

小提琴之實驗模態分析與振動模態特性探討

Experimental Modal Analysis and Vibration Modes Characteristics of Violin

王栢村¹ 龍暉² 潘忠岳¹ 林偉智¹ 李哲綸¹ 馬凱齡¹Bor-Tsuen Wang¹, Way Long², Chung-Yueh Pan¹, Wei-Chih Lin¹, Jhe-Lun Li¹, Kai-Ling Ma¹¹ 國立屏東科技大學機械工程系¹Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology² 國立屏東科技大學木材科學與設計系²Department of Wood Science and Design, National Pingtung University of Science and Technology

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

小提琴屬於以琴弦發聲的一種弦樂器，其發聲方式是藉由弓與琴弦摩擦經琴弦振動傳遞到共鳴箱而發出聲音。因小提琴的聲音特性與結構之振動模態參數有密切的關聯性，故本研究對小提琴結構在無琴弦張力效應下進行實驗模態分析 (experimental modal analysis, EMA)，並探討其振動模態特性。首先對小提琴結構依面板、背板、側板、琴頸四個部分規劃適當之實驗量測點，以移動衝擊錘及固定加速度規的方式進行實驗模態分析，由實驗量測得到之頻率響應函數，再進行曲線嵌合可得到四個組件結構之模態參數，包括自然頻率、模態振型及模態阻尼比。並運用曲線嵌合軟體之技巧，將四個組件結構模型結合取得組合結構模型，可以觀察整體結構模型之模態，進而探討小提琴整體結構及零組件結構之振動模態特性，並比較零組件結構模態振型與整體結構操作變形振型之差異。由於面板及背板與聲音品質有較大之關聯性，最後討論面板與背板之振動特性，並可區分出其具有自由邊界的整體模態和四周固定的局部模態及單邊固定的振動模態。本文主要探討實驗模態分析的方法應用在複雜的組合結構，對於複雜組合結構可將其分為不同零組件，分別獨立進行實驗模態分析，以獲得整體結構與零組件結構之振動模態，使能瞭解小提琴結構之振動模態特性。

關鍵字：小提琴、實驗模態分析、振動模態、模態參數、操作變形振型

Abstract

The violin is a kind of string instrument. The sound generation is excited by using the bow rubbing the string to induce the vibration transmitted to resonance box and amplify the sound radiation. This work adopts experimental modal analysis (EMA) on the violin without the string tension to obtain vibration modes of violin. EMA takes measurement by the roving impact hammer and the fixed accelerometer on the top plate, back plate, side plate, and neck of violin, respectively. The four individual parts of the assembly violin is performed EMA, respectively, to obtain the frequency response functions (FRFs) as well as modal parameters, including natural frequencies, mode shapes, and modal damping ratios, after the curve-fitting process. In modal parameter extraction software, the individual component structure models for the four parts are assembled to obtain the entire violin structure model, and so forth both the violin component and assembly vibration modes can be observed, respectively. The violin's vibration modes can be identified for global structure modes by operational deflection shape (ODS) and local component modes. The global modes reveal vibration in all components, while the component modes show only one or several components vibrate and others do not. The top plate and back plate are known mostly related to sound quality of violin. Their vibration modes are identified as global

free motion modes and fully or partially fixed local plate modes. This work shows EMA techniques on complex structure such a violin by taking measurement on individual parts and assembling to the entire structure for comparing the individual part and assembly structure's vibration modes.

Keywords: Violin, Experimental Modal Analysis (EMA), Vibration Modes, Modal Parameters, Operational Deflection Shape

1. 前言

小提琴屬於弓弦樂器，是現代管弦樂團弦樂組中最重要的樂器。其獨特的發音會因其不同部位的互動所造成。拉弓時擦過小提琴的弦線從而振動，這個振動透過琴橋和音柱被傳送至琴身（主要為琴身頂部和底部），弦的張力和琴身的建造也會對小提琴琴音的大小及音質作出影響。因此我們將小提琴分為受琴弦張力及無琴弦張力進行實驗模態分析 (experimental modal analysis, EMA)，以探討在這兩種狀態下小提琴結構的振動模態特性。本文將先針對小提琴無琴弦張力效應之振動模態特性進行討論。

王等人 [1] 對一複雜結構之多功能車 (utility vehicle, UV) 車架進行實驗模態分析，探討實務實驗方法步驟及技巧，將多功能車車架結構區分為外框、上橫樑、中間座、下底盤四部位來探討振動模態特性。胡等人 [2] 分別對大客車之底盤和車架，以及整車車體結構進行振動分析與實驗，並探討各種型車條件下的車體振動行為。王等人 [3] 針對振動噪音量測技術開發客製化之聲音振動量測 (sound and vibration measurement, SVM) 軟體，此聲音振動量測軟體可用來進行實驗模態分析，並將實驗所得之數據快速傳輸予曲線嵌合軟體，以方便後續之處理。王與黃 [4] 以有限元素分析及實驗模態分析對含琴柄與共鳴箱之整體吉他結構進行探討，並求得吉他之振動模態特性，由模態振型來看，後板之響應比起前板或琴柄響應要來的大，原因與加速度規放置之位置有關，可以考慮變換加速度規之放置點至前板或琴柄，用以比較不同放置點之差異。王與蘇 [5] 對吉他弦進行實驗模態分

析，在實驗架設時，為了避免加速度規質量效應過大，實驗為固定加速度規，移動衝擊錘之敲擊方式。

王等人 [6] 對迴轉式壓縮機由一次實驗獲得三個部件實驗模態分析結果，將不同部位所量測之模態參數結合來看，在自然頻率上大部分都有對應，但在比對模態振型時卻沒對應的很好，可能的原因為加速度規放置的位置相差了 90 度的相位角，導致振型有前後及左右擺動的差異。王等人 [7] 對吉他之共鳴箱進行實驗模態分析，觀察實驗頻率響應函數之不明顯的峰值，是由琴頸與吉他共鳴箱所產生；明顯之峰值則為吉他音箱主要的模態振型。王等人 [8] 對典型之扁鑼進行有限元素分析及實驗模態分析，瞭解其振動特性，並由實驗分析得知，聲音的特性與振動分析所得模態參數有密切的關聯性，故得知樂器的聲音特性可經由振動分析的結果預先推測。

Runnemalm et al. [9] 觀察小提琴 400 ~ 600 Hz 操作變形振型中的正交振動分量，因該頻率區間下具有兩個最突出的橋樑移動的共振峰值及聲音輻射。Schumacher [10] 嘗試以有限元素法的軟體分析小提琴，因其材質為木頭，而木頭的彈性體模態較難用實驗的方法取得，故以理論方式得到小提琴的模態振型。Marshall [11] 將小提琴尾部朝上，使用兩條橡皮筋套在小提琴 C 段腰部內弧處，並以金屬框架支撐模擬自由邊界進行實驗模態分析，量測頻寬設定在 0 ~ 1300 Hz。

本文對於小提琴無琴弦張力效應之實驗模態分析與振動模態特性探討主要分為：

1. 針對小提琴此複雜組合結構進行實驗模態分析時，透過王等人 [1] 對多功能車車架的實務實驗方法為參考依據，將小提琴結構分成面板、背板、側板、琴頸等四個零組件進行實驗模態分析。
2. 運用王等人 [7] 對吉他之共鳴箱進行實驗模態分析的經驗，觀察整體結構模型 (global structure model) 與零組件結構模型在不同頻率下之振動型態並進行差異比較。
3. 接著由王等人 [8] 實驗之結果，樂器的聲音特性可經由振動分析的結果預先推測，故我們對較影響小提琴聲音品質的面板與背板進行振動特性探討與比較。

2. 小提琴之實驗模態分析方法與步驟

2.1 布點規劃與預測試

圖 1 為小提琴的實際照片，首先對小提琴結構之面板、背板、側板、琴頸部分規劃量測點，以進行實驗模態分析。圖 2 為小提琴各部位量測點照片，其量測點規劃如下：面板規劃 100 點，由外到內採環狀排列，點與點間距約 2.5 cm。背板規劃 45 點，外圍採環狀，內部採平均分配，點與點間距約 4 cm。琴頸規劃 16 點，點與點間距 3 cm。側板規劃 58 點，將其分成兩層，每層點與點間距 4 cm。

經由預測試得知，對各部件進行實驗模態分析時加速度規分別放置小提琴面板第 55、69 點位置、背板第 186、198 點位置、側板第 156、123 點位置、琴頸第 213、210 點位置，衝擊錘敲擊小提琴結構時可



圖 1 小提琴實際照片

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

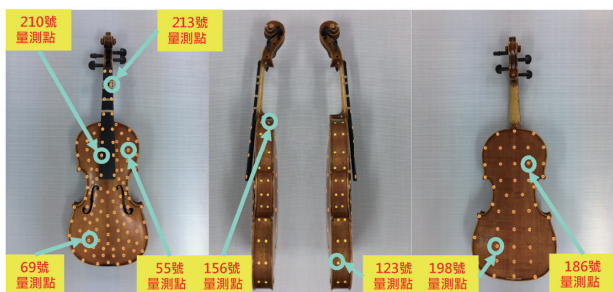


圖 2 小提琴各部位量測點實體照片

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

以得到最多的模態振型 (P_i)，並非小提琴結構之節點位置，因此選定上述點數為加速度規之放置位置，並移動小型衝擊錘進行實驗模態分析。

2.2 實驗模態分析

圖 3 為小提琴自由邊界實驗儀器與量測圖。小提琴使用尼龍繩，掛勾於琴頭，懸吊於架上模擬自由邊界。利用小型衝擊錘對整支小提琴結構之面板、背板、側板、琴頸部分進行敲擊實驗，並以兩顆加速度規做為感測器進行量測。衝擊錘選擇小型鋼頭衝擊錘，採固定加速度規，移動衝擊錘之方式進行模態測試。

圖 4 為聲音振動量測頻譜分析儀介面設定，本實驗將頻譜分析儀設定頻寬為 0 ~ 5000 Hz，解析頻率 1.28 Hz，衝擊錘與加速度規不加任何加權函數。經由實驗模態分析所量得訊號傳輸到頻譜分析儀，作快速傅立葉轉換，求得實驗頻率響應函數如圖 5 所示。圖 6 為小提琴結構之布點模型，再由 ME'scopeVES 軟體對實驗頻率響應函數做曲線嵌合，以求得合成實驗頻率響應函數與模態參數。小提琴經由實驗模態分析所求得之振動模態，依照不同部件可得，面板共 35 個、背板 34 個、側板 32 個、琴頸 26 個。

3. 小提琴振動模態特性探討

3.1 小提琴整體結構模型與零組件結構模型

由於小提琴是一複雜組合結構，故在完成整支小提琴實驗模態分析後，將小提琴結構分為四個個

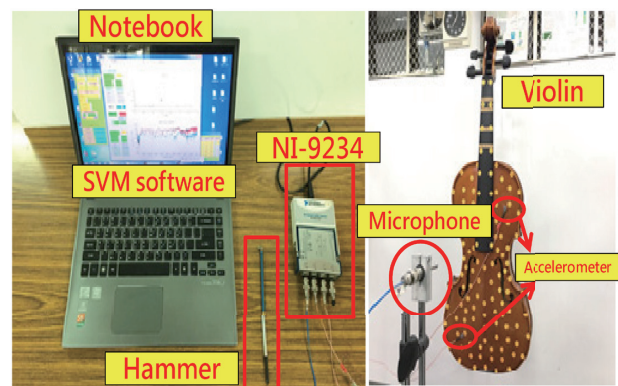


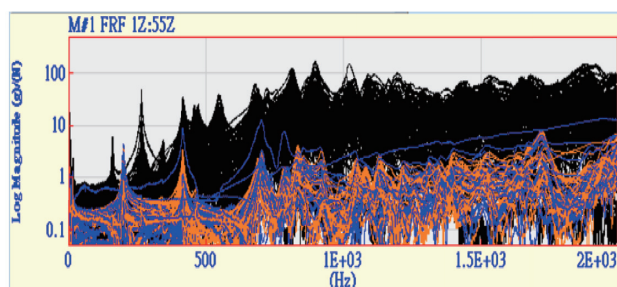
圖 3 小提琴自由邊界實驗儀器與量測照片

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

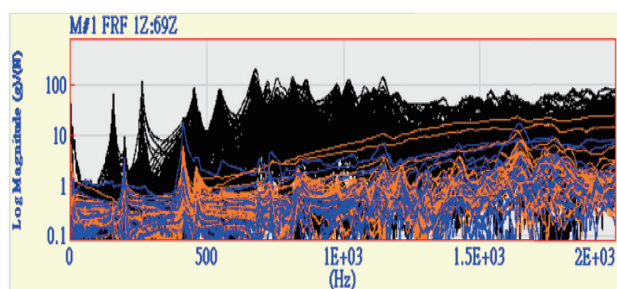


圖 4 聲音振動量測頻譜分析儀介面設定

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>



(a)



(b)

圖 5 頻率響應函數振幅部重疊圖：(a) 加速度規一 0~2000 Hz；(b) 加速度規二 0~2000 Hz

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

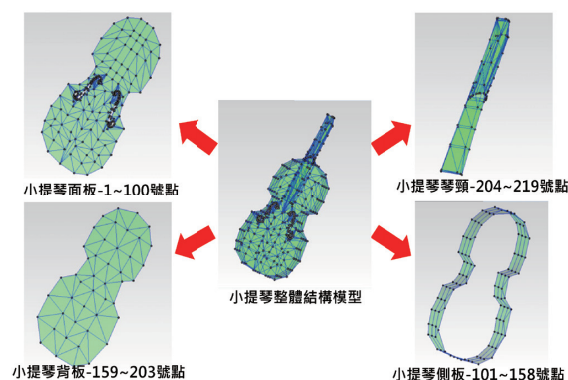


圖 6 小提琴結構之布點模型

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

別零組件進行後處理，並在 ME'scopeVES 結構模型中分為整體結構模型與零組件結構模型 (component structure model) 以呈現小提琴之模態振型，圖 7 為整體結構模型與零組件結構模型之模態。整體結構模型之模態以操作變形振型 (operational deflection shape, ODS) 來觀察小提琴的變形振動狀態，並在觀察整體結構模態 (global structure mode) 時，複製側板共 58 點之頻率響應函數，同時更改其量測點座標，使側板除了具有本身側向振動特性外，同時也具有面板及背板之振動特性。零組件結構模型之模態 (component structure mode) 以四個組件：面板、背板、側板、琴頸分別觀察，並且可以得到四組件之模態參數，包括自然頻率 (f_n)、模態振型、阻尼比。

3.2 小提琴之振動模態特性

小提琴自然頻率總表如表 1 所示，由兩顆加速度規所量測到的模態數量共有 64 個。由於無法辨識該

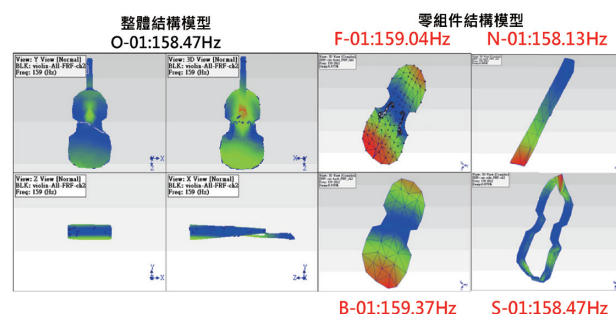


圖 7 整體結構模型與零組件結構模型之模態

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

表 1 小提琴自然頻率總表

加速度規一			加速度規二			一、二加速度規	
模態	自然頻率 (Hz)	阻尼比 (%)	模態	自然頻率 (Hz)	阻尼比 (%)	模態	自然頻率 (Hz)
A-01	158.47	0.88	A-01	158.98	0.88	O-01	158.47
A-02	199.83	0.86	A-02	198.35	0.96	O-02	199.83
A-03	268.28	0.68	A-03	266.88	0.70	O-03	268.28
A-04	280.61	1.54	A-04	279.98	1.94	O-04	280.61
A-05	344.65	1.04	A-05	244.65	1.02	O-05	344.65
A-06	419.62	0.95	A-06	419.77	0.96	O-06	419.62
A-07	458.02	0.96				O-07	458.02
A-08	465.89	0.97	A-07	462.09	0.79	O-08	465.89
A-09	475.50	0.90	A-08	472.01	0.94	O-09	475.50
A-10	549.44	1.56	A-09	549.40	1.71	O-10	549.44
A-11	680.44	1.29	A-10	681.44	1.35	O-11	680.44
A-12	691.65	0.88	A-11	691.06	0.12	O-12	691.65
A-13	725.68	1.30	A-12	725.37	1.24	O-13	725.68
A-14	735.80	1.02	A-13	735.59	1.02	O-14	735.80
A-15	760.41	1.32	A-14	760.58	1.26	O-15	760.41
A-16	769.34	1.18	A-15	769.54	1.08	O-16	769.34
A-17	785.37	1.14	A-16	782.14	0.50	O-17	785.37
A-18	817.46	1.17	A-17	815.75	1.19	O-18	817.46
A-19	836.03	0.29	A-18	836.63	1.09	O-19	836.03
			A-19	854.46	0.71	O-20	854.46
A-20	869.29	1.28	A-20	869.27	1.02	O-21	869.29
A-21	896.63	1.28	A-21	897.50	1.23	O-22	896.63
A-22	915.20	0.96				O-23	915.20
A-23	925.04	1.05				O-24	925.04
A-24	987.99	1.09	A-22	988.07	0.18	O-25	987.99
A-25	1021.80	0.80	A-23	1022.00	1.06	O-26	1021.80
A-26	1049.10	0.96	A-24	1049.04	0.91	O-27	1049.10
A-27	1059.51	0.77				O-28	1059.51
A-28	1084.33	0.49	A-25	1085.31	0.93	O-29	1084.33
A-29	1092.01	1.18	A-26	1097.20		O-30	1092.01
A-30	1111.54	0.88				O-31	1111.54
A-31	1131.96	0.80	A-27	1130.25	0.89	O-32	1131.96
A-32	1147.60	0.86	A-28	1148.10	0.95	O-33	1147.60
A-33	1172.25	0.83	A-29	1168.56	1.09	O-34	1172.25
A-34	1205.12	1.06	A-30	1205.99	1.12	O-35	1205.12
A-35	1219.30	0.82	A-31	1219.40	0.90	O-36	1219.30
A-36	1245.80	1.03				O-37	1245.80
A-37	1257.96	0.55				O-38	1257.96

表 1 小提琴自然頻率總表 (續)

加速度規一			加速度規二			一、二加速度規	
模態	自然頻率 (Hz)	阻尼比 (%)	模態	自然頻率 (Hz)	阻尼比 (%)	模態	自然頻率 (Hz)
A-38	1315.10	0.66	A-32	1314.20	0.97	O-39	1315.10
A-39	1349.10	1.28	A-33	1347.70	0.91	O-40	1349.10
			A-34	1388.05	1.19	O-41	1388.05
A-40	1397.49	0.09	A-35	1399.25	0.76	O-42	1397.49
			A-36	1429.52	1.20	O-43	1429.52
A-41	1437.44	0.75				O-44	1437.44
A-42	1480.84	0.01	A-37	1487.72	0.01	O-45	1480.84
			A-38	1492.50	1.19	O-46	1492.50
A-43	1513.66	1.42				O-47	1513.66
			A-39	1527.90	0.41	O-48	1527.90
			A-40	1543.26	0.96	O-49	1543.26
A-44	1599.25	0.57	A-41	1570.31	0.93	O-50	1570.31
A-45	1620.00	0.85	A-42	1598.73	0.63	O-51	1599.25
A-46	1635.30	0.82	A-43	1619.82	0.64	O-52	1619.82
A-47	1648.37	1.21	A-44	1636.76	0.60	O-53	1635.30
A-48	1666.00	1.04	A-45	1648.21	1.12	O-54	1648.37
A-49	1683.60	0.85	A-46	1664.10	0.99	O-55	1666.00
A-50	1728.99	0.96				O-56	1683.60
			A-47	1784.40	0.97	O-57	1728.99
A-51	1825.80	1.30				O-58	1784.40
A-52	1869.00	1.21				O-59	1825.80
A-53	1894.19	0.98				O-60	1869.00
			A-48	1909.70	0.71	O-61	1894.19
A-54	1922.52	0.64	A-49	1925.49	0.72	O-62	1909.70
A-55	1953.50	1.08	A-50	1952.80	0.82	O-63	1922.52
						O-64	1952.80

頻率下之振動模態為小提琴哪一部分零組件所貢獻，故將小提琴的振動模態特性分為整體結構模態與零組件結構模態來進行觀察。圖 7 與圖 8，O-01 頻率在 158 Hz 與 O-02 頻率在 199 Hz 時為小提琴整體結構模態，此時面板、背板、側板、琴頸在 158 Hz、199 Hz 時也有其對應的模態振型。圖 9 為小提琴零組件結構模態，圖 9 (a) O-18/F-14 頻率在 817 Hz 時只有面板之模態振型，琴頸、背板、側板為操作變形振型、圖 9 (b) O-15/N-07/B-10 頻率在 760 Hz 時只有背板與琴頸之模態振型，面板與側板為操作變形振型、圖 9 (c) O-06/F-06/B-05/S-05 頻率在 419 Hz 時有面板與背板及側板之模態振型，琴頸為操作變形振型。

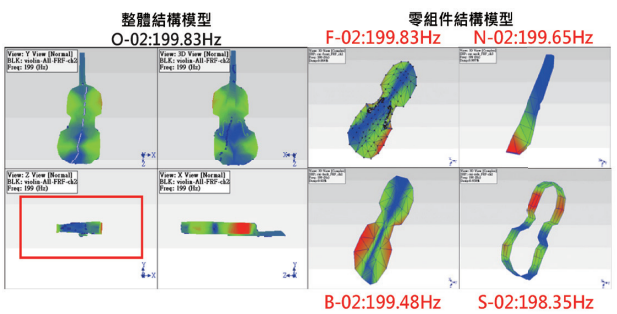
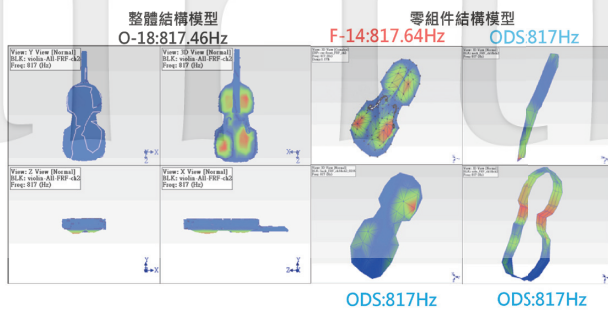
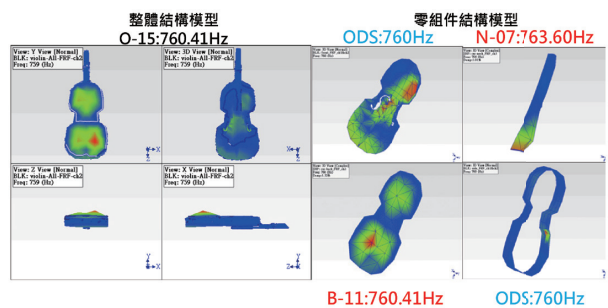


圖 8 整體結構模態

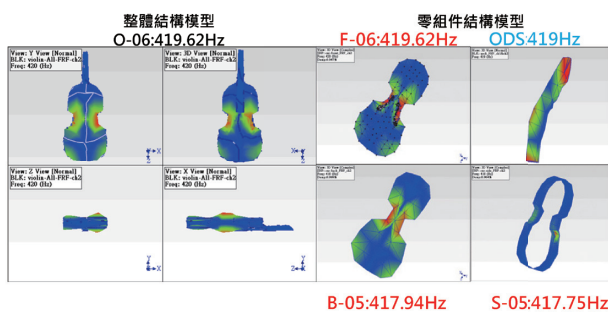
註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>



(a)



(b)



(c)

圖 9 零組件結構模態：(a) 面板之模態振型；(b) 背板、琴頸之模態振型；(c) 面板、背板、側板之模態振型

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

3.3 小提琴結構在不同頻率下之振動型態

小提琴的振動模態中有很多是屬於零組件結構模態，而有模態才具有對應之自然頻率及模態振型。若沒有模態則觀察其操作變形振型，且當 $f \sim f_r$ 時，操作變形振型會與該自然頻率對應的模態振型的物理意義相同。因此探討結構模態振型與結構操作變形振型在不同頻率下之振動行為。圖 8 O-02 在頻率 199 Hz 時為小提琴整體結構模態，由左下紅框處之仰視圖可以判斷此整體結構模態為反向模態，並且受到側板振

動特性影響造成小提琴 X 方向擺動，其面板與背板之物理意義 $(X, Y) = (1, 2)$ 。圖 9 (a) O-18/F-14 為小提琴面板四周固定之局部區域模態 (local mode) 其物理意義 $(X, Y) = (2, 2)$ 、圖 9 (b) O-15/B-11 為背板四周固定之局部區域模態其物理意義 $(X, Y) = (1, 2)$ 、圖 9 (c) O-06/F-06/B-05 為面板與背板四周固定局部區域模態其物理意義 $(X, Y) = (2, 3)$ ，且其操作變形振型與該自然頻率所對應的模態振型的物理意義相同，並由此可觀察出小提琴結構的模態振型特性。

3.4 小提琴面板與背板振動特性

本實驗是以整支小提琴進行實驗模態分析，為了更加瞭解小提琴面板特性，本節特別探討面板及背板物理意義，圖 10 (a) 為面板合成頻率響應函數與模態振型、圖 10 (b) 為背板合成頻率響應函數與模態振型。可觀察出 0 ~ 1000 Hz 面板與背板之模態振型與模態峰值頻率對應良好。且因面板及背板與聲音品質有較大之關聯性，故將 0 ~ 1000 Hz 間面板與背板之模態振型整理如表 2，討論如下。

1. F-01/B-01、F-03/B-03 物理意義 $(X, Y) = (1, 2)$ 、F-02/B-02 物理意義 $(X, Y) = (2, 1)$ 皆為整體模態 (global mode)。
2. F-04 為面板四周固定的局部區域模態物理意義 $(X, Y) = (1, 1)$ 。
3. F-05/B-04 物理意義 $(X, Y) = (2, 1)$ 、F-06/B-05 物理意義 $(X, Y) = (2, 3)$ 且皆為頭尾固定的局部區域模態。
4. F-07 為面板四周固定的局部區域模態物理意義 $(X, Y) = (1, 2)$ 但面板上部響應較小。
5. B-06 頭部固定尾部飄移物理意義 $(X, Y) = (1, 2)$ 為背板單邊固定模態。
6. F-08/B-07 為頭尾固定局部區域模態但物理意義不相同，面板 $(X, Y) = (3, 1)$ 、背板 $(X, Y) = (1, 2)$ 。
7. F-09/F-10 物理意義上部為 1，底部為 2，不同處為 F-10 中間節線分開，皆為面板頭尾固定局部區域模態，但右半部的響應皆偏小。
8. F-13 較特殊屬於節線飄移，並無固定節線，判斷為阻尼影響所造成。
9. F-14 物理意義 $(X, Y) = (2, 2)$ 為面板四周固定的局部區域模態。
10. O-24 頻率在 915 Hz、925 Hz 下只有側板之振動模態，並無面板與背板。

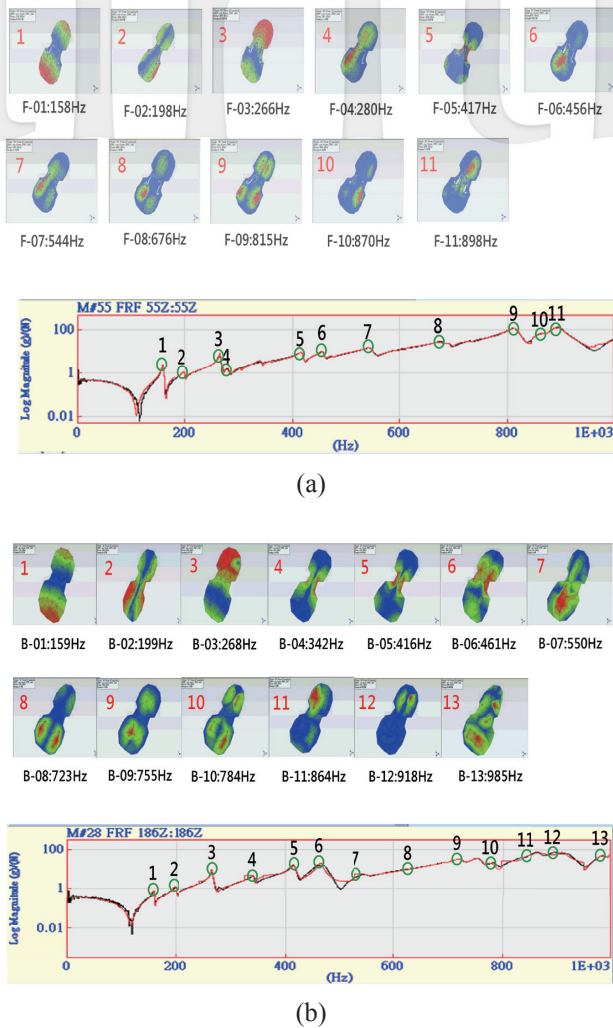


圖 10 合成頻率響應函數與模態振型：

(a) 面板；(b) 背板

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

由以上討論整理可發現，面板與背板之振動模態主要分為整體模態、四周固定與頭尾固定局部模態，以及單邊固定的局部區域模態，且四周固定與頭尾固定之局部模態數量最多。

4. 結論

本文應用實驗模態分析於無琴弦張力之小提琴，探討小提琴振動模態特性，其主要結論如下：

1. 透過將小提琴結構依面板、背板、側板、琴頸四大部分並獨立進行實驗模態分析，以獲得各零組件結構模態，且運用曲線嵌合軟體技巧獲得小提琴整體

表 2 面板與背板振動模態

模態	頻率 (Hz)	面板	背板
O-01	158.47	 物理意義 (X, Y) = (1, 2) F-01: 158.47 Hz	 物理意義 (X, Y) = (1, 2) B-01: 159.37 Hz
O-02	199.83	 物理意義 (X, Y) = (2, 1) F-02: 199.83 Hz	 物理意義 (X, Y) = (2, 1) B-02: 199.48 Hz
O-03	268.28	 物理意義 (X, Y) = (1, 2) F-03: 266.80 Hz	 物理意義 (X, Y) = (1, 2) B-03: 268.28 Hz
O-04	280.61	 物理意義 (X, Y) = (1, 1) F-04: 280.61 Hz	
O-05	344.65	 物理意義 (X, Y) = (2, 1) F-05: 343.63 Hz	 物理意義 (X, Y) = (2, 1) B-04: 344.65 Hz
O-06	419.62	 物理意義 (X, Y) = (2, 3) F-06: 419.62 Hz	 物理意義 (X, Y) = (2, 3) B-05: 417.94 Hz

表 2 面板與背板振動模態 (續)

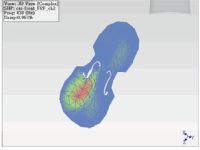
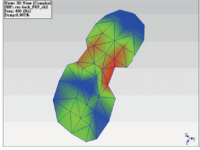
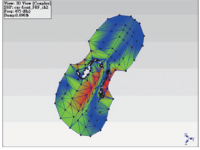
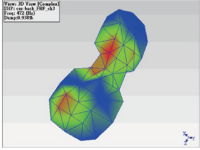
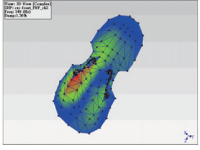
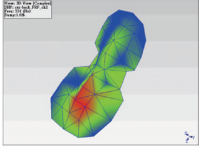
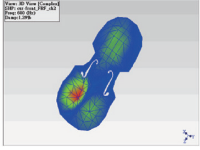
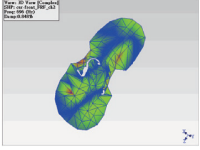
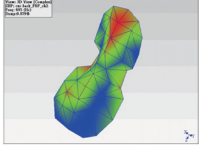
模態	頻率 (Hz)	面板	背板
O-07	458.62		
		物理意義 (X, Y) = (1, 2) F-07: 458.02 Hz	
O-08	465.89		
		物理意義 (X, Y) = (1, 2) B-06: 465.89 Hz	
O-09	475.50		
		物理意義 (X, Y) = (3, 1) F-08: 474.81 Hz	物理意義 (X, Y) = (1, 2) B-07: 472.01 Hz
O-10	549.44		
		物理意義 (上, 下) = (1, 2) F-09: 549.44 Hz	物理意義 (X, Y) = (2, 3)
O-11	680.44		
		物理意義 (上, 下) = (1, 2) F-10: 680.44 Hz	
O-12	691.65		
		F-11: 696.04 Hz	物理意義 (上, 下) = (3, 3) B-09: 695.49 Hz

表 2 面板與背板振動模態 (續)

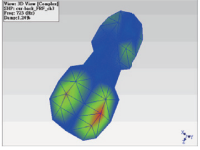
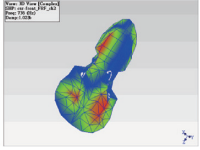
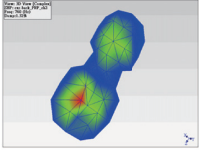
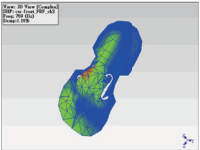
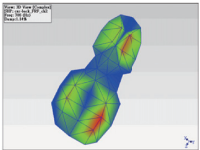
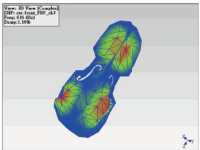
模態	頻率 (Hz)	面板	背板
O-13	725.68		
			物理意義 (X, Y) = (2, 2) B-10: 725.68 Hz
O-14	735.80		
		物理意義 (上, 下) = (1, 2) F-12: 735.80 Hz	
O-15	760.41		
			物理意義 (上, 下) = (1, 1) B-11: 760.41 Hz
O-16	769.34		
		節線飄移，無固定節線 F-13: 769.34 Hz	
O-17	785.73		
			物理意義 (X, Y) = (2, 2) B-12: 785.73 Hz
O-18	817.46		
		物理意義 (X, Y) = (2, 2) F-14: 817.46 Hz	

表2 面板與背板振動模態 (續)

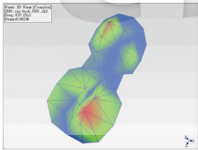
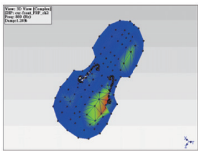
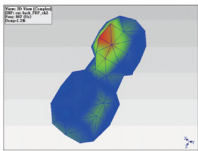
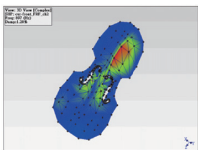
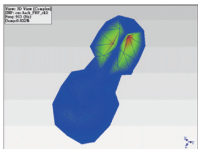
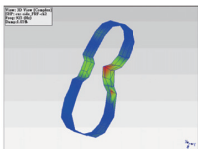
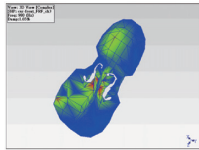
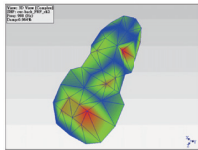
模態	頻率 (Hz)	面板	背板
O-19	836.03		
			物理意義 (X, Y) = (2, 2) B-13: 837.39 Hz
O-20	854.46		
		側板模態 S-11: 854.46 Hz	
O-21	869.29		
		物理意義 (X, Y) = (2, 2) F-15: 869.29 Hz	物理意義 (上, 下) = (1, 3) B-14: 867.10 Hz
O-22	896.63		
		物理意義 (X, Y) = (2, 1) F-16: 896.63 Hz	
O-23	915.20		
			物理意義 (上, 下) = (2, 1) B-15: 915.20 Hz
O-24	925.04		
		側板模態 S-12: 925.04 Hz	

表2 面板與背板振動模態 (續)

模態	頻率 (Hz)	面板	背板
O-25	987.99		
		F-17: 980.23 Hz	物理意義 (X, Y) = (2, 3) B-16: 987.99 Hz

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

結構模態。並探討各零組件對於小提琴整體模態特性的影響，發現各零組件之模態特性與整體之模態特性有良好的對應，驗證了針對複雜之組合結構可以使用將其分為不同組件進行實驗模態分析的方法。

2. 小提琴振動模態中有很多屬於零組件結構模態，故將其組合後才可以觀察到整體結構模態。並瞭解小提琴振動模態大多都是面板與背板所貢獻，琴頸與側板也有，但量值較小且較不影響小提琴之聲音品質。小提琴振動模態特性大致可分為整體結構模態與零組件結構模態，其中包括單一組件、兩組件及三組件結構模態。
3. 針對觀察實驗結果面板與背板振動特性後，可推測四周固定與頭尾固定之局部區域模態可能較會影響小提琴的聲音品質。並經由部分面板振動模態特性發現右半邊的響應都較左半邊小，推斷原因為小提琴面板內側低音樑導致模態振型產生不對稱。

致謝

本文感謝科技部研究計畫的經費補助，得以完成「小提琴之實驗模態分析與振動模態特性探討」，計畫編號：MOST 107-2221-E-020-018，特此致謝

參考文獻

- [1] 王栢村、陳昱成、陳勇全。車架之實驗模態分析實務與振動模態特性探討。中華民國振動與噪音工程學會第18屆學術研討會。臺北，

- 2010；論文編號：C-150。
- [2] 胡惠文、王栢村、王桀民、高懷恩、陳坤義、呂振源。大客車車體結構之振動分析與實驗。第十五屆中華民國振動與噪音工程學術研討會。臺北，2007；303-315 頁。
- [3] 王栢村、王文志、謝長鴻。客制化振動噪音量測系統之開發驗證與應用。Matlab & Simulink 技術高峰會。臺北，2012；論文編號：No.38。
- [4] 王栢村、黃國棟。吉他之振動特性與模態分析。中華民國音響學會第十七屆學術研討會。高雄，2004；197-205 頁。
- [5] 王栢村、蘇集銘。吉他弦之振動與聲音特性探討。中華民國音響學會第十九屆學術研討會。臺南，2006；論文編號：A7。
- [6] 王栢村、葉銘凱、謝宗廷、周建中、陳金龍。迴轉式壓縮機之實驗模態分析。第二十屆中華民國振動與噪音工程學術研討會。彰化，2012；論文編號：C-09。
- [7] 王栢村、胡惠文、蘇敬翔。吉他共鳴箱之振動特性分析。ANSYS 2003 臺灣區用戶大會暨論文發表會。雲林，2003；71-84 頁。
- [8] 王栢村、李雨軒、張志偉。銅鑼振動與聲音特性之探討。中華民國振動與噪音工程學會第十屆學術研討會。臺北，2002；245-252 頁。
- [9] Runnemalm A, Molin N E, Jansson E. On operating deflection shapes of the violin body including in-plane motions. J Acoust Soc Am, 2000; 107: 3452-3459. doi:10.1121/1.429415
- [10] Schumacher R T. Compliances of wood for violin top plates. J Acoust Soc Am, 1988; 84: 1223-1235. doi:10.1121/1.396623
- [11] Marshall K D. Modal analysis of a violin. J Acoust Soc Am, 1985; 77: 695-709. doi:10.1121/1.392338