

聲學照相機之量測驗證與應用

The Verification and Applications of Acoustic Camera

王栢村¹、蔡建雄²、曾全佑²、蔡曜光^{1*}、蔡俊郎³、吳盈輝⁴

¹屏東科技大學機械工程系

²屏東科技大學車輛工程系

³台灣云意科技有限公司

⁴國立內埔高級農工職業學校

摘要

當結構受到激振時，振動經過空氣路徑傳導聲音，並由人耳接收聽到聲響。振動噪音的診斷，傳統上常透過結構模態分析與振動量測，以及單點的聲音量測為主，較少能夠量測到空間域中聲音的傳遞特性。本文介紹了聲學照相機與其量測值驗證方式，以及實際應用於測量銅鐘之聲場特性。本文建立了比對式驗證程序，透過精密麥克風量測參考音源的聲壓頻譜，作為參考值，據以驗證聲學照相機的聲音量測準確性，也說明儀器架設與量測作業程序。其次，應用聲學照相機以實驗方式量測取得銅鐘的聲場模態振型，並與銅鐘實驗模態分析結果作比較探討。結果顯示，透過適當的儀器架設、量測方法與後處理流程，可以有效求得銅鐘結構之聲場模態特性。本文探討了聲學照相機的比對式驗證方法，以及成功的應用於量測銅鐘結構的聲場模態特性。未來可應用本文之驗證與量測方法，測量結構的聲場響應，以及噪音源定位，有助於產品的振動噪音診斷。

關鍵字：聲學照相機、驗證、聲場模態振型

Abstract

Structural excitation can induce vibration and thus radiate sound transmit to the receivers through air path. Noise and vibration (N&V) diagnosis may require structural modal analysis and vibration measurement and conventionally the single point sound measurement. It is rarely able to measure the transmitted sound around the spatial domain. This work introduces a type of acoustic camera and its verification procedure as well as the applications to measurement of copper bell percussion sound. First, this work establishes the comparison verification procedure for the acoustic camera. While using a precision microphone to measure the sound source as the reference, the acoustic camera is used to capture the same data. The instrument and measurement procedure are detailed. Next, the acoustic camera is applied to measure the sound pressure mode shapes for the copper bell. Results show the bell sound pressure mode shapes can be reasonably obtained with proper instrumentation, measurement and post-processing. This work presents the comparison verification method for the acoustic camera and its

applications to obtain the bell's sound pressure mode shapes. The developed verification and measurement methods can be applied to other structures and beneficial to product N&V diagnosis.

Keyword : acoustic camera, verification, sound pressure mode shape

一、前言

振動噪音的診斷，傳統上常透過結構實驗模態分析與振動量測，以及利用單點麥克風進行聲音量測為主，近年來隨著量測技術與工具的發展，聲學照相機能夠量測到空間域中聲音的傳遞特性，並將空間域中聲壓分佈視覺化。Döbler and Heilmann [1]利用聲學照相機遠距離量測運行中的汽車，透過聲學照相機設定分析距離與位置，針對量測汽車底盤聲壓，可以隨著汽車移動保持量測該位置，取得不同時間下汽車底盤的聲壓量值。Kerscher *et al.* [2]使用 3 維球型陣列麥克風，量測室內空間的脈衝響應，透過對麥克風量測信號進行後處理，計算出室內空間反射脈衝響應的位置，並顯示於 3D 室內空間模型，使空間內的脈衝響應視覺化。

本文利用聲學照相機來瞭解結構於空間域中的聲音傳遞特性，而傳統上常使用實驗模態分析與振動量測技術來診斷結構發聲特性，王等人[3]針對不同銅鐘包括地鐘、韓國鐘與法華鐘應用實驗模態分析(EMA)探討幾何結構之振動特性，並與聲音特性進行關聯性探討，結果顯示銅鐘主要以環型模態為主要發聲模態，其聲音特性與結構振動模態具關聯性。Liu and Yi [4]探討球磨機之結構空氣耦合系統與單一結構之關聯性，分別對結構、聲場、以及空氣結構耦合系統進行模態分析，發現聲場模態與結構模態振型有密切關係。王與林[5]對鐵琴片進行實驗模態分析，求得實體結構之模態參數，包括自然頻率、模態振型及阻尼比並完成模型驗證，也量測鐵琴片敲擊後的聲音頻譜響應，得知第一個振動模態為鐵琴片之主頻率，使用硬度高的敲擊錘進行敲擊時，高頻率模態易被激發。

傳統上較少能夠量測到空間域中聲音的傳遞特性，若能量測實際音場中結構的聲場模態振型，將有助於振動噪音診斷，王等人[6]對銅鐘進行聲振耦合分析，分為銅鐘結構與空氣結構耦合兩個系統，觀察銅鐘結構之模態特性與聲音頻譜，了解銅鐘聲音傳遞的聲音壓力位準與聲音指向性，結果顯示，空氣耦合對結構自然頻率僅有微小的影響，結構模態與聲音壓力聲場模態振型有合理的對應。

本文旨在驗證聲學照相機量測空間域中不同位置的準確性，利用 3 支精密麥克風放置不同位置，與聲學照相機量測對應麥克風位置之聲壓總量進行比對驗證，以及應用聲學照相機量測銅鐘聲場模態振型，瞭解實際音場中銅鐘的聲音傳遞特性，並與實驗模態分析所求得之結構模態參數比對驗證，確認聲場模態量測的可靠性。

二、聲學照相機簡介與操作流程

聲學照相機是一種非接觸式感測器，能夠定位聲音的來源，使用聲學照相機測量可獲得空間域之聲音壓力分佈，並將聲源視覺化，以找出聲音的來源與空間能量分佈。本文所使用之聲學照相機型號為 Bionic-XS-56，圖 1 為聲學照相機實體

圖，共有 56 支麥克風與 1 顆攝影鏡頭，圖 2 為量測示意與訊號流程圖，介紹聲學照相機的操作流程，首先將聲學照相機對準待測空間進行量測，錄製一段聲音與影像，再進行量測數據後處理，分析設定包括距離(空間域)、時間區間(時間域)、頻率區間(頻率域)，分析結果包含聲音壓力分佈圖、1/3 八音頻帶頻譜與聲壓位準，圖 3 為聲學照相機後處理軟體介面與功能示意圖，聲壓分佈圖可調整聲壓顯示上限(vlax)以及聲壓顯示動態範圍(Dyn)，紅色為聲壓最大，紫色為聲壓最小，聲壓超出顯示動態範圍則不顯示，由聲音壓力分佈圖可以瞭解聲源位置以及空間域中聲音的傳遞特性，另外，調整頻譜輸出點則可得到空間域中特定位置的 1/3 八音頻帶頻譜與聲壓位準。



圖 1 聲學照相機實體圖

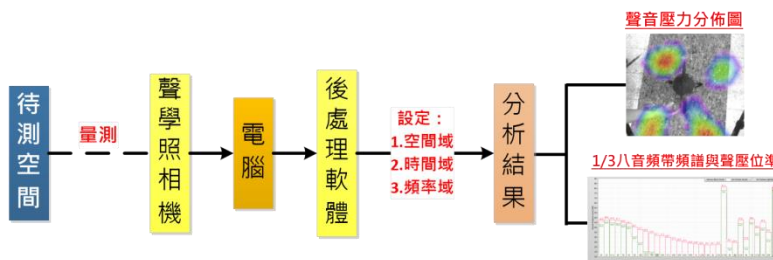
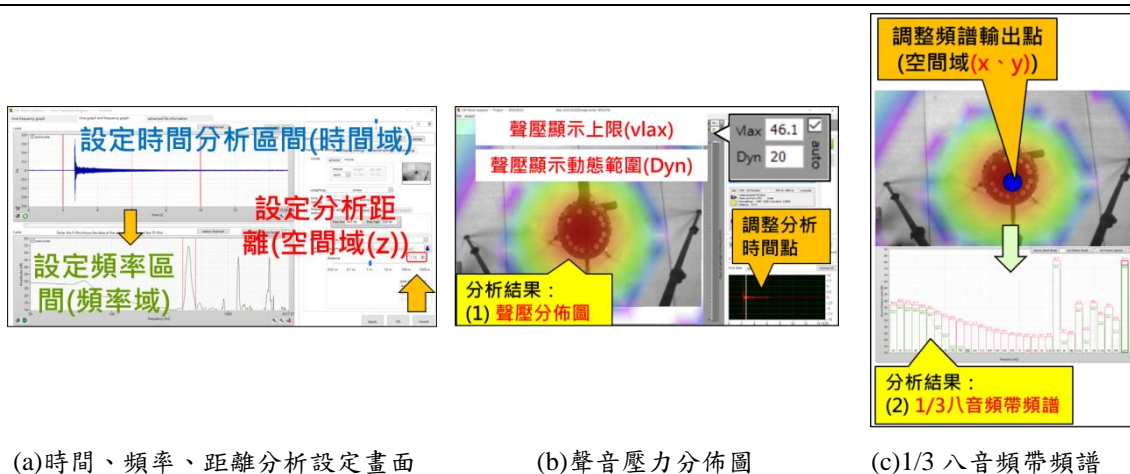


圖 2 量測示意與訊號流程圖



(a)時間、頻率、距離分析設定畫面

(b)聲音壓力分佈圖

(c)1/3 八音頻帶頻譜

圖 3 聲學照相機後處理軟體介面與功能示意圖

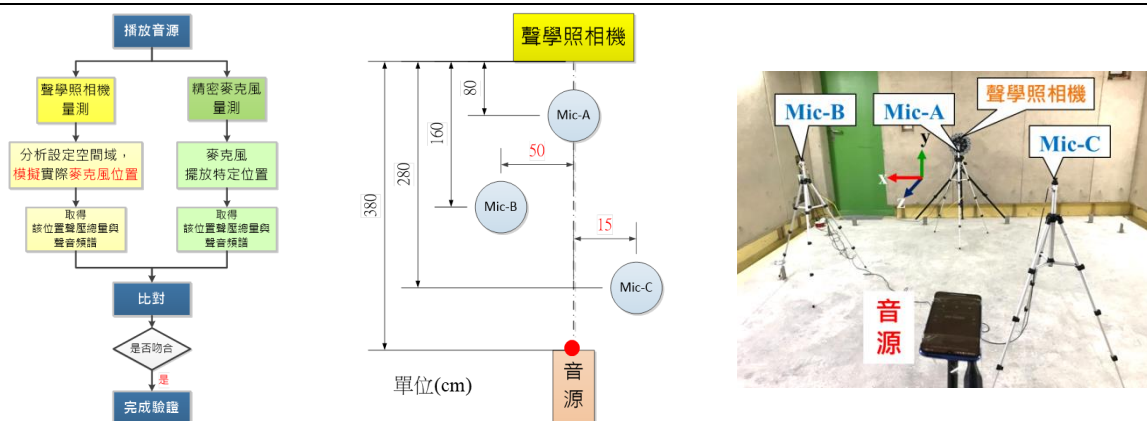
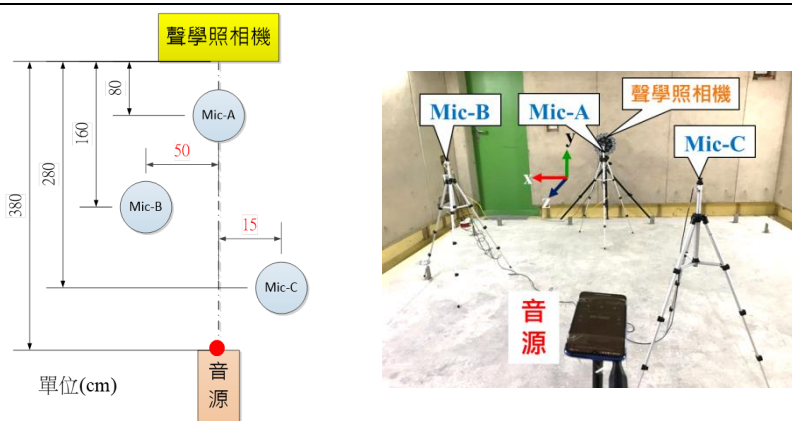


圖 4 量測值驗證流程圖



(a)架設尺寸圖

(b)實際架設示意圖

圖 5 聲學照相機與麥克風實際架設位置示意圖

三、聲學照相機之量測值驗證

本章利用三支精密麥克風量測空間中特定位置的點聲壓，並同步使用聲學照相機量測空間域之聲音壓力分佈，以精密麥克風之量測聲音壓力總量作為參考值，據以比較驗證聲學照相機於空間域的聲音量測準確性。

3.1 量測值驗證流程

圖 4 為量測值驗證流程圖，首先播放 3000Hz 固定音源，將三支精密麥克風分別擺放到不同位置，實際架設位置如圖 5 所示，進行量測後得到三個位置的聲壓總量與聲音頻譜，聲學照相機則對應設定頻譜輸出點，模擬實際麥克風位置，與精密麥克風同時量測，各獲得三組聲壓總量與聲音頻譜，聲學照相機與精密麥克風量測頻寬皆為 0~20000Hz，量測時間 0.64 秒，以精密麥克風量測之聲音壓力總量作為參考值，對聲學照相機量測值進行比對驗證。

3.2 驗證結果

圖 6 為聲學照相機量測音源聲壓分佈圖，首先以模擬 Mic-A 位置量測為例，聲學照相機與 Mic-A 的距離為 0.8m，因此分析距離設定 0.8m 使空間模擬為 Mic-A 所在平面，接著設定頻譜輸出點，模擬實際 Mic-A 量測點位置，輸出 1/3 八音頻帶頻譜圖，並與精密麥克風之 1/3 八音頻帶頻譜圖進行比對，結果如圖 7 所示，兩者整體趨勢對應良好，而聲學照相機 100~2500Hz 的頻率區間量值皆為 0dB，推測可能是分析方法之限制所導致，表 1 為精密麥克風與聲學照相機之聲壓總量總表，兩者聲壓總量差異皆小於 3dB，驗證聲學照相機於空間域中的聲音量測與分析具相當可靠度。

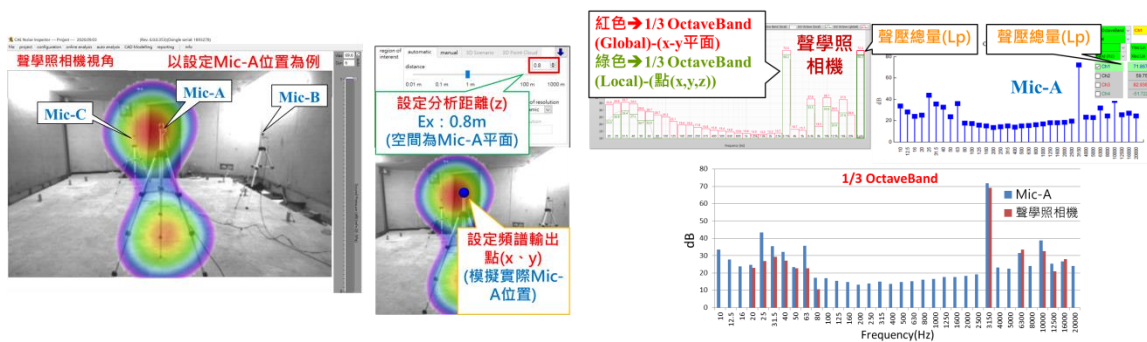


圖 6 聲學照相機量測音源聲壓分佈圖

圖 7 1/3 八音頻帶頻譜圖

表 1 精密麥克風與聲學照相機之聲壓總量總表

麥克風代號	Mic-A	Mic-B	Mic-C
聲學照相機 設定分析距離(cm)	80	160	280
頻譜輸出點位置 (設置於畫面中 麥克風位置)			
精密麥克風 聲壓總量(dB)	71.9	68.0	79.7
聲學照相機 聲壓總量(dB)	69.1	70.4	80.0
聲學照相機 精密麥克風 聲壓總量差值(dB)	-2.8	2.4	0.3

四、聲學照相機之實務應用

本章主要應用聲學照相機量測銅鐘經敲擊後於不同頻帶之聲場模態振型，並與銅鐘本身振動模態比較探討，比對聲場模態振型與振動模態振型兩者之物理意義，確認經由此方法可成功量測實際聲場模態振型。

4.1 銅鐘聲場模態振型量測

本節實驗於半無響室進行量測，圖 8 為銅鐘實體圖，銅鐘懸吊模擬自由邊界，圖 9 為聲場模態振型量測系統方塊圖，系統之振動源為鋼鎚敲擊的衝擊力 $f(t)$ ，銅鐘受到敲擊後激振產生振動 $a(t)$ ，振動傳遞至空氣後產生聲音，由聲學照相機量測到聲音響應 $p(t)$ 。圖 10 為聲場模態振型量測儀器架設示意圖，銅鐘鐘底距離地板 5 公分，聲學照相機位在高於鐘底 112 公分處俯視拍攝銅鐘。後處理軟體量測設定如下，頻寬設定為 5000Hz，頻率解析度為 11.71835 Hz，分析距離 112 公分，本次實驗量測時間為 15 秒，2.6 秒時鋼鎚敲擊鐘底邊緣進行激振，銅鐘開始響應，4.8 秒時銅鐘已響應微弱，故本章將於 2.6~4.8 秒間於不同頻帶擷取聲場模態振型。

表 2 為聲場模態振型量測自然頻率總表，圖 11 為聲音頻譜與相應的聲場模態振型圖，由於各聲場模態振型特徵不同，因此擷取聲壓分佈畫面的時間，以及聲壓顯示動態範圍會根據模態狀況調整，以能辨識出聲場模態特徵為主要目標，結果顯示，頻率峰值對應的聲場模態振型皆有明顯的模態特徵，由聲場模態振型可以觀察到該頻率下聲音的傳遞特性，且由於銅鐘本身為對稱結構，其模態振型亦有對稱模態的現象產生，其理論特性為模態振型物理意義兩兩相同，僅有模態振型之 z 軸 45 度或 90 度相位差。

4.2 銅鐘實驗模態分析

實驗模態分析可求得銅鐘結構的模態參數，其包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比，圖 12 為銅鐘實驗模態分析系統方塊圖，系統之振動源為衝擊鎚敲擊的衝擊力 $f(t)$ ，銅鐘受到敲擊後激振產生振動，由加速規量測到加速度響應 $a(t)$ ，再以 G_{aa}/G_{ff} 可求得頻率響應函數(FRF)，圖 13(a) 為銅鐘實驗模態分析量測點示意圖，銅鐘佈點為將鐘高分成 7 等份，圓周 16 等份，共有 112 個量測點，每一量測點可獲得一筆頻率響應函數，共 112 筆頻率響應函數；圖 13(b) 為銅鐘實驗模態分析儀器架設圖，本實驗使用振動噪音量測軟體(SVM)與訊號擷取卡(NI-9234)進行實驗模態分析，銅鐘懸吊模擬自由邊界，以衝擊鎚為驅動器，加速規為感測器，將加速規固定在結構 7 號量測點，利用固定加速規，移動衝擊鎚的方式進行實驗量測。振動噪音量測軟體設定如下，頻寬設定為 5000Hz，頻率解析度為 0.78125Hz，將加速規與衝擊鎚連接於訊號擷取卡，擷取之訊號傳入振動噪音量測軟體進行分析，求得實際之頻率響應函數，並匯入曲線嵌合軟體 ME'scopeVES，進行曲線嵌合求得銅鐘實驗之自然頻率、模態振型。

表 3 為聲場模態量測與實驗模態分析自然頻率總表，圖 14 為加速度頻譜與相應的振動模態振型圖，模態振型物理意義之 z 方向為鐘高， θ 為周向節線數，實驗模

態分析的模態振型亦有對稱模態的現象產生。

4.3 銅鐘聲場模態振型與振動模態振型比對探討

本節主要對銅鐘聲場模態量測結果與振動模態進行比對探討，表 3 為聲場模態量測與實驗模態分析自然頻率總表，表 4 為聲場模態振型與振動模態振型總表，比對結果如下：

1. 聲場模態量測與實驗模態分析之自然頻率比對結果，整體自然頻率誤差平均($\bar{\epsilon}$)為 0.02%，誤差平方平均根值(ϵ_{rms})為 0.24%，結果顯示，空氣耦合對結構自然頻率僅有微小的影響。
2. 聲場模態振型與振動模態振型之比對結果，以 A-05/O-05 模態為例，紅色虛線為模態振型節線，物理意義皆為 $(z,\theta)=(1,4)$ ，此案例聲場模態振型與結構模態振型對應良好，A-01/O-01、A-12/O-12、A-13/O-13 兩者模態具有對應趨勢，表示藉由此方法應用聲學照相機可成功量測實際聲場模態振型，也確認結構振動與聲場模態具有關聯性。
3. 部分聲場模態振型與振動模態振型物理意義趨勢較不同，但聲場模態振型仍具有明顯模態特徵，推測可能為聲場模態振型特徵與結構本身模態振型特徵不同，未來將加入銅鐘聲振耦合分析，進一步驗證聲場模態振型的實驗量測結果。

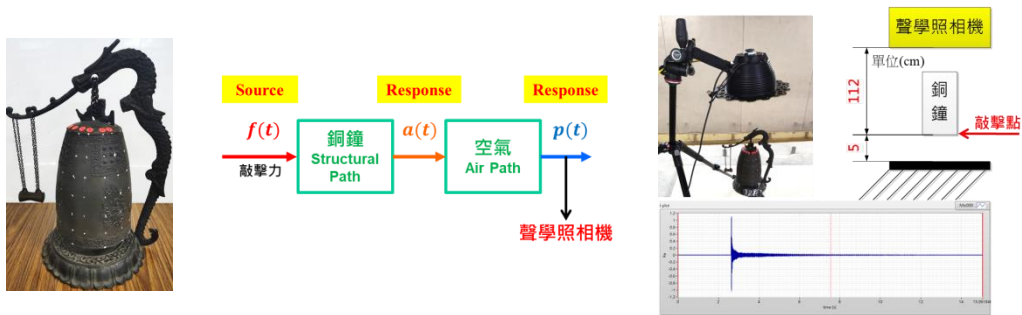


圖 8 銅鐘實體圖 圖 9 聲場模態振型量測系統方塊圖 圖 10 聲場模態振型量測儀器架設示意圖

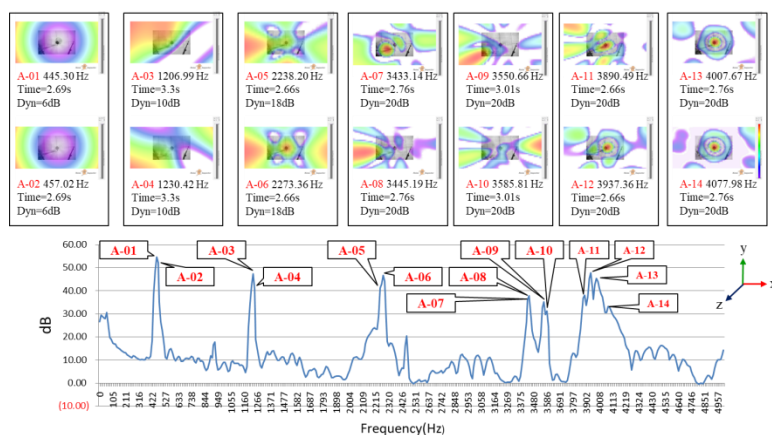


圖 11 聲音頻譜與相應的聲場模態振型圖

表 2 聲場模態振型量測自然頻率總表

聲學照相機量測	
模態數	自然頻率 (Hz)
A-01	445.30
A-02	457.02
A-03	1206.99
A-04	1230.42
A-05	2238.20
A-06	2273.36
A-07	3433.14
A-08	3445.19
A-09	3550.66
A-10	3585.81
A-11	3890.49
A-12	3937.36
A-13	4007.67
A-14	4077.98

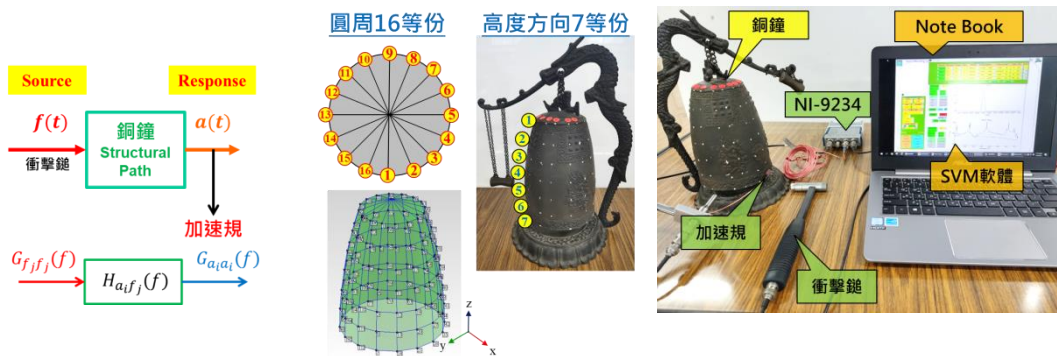


圖 12 銅鐘實驗模態分析系統方塊圖

(a)銅鐘實驗模態分析量測點示意圖

(b)銅鐘實驗模態分析儀器架設圖

圖 13 銅鐘實驗模態分析佈點規劃與儀器架設圖

表 3 聲場模態量測與實驗模態分析自然頻率總表

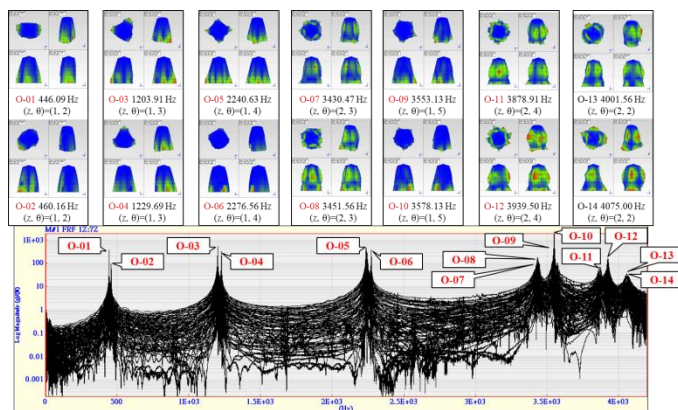


圖 14 加速度頻譜與相應的振動模態振型圖

模態數	聲學照相機量測		EMA		物理意義	自然頻率物差(%)
	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	模態數		
A-01	445.30	O-01	446.09	O-01	(z, θ)=(1, 2)	0.18
A-02	457.02	O-02	460.16	O-02	(z, θ)=(1, 2)	0.69
A-03	1206.99	O-03	1203.91	O-03	(z, θ)=(1, 3)	-0.26
A-04	1230.42	O-04	1229.69	O-04	(z, θ)=(1, 3)	-0.06
A-05	2238.20	O-05	2240.63	O-05	(z, θ)=(1, 4)	0.11
A-06	2273.36	O-06	2276.56	O-06	(z, θ)=(1, 4)	0.14
A-07	3433.14	O-07	3430.47	O-07	(z, θ)=(2, 3)	-0.08
A-08	3445.19	O-08	3451.56	O-08	(z, θ)=(2, 3)	0.18
A-09	3550.66	O-09	3553.13	O-09	(z, θ)=(1, 5)	0.07
A-10	3585.81	O-10	3578.13	O-10	(z, θ)=(1, 5)	-0.21
A-11	3890.49	O-11	3878.91	O-11	(z, θ)=(2, 4)	-0.30
A-12	3937.36	O-12	3937.50	O-12	(z, θ)=(2, 4)	0.00
A-13	4007.67	O-13	4001.56	O-13	(z, θ)=(2, 2)	-0.15
A-14	4077.98	O-14	4075.00	O-14	(z, θ)=(2, 2)	-0.07
自然頻率誤差平均值						0.02
自然頻率誤差平方平均根值						0.24

五、結論

本文目的為驗證聲學照相機於空間域中量測分析的準確度，並應用於量測銅鐘聲場模態振型，瞭解銅鐘響應於空間的傳遞特性，並利用實驗模態分析所得銅鐘結構之模態參數進行驗證，確認聲場模態振型量測結果的可靠性，結論如下：

1. 聲學照相機與實際精密麥克風聲壓總量量測值差異皆小於 3dB，表示聲學照相機於空間域中的聲音量測與分析具有相當可靠度。
2. 聲場模態量測與實驗模態分析之整體自然頻率誤差平均百分比 (ϵ) 為 0.02%，誤差平方平均根值百分比 (ϵ_{rms}) 為 0.24%，兩者模態順序與自然頻率皆對應，表示聲場模態量測與實驗模態分析之結果具有一定的可靠度，且發現空氣路徑對自然頻率的影響微小。
3. 聲場模態振型與振動模態振型比對中 A-05/O-05 模態對應最為良好，A-01/O-01、A-12/O-12、A-13/O-13 兩者模態具有對應趨勢，本文應用聲學照相機方法成功量測實際聲場模態振型，也確認結構振動與聲場模態具有關聯性。

4. 本文針對銅鐘進行聲場模態振型量測，並利用實驗模態分析佐證，確認量測聲場模態振型的可靠性，本文使用之手法也可應用於其他樂器或結構之聲音特性研究與聲場分析驗證。

六、參考文獻

1. Döbler, D., & Heilmann, G. (2005). Perspectives of the Acoustic Camera. *The 2005 Congress and Exposition on Noise Control*, Vol. 3:2672-2679.
2. Kerscher, M., Vonrhein, B., Heilmann, G., Barré, S., & Weigel, P. (2016). Measurement and Visualization of Room Impulse Responses with Spherical Microphone Arrays. *29th Tonmeistertagung - VDT International Convention*, Cologne, 1-7.
3. 王栢村, 楊昶昱, 張博鈞, 黃家賢, 吳盈輝 (2016) 不同銅鐘之振動模態與發聲機制探討, 中國機械工程學會第三十三屆全國學術研討會論文集, 台北, 論文編號:1490.
4. Liu, Z., & Yi, C. (2008). The Analysis of Vibro-Acoustic Coupled Characteristics of Ball Mill Cylinder Under Impact Excitation. *China Conference on Software Engineering*, China, Vol. 2, No. 6.
5. 王栢村, 林怡馨 (2007) 鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討, 中華民國音響學會年會暨第二十屆論文發表會, 臺北, 論文編號:C5.
6. 王栢村, 蔡俊郎, 黃崇閔, 黃家賢, 吳盈輝, (2016) 銅鐘聲振耦合分析之模態特性與聲音頻譜, 台灣聲學學會第二十九屆學術研討會論文集, 雲林, 第 13-21 頁.

表 4 聲場模態振型與振動模態振型總表

聲學照相機量測		EMA		物理意義 (z,θ)
自然頻率(Hz)	模態振型	自然頻率(Hz)	模態振型	
A-01_ 445.30		O-01_446.09		(1,2)
A-03_ 1206.99		O-03_ 1203.91		(1,3)
A-05_ 2238.20		O-05_ 2240.63		(1,4)
A-07_ 3433.14		O-07_ 3430.47		(2,3)
A-09_ 3550.66		O-09_ 3553.13		(1,5)
A-12_ 3937.36		O-12_ 3939.50		(2,4)
A-13_ 4007.67		O-13_ 4001.56		(2,2)