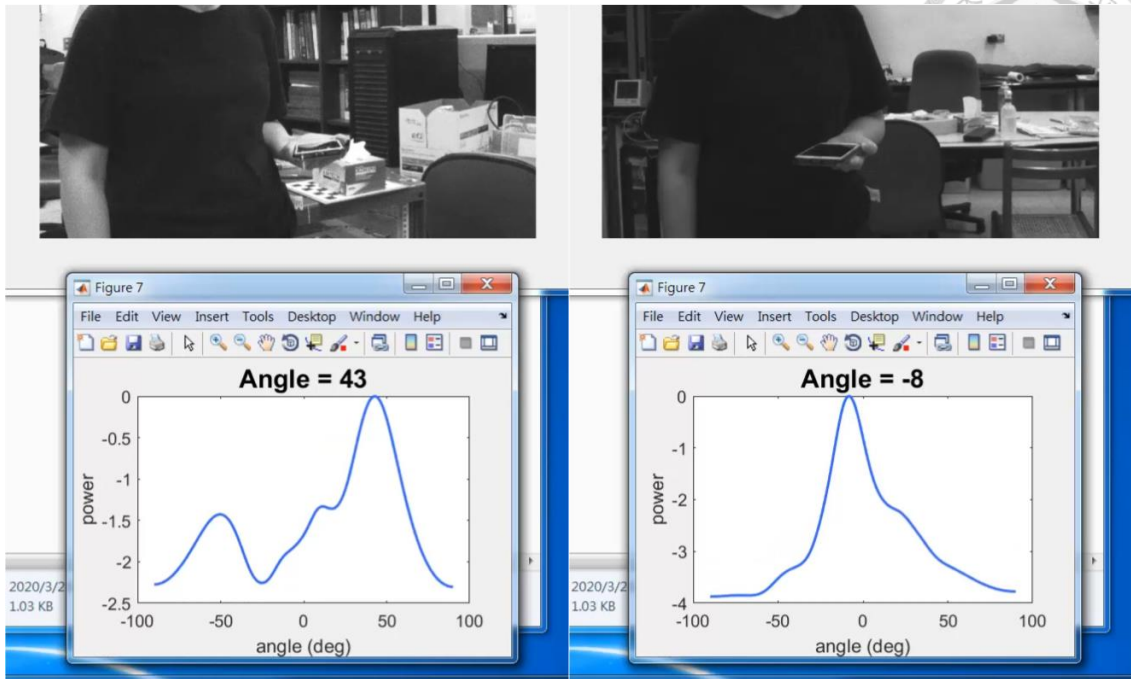
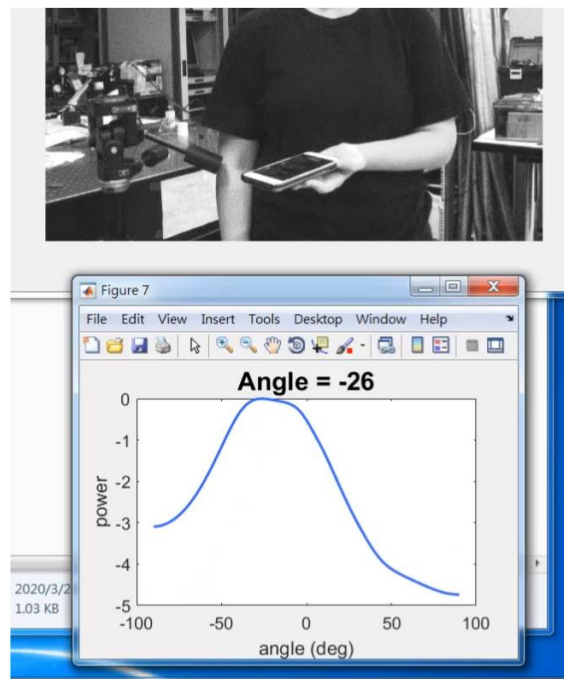


圖 3 - 72 實際架設照片



(a) 右

(b) 中



(c) 左

圖 3 - 73 即時聲源定位過程截圖



## 第四章 二維等間距正圓形麥克風陣列

將麥克風擺放成二維的陣列即可進行二維的聲源定位，不同的陣列排列形式對於解析度與聲源辨識能力即有不同的影響，因而衍生出許多陣列幾何配置設計的研究，本研究考量硬體配置，並參考卓昭成、鄭泗東於 2012 年針對二維正圓形陣列擺放方式的研究結果[27]，深入探討麥克風由 +x 軸開始順時針擺放的等間距正圓形陣列。

### 4.1 二維等間距正圓形麥克風陣列之 Array pattern

二維陣列之 array pattern 同樣由 2.1.2 小節所述之 array pattern 式子推導：

$$W = \sum_{m=1}^M e^{j(\mathbf{k}-\mathbf{k}_s)\cdot\mathbf{r}_m} = \sum_{m=1}^M e^{jk(\mathbf{k}-\mathbf{k}_s)\cdot\mathbf{r}_m} \quad (4.1)$$

若此二維等間距正圓形麥克風陣列麥克風數為  $M$ ，陣列直徑為  $D$ （如圖 4 - 1），

$$\text{以圓心為參考點，則麥克風位置向量 } \mathbf{r}_m = \left[ \frac{D}{2} \cos\left(2\pi \frac{m-1}{M}\right) \quad -\frac{D}{2} \sin\left(2\pi \frac{m-1}{M}\right) \quad 0 \right]。$$

假設聲源沿 z 軸入射，則聲源位置之單位向量為  $\mathbf{k}_s = [0 \quad 0 \quad 1]$ ，觀測方向之單位向

量為  $\mathbf{k} = [\sin \theta \cos \phi \quad \sin \theta \sin \phi \quad \cos \theta]$ ，如圖 4 - 2。因此  $\mathbf{k} - \mathbf{k}_s$  為：

$$\mathbf{k} - \mathbf{k}_s = [\sin \theta \cos \phi \quad \sin \theta \sin \phi \quad \cos \theta - 1] \quad (4.2)$$

再計算  $(\mathbf{k} - \mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r}_m$  得

$$(\mathbf{k} - \mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r}_m = \left( \sin \theta \cos \phi \cdot \frac{D}{2} \cos\left(2\pi \frac{m-1}{M}\right) - \sin \theta \sin \phi \cdot \frac{D}{2} \sin\left(2\pi \frac{m-1}{M}\right) \right) \quad (4.3)$$

利用和角公式整理可得

$$(\mathbf{k} - \mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r}_m = \frac{D}{2} \sin \theta \cos\left(2\pi \frac{m-1}{M} + \phi\right) \quad (4.4)$$

因此二維等間距正圓形麥克風陣列之 array pattern 為



$$W(k, \theta, \phi) = \sum_{m=1}^M e^{j \frac{kD}{2} \sin \theta \cos \left( 2\pi \frac{m-1}{M} + \phi \right)} \quad (4.5)$$

將式(4.5)與一維等間距麥克風陣列的 array pattern (式(3.2)) 比較可以發現兩者的類似之處，二維陣列的 array pattern 與訊號波數  $k$ 、陣列直徑  $D$  及麥克風數量  $M$  相關，其中  $kD$  的影響與一維陣列的  $kd$  相同，在二維陣列中若限制觀測範圍為正前方 ( $z > 0$ )，則  $kD > 2\pi$  會出現混疊現象。

圖 4-3 (a) 為  $M=4$ ， $kD = \pi$  之 array pattern，上圖  $z$  軸為陣列輸出能量之 dB 值；下圖則為上圖之俯視圖，也可理解為以陣列圓心向  $z$  軸觀測， $x-y$  平面為俯仰角及水平角  $-90^\circ \sim +90^\circ$  所形成的視野範圍，因此  $x$ 、 $y$  軸刻度分別為水平角與俯仰角之正弦值。圖 4-3 (a) 至 (d) 為相同麥克風數量，不同  $kD$  所形成的 array pattern，可以發現  $kD = 2\pi$  時雖然主瓣寬度變窄，但在視野範圍的四角出現了假聲源，如圖 4-3 (b)；而隨著  $kD$  值的增加假聲源數量會增加並且越來越密集，如圖 4-3 (c) 與 (d)。在麥克風數  $M$  與  $kD$  固定的情況下，縮小觀測範圍能夠避免假聲源出現，例如將俯仰角及水平角縮小至  $-30^\circ \sim +30^\circ$ ，則視野範圍會縮小至四分之一，以圖 4-3 (c)， $M=4$ ， $kD = 3\pi$  的情況為例，縮小觀測範圍後則如圖 4-4，但同樣地觀測更高頻率 (例如  $kD = 5\pi$ ) 時，假聲源又會進入觀測範圍內，如圖 4-5 所示。而麥克風數量  $M$  的增加可以使旁瓣變小。如圖 4-6，當麥克風數從 4 支增加至 8 支時，可發現周圍的假聲源被壓下，同時也有遠離主瓣的趨勢。

綜合以上對 array pattern 的分析探討，可以得出以下結論：1. 陣列直徑固定、麥克風數目增加則最大可觀測訊號波數 (頻率) 上升，但製造陣列的成本會提高。2. 若麥克風數固定，縮小陣列直徑能提高最大可觀測頻率。3. 然而並非陣列直徑越小越好，因為在同一觀測訊號頻率下，直徑越大，主瓣寬度越小。此外過去文獻 [27] 中提到，在空間上可以解析的波長應小於直徑，故

$$f_{\min} \approx \frac{c}{D} \quad (4.6)$$

實際上量測頻率下限還與其他因素相關，必須仰賴模擬分析與實驗量測而得，但使



用此近似式可得到一個大概作為陣列設計依據。

## 4.2 陣列設計與實現

本小節將闡述如何應用前述的陣列設計原理實現一個二維陣列。二維陣列的聲源定位程式計算流程與一維陣列相似，只是多了一個維度而已，如圖 4 - 7，換句話說就是對平面中每個點的方向做一次 delay and sum，由於多了一個維度要做計算，因此計算量倍增許多。輸出的計算結果為一個二維矩陣，因此若有一個相機與計算結果疊合來顯示定位結果會方便得多，同時也可以配合相機視角限縮觀測範圍，減少計算時間。而實驗室有四支麥克風，因此先確定麥克風數  $M=4$ ，在陣列設計策略上可以先求得相機之視角，再透過計算可觀測頻段決定陣列直徑。

### 4.2.1 計算相機視角

相機的視角能夠從相機的成像原理得到。圖 4 - 8 為一個理想的針孔成像模型 (pinhole camera model)，視野 (field of view) 中的畫面透過針孔成像投射到相機的感光元件 (charge-coupled device, CCD) 上，就是相機裡的影像，其中  $O$  點為相機鏡頭之焦點。圖 4 - 8 的上視圖與側視圖各可以得到一組相似三角形，如圖 4 - 9 之 (a) 與 (b)，所求的水平角  $\theta_x$  與俯仰角  $\theta_y$  可以透過畢氏定理得到：

$$\begin{cases} \theta_x = \tan^{-1}\left(\frac{I_x/2}{f_x}\right) \\ \theta_y = \tan^{-1}\left(\frac{I_y/2}{f_y}\right) \end{cases} \quad (4.7)$$

其中  $I_x$  及  $I_y$  為 CCD 大小，可查詢相機規格求得，而  $f_x$  與  $f_y$  為 CCD 與點  $O$  的距離，也就是相機的焦距。本研究使用 Zhang's method[40]，此方法透過拍攝多張含有校正板之影像後計算得出相機焦距，雖然理論上  $f_x$  與  $f_y$  應相同，但是此方法計算出的  $f_x$  與  $f_y$  會是兩個相近的值，因此還是使用計算值進行後續運算。拍攝影像如圖



4-10 所示，以 MATLAB 程式進行計算後得  $f_x = 2518.2\text{pixels}$ ， $f_y = 2510.3\text{pixels}$ ；而本研究所使用之工業相機解析度為  $2048 \times 1536\text{pixels}$ ，因此  $I_x = 2048\text{pixels}$ ， $I_y = 1536\text{pixels}$ 。代入式(4.7)後可得  $\theta_x \approx 22^\circ$ ， $\theta_y \approx 17^\circ$ ，因此此相機視野範圍為水平角  $-22^\circ \sim +22^\circ$ ，俯仰角範圍為  $-17^\circ \sim +17^\circ$ ，計算時只要在此角度範圍內進行 delay and sum 即可，而最後實際組裝相機與麥克風陣列時，須注意將麥克風頭與鏡頭焦點（約為鏡頭長一半）調整至共平面。

## 4.2.2 可觀測頻率範圍

得到觀測範圍之後，出現假聲源的情況不再是  $kD = 2\pi$ （如圖 4-11），而是會往上增加，因此透過計算更高  $kD$  的 array pattern 查看何時會出現假聲源，如圖 4-12 為限制觀測範圍後  $kD = 3\pi \sim 7\pi$  的 array pattern，由圖可以發現大約在  $kD = 6.5\pi$  為出現假聲源的臨界點，因此將  $kD = 6.5\pi$  訂為  $kD$  值的上限。再將  $kD = 6.5\pi$  改寫為：

$$(kD)_{\max} = \frac{2\pi f_{\max}}{c} D = 6.5\pi \quad (4.8)$$

由此可得觀測頻率上限與陣列直徑之關係：

$$f_{\max} = \frac{3.75c}{D} \quad (4.9)$$

搭配式(4.6)，並且代入本研究統一設定聲速  $c = 345\text{m/s}$ ，可得不同陣列直徑對應的最佳頻率觀測範圍，如圖 4-13 所示。最後選擇以陣列直徑  $D = 0.2\text{m}$  進行後續的實驗測試，陣列實體如圖 4-14 所示。

## 4.3 商用聲學攝影機 CAE SoundCam

完成陣列硬體設計之後，還須設計運算程式的計算精度，由於二維聲源定位計算量非常龐大，因此需要適度地調整參數，兼顧計算結果解析度與運算時間。本研究所使用的商用聲學攝影機 CAE SoundCam 即是利用波束成型的原理進行聲源定位，並即時呈現結果，因此本節將對此聲學攝影機之功能與規格進行較詳細的介紹，並以此作為參考來設計本研究自行開發之定位系統的計算參數。



### 4.3.1 硬體規格、量測資訊與操作功能介紹

此聲學攝影機之硬體外觀正面如圖 4 - 15，具有 64 個微機電 (MEMS) 麥克風，由內而外分別由 18、23、23 個麥克風等間距地排成的三個同心圓，麥克風取樣頻率為約 48kHz；正中央為攝影機，影像大小為  $320 \times 240 \text{ pixels}$ ，更新率為 50fps；攝影機外圈則為四個 LED，可在黑暗環境下照明。

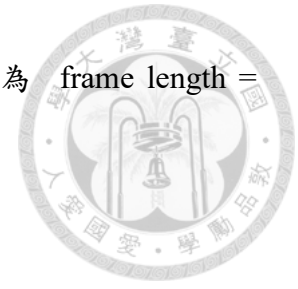
圖 4-16 為此聲學攝影機的介面，定位結果會呈現在攝影機畫面上，下方則是短時傅立葉轉換 (STFT) 後的時頻譜，其橫軸為時間，縱軸為頻率；右下角是當下傅立葉轉換的頻譜，因此由此圖所呈現結果，可得知當觀察頻率為 2300Hz ~ 8300Hz 時，聲源位於此喇叭的兩個單體上。因應不同量測需求，可調整不同參數，例如調整待測物與聲學攝影機之距離，可得到更精確之結果，然而在大部分情況下調整此參數對結果影響並不大。顯示模式分為 Auto、Smart 與 Off 三種模式，Auto 模式為設定動態範圍後，顯示當下聲壓最大之動態範圍內的聲壓值，例如圖 4 - 17 中設定動態範圍 (Dynamic) 為 3dB，而當下最大聲壓值為 63.9dB，因此定位結果圖中顯示的上色區域為 60.9 ~ 63.9dB 的區域；Smart 模式 (如圖 4 - 18) 能夠消除背景噪音，透過調整波峰因數 (Crest) 控制消除背景噪音程度的多寡，可用於較吵雜的環境；Off 模式又稱閾值模式，透過調整最大值 (Maximum) 與動態範圍 (Dynamic) 設定顯示於畫面上的聲壓門檻，如圖 4 - 19 所示，由於設定之最大值為 67dB，動態範圍為 5dB，因此畫面中固定顯示 62dB ~ 67dB 之聲壓值，適用於暫態噪音等。

調整觀測頻率為濾波功能，可以專注量測特定頻率的訊號，如圖 4-20 所示，STFT 與 FFT 畫面也能幫助量測者決定觀測頻率範圍。錄製時長可選擇 10 秒、30 秒、60 秒、120 秒或 180 秒，畫面左側則有畫面截圖、設定時間標記等功能。

### 4.3.2 內部計算參數

由於廠商不提供計算精度等資訊，因此本小節透過拆解量測結果檔案內容推算其計算參數，發現其定位結果為  $64 \times 48$  的二維矩陣，代表其計算精度為影像範

圍內水平方向取 64 點，垂直方向取 48 點；STFT 參數部分為  $\text{frame length} = 2048\text{points}$ ， $\text{overlap} = 512\text{points}$ 。



## 4.4 聲源平面定位實驗

本節將以前一節自製的二維陣列分別進行靜止與移動聲源定位實驗，利用機械手臂精準且重複運動的特點，夾持 KINYO 喇叭播放白噪音（如圖 4-21），由麥克風陣列錄製訊號並進行定位計算後，再與影像疊合顯示，達到聲音可視化的效果。實驗架設如圖 4-22 所示。

### 4.4.1 運算程式設定

進行定位運算之前須先設定計算精度，也可理解為設定對觀測平面內哪幾個點掃描式地進行 delay and sum，得出各點陣列輸出能量後繪製成圖，而此二維能量矩陣須能與影像矩陣疊合呈現，因此須配合影像大小取點。在聲源靜止的情況下只須拍一張相片，之後將聲源定位計算結果畫至此相片上即可，而根據相機規格，相片檔案為  $2048 \times 1536\text{pixels}$ ，但若聲源為移動狀態，在錄製聲音訊號的過程中，相機須以連拍的方式同時記錄聲源位置，為了呈現連續動態的結果必須提升每秒紀錄張數（frame per second, fps），而若以相機原規格存取影像會導致 fps 過低，因此採用內插取點的方式縮小影像大小，將  $2048 \times 1536\text{pixels}$  的影像縮為  $410 \times 308\text{pixels}$ ，如圖 4-23 為原影像，內插取點後則如圖 4-24，可以發現畫質稍微降低。經過考量以後統一設定計算精度為在視野範圍內水平方向等間距地取 59 點，垂直方向取 44 點，目的為使計算點均勻分布於視野範圍內；各點與影像疊合後如圖 4-25 與圖 4-26 所示。

至於 STFT 參數設定則是統一設定  $\text{frame length} = 2048\text{points}$ ， $\text{overlap} = 0$ ，由於麥克風取樣頻率為 51200Hz，因此相當於每 0.04 秒計算一次聲源定位，也就是說聲學計算之結果為 25fps。不過要特別注意的是因為計算量巨大無法進行即時計算呈現結果，此系統是錄製聲音及影像訊號後再進行離線計算，計算結束後再將結

果與影像疊合呈現，因此 25fps 指的是計算結果在呈現上更新的速率，而非實際計算速度。

在計算實驗結果之前，可先測試呈現在畫面上的結果是否正確有無偏移，測試方法為將四段相同訊號放進系統做定位計算，四段相同的訊號代表相位也皆相同，因此可視為聲源由畫面中心點入射，預期計算出的聲源應在正中間，計算結果為一個二維的陣列輸出能量矩陣，如圖 4-27，俯視圖則如圖 4-28 所示，每個方格為一個定位計算點。若將此圖以等高線繪製，如圖 4-29 所示，可以驗證計算結果與影像疊合理論上是沒有問題的。

#### 4.4.2 靜止聲源

本實驗設計喇叭於定點播放白噪音，聲源定位結果如圖 4-30 所示，顯示計算結果與影像中的喇叭中心有一點差距，而圖 4-31 為 SoundCam 的拍攝結果，其計算結果較接近聲源的位置，又因前一小節已確定定位結果矩陣與影像疊合上並無問題，因此實驗結果中的位置偏移可能是由於麥克風陣列與工業相機的擺放誤差而造成。欲修正此偏差可透過平移結果矩陣達成，將圖 4-30 放大如圖 4-32 所示，找出陣列能量矩陣最大值於影像之所在座標為  $P(1057,681)$ ，而喇叭中心座標為  $O(987,716)$ ，因此將整個陣列能量矩陣於影像上往  $-X$  方向移動 70 點，往  $+Y$  方向移動 35 點，使矩陣最大值顯示於喇叭中心點上，修正後如圖 4-33 所示。

#### 4.4.3 平面移動聲源

本實驗以機械手臂夾持喇叭移動，設計兩種移動路徑，如圖 4-34 所示，一種為斜直線，另一種為半圓形。在呈現結果之前，需要先處理時間軸疊合的問題。由於 MATLAB 程式的限制，無法使影像與定位結果各自獨立播放，而是需要像播放動畫一樣合成後一幀幀顯示，定位計算的結果如前述為固定 25fps，然而本研究使用之工業相機更新率雖然在規格說明中為 121fps，但是由於在此是以 MATLAB 程式控制運作，因此其 fps 會大幅降低，並且為非定值，平均為約 0.22 秒左右拍攝一張照片。例如使用系統運作 1 秒鐘，相機拍攝得 5 張照片，其時間標記為 0.22、

0.445、0.656、0.873 與 1.109 秒，而波束成型計算結果的時間刻度為 0.02、0.06、0.10、...、0.94、0.98 秒，因此設計將介於相片之第一與第二時間點之間（第 0.22 ~ 0.445 秒）的定位計算結果（第 0.26 ~ 0.42 秒）皆顯示於第一張相片上，以此類推，如圖 4-35，可以發現在第一張影像時間點之前的波束成型結果皆被拋棄（標示紅色），因此再修改程式使麥克風系統錄音時長增加 0.2 秒（標示綠色）。實際每幀畫面如圖 4-36 所示，各圖標題為波束成型時間標記，圖中數字為每張影像的時間標記。

斜直線路徑定位結果如圖 4-37 所示，由於張數過多 (fps=25)，在此以每 0.24 秒取一張表示，由圖可發現影像中喇叭的移動時間點落後於波束成型時間，這是由於程式中啟動相機與啟動麥克風系統所需的時間不同，因此各自開始擷取影像及聲音訊號的時間點也不相同，此問題可透過觀察兩方時間大約相差多久進而調整，經過修正後的斜直線移動聲源定位結果如圖 4-38 所示，而使用相同調整方式所得的半圓路徑移動聲源定位結果則如圖 4-39，顯示計算結果與影像中喇叭的位置無論是時間還是空間座標皆有良好對應。

#### 4.4.4 三維空間移動聲源

本小節嘗試對在三維空間移動的聲源進行定位計算，其結果應為聲源投影於觀測平面中的位置。設計路徑如圖 4-40，由點 1（圖 4-40 (a)）依序移動至點 2（圖 4-40 (b)）、點 3（圖 4-40 (c)），各停留 1 秒鐘後再回到點 1。坐標軸方向則如圖 4-41 所示，各點座標為點 1 (0,368,293.5)、點 2 (150,550,0)、點 3 (-250,200,200)，單位為 mm。

聲源定位計算結果如圖 4-42，由結果可發現當聲源於點 1 時（第 1.02 秒）計算結果位於影像中的喇叭中心，但是移動到點 2 時（第 4.42 秒）則漸漸往左偏移，移動至點 3 時（第 9.18 秒）則向右偏移，再回到點 1 時（第 12.58 秒）計算結果又與喇叭中心重疊，此現象推測是如同 4.4.2 所述之陣列與相機的擺放誤差所造成，例如陣列所形成之平面與相機之觀測平面並非平行，而由於圖 4-42 是以聲源在點

1 時進行修正後的結果，使得計算結果能夠與喇叭中心疊合，但是當聲源離開修正參考的平面 ( $Y = 368$ ) 時，麥克風陣列與相機的擺放誤差所造成的定位偏差程度改變，因此造成圖中的偏移；儘管如此，偏移量仍不算太大。

雖然本研究開發之系統只能進行二維的聲源定位，缺少了深度的資訊，但是配合本實驗室開發的數位影像相關法 (Digital Image Correlation, DIC) 進行量測，透過架設兩台相機並在聲源黏貼貼紙作為特徵點，如圖 4-43 所示，就能夠透過計算特徵點位置得到三維的位置資訊。計算結果如圖 4 - 44，其 XYZ 軸為相機 2 之座標軸。

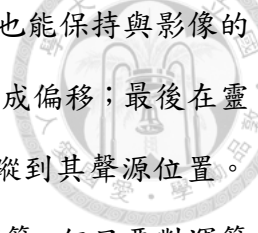
#### 4.4.5 靈敏度測試

在本章最後對此系統做靈敏度測試。實驗設計在系統啟動後兩秒內為靜音狀態，此時接收到的訊號為環境噪音，之後開始播放白噪音，同時將音量調小至靜音，其麥克風原始訊號如圖 4 - 45，接著計算結果並觀察在何時系統無法追蹤到聲源。計算結果如圖 4 - 46 所示，可發現於第 14.26 秒之結果開始不穩定，第 14.46 秒開始無法追蹤到聲源。比對原始訊號，如圖 4-47 為麥克風原始訊號與時頻譜，圖 4 - 48 為每個 frame 的聲壓均方根植，發現此時的訊號已與最開始時靜音狀態的環境噪音幾乎無異，顯示此聲源追蹤系統靈敏度極佳，只要有一點訊號即可追蹤得到聲源位置。

### 4.5 本章結論

本章首先探討二維等間距正圓形陣列之特性，探討麥克風數目與陣列直徑對最佳觀測頻率範圍的關係，並依此實現一個二維聲源追蹤系統，而透過得到使用相機之焦距後能計算出相機視野範圍為水平角  $-22^{\circ} \sim +22^{\circ}$ ，俯仰角  $-17^{\circ} \sim +17^{\circ}$ ，將追蹤系統程式參數配合修改，其結果與影像疊合能達成聲源可視化的效果。

對此自行開發系統進行實測，透過靜止聲源追蹤實驗發現麥克風陣列與相機擺放誤差造成計算結果的偏移，但能藉由手動調整修正，修正後與商用聲學攝影機



SoundCam 之拍攝結果差異不大，在平面移動聲源的追蹤實驗中也能保持與影像的對應，但是當聲源離開此平面進行三維空間運動時，則會再次造成偏移；最後在靈敏度測試中發現此系統只需比環境噪音稍大一點的訊號就能追蹤到其聲源位置。然而此系統缺點為計算量大，以本研究者的設備無法進行即時運算，但只要對運算設備進行優化，應能達成即時聲源追蹤的效果。

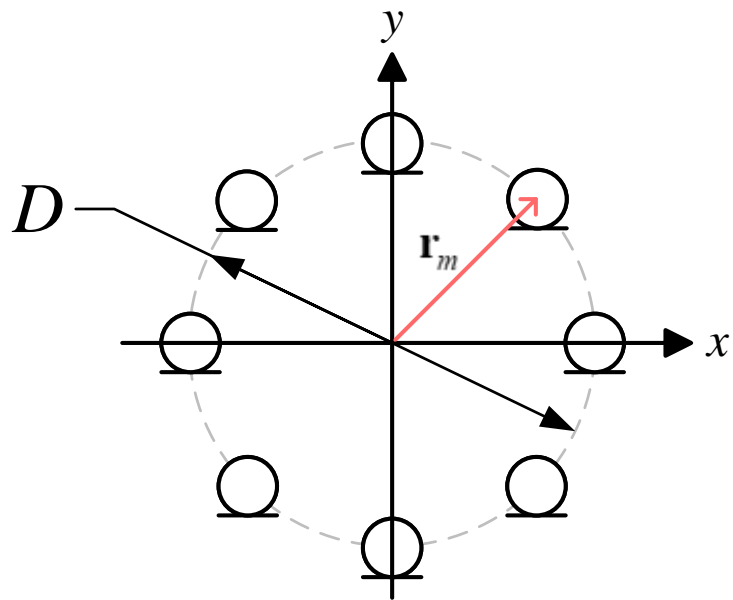


圖 4-1 二維等間距正圓形麥克風陣列

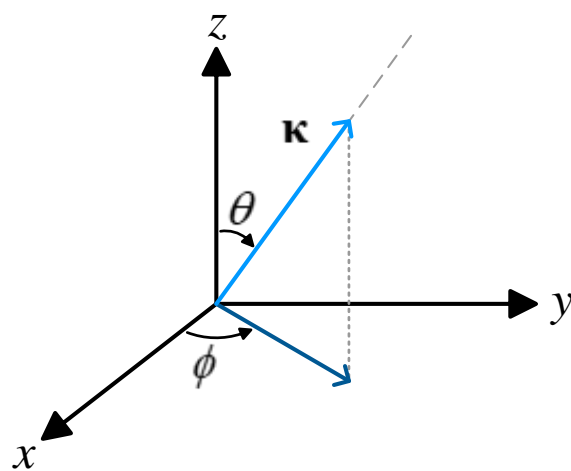
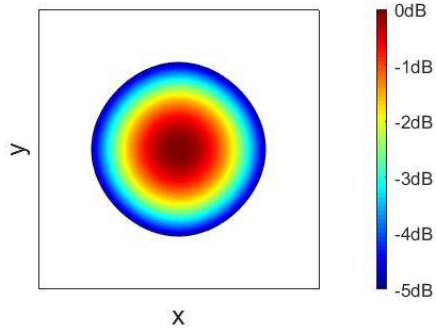
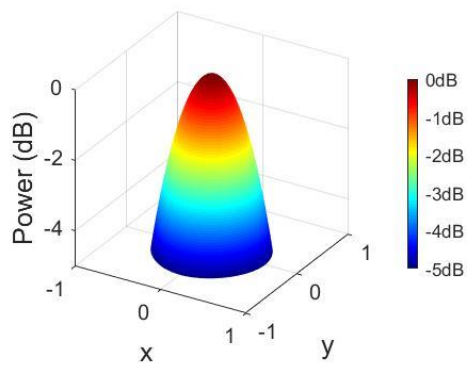
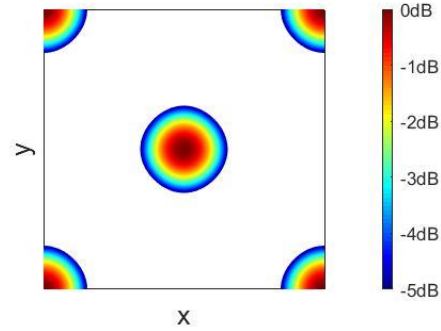
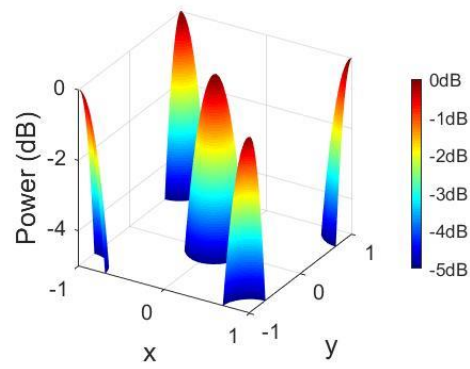


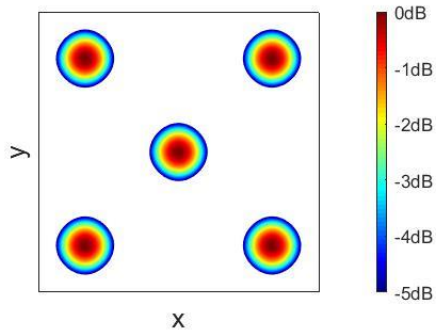
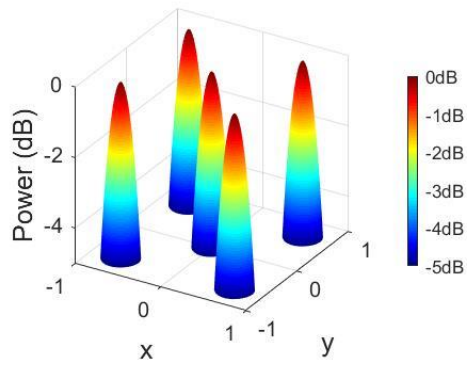
圖 4-2 觀測方向



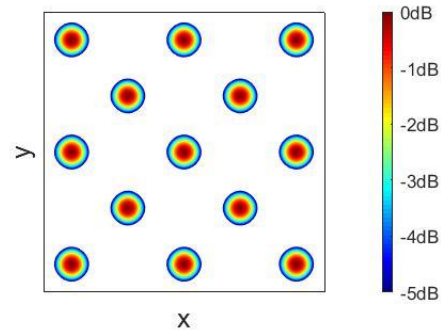
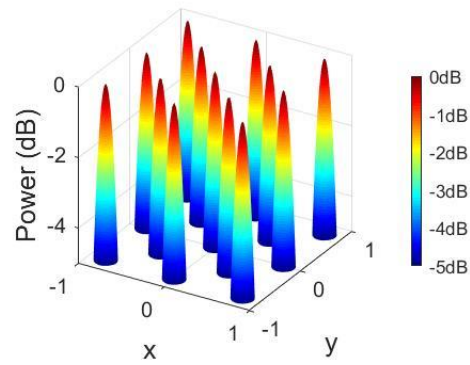
(a)  $M = 4$  ,  $kD = \pi$



(b)  $M = 4$  ,  $kD = 2\pi$



(c)  $M = 4$  ,  $kD = 3\pi$



(d)  $M = 4$  ,  $kD = 5\pi$

圖 4 - 3  $M = 4$  , 不同  $kD$  之 array pattern

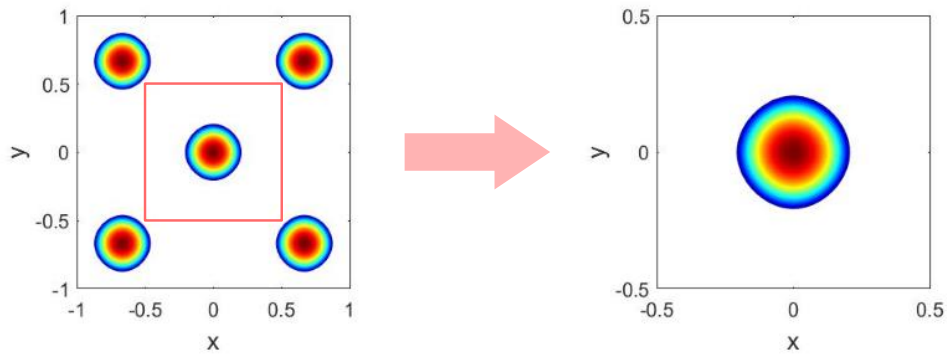


圖 4 - 4 縮小範圍至俯仰角及水平角  $-30^\circ \sim +30^\circ$  ( $M=4$ ,  $kD=3\pi$ )

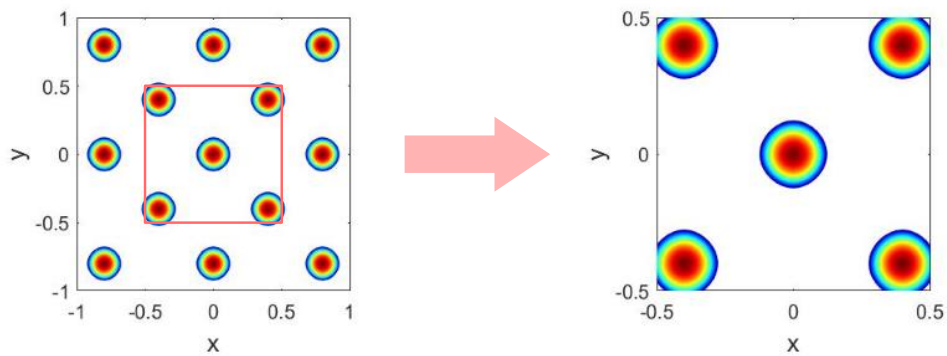
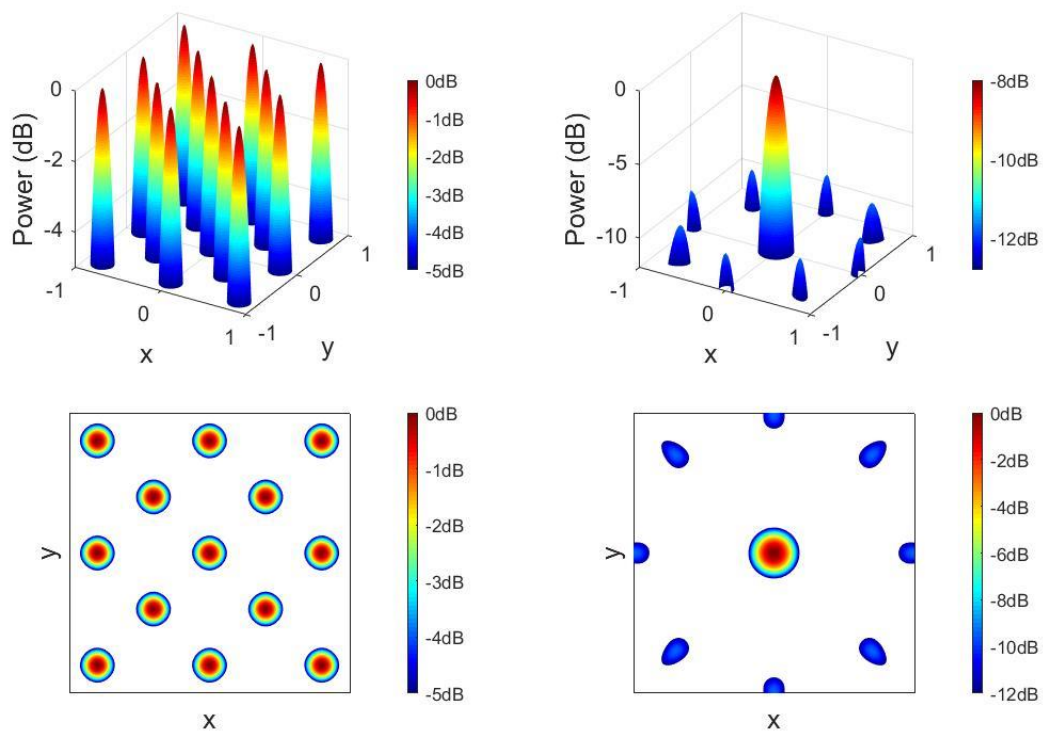


圖 4 - 5 縮小範圍至俯仰角及水平角  $-30^\circ \sim +30^\circ$  ( $M=4$ ,  $kD=5\pi$ )



(a)  $M=4$ ,  $kD=5\pi$

(b)  $M=8$ ,  $kD=5\pi$

圖 4 - 6 相同  $kD$ ,  $M=8$  與  $M=12$  之 array pattern

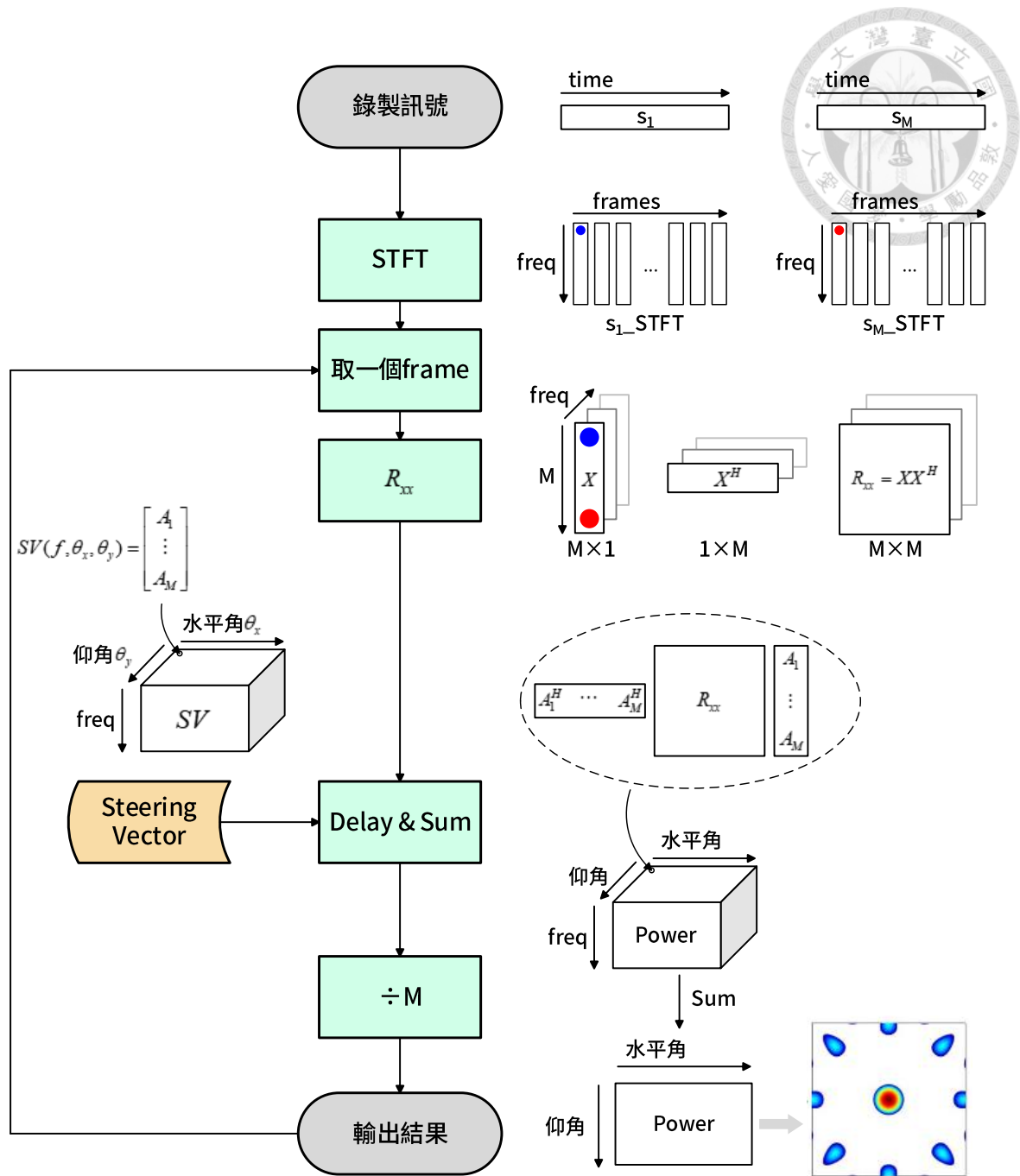


圖 4 - 7 二維陣列聲源追蹤程式運算流程圖

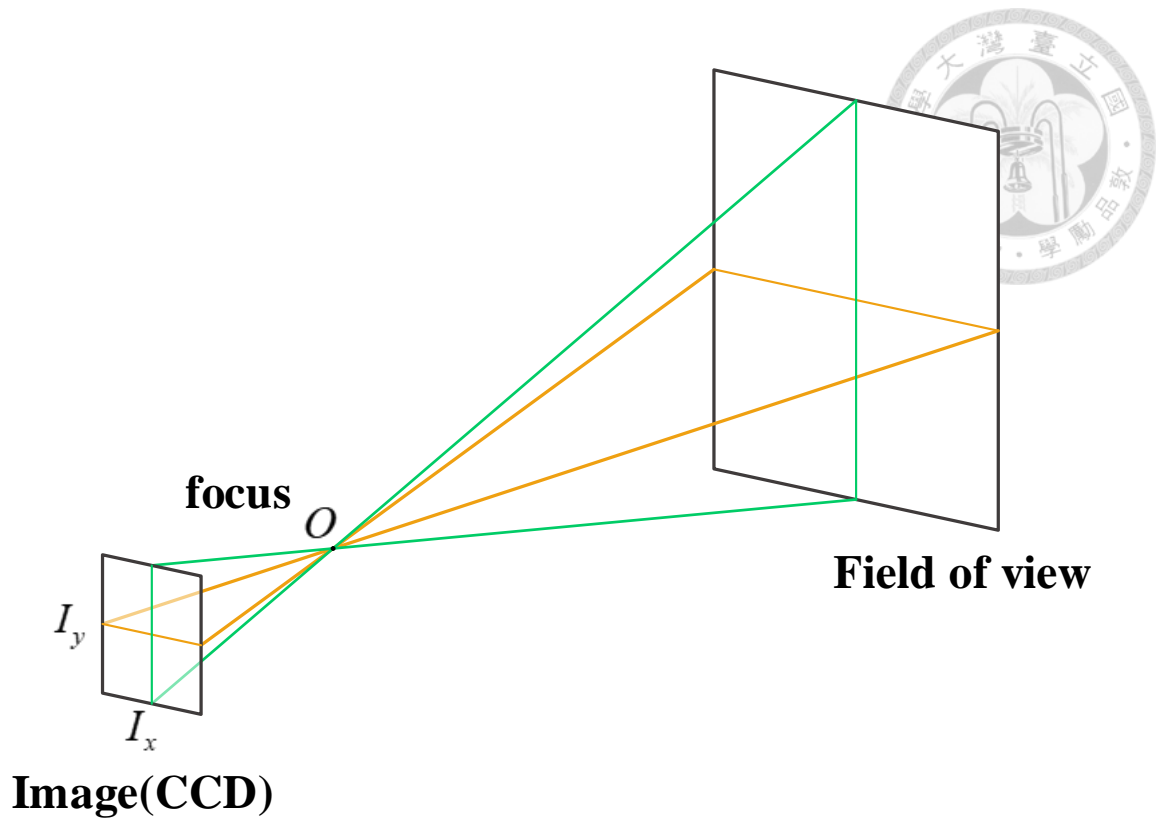


圖 4 - 8 理想針孔成像模型

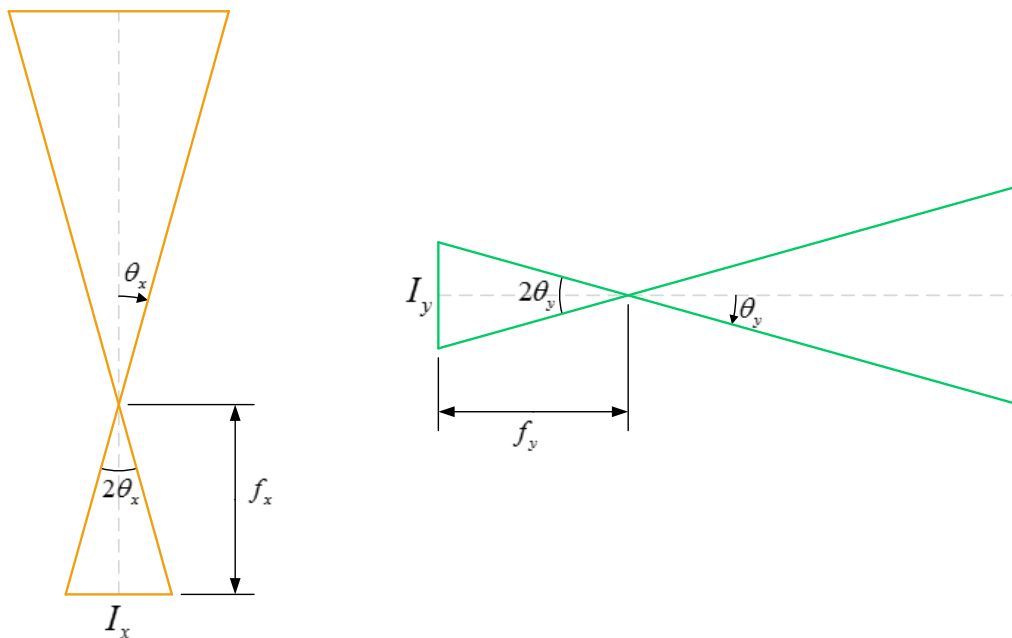


圖 4 - 9 理想針孔成像模型之上視圖與側視圖

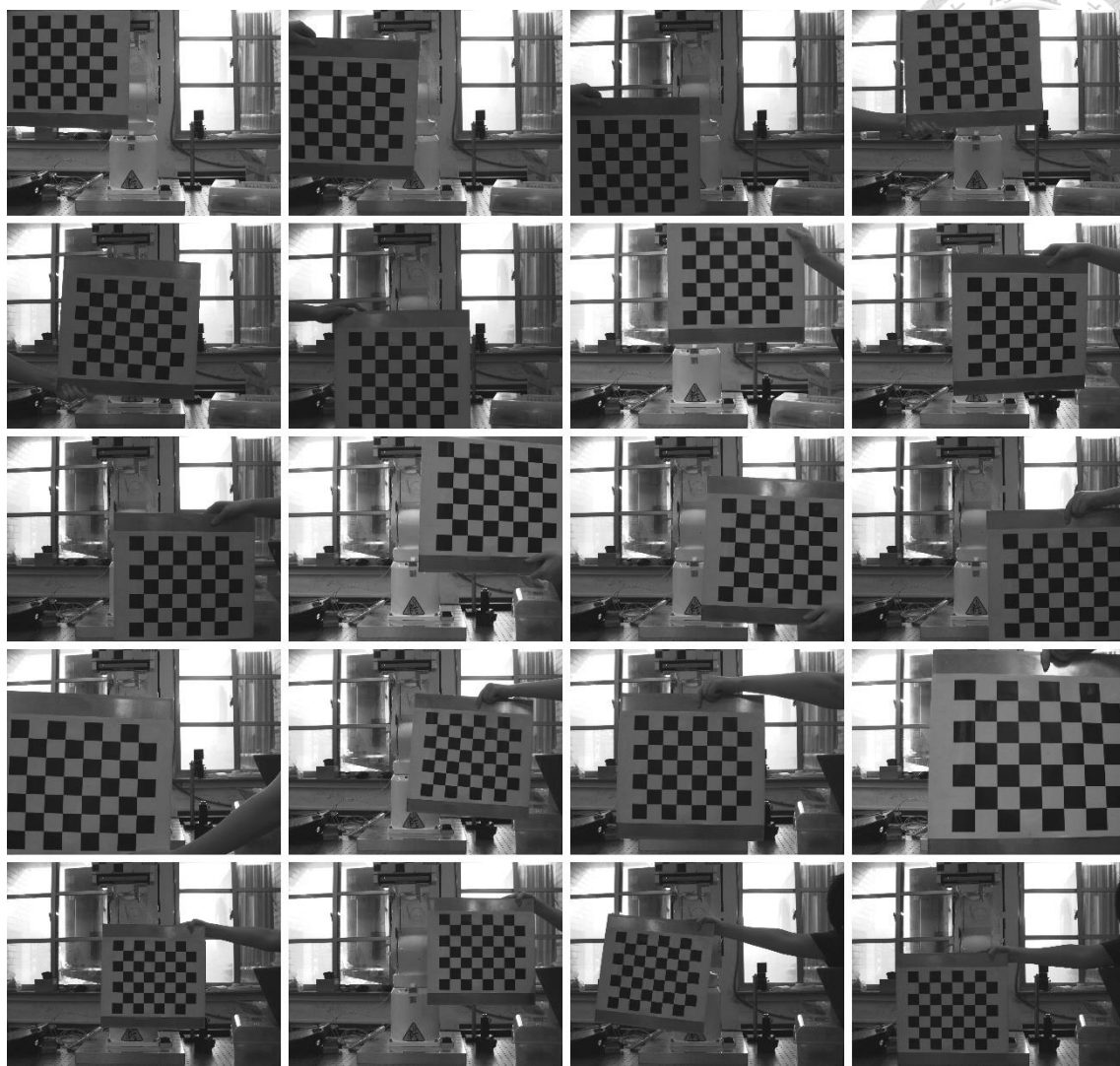


圖 4 - 10 含校正板之影像

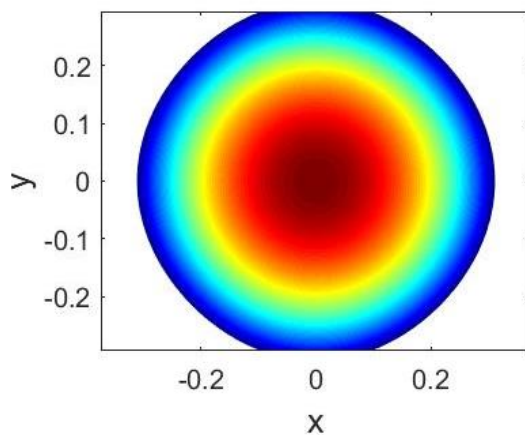


圖 4 - 11  $M=4$ ，觀測範圍水平角  $\theta_x = -22^\circ \sim +22^\circ$ 、俯仰角  $\theta_y = -17^\circ \sim +17^\circ$ ，

$kD = 2\pi$  之 array pattern

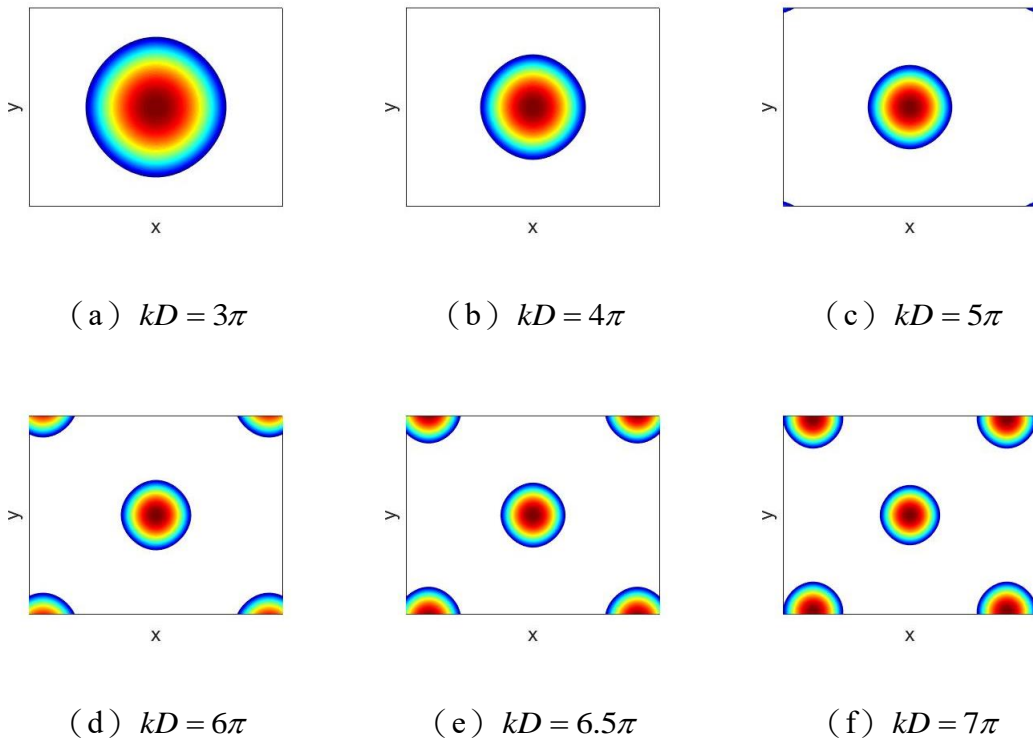
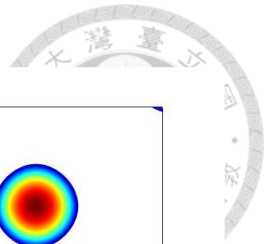


圖 4 - 12  $M = 4$ ，觀測範圍水平角  $\theta_x = -22^\circ \sim +22^\circ$ 、俯仰角  $\theta_y = -17^\circ \sim +17^\circ$ ，

$kD = 3\pi \sim 7\pi$  之 array pattern

陣列直徑 $D(m)$	觀測頻率上限 $f_{\max}(Hz)$	觀測頻率下限 $f_{\min}(Hz)$
0.1	12937.5	3450
0.15	8625	2300
0.2	6468.75	1725
0.25	5175	1380
0.3	4312.5	1150
0.35	3696.43	985.71

圖 4 - 13 各陣列直徑對應最佳觀測頻率範圍

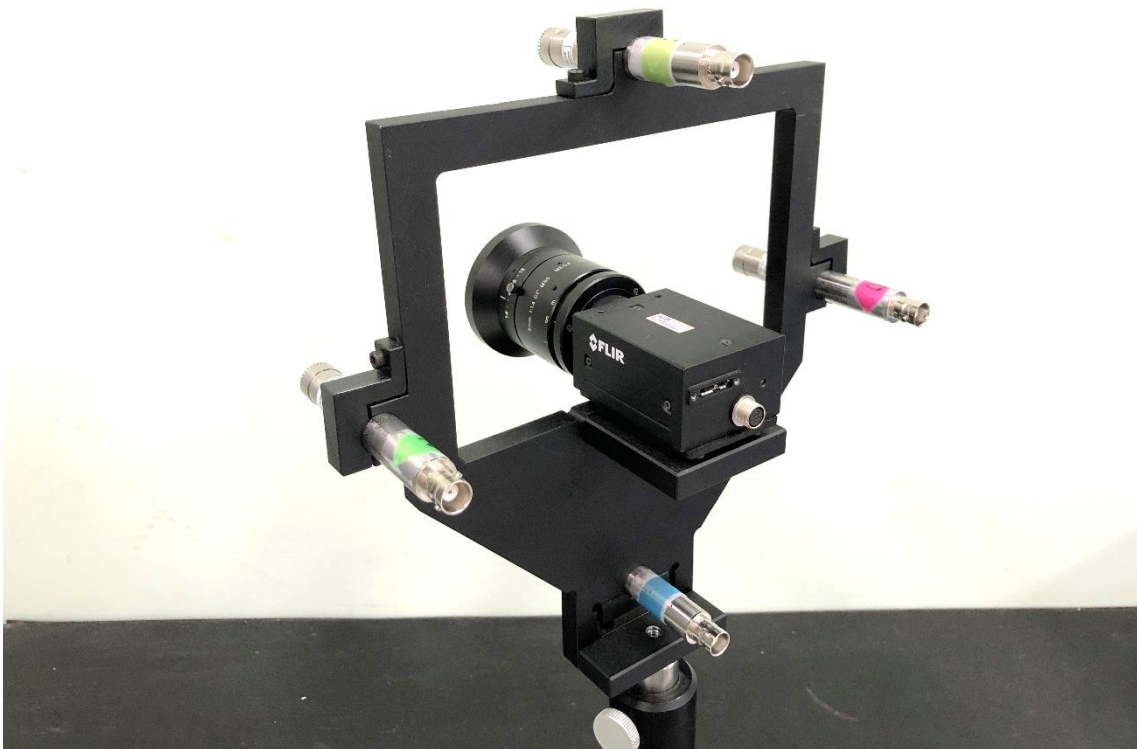
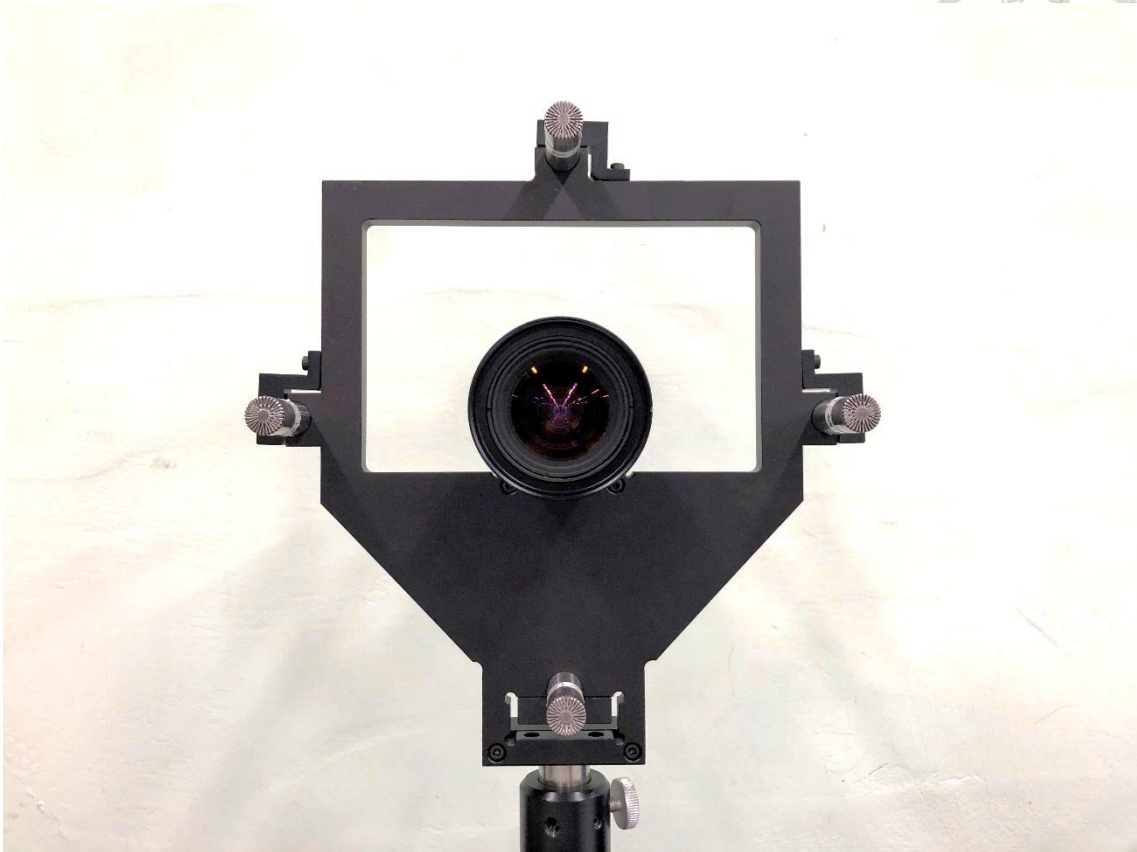


圖 4 - 14 二維陣列實體 (  $M = 4$  ,  $D = 0.2m$  )



圖 4 - 15 CAE SoundCam 硬體外觀

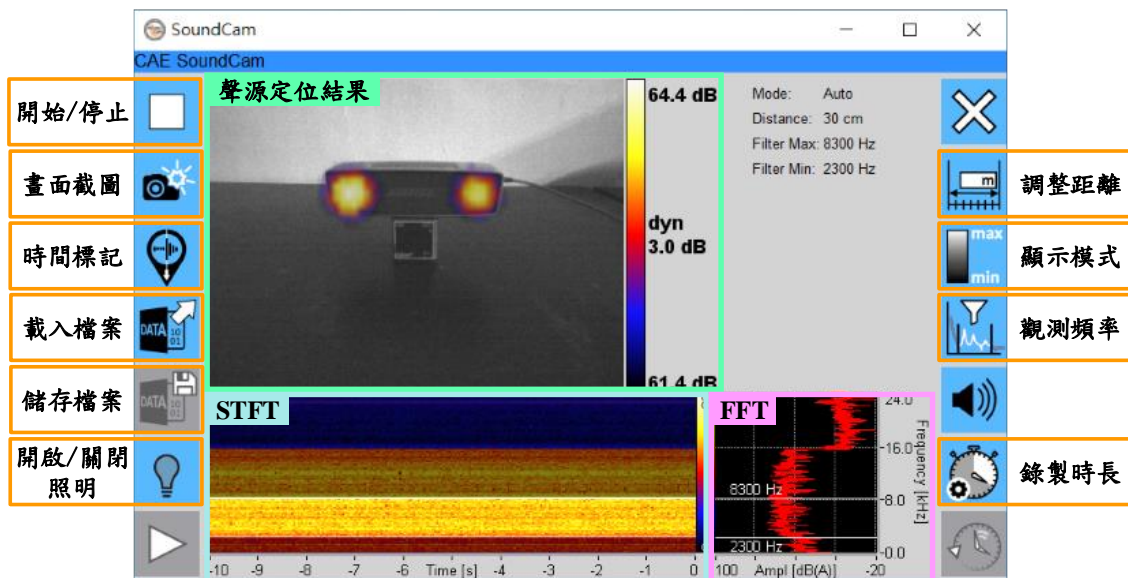


圖 4 - 16 CAE SoundCam 量測介面

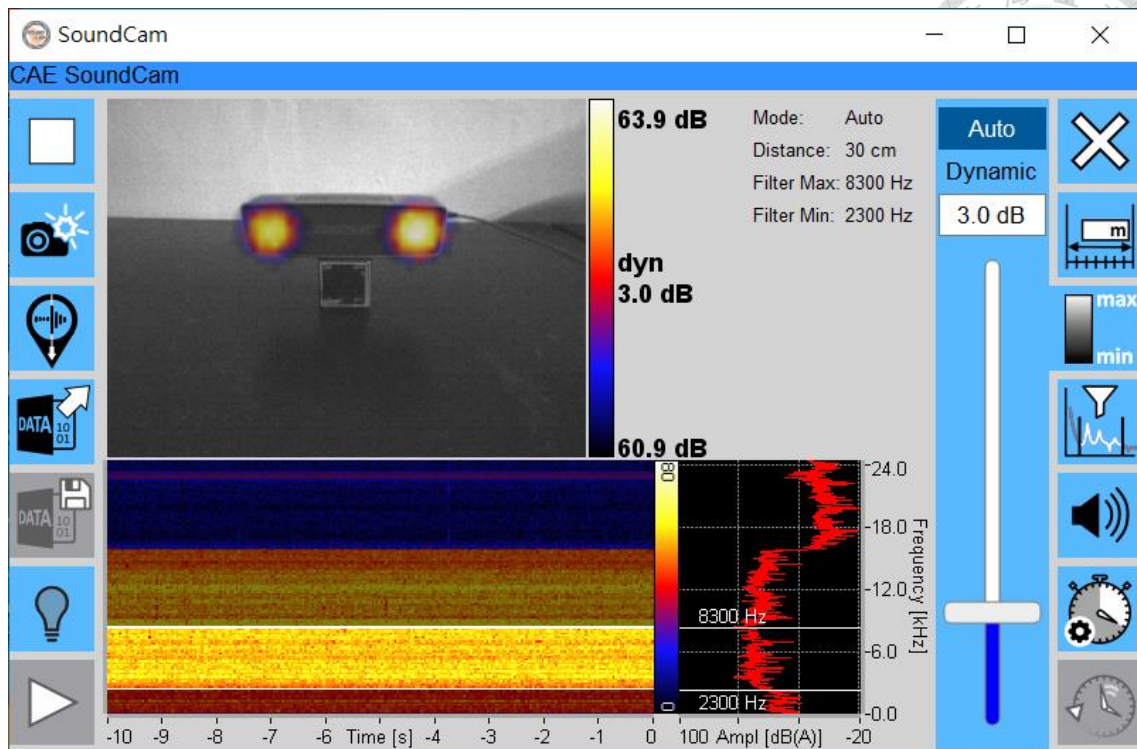


圖 4 - 17 Auto 模式

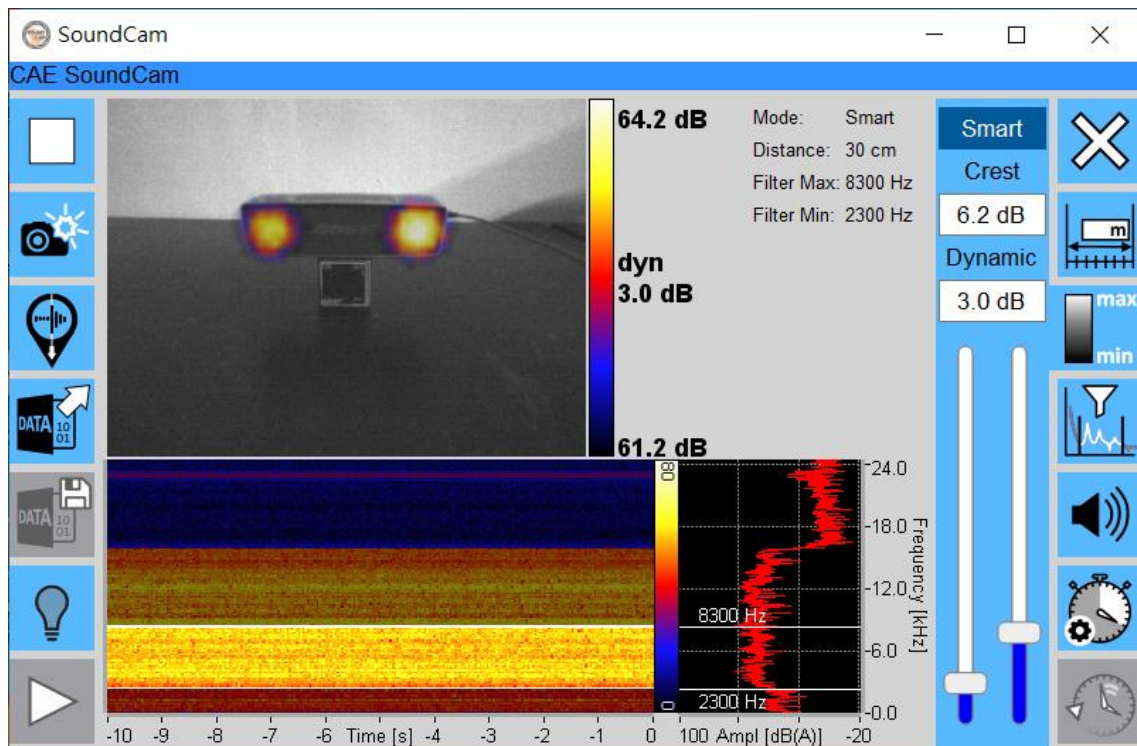


圖 4 - 18 Smart 模式

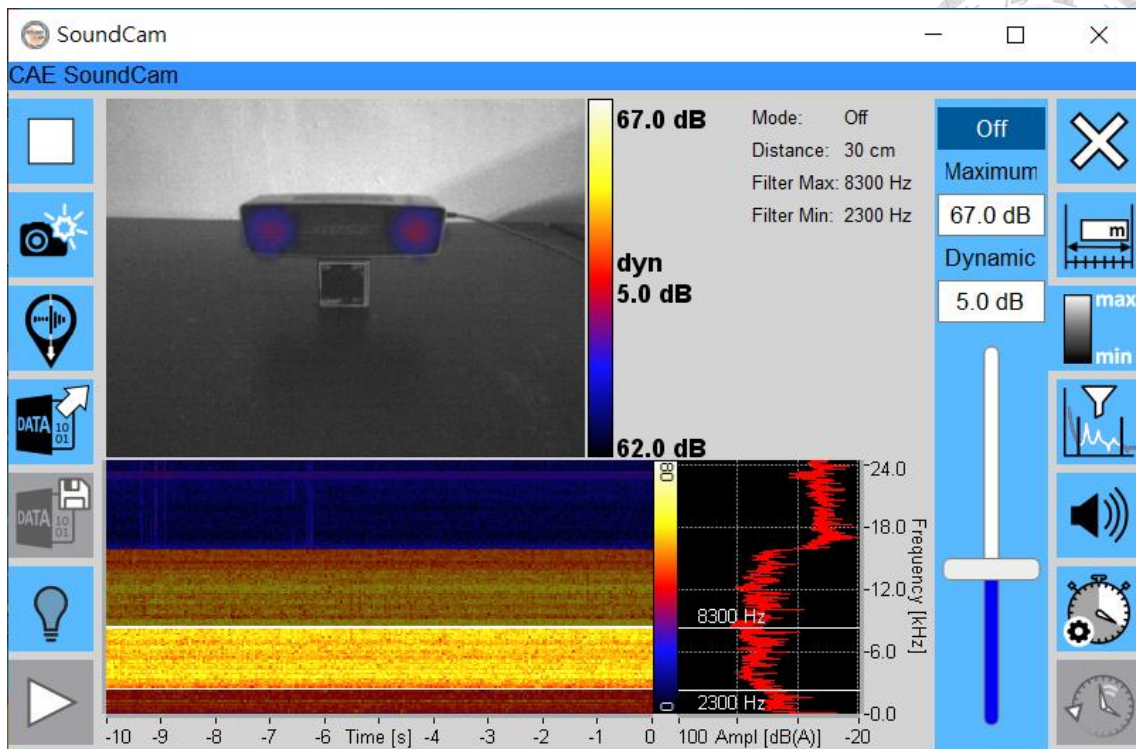


圖 4 - 19 Off 模式 (閾值模式)

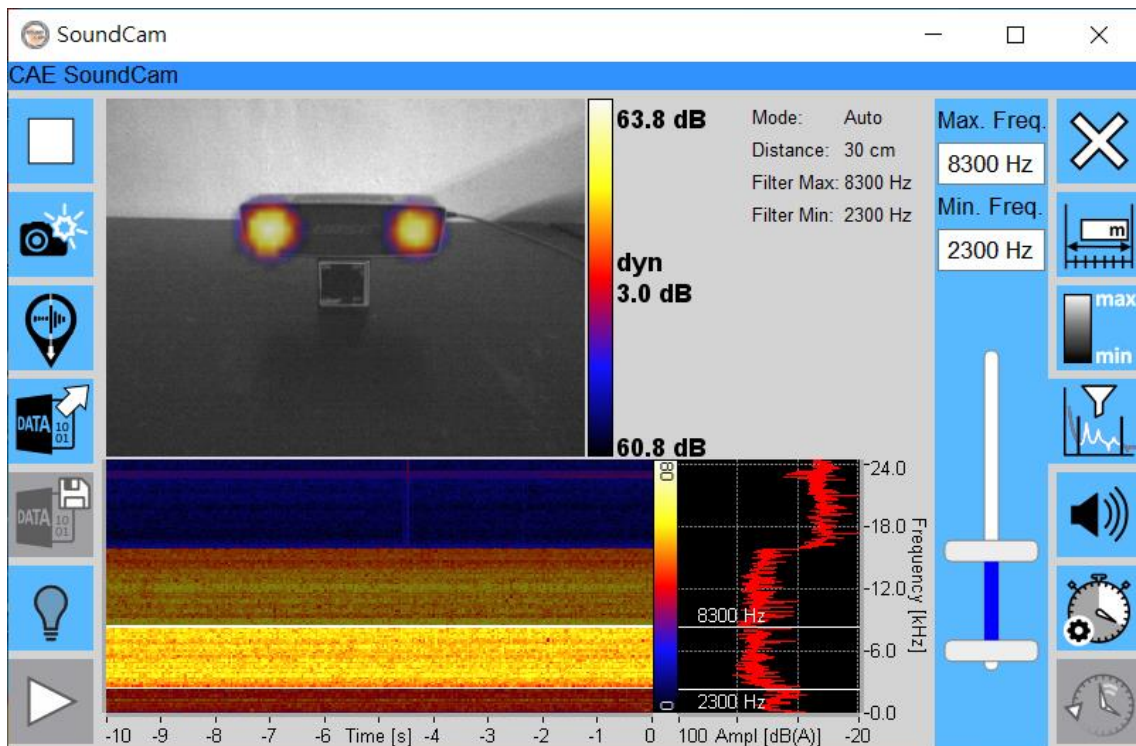


圖 4 - 20 調整觀測頻率範圍 (頻率濾波)

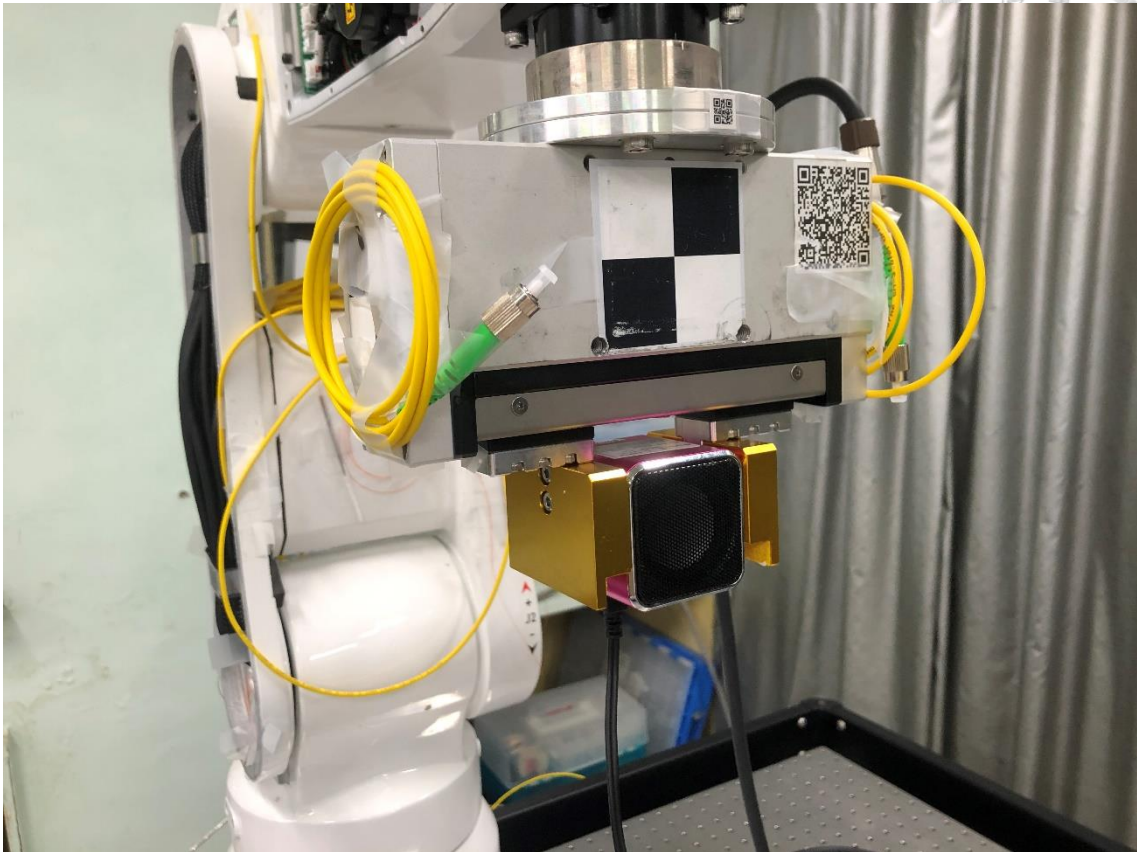


圖 4 - 21 以機械手臂夾持聲源 KINYO 喇叭

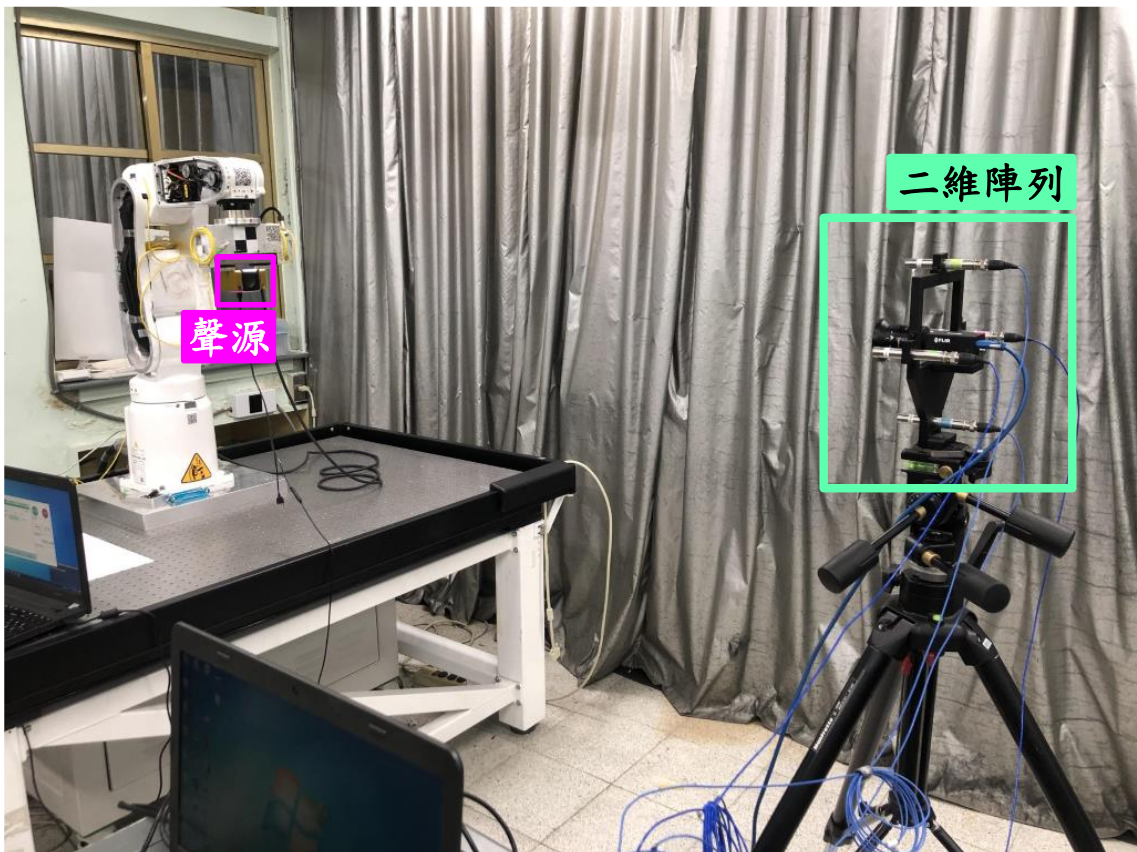


圖 4 - 22 整體實驗架設

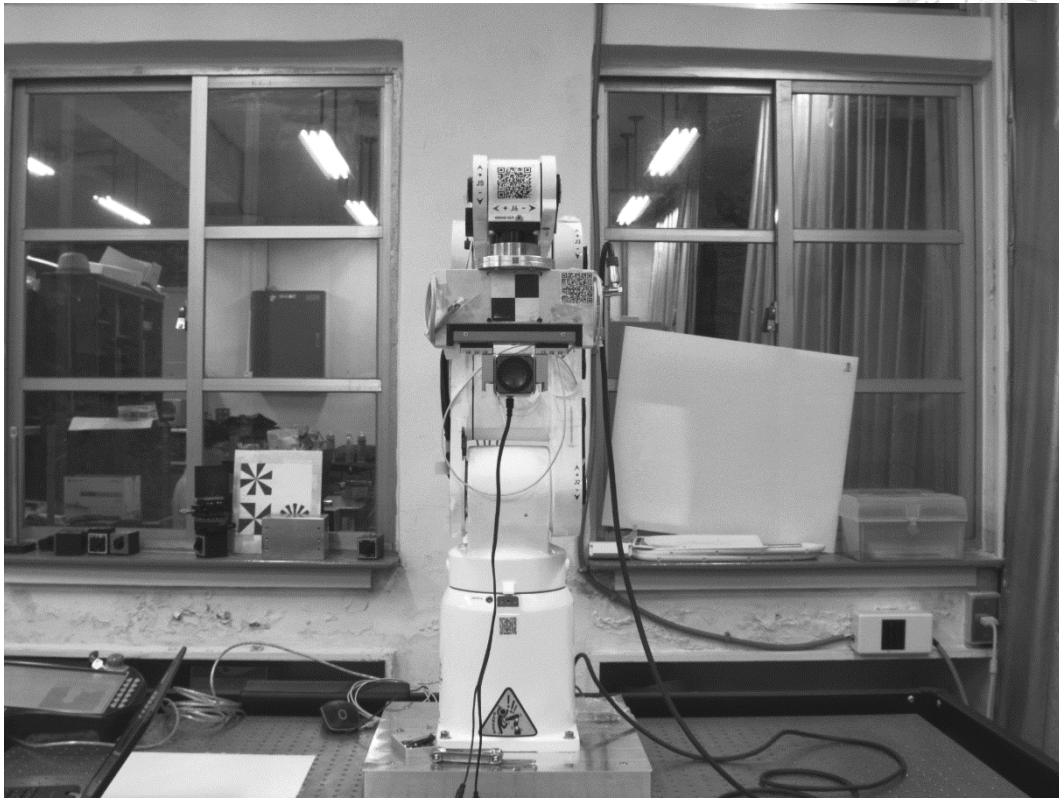


圖 4 - 23 相機擷取影像原圖 (  $2048 \times 1536 \text{ pixels}$  )

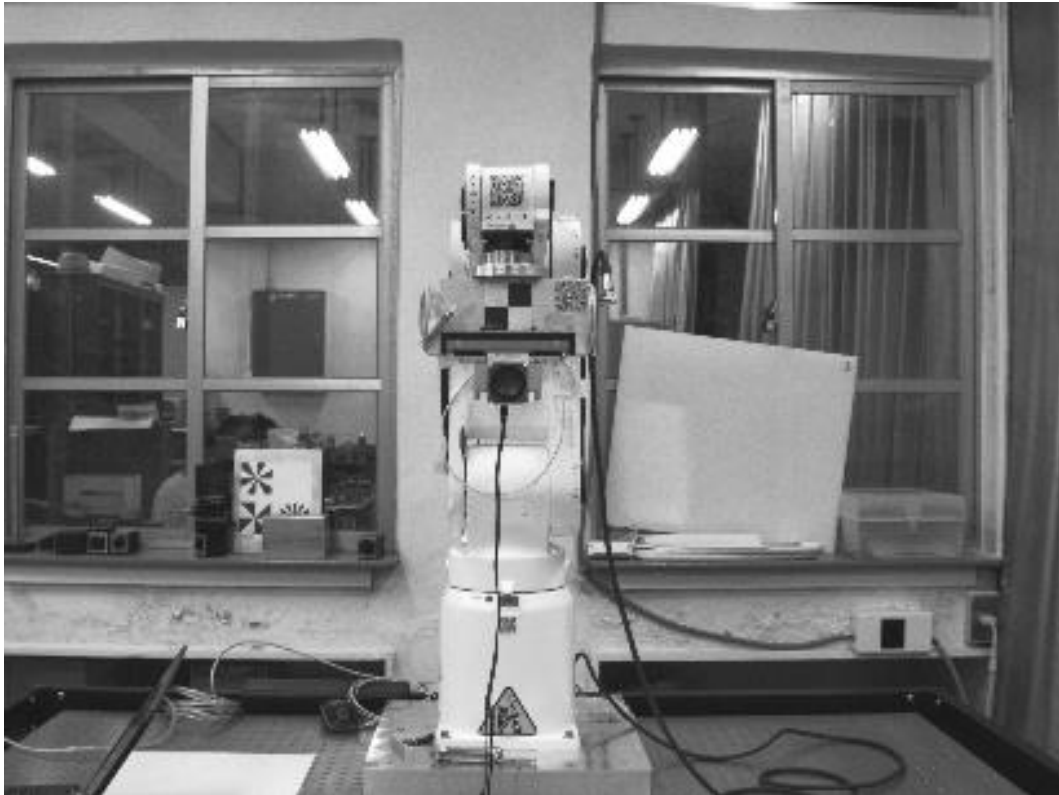


圖 4 - 24 以內差法取點之影像 (  $410 \times 308 \text{ pixels}$  )

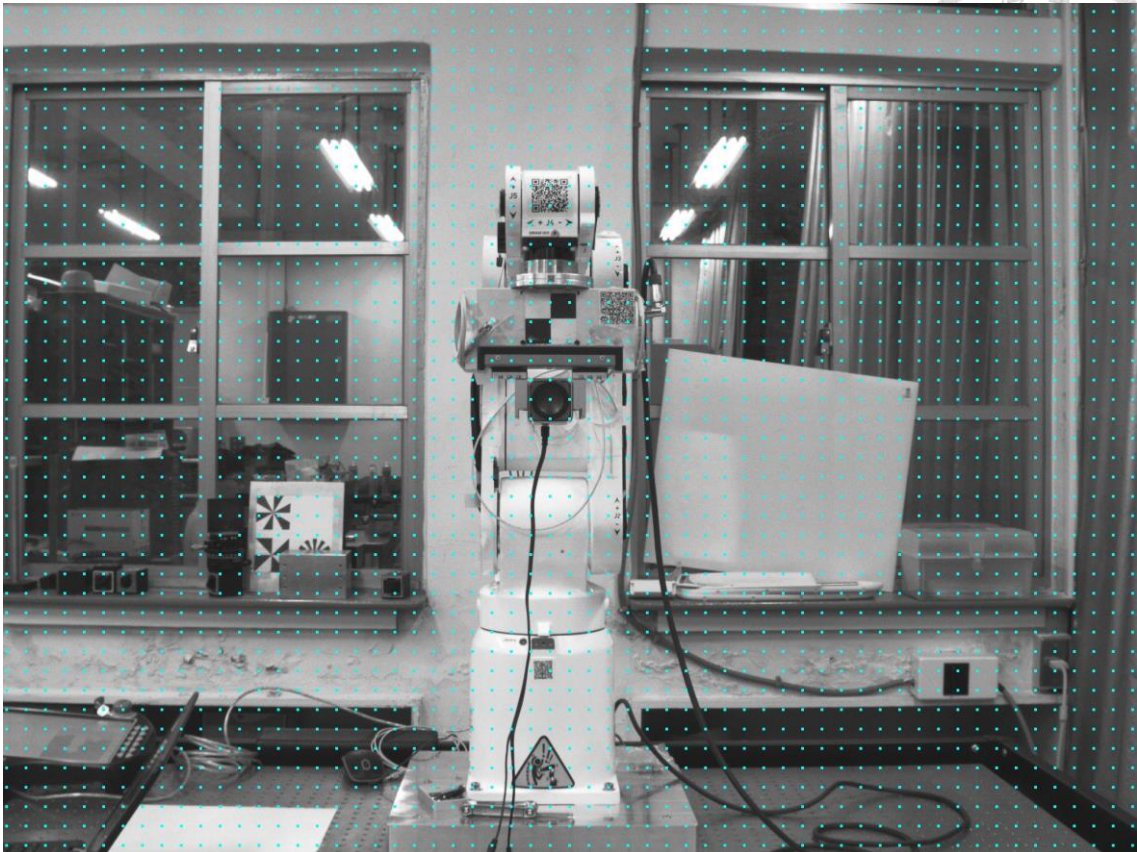


圖 4 - 25 靜止聲源之定位計算點與影像疊合

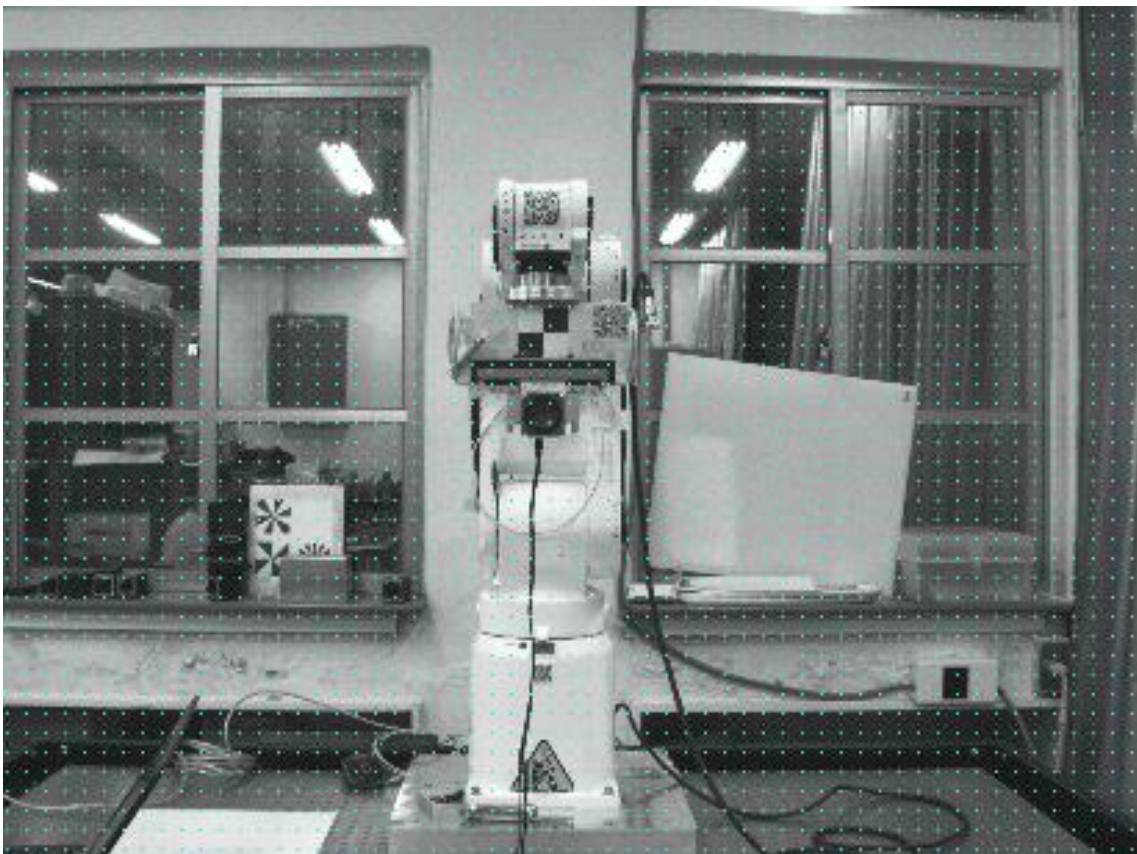


圖 4 - 26 移動聲源之定位計算點與影像疊合

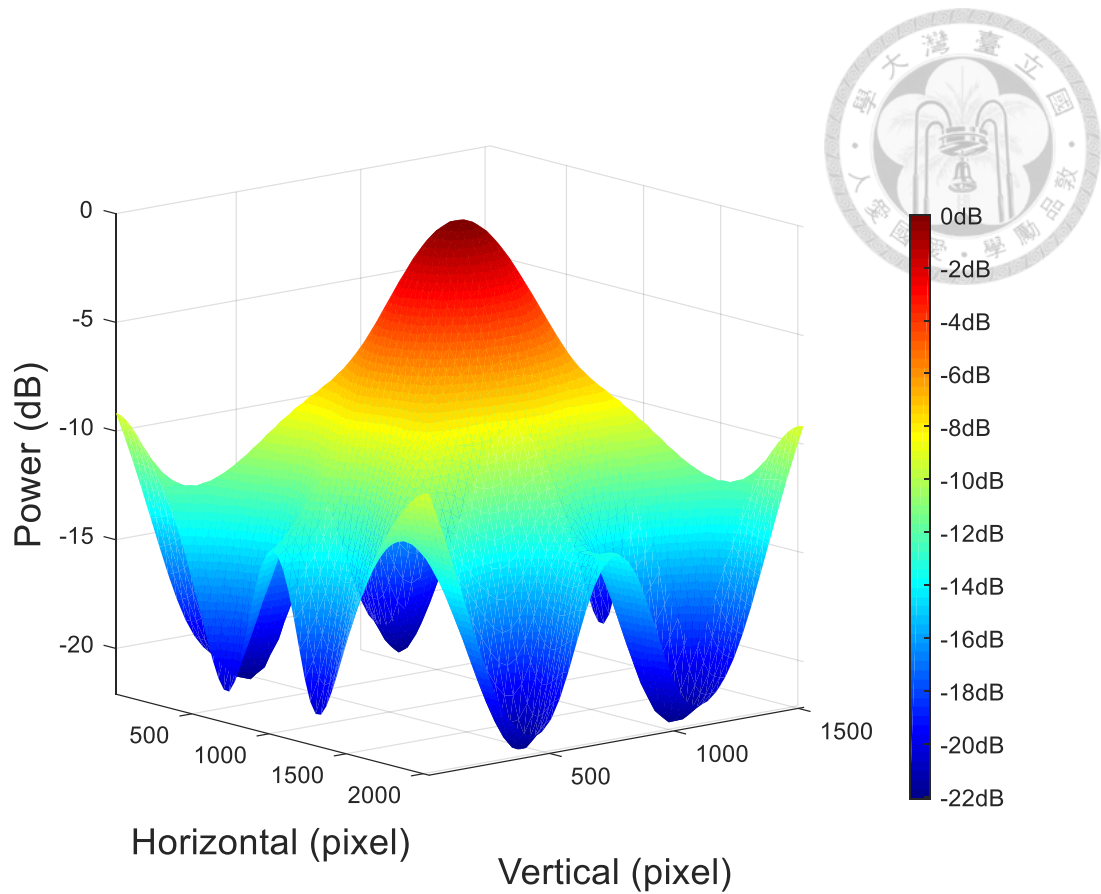


圖 4 - 27 模擬聲源由正中央入射之結果

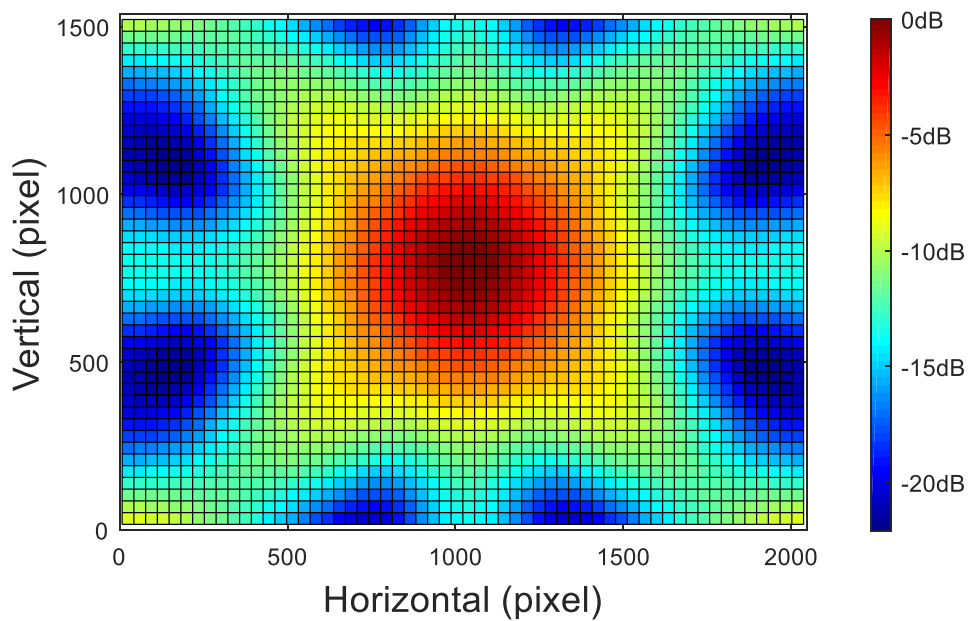


圖 4 - 28 陣列輸出能量矩陣俯視圖



圖 4 - 29 與影像疊合結果

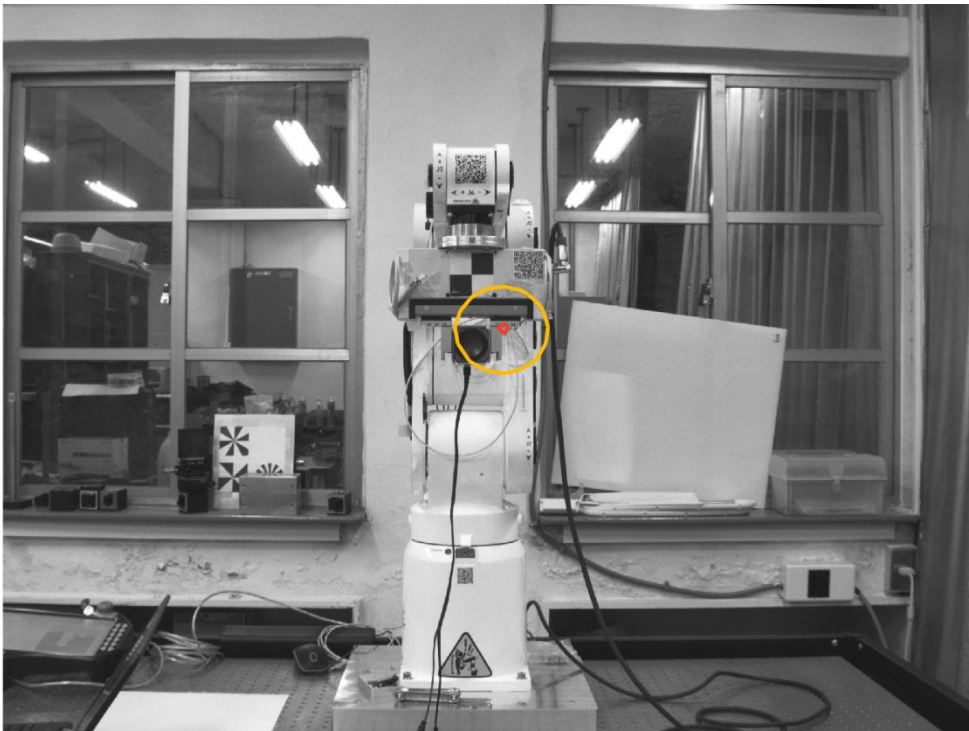


圖 4 - 30 靜止聲源定位結果

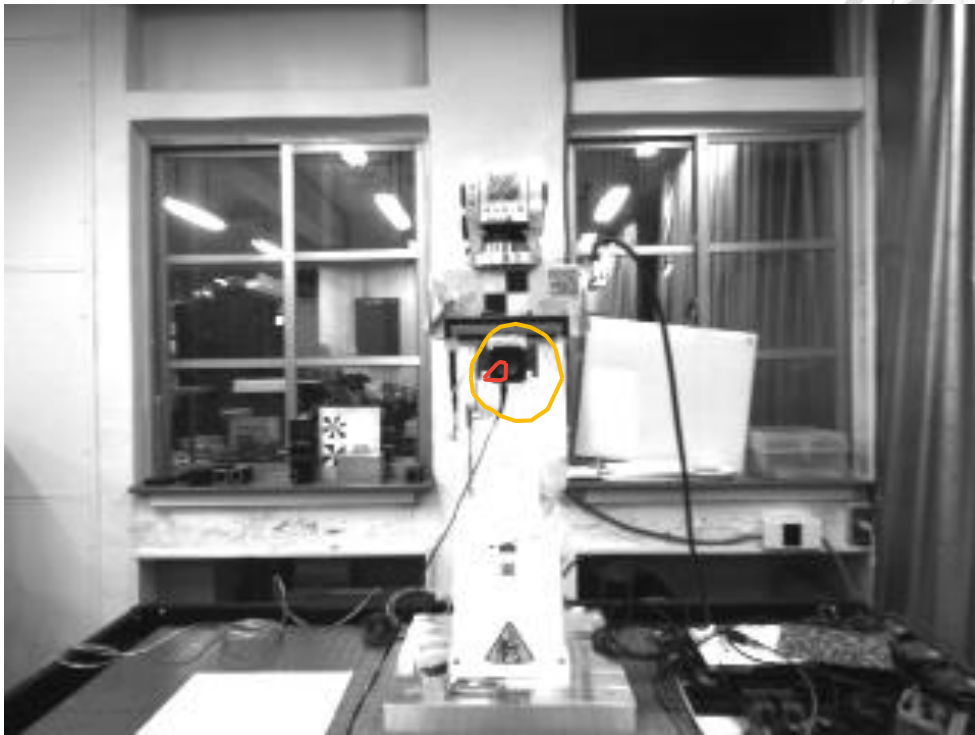


圖 4 - 31 SoundCam 拍攝結果

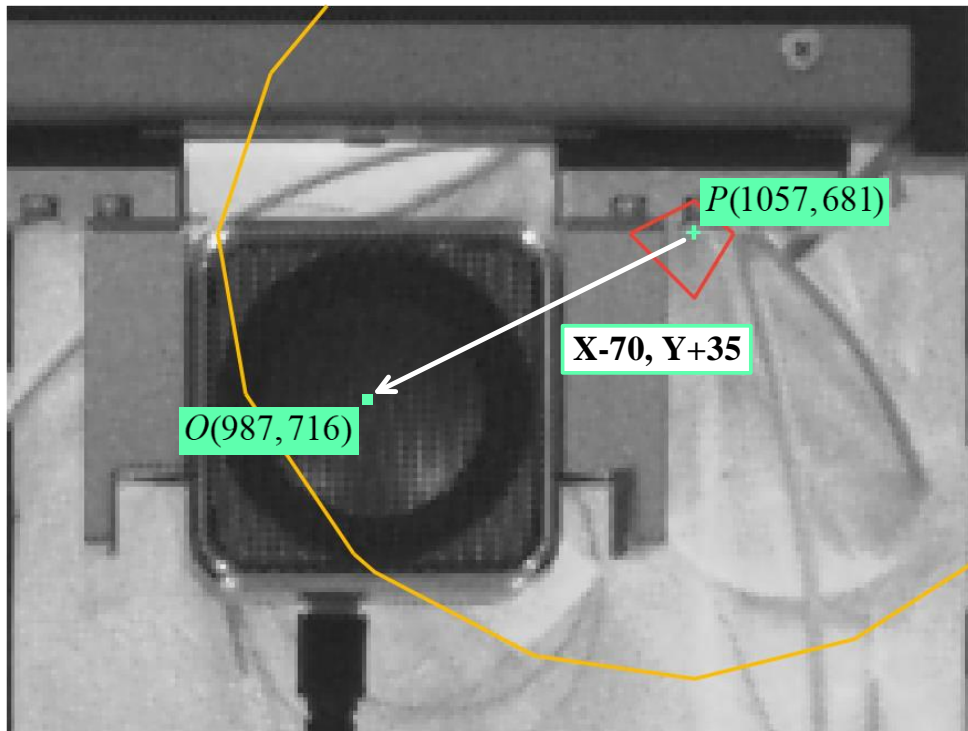


圖 4 - 32 陣列能量矩陣最大值與喇叭中心之距離

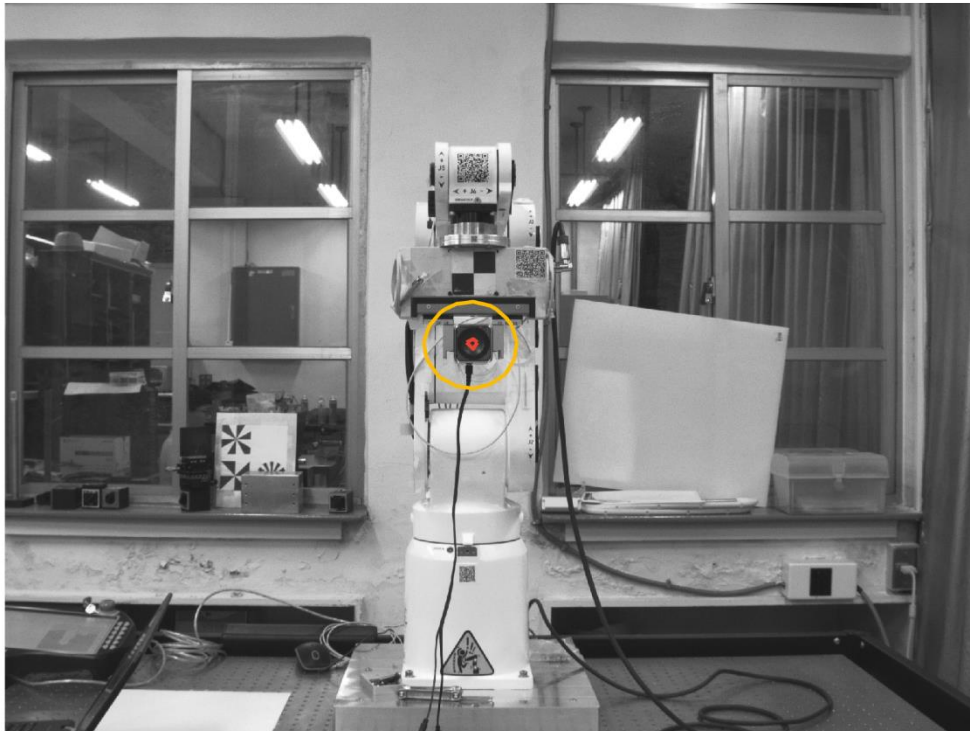


圖 4 - 33 修正座標後之靜止聲源定位結果

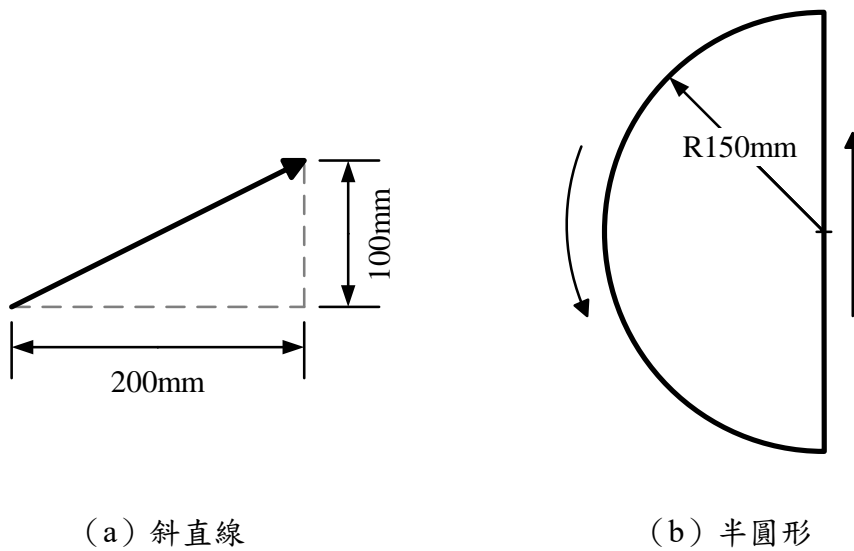


圖 4 - 34 手臂夾持聲源移動路徑

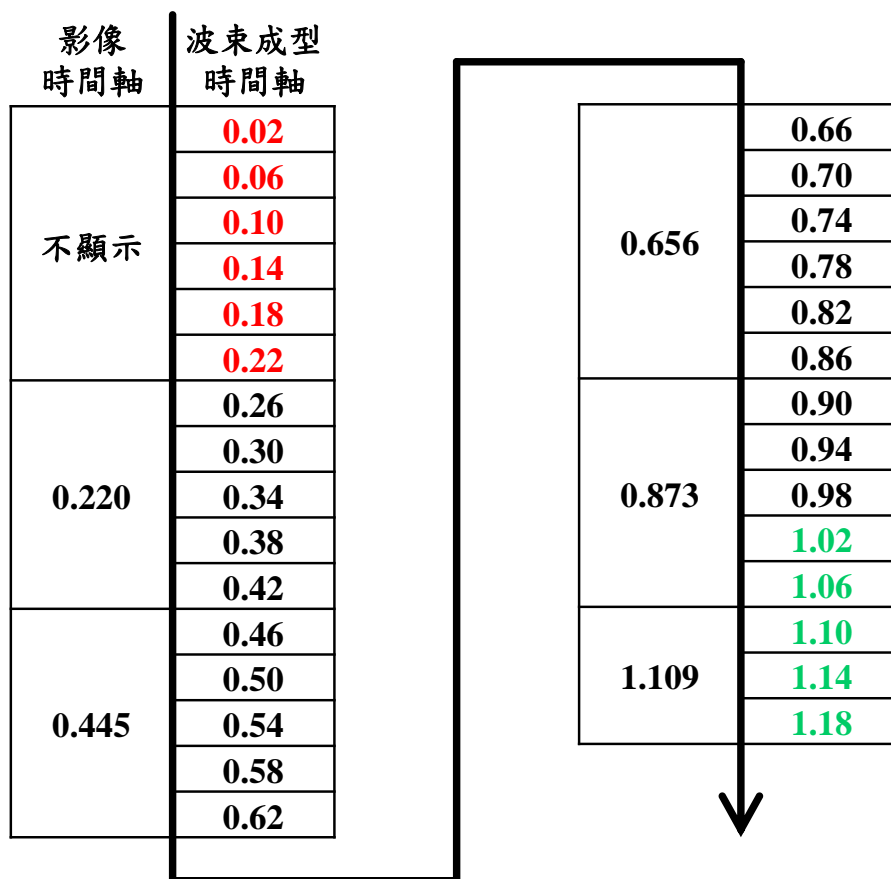


圖 4 - 35 影像與波束成型時間對應示意圖

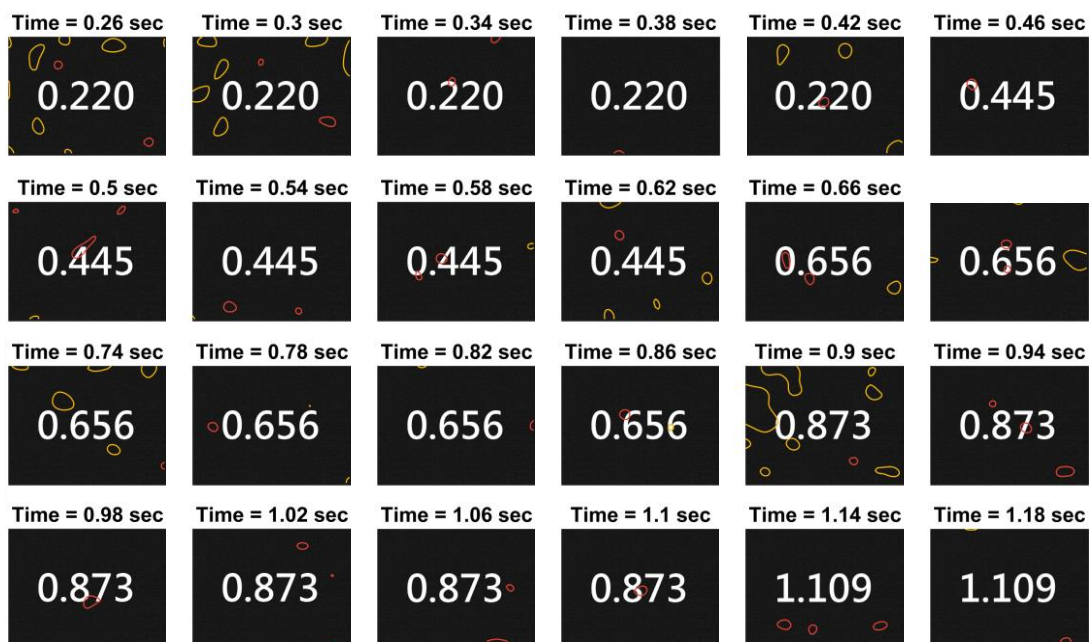


圖 4 - 36 每幀畫面示意圖

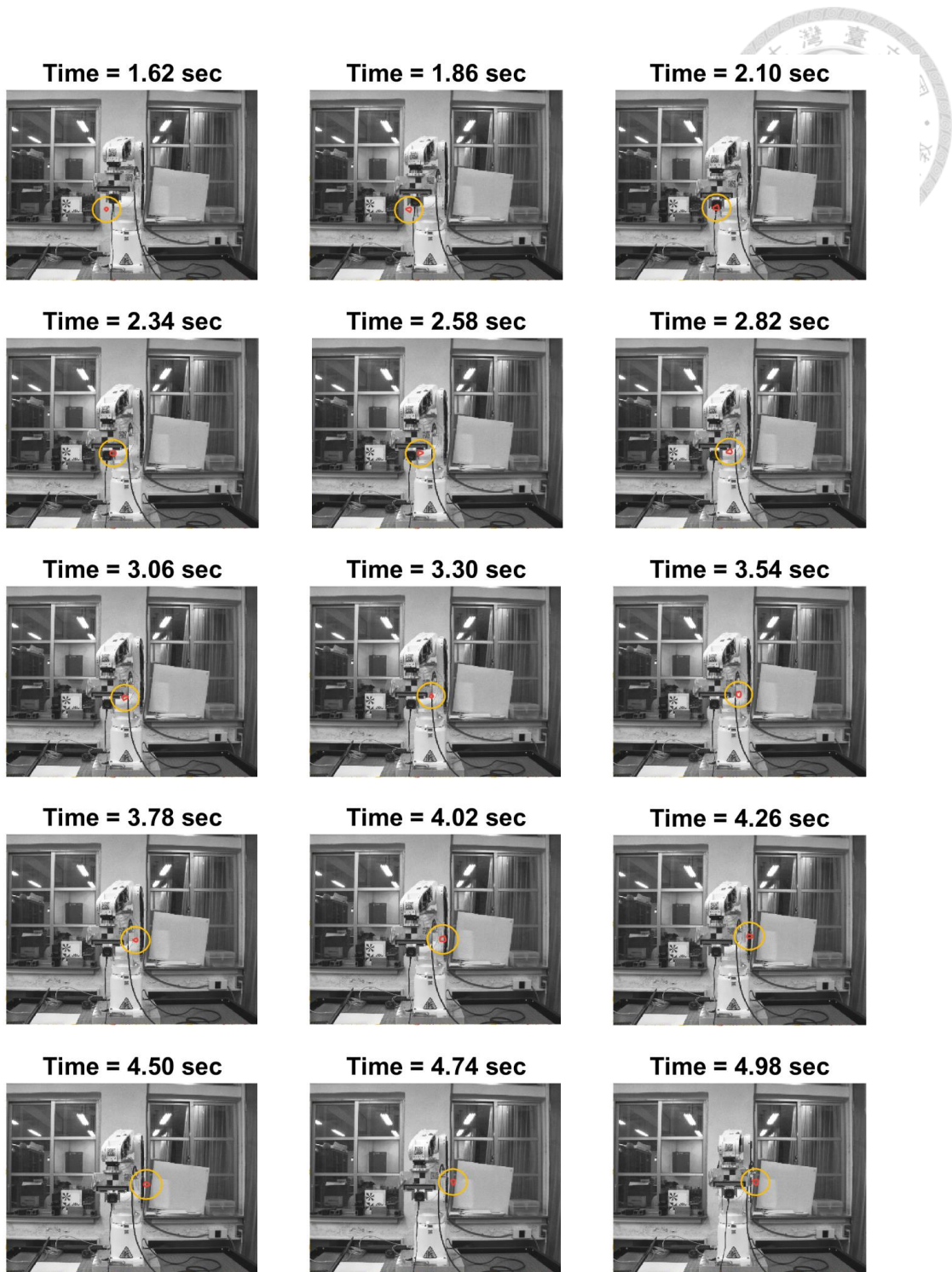


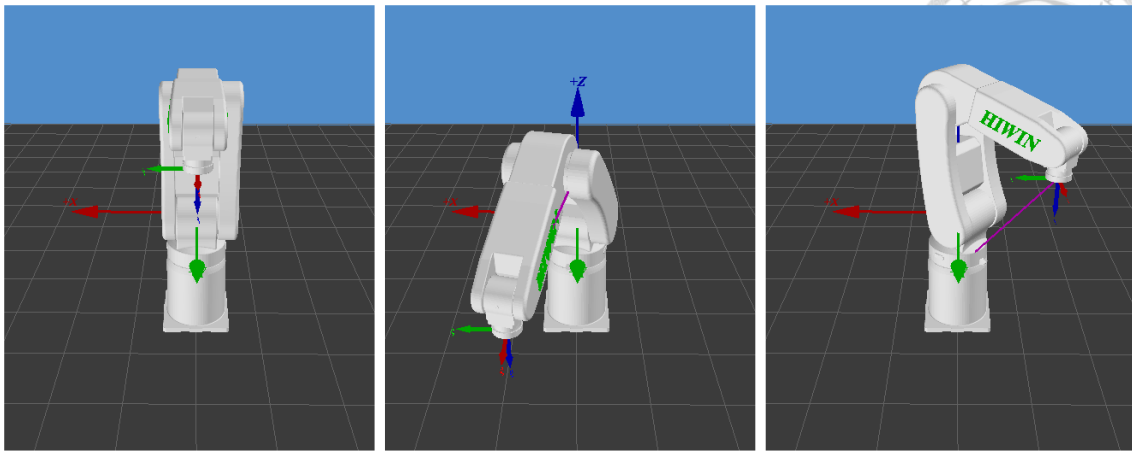
圖 4 - 37 斜直線移動聲源定位結果



圖 4 - 38 斜直線移動聲源定位結果 (時間軸修正後)



圖 4 - 39 半圓路徑移動聲源定位結果 (時間軸修正後)



(a) 點 1 (0,368,293.5)      (b) 點 2 (150,550,0)      (c) 點 3 (-250,200,200)

圖 4 - 40 三維空間移動路徑

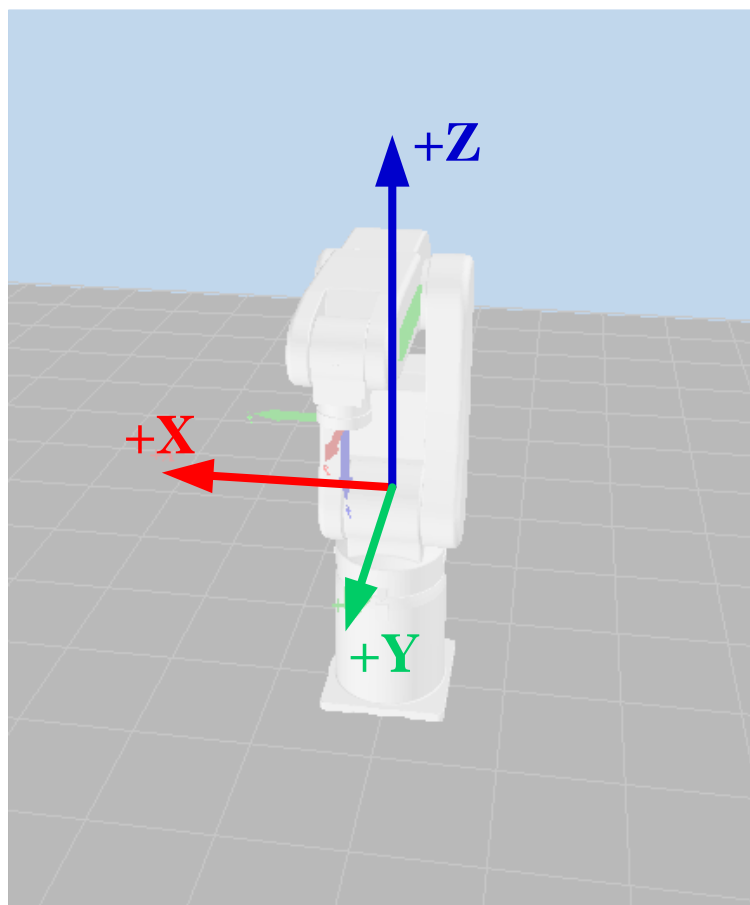


圖 4 - 41 坐標軸方向示意圖

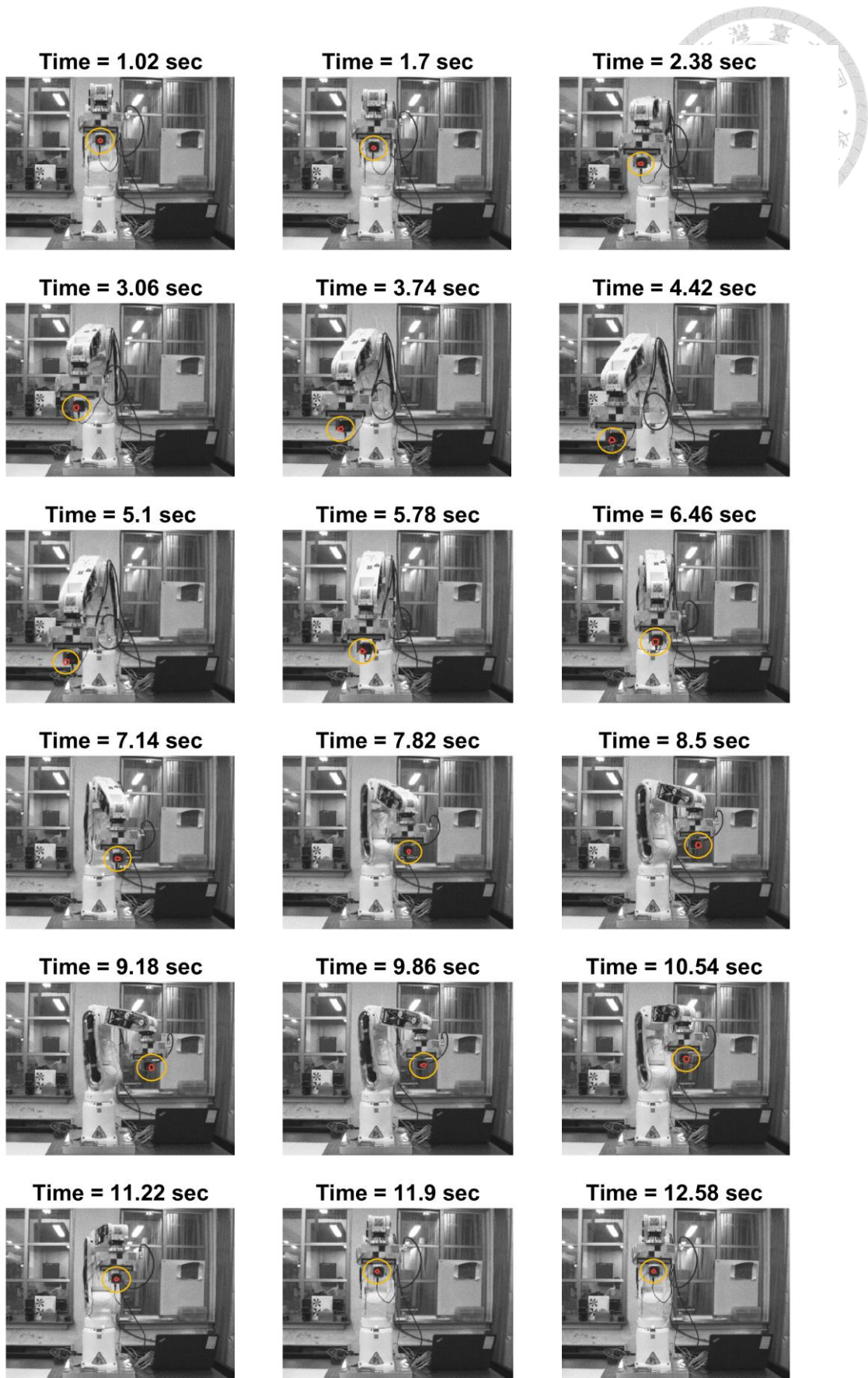


圖 4 - 42 三維空間移動聲源之定位結果

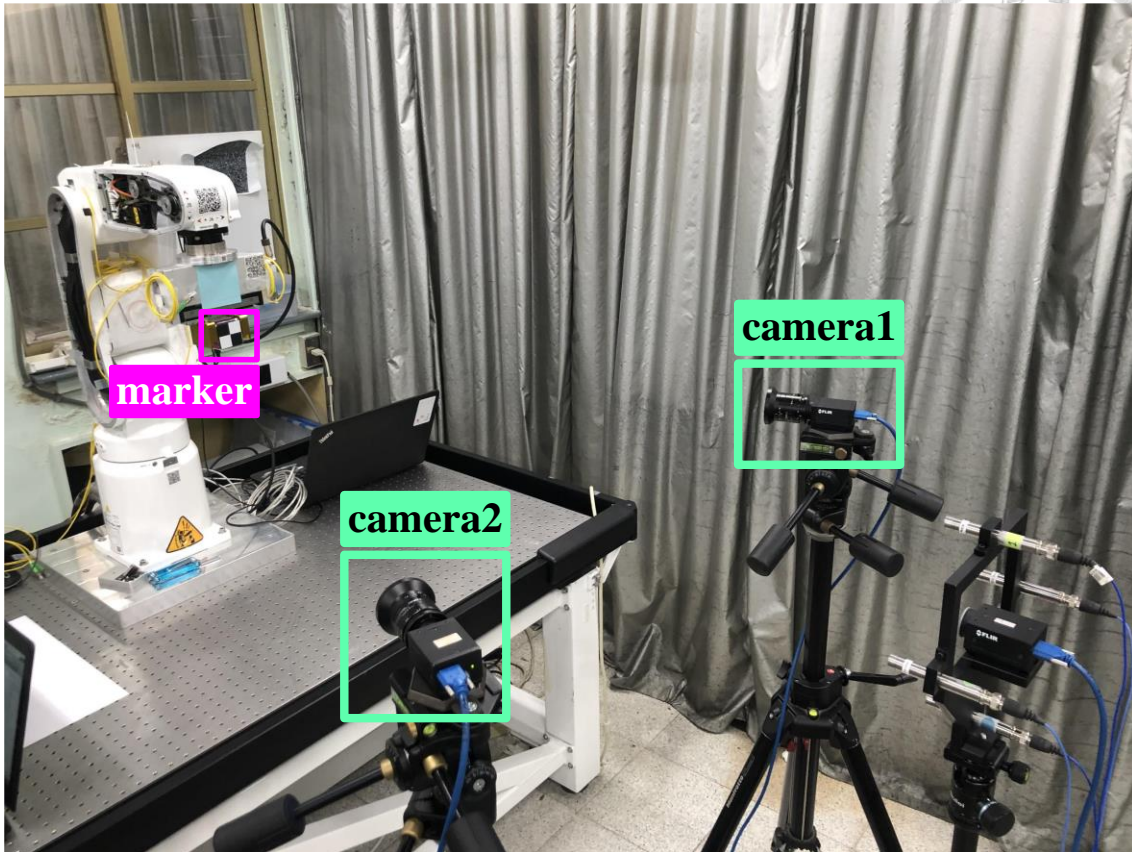


圖 4 - 43 三維 DIC 架設

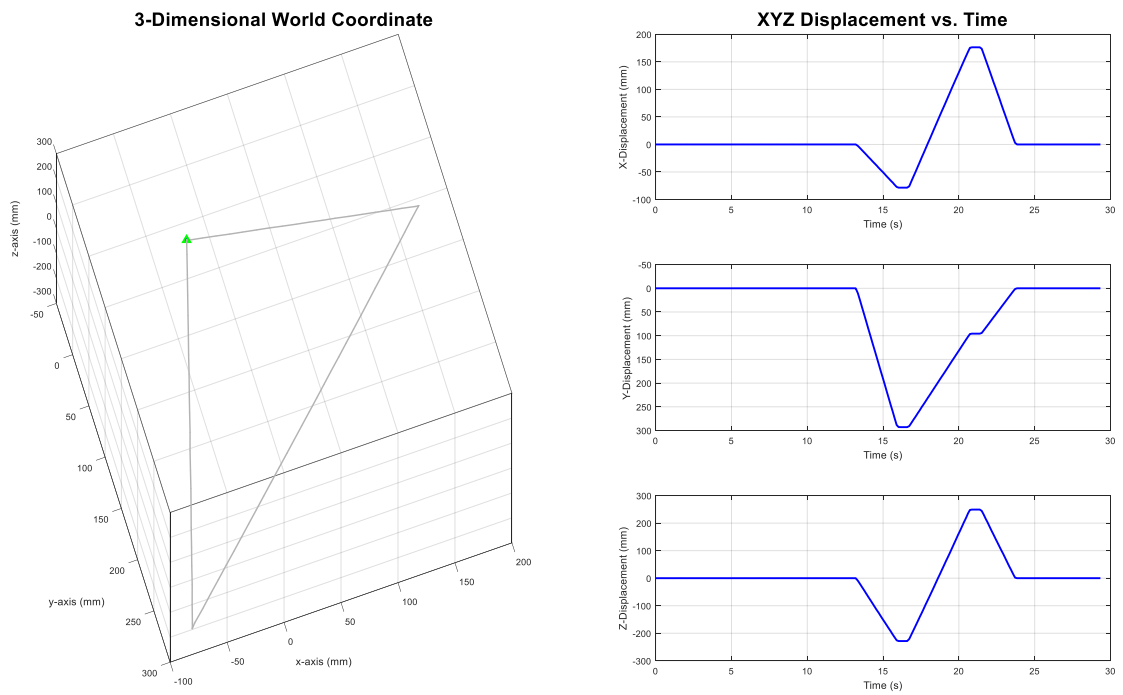


圖 4 - 44 三維 DIC 定位結果

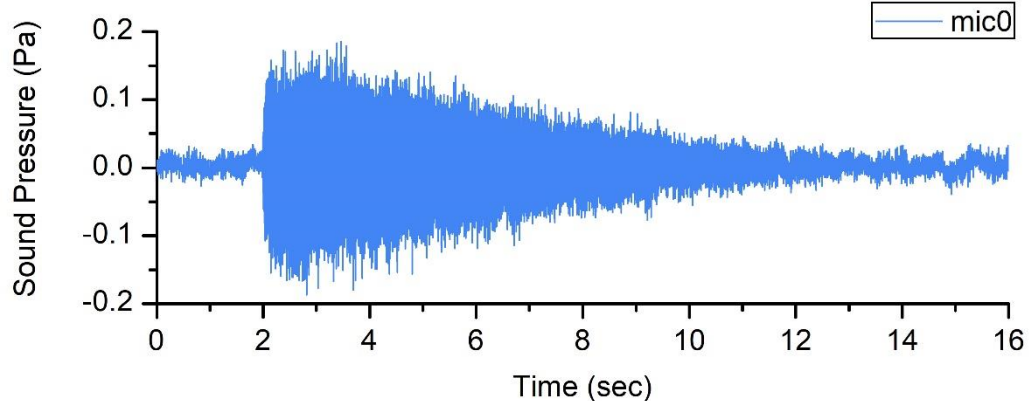


圖 4 - 45 靈敏度測試之麥克風原始訊號

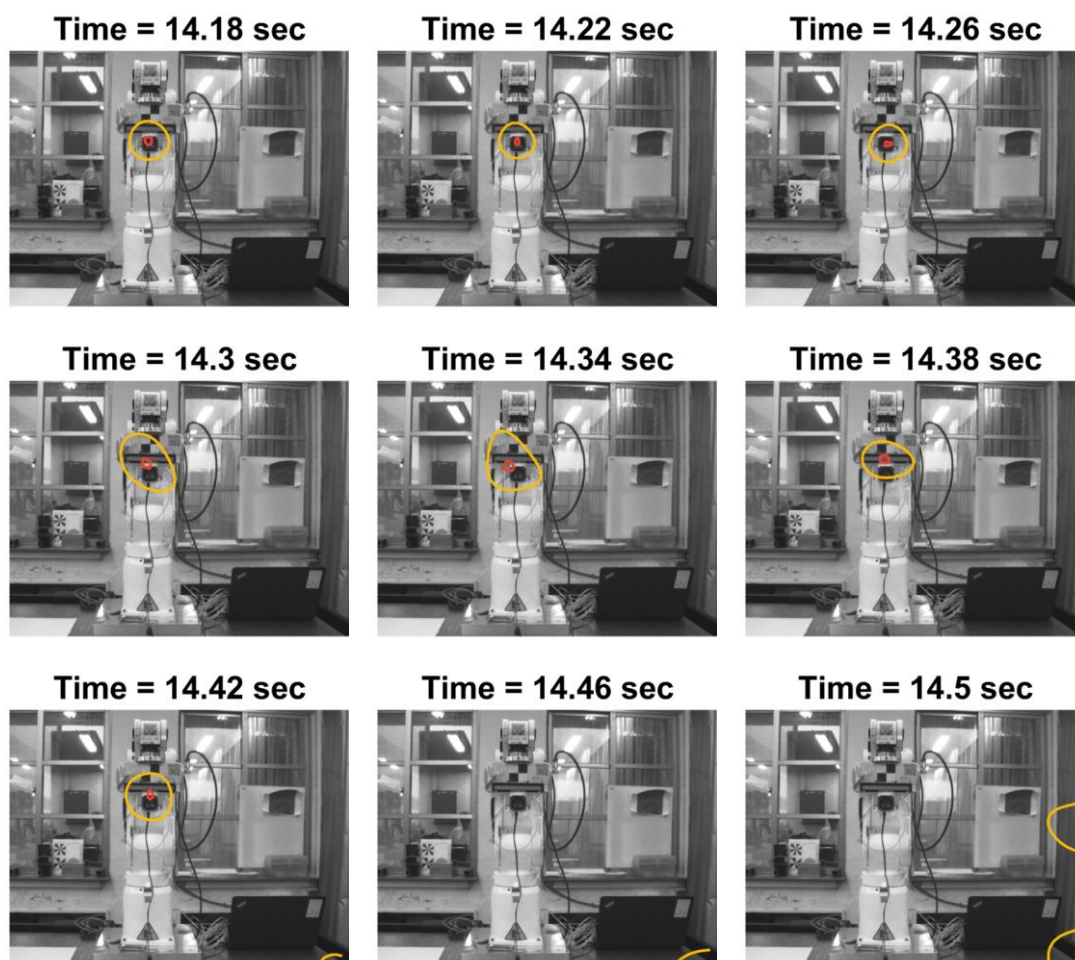


圖 4 - 46 計算結果 (第 14.26 秒至 14.46 秒)

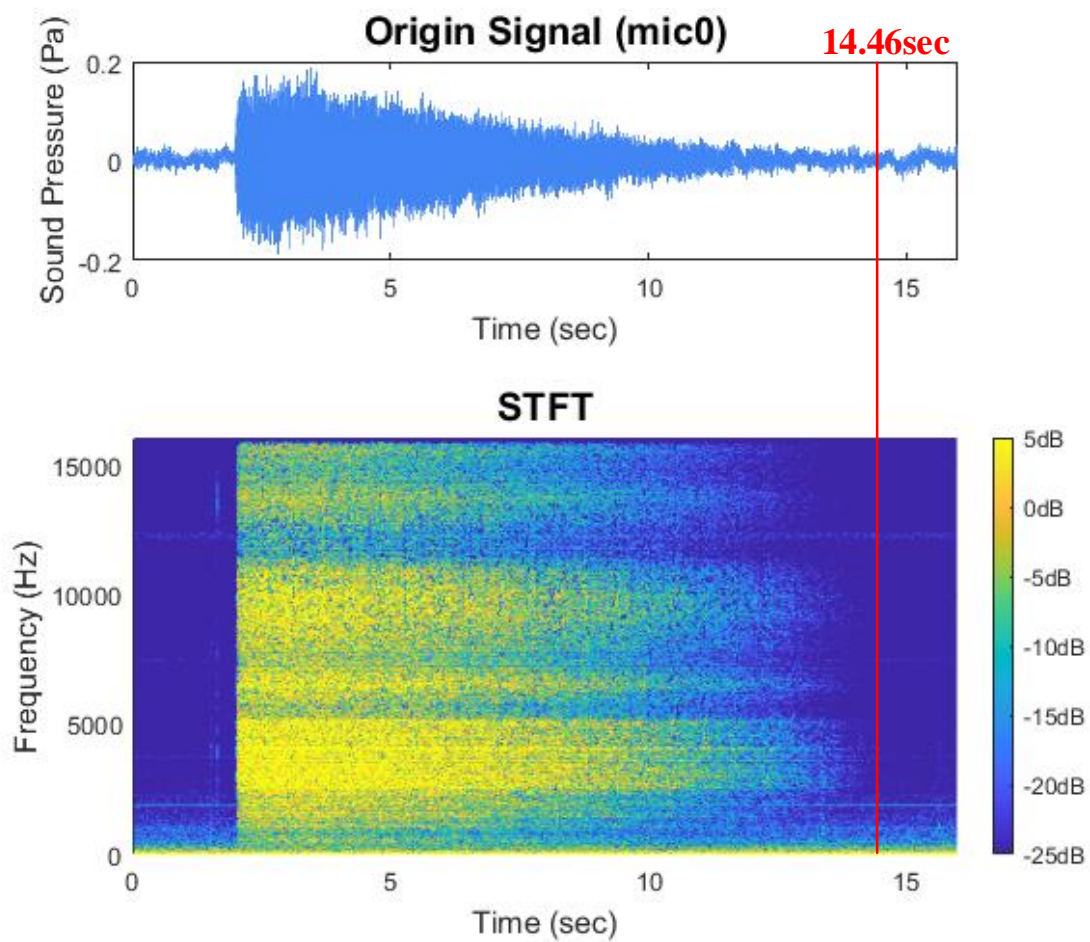


圖 4 - 47 麥克風原始訊號與時頻譜

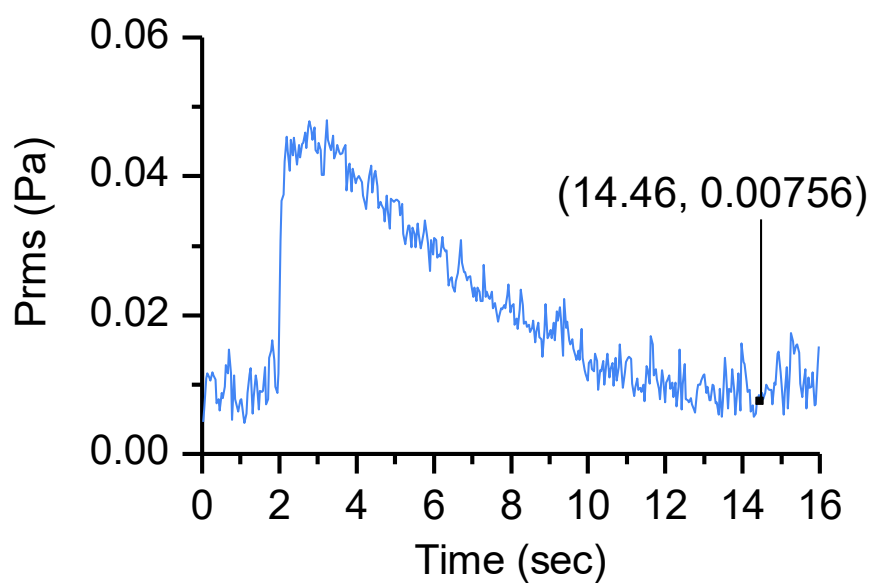


圖 4 - 48 聲壓均方根植



## 第五章 高速內藏式主軸之振噪分析



工具機中的主軸被譽為「機床的心臟」，屬於加工設備的核心配件，為了達到高精度的加工品質，對於主軸的要求也就更加嚴格。主軸的振動、溫度、熱伸長量及異音檢測都是業界關心的議題，先前許多學長姐已經針對實驗室的內藏式高速主軸應用布拉格光纖光柵（fiber Bragg grating，FBG）及數位影像相關法（digital image correlation，DIC）做過各種振動及溫升應變的精確量測，但此主軸之噪音相關的研究卻僅有詹惠媛學姐於 2019 年所做的一個初步分析[41]，但聲音對於主軸等機器是否出現異常是最直觀的判斷依據，因此本章將針對主軸的噪音使用聲學攝影機以及麥克風做量測，並且以加速規為輔助，進行一個較為完整的分析探討，並與學姊的實驗結果進行比較。

本章所研究的內藏式高速主軸為旭泰精密機械有限公司所製造的銑削主軸，如圖 5-1 所示，其刀把型號為 SK-40，套管外徑為 170mm，軸徑為 70mm，可到達之最高轉速為 15000rpm，搭配銓利有限公司型號 SP2203 之變頻器（見圖 5-2），以轉速控制器控制高速主軸的轉速變化。控制方式如圖 5-3，將下方開關打開後再旋轉右上角的旋鈕以控制轉速。由於只能透過手動旋轉旋鈕的方式控制轉速，無法像程式那樣精確指定轉速，因此本章實驗所測得之主軸旋轉頻率有一點誤差是合理的。

### 5.1 以聲學攝影機拍攝高速主軸之聲源定位結果

本研究所使用聲學攝影機之量測結果資訊已於 4.3 節說明，因此不再贅述；拍攝結果如圖 5-4、圖 5-5 及圖 5-6，發現主要聲源有三處：主軸上部兩孔洞（見圖 5-7）以及下方末端處（見圖 5-8），這三個地方都是套管內部空間與外部的通道，也就是說主軸的噪音來自內部，並且主要經由這三個孔洞發出。



## 5.2 待機狀態噪音及振動訊號量測分析

依照 4.1 之結果，將麥克風架設在上部孔洞附近（如圖 5-9），並且將一加速規（352C22）黏於主軸上，另一加速規（352C33）黏於主軸之固定桌上，如圖 5-10 所示。

在操作主軸時，發現將轉速控制器開關打開但未旋轉旋鈕設定轉速時，即有一小小的聲音產生。為比較開關打開前後差異，錄製六秒訊號，前三秒為開關未打開的狀態，後三秒則是開關打開後。圖 5-11、圖 5-13、圖 5-15 分別為麥克風、加速規 352C22、加速規 352C33 量測到的訊號原始波形及時頻譜，顯示加速規的訊號在開關打開後振幅都明顯增加許多，而三個訊號都在開關打開後出現約 6000Hz 及其倍頻的訊號，雖然麥克風因為會受環境噪音影響所以訊號較不明顯，但是與開關打開前比較還是可以看出差異。圖 5-12、圖 5-14、圖 5-16 為將開關打開後的訊號（第 4 至 6 秒）做頻譜分析，以得到更準確的頻率資訊，發現這四個頻率的確是約 6000Hz 左右以及其倍頻。


接著利用聲學攝影機來確定這個訊號的來源，經過拍攝後發現聲源來自於變頻器（見圖 5-17），同時也發現變頻器延伸出來的訊號線都有 6kHz 的訊號源，因此判斷開關打開後變頻器會以約 6kHz 的頻率振動，不僅產生聲音也會使主軸產生振動。

## 5.3 變轉速實驗之噪音及振動訊號量測分析

本實驗規劃主軸以 6000rpm、9000rpm、12000rpm 及 15000rpm（換算旋轉頻率分別為 100Hz、150Hz、200Hz、250Hz）各運轉 60 秒，透過分析麥克風及加速規訊號比較於主軸不同轉速的情況下訊號的變化情況。

### 5.3.1 麥克風訊號分析

圖 5-18 為麥克風原始訊號及時頻譜，觀察原始訊號波形可發現雖然聲壓振幅



時大時小，實際聽起來也能感受到聲音漸強漸弱的變化，但整體看來聲壓振幅仍有隨著轉速增加而成長的趨勢。而由時頻譜可看出各轉速量值較大的頻率都集中於 8000Hz 以下，因此以下針對各轉速的時頻分析及頻譜只呈現 0~8000Hz 的部分。為了確保整段訊號為固定轉速，需去除中間調整控制器變化轉速的時間，因此在各轉速中只取 50 秒長度的訊號做分析，轉速 6000rpm 取第 0 至第 50 秒，轉速 9000rpm 取第 70 至第 120 秒，轉速 12000rpm 取第 130 至第 180 秒，轉速 15000rpm 取第 200 至第 250 秒。圖 5 - 19 至圖 5 - 22 為各轉速麥克風訊號之時頻譜，這四段訊號的時頻譜中都有出現量值隨時間變化的頻率訊號，而這些頻率值在整段訊號的頻譜圖中也能找到，比較後發現每個轉速出現的主要頻率各不相同，但大部分都分布在 2000Hz~8000Hz，即是中高頻段的部分，這些訊號應是主軸運轉時內部的零件互相高速摩擦所發出的尖銳聲響。

然而先前詹惠媛在變轉速實驗中[41]所發生的異音，如圖 5 - 23 所示，於訊號第 597 秒至第 647 秒出現多個連續之的頻率群，在本研究中並未出現，推測原因為本實驗進行之前此主軸曾經帶出去比賽過，可能在移動過程中內部零件位置稍微改變，因此不再出現此現象。不過實驗過程中另外發現主軸於轉速 12000rpm 時有另一種低頻的聲音出現，同時還可以明顯感受到整個地板都在震動，因此將透過以下進一步的頻譜分析以及加速規量測結果討論此現象。

特別觀察各轉速頻譜的低頻部分，如圖 5 - 24 所示，標示為粉紅色的即為主軸旋轉頻率及其倍頻，其中 12000rpm 的旋轉頻率 202.32Hz 量值特別大（見圖 5 - 24 (c)），若聆聽 202.32Hz 的單頻訊號，可發現的確為前文所提到的低頻聲音。而其他轉速的頻譜（圖 5 - 24 (a)、(b)、(d)）除了旋轉頻率之外也有出現其他的頻率訊號，而且非常類似，都在約 28Hz、48Hz、305Hz 附近出現峰值，懷疑可能為背景噪音以及主軸噪音於空間中反射迴響造成。因此另外錄下主軸未啟動時的環境噪音訊號做頻譜分析（如圖 5 - 25），其頻率分布曲線與各轉速的頻譜都很類似，因此可以推論圖 5 - 24 中除了各轉速旋轉頻率之外的頻率訊號應是來自環境背景噪音。



### 5.3.2 加速規訊號分析

圖 5 - 26 為黏於軸上之加速規 352C22 原始訊號及時頻譜。由原始訊號可看出其振幅有隨著轉速上升而增加的趨勢，而圖 5 - 27 為黏於主軸固定桌上之加速規 352C33 的原始訊號及時頻譜，其中有幾點值得討論的現象：1. 9000rpm 以上的高轉速訊號波形明顯不對稱；2. 時頻譜中顯示在轉速 12000rpm 時，在低頻段出現連續密集的頻率，隨著頻率軸往上而漸漸消失，轉速 15000rpm 也有此現象但相較之下非常輕微；3. 相較於加速規 352C22 訊號振幅隨轉速而增加，加速規 352C33 訊號振幅最大的時候並非轉速 15000rpm 而是 12000rpm，其次依序為 15000rpm、9000rpm、6000rpm。

訊號不對稱的現象推測是由於固定桌桌腳不等長所造成，因此將加速規 352C33 改黏於固定桌其他位置如圖 5 - 28，以同樣運轉行程比較訊號波形。實驗結果如圖 5 - 29，並無出現訊號不對稱的現象，且訊號振幅與 352C22 同樣隨轉速上升而增加，此外時頻譜也沒有出現原架設位置時轉速 12000rpm 的異常現象。由以上結果可以得出主軸固定桌桌腳不平，而原架設位置為晃動較大的部分，因此訊號才會不對稱，而新架設位置為晃動較小的部分，因此訊號正常。

接著討論圖 5 - 27 的時頻譜異狀。若將原架設位置的變轉速實驗中加速規 352C33 的振動訊號針對各轉速的訊號做頻譜分析，訊號剪取範圍與 5.3.1 小節相同，則各轉速的頻譜結果如圖 5 - 30 所示。比較後可發現轉速 12000rpm 的頻譜低頻部分由低至高呈現斜坡狀，甚至在轉速 15000rpm 與 9000rpm 的頻譜也有稍微出現這個現象，但相較之下轉速 12000rpm 非常明顯。此種頻譜特徵符合基座鬆動的頻譜現象[42]，與前段訊號不對稱的造成原因相互呼應。

其次將問題聚焦於為何出現異常的是轉速 12000rpm。參考文獻[43]後得知若轉軸中有鬆動零件 (loose part)，其振動訊號在轉軸旋轉頻率接近轉軸本身之共振頻率時振幅會變大，並且訊號會出現拍頻現象 (beating)。因此首先確認主軸的共振頻率，進行敲擊實驗，加速規架設位置同圖 5 - 10。使用橡膠槌敲擊，敲擊位置

見圖 5-31，實驗結果如圖 5-32 所示，兩加速規所得的共振頻率非常相近。再將各轉速的原始時域訊號取 20 秒觀察比較，訊號波形如圖 5-33 至圖 5-36 所示，可發現轉速 12000rpm 的訊號出現明顯的拍頻波形，以上實驗結果皆符合文獻[43]之結果，因此可推論此主軸內部應有零件鬆動。

綜合以上分析結果，前述之訊號異常現象成因推測為：主軸內部有零件鬆脫，而主軸轉速為 12000rpm 時，旋轉頻率 200Hz 接近第三共振頻（約 210Hz），因此振動振幅增大並且出現拍頻，加上固定桌基座不平衡造成訊號不對稱，也因此在此轉速時整個主軸和固定桌都會一起振動。至於為何旋轉頻率接近第一共振頻（26.667Hz）及第二共振頻（約 136Hz）時並未出現此現象，本研究推測為當旋轉頻率接近前兩共振頻率時，振動力度不夠大因此無法觸發；第四共振頻（約 280Hz）則因此主軸轉速限制最高為 15000rpm（旋轉頻率 250Hz）而無法進行實驗觀察。

最後探討加速規訊號頻譜低頻部分，以觀察是否量測到主軸之旋轉頻率。圖 5-37 為主軸各轉速加速規 352C22 訊號 0~400Hz 部分的頻譜，可以發現很清楚地出現各轉速的旋轉頻率以及倍頻（標示為粉紅色），並且轉速 12000rpm 所測得的旋轉頻率量值高很多，與麥克風訊號相同。圖 5-38 為主軸各轉速加速規 352C33 訊號 0~400Hz 部分的頻譜，轉速 6000rpm 同樣有出現旋轉頻率 99.98Hz 及其倍頻，但相較於加速規 352C22 量值較小；9000rpm 則沒有出現旋轉頻率 156.18Hz，量值最高的前兩個頻率為共振頻率，並且頻譜呈現等間距的頻率峰群；12000rpm 則出現旋轉頻率 202.32Hz，同樣也有等間距頻率峰群的現象；15000rpm 也有出現旋轉頻率 250.14Hz。比較兩加速規的頻譜，發現加速規 352C33 的頻譜除了旋轉頻率外也會出現其他頻率，是因為加速規 352C33 架設於固定桌上，又是位移較大的地方，除了主軸的振動外還會受固定桌本身的振動影響，所以會出現其他頻率的訊號。比較新架設位置的訊號頻譜（見圖 5-39），可發現頻率峰群的現象減小許多，轉速 9000rpm 也量得到旋轉頻率了。



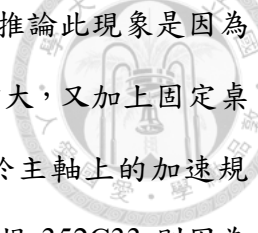
## 5.4 使用自行開發之二維聲源定位系統進行量測

在本章最後另外使用前一章所自行開發的二維聲源定位系統對此主軸進行量測，實驗架設如圖 5-40 所示，將陣列正對孔洞 2，設定主軸轉速 15000rpm，錄製一段訊號後進行計算，關於程式設定之觀測頻率範圍，5.1 節中聲學攝影機設定的範圍為 6500~11600Hz，雖然已超過自行開發系統之觀測頻率上限，但還是設定相同範圍，以比較定位結果。

計算結果如圖 5-41 所示，而圖 5-42 為疊合前的陣列輸出能量完整曲面俯視圖，由於這些峰值呈現規則排列，因此應是混疊現象的假聲源，此外因為實驗空間小、反射物多造成混響嚴重，都是影響量測結果的可能原因，但是在孔洞 2 附近仍有陣列能量峰值。由於陣列輸出能量大小與原始訊號量值呈正相關，因此嘗試尋找訊號中的主導頻率，四支麥克風所得原始訊號如圖 5-43，FFT 轉換後之頻譜則如圖 5-44，結果顯示在系統觀測範圍內量值最大的頻率為 10300.7Hz，再計算此頻率之 array pattern，如圖 5-45，將其平移後與實驗結果疊合比對如圖 5-46 所示，可看出假聲源位置非常接近，代表此實驗結果是由 10300.7Hz 的訊號所主導。

## 5.5 本章結論

本章藉由聲音及振動量測工具對內藏式高速主軸做各項量測與分析，首先發現主軸轉速控制器開關打開時而未設定轉速時，主軸之變頻器即有產生約 6000Hz 的振動噪音，並且透過連接線路而導致主軸本身也有相同的振動訊號。而當主軸開啟之後聲音的主要來源發自主軸內部，經由軸上三個孔洞所發出，經由變轉速實驗的聲音訊號分析後，認為應是主軸運轉時內部的零件互相高速摩擦所發出的尖銳聲響，但因主軸無法拆卸觀察其內部構造，所以無法確切得知是哪個零件部位所產生。主軸運轉實驗過程中並未出現學姊量測到的異音，但卻另外發現主軸轉速為 12000rpm 時出現一明顯的低頻聲音，此聲音為主軸的旋轉頻率，從加速規 352C33 的訊號時頻譜中同樣發現轉速 12000rpm 的訊號出現了異常，並且 6000rpm 以上的



轉速訊號皆明顯不對稱。將以上現象做為線索，參考文獻分析後推論此現象是因為主軸內部有鬆脫的零件，在主軸轉速接近共振頻時振動振幅會增大，又加上固定桌不平衡因此主軸在這個轉速時造成整體的振動。麥克風與黏於主軸上的加速規 352C22 皆有量測到主軸的旋轉頻率，但是黏於固定桌上的加速規 352C33 則因為被固定桌的振動所影響，頻譜中出現了旋轉頻率以外的訊號。

對內藏式主軸的機構來說，想要用聲源定位的技術來直接找發出異音的部位為何處是困難的，因為外面被套管所包覆，所以內部有異音的話都會從孔洞發出，在本章中還是可透過一般麥克風及加速規量測的方式進行可能發生異常的現象作分析。

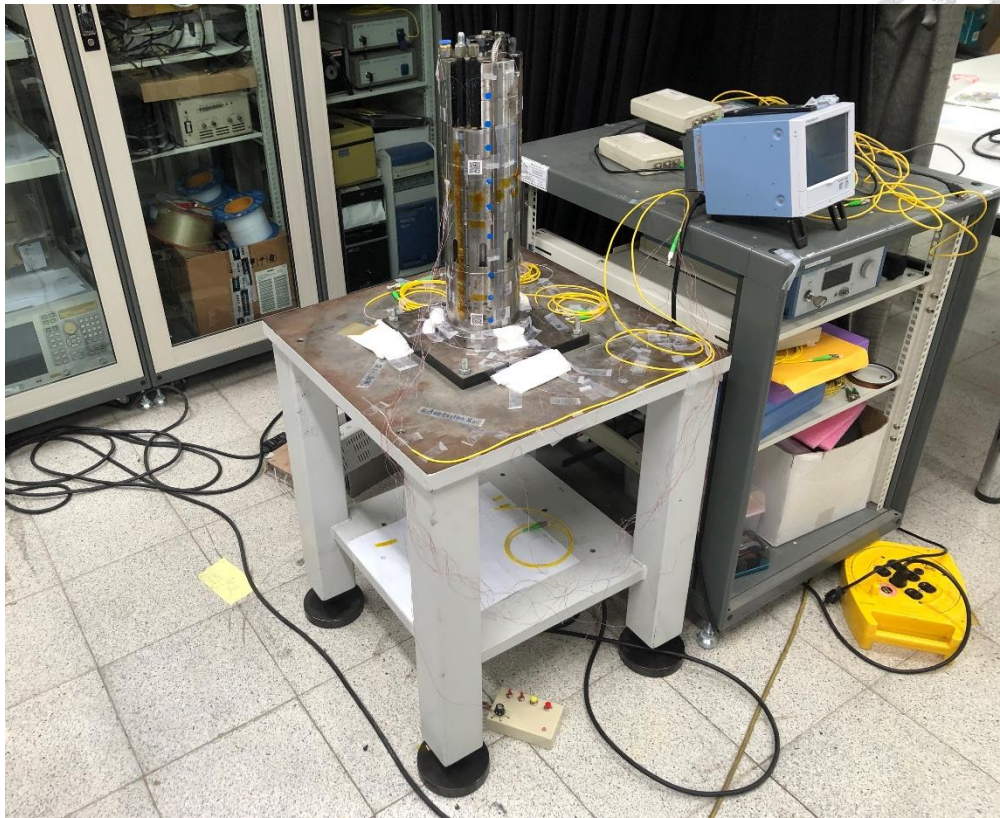


圖 5-1 內藏式高速主軸



圖 5-2 變頻器



圖 5 - 3 轉速控制器

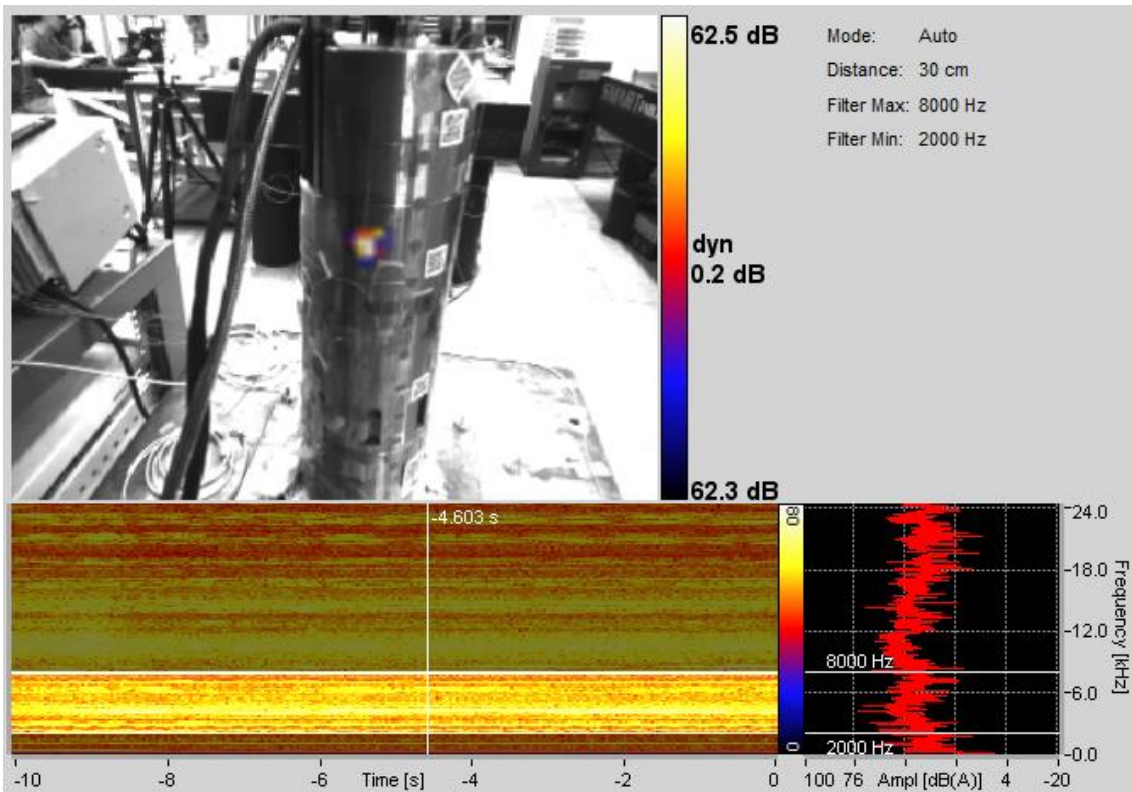


圖 5 - 4 聲學攝影機拍攝結果(上方孔洞之一)

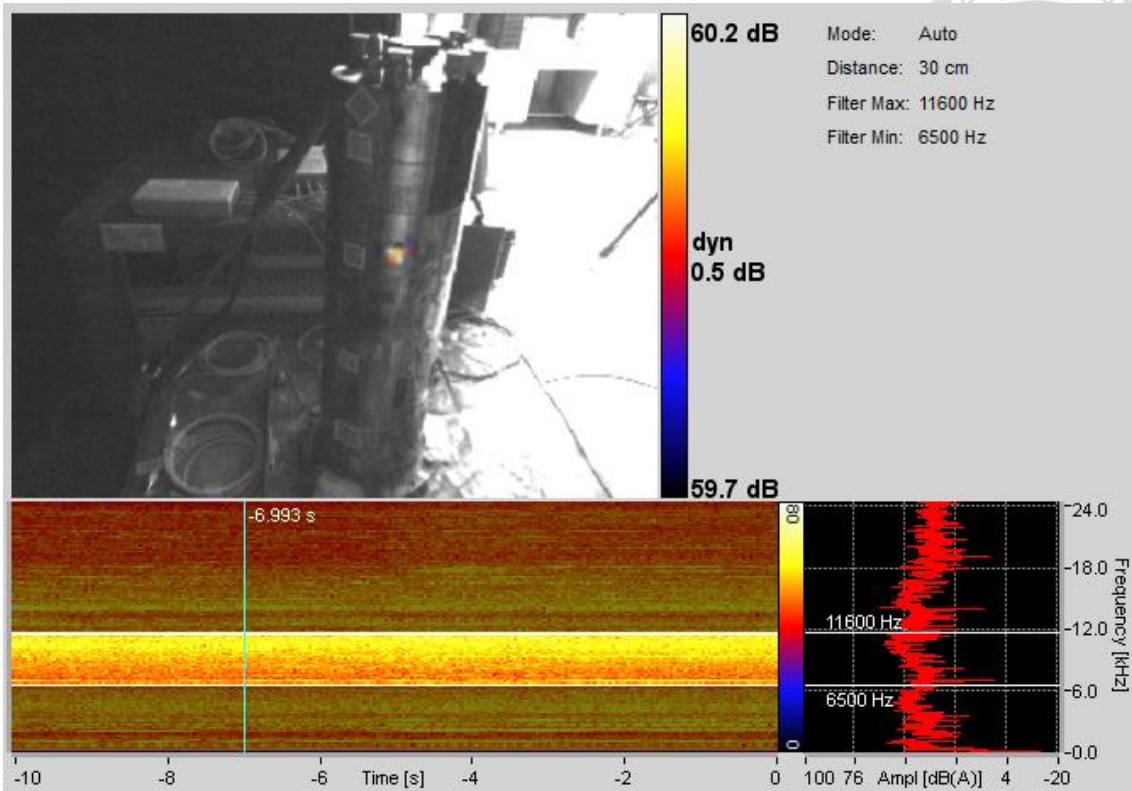


圖 5 - 5 聲學攝影機拍攝結果(上方孔洞之二)

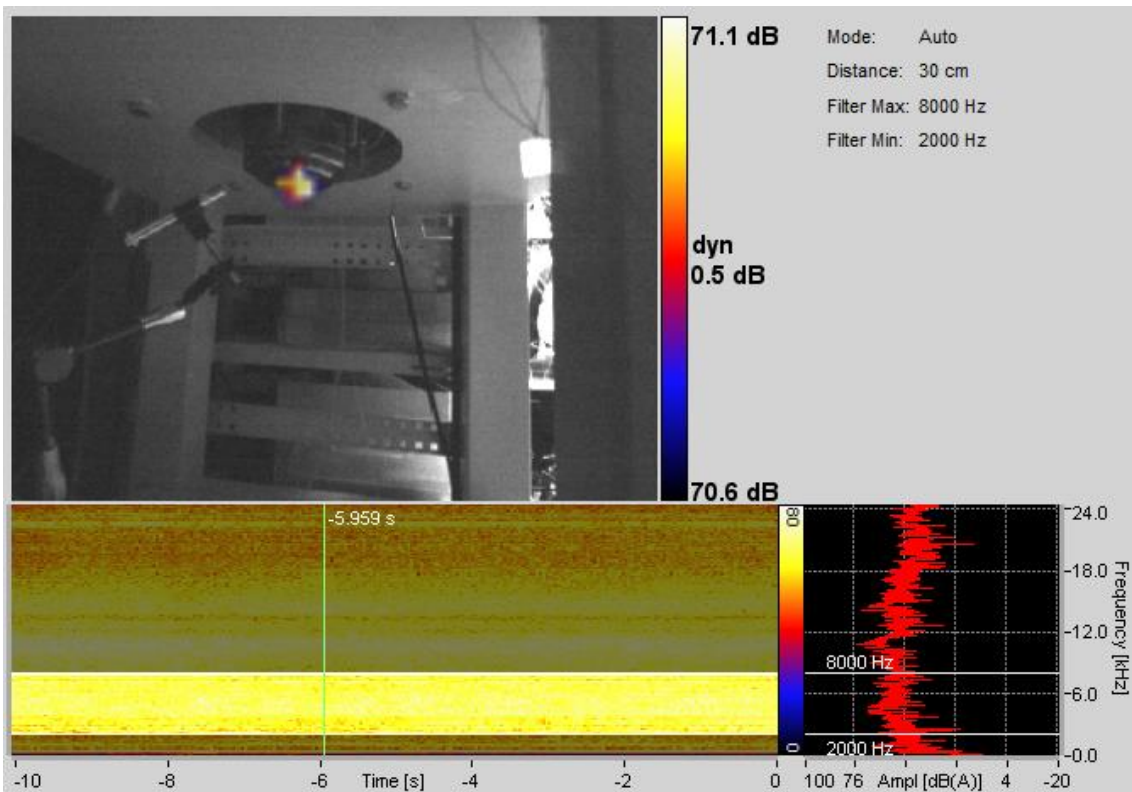


圖 5 - 6 聲學攝影機拍攝結果(下方末端)

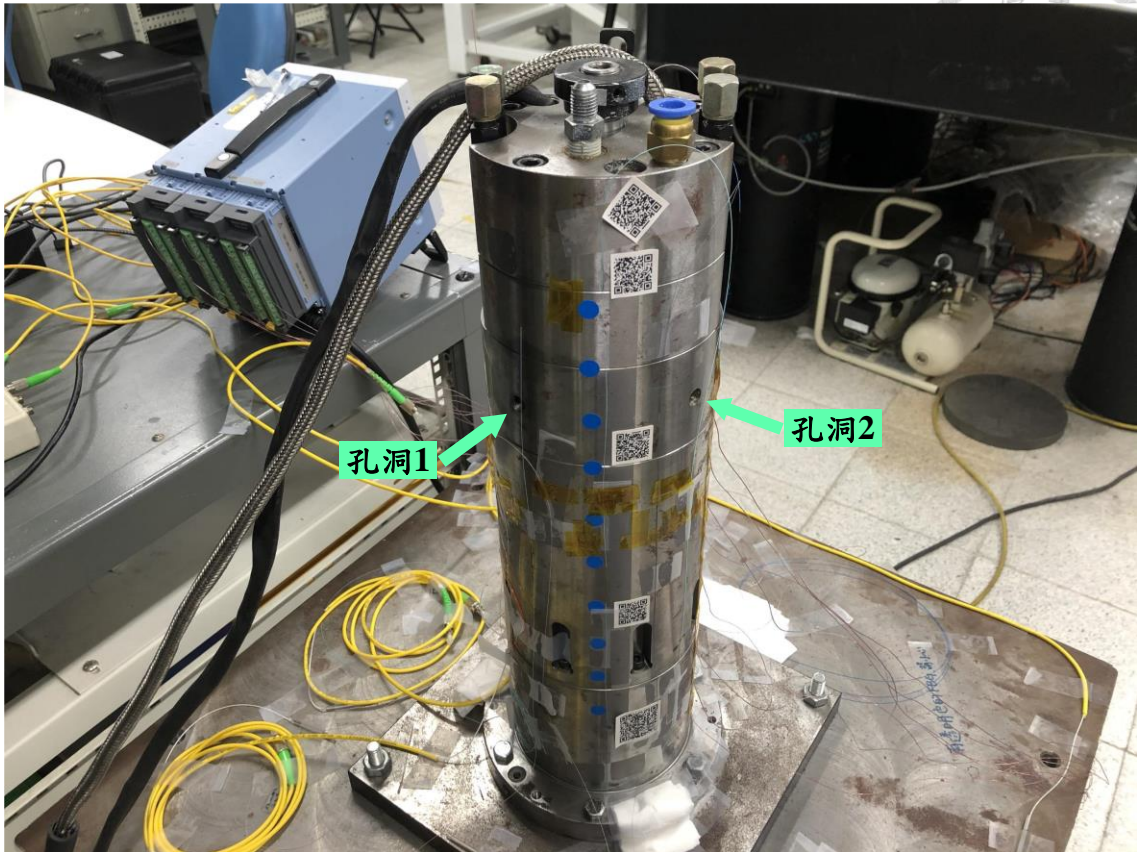


圖 5-7 主軸上部兩孔洞

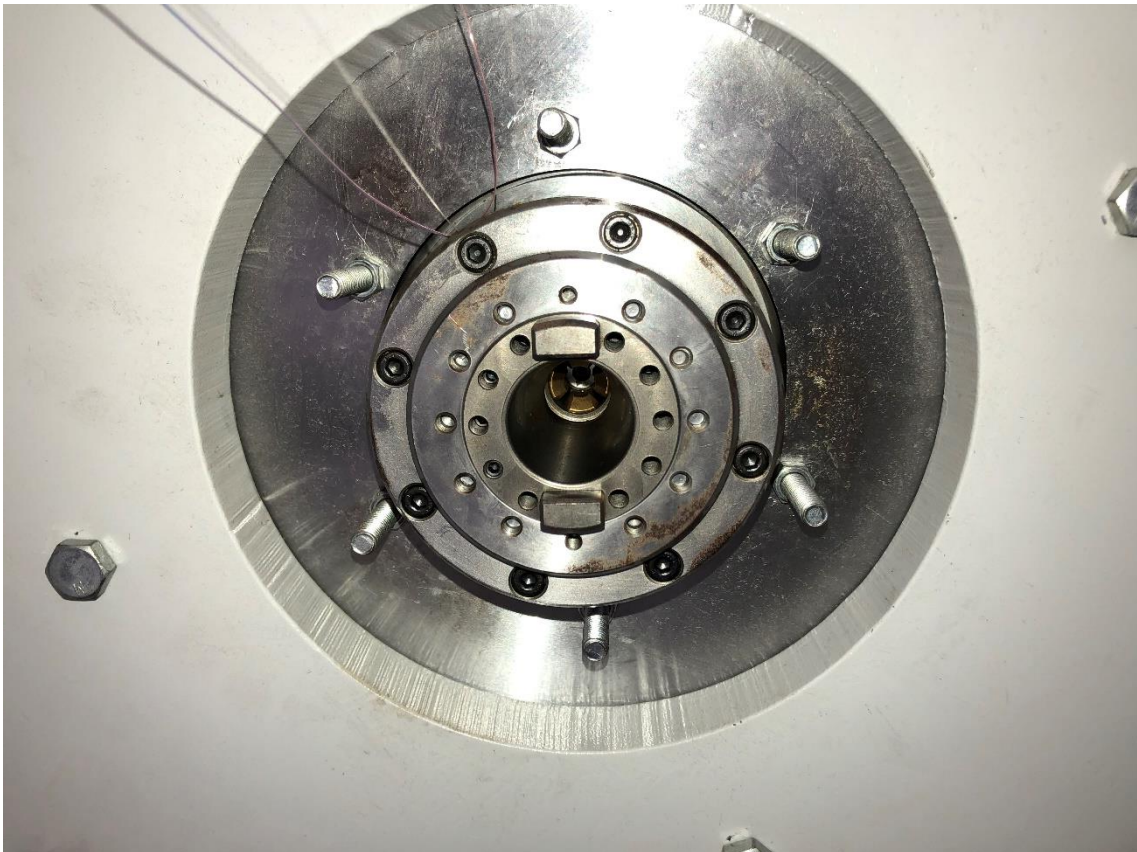


圖 5-8 主軸下方末端處

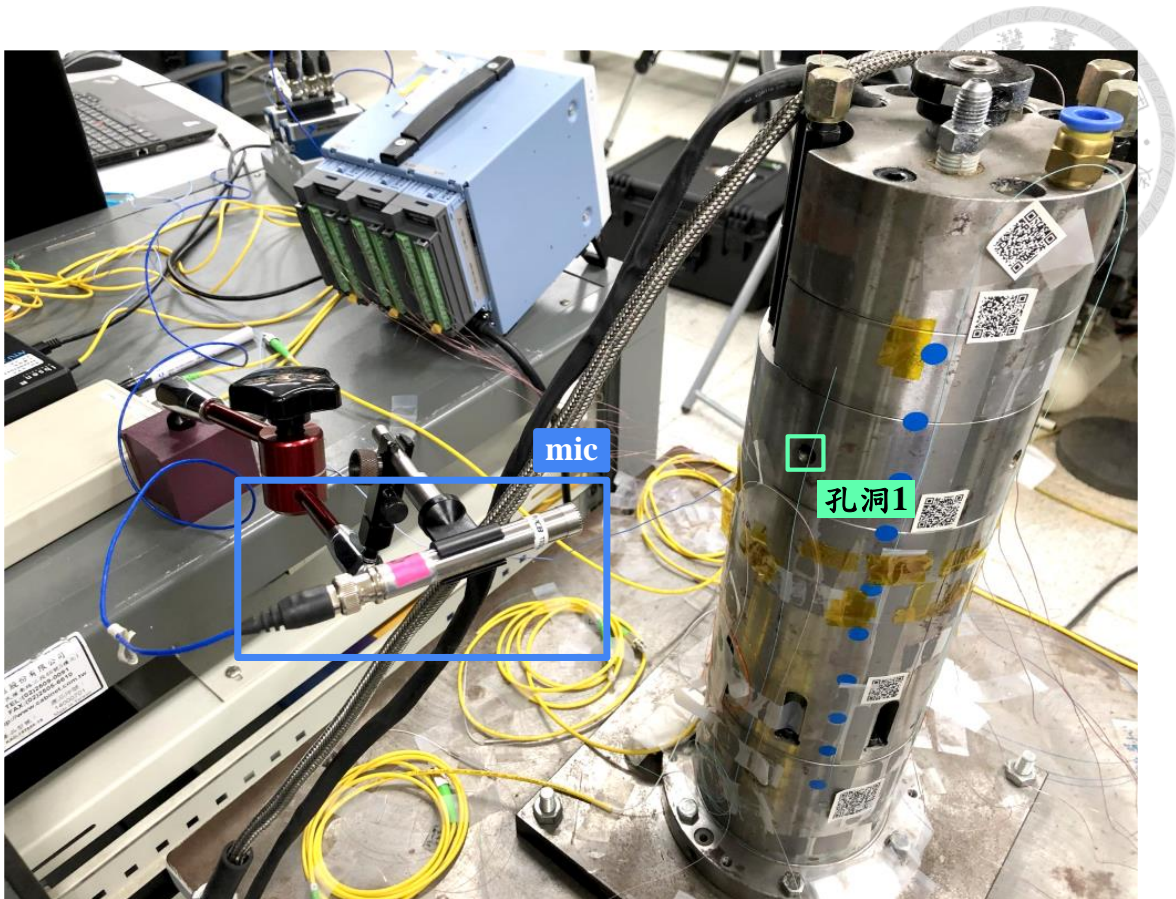


圖 5 - 9 實驗架設 (麥克風)

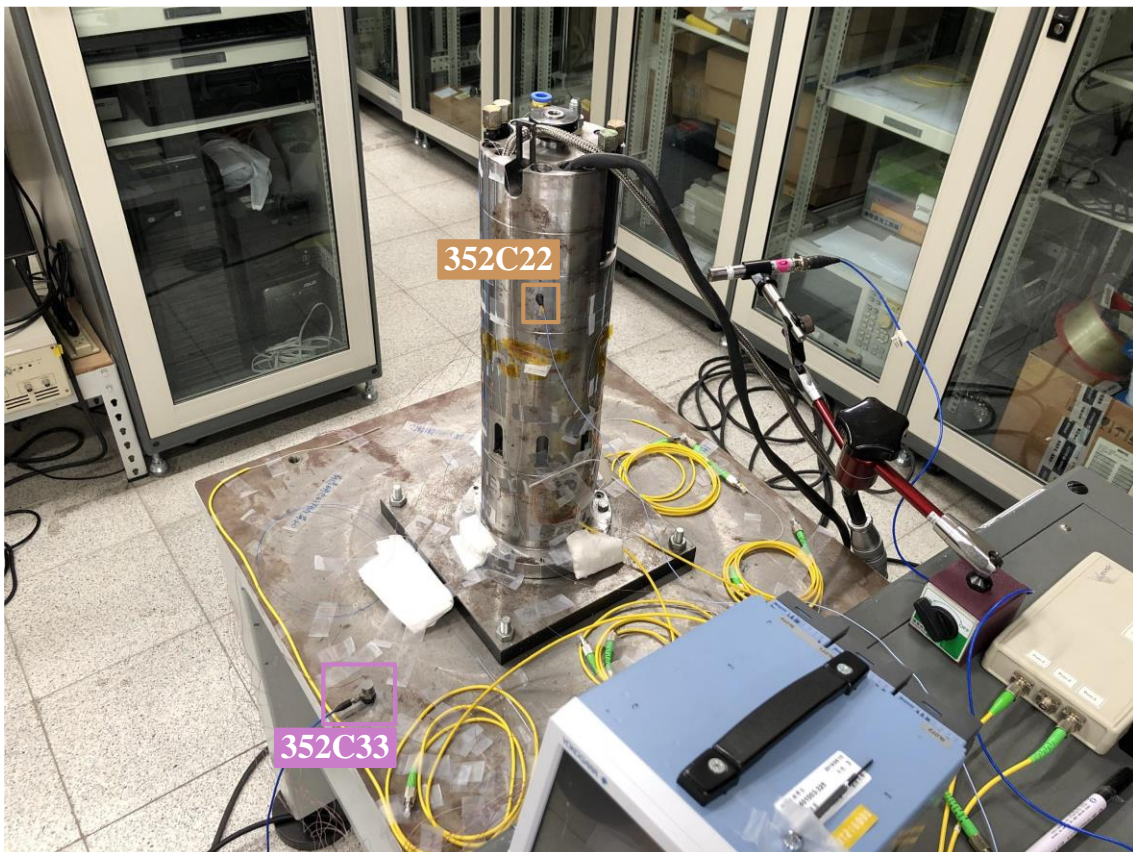


圖 5 - 10 實驗架設 (加速規)

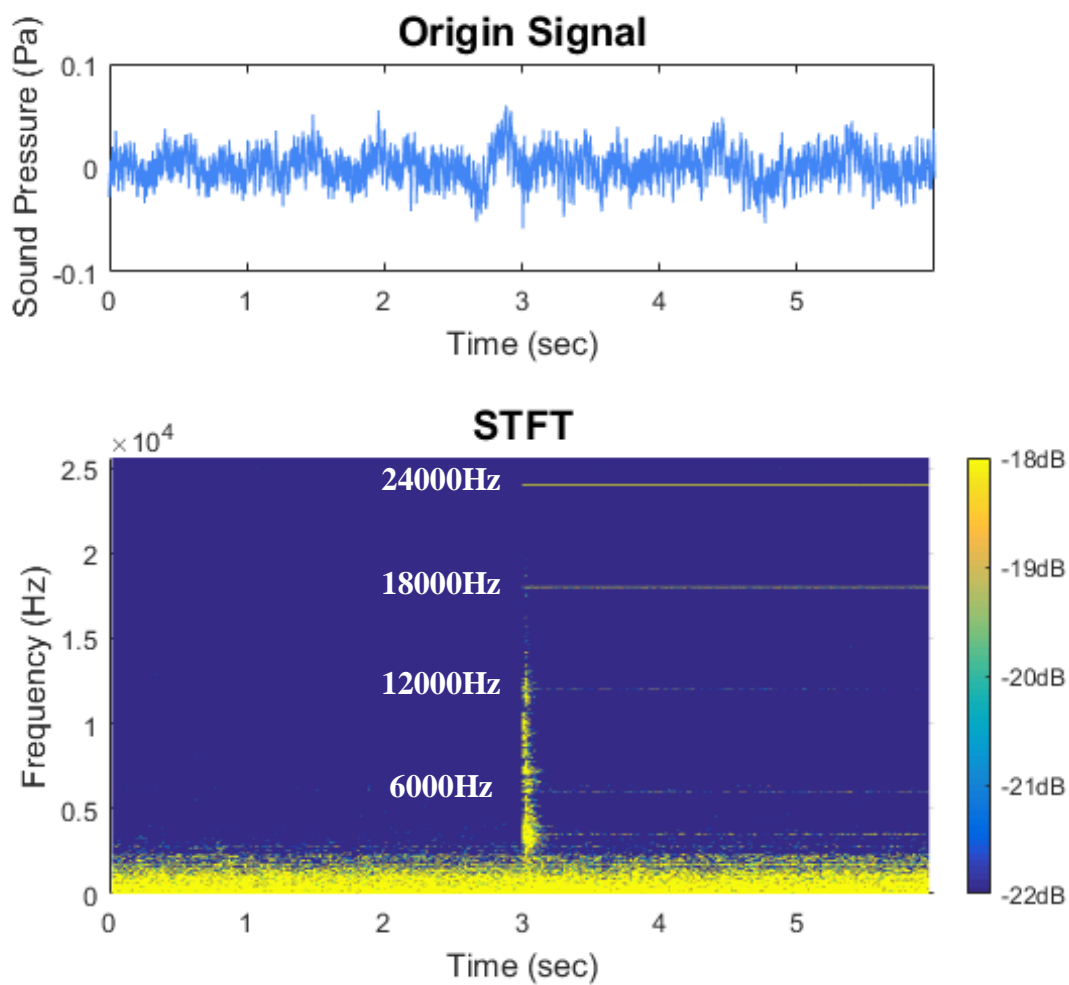
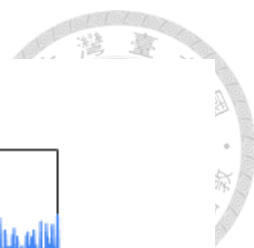


圖 5 - 11 開關打開前後麥克風原始訊號及時頻譜

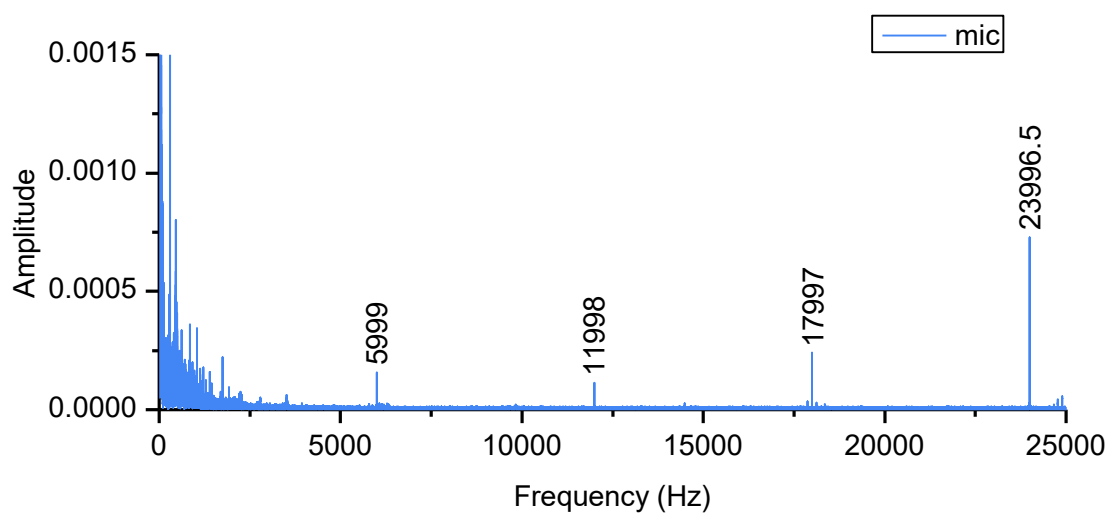


圖 5 - 12 開關打開後麥克風訊號之頻譜

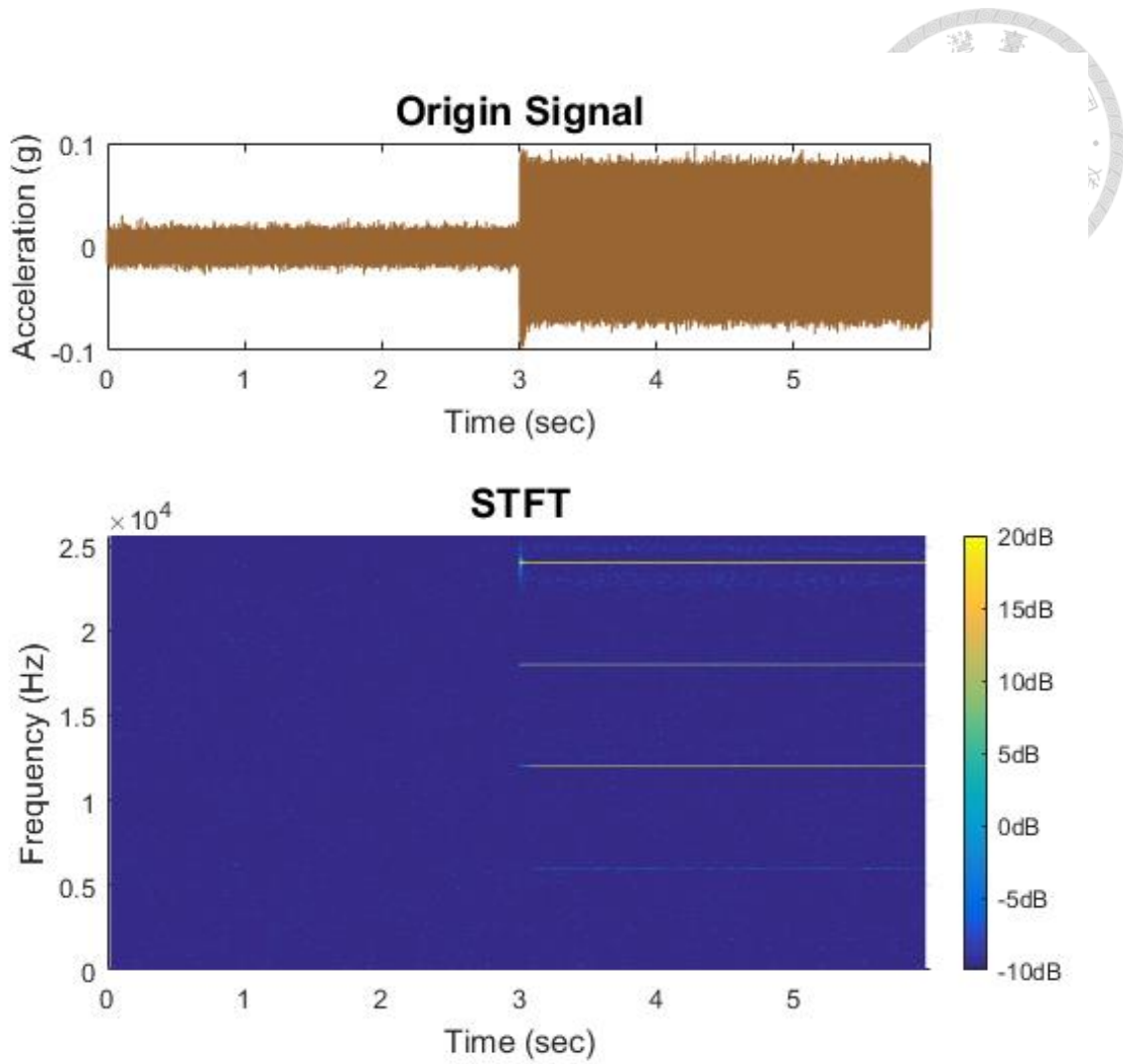


圖 5 - 13 開關打開前後加速規 352C22 原始訊號及時頻譜

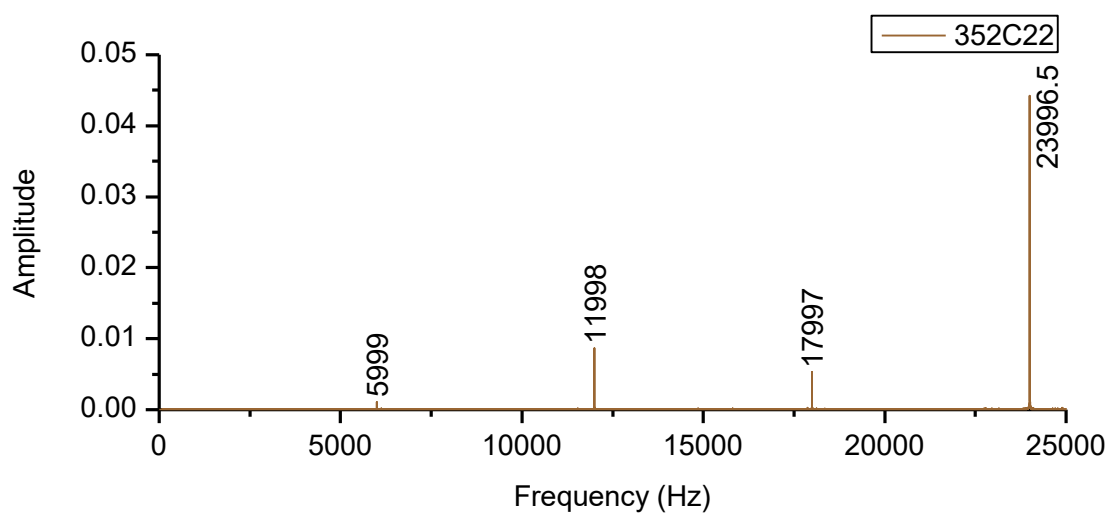


圖 5 - 14 開關打開後加速規 352C22 訊號之頻譜

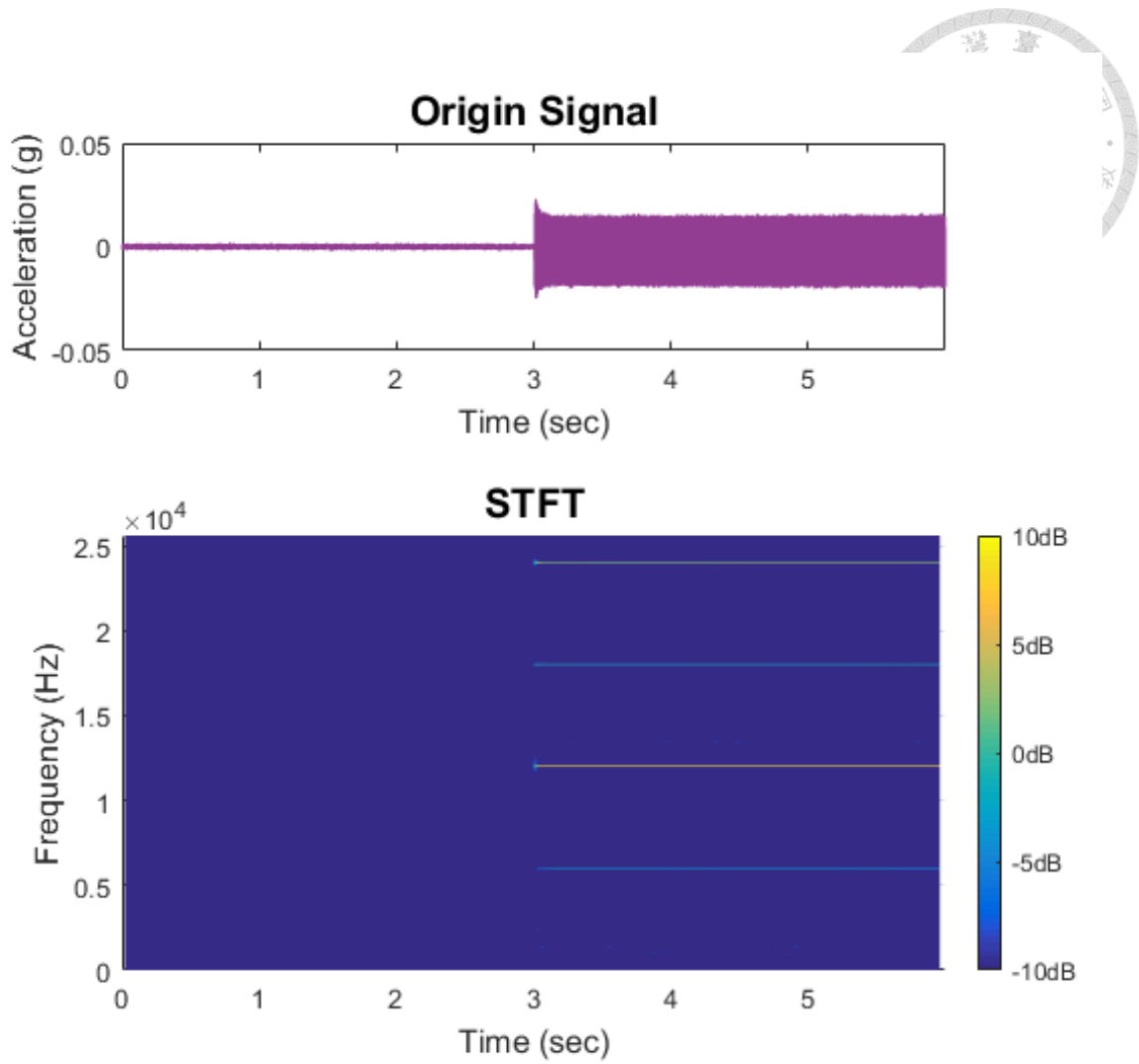


圖 5 - 15 開關打開前後加速規 352C33 原始訊號及時頻譜

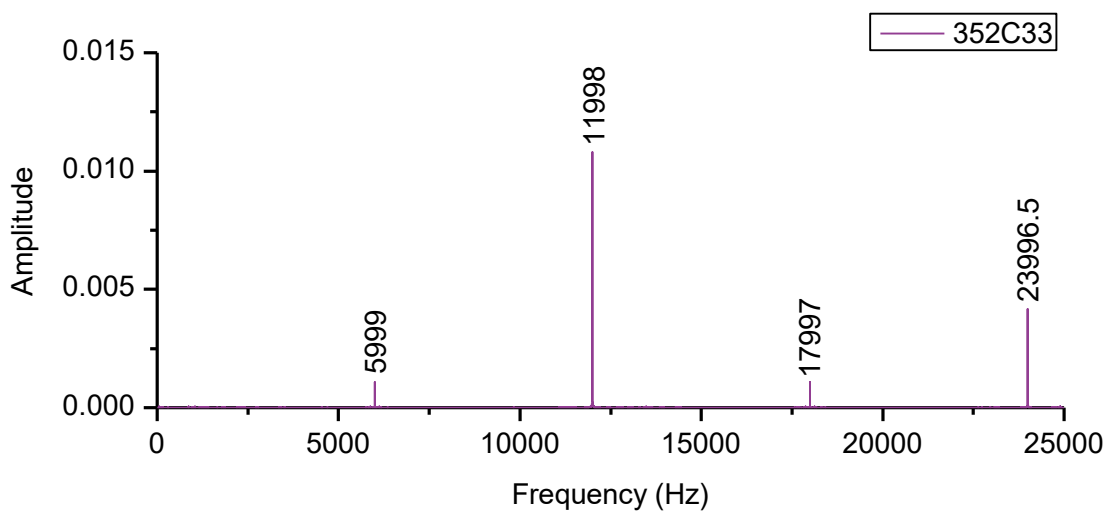


圖 5 - 16 開關打開後加速規 352C33 訊號之頻譜

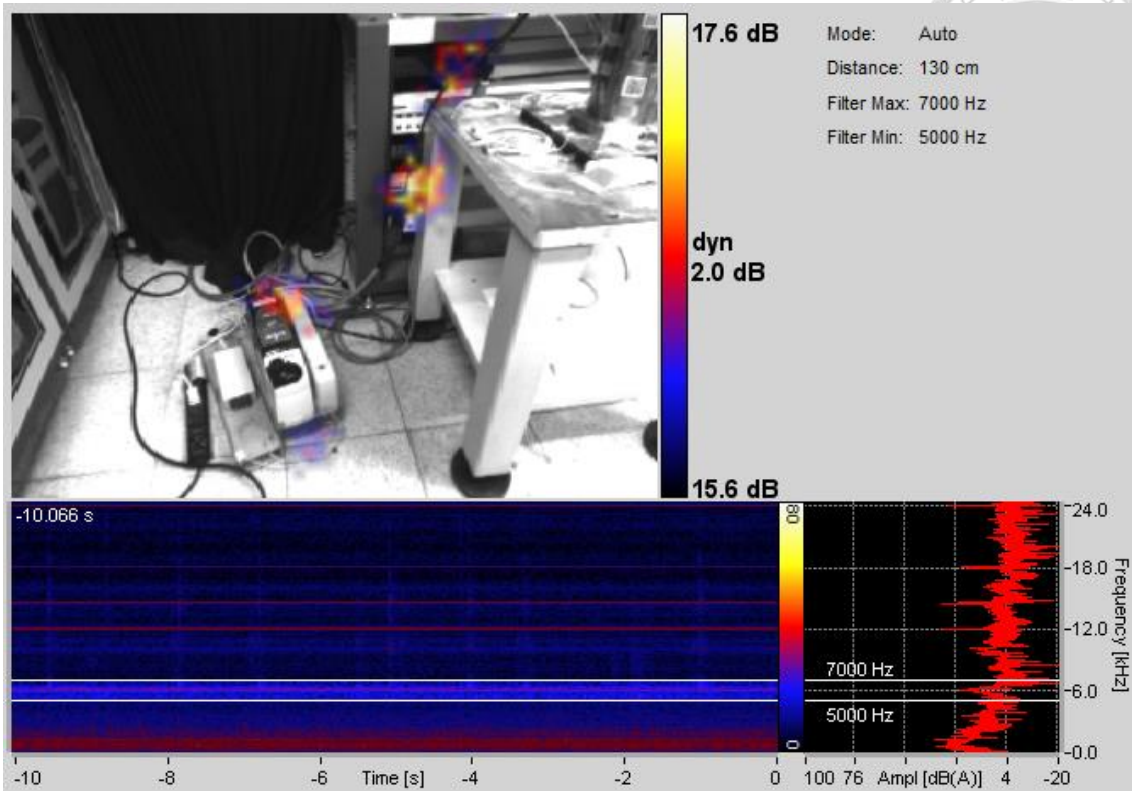


圖 5 - 17 6kHz 訊號聲源拍攝結果

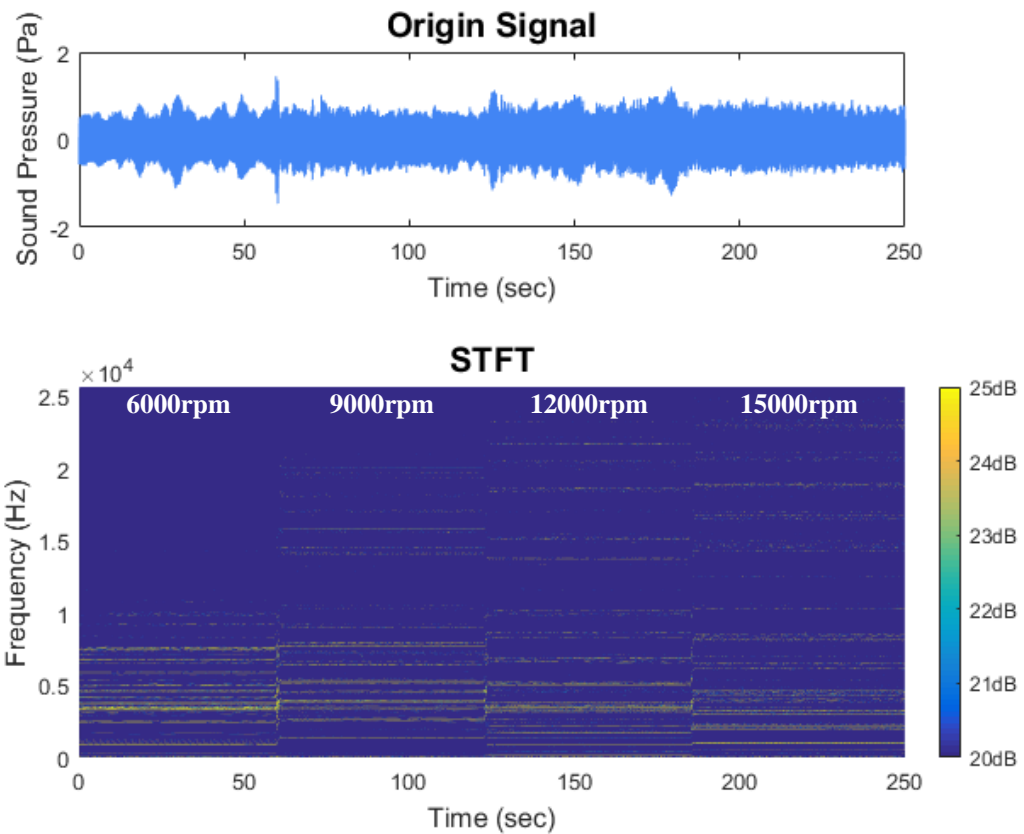


圖 5 - 18 變轉速實驗之麥克風原始訊號及時頻譜

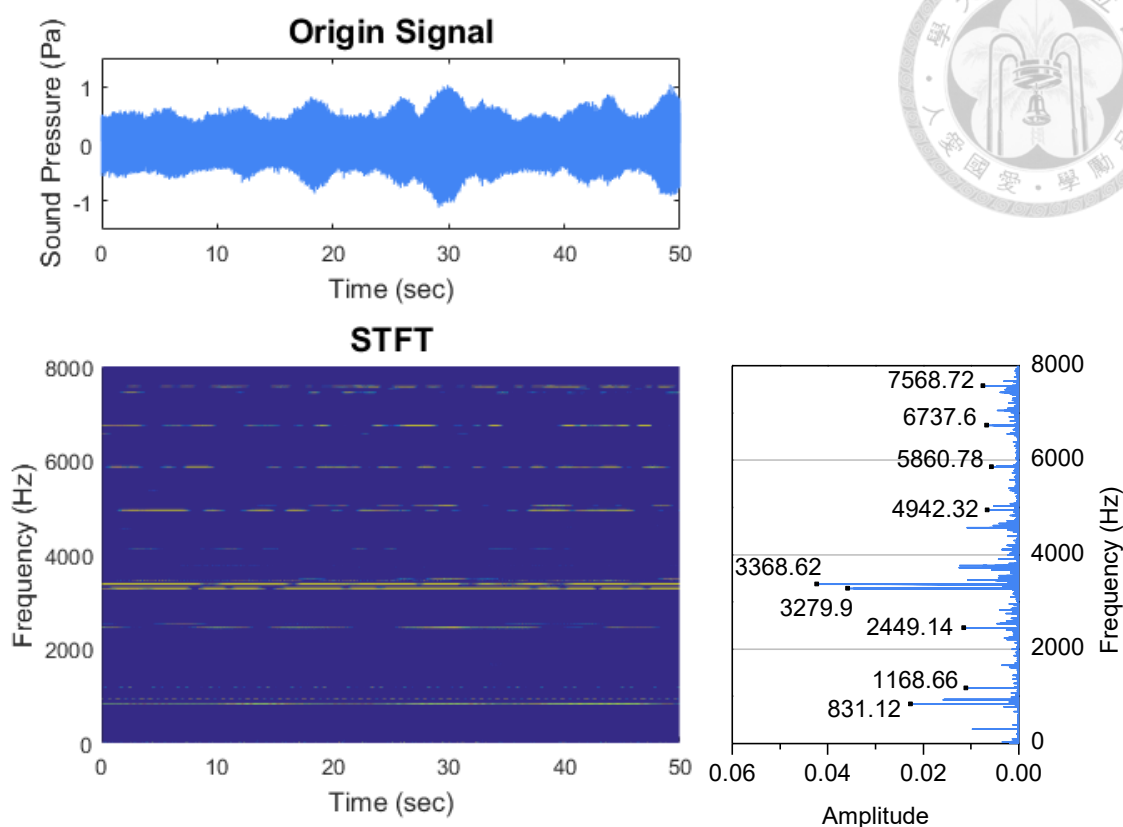


圖 5 - 19 主軸轉速 6000rpm 之麥克風訊號分析結果

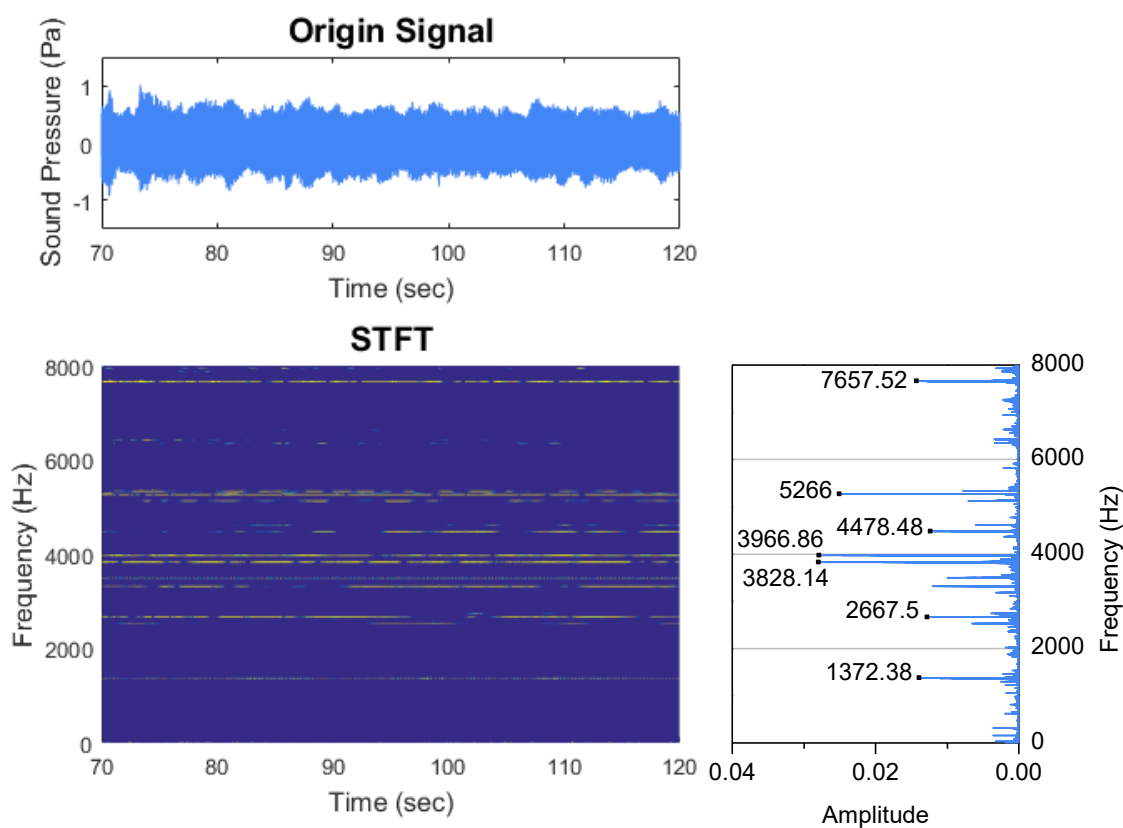


圖 5 - 20 主軸轉速 9000rpm 之麥克風訊號分析結果

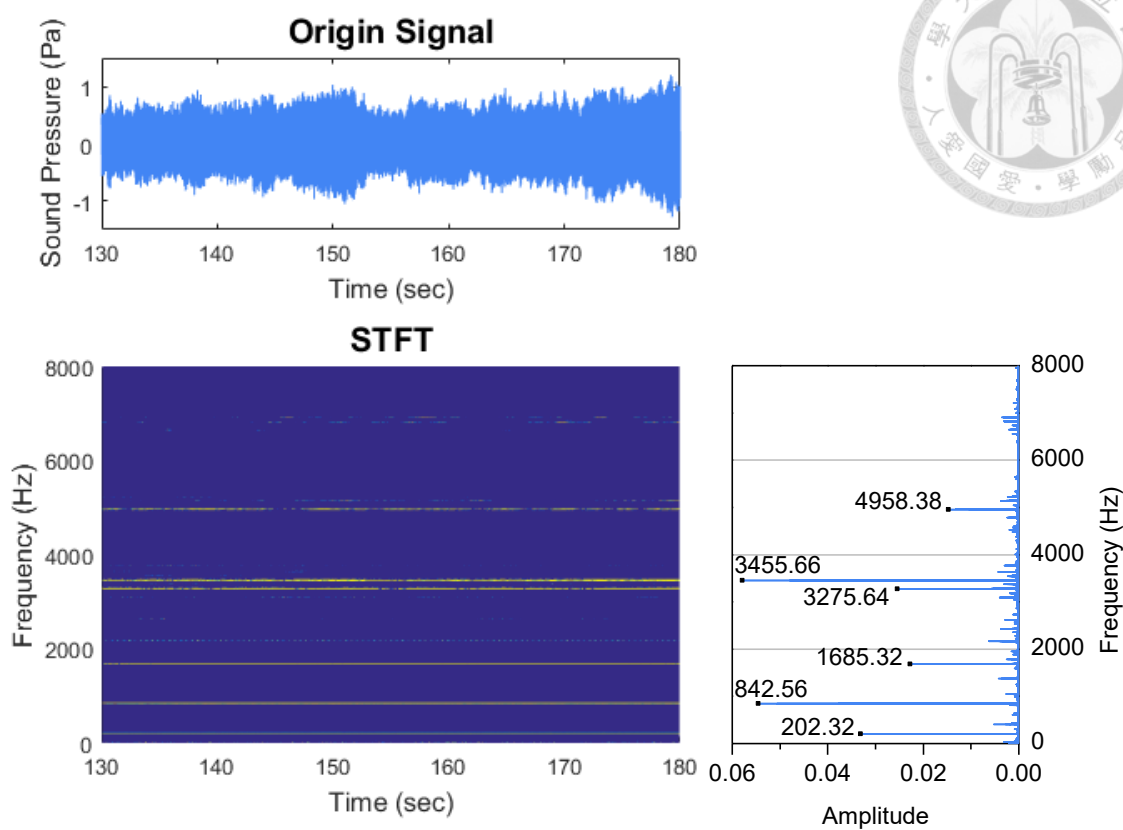


圖 5 - 21 主軸轉速 12000rpm 之麥克風訊號分析結果

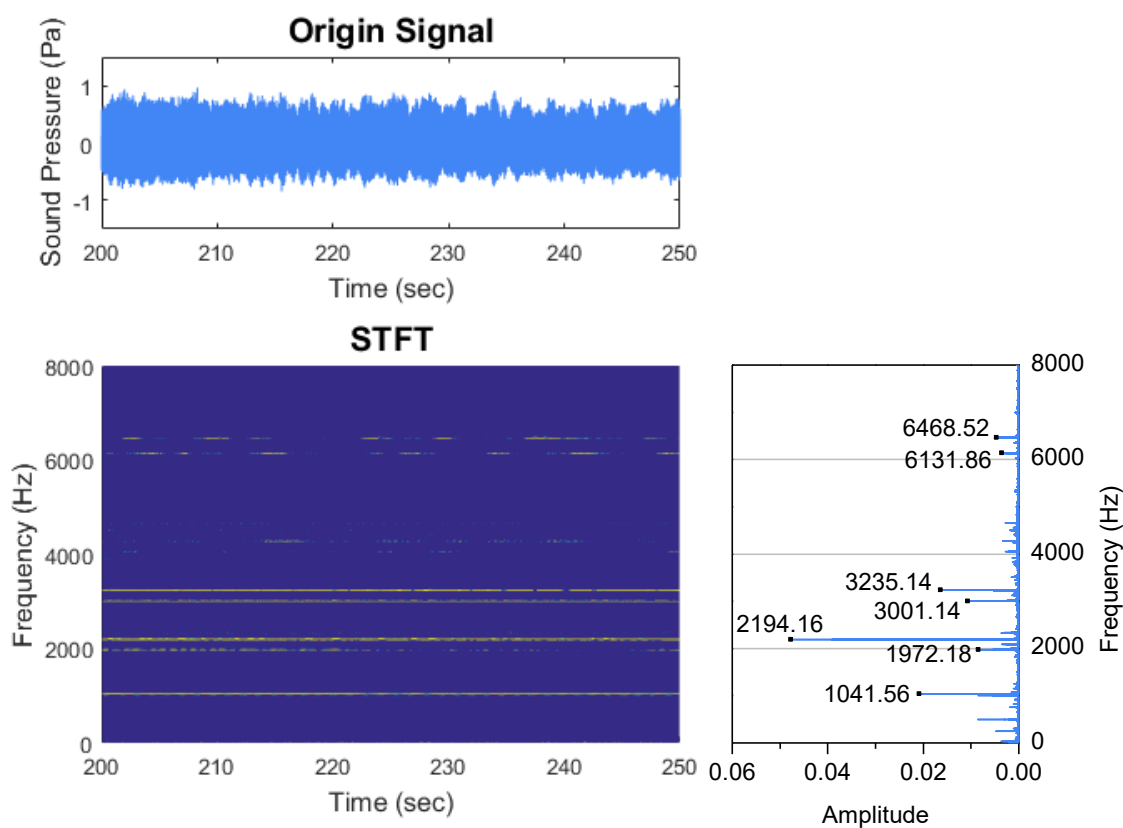


圖 5 - 22 主軸轉速 15000rpm 之麥克風訊號分析結果

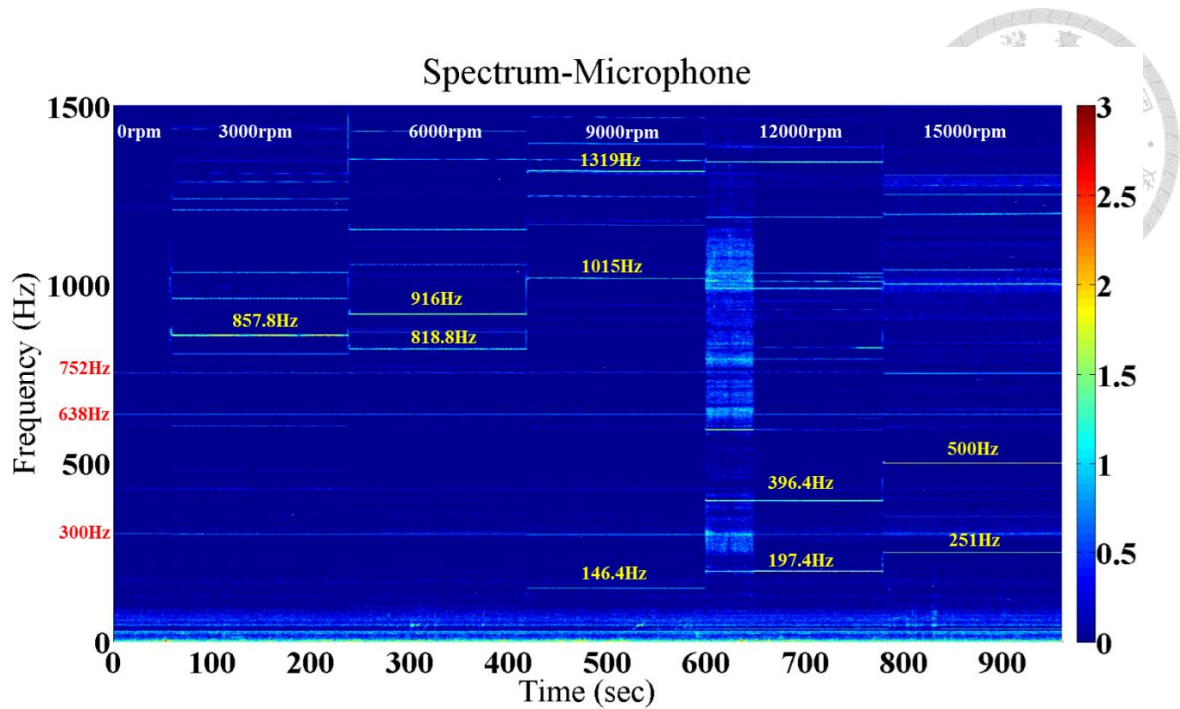


圖 5 - 23 麥克風變轉速實驗頻譜圖(振幅經對數處理)[41]

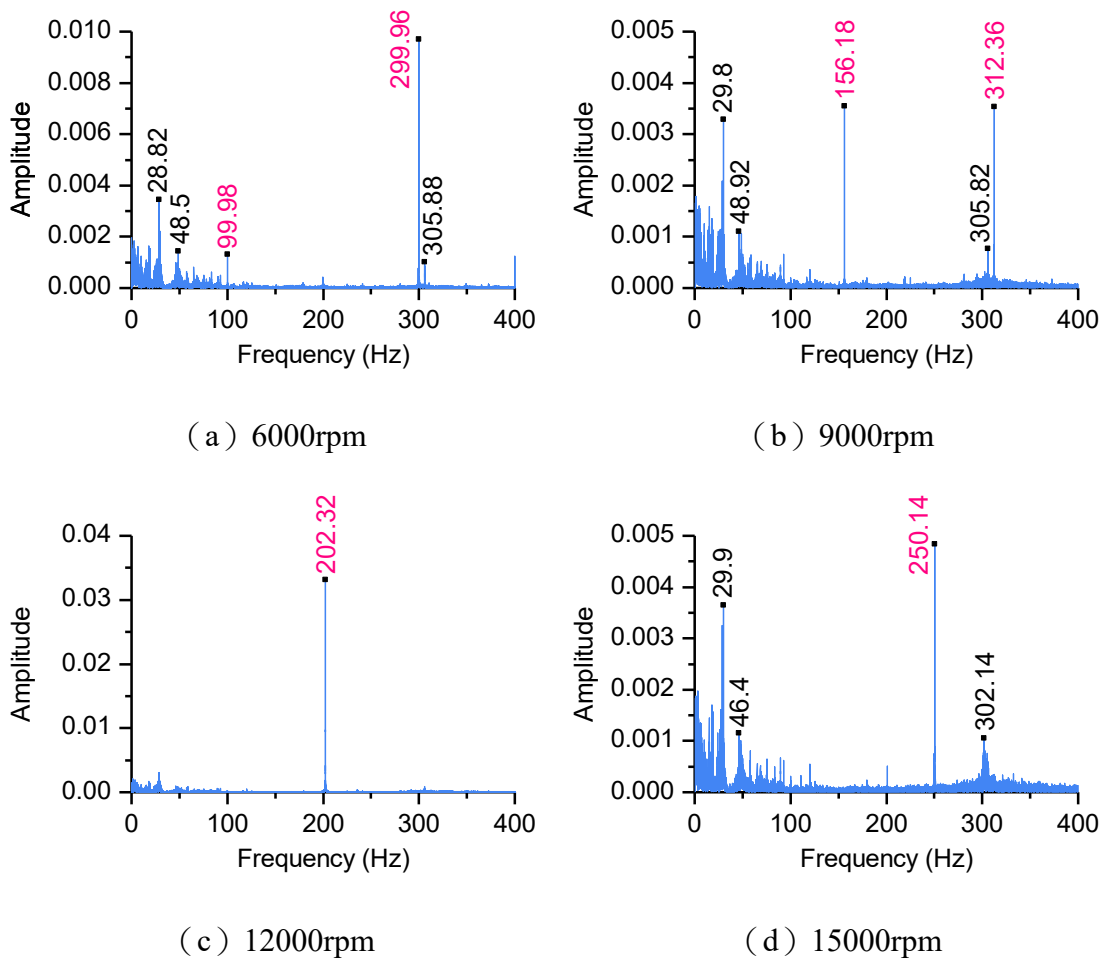


圖 5 - 24 主軸各轉速麥克風訊號之頻譜 (0-400Hz)

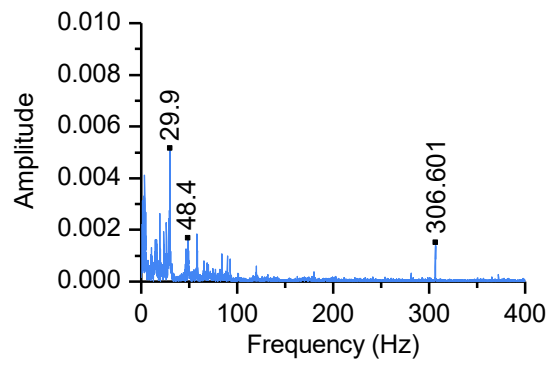


圖 5 - 25 環境背景噪音之頻譜 (0-400Hz)

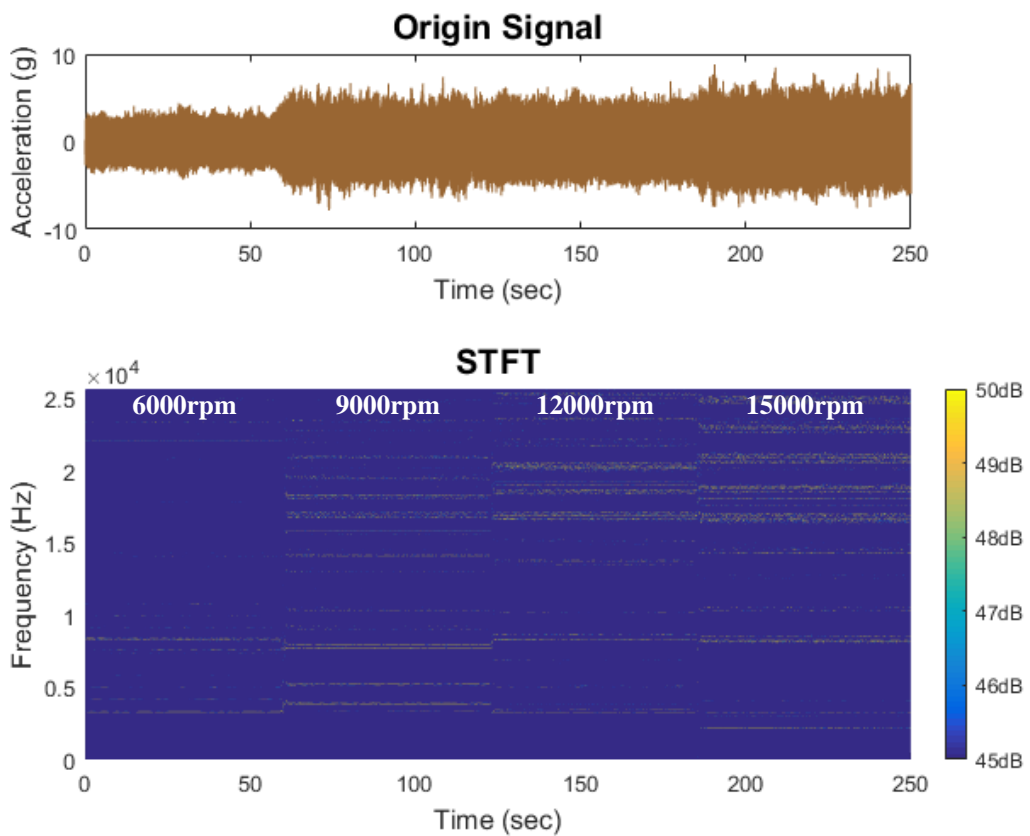


圖 5 - 26 變轉速實驗之加速規 352C22 原始訊號及時頻譜

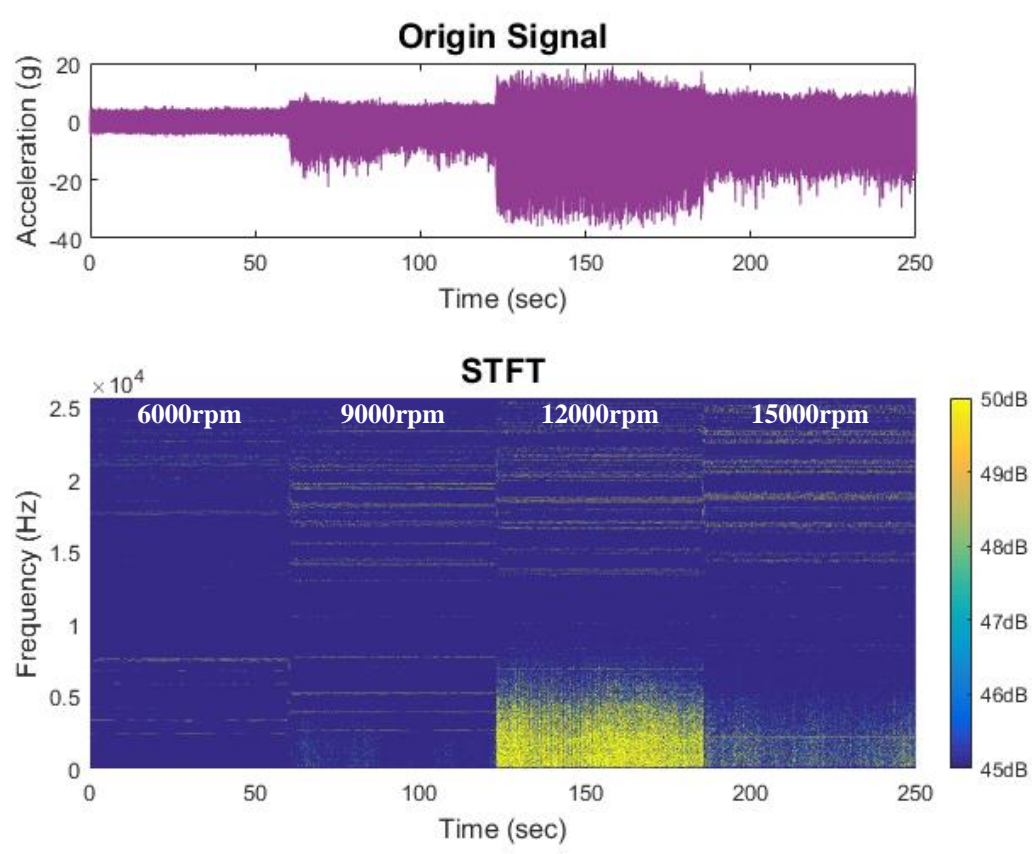
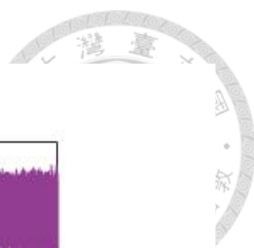


圖 5 - 27 變轉速實驗之加速規 352C33 原始訊號及時頻譜

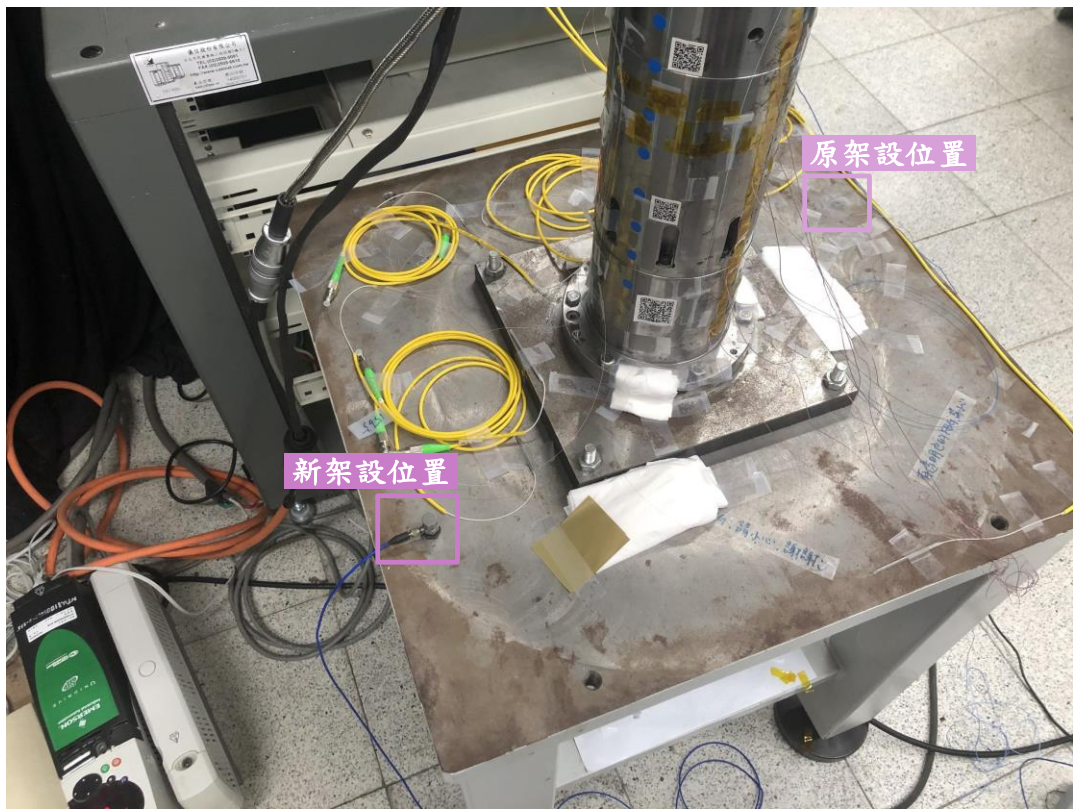


圖 5 - 28 加速規 352C33 之新舊架設位置

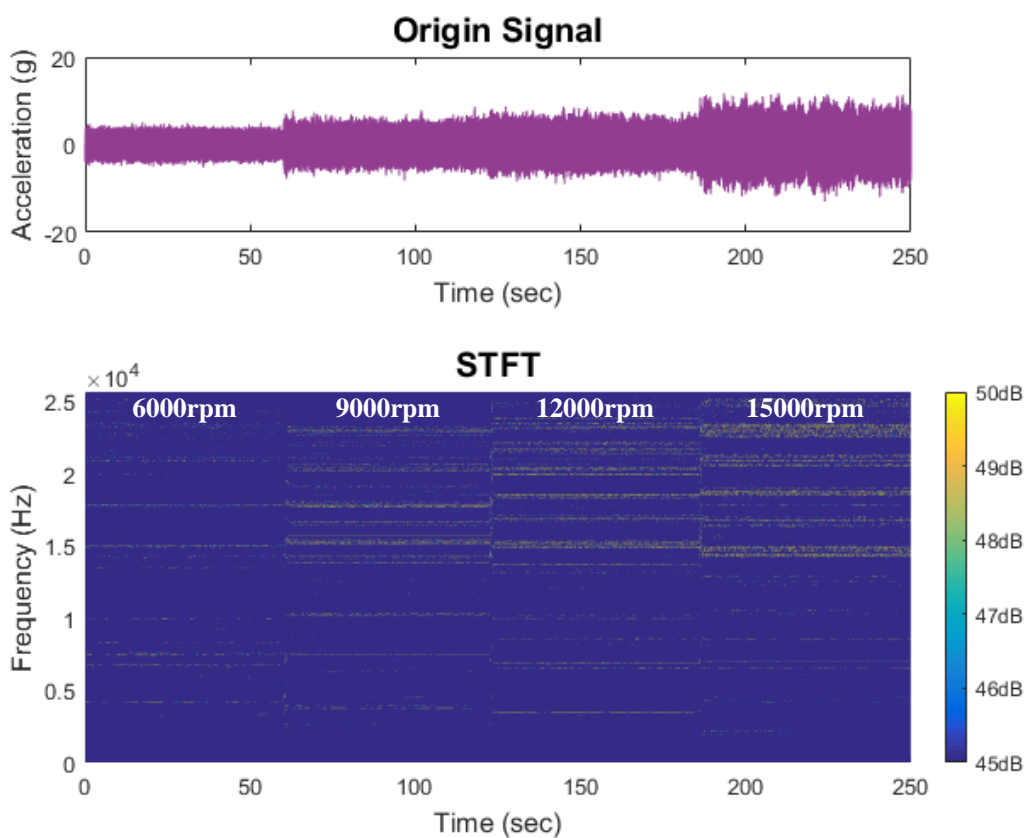
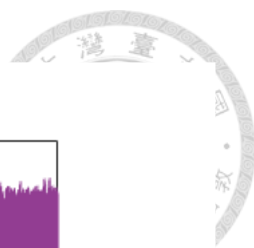


圖 5 - 29 新架設變轉速實驗之加速規 352C33 原始訊號及時頻譜

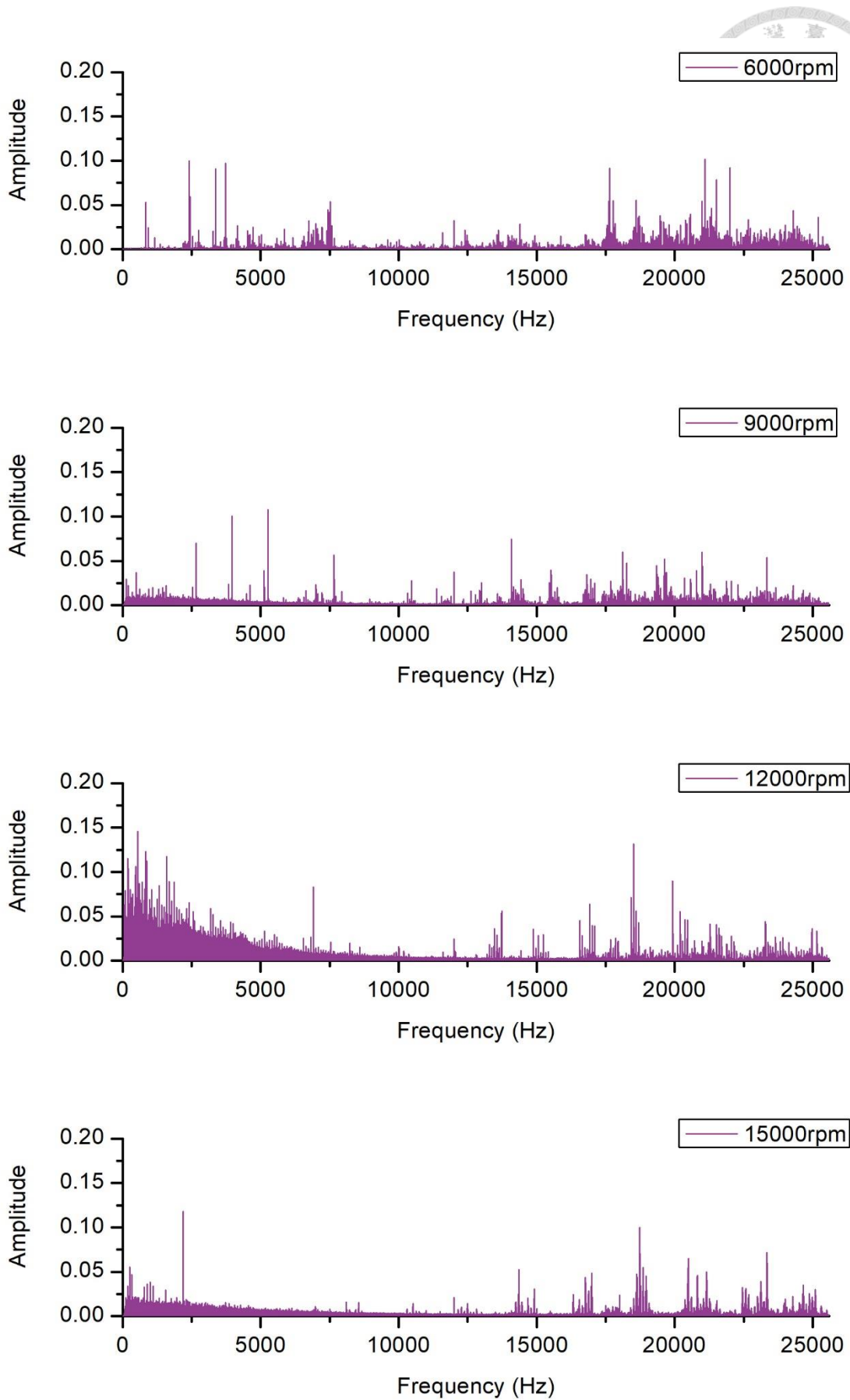


圖 5 - 30 主軸各轉速之加速規 352C33 訊號分析結果

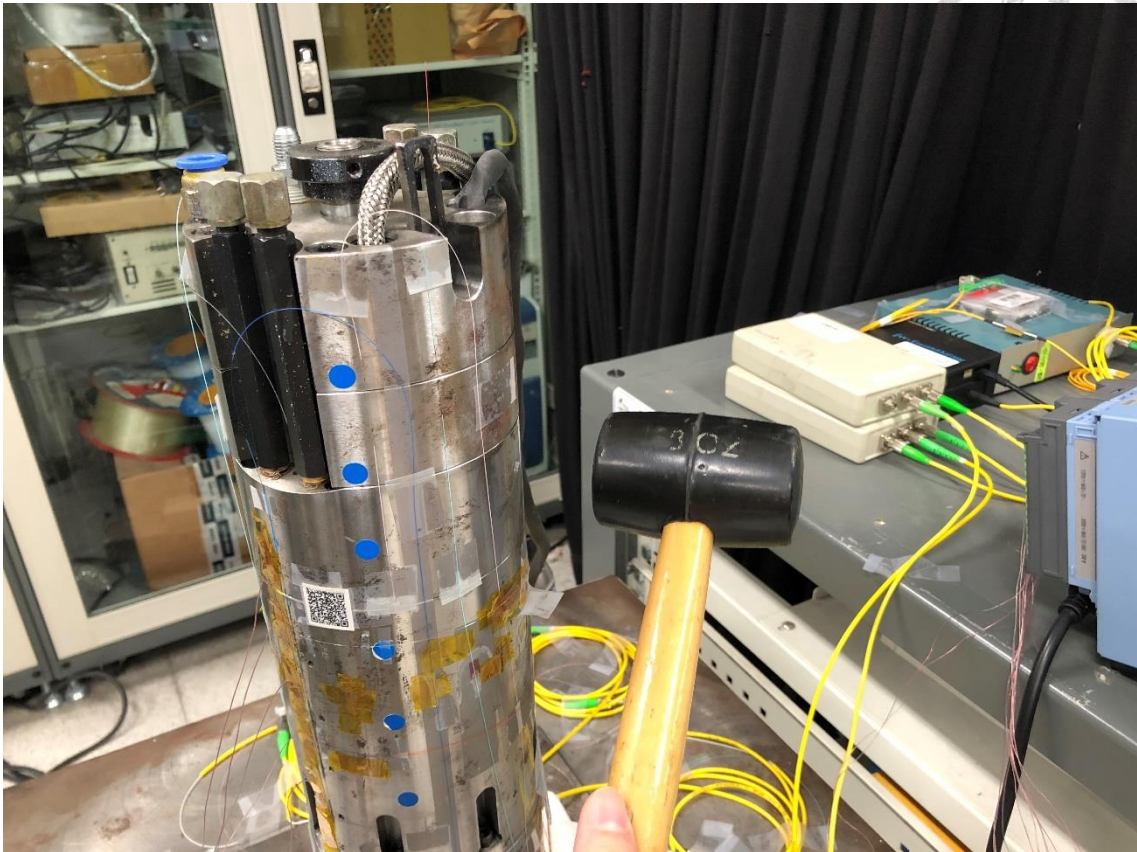
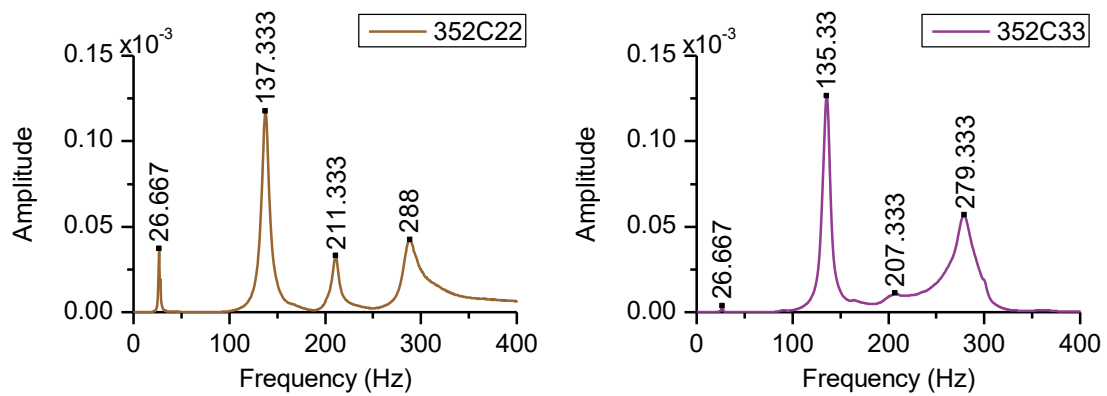


圖 5 - 31 敲擊實驗之敲擊位置



(a) 加速規 352C22 (軸上)

(b) 加速規 352C33 (桌上)

圖 5 - 32 主軸共振頻率敲擊實驗結果

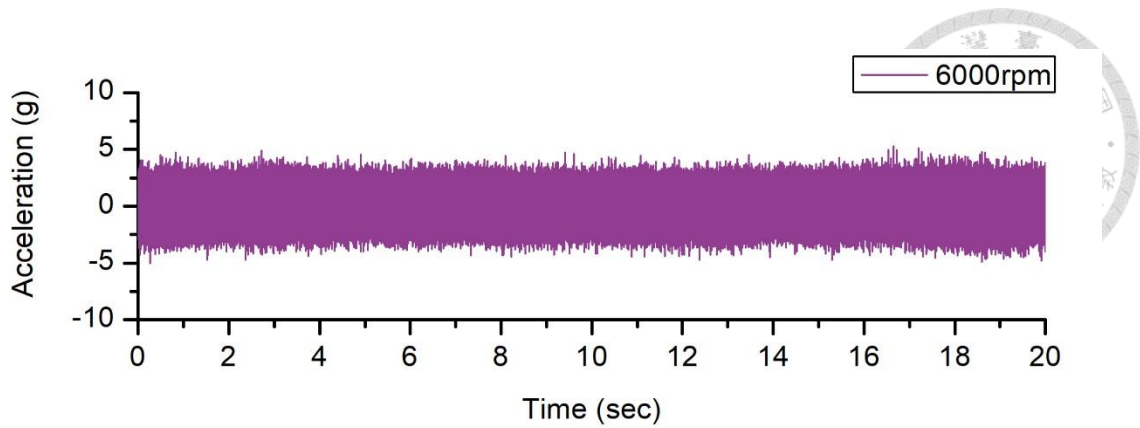


圖 5 - 33 變轉速實驗之加速規 352C33 第 0 ~ 20 秒訊號 (6000rpm) 原始波形

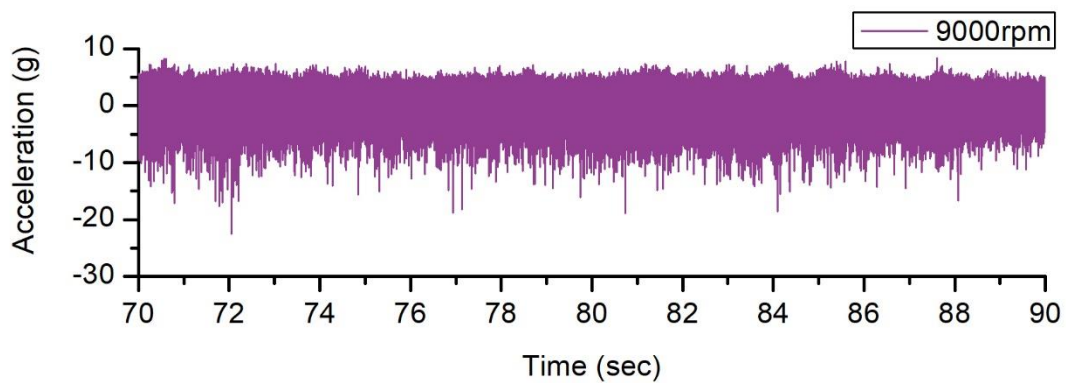


圖 5 - 34 變轉速實驗之加速規 352C33 第 70 ~ 90 秒訊號 (9000rpm) 原始波形

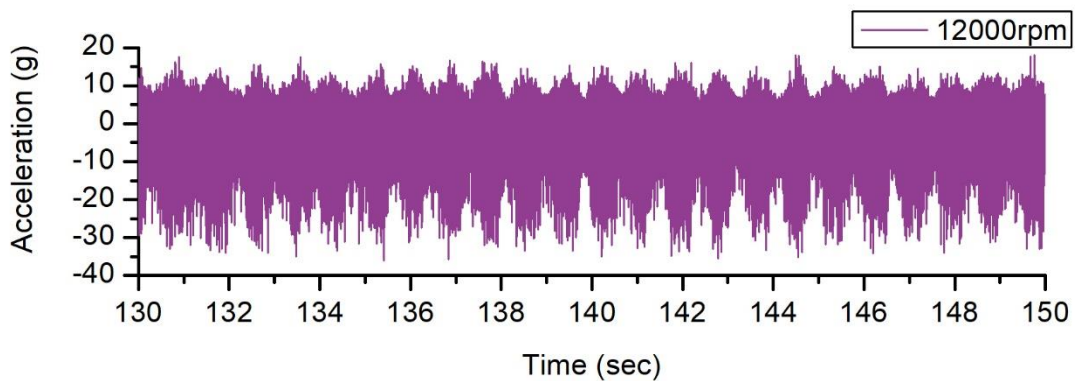


圖 5 - 35 變轉速實驗之加速規 352C33 第 130 ~ 150 秒訊號 (12000rpm) 原始波形

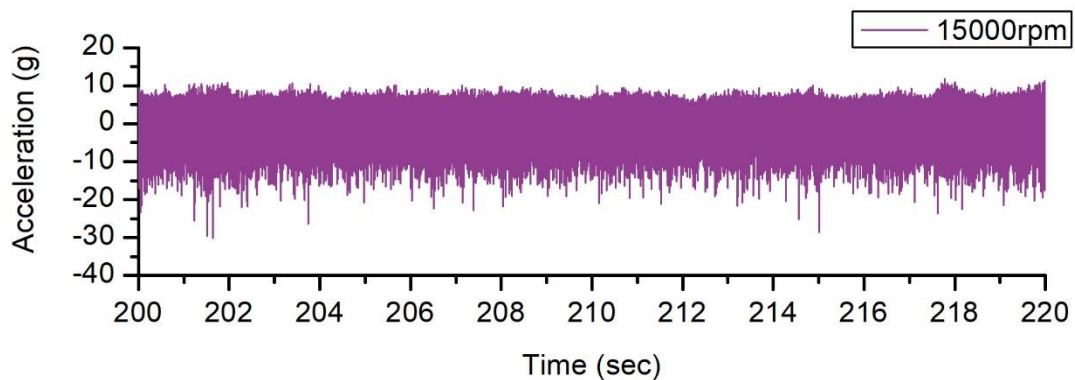
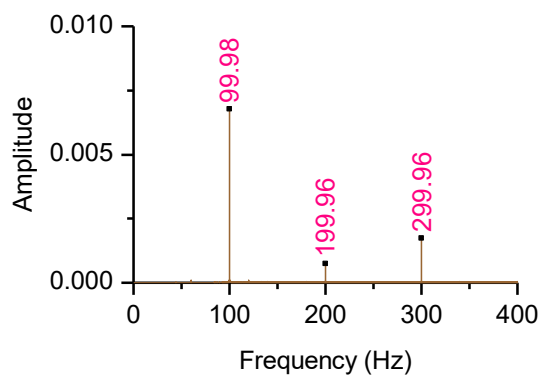
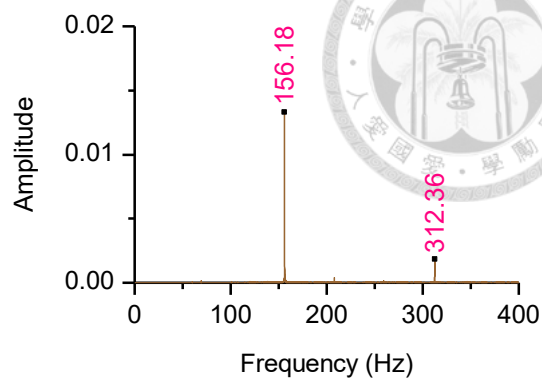


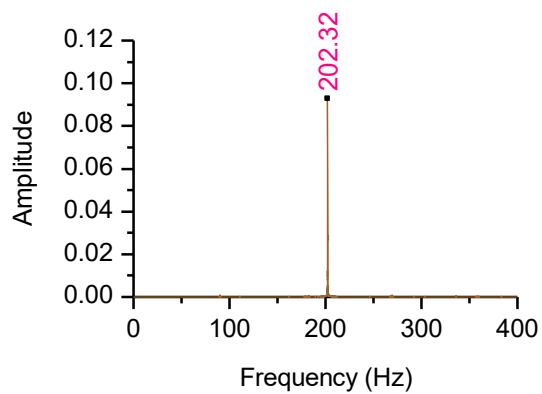
圖 5 - 36 變轉速實驗之加速規 352C33 第 200 ~ 220 秒訊號 (15000rpm) 原始波形



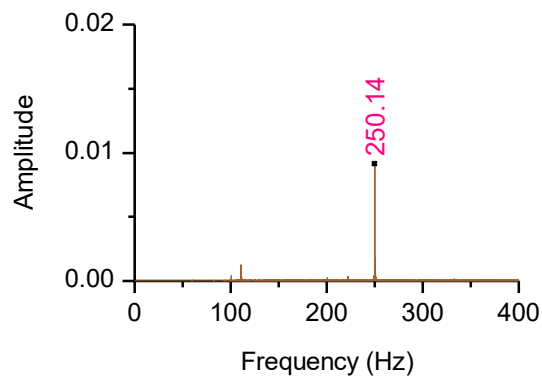
(a) 6000rpm



(b) 9000rpm

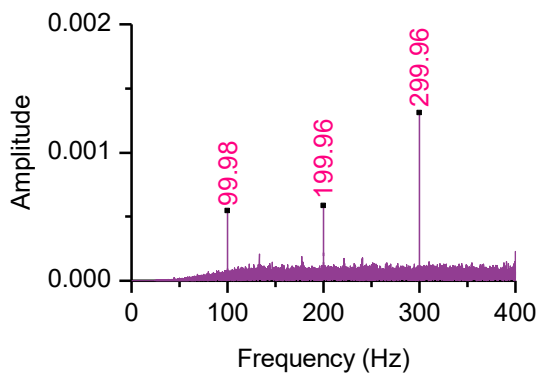


(c) 12000rpm

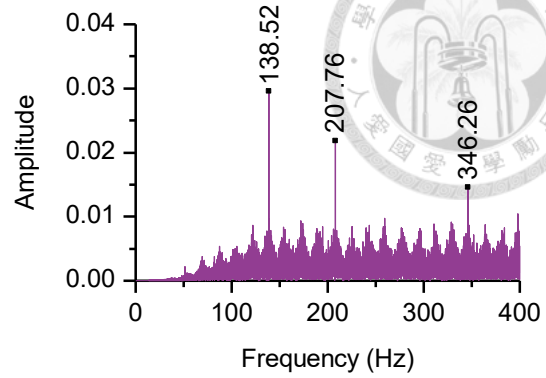


(d) 15000rpm

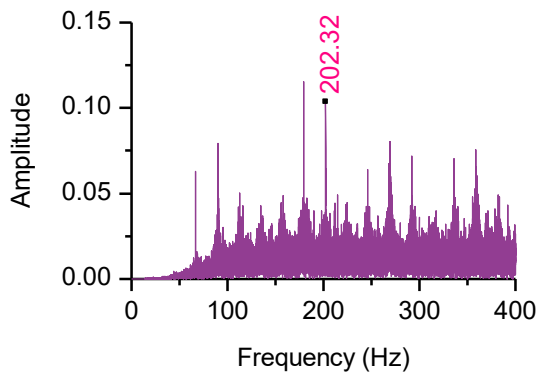
圖 5 - 37 主軸各轉速加速規 352C22 訊號之頻譜 (0-400Hz)



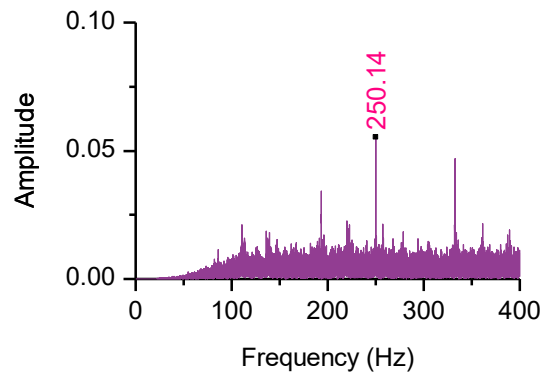
(a) 6000rpm



(b) 9000rpm

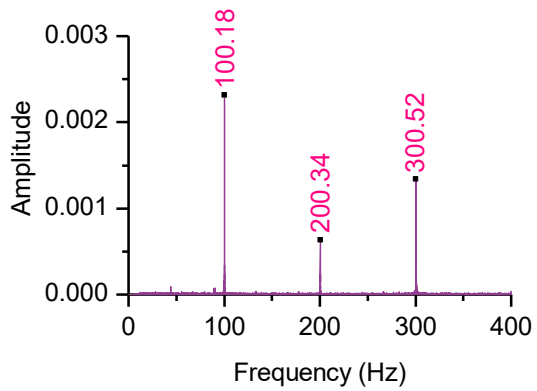


(c) 12000rpm

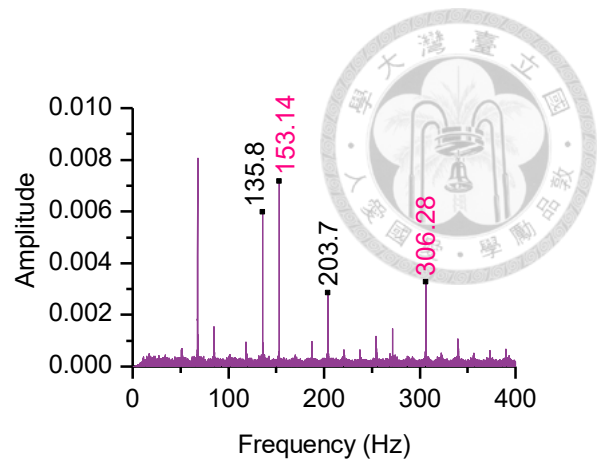


(d) 15000rpm

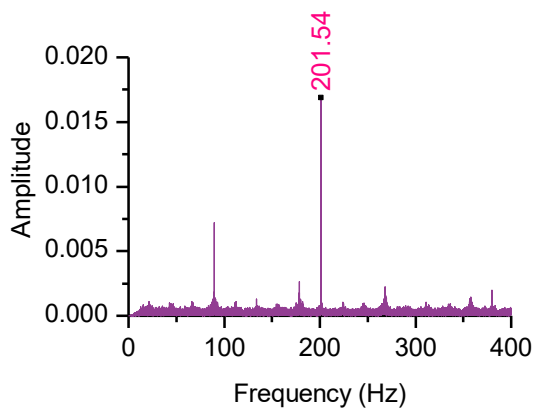
圖 5 - 38 主軸各轉速加速規 352C33 訊號之頻譜 (0-400Hz)



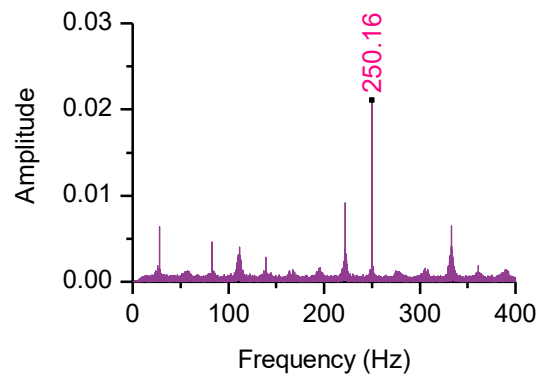
(a) 6000rpm



(b) 9000rpm



(c) 12000rpm



(d) 15000rpm

圖 5 - 39 新架設位置主軸各轉速加速規 352C33 訊號之頻譜 (0-400Hz)

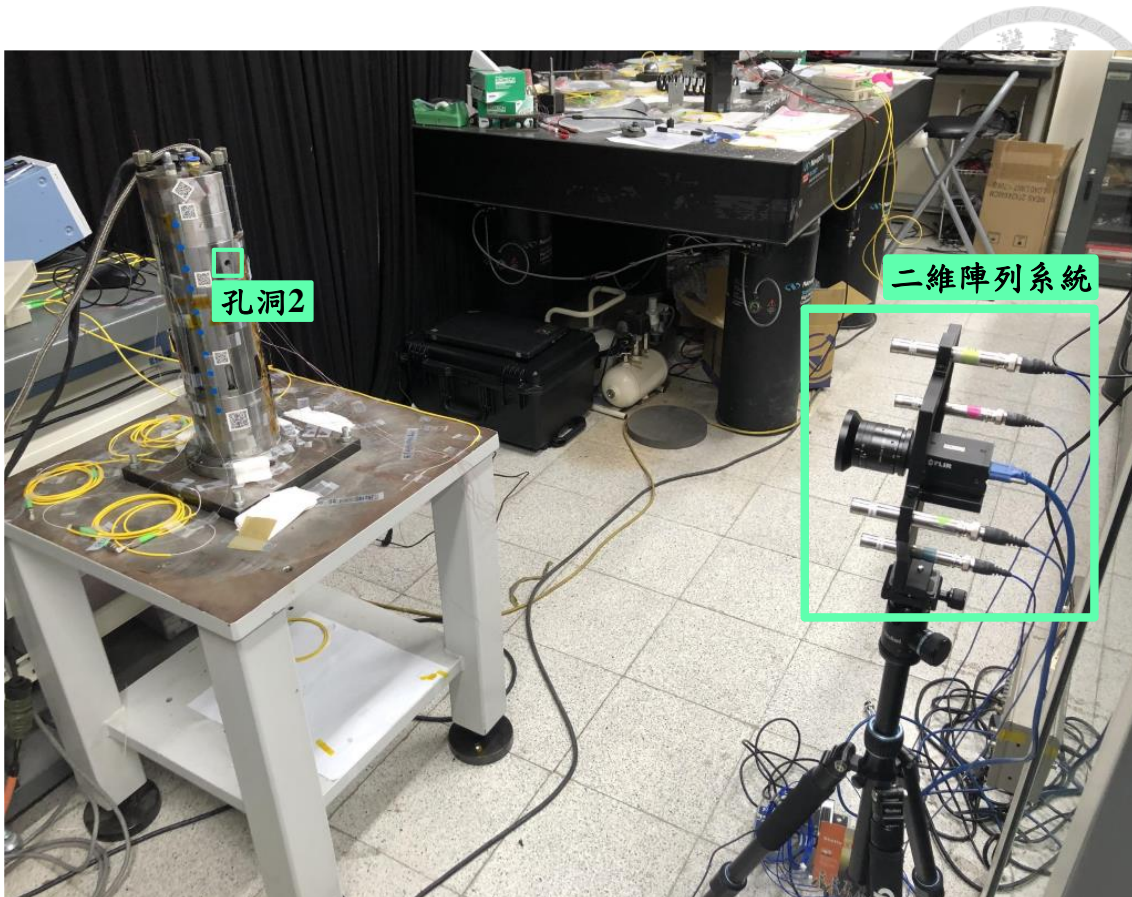


圖 5 - 40 使用自行開發二維聲源定位系統進行量測之實驗架設

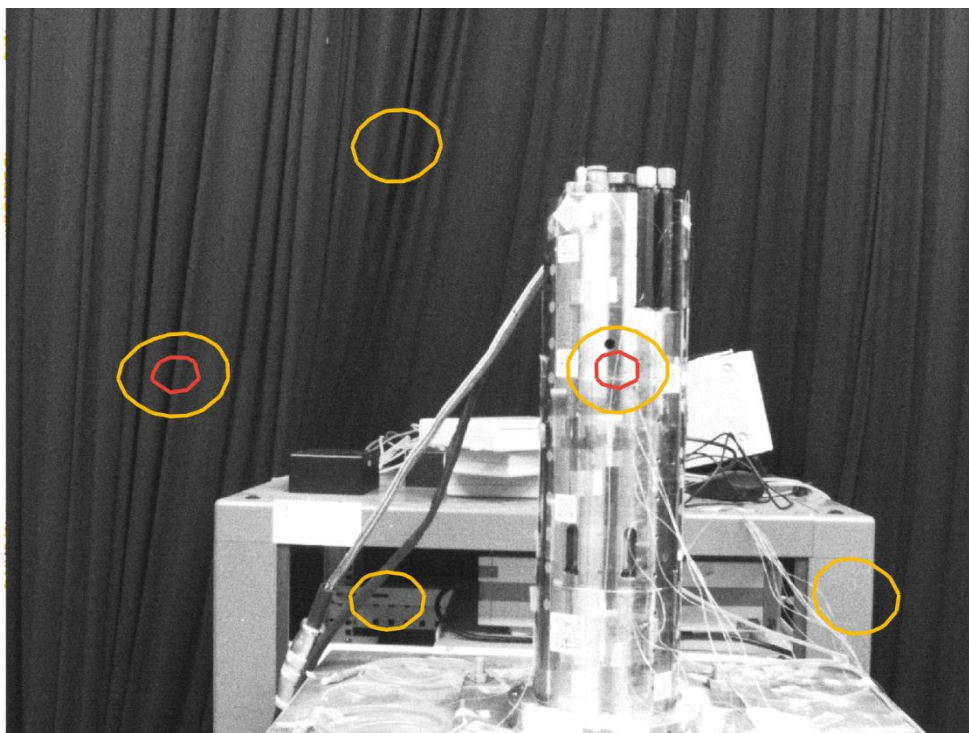


圖 5 - 41 使用自行開發二維聲源定位系統進行量測之實驗結果

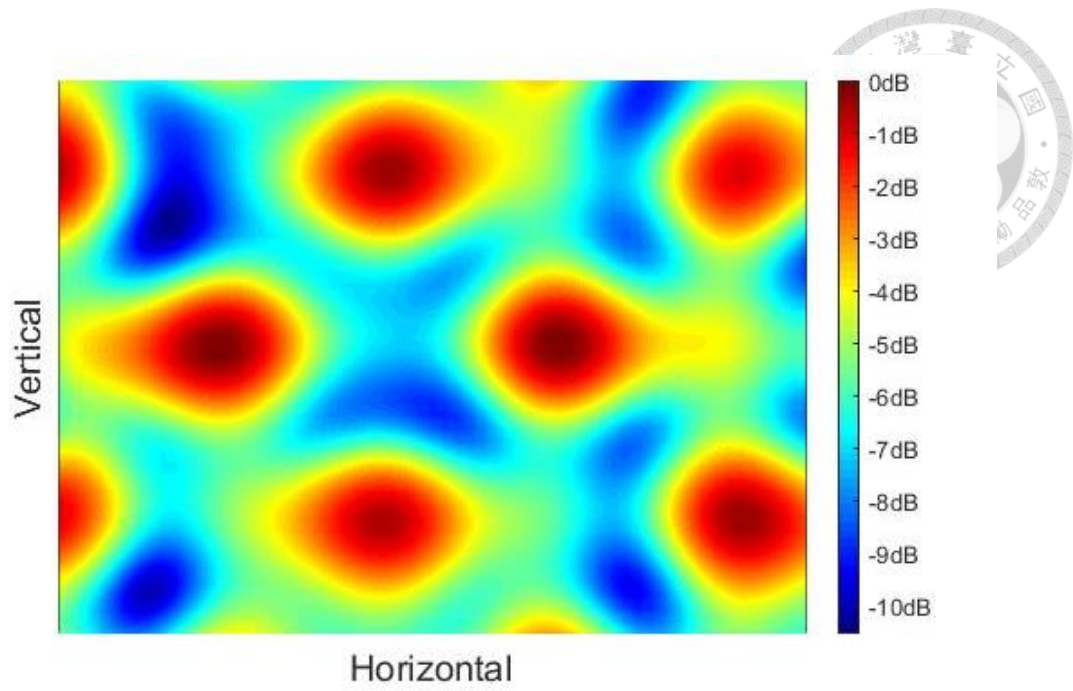


圖 5 - 42 實驗結果之陣列能量完整曲面俯視圖

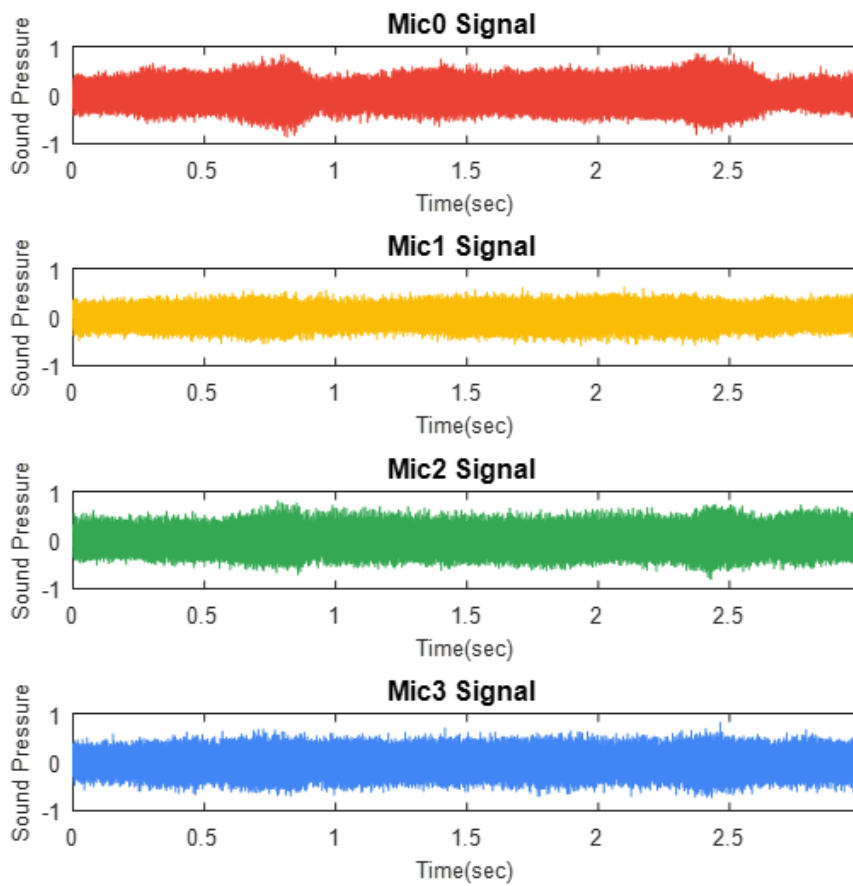


圖 5 - 43 麥克風陣列量測所得原始訊號

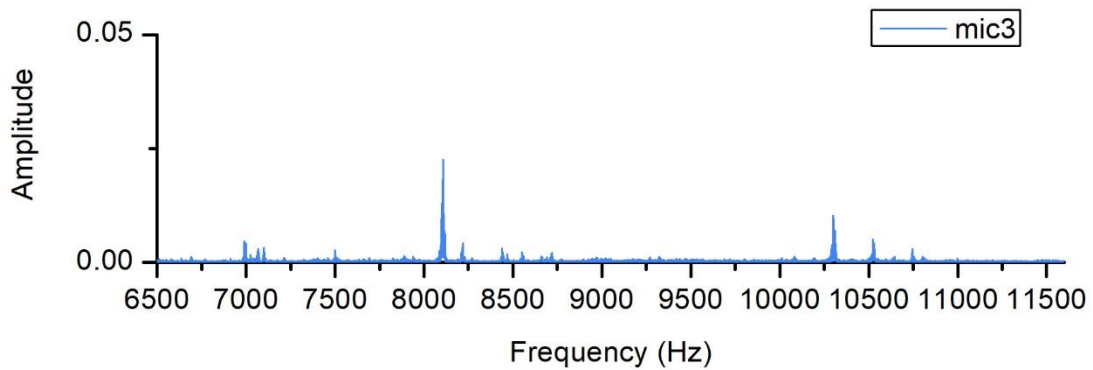
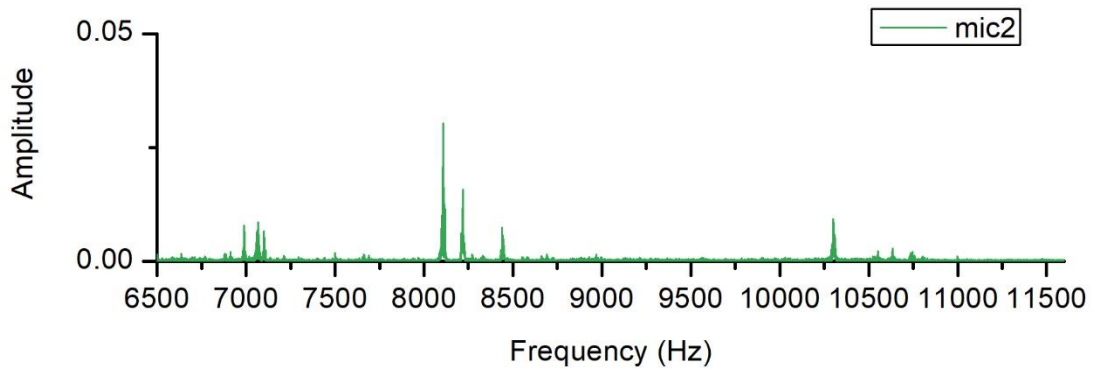
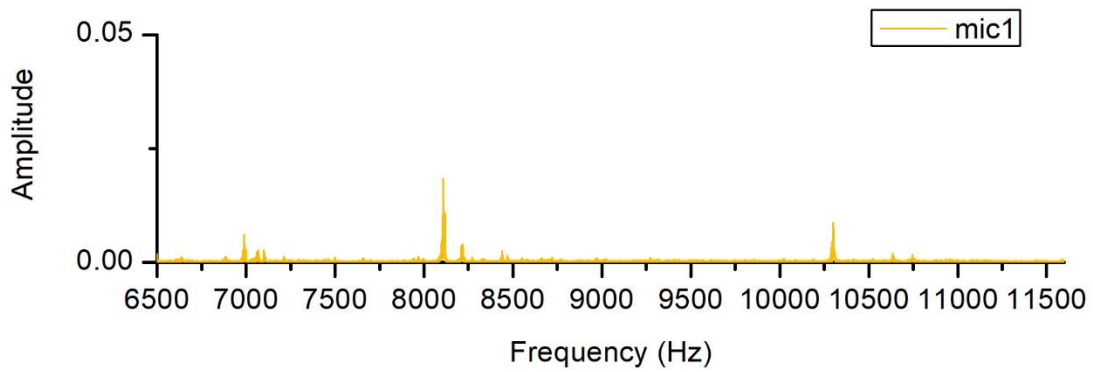
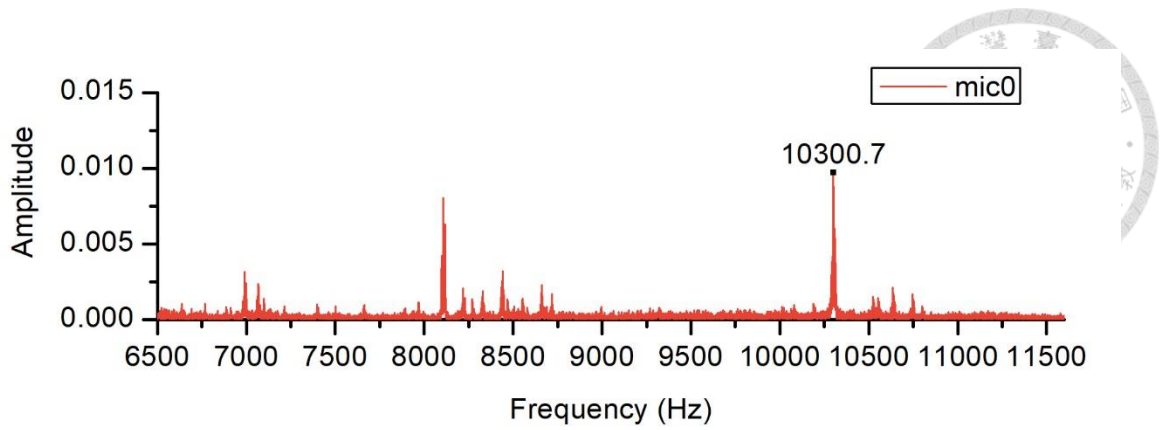


圖 5 - 44 各麥克風訊號頻譜

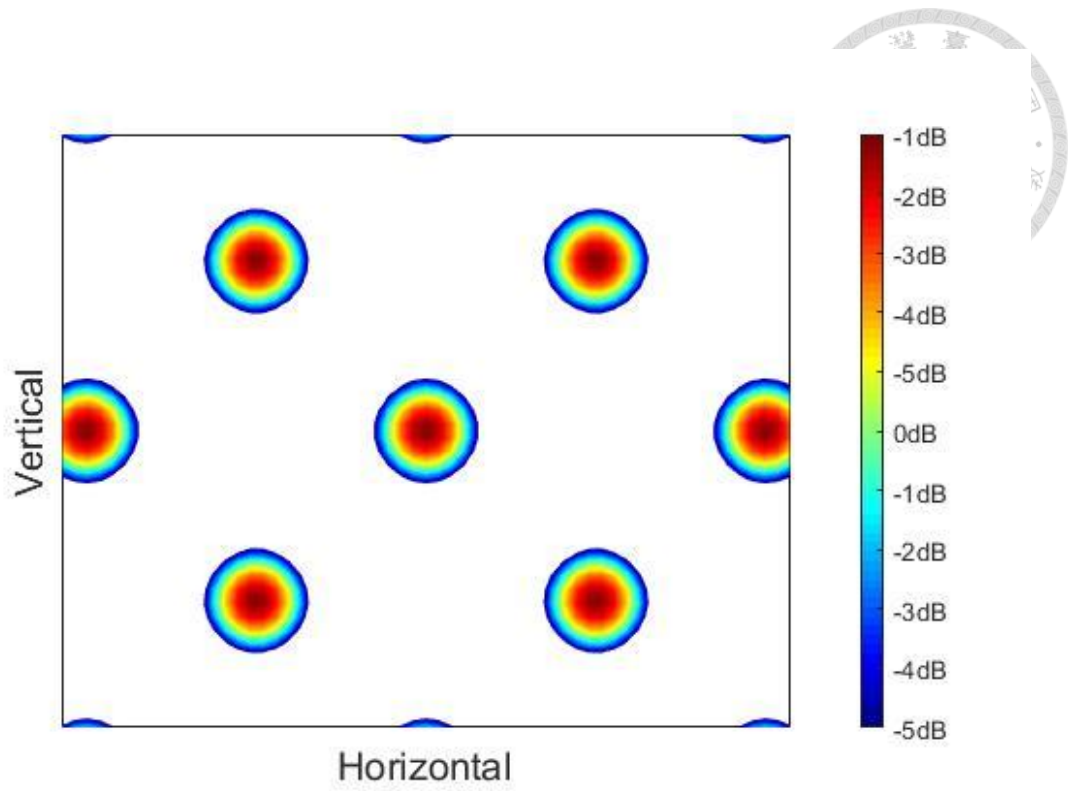


圖 5 - 45 自製陣列於觀測訊號頻率 10300.7Hz 的 array pattern

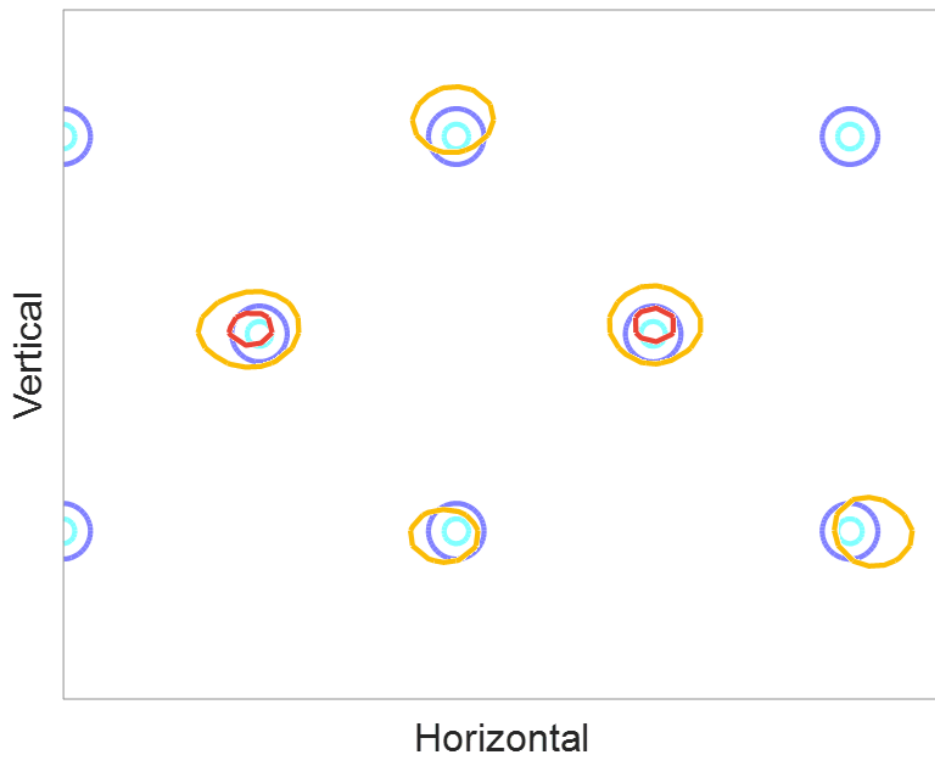


圖 5 - 46 將 array pattern 平移後與實驗結果比對



## 第六章 小型馬達加工系統之振噪及瑕疵分析

在第五章內藏式主軸的聲學攝影機拍攝結果中發現由於外部為金屬套管所包覆，因此內部不管何處出現異音皆是由套管孔洞所發出，導致以聲源定位查找內部異音部位有些困難，而本章所研究之系統則是為模擬整體加工系統所製作的小型馬達加工系統，其馬達與軸承等結構元件皆裸露在外，並且故意將軸承中一個滾珠進行破壞，模擬實際零件受損的情況，本章將針對軸承受損前後的噪音訊號進行分析比較，同時使用加速規及聲學攝影機進行異音源查找。

### 6.1 馬達加工系統介紹與實驗架設

本章所研究之馬達系統構造如圖 6-1 所示，為模擬整體加工條件之系統。其使用馬達與聯軸器帶動軸旋轉，並配有一偏重盤透過鎖固螺絲的方式可製造偏心振動，且設有兩個軸承支撐旋轉軸，分別在馬達與偏重盤間（軸承 1），以及偏重盤至旋轉軸末端連接刀具座處（軸承 2），此系統以不鏽鋼底座開螺絲孔的方式鎖固在光學防震桌上，以防止外在條件造成的振動，整體系統實體照片如圖 6-2 所示。本系統使用之伺服馬達為三菱電機 HG-KN73 伺服馬達，主要規格為額定出力 750W，額定迴轉速度為 3000rpm，其他詳細規格如圖 6-3 所示。使用軸承為日本精工株式會社（NSK）所製造之 6004Z 滾珠軸承（見圖 6-4）。

控制伺服馬達的方式為使用禮維科技有限公司之控制器，實體見圖 6-5，可選擇內部控制，是以旋鈕方式手動控制馬達之轉速輸出，外部控制則是另外連接 NI 網路卡後以電腦軟體控制轉速，此種方式能夠設定轉速以控制的方式變化，如線性增加或週期變化，軟體介面如圖 6-6 所示，同時控制器的螢幕會顯示馬達當下之轉速。

而實驗架設因本章設計於軸承 2 分別使用正常與瑕疵軸承進行運轉實驗比較量測結果，因此統一將麥克風架設於軸承 2 附近，如圖 6-7 所示。



## 6.2 待機狀態之噪音分析

將馬達系統電源開啟，未設定轉速時，即持續出現一個人耳可聽見的噪聲。將其進行時頻分析及頻譜分析，結果如圖 6-8，發現此聲音由 4500Hz 訊號及其倍頻所組成。再使用聲學攝影機查找此聲音之來源，結果如圖 6-9 所示，發現聲源為伺服馬達，因此判斷此現象為伺服馬達內部電子元件因通電後造成的振動噪音，在後續實驗量測到的訊號中，此訊號都會一直存在。

## 6.3 定轉速之噪音分析

本小節對馬達不同轉速進行聲音訊號量測，選擇 600rpm、1200rpm、1800rpm、2200rpm 以及最高轉速 3000rpm 六種轉速各運轉 20 秒，以麥克風擷取訊號後進行分析。所得之麥克風原始訊號如圖 6-10 與圖 6-11 所示，可發現聲壓隨轉速上升而增加，此外若仔細觀察訊號波形，如圖 6-12 及圖 6-13 所示，可以發現訊號波形呈現規則變化，並且變化週期約等於旋轉頻率，例如圖 6-13 下圖 3000rpm 的訊號，0.2 秒鐘訊號波形擺盪約 10 次，換算頻率為 50 次/秒，而馬達轉速 3000rpm 換算成旋轉頻率為 50Hz。其他轉速也皆有此現象，除了 600rpm 因聲壓過小、訊噪比較低，因此較難判斷。若觀察各轉速訊號頻譜的低頻部分，如圖 6-14，則可以發現皆有出現旋轉頻率及其倍頻。

### 6.3.1 旁波

圖 6-15 為馬達於各轉速之麥克風訊號時頻譜，可以發現訊號很穩定幾乎沒有什麼變化，量值較大的頻率為前一小節所述來自伺服馬達之 4500Hz 及其倍頻，但其量值並非固定，而是隨著轉速上升而增加。此外觀察各時頻譜約 8kHz ~ 10kHz 以及 12kHz~ 15kHz 的部分，發現其頻率分佈間隔似乎有隨轉速上升而變大的趨勢，因此改用頻率解析度較高的頻譜分析來看比較清楚。圖 6-16 為馬達各轉速 8700Hz ~ 9300Hz 的頻譜，可以發現此處的頻率群是以約 9000Hz 為中心，兩邊等間隔地分

布著頻率峰值，而這些頻率的間隔等於各轉速的旋轉頻率；圖 6-17 為馬達各轉速 12.5kHz ~ 14.5kHz 的頻譜，同樣可以發現有等間隔分布的頻率峰值，其間隔為十倍的轉速頻率。這些頻率稱為旁波 (side band)，是由於兩種不同頻率的訊號調合產生振幅調變訊號 (amplitude modulation, AM) 進行傅立葉轉換後會出現的現象，在旋轉機械中會因為轉軸偏心等異常而出現旁波，其間隔為旋轉頻率或倍頻。而在本實驗中則推斷為因偏心盤造成轉軸偏心，因此旋轉頻率與 4500Hz 之倍頻 9000Hz 與 13500Hz 產生振幅調變而產生此旁波現象。

#### 6.4 瑕疵軸承置換後比較

為模擬工具機內部零件損壞的情況，將軸承 2 置換為含有一個滾珠具瑕疵之軸承，此軸承是將正常滾珠軸承內部的滾珠進行加工破壞，如圖 6-18 所示，滾珠上有直徑為 1mm 的小孔，本小節將對含有此瑕疵軸承的馬達加工系統進行運轉量測。

量測結果之原始訊號如圖 6-19 及圖 6-20 所示，約前 2.5 秒為開關打開前之狀態。原始訊號與正常軸承 (見圖 6-10、圖 6-11) 比起較不平穩，出現一些突波，不過仔細觀察波形，如圖 6-21 及圖 6-22 所示，可發現與正常軸承同樣出現週期性的波形振盪，而由時頻譜結果 (見圖 6-23) 可得除了開關打開後出現伺服馬達產生的 4500Hz 及其倍頻外，與正常軸承的運轉訊號相比多了一些其他不固定出現的訊號在低頻部分；實際聆聽可以發現這些訊號是一些類似撞擊的異音。以 600rpm 為例，觀察時頻譜 0 ~ 4000Hz 的部分如圖 6-24，可發現異音出現時原始訊號波形出現不正常振幅，與時頻譜中的異常訊號出現時間也有對應關係。

推測此異音為瑕疵軸承所產生之異音，而為了證明推測，加入了加速規量測伺服馬達、軸承 1 與軸承 2 之振動訊號，並同時使用聲學攝影機進行拍攝，實驗架設如圖 6-25 所示，量測定轉速 2200rpm 之訊號。量測結果如圖 6-26 所示，由麥克風訊號可看出約第 5 至 8 秒出現異音，但黏於伺服馬達的加速規訊號幾乎看不出異狀，軸承 1 上的加速規有出現些微振盪，而軸承 2 上的加速規訊號則是明顯出

現振盪，量值也很大。聲學攝影機之拍攝結果則如圖 6-27 及圖 6-28 所示，分別為異音發生時之畫面以及無異音發生時之畫面，異音發生時可發現聲源為瑕疵軸承，因此透過加速規及聲學攝影機可以雙雙驗證此異音是由瑕疵軸承所造成。

## 6.5 本章結論

透過量測聲音與振動對此馬達系統做分析後，結果顯示伺服馬達在通電狀態時即產生約 4500Hz 的振動噪音，此訊號量值會隨著轉速上升而增加，並且其倍頻與旋轉頻率產生旁波現象，此旁波現象推測是因偏心盤造成轉軸偏心運轉所導致；在定轉速的量測結果中發現原始訊號波形呈週期振盪，其振盪頻率與旋轉頻率相同，在頻譜中也能準確量測到旋轉頻率。將軸承 2 更換為瑕疵軸承後出現了非週期出現的敲擊異音，利用加速規與聲學攝影機能夠確定此異音是由瑕疵軸承所發出。綜合以上結果，使用聲源定位查找異音源是可行的，比起加速規有非接觸式的優點，但實際應用上尚須克服外部機構阻擋的問題。

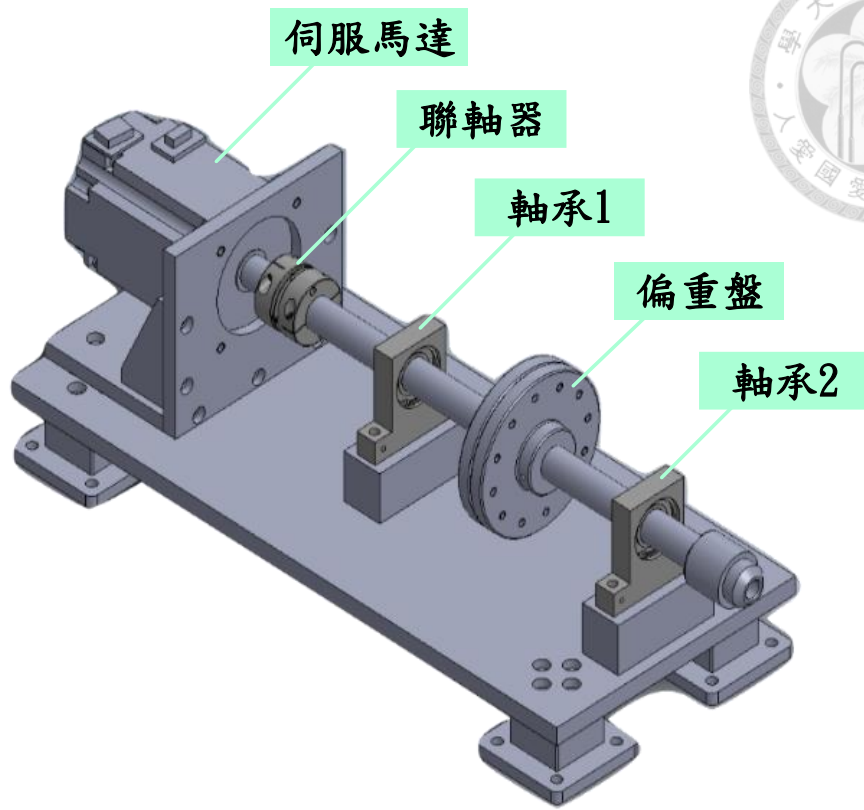


圖 6 - 1 馬達加工系統構造

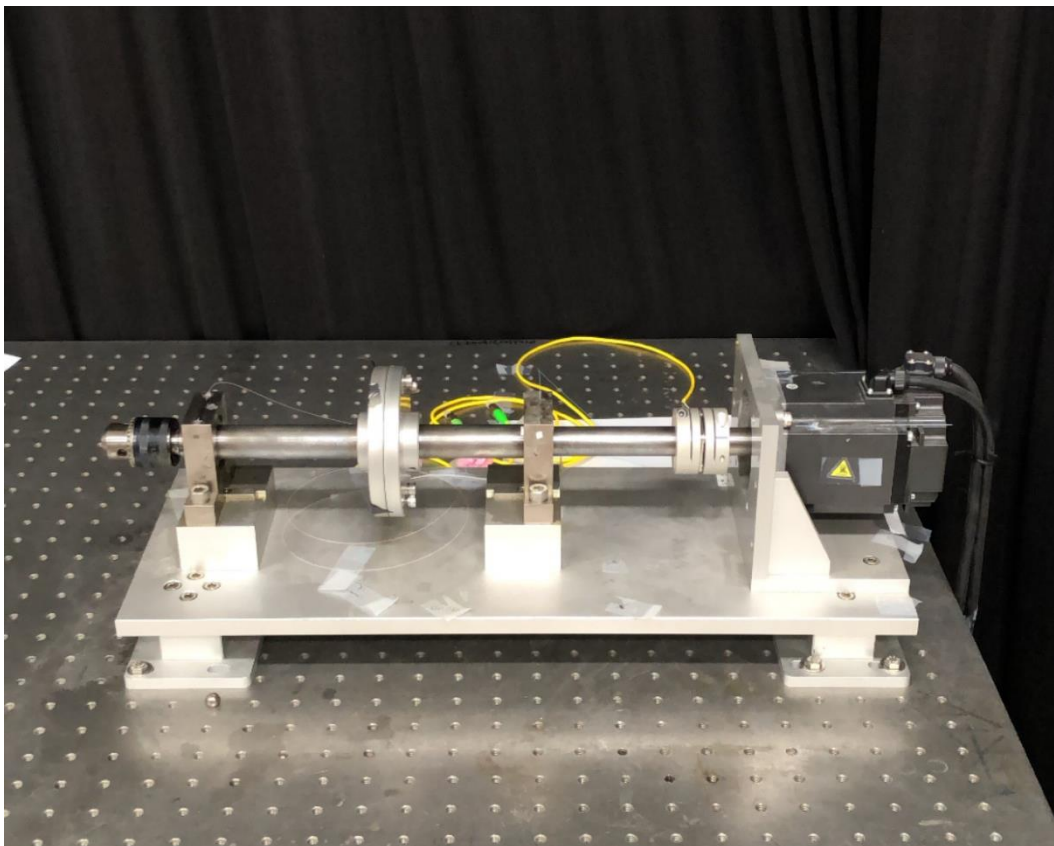


圖 6 - 2 馬達加工系統實體照片

馬達型名		HG-KN	13(B)(J)	23(B)(J)	43(B)(J)	73(B)(J)
對應伺服驅動器型名			MR-JE-10A MR-JE-10B MR-JE-10C	MR-JE-20A MR-JE-20B MR-JE-20C	MR-JE-40A MR-JE-40B MR-JE-40C	MR-JE-70A MR-JE-70B MR-JE-70C
電源設備容量		[KVA]	0.3	0.5	0.9	1.3
連續特性	額定出力	[W]	100	200	400	750
	額定轉矩 (注3)	[N · m]	0.32	0.64	1.3	2.4
最大轉矩		[N · m]	0.95	1.9	3.8	7.2
額定回轉速度		[r/min]	3000			
最大回轉速度		[r/min]	5000			
允許瞬間回轉速度		[r/min]	5750			
連續額定轉矩	標準	[kW/s]	12.9	18.0	43.2	44.5
時的功率比	附電磁剎車	[kW/s]	12.0	16.4	40.8	41.0
額定電流		[A]	0.8	1.3	2.6	4.8
最大電流		[A]	2.4	3.9	7.8	14
再生剎車頻率		[回/分]	(注4)	(注5)	276	159
慣性力矩	標準	[x 10 <sup>-4</sup> kg · m <sup>2</sup> ]	0.0783	0.225	0.375	1.28
	附電磁剎車	[x 10 <sup>-4</sup> kg · m <sup>2</sup> ]	0.0843	0.247	0.397	1.39
推薦負載慣性力矩比 (注1)			15倍以下			
速度/位置檢出器	搭配MR-JE-B		絕對型/增量型 17位元編碼器(分解能:131072 脈波/轉)			
	搭配MR-JE-A		增量型 17位元編碼器(分解能:131072 脈波/轉)			
油封			型號含J:有油封			
耐熱類別			130(B)			
構造			全閉自冷 (IP 等級: IP65 ) (注2)			
環境條件	周圍溫度		0°C~40°C(不結凍)、保存: -15°C~70°C			
	周圍濕度		80%RH以下(不結露)、保存: 90%RH以下(不結露)			
	環境		屋內(不會陽光直射)、無腐蝕性氣體·引火性氣體·油霧·塵埃			
	標高		海拔1000m以下			
振動			X:49 m/s <sup>2</sup> Y:49m/s <sup>2</sup>			
振動階級			V10			
軸的容許荷重	L	[mm]	25	30	30	40
	徑向	[N]	88	245	245	392
	推力	[N]	59	98	98	147
質量	標準	[kg]	0.6	0.98	1.5	3.0
	附電磁剎車	[kg]	0.8	1.4	1.9	4.0

圖 6 - 3 三菱電機 HG-KN73 伺服馬達詳細規格



圖 6 - 4 NSK 6004Z 滾珠軸承



圖 6 - 5 伺服馬達控制器實體照片

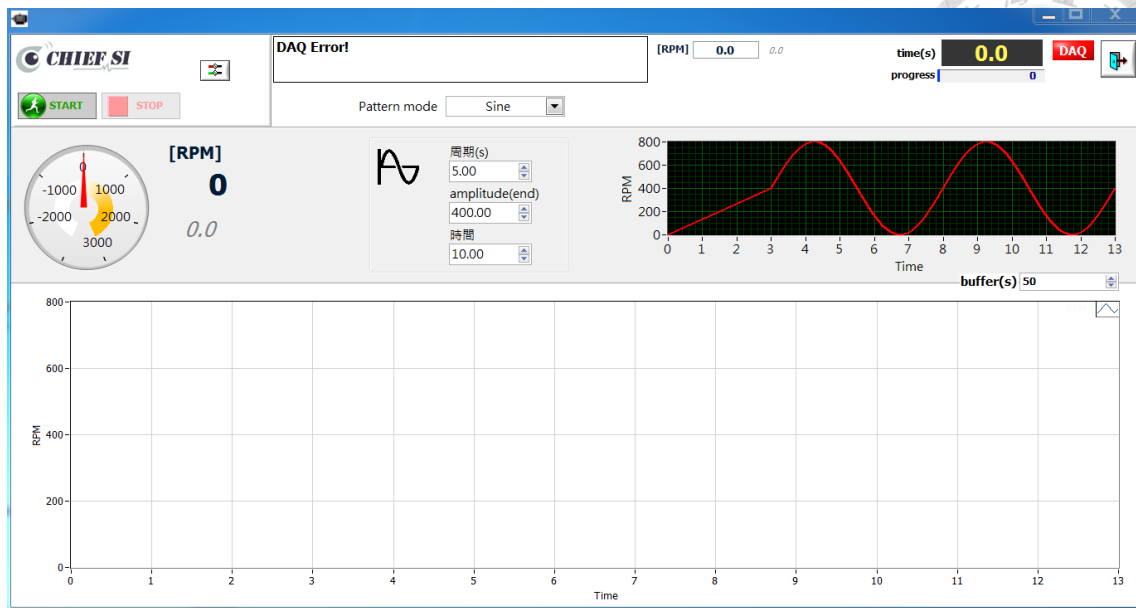


圖 6 - 6 伺服馬達控制軟體介面

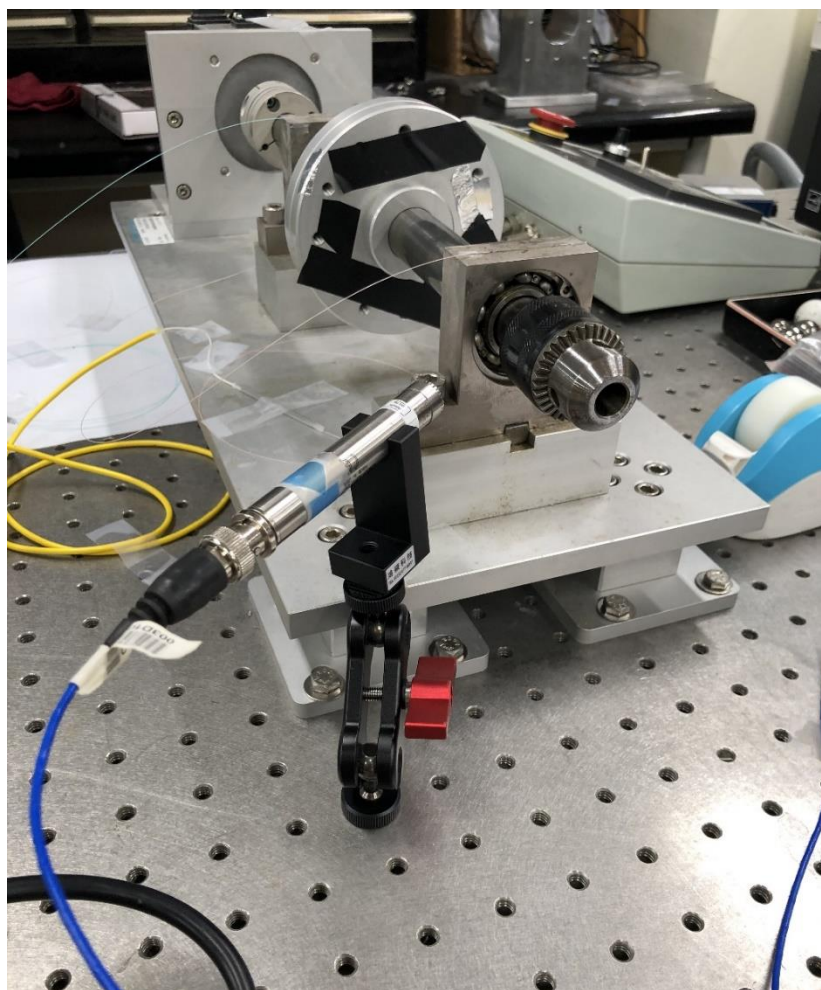


圖 6 - 7 噪音量測實驗架設

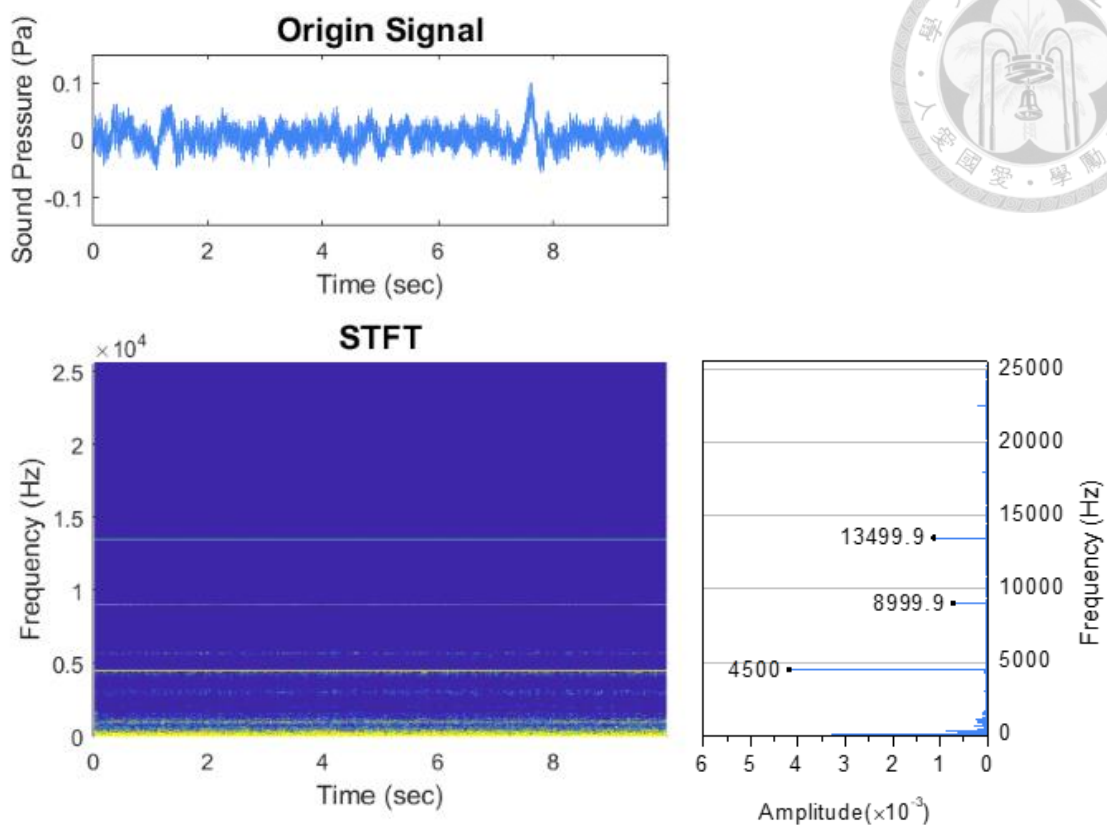


圖 6-8 待機時麥克風訊號分析結果

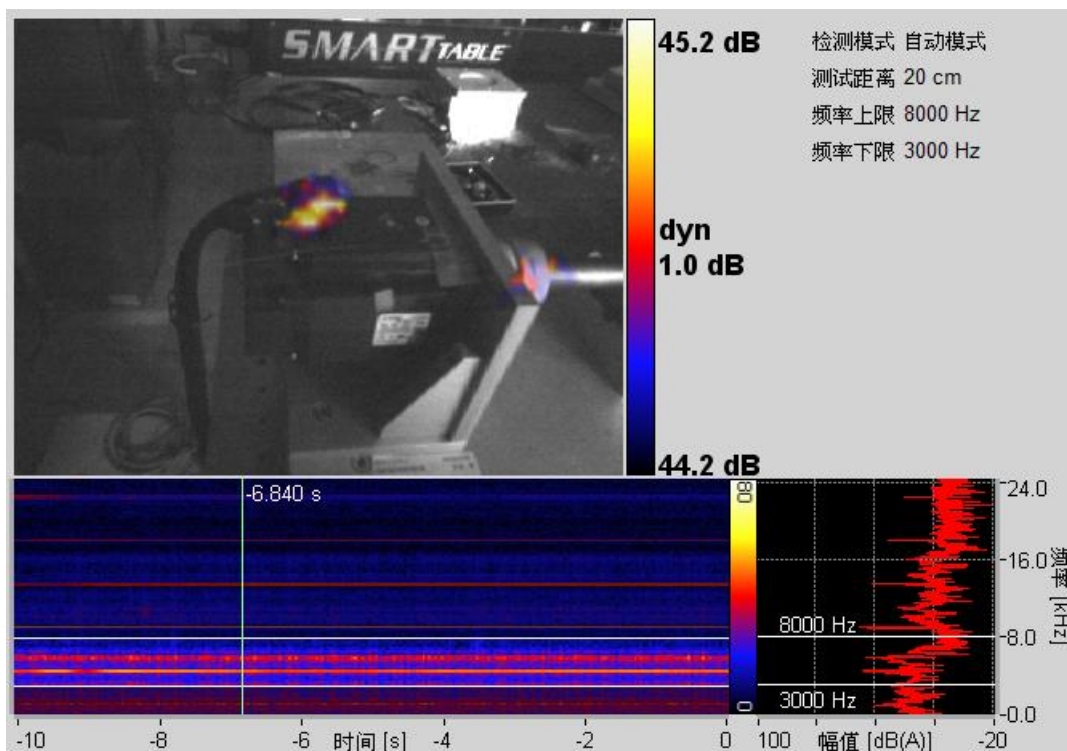


圖 6-9 待機狀態噪音之聲學攝影機拍攝結果

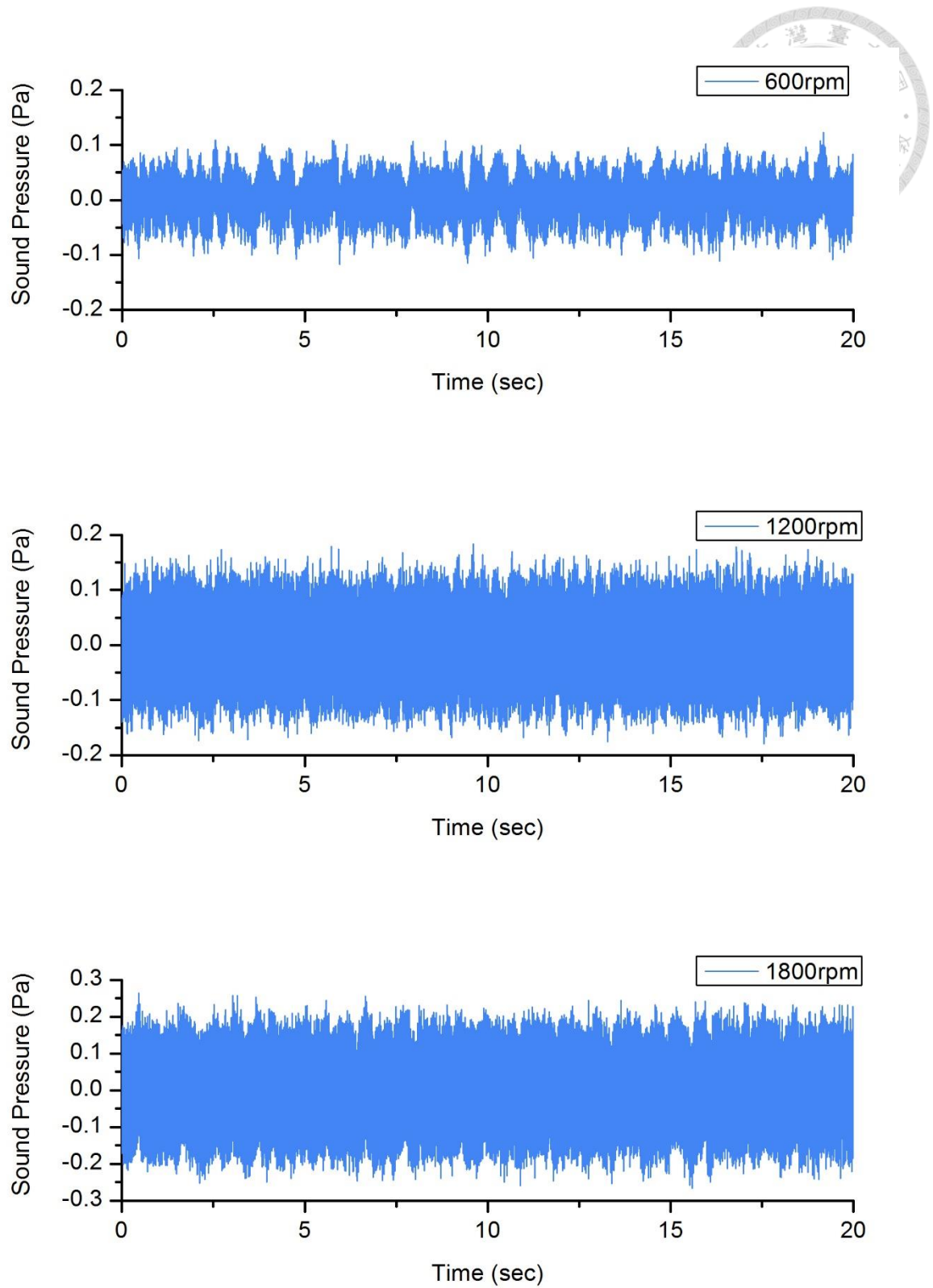


圖 6 - 10 馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 之麥克風原始訊號

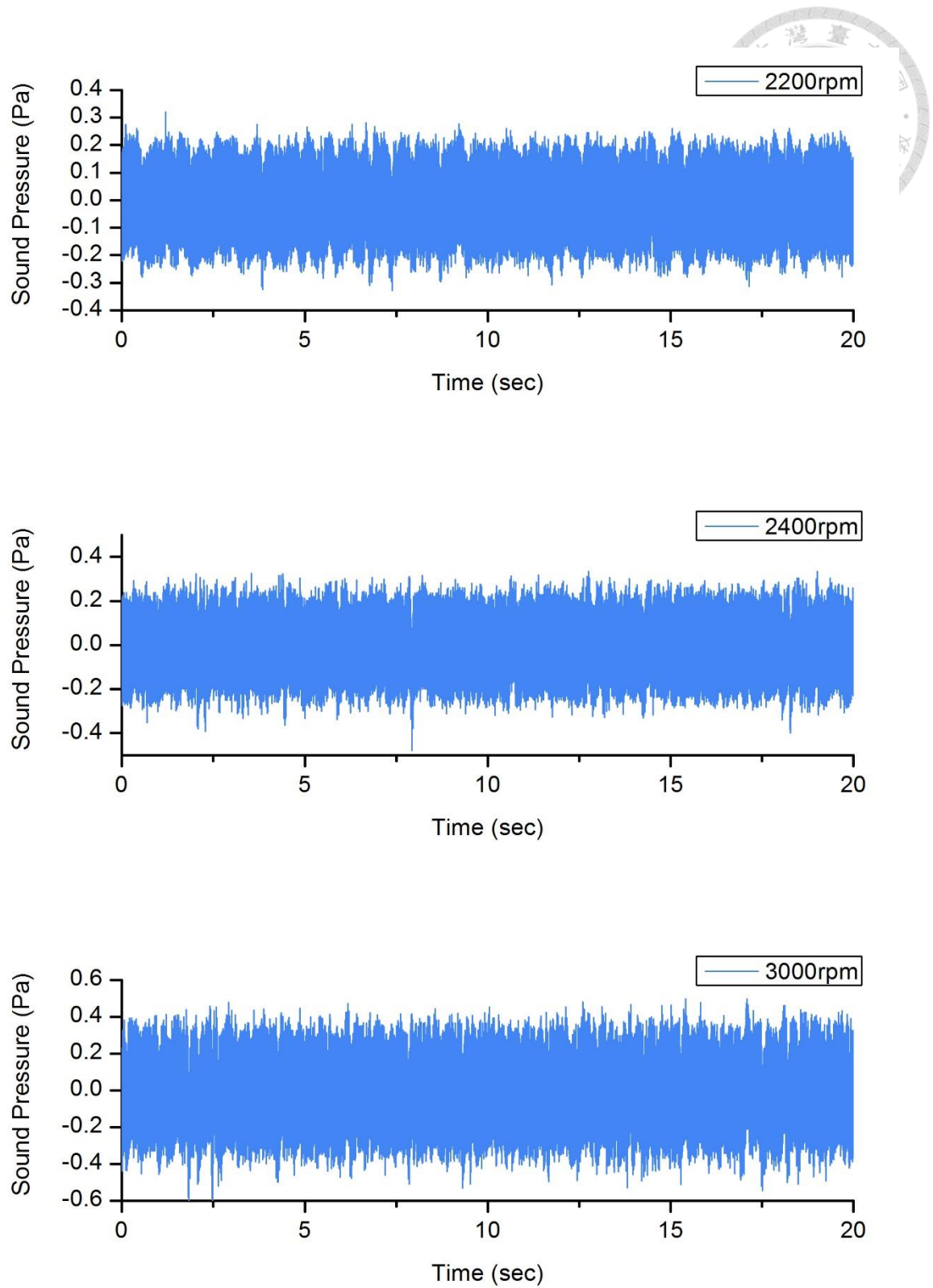


圖 6 - 11 馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 之麥克風原始訊號

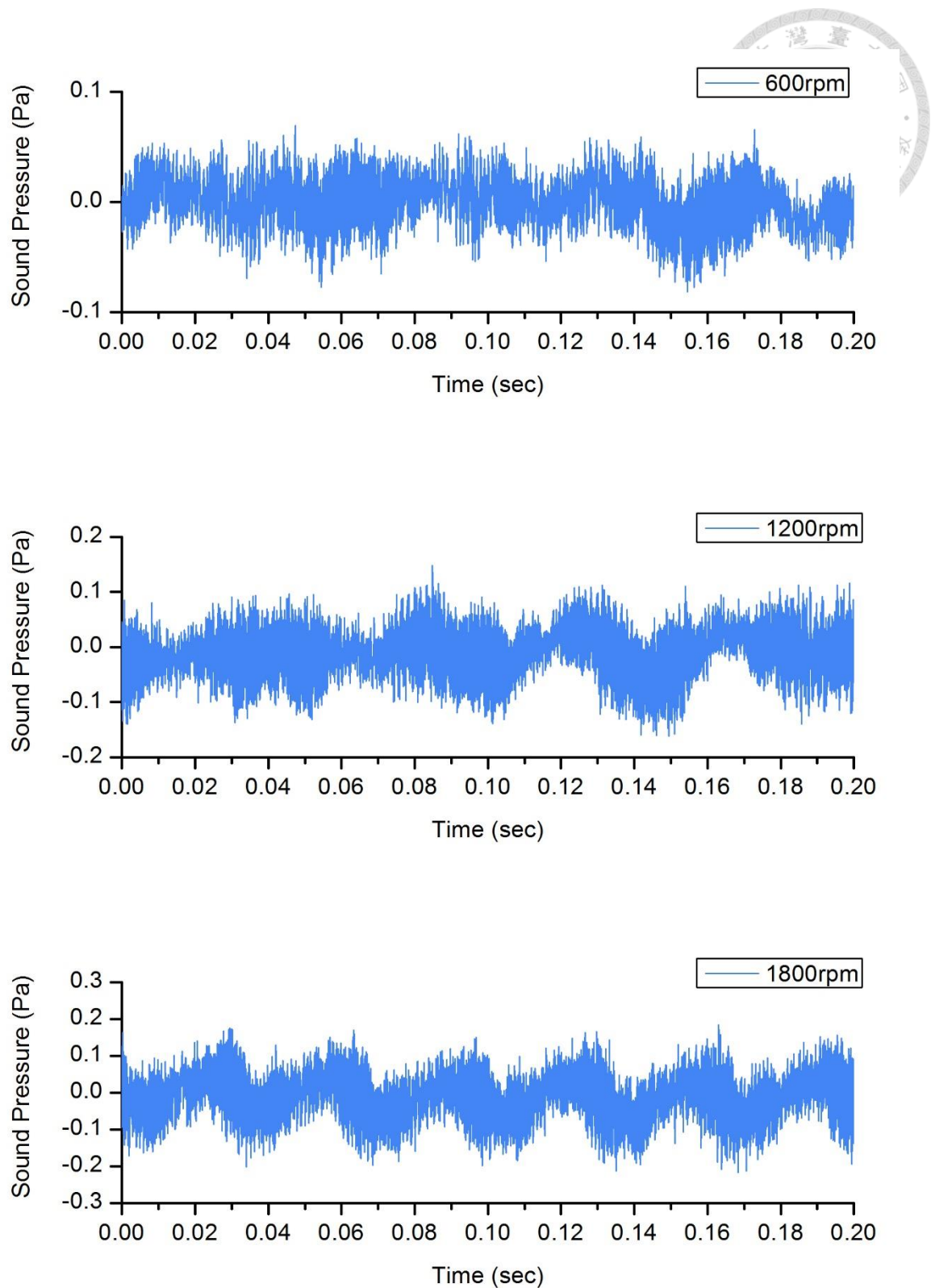


圖 6 - 12 馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 之麥克風原始訊號 (0~0.2 秒)

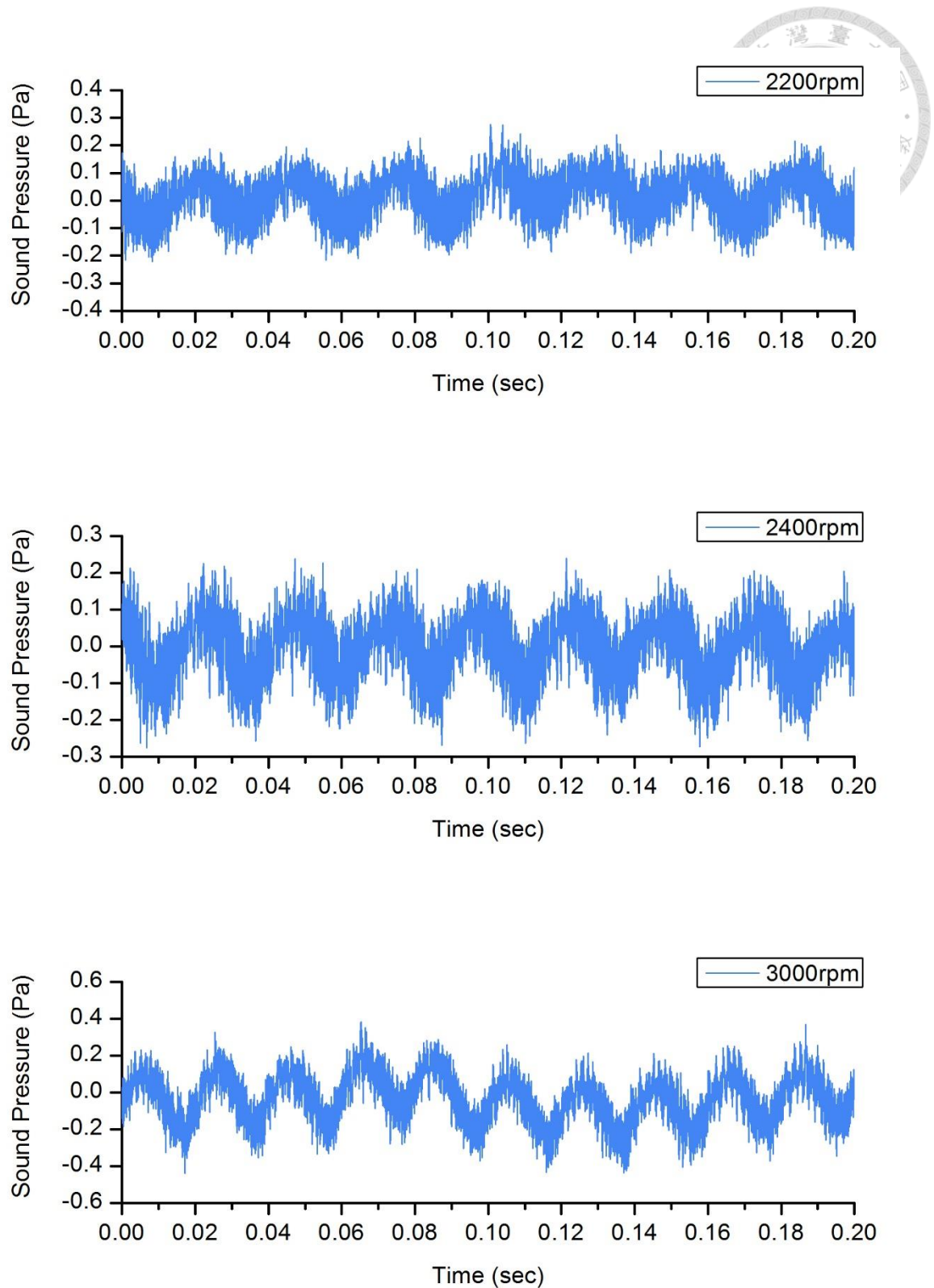


圖 6 - 13 馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 之麥克風原始訊號 (0~0.2 秒)

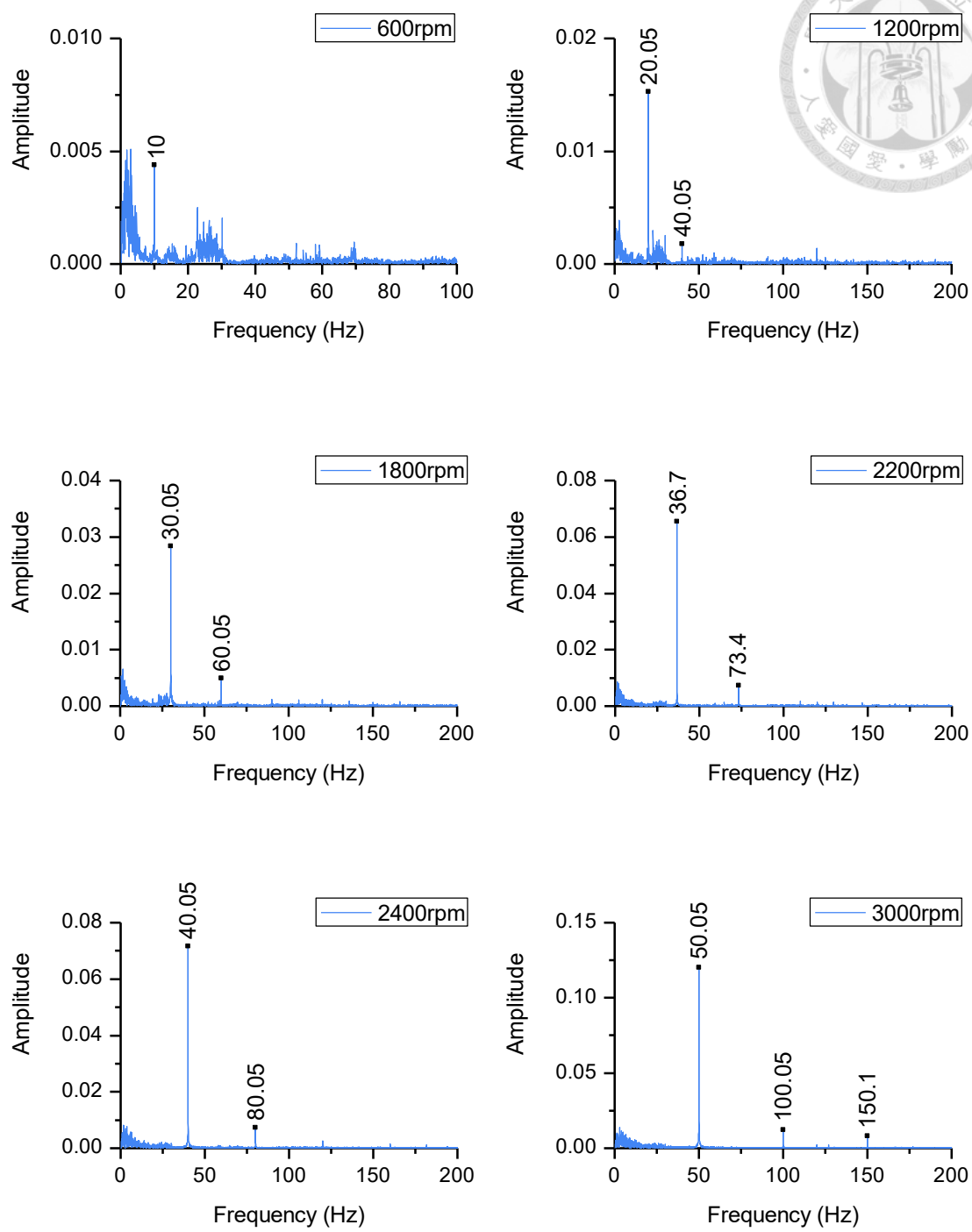
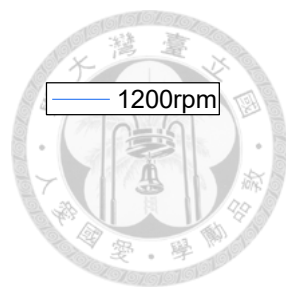


圖 6 - 14 馬達各轉速之麥克風訊號頻譜

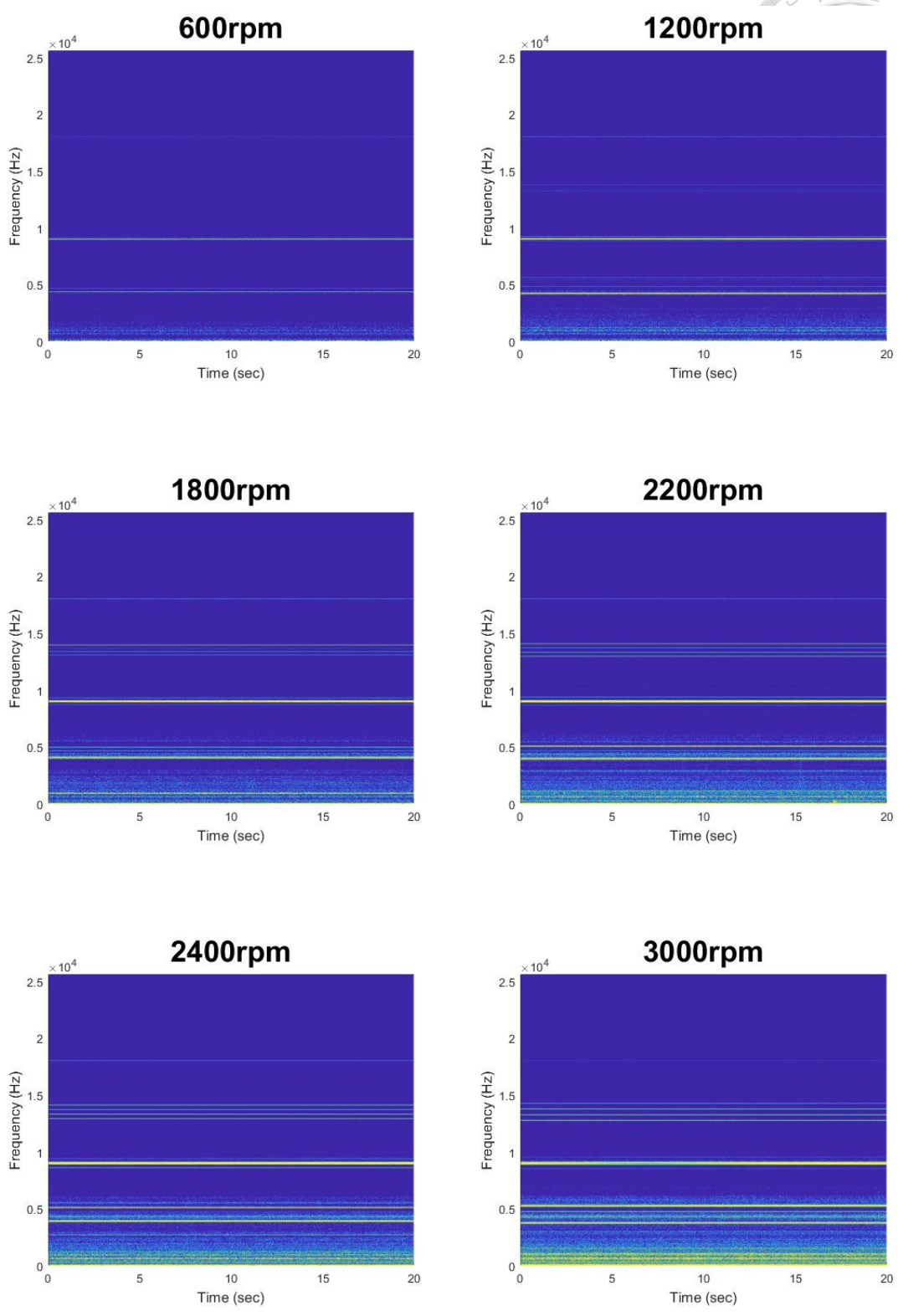


圖 6 - 15 馬達於各轉速之麥克風訊號時頻譜

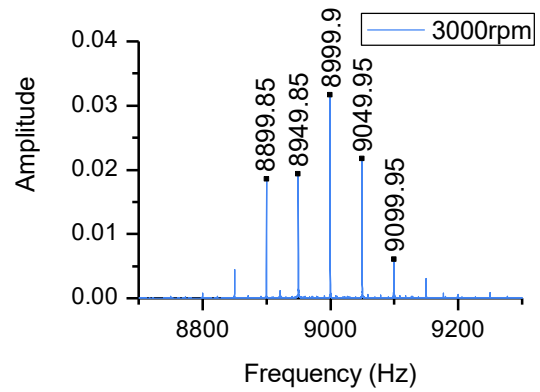
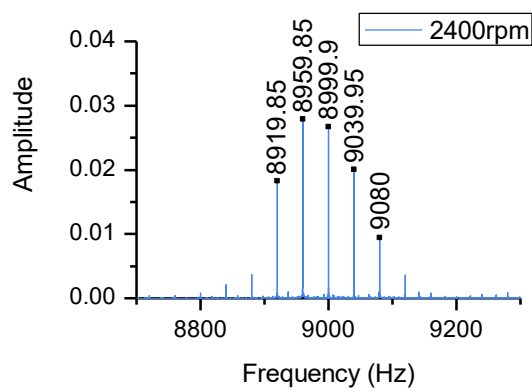
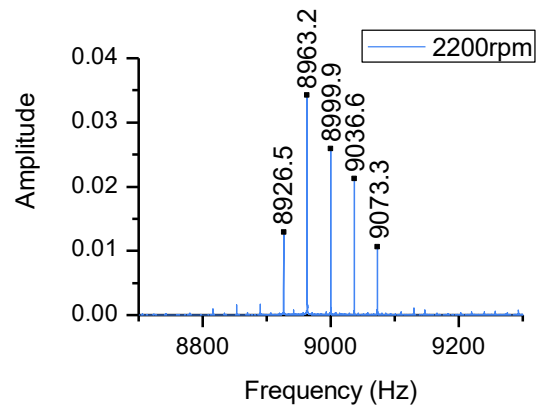
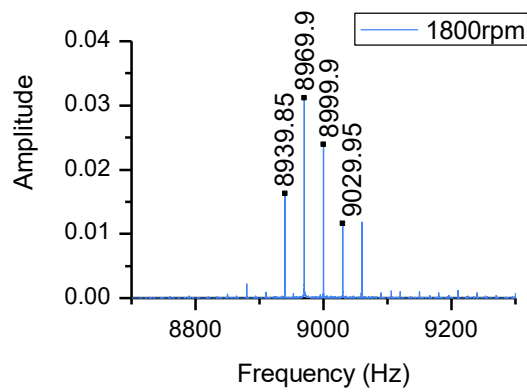
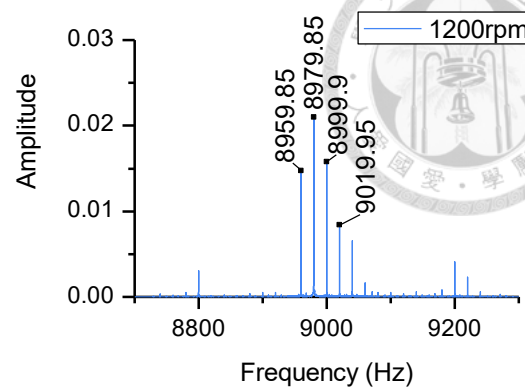
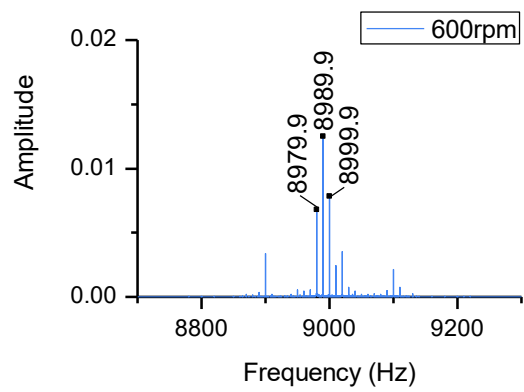


圖 6 - 16 馬達各轉速之麥克風訊號頻譜 (8700 ~ 9300Hz)

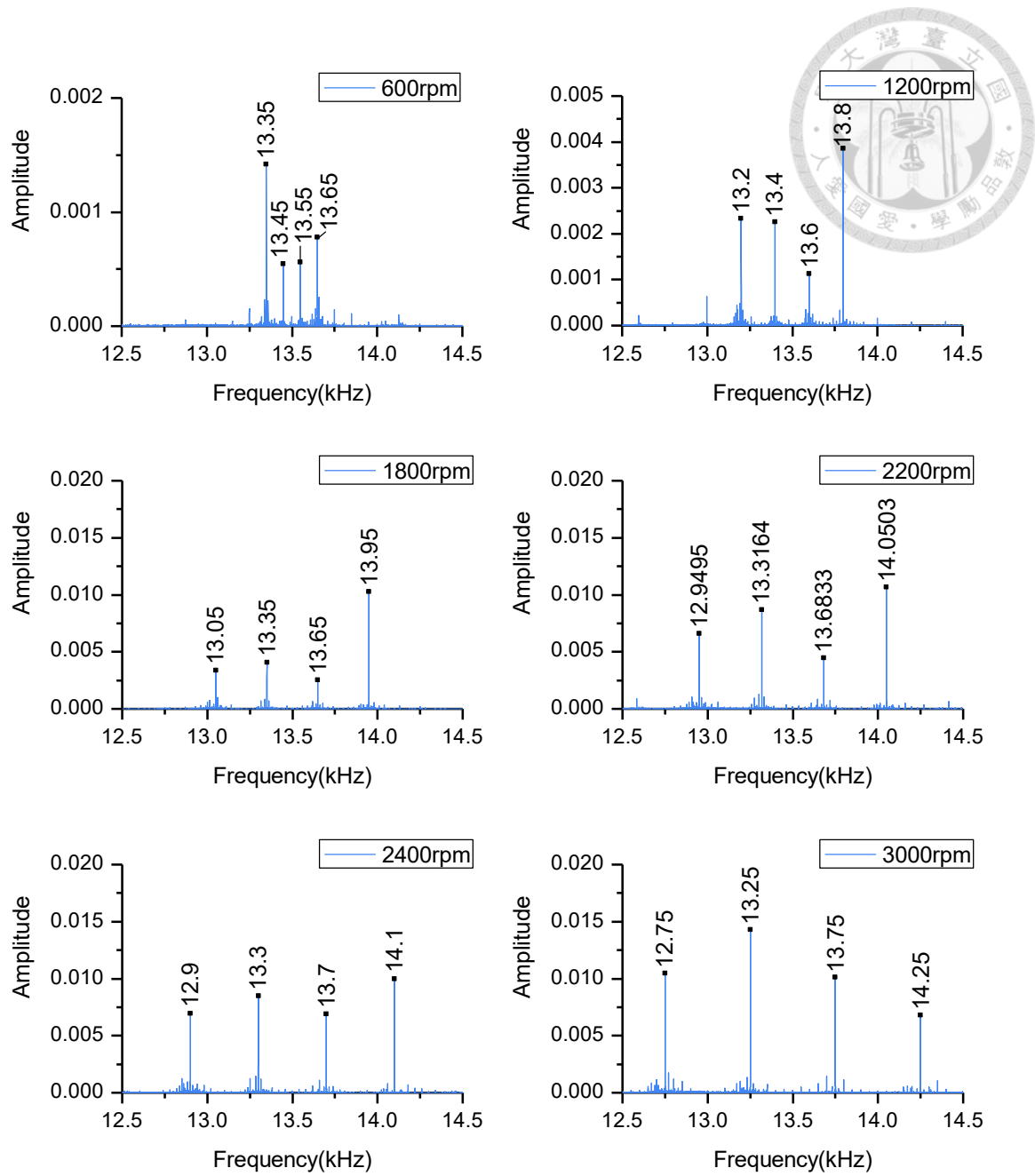


圖 6 - 17 馬達各轉速之麥克風訊號頻譜 (12.5 ~ 14.5Hz)

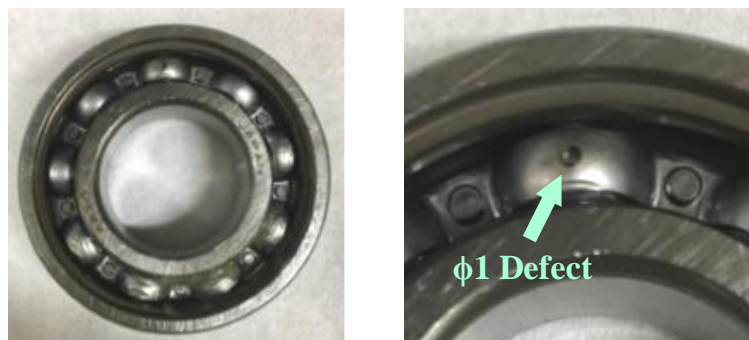


圖 6 - 18 瑕疵軸承

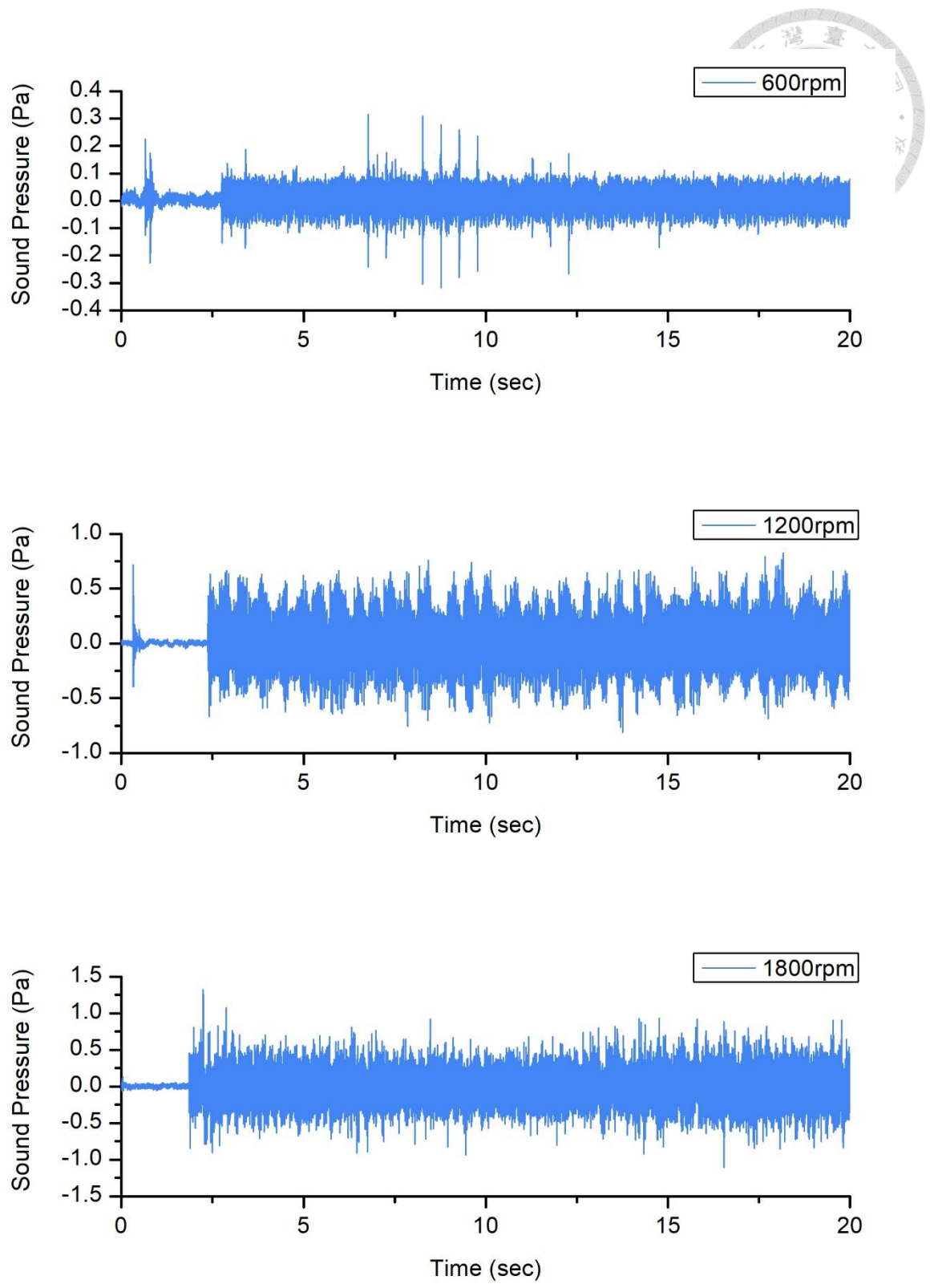


圖 6 - 19 含有瑕疵軸承之馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 麥克風原始訊號

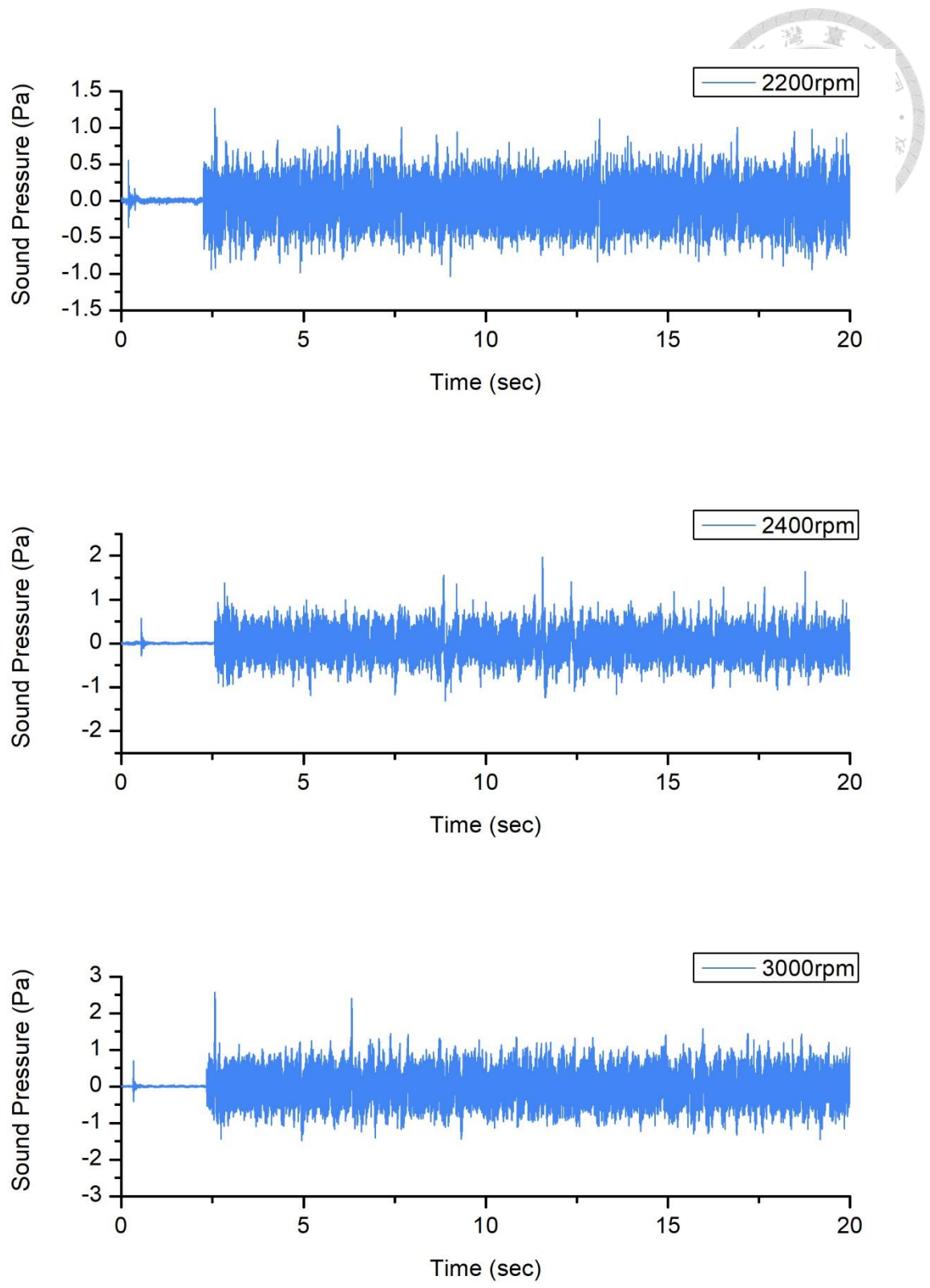


圖 6 - 20 含有瑕疵軸承之馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 麥克風原始訊號

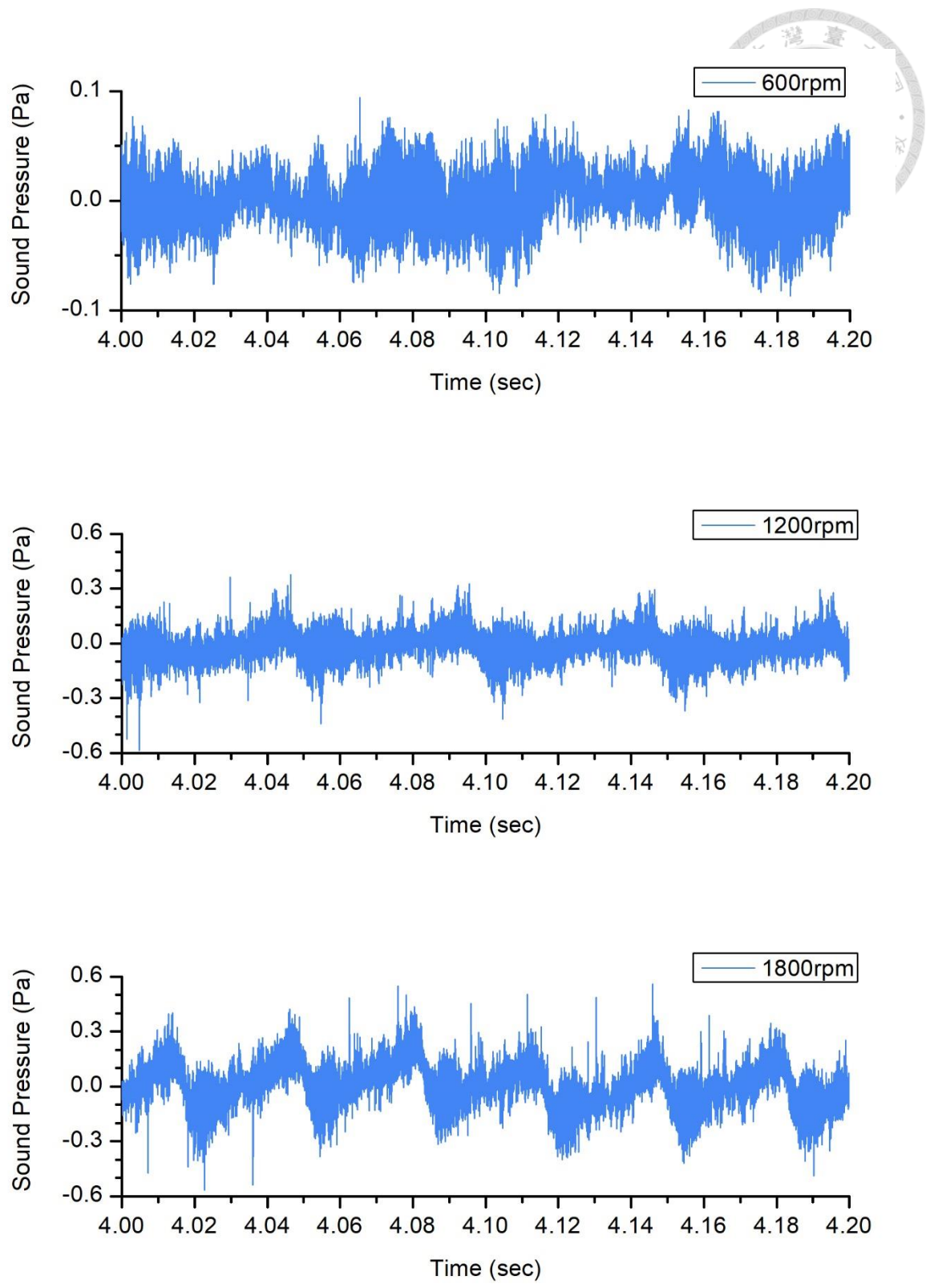


圖 6 - 21 含有瑕疵軸承之馬達轉速 600rpm、1200rpm、1800rpm 麥克風原始訊號  
(4 ~ 4.2 秒)

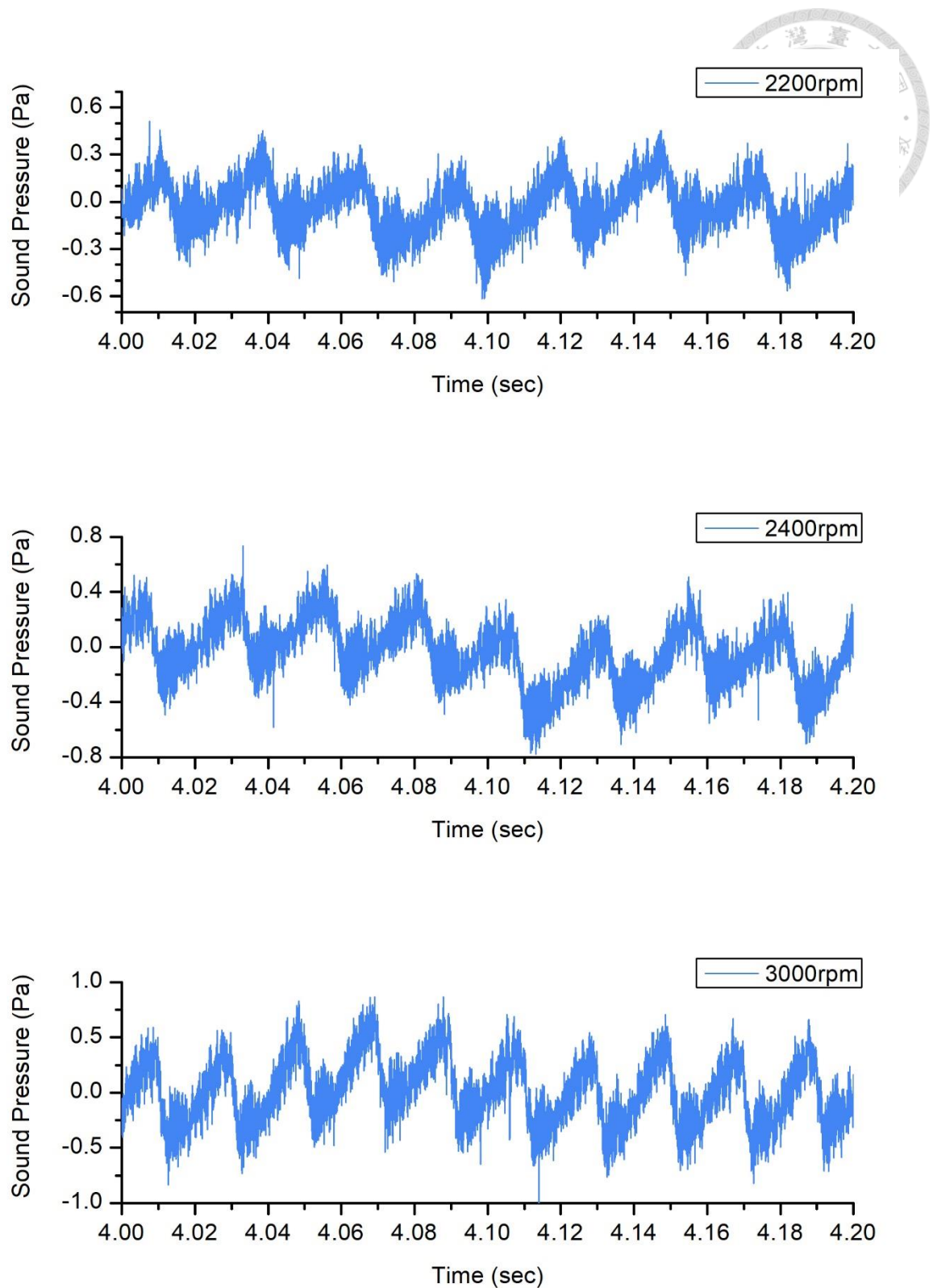


圖 6 - 22 含有瑕疵軸承之馬達轉速 2200rpm、2400rpm、3000rpm 之麥克風原始訊號 (4 ~ 4.2 秒)

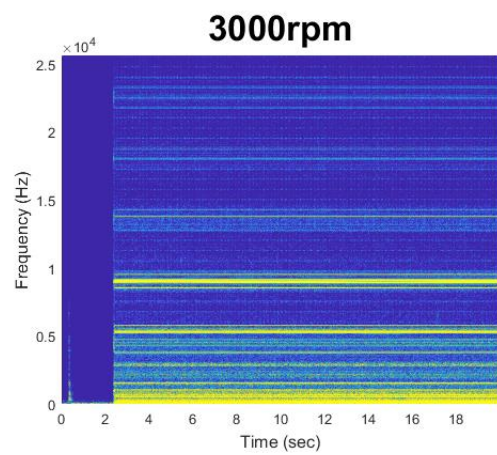
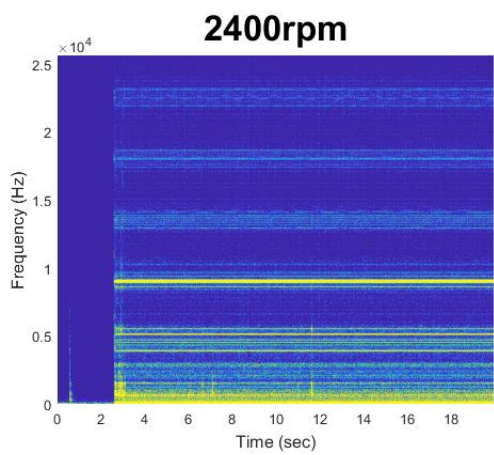
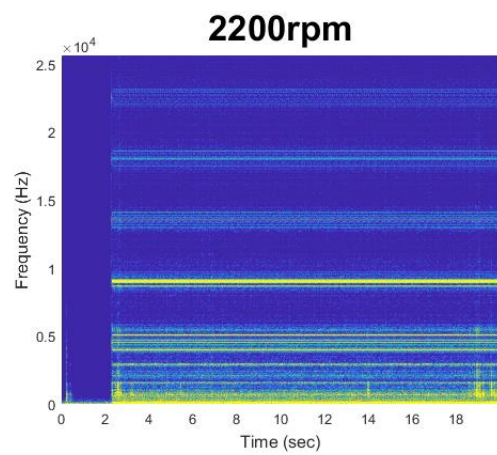
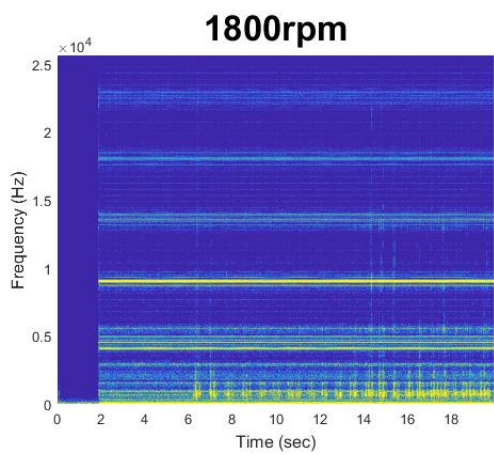
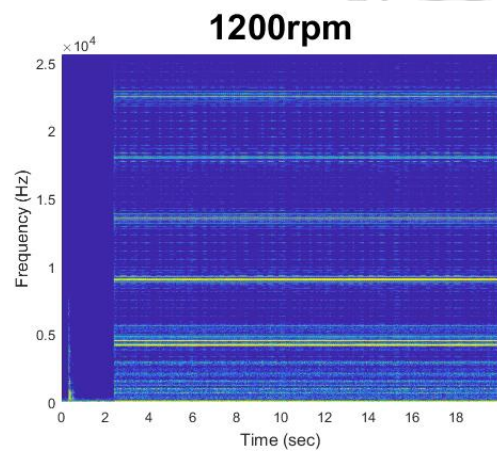
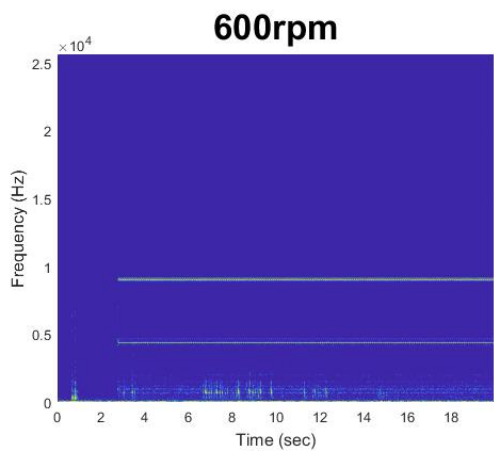
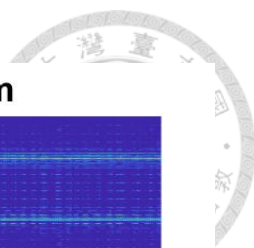


圖 6 - 23 含有瑕疵軸承之馬達各轉速麥克風訊號時頻譜

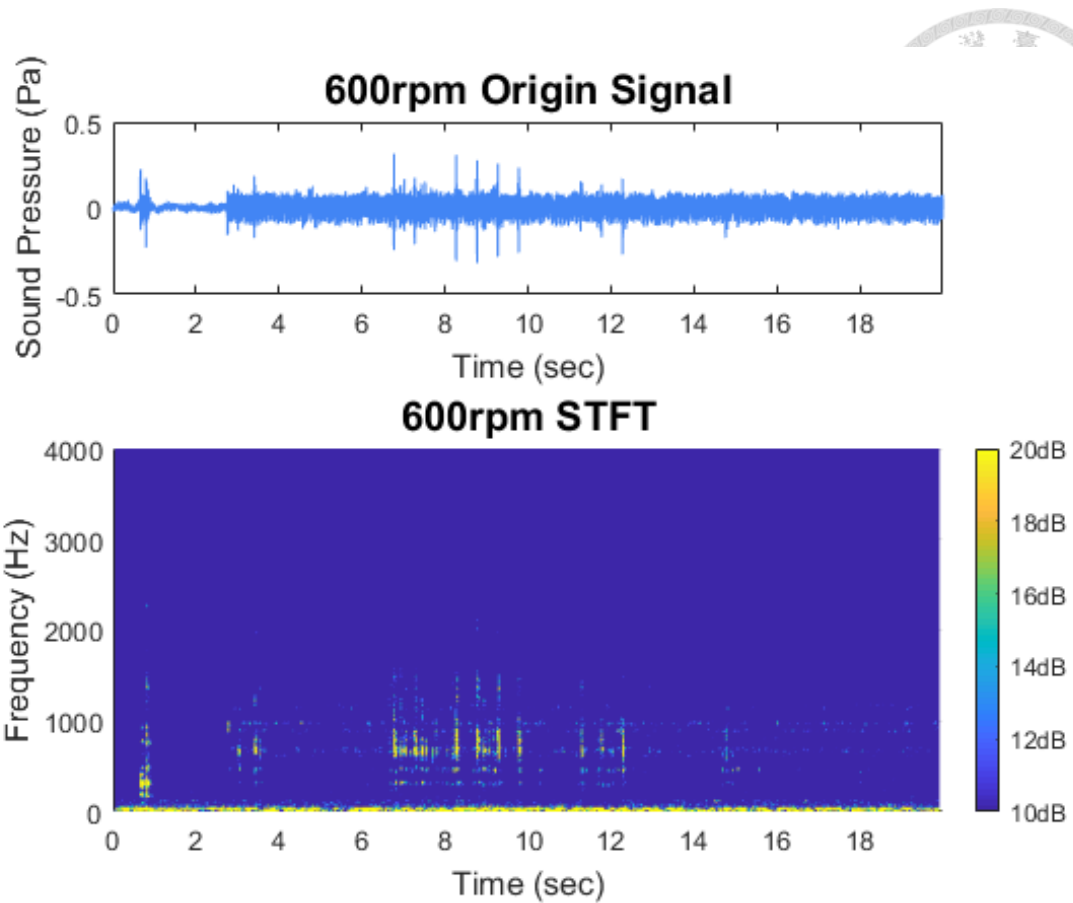


圖 6 - 24 含有瑕疵軸承之轉速 600rpm 麥克風原始訊號與時頻譜 (0-4000Hz)

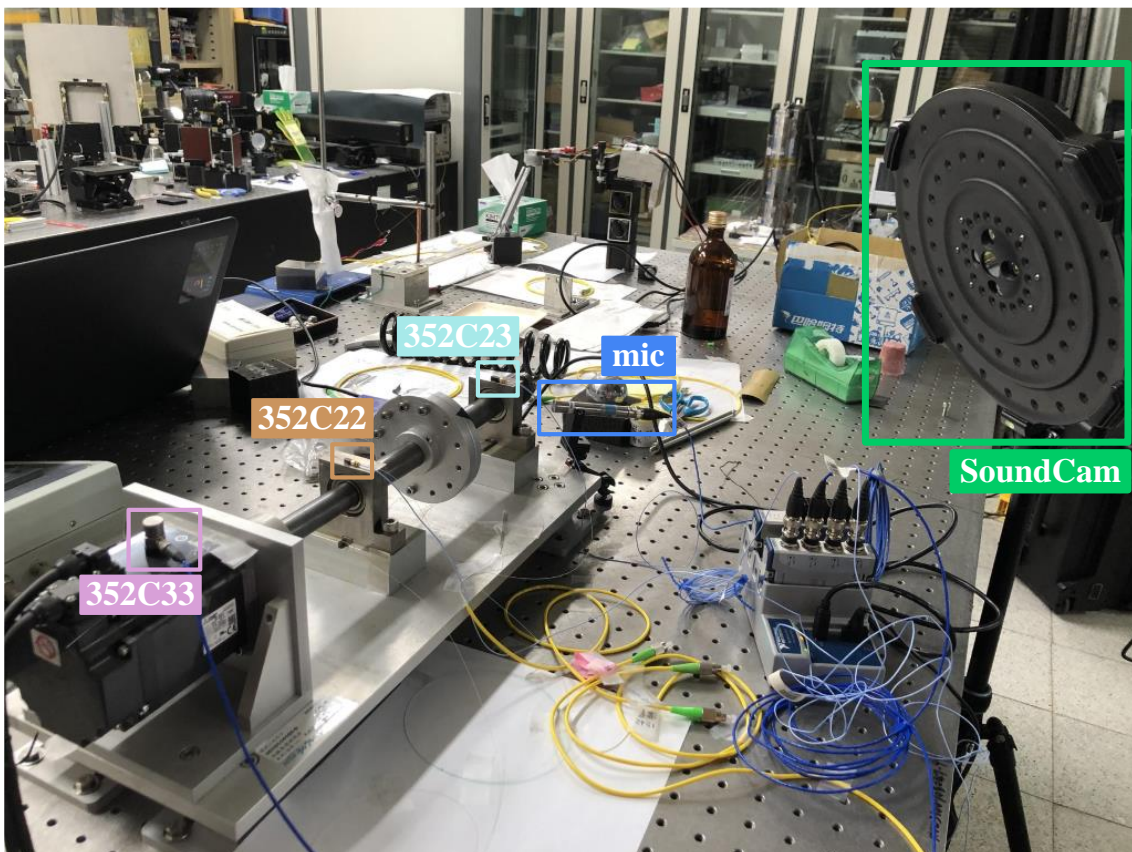


圖 6 - 25 加入加速規及聲學攝影機之實驗架設

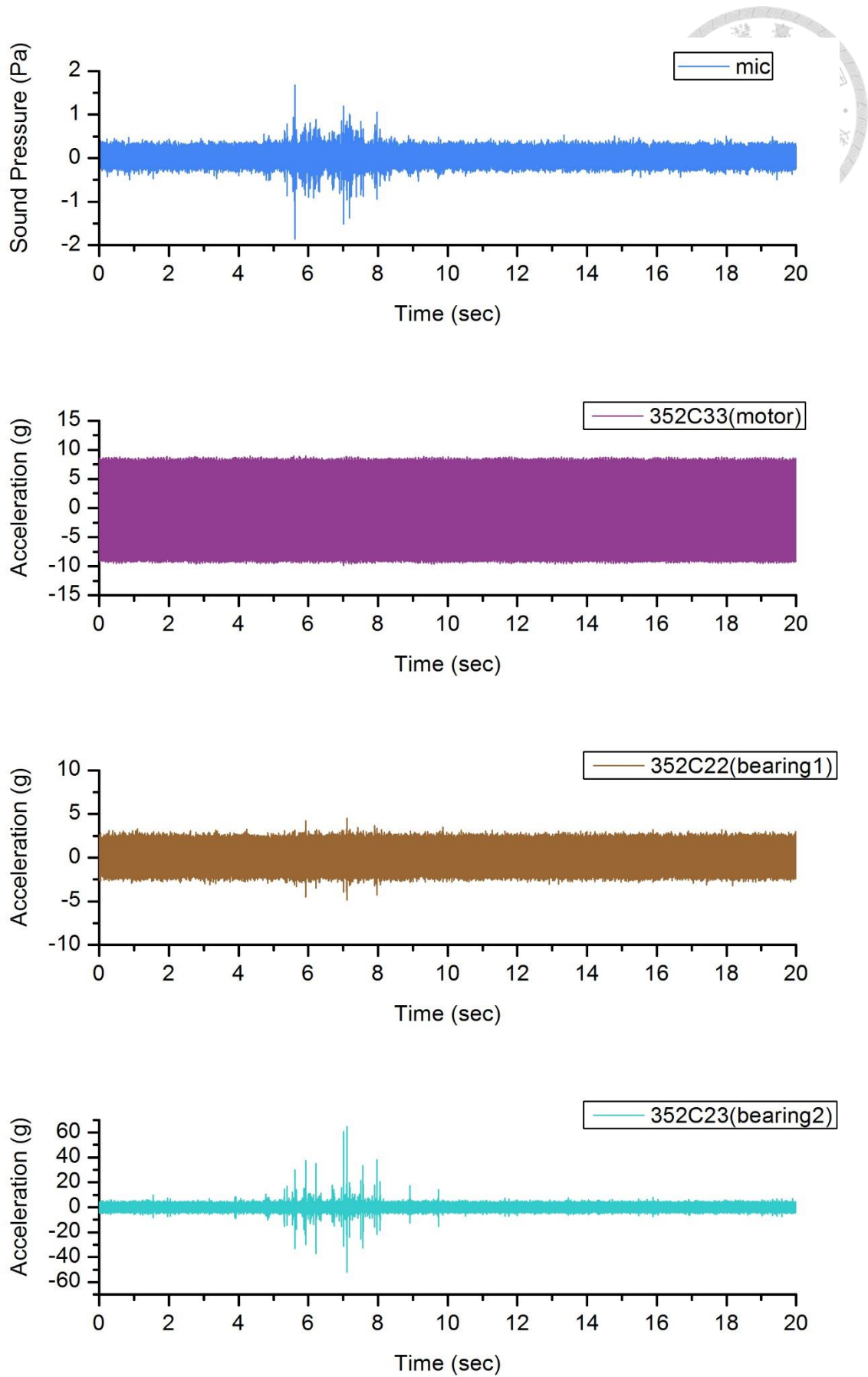


圖 6 - 26 含有瑕疵軸承之轉速 2200rpm 麥克風及加速規原始訊號

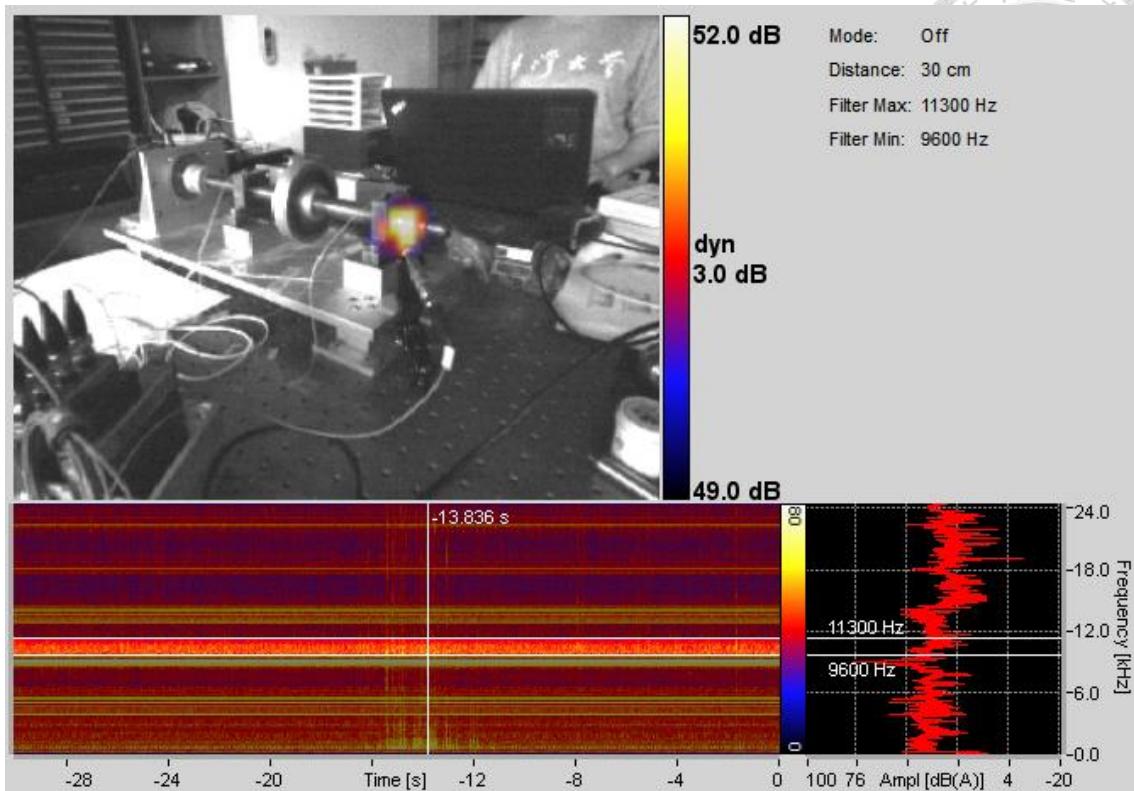


圖 6 - 27 異音發生時之聲學攝影機拍攝結果

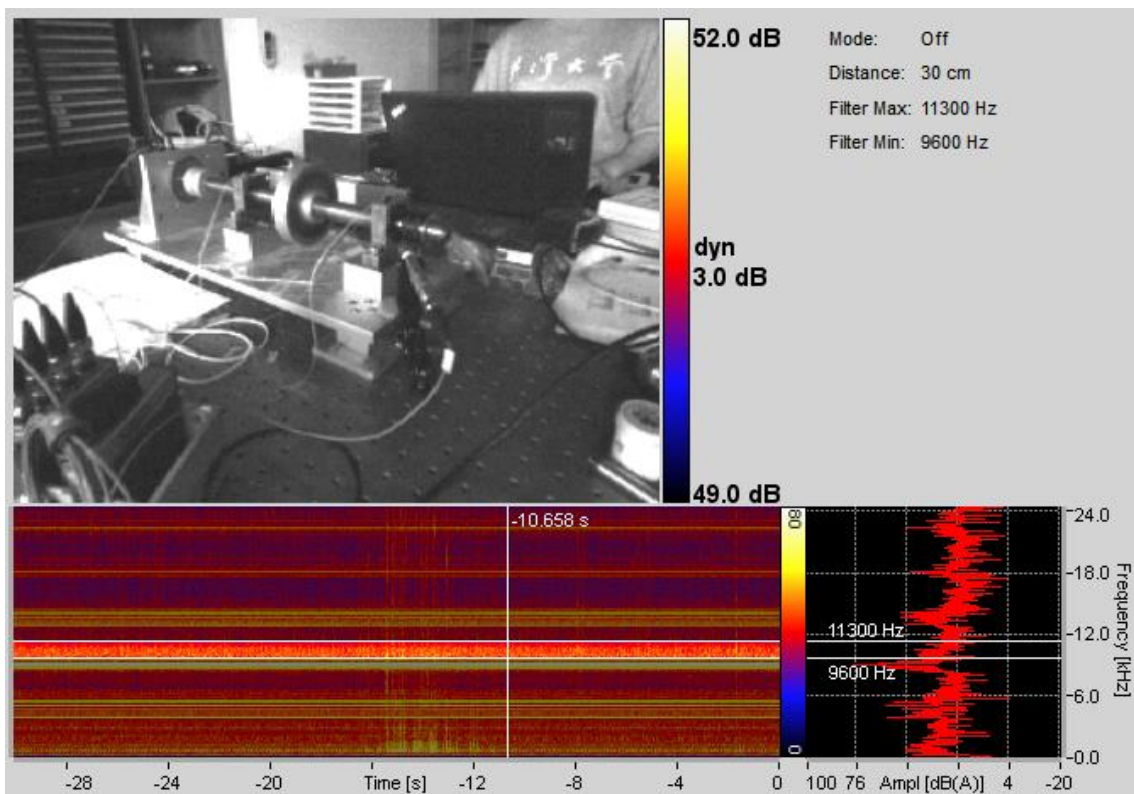


圖 6 - 28 無異音發生時之聲學攝影機拍攝結果



## 第七章 機械手臂之異音問題研究



機械手臂是模仿人類手臂功能的設備，具有多個關節，能夠精確並反覆完成無數次的正確規律運作。製造工業中許多危險而繁重的工作皆能以機器手臂取代人工，在大工廠中若手臂產生故障則可能動輒損失上億元，因此設備的維護及狀態檢測變得極為重要。本章將針對上銀科技生產的機械手臂進行量測分析，特別針對此產品固有的異音問題，應用聲音攝影機等量測工具做研究探討。

### 7.1 機械手臂系統構造

本章所研究的機械手臂為上銀科技所生產之 RT605-710-GB 關節式機械手臂，具有六個軸（如圖 7-1），其中本章要探討的第二軸（J2）是由馬達經由皮帶帶動減速機進行運動，將手臂外蓋拆下後的結構示意圖如圖 7-2。兩皮帶輪齒數皆為 26 齒，因此齒輪比為 1:1。運轉時透過程式設計動作，也能設定運轉速度，當設定為 100% 時代表 J2 馬達以最高轉速 3000rpm 運行，50% 為 1500rpm，以此類推。

### 7.2 問題描述

本章所要研究的異音問題為此產品共通的現象，並非個案：當設定 J2 以約 30% 速度（900rpm，旋轉頻率 15Hz）運轉時有異音發生，聽起來像是一連串短促敲擊的聲音。然而無法確切得知是哪一個部位所產生以及什麼原因導致，因此本章將使用聲學攝影機以及麥克風與加速規等工具進行量測與分析。

### 7.3 減速機

減速機是一種動力傳達機構，能夠將馬達等高速運轉的動力減速並得到較大的轉矩，從而進行更精確的控制。此機械手臂所使用的減速機為諧波齒輪傳動機構（Harmonic Drive），由日本企業 Harmonic Drive Systems Inc. 所製造，型號為 CSF-

32-100-2A-GR。諧波齒輪傳動機構是靠波發生器使彈性齒輪產生可控彈性變形，並與剛性齒輪相啮合來傳遞運動和動力的齒輪傳動，主要由波發生器、柔性齒輪和剛性齒輪三個基本構件組成，結構示意圖見圖 7 - 3。波產生器是將薄型滾珠軸承結合進橢圓狀凸輪外圈內的零件，軸承的內輪雖然固定在凸輪上，但外輪可透過滾珠產生彈性變形，安裝在輸入軸上。彈性齒杯為薄型杯狀的彈性金屬零件，在開口的外圈課有齒槽。杯狀底部稱之為隔板，安裝在輸出軸上。剛性齒輪為剛性環狀零件，在內圈刻有齒槽，齒輪數較彈性齒杯多兩齒，安裝在外殼作為固定元件。

其作動原理可參考圖 7 - 4，彈性齒杯會受波產生器拉寬為橢圓狀。隨著波產生器的旋轉，彈性齒杯與剛性齒輪啮合的位置會緩慢變化。由於彈性齒杯的齒槽數比剛性齒輪少 2 齒，因此當波產生器（輸入軸）完整旋轉一圈（360 度）後，彈性齒杯（輸出軸）會朝逆時針方向移動 2 片齒槽的距離，如此一來就能達到減速的效果。此諧波減速機的減速比為 1/100，在產品規格書中以倒數 100 表示。

諧波減速機轉動時會產生角傳動誤差，此傳動誤差導致的振動頻率若與減速機的固有頻率重合時將形成共振狀態。而由於諧波減速機結構上輸入軸旋轉一次會出現兩次傳動誤差，因此當輸入頻率為共振頻率的一半時就會產生共振。根據產品規格資料[44]，此減速機的共振頻率計算方式如下式：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (7.1)$$

其中  $K$  為彈簧常數， $J$  為負載慣性。彈簧常數定義為轉矩對扭轉角曲線的斜率，如圖 7 - 5，可發現其斜率會隨著轉矩大小而改變，並非定值，因此產品規格書依照轉矩大小以  $T_1$ 、 $T_2$  分界為三個區間，對應三種彈簧常數，當轉矩為  $0 \sim T_1$  時，彈簧常數為  $K_1$ ，轉矩介於  $T_1 \sim T_2$  之間時，彈簧常數為  $K_2$ ，轉矩為  $T_2$  以上時，彈簧常數為  $K_3$ 。參考規格資料（圖 7 - 6），得此減速機之彈簧常數之  $K_1$ 、 $K_2$  及  $K_3$  分別為  $6.4 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$ 、 $11 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$ 、 $12 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$ 。而此機械手臂的負載慣

性約為  $2.238\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，將負載慣性與三種彈簧常數代入式(7.1)，可得出三種彈簧常數對應的共振頻率分別為 27.54Hz、35.28Hz、36.85Hz，推算減速機輸入頻率應為 13.77Hz、17.64Hz、18.43Hz。再推算此時的馬達輸出頻率，因 J2 馬達與減速機皮帶輪的齒輪比為 1:1，因此馬達輸出頻率同樣為 13.77Hz、17.64Hz、18.43Hz，換算成程式設定的速度百分比則為 27.54%、35.28%、36.85%。也就是說當 J2 馬達轉速為 27.54%~36.85%時，減速機都有可能產生共振，而如前一節所述，異音發生時的 J2 馬達轉速為約 30%，正好在導致減速機產生共振的區間，因此推測此異音可能與減速機共振有關。

## 7.4 使用聲學攝影機確認產生異音之部位

本小節使用聲學攝影機拍攝 J2 運轉過程，確定發出異音的部位。觀察手臂內部構造後，確認異音應是由手臂左側的部件產生，因此將聲學攝影機架於手臂左側，如圖 7-7。

### 7.4.1 電路板之噪音

將機械手臂開關打開後，還要再將手臂「激磁」馬達才會作動。而在操作機械手臂的過程中，發現當手臂激磁後就會出現一明顯的高頻聲音，透過聲學攝影機拍攝結果如圖 7-8，可發現此噪音來自第四臂內部的電路板(見圖 7-9)，約為 9kHz。後續實驗結果都有出現此一聲音。推測此現象是因電路通電後在電容電感等電子元件產生電磁力，造成元件共振進而產生噪音。

### 7.4.2 手臂動作設計與實驗結果

為了確定產生異音之部位，本實驗設計手臂只動 J2，由 +60° 至 -45° 間(如圖 7-10)以速度 20%、30%、40%、50%各往返一次，每次動作中間休息一秒。為避開前述電路板的 9kHz 噪音影響，聲學攝影機觀察頻率設為 9800~14600Hz。拍攝結果如圖 7-11，可發現 J2 轉速在有異音的 30%時，時頻譜明顯與其他轉速不同，此時聲源為 J2 馬達的皮帶輪。將觀察頻率改為 4000~7200Hz，拍攝結果如圖 7-



12 也同樣觀察到異音來自 J2 馬達的皮帶輪。

## 7.5 使用聲學攝影機確認異音產生的轉速區間

由前一節的結果可知 J2 在速度 40% 及 50% 時是沒有異音的，因此推測此異音超過一定轉速就不會出現。為了確定異音產生的轉速區間，本次實驗針對 30% 附近的轉速，設定由 +60° 至 -45° 以速度 20%、21%、22%、...、39%、40% 各往返一次，受限於聲學攝影機錄製時長的限制而分兩段拍攝。實驗結果如圖 7-13 及圖 7-14 所示，發現異音的出現是隨著轉速增加而漸漸變得明顯，在轉速 26% 至 34% 時異音最為明顯。若將馬達瞬間轉速與時間作圖並把轉速 26% 到 34% 標示起來，如圖 7-15，接下來將以此圖觀察 J2 馬達轉速是否處於此區間時就會產生異音。

接下來重新設計手臂動作，將轉速設定為 27%，並將加速度從原本的 100% 調降以拉長馬達加速時間，使馬達轉速變化如圖 7-16 (a) 至 (c)，加速度分別設定為 9%、15% 及 100%，以加速時間由長至短三種不同行程使馬達轉速處於異音區間的時間由短到長。實驗拍攝結果則如圖 7-17，可發現異音出現的時間佔整個行程的時長越來越長。

而後再次調整手臂動作，讓 J2 馬達轉速通過並超過有異音的區間。因此將速度設定為 40%，並稍微拉長馬達加速時間（設定加速度 15%），使馬達轉速變化如圖 7-18，預測應只有在行程頭尾才出現異音。實驗拍攝結果如圖 7-19 所示，可發現異音出現時間點與預期相符。若再次延長馬達加速時間（設定加速度 11%），使馬達轉速變化如圖 7-20，讓轉速在有異音的區間停留更久，實驗拍攝結果如圖 7-21 所示，可發現異音出現時間比較晚也變長了一點。

透過以上種種不同的動作測試，得到的結果都與繪製的轉速對時間圖有良好的對應關係，因此可以確定異音出現的轉速區間約為 26% 至 34%。

## 7.6 J2 馬達於各轉速之振動與噪音分析

本小節使用麥克風針對 J2 馬達於 30% 轉速時產生之異音做分析，並與其他無



異音的轉速做比較。同時使用加速規(352C22)黏在第六臂上，以觀察異音是否會造成夾爪端異常振動，另一個加速規(352C33)則黏在 J2 減速機上，比較馬達與減速機的訊號。實驗架設如圖 7-22、圖 7-23 及圖 7-24 所示。

### 7.6.1 量測結果

量測結果如圖 7-25 所示，第 0 至 5 秒為 J2 馬達緩慢轉至  $+60^\circ$  前的準備動作，第 5 至 12.5 秒 J2 馬達以轉速 20%往返各一次，其後第 13.5 至第 19 秒、第 20 至 25 秒及第 26 至 30 秒為 J2 馬達分別以轉速 30%、40%、50%往返各一次，最後是回到原點的動作。

從時域訊號就可以發現 J2 馬達在轉速 30%出現異音時，其聲壓明顯大於其他轉速，而減速機與夾爪端的加速規量測到的振動訊號雖然在 30%轉速的時候稍大一點，但差異程度並不如聲壓訊號那樣明顯。

### 7.6.2 訊號分析與討論

將麥克風訊號做短時距傅立葉轉換 (Short-time Fourier transform, STFT) 後結果如圖 7-26，可發現如同 7.4.2 之結果，J2 馬達轉速 30%時出現多個頻率峰群，與其他轉速明顯不同，乃異音產生之效果。圖 7-27 為黏於減速機的加速規 352C33 訊號之 STFT 結果，同樣在轉速 30%時在差不多的頻段量值較大，而黏於夾爪端的加速規 352C22 訊號之 STFT 結果 (見圖 7-28) 則顯示頻譜於 3000Hz 以上幾乎沒有訊號，量值較大的訊號集中於 500Hz 以下，並且轉速 30%時與其他轉速並無顯著差異。

此外由時頻譜能判斷同轉速往返差異不大，因此接下來僅使用各轉速前半段，也就是 J2 馬達由  $+60^\circ$  轉至  $-45^\circ$  的動作訊號來做頻譜分析，並且為了擷取馬達穩定運轉的訊號，選擇去掉頭尾馬達加減速的部分。而由於隨著轉速增加，手臂運動時間也會縮短，因此轉速 20%時，取中段 2 秒鐘的訊號 (約為第 5.39 至 7.39 秒)，轉速 30%取中段 1.5 秒鐘 (約為第 13.8 至 15.3 秒)，轉速 40%取中段 1 秒鐘 (約為第 20.49 至 21.49 秒)，轉速 50%取中段 0.8 秒鐘 (約為第 26.19 至 26.99 秒)。

將以上訊號做快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 進行頻譜分析，圖 7-29 為各轉速麥克風訊號之頻譜。首先可以看到每個轉速都有出現約 8928Hz 及 17856Hz 的頻率 (以紫色標示)，即是 7.4.1 小節提到的電路板噪音及其倍頻。以桃紅色標示的頻率為齒輪嚙合頻率 (Gear Mesh Frequency, GMF) 及其倍頻。齒輪嚙合頻率為齒數與轉速之乘積，亦為齒輪機構固有頻率。例如 J2 馬達轉速為 20% 時換算旋轉頻率為 10Hz，馬達與減速機之皮帶輪齒數皆為 26 齒，因此此時的齒輪嚙合頻率為 260Hz，而轉速 30%、40% 及 50% 時的齒輪嚙合頻率以此類推分別為 390Hz、520Hz 及 650Hz。最後觀察轉速 30% 之頻譜，可發現如同 STFT 結果，出現多個頻率峰群。

黏於減速機上的加速規 (352C33) 振動訊號 FFT 結果如圖 7-30，大致上與麥克風頻譜類似，但是轉速 30% 在 9000Hz 至 15000Hz 間出現的頻率峰群，到了轉速 40% 與 50% 都沒有消失。觀察低頻段 (見圖 7-31)，也同樣出現了齒輪嚙合頻率及其倍頻。

而夾爪端的加速規 (352C22) 振動訊號 FFT 結果如圖 7-32，由於從時頻譜初步判斷量值較大的頻率集中於 500Hz 以下，因此僅呈現 0~500Hz 部分的頻譜。可發現馬達旋轉頻率的偶數倍皆有較大的振幅。

## 7.7 本章結論

透過聲學攝影機量測可以確定發出異音的部位，可釐清問題主要產生之處，在使用麥克風時就知道要架在何處。經過不同實驗後得出只有在 J2 馬達轉速為約 26% 至 34% 時會發出異音，與造成減速機共振的馬達轉速範圍具相關性，但是異音卻是由馬達附近所發出。將各轉速的聲音及振動訊號錄下並做分析，首先從原始訊號即可發現 J2 馬達轉速為 30% 時不管是麥克風聲壓還是加速規的振動訊號，都比其他轉速時的振幅來的大，尤其麥克風訊號差異最為明顯，即是我們人耳所聽到的異音。而將麥克風訊號轉到頻域做分析後，可看出此異音分布頻帶很廣，從中低頻到高頻出現了好幾個頻率峰群，同時也量測到了齒輪嚙合頻率以及電路板的高頻

噪音。減速機的振動訊號也得到類似的結果，夾爪端的頻域訊號則是集中在低頻，馬達旋轉頻率的偶數倍有較大的振幅。

由於機械手臂是一個複雜的結構，也無法任意將其拆卸，因此在此僅能呈現異音的聲源及頻譜特徵，一開始因為轉速區間的對應性猜測可能是由減速機共振所造成，此外上銀科技方面表示先前曾經測試過若將皮帶移除，發現 J2 馬達以 30% 速度運轉時並沒有出現異音，因此關於此異音最可能的解釋為減速機共振時牽動皮帶一起振動而產生聲音。

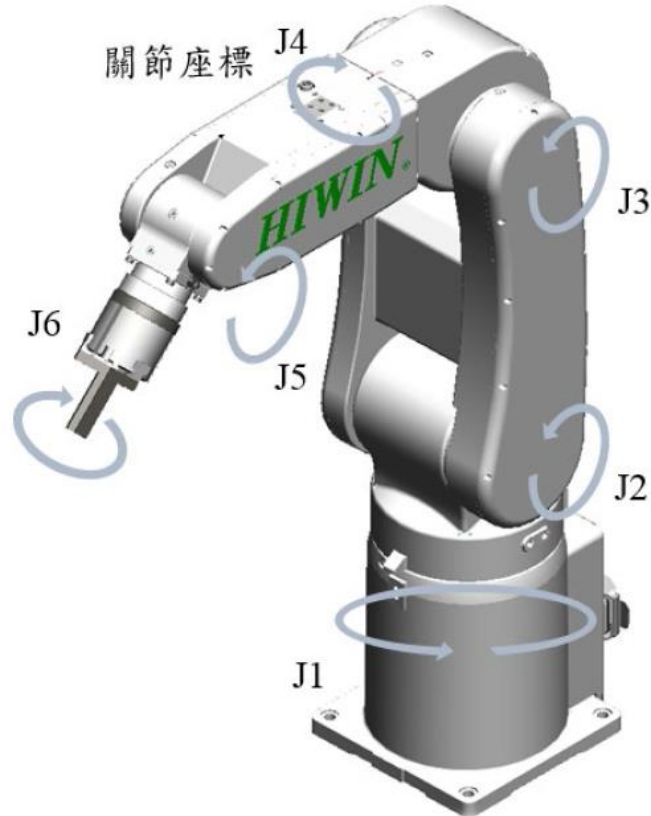


圖 7-1 機械手臂的構成

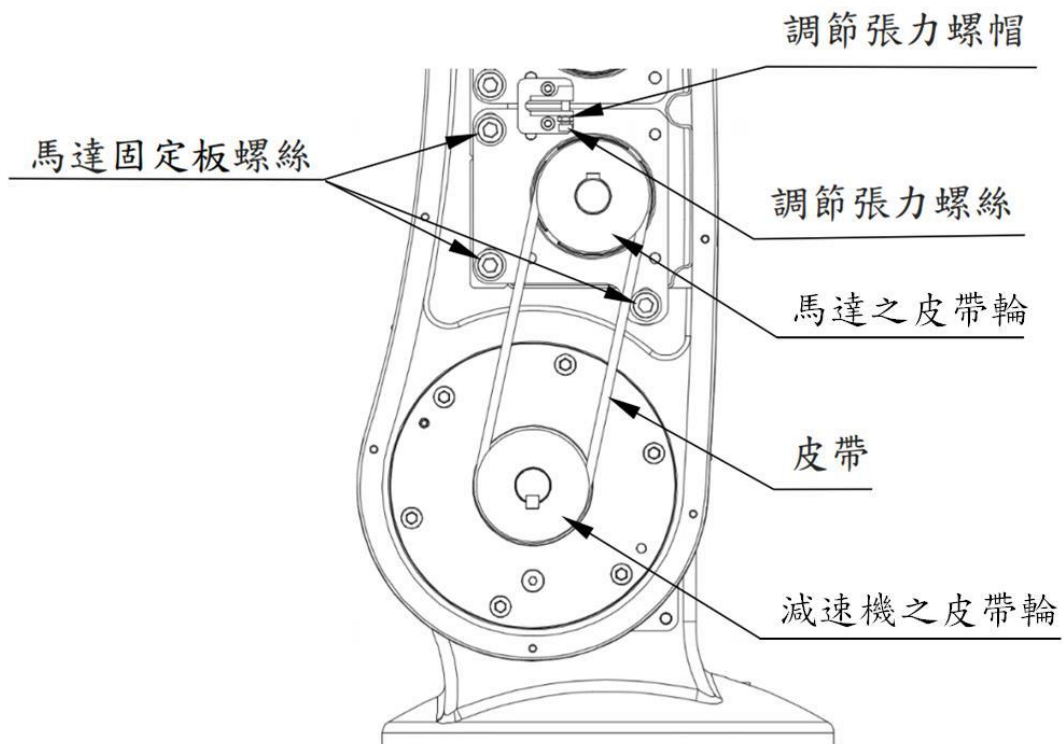


圖 7-2 第二軸結構示意圖

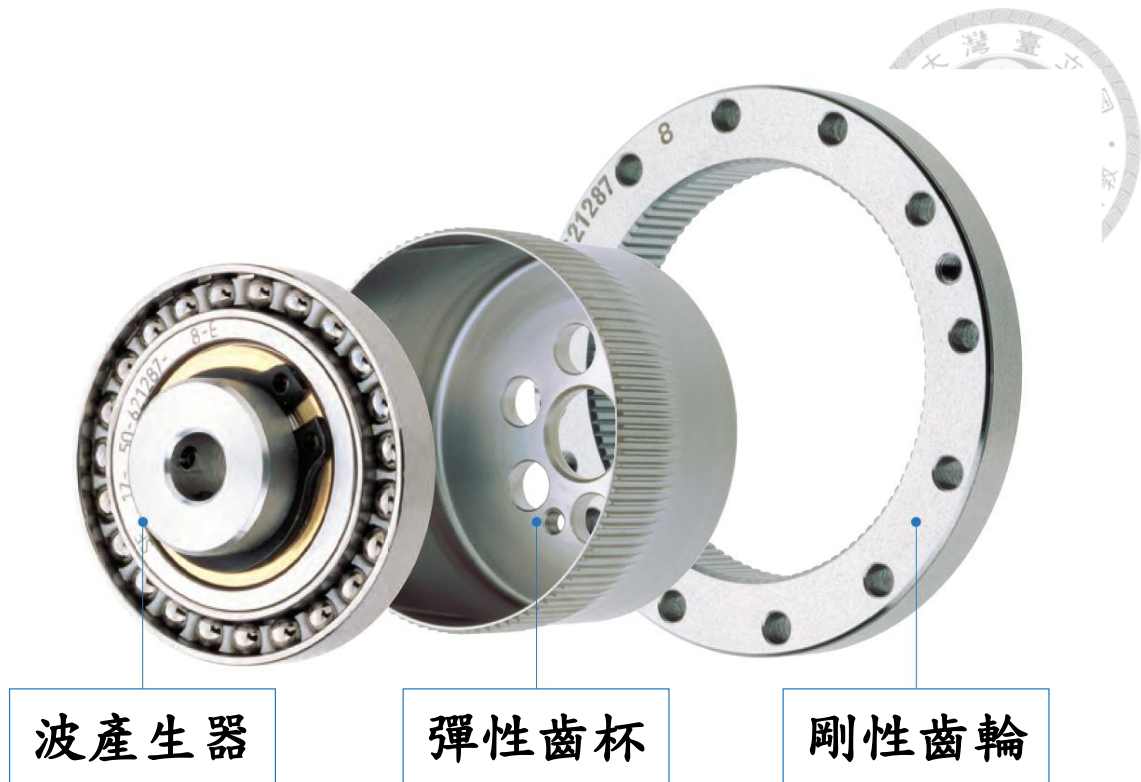


圖 7-3 諧波齒輪減速機結構示意圖

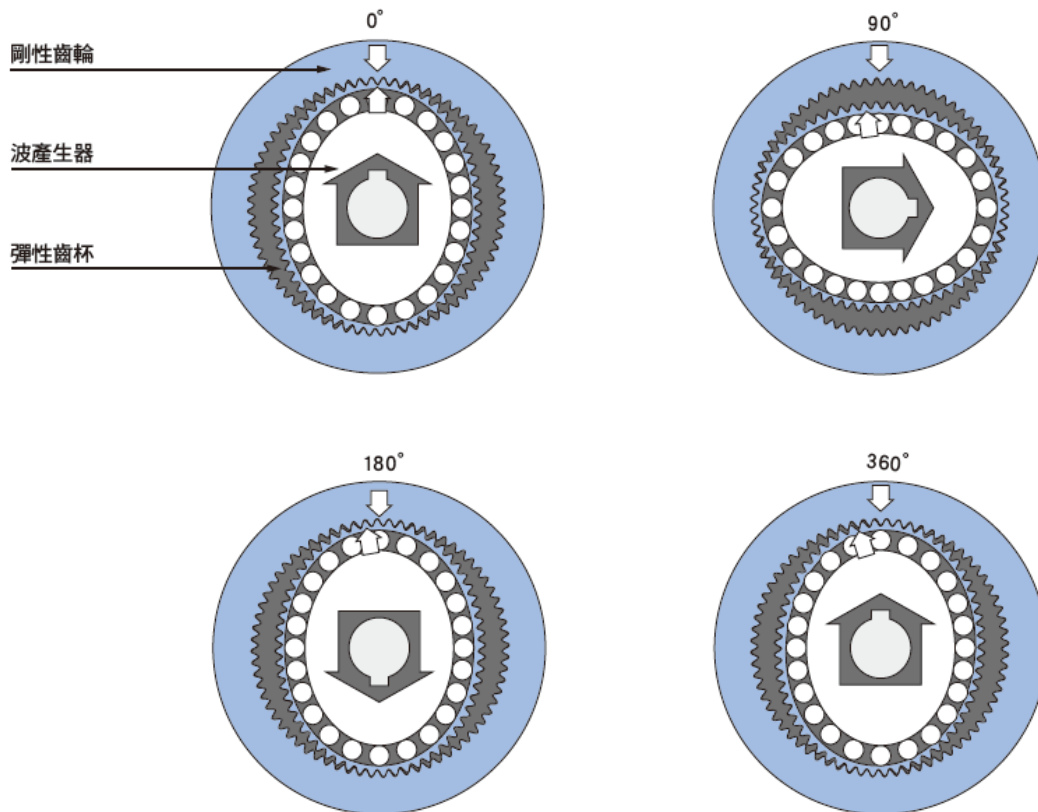


圖 7-4 諧波齒輪減速機傳動原理

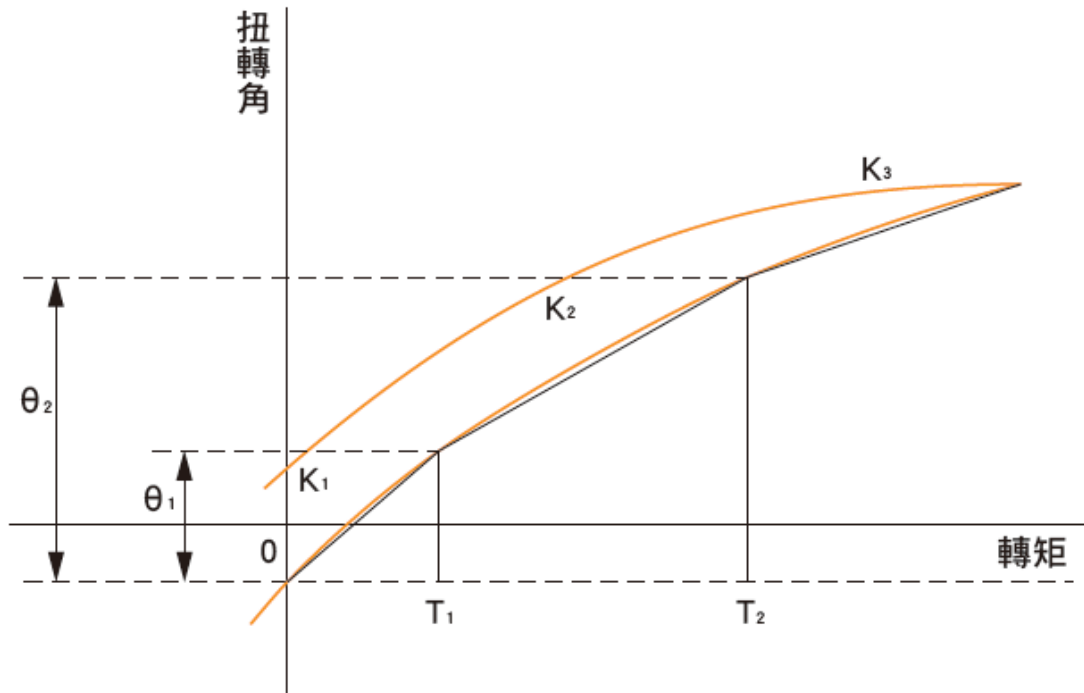


圖 7 - 5 轉矩—扭轉角線圖

記號		型號	8	11	14	17	20	25	32	40	45
		T <sub>1</sub>	Nm	0.29	0.80	2.0	3.9	7.0	14	29	54
kgfm	0.03		0.082	0.2	0.4	0.7	1.4	3.0	5.5	7.8	
T <sub>2</sub>	Nm	0.75	2.0	6.9	12	25	48	108	196	275	
	kgfm	0.077	0.2	0.7	1.2	2.5	4.9	11	20	28	
減速比 80 以上	K <sub>1</sub>	X10 <sup>4</sup> Nm/rad	0.091	0.27	0.47	1	1.6	3.1	6.7	13	18
		kgfm/arc min	0.027	0.080	0.14	0.3	0.47	0.92	2.0	3.8	5.4
	K <sub>2</sub>	X10 <sup>4</sup> Nm/rad	0.10	0.34	0.61	1.4	2.5	5.0	11	20	29
		kgfm/arc min	0.031	0.10	0.18	0.4	0.75	1.5	3.2	6.0	8.5
	K <sub>3</sub>	X10 <sup>4</sup> Nm/rad	0.12	0.44	0.71	1.6	2.9	5.7	12	23	33
		kgfm/arc min	0.036	0.13	0.21	0.46	0.85	1.7	3.7	6.8	9.7
	θ <sub>1</sub>	X10 <sup>-4</sup> rad	3.2	3.0	4.1	3.9	4.4	4.4	4.4	4.1	4.1
		arc min	1.1	1.0	1.4	1.3	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4
	θ <sub>2</sub>	X10 <sup>-4</sup> rad	8	6	12	9.7	11.3	11.1	11.6	11.1	11.1
		arc min	2.6	2.2	4.2	3.3	3.9	3.8	4.0	3.8	3.8

※ 本表數值為參考值。下限值約為標示數值的 80%。

圖 7 - 6 Harmonic Drive CSF 系列減速機彈簧常數對照表



圖 7-7 聲學攝影機實驗架設

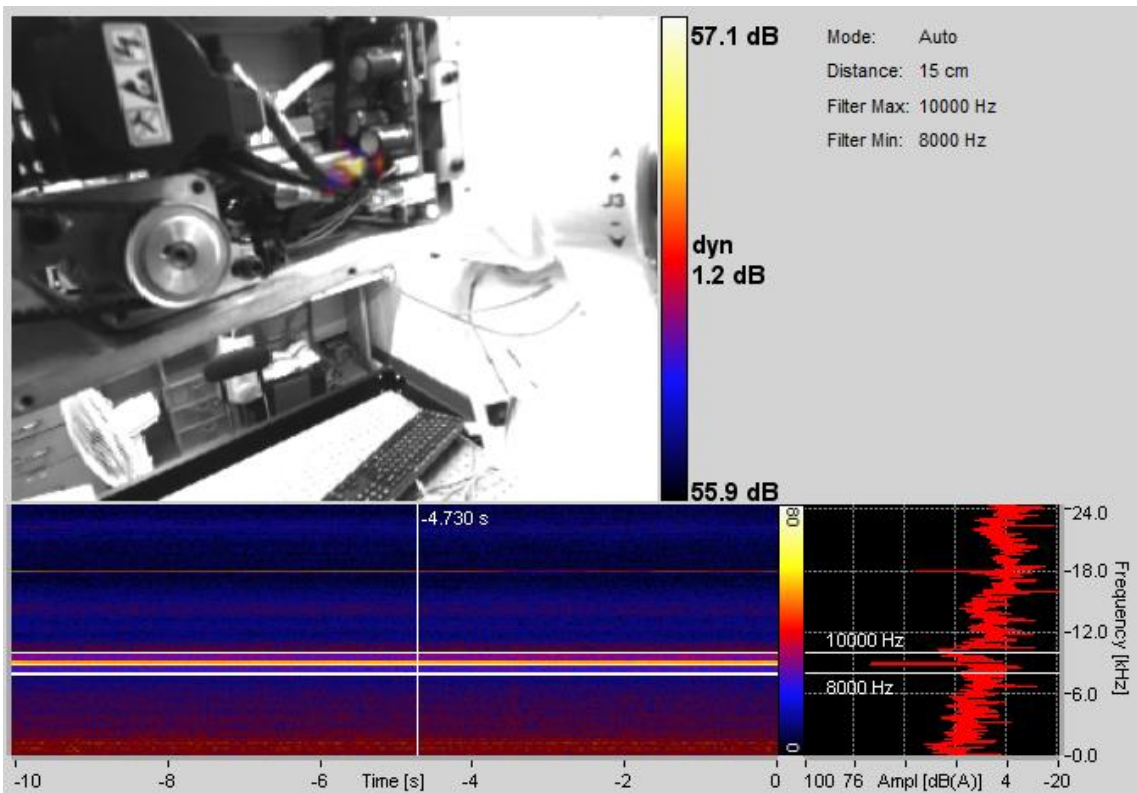
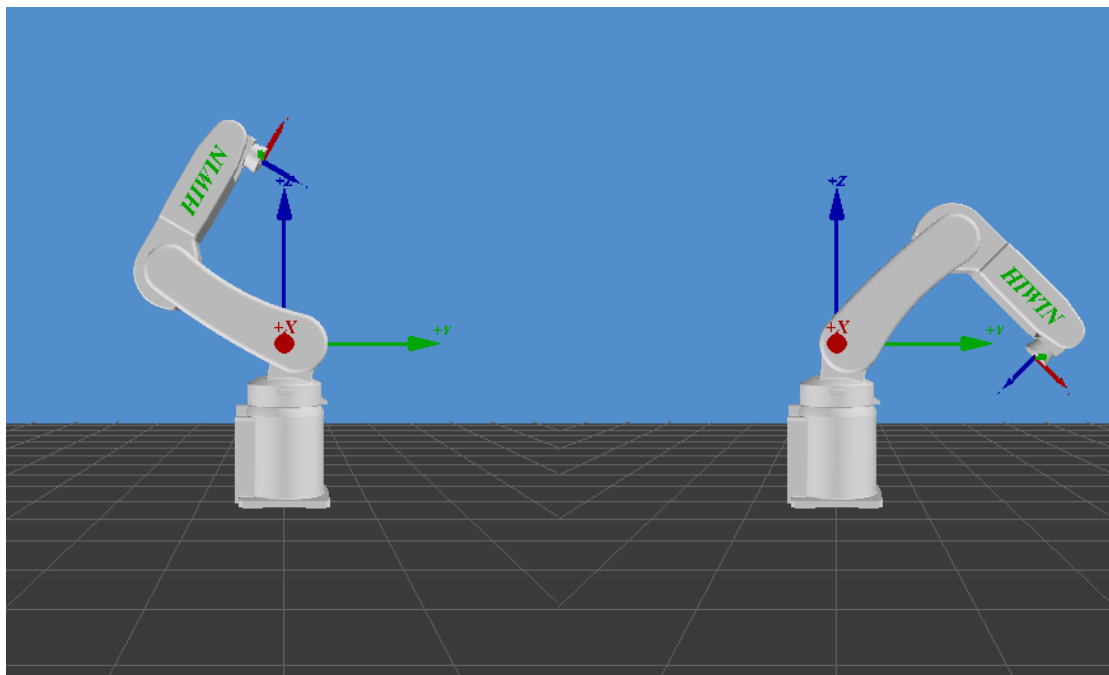


圖 7-8 電路板產生之約 9kHz 噪音及其倍頻



圖 7-9 機械手臂第四臂



(a) J2 於  $+60^\circ$

(b) J2 於  $-45^\circ$

圖 7-10 手臂動作示意圖

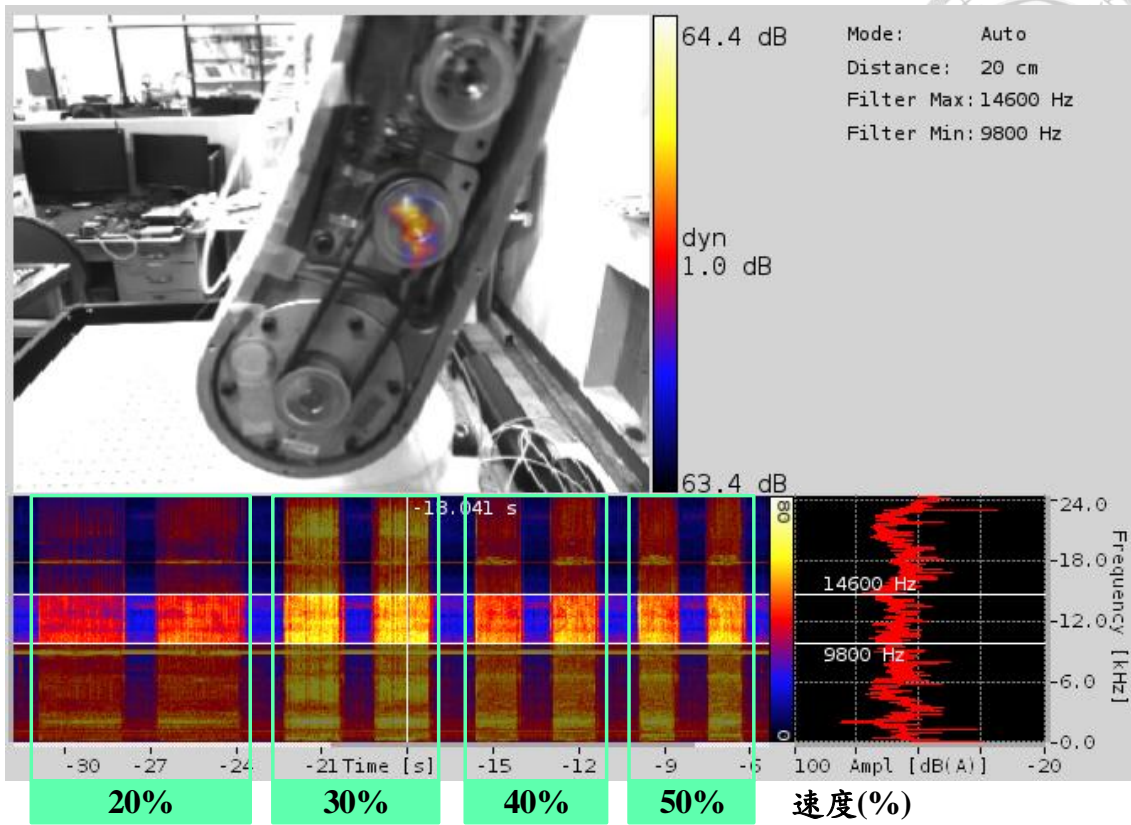


圖 7 - 11 聲學攝影機拍攝結果 (觀察頻率 9800~14600Hz)

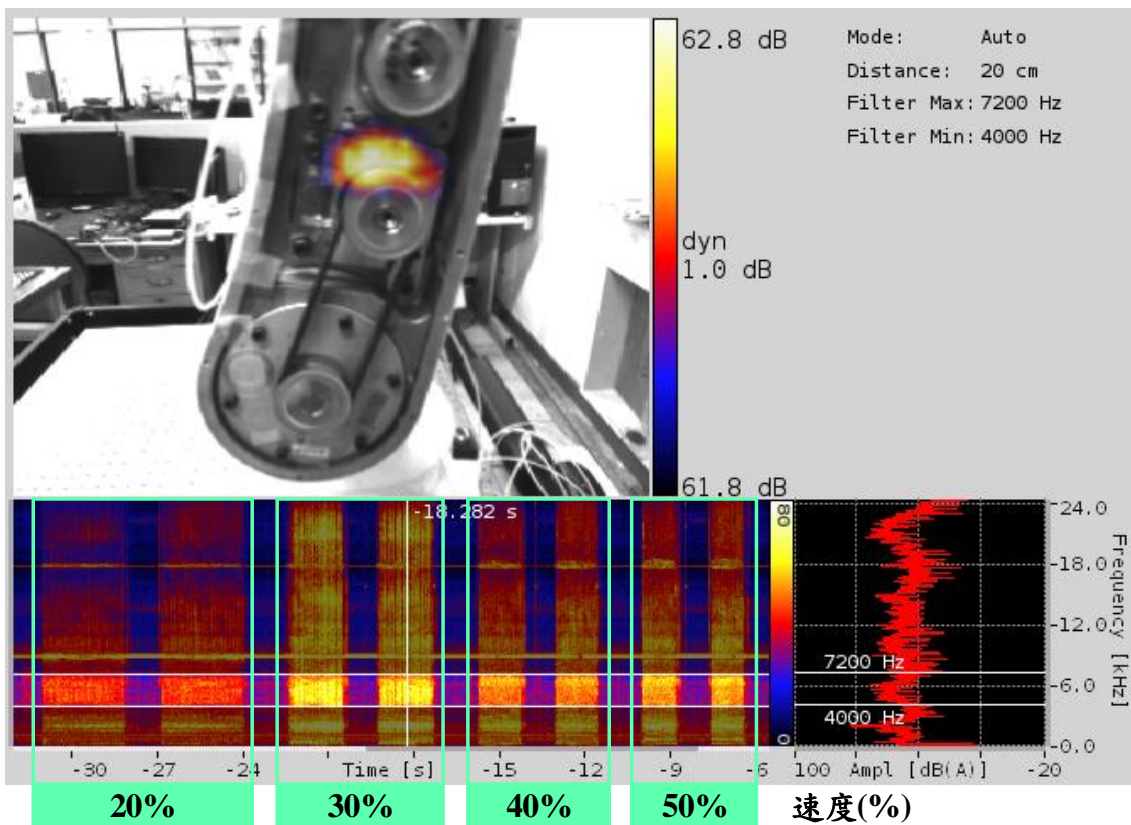


圖 7 - 12 聲學攝影機拍攝結果 (觀察頻率 4000~7200Hz)

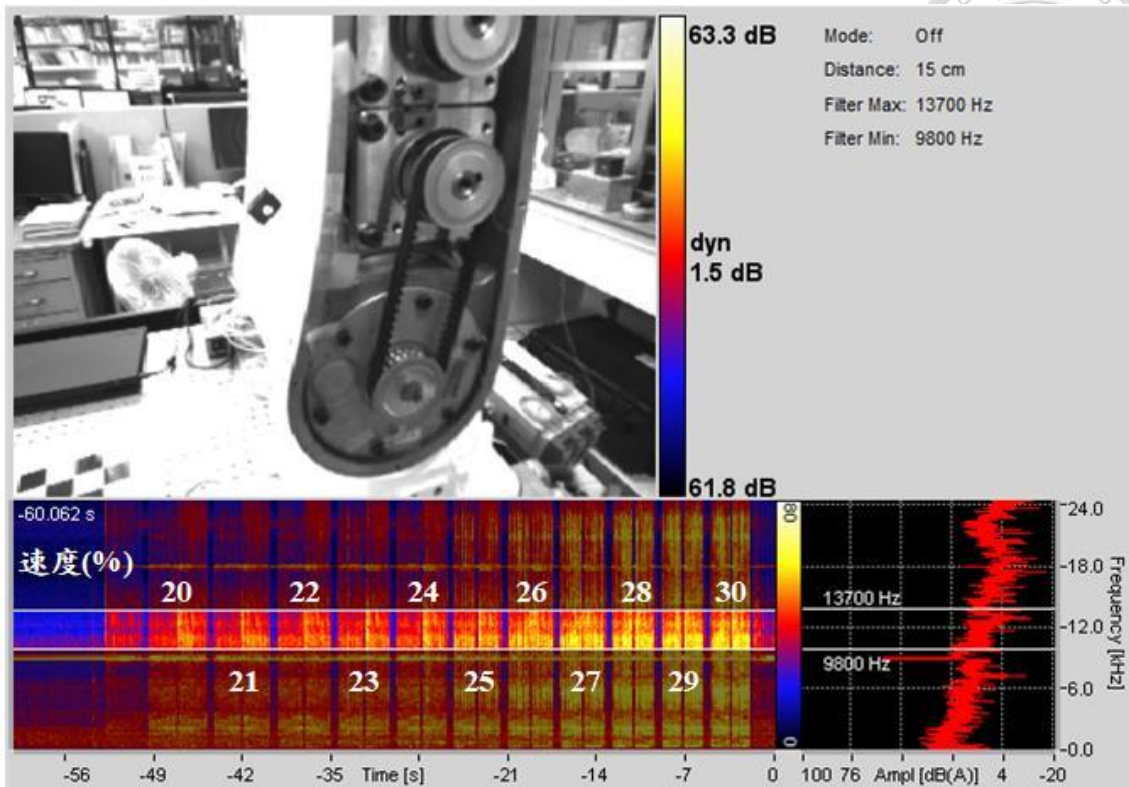


圖 7 - 13 J2 馬達轉速 20% ~ 30% 拍攝結果

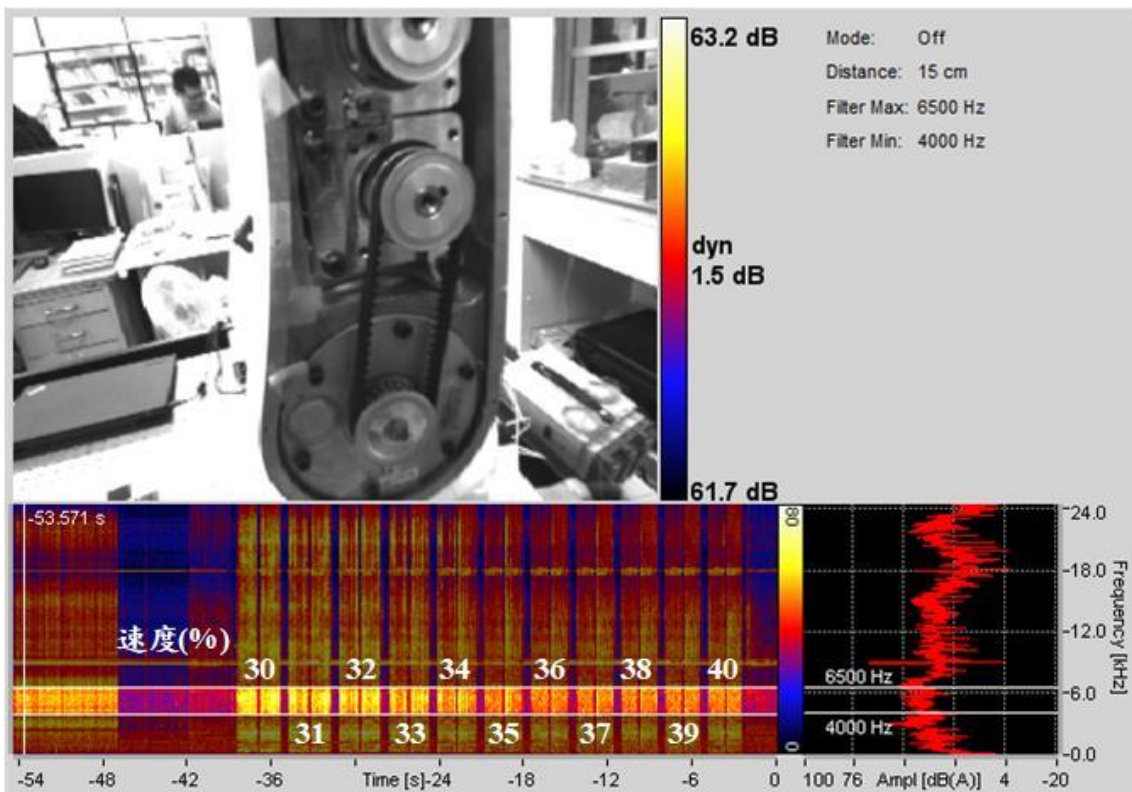


圖 7 - 14 J2 馬達轉速 30% ~ 40% 拍攝結果

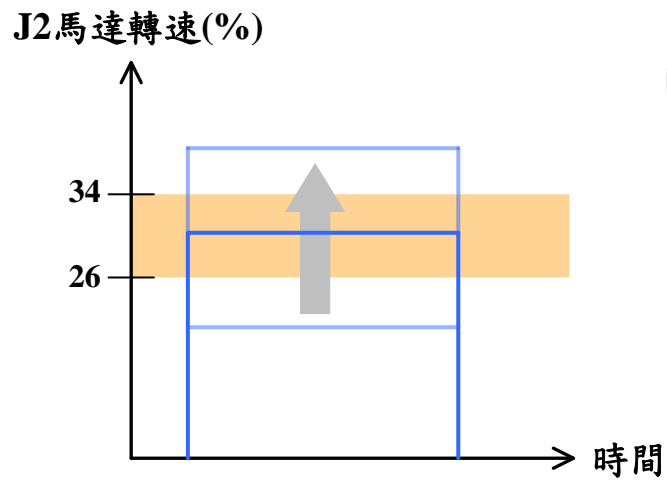
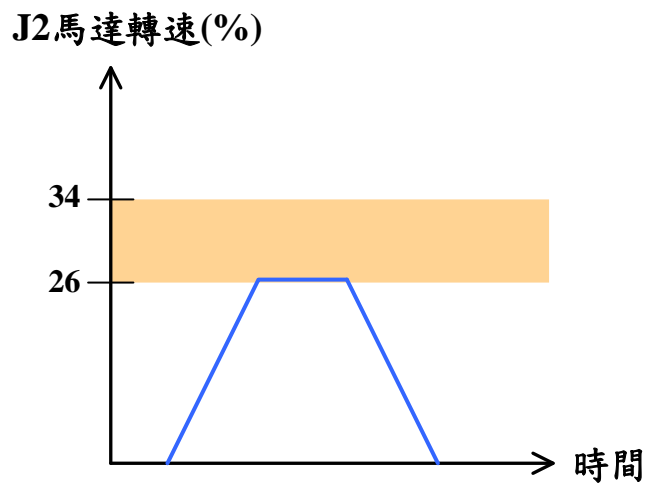
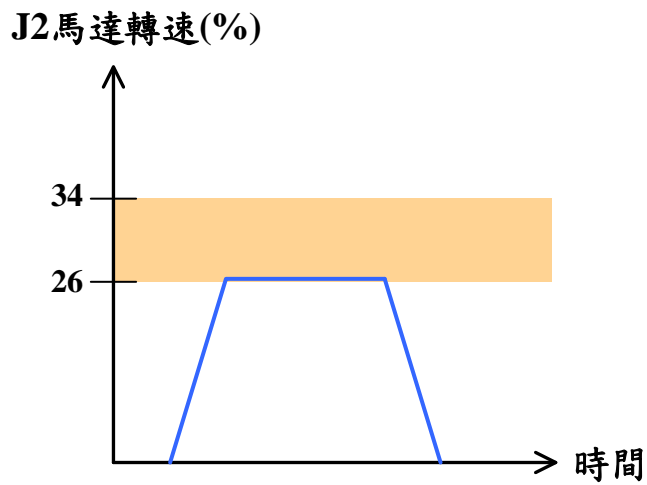


圖 7 - 15 馬達轉速對時間圖



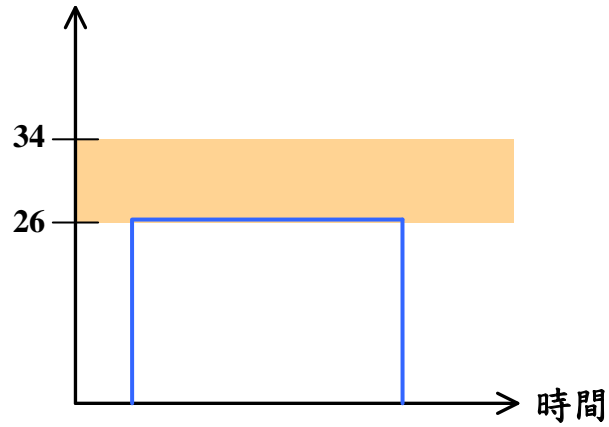
(a) 加速度 9%



(b) 加速度 15%



J2馬達轉速(%)



(c) 加速度 100%

圖 7 - 16 拉長加速時間 (a) 加速度 9% (b) 加速度 15% (c) 加速度 100%

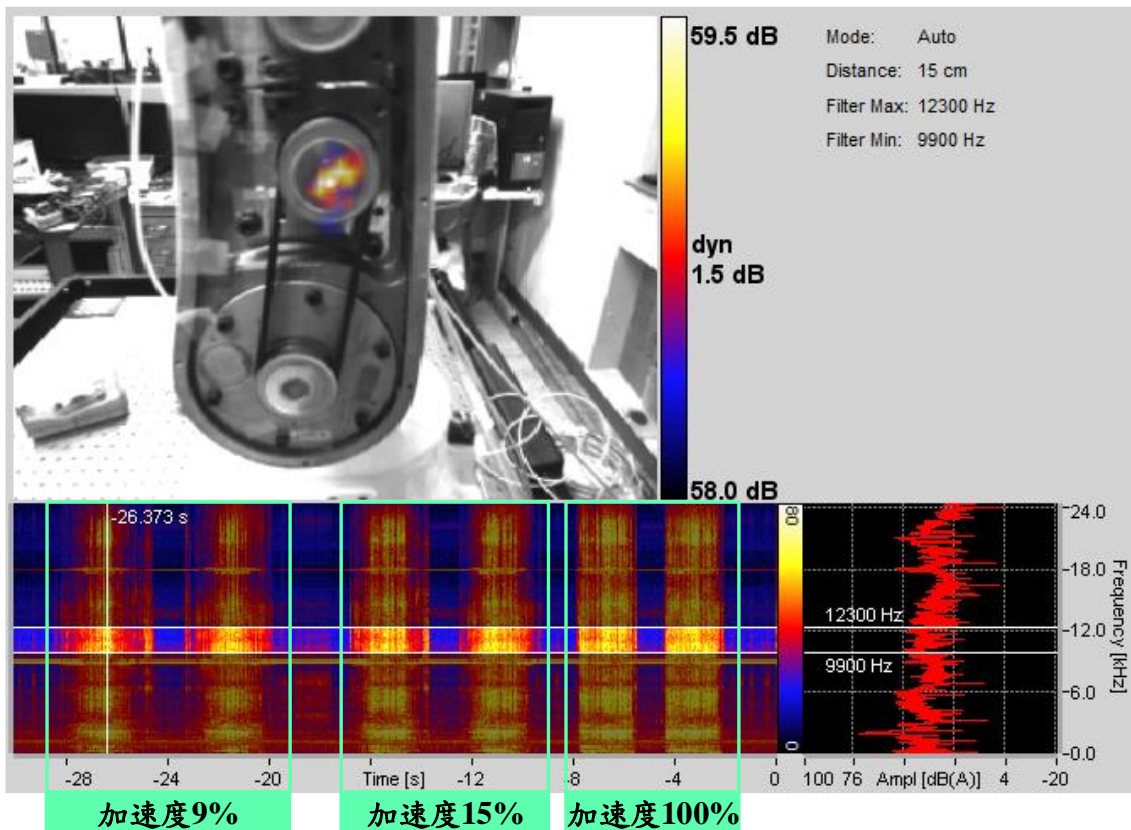


圖 7 - 17 設定不同加速度拍攝結果



J2馬達轉速(%)

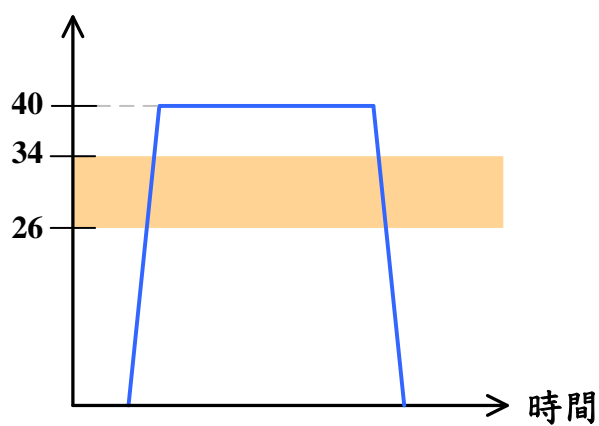


圖 7 - 18 設定轉速 40%，加速度 15%之轉速對時間圖

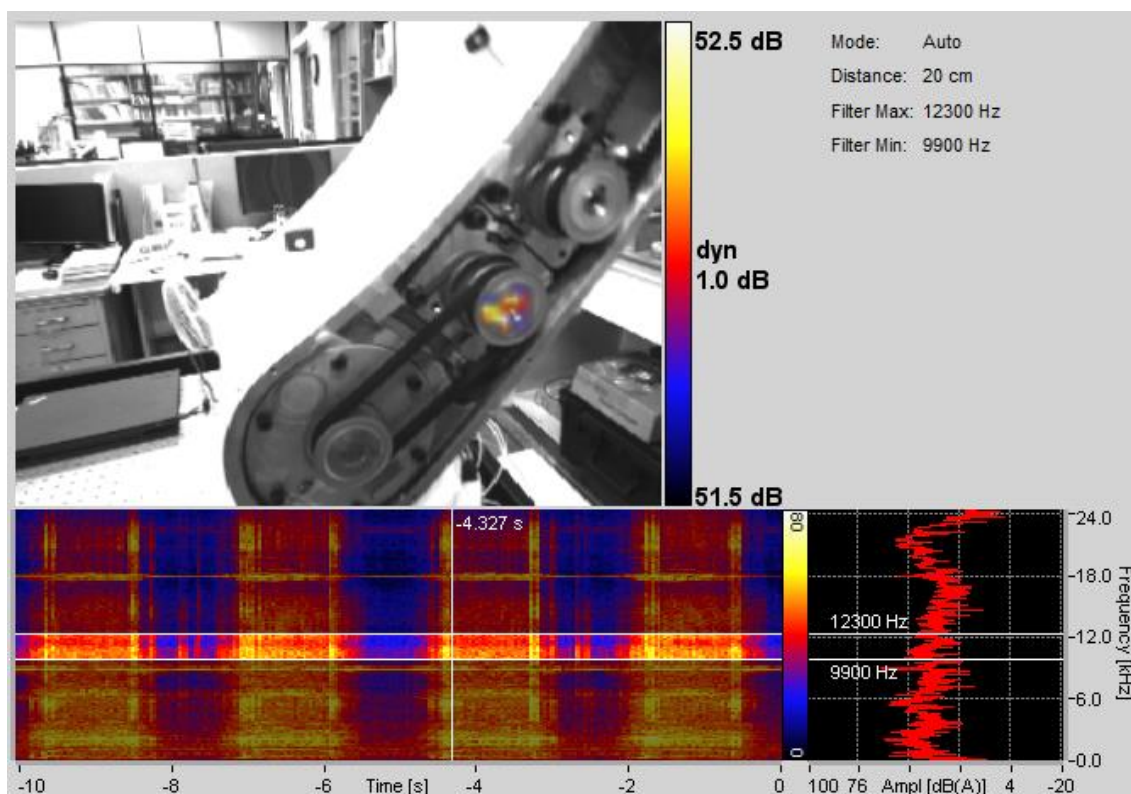


圖 7 - 19 設定轉速 40%，加速度 15%之拍攝結果



J2馬達轉速(%)

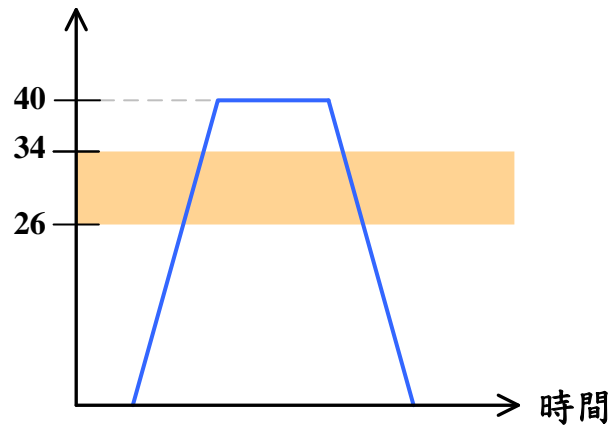


圖 7 - 20 設定轉速 40%，加速度 11%之轉速對時間圖

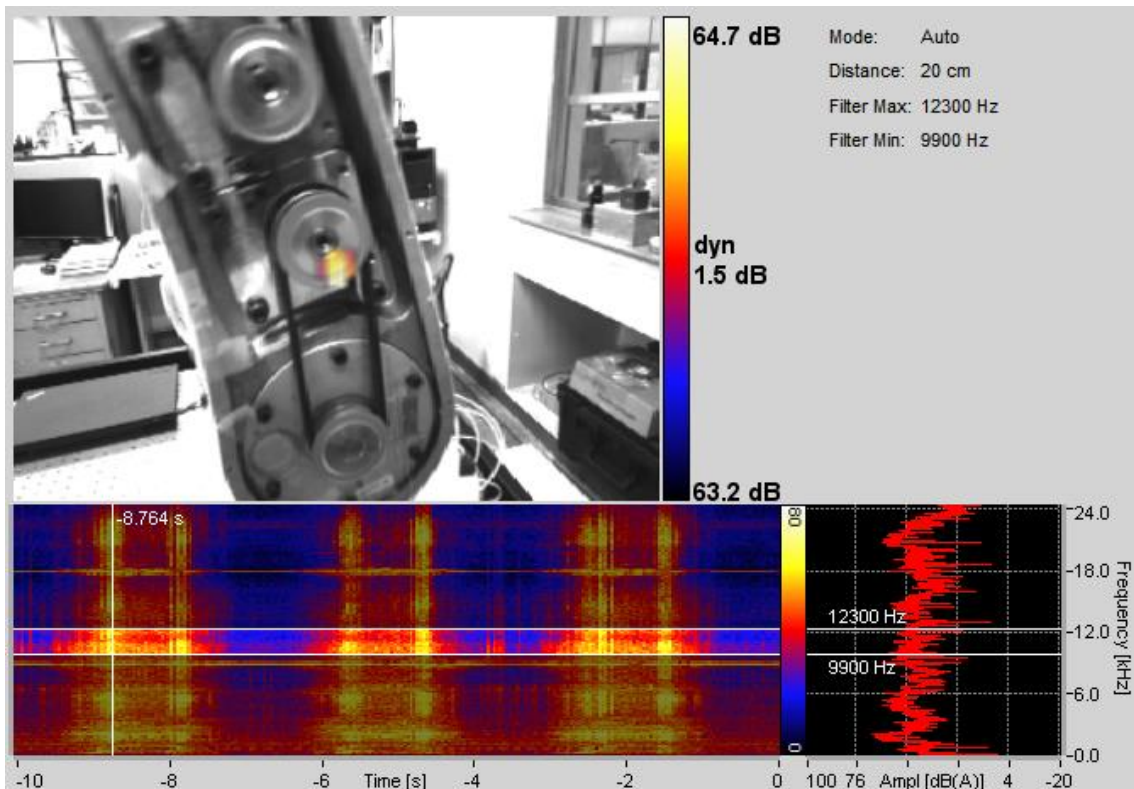


圖 7 - 21 設定轉速 40%，加速度 11%之拍攝結果

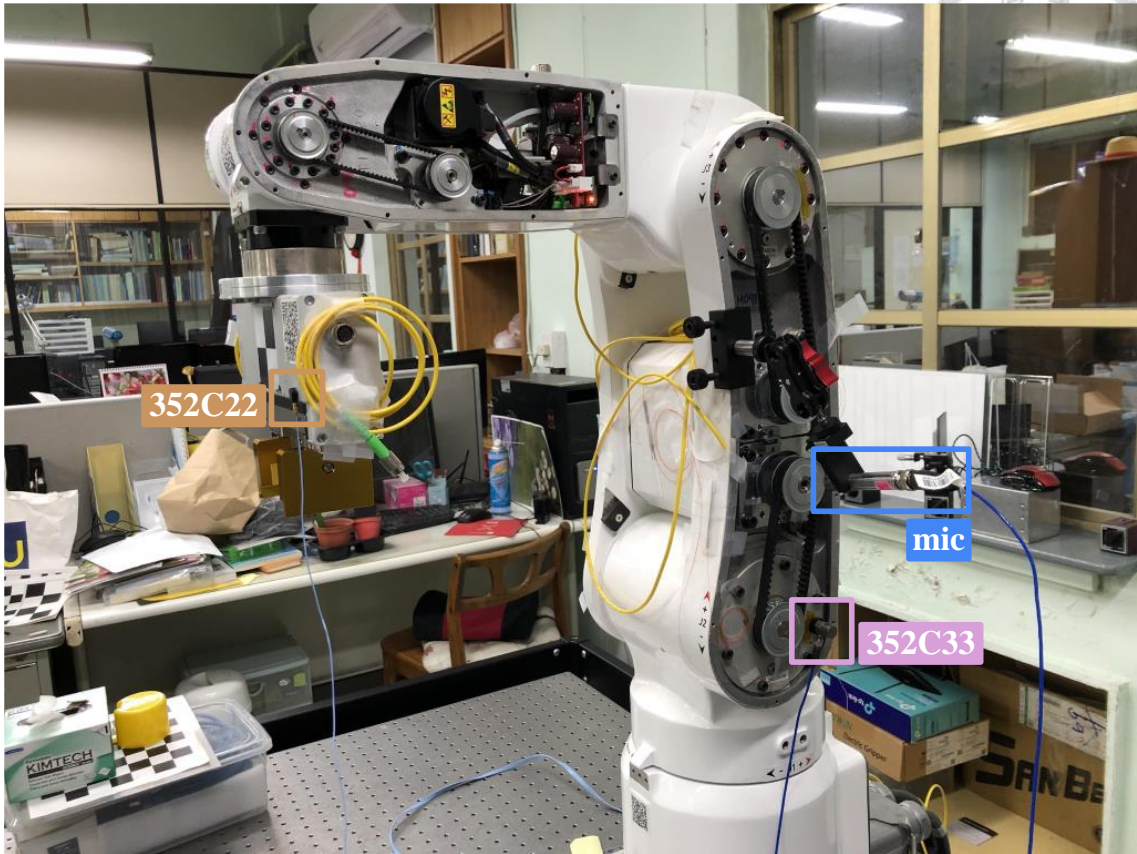


圖 7 - 22 實驗架設

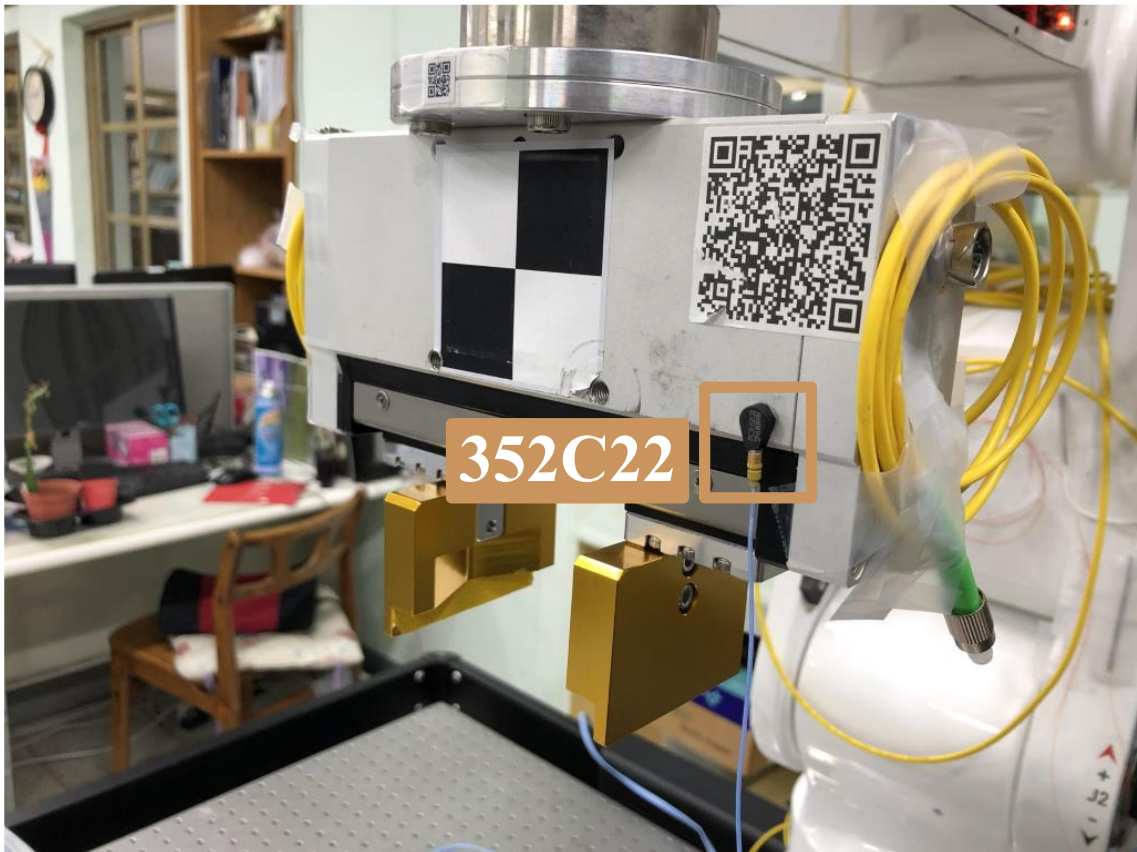


圖 7 - 23 實驗架設 (加速規 352C22)

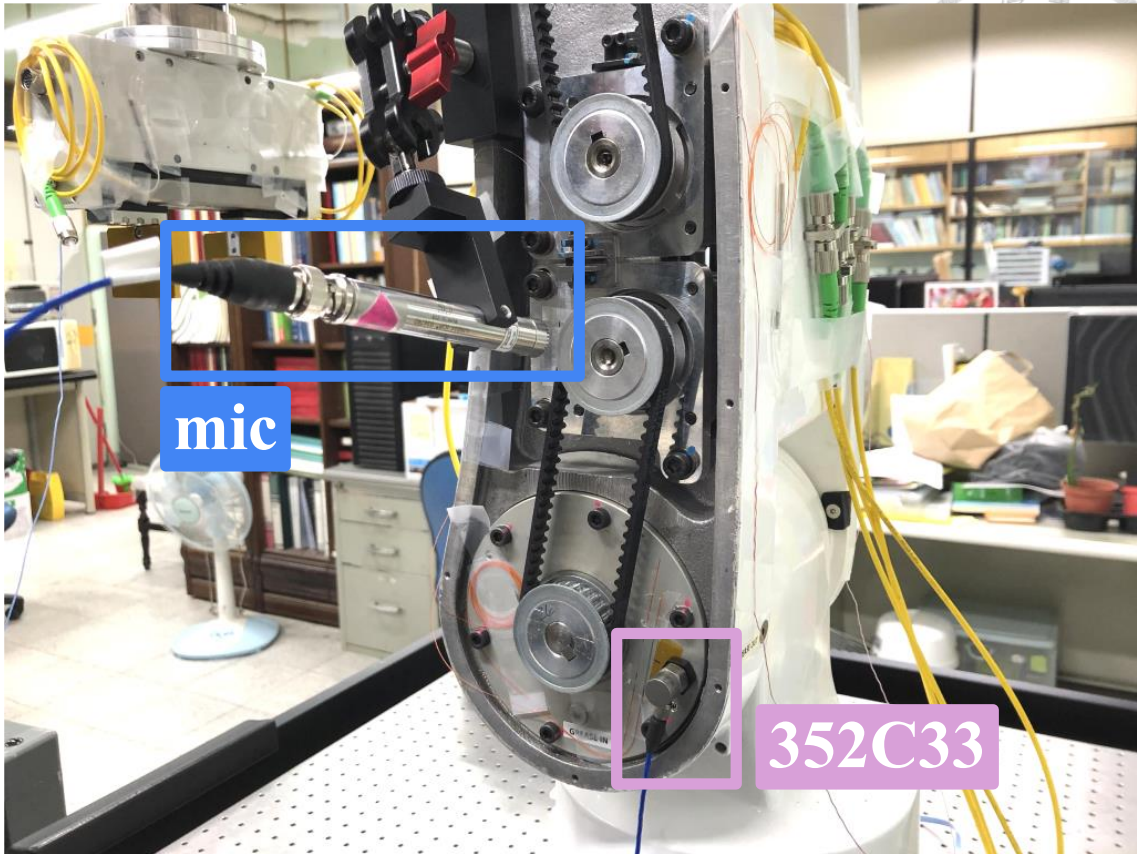


圖 7 - 24 實驗架設 (加速規 352C33 及麥克風)

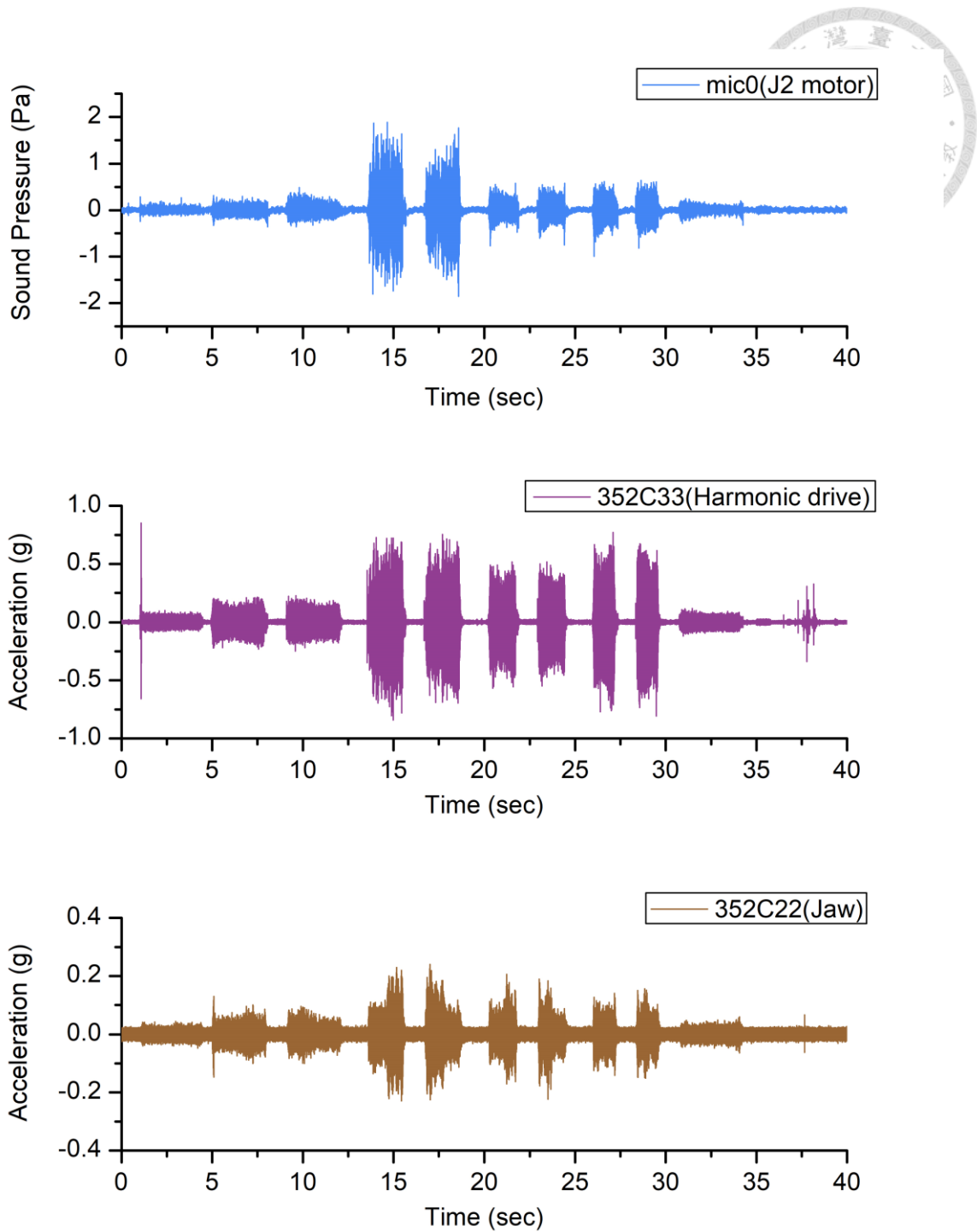


圖 7 - 25 麥克風、加速規 352C22 及 352C33 原始訊號

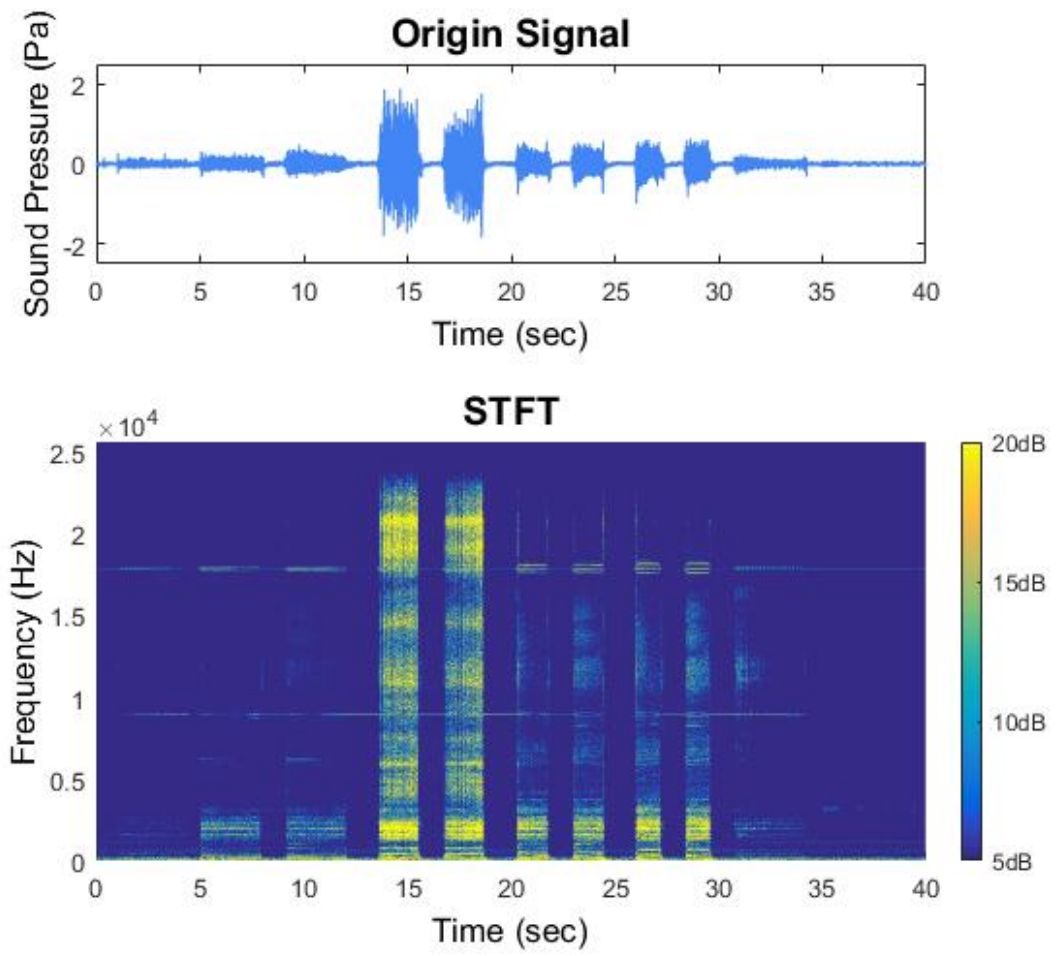
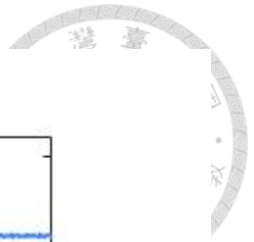


圖 7 - 26 麥克風訊號 STFT 結果

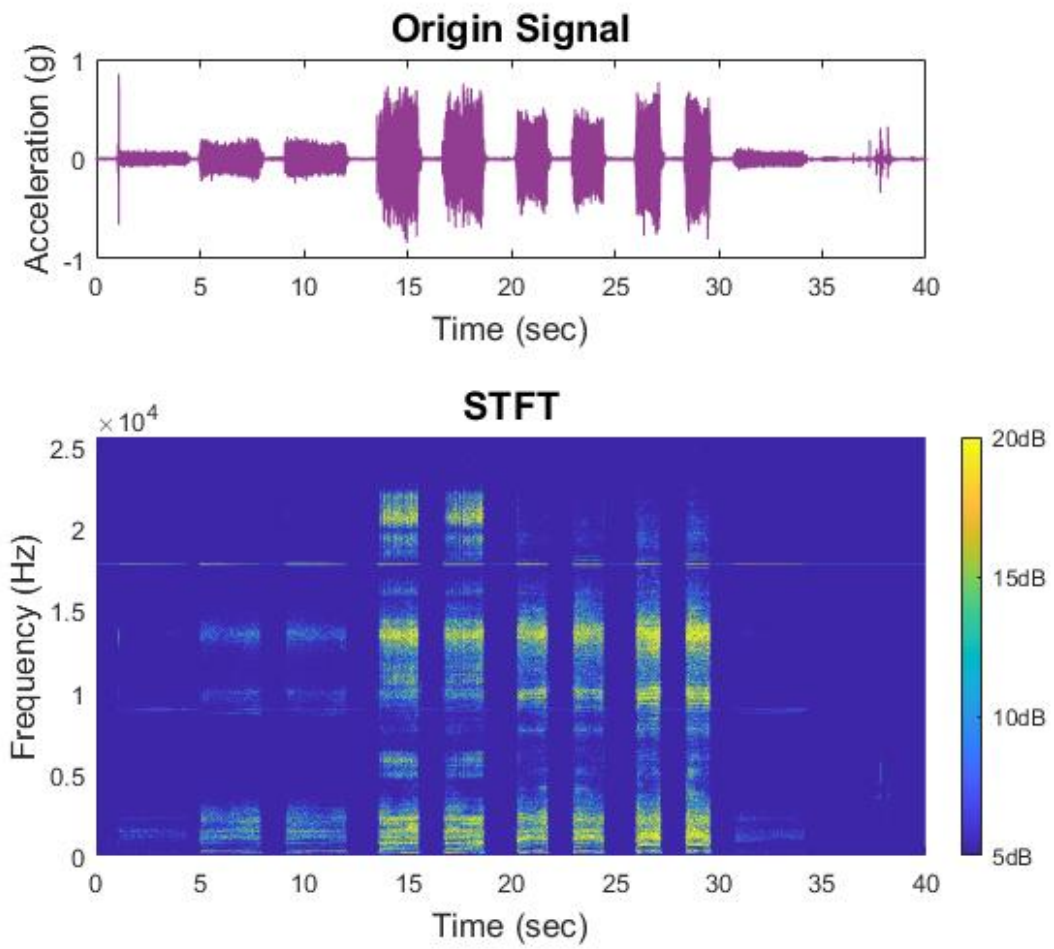
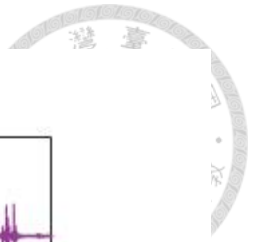


圖 7 - 27 加速規 352C33 訊號 STFT 結果

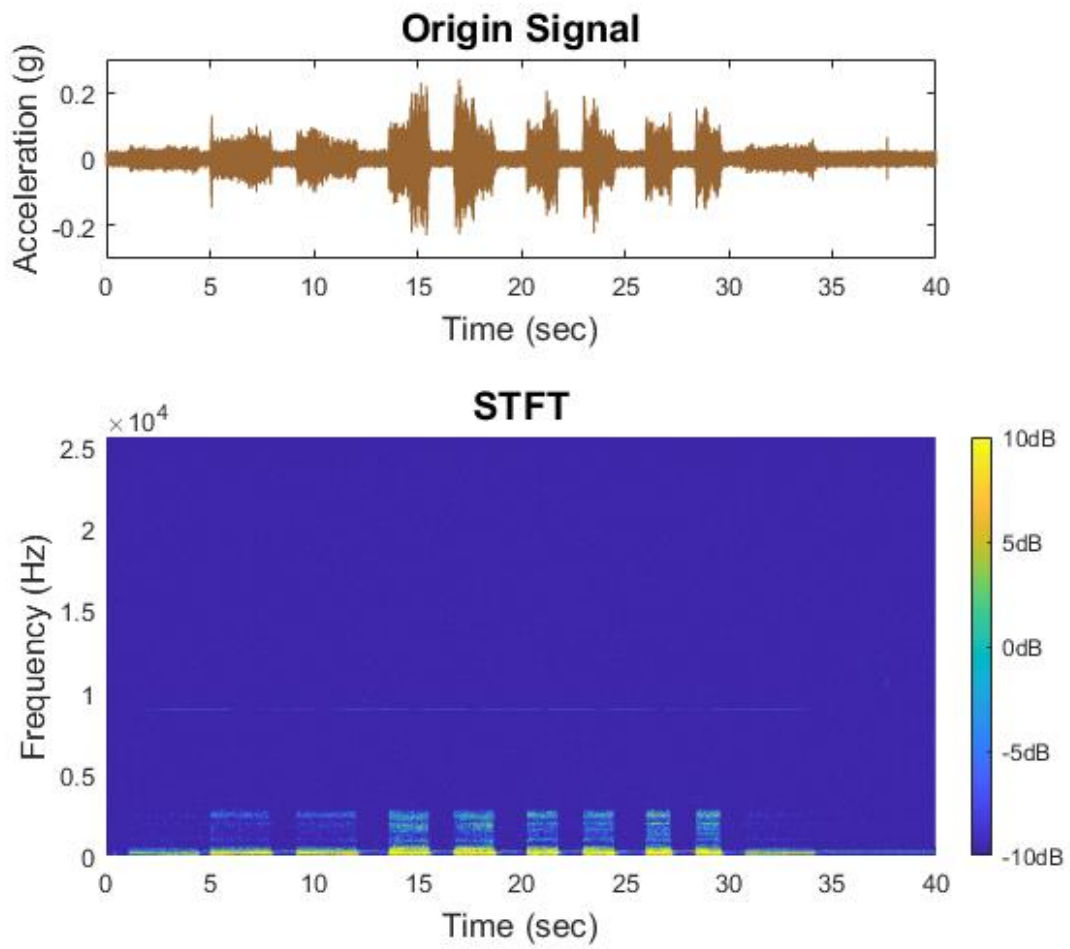
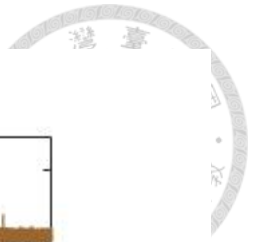


圖 7 - 28 加速規 352C22 訊號 STFT 結果

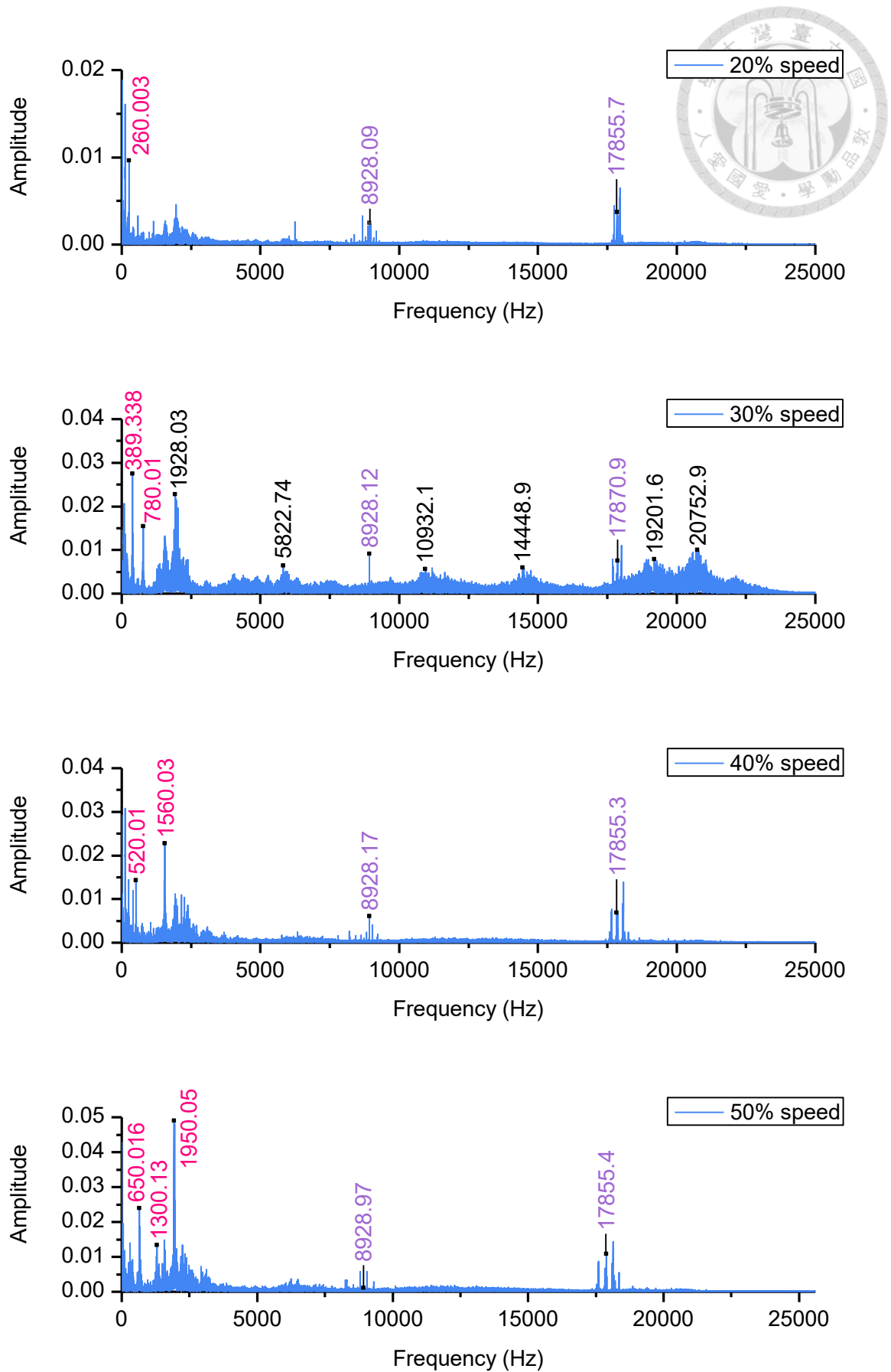


圖 7 - 29 J2 馬達各轉速之麥克風訊號 FFT 結果

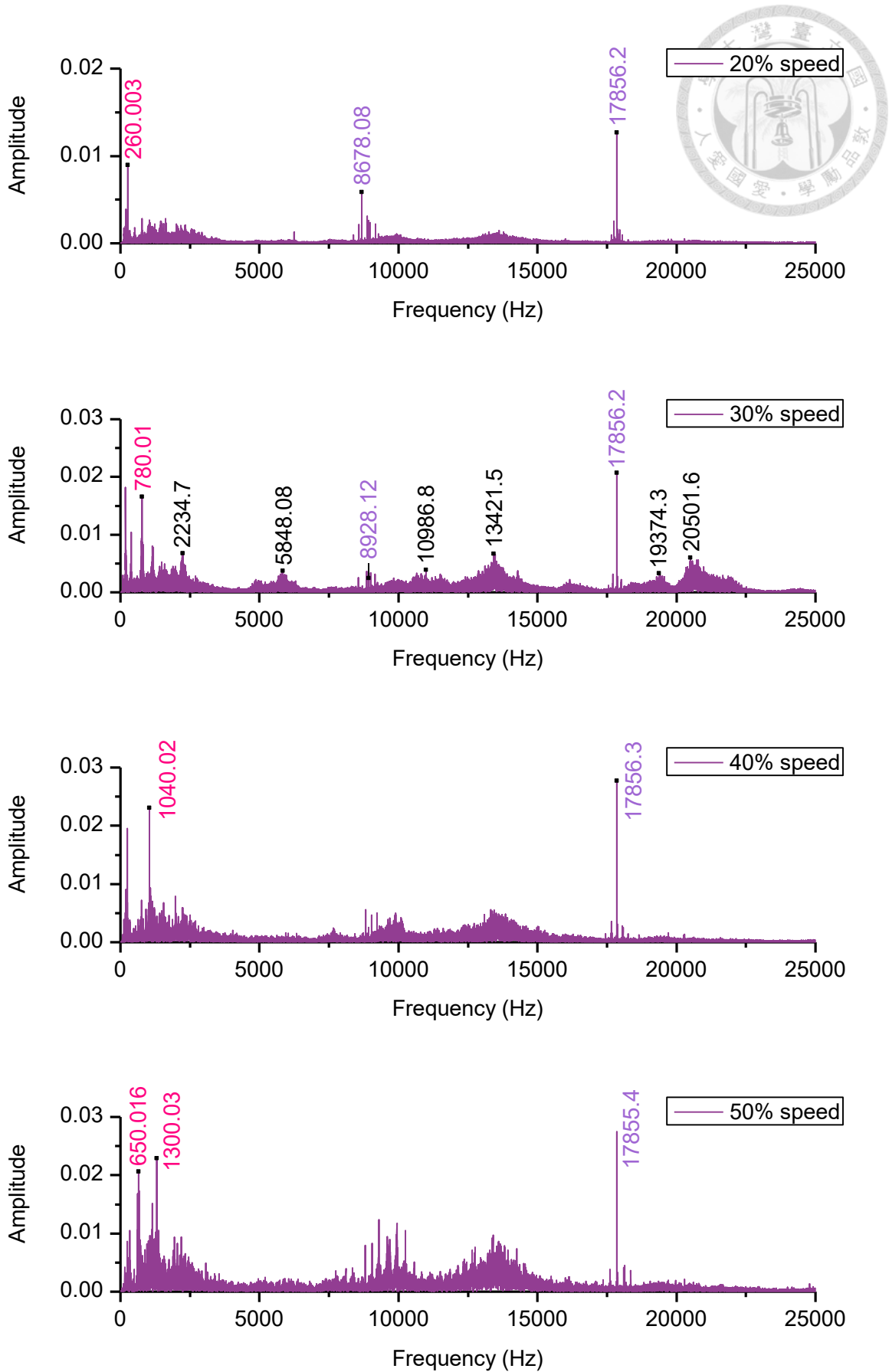
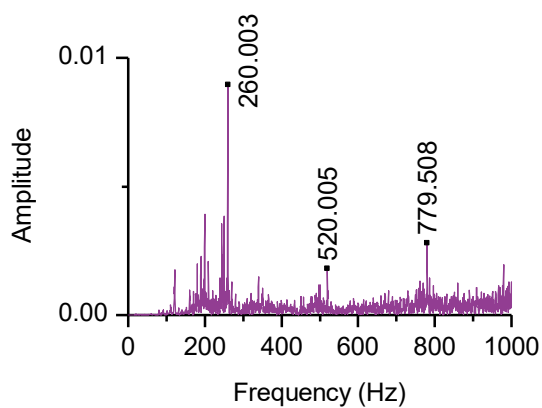
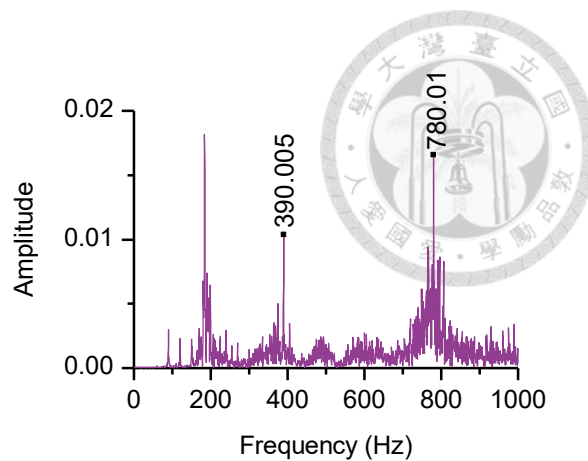


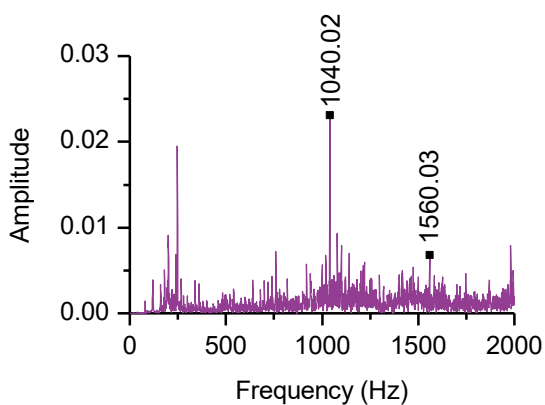
圖 7 - 30 J2 馬達各轉速之加速規 352C33 訊號 FFT 結果



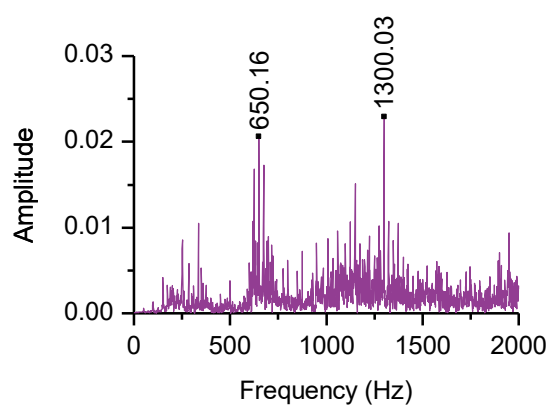
(a) J2 馬達轉速 20% (0~1000Hz)



(b) J2 馬達轉速 30% (0~1000Hz)



(c) J2 馬達轉速 40% (0~2000Hz)



(d) J2 馬達轉速 50% (0~2000Hz)

圖 7 - 31 J2 馬達各轉速之加速規 352C33 訊號 FFT 結果 (低頻段)

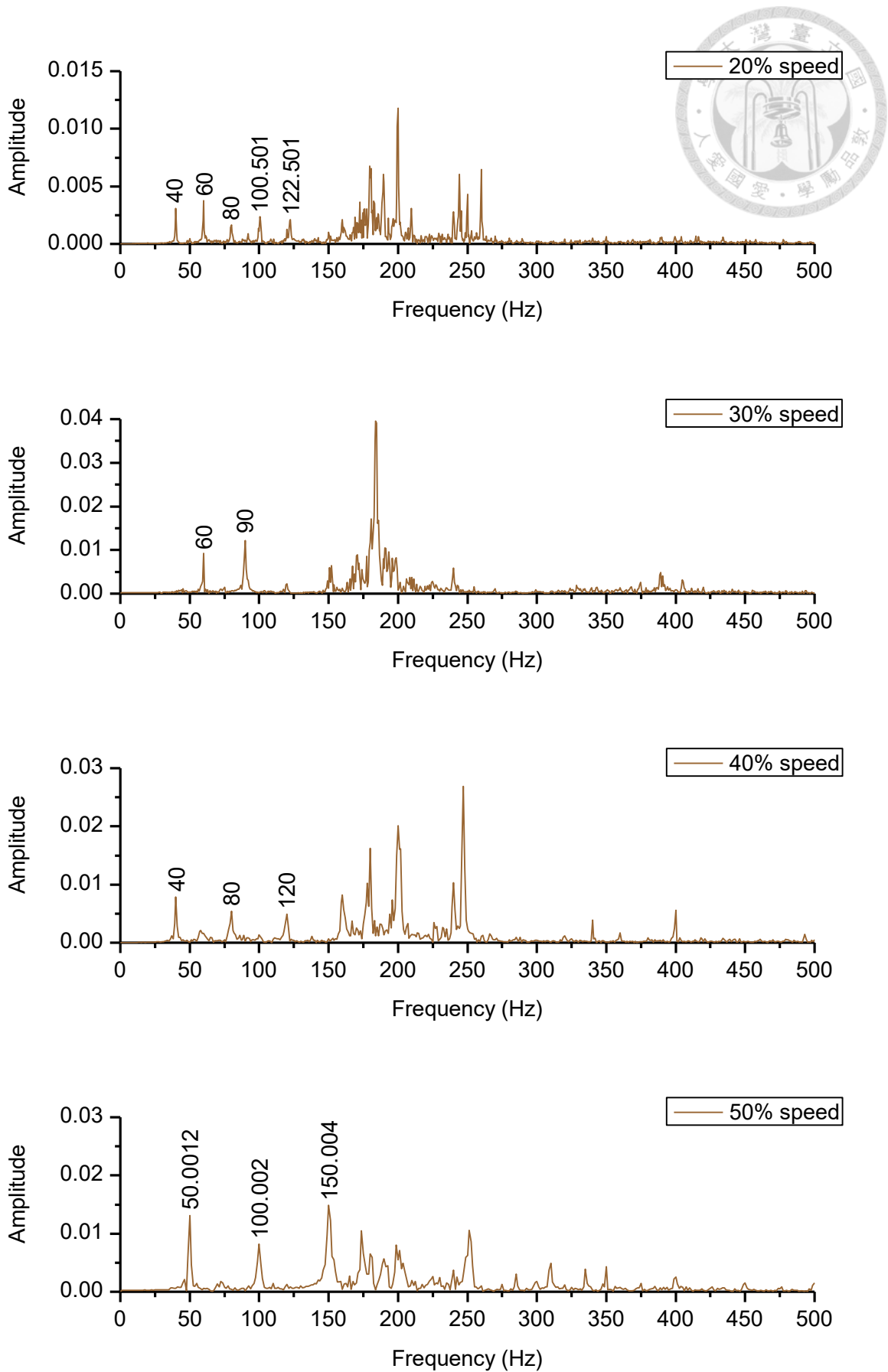


圖 7 - 32 J2 馬達各轉速之加速規 352C22 訊號 FFT 結果 (0-500Hz)

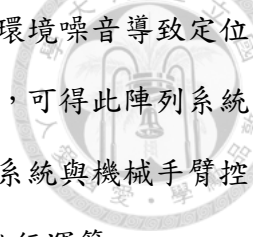
## 第八章 結論與未來展望



### 8.1 結論

本研究應用波束成型演算法開發一維及二維聲源定位系統，其中二維定位系統與影像疊合達成聲音可視化的效果，為聲學攝影機的雛型，並且使用已商品化的聲學攝影機、麥克風與加速規對主軸、馬達以及機械手臂進行振噪分析。本文第二章介紹波束成型的空間濾波概念和 delay and sum 演算法原理，以及陣列圖形(array pattern) 對陣列的意義，beam pattern 為陣列能量輸出結果，是以此判斷聲源之方位；並且介紹快速傅立葉以及短時傅立葉轉換兩種頻率域的數據處理方法，最後介紹本文中使用的相關實驗設備和量測儀器。

本文第三章先以理論推導計算一維等間距直線麥克風陣列之 array pattern，由算式可知影響參數為麥克風間距  $d$ 、觀測訊號波數  $k$  以及麥克風數  $M$ ，其中麥克風間距與觀測訊號波數可一併以乘積值  $kd$  討論，透過改變不同參數後得到的 array pattern 討論參數對陣列定位效果之影響，首先由空間取樣定理可得當  $kd > \pi$  時會出現空間混疊現象，array pattern 開始出現旁瓣，而當  $kd = 2\pi$  時開始出現因旁瓣與主瓣能量值相等而形成假聲源，將導致聲源方位誤判，若  $kd$  值持續上升，假聲源會增加且密集出現。而麥克風數的增加可使陣列對角度的辨識度增強，並且抑制非觀測方向的雜訊。接下來以雙麥克風陣列的實驗直接計算訊號相位差並推算訊號入射角，由算式得到相位差與訊號入射角的關係導致聲源方位計算上若訊號本身入射角較大則有誤差放大的效應；接著介紹本研究中一維聲源追蹤系統的程式計算流程，由流程中可看出計算前設定的短時傅立葉參數與角度計算精度會影響運算時間。在無響室進行的靜止聲源追蹤實驗中比較不同麥克風數量、間距以及喇叭單體數量對定位結果的影響，前兩項參數的結果皆與理論相互印證，而比較單單體喇叭與雙單體喇叭之聲源定位結果可得雙單體喇叭會使定位精確度大幅下降，而



整個實驗中定位平均誤差最大為 $1^\circ$ 。在一般環境的實驗中，由於環境噪音導致定位結果誤差提升至最大為 $1.31^\circ$ ，透過將聲源由近移動至遠處的實驗，可得此陣列系統在約 0.5m 以內會因球面波效應而影響定位結果。最後將此定位系統與機械手臂控制系統結合，可使手臂即時轉向聲源方向，使用一般筆電即可進行運算。

本文第四章講述實現二維聲源可視化系統的過程與實驗結果，以理論推導計算二維等間距正圓形麥克風陣列之 array pattern，與一維等間距直線麥克風陣列類似，影響參數為陣列直徑  $D$ 、觀測訊號波數  $k$  以及麥克風數  $M$ ，同樣以繪製 array pattern 的方式整理出麥克風數目與陣列直徑對最佳觀測頻率範圍的關係。為了將計算結果與影像疊合，計算出相機視野範圍為水平角  $-22^\circ \sim +22^\circ$ ，俯仰角  $-17^\circ \sim +17^\circ$ ，即為陣列觀測範圍，可提高最高觀測頻率門檻並減少計算時間，並且由計算 array pattern 決定陣列直徑，完成陣列硬體設計。接著針對此陣列系統進行實測，透過靜止聲源追蹤實驗發現麥克風陣列與相機擺放誤差造成計算結果的偏移，但能藉由手動調整修正，修正後與商用聲學攝影機 SoundCam 之拍攝結果差異不大，在平面移動聲源的追蹤實驗中也能保持與影像的對應，但是當聲源離開此平面進行三維空間運動時，因為不同平面需要的座標修正量不同再次造成偏移，但是在結果畫面中的定位結果也並沒有超出喇叭之外；最後在靈敏度測試中發現此系統只需要比環境噪音稍大一點的訊號就能追蹤到其聲源位置。

本文第五章對高速內藏式主軸使用聲學攝影機、麥克風及加速規進行振噪分析，聲學攝影機拍攝結果顯示主軸之運轉噪音來自內部，經由三個套管上的孔洞發出，變轉速實驗的聲音訊號分析後，推測應是主軸運轉時內部的零件互相高速摩擦所發出的尖銳聲響。在變轉速實驗中發現主軸於 12000rpm 時出現明顯低頻聲音，並且加速規 352C33 訊號也出現異常，經過分析後發現低頻聲音為主軸旋轉頻率，而此旋轉頻率也與主軸之第三共振頻相近，異常的加速規原始訊號出現拍頻現象，符合轉軸零件鬆動特徵，而頻譜成斜坡狀則符合基座鬆動的頻譜特徵。綜合以上結果，推測此主軸系統內部有零件鬆動並且固定桌不穩，因此在旋轉頻率接近共振頻時出現訊號異常。最後則使用第四章中開發的二維聲源定位系統對此主軸進行測

試，聲源定位結果中出現了混疊現象，並且因實驗空間小、反射物多造成混響嚴重而影響量測計算結果，但在孔洞 2 附近仍有陣列能量峰值。

本文第六章對小型馬達加工系統使用聲學攝影機、麥克風及加速規進行振噪分析，首先馬達於通電後即有 4500Hz 及其倍頻訊號出現，聲學攝影機拍攝結果顯示此訊號來自伺服馬達，推測其內部電子元件因通電後的電磁效應造成振動噪音，此訊號在後續運轉訊號分析中皆會出現，並且量值隨轉速上升而增加。由定轉速實驗所得的訊號波形有周期性的振盪，其波形變化頻率等於旋轉頻率，而訊號頻譜出現旁波現象，是由於偏重盤上螺絲重量不均導致轉軸偏心而出現此現象。破壞滾珠軸承使其成為瑕疵軸承，比較破壞前後的運轉聲音訊號，在訊號波形中同樣出現週期性振盪，但是整體波形較不穩定，出現多個突波，實際聆聽上類似零件撞擊聲，使用加速規與聲學攝影機進行量測後成功證明此聲源來自瑕疵軸承。

本文第七章針對上銀科技 RT605-710-GB 關節式機械手臂之固有異音問題進行量測分析研究，此手臂之第二軸 (J2) 在約以程式設定轉速 30% 運轉時會出現異音，造成減速機共振的馬達轉速範圍為 27.54%~36.85%，而經過實驗後顯示此異音會在馬達轉速約 26% 至 34% 時出現，超過或低於此轉速區間則無異音，與造成減速機共振的馬達轉速範圍具相關性，但異音卻是來自馬達的皮帶輪。分析各轉速的馬達聲音訊號及夾爪端與減速機的振動訊號，可由訊號波形看出轉速 30% 時不管是麥克風聲壓還是加速規的振動訊號，都比其他轉速的訊號振幅大，尤其麥克風訊號差異最為明顯；麥克風訊號與減速機振動訊號頻譜顯示出馬達轉速 30% 時出現多個連續頻率峰群，同時也量測到了齒輪嚙合頻率以及電路板的高頻噪音；夾爪端振動訊號的頻譜則是集中在低頻，並且馬達旋轉頻率的偶數倍有較大的量值。

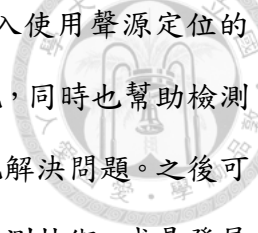
總結以上三種聲學攝影機應用案例，使用聲源定位設備能夠在馬達加工系統與機械手臂找出異音源及缺陷零件，但對於第五章內藏式主軸，因為轉軸外部還有一層金屬套管包覆，導致內部聲音皆從孔洞發出，若內部零件有問題產生異音將難以透過聲源定位的方式查找，但仍可透過一般麥克風及加速規訊號分析問題。



## 8.2 未來展望

本小節討論實驗中可改善的地方與進行方式，並且提出未來可深入研究的方向。本文第三章將一維陣列聲源定位系統進行測試並討論結果，其中需要改進的是架設方式。在無響室進行的實驗中，聲源擺放位置皆是以陣列夾具下安裝的直線型雷射標線器旋轉指定角度後再將喇叭放置於線上，因此必定會有其擺放誤差，不過在結果比較上都還是以理論角度呈現；在 3.5.1 小節的實驗中雖然手臂能夠定量移動，但是陣列是以腳架架設，在實驗架設過程中是以人工盡量對準手臂原點並平行手臂移動方向。因為聲源需要擺放在較遠的地方模擬遠場聲源，因此無法鎖固在光學桌等可以有比較準確而且可重複性地架設實驗，若要改善此問題可能需要特別設計大型夾具以確保聲源擺放在想要的角度位置。在 3.6 小節中將即時聲源追蹤系統控制手臂轉向追蹤聲源，是一個初步的結合應用，未來可望發展出更多的功能，像是在多人遠距會議中能夠控制攝影機轉向追蹤發言者的位置等等。

本文第四章的實驗結果則顯示出了麥克風陣列與工業相機的擺放誤差，除了器材沒有架設好之外，也因為無法確定相機鏡頭的焦距位置所以目前僅能大致將麥克風架設於鏡頭長度的一半；雖然可以透過手動的方式修正誤差，但是每次架設所需的修正量皆不同，或是在量測三維移動聲源的情況下若離開一開始修正參考的平面也會產生量測結果偏移，因此在未來可針對此問題進行研究，例如設計一個校正流程等。此外市售之聲學攝影機大部分皆是以二維陣列進行平面聲源定位，或是架設三維陣列做空間的聲源定位，而本研究開發之二維聲源定位系統雖然同樣是只能做平面定位，但若結合三維 DIC 量測技術可補足深度資訊，也就是以二維陣列做到三維的聲源定位，未來可重新調整架設讓兩種不同的量測系統有更好的結合，例如兩系統使用同一台相機的影像，一方面疊合計算結果，一方面與第二台相機計算空間軌跡，可免去結果呈現上座標轉換的麻煩。本研究在一般環境進行的實驗雖然是普通室內環境，但都還是在相對安靜的情況下進行，未來可嘗試在有背景噪音環境下對目標訊號進行聲源定位，分析實驗結果並且找出如何優化系統。




對於第五章至第七章加工系統振噪分析的部分，本研究加入使用聲源定位的技術進行量測，比起傳統的振噪分析多提供了聲音加位置的資訊，同時也幫助檢測人員決定量測設備之架設位置以取得更好的訊號，或是有效率地解決問題。之後可嘗試使用此技術於更多其他工業噪音問題，精進工具機設備的檢測技術，或是發展商業化的應用功能，對科技發展做出貢獻。

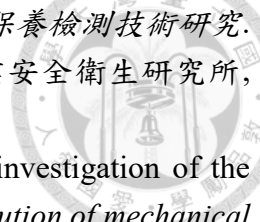
## 參考資料



- [1] 涂莎莉, "二維空間的音源定位:時域方法的實作與探討," 碩士, 資訊工程學系, 國立清華大學, 新竹市, 2004. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/w3af45>
- [2] 蔡秉昌, "利用麥克風陣列做戶外異常聲源之定位," 碩士, 資訊工程學系, 國立暨南國際大學, 南投縣, 2010. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/2e5k79>
- [3] C. Knapp and G. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976.
- [4] G. C. Carter, "Coherence and time delay estimation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 2, pp. 236-255, 1987.
- [5] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," *IEEE assp magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, 1988.
- [6] S. Haykin, "Array signal processing," *ph*, 1985.
- [7] K. Yao, R. E. Hudson, C. W. Reed, D. Chen, and F. Lorenzelli, "Blind beamforming on a randomly distributed sensor array system," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1555-1567, 1998.
- [8] H. L. Van Trees, *Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory*. John Wiley & Sons, 2004.
- [9] J. Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, 1969.
- [10] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, 1986.
- [11] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, 1989.
- [12] T. S. Graham, "Long-wavelength acoustic holography," *The journal of the acoustical society of america*, vol. 46, no. 1A, pp. 116-116, 1969.
- [13] E. Watson, "Detection of sound radiation from plates using long wave acoustical holography," *The journal of the acoustical society of America*, vol. 54, no. 6, pp. 1766-1766, 1973.
- [14] E. G. Williams, J. D. Maynard, and E. Skudrzyk, "Sound source reconstructions using a microphone array," *The journal of the acoustical society of America*, vol. 68, no. 1, pp. 340-344, 1980.
- [15] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography: I.

- Theory of generalized holography and the development of NAH," *The journal of the acoustical society of America*, vol. 78, no. 4, pp. 1395-1413, 1985.
- [16] W. Veronesi and J. D. Maynard, "Nearfield acoustic holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation," *The journal of the acoustical society of America*, vol. 81, no. 5, pp. 1307-1322, 1987.
- [17] J. Hald and K. Ginn, "Spatial transformation of sound fields: principle, instrumentation and applications," in *Proceedings of the acoustic intensity symposium, Tokyo*, 1987.
- [18] J. Hald and K. Ginn, "Vehicle noise investigation using spatial transformation of sound fields," *Sound and vibration*, vol. 23, no. 4, 1989.
- [19] T. Loyau, J. C. Pascal, and P. Gaillard, "Broadband acoustic holography reconstruction from acoustic intensity measurements. I: Principle of the method," *The journal of the acoustical society of America*, vol. 84, no. 5, pp. 1744-1750, 1988.
- [20] P. Smaragdis and P. Boufounos, "Position and trajectory learning for microphone arrays," *IEEE Transactions on audio, speech and language processing*, vol. 15, no. 1, pp. 358-368, 2007, doi: 10.1109/tasl.2006.876758.
- [21] J. Christensen and J. Hald, "Beamforming technical review No. 1 2004," *Briuel & Kjaer Sound vibration measurement A/S*, 2004.
- [22] 劉冠良, "利用隨機配置陣列發展遠場聲學影像演算法," 碩士, 機械工程系所, 國立交通大學, 新竹市, 2009. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/v2py4p>
- [23] 蔡傑名, "提升聲源位置估測準確度之麥克風陣列幾何配置," 碩士, 電控工程研究所, 國立交通大學, 新竹市, 2010. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/se65ka>
- [24] P. A. Ravetta, R. A. Burdisso, and W. F. Ng, "Phased array technology development at Virginia tech: Application to landing gear noise source identification," *Mecanica computacional*, vol. 23, pp. 2721-2732, 2004.
- [25] K. K. ISVR and D. T. ISVR, "Noise source identification using microphone arrays," *Proceedings of the institute of acoustics*, vol. 29, 5, 2007.
- [26] H. Camargo, P. Ravetta, R. Burdisso, and D. Yantek, "Mining publication: Noise source identification on a horizontal vibrating screen," *Min Eng*, vol. 61, no. 7, pp. 47-51, 2009.
- [27] 卓昭成, "即時音源可視化分析系統研究," 碩士, 工學院聲音與音樂創意科技碩士學位學程, 國立交通大學, 新竹市, 2012. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/d8kk6p>
- [28] 王明鑫, "沖床振動噪音之改善研究," 碩士, 自動化工程研究所, 國立虎尾科技大學, 雲林縣, 2013. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/t53e57>

- 
- [29] 杜宗玟, "馬達推桿外殼之振動與噪音改善研究," 碩士, 機械工程學系, 國立中央大學, 桃園縣, 2017. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/n3m28g>
- [30] 廖俊凱, "廠內噴流機器噪音分布及控制改善研究," 碩士, 環境工程與科學系所, 國立屏東科技大學, 屏東縣, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/38v98j>
- [31] S. A. Long, Z. Zhu, and D. Howe, "Effectiveness of active noise and vibration cancellation for switched reluctance machines operating under alternative control strategies," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 792-801, 2005.
- [32] K. Vijayakumar, R. Karthikeyan, S. Paramasivam, R. Arumugam, and K. Srinivas, "Switched reluctance motor modeling, design, simulation, and analysis: a comprehensive review," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 44, no. 12, pp. 4605-4617, 2008.
- [33] C. Mayo, "Loose-part signal properties," *Progress in nuclear energy*, vol. 28, no. 4, pp. 347-357, 1994.
- [34] N. Seemuang, T. McLeay, and T. Slatter, "Using spindle noise to monitor tool wear in a turning process," *The international journal of advanced manufacturing technology*, vol. 86, no. 9-12, pp. 2781-2790, 2016.
- [35] Z. Bo, Z. Yanan, and C. Changzheng, "Acoustic emission detection of fatigue cracks in wind turbine blades based on blind deconvolution separation," *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, vol. 40, no. 6, pp. 959-970, 2017.
- [36] 翁堂鈞, "散熱風扇之窄頻噪音監測與消除," 碩士, 飛機工程系航空與電子科技碩士班, 國立虎尾科技大學, 雲林縣, 2016. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/24hexz>
- [37] 湯耀期, "噪音訊號診斷模式在風力發電機葉片表層損傷之應用," 博士, 工程科學及海洋工程學研究所, 國立臺灣大學, 台北市, 2017. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/ftw77j>
- [38] 李枝煌, "利用聲學相位陣列雷達系統進行工業噪音源之位置判定," 碩士, 機械工程研究所, 國立交通大學, 新竹市, 1995. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/md5xzv>
- [39] 陳勁誠, "應用近場與遠場麥克風陣列於工具機噪音源識別," 博士, 動力機械工程學系, 國立清華大學, 新竹市, 2013. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/4z3zvb>
- [40] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [41] 詹惠媛, "布拉格光纖光柵感測器於高速內藏式主軸之健康檢測分析與工具機量測之應用," 碩士, 機械工程學研究所, 國立臺灣大學, 台北市, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/jp8t8u>

- 
- [42] 勞動部勞動及職業安全衛生研究所，一般動力機械預知保養檢測技術研究。勞動部勞動及職業安全衛生研究所：勞動部勞動及職業安全衛生研究所，2018。
- [43] M. Behzad and M. Asayesh, "Numerical and experimental investigation of the vibration of rotors with loose discs," *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part C: Journal of mechanical engineering science*, vol. 224, no. 1, pp. 85-94, 2010.
- [44] *Harmonic Drive 綜合型錄*. Harmonic Drive Systems Inc., 2018.