

小提琴琴弦之操作模態分析於位移模態振型量測

王栢村¹、龍暉²、蘇秉翔¹、馬凱齡¹、吳盈輝³

¹ 屏東科技大學機械工程系

² 屏東科技大學木材科學與設計系

³ 國立內埔高級農工職業學校 機械科

科技部計畫編號：108-2221-E-020-018

摘要

小提琴為弓弦樂器之一，主要發聲機制是由弓與琴弦的摩擦，使琴弦振動透過音箱產生聲音。本文以實驗方法求得琴弦模態振型，由於琴弦較細，以傳統的模態試驗或實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)是不容易取得模態振型，因衝擊錘不適合激振琴弦，加速規有質量效應不易安裝和測量琴弦。本文提出了操作模態分析(Operational Modal Analysis, OMA)實驗方法，以求得琴弦模態振型，操作狀態的輸入為手指在琴弦上施加撥弦力，此施加力是未知的，同時以非接觸式的雷射位移計量測琴弦振動，加速規黏貼於琴橋與面板上量測參考訊號。本文介紹 OMA 的理念，並詳細介紹量測琴弦響應的實驗程序。針對 OMA 所量測到的琴弦振動的訊號，會進行後處理以得到琴弦之模態振型。結果顯示，因施加力道不穩定，透過琴弦位移訊號與加速度規量測參考訊號的頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)無法取得正確的模態振型。本文提出了兩種方法，時間域方法與頻率域方法，以調整雷射位移計所量測訊號，解決施加力不穩定的狀況，此方法可以合理辨識琴弦前幾個位移模態振型。本文發展 OMA 方法成功取得琴弦位移模態振型，所提出的 OMA 實驗步驟與後處理方法，適用於未知外力激振的操作狀態下的機器或是結構，可以求得結構模態振型或操作模態振型(Operational Deflection Shape, ODS)。

關鍵字：小提琴琴弦、操作模態分析、位移模態振型、振動模態

1. 前言

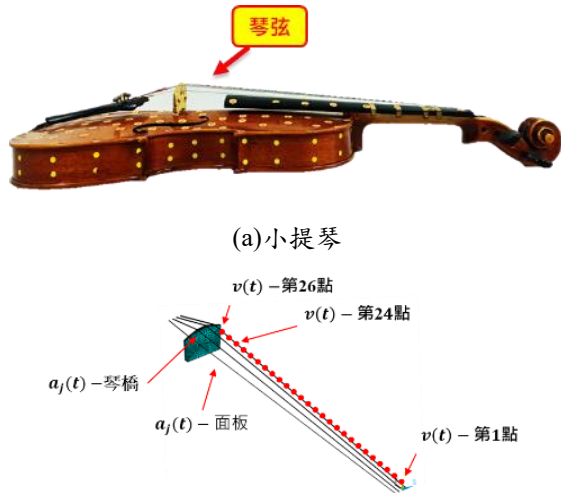
小提琴是個歷史悠久的樂器，透過弓與琴弦磨擦，琴弦振動進而產生獨特的聲音，在研究小提琴的振動特性前，需先了解琴弦振動特性。Aditanoyo et al. [1] 研究木製小提琴與竹製小提琴，探討不同材質所製作之小提琴音色的差異，並開發自動拉弦機，進行小提琴聲音振動分析，結果顯示在中、高頻率時兩種小提琴泛音與頻率響應函數數值沒有對應，在低頻率時則有對應。王等人[2]進行小提琴振動模態特性探討，針對無琴弦張力效應之小提琴進行實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)，將小提琴結構區分為面板、背板、側板與琴頸四部分並獨自進行實

驗量測，結果驗證，複雜結構可分為不同組件進行實驗，小提琴振動模態大多為面板與背板貢獻，側板與琴頸貢獻較小，不影響小提琴聲音。

由於琴弦是小提琴的主要發聲機制，因此需要探討琴弦對於小提琴的影響，Mamom-Main et al. [3] 針對樂器上琴弦研究預應力的影響，設計測試平台，包含了琴板、琴橋與琴弦，透過場聲全息(NAH)進行實驗量測，驗證出預應力對於共鳴箱的影響。王等人[4] 探討吉他弦之振動模態與聲音特性，透過 EMA 量測吉他弦振動模態，並與有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)進行驗證，結果顯示 EMA 可以量測到吉他弦模態參數，不過加速規會造成質量效應，使琴弦自然頻率有偏高情形。

為了瞭解結構模態參數，實驗模態分析是常用的實驗手法，Eleinarrieta et al. [5] 研究吉他特性探討，進行吉他共鳴箱的實驗模態分析，理論分析部分是將共鳴箱區分為面板與背板，將實驗數據與理論分析數據進行對比，結果為共鳴箱內部空氣會影響吉他結構自然頻率與對應模態振型。王等人[6] 針對小提琴面板素材進行機械性質測定，透過有限元素分析與實驗模態分析進行模型驗證，透過模型驗證建立小提琴面板素材測定方式，未來可依此方式為基礎，進行小提琴面板與背板的機械性質測定。王等人[7] 探討車架的 EMA 步驟與振動模態特性，探討實驗步驟與曲線嵌合技巧，結果成功取得完整 UV 車架之模態參數，未來對於複雜結構可以運用相同方法進行實驗。王等人[8] 探討 EMA 與操作模態分析(Operational Modal Analysis, OMA)兩種實驗方式，分別針對振動平台進行實驗，將兩實驗所取得實驗模態參數進行比較，發現 EMA 適用於結構靜止狀態下的量測，OMA 適用於結構運轉中的量測，驗證了 OMA 可以取得結構模態參數。

為了取得琴弦位移模態振型，本文提出使用 OMA 方法進行小提琴琴弦實驗量測，實驗過程中，施力是由人為撥奏琴弦後使琴弦自由振動，並使用雷射位移計量測琴弦振動訊號，加速規分別黏貼於琴橋與面板，量測輸入源之參考訊號，並提出時間域方法與頻率域方法，對於雷射位移計所量測到琴弦振動訊號進行調整，最終取得琴弦之操作模態振型(Operational Deflection Shape, ODS)。



(b) 琴弦 OMA 之量測規劃示意圖

圖 1 小提琴實體結構

2. 操作模態分析理念 OMA

本文使用 OMA 方法進行小提琴琴弦實驗量測，圖 1 為小提琴實體結構，圖 1(a) 為小提琴，實驗量測之結構為琴弦。圖 1(b) 為琴弦量測規劃示意圖，其量測點數規劃每條弦有 26 點，間距為 1.2cm。

2.1 模型驗證理念

本小節對於模型驗證理念進行說明，圖 2 為模型驗證流程圖，首先區分為 3 個區塊，有限元素分析與實驗分析，實驗分析又分為實驗模態分析與操作模態分析。第 1 區塊為有限元素分析，流程為先建立分析模型，接著進行模態分析，求得理論模態參數，包括自然頻率與模態振型；第 2 區塊為實驗模態分析，針對靜止結構進行模態實驗，取得結構頻率響應函數，接著使用曲線嵌合求得結構模態參數；第 3 區塊是本實驗所使用實驗分析手法，因小提琴是由人為撥奏琴弦使琴弦自由振動，因此無法透過實驗模態分析進行實驗分析，需使用操作模態分析手法進行實驗，透過模態實驗可以取得頻率響應函數與自身功率頻譜函數，透過曲線嵌合可以取得實驗模態參數，最後比對理論模態參數與實驗模態參數，確認分析模型等效於實際結構。

2.2 結構系統之振動分析方塊圖

對於振動分析問題，可以透過結構系統方塊圖進行思考，圖 3 為結構系統之振動分析方塊圖，包含 ISO/SPR 分析流程圖、物理域系統方塊圖、模態域系統方塊圖與頻率域系統方塊圖。首先是 ISO/SPR 方塊圖進行結構系統振動分析，Source 為振動或是噪音源；Path 為傳遞路徑；Response 為響應。對應 ISO 分別為 Input 輸入、System 為系統、Output 為輸出。透過物

理域來分析振動源，輸入為外力 $f_j(t)$ ，結構振動加速度 $a_i(t)$ 為輸出，系統包含了幾何形狀(Geometry)、材料性質(Material)、邊界條件(Boundary)與接觸邊界(Interface)，將物理域訊號進行理論模態分析可得到模態域系統，其系統為自然頻率(f_r)、模態振型(ϕ_r)與阻尼比(ξ_r)，但阻尼比無法從理論分析取得，只能從實驗量測得到。最後頻率域系統方塊圖中，系統為頻率響應函數(Frequency response function, FRF)，輸入為衝擊錘激發外力 $f_j(t)$ ，輸出為加速規量測訊號 $a_i(t)$ 。

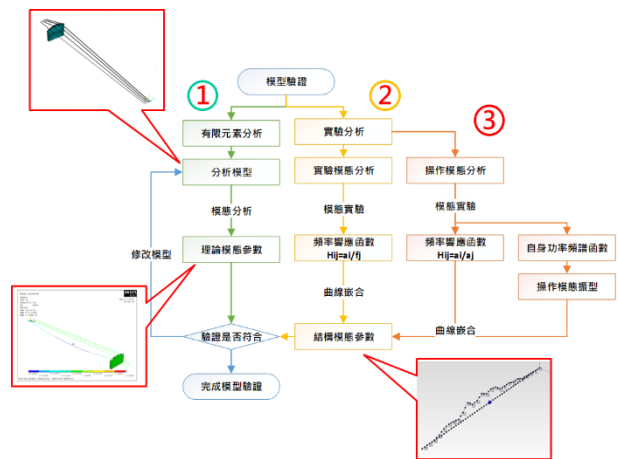
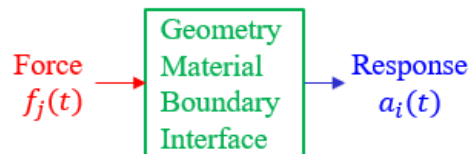


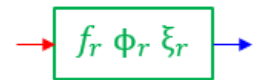
圖 2 模型驗證流程圖



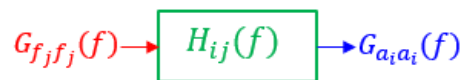
(a) ISO/SPR 分析流程圖



(b) 物理域系統方塊圖



(c) 模態域系統方塊圖



(d) 頻率域系統方塊圖

圖 3 結構系統之振動分析方塊圖

2.3 EMA 之結構系統方塊圖

在振動分析中，實驗方法通常使用 EMA 進行模態實驗，圖 4 為 EMA 之結構系統方塊圖，首先是物理域系統方塊圖，輸入為衝擊錘敲擊訊號 $f_j(t)$ ，輸出為加速規所量測加速度訊號 $a_i(t)$ ，系統為實體結構。對應頻率域系統方塊圖，會將輸入訊號衝擊錘敲擊訊號 $f_j(t)$ 與輸出加速度訊號 $a_i(t)$ 進行快速傅立葉轉換，得到輸入訊號為 $G_{f_j f_j}(f)$ ，輸出訊號為 $G_{a_i a_i}(f)$ ，系統 H_{ij} 為輸出與輸入比值。最後模態域是將 H_{ij} 進行曲線嵌合，求得模態參數，包含：自然頻率、模態振型與阻尼比。

2.4 OMA 之結構系統方塊圖

本次實驗是因琴弦無法使用衝擊錘進行敲擊，加速規黏貼於琴弦也會因質量效應影響實驗數據，因此選擇透過 OMA 進行模態實驗，OMA 與 EMA 最大差別為，EMA 的輸入力是衝擊錘訊號 $f_j(t)$ ，OMA 則無法量取到輸入力訊號 $f_j(t)$ 。本節介紹進行 OMA 之結構系統。



(a) 物理域系統方塊圖



(b) 頻率域系統方塊圖

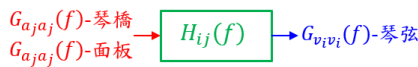


(c) 模態域系統方塊圖

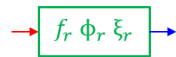
圖 4 EMA 之結構系統方塊圖



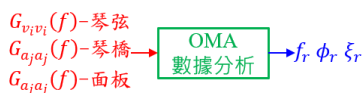
(a) OMA 實際結構系統方塊圖



(b) 頻率域系統方塊圖



(c) 訊號處理之模態域示意圖



(d) OMA 數據分析示意圖

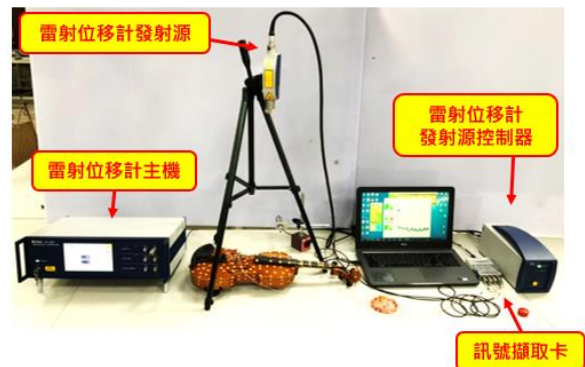
圖 5 OMA 之結構系統方塊圖

圖 5 為 OMA 之結構系統方塊圖，首先實驗中，輸入力為撥弦力 $f_j(t)$ ，但無法量測到其訊號 $f_j(t)$ ，所以透過加速規設為輸入力的參考點，量測撥弦後琴弦自由振動訊號，包含 $a_j(t)$ -琴橋與 $a_j(t)$ -面板，雷射位移計量測琴弦振動速度 $v_i(t)$

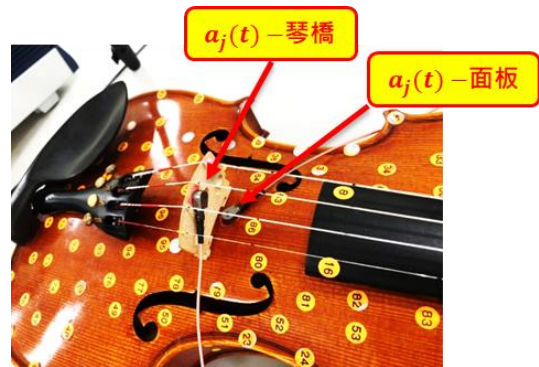
接著將量測到訊號進行快速傅立葉轉換，輸入轉換為 $G_{a_j a_j}(f)$ -琴橋與 $G_{a_j a_j}(f)$ -面板，輸出則轉換為 $G_{v_i v_i}(f)$ ，系統為頻率響應函數 H_{ij} 為輸出與輸入比值 $H_{ij} = \frac{G_{v_i v_i}(f)}{G_{a_j a_j}(f)\text{-面板}}$ 與 $H_{ij} = \frac{G_{v_i v_i}(f)}{G_{a_j a_j}(f)\text{-琴橋}}$ ，模態域是將頻率響應函數 H_{ij} 進行曲線嵌合，求得模態參數：自然頻率 f_r 、模態振型 ϕ_r 與阻尼比 ξ_r 。

最後實驗透過加速規設為輸入力 $f_j(t)$ 的參考點，進行撥弦後琴弦自由振動的量測，但輸入力是人為撥奏琴弦，所以無法控制每次施力大小都相同，因此造成 $G_{a_j a_j}(f)$ -琴橋與 $G_{a_j a_j}(f)$ -面板訊號不穩定，進而影響頻率響應函數無法辨識模態參數。

故透過 OMA 數據分析，將加速規量測到訊號 $G_{a_j a_j}(f)$ -琴橋、 $G_{a_j a_j}(f)$ -面板和雷射位移計量測訊號 $G_{v_i v_i}(f)$ 訊號，進行 OMA 數據分析辨識琴弦模態參數，最終求得琴弦位移模態振型。



(a) 儀器架設位置



(b) 加速規固定位置

圖 6 OMA 實驗儀器架設圖

3. 琴弦 OMA 之實驗方法

本節針對小提琴琴弦進行 OMA 模態實驗，為了求得琴弦模態參數，包含：自然頻率 f_r 、模態振型 ϕ_r 與阻尼比 ξ_r 。

3.1 琴弦 OMA 之儀器架設及設定

本小節介紹進行 OMA 模態實驗所準備的主要儀器及架設方式，圖 6 為 OMA 實驗儀器架設圖，儀器包含雷射位移計、加速規、PC 與訊號擷取卡，琴弦安裝於小提琴上，並完成調音，確認各條琴弦音準正確。琴弦振動輸出由雷射位移計垂直於琴弦進行量測，輸入力透過加速規設為參考點進行量測，分別固定於琴橋與面板。實驗方式採用移動雷射位移計，固定加速規進行實驗量測，於 $i=24$ 點上進行撥弦，撥弦後琴弦自由振動，雷射位移計量測琴弦的振動速度，加速規為輸入源的參考點，量測撥弦後琴弦自由振動訊號。

接下來為頻譜分析儀的設定，圖 7 為頻譜分析儀 (SVM) 介面設定，包含了設定靈敏度介面、快速傅立葉轉換(FFT)控制介面、主介面，表 1 為儀器設定表，雷射位移計型號為 Polytec OFV-534，Window 視窗加權函數選擇 Boxcar，靈敏度為 2083.512 mV/(m/s)；兩顆加速規型號為 ENDEVCO-27AM1，Window 視窗加權函數選擇 Boxcar，靈敏度分別為 10.350 mV/g 與 11.299 mV/g。設定實驗量測頻寬為 5000Hz，解析條數為 12800，觸發條件為 Trigger，平均次數為 1 次，主介面可以選擇呈現各儀器所量測之訊號圖，包括了時間域訊號、自身功率頻譜密度函數、頻率響應函數等等。



圖 7 頻譜分析儀介面設定

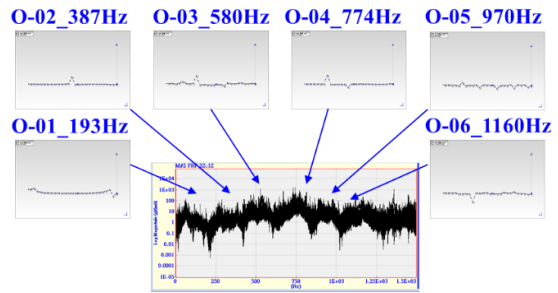


圖 8 頻率響應函數對應 ODS

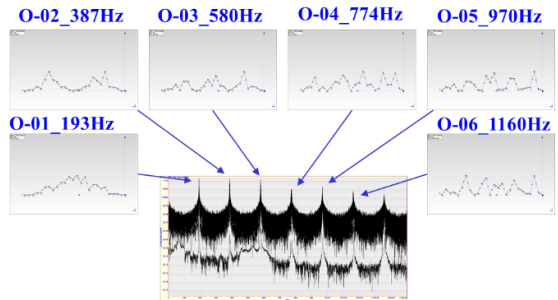


圖 9 雷射位移計頻譜重疊圖對應 ODS

3.2 琴弦 OMA 之操作模態振型理念

透過 OMA 進行琴弦模態，取得琴弦頻率響應函數，從雷射位移計頻譜圖 $G_{v_i v_i}(f)$ 峰值，得到琴弦的自然頻率數值，圖 8 為頻率響應函數對應 ODS 圖，從 $G_{v_i v_i}(f)$ 所得自然頻率，對應頻率響應函數進行 ODS 辨識，結果發現沒有 ODS 與琴弦模態振型對應，主要原因是因實驗過程中，輸入力是由人為撥奏琴弦，使琴弦自由振動，撥奏琴弦力道是不穩定的激振頻率，造成頻率響應函數對應 ODS 無法辨識琴弦位移模態振型。因此後續透過雷射位移計量測訊號 $G_{v_i v_i}(f)$ 進行琴弦 ODS 辨識。

OMA 模態實驗，量測訊號包含了 $G_{a_f a_f}(f)$ -琴橋、 $G_{a_f a_f}(f)$ -面板與 $G_{v_i v_i}(f)$ 。圖 9 為雷射位移計頻譜重疊圖對應 ODS，從 $G_{v_i v_i}(f)$ 頻譜圖峰值對應出 ODS，接著從模態振型特徵進行探討，發現模態振型整體振動趨勢是正確的，不過細部觀察可以發現，26 點量測點中，點與點之前會有不符合整體趨勢的起伏。

此現象因輸入力是為人為撥奏琴弦，無法控制每次撥奏琴弦力道都相等，造成 ODS 細部有不穩定的起伏現象。後續會針對此現象進行 OMA 數據分析處理，模擬撥弦力道一致，將 ODS 整體趨勢調整至更加平順。

圖 10 為 OMA 數據分析流程圖，首先有雷射位移計量測所得原始數據 $G_{v_i v_i}(f)$ ，接著進行數據分析，數據分析分為兩種手法，一種為使用時間域訊號方法，另一種為頻率域訊號方法。時間域方法會得到縮放比例 R_i ，頻率域方法會得到縮放比例 K_i 。將 $G_{v_i v_i}(f)$ 分別乘上 R_i 與 K_i ，會得到新數據 $\bar{G}_{v_i v_i}(f)$ ，完成 OMA 數據分析。

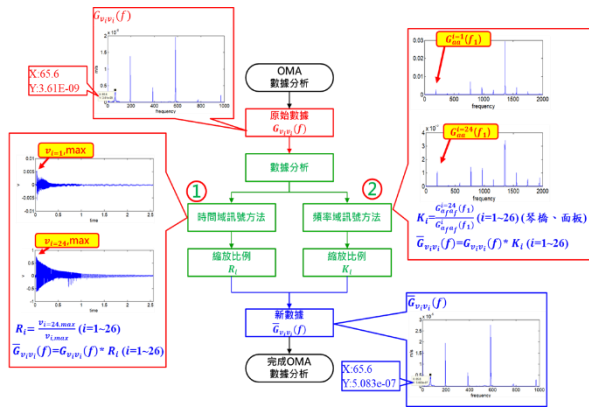


圖 10 OMA 數據分析流程圖

首先是時間域訊號方法。假設琴弦有*i*個量測點，雷射位移計所量測時間域訊號為 $v_i(t)$ ，令時間域訊號量值之最大值为 $v_{i,max}$ ，實驗中固定撥弦於24點，因此取 $v_{j,max}$ ($j=24$)為基準點，進行比例縮放，求得 R_i ，可表示成：

$$R_i = \frac{v_{j,max}}{v_{i,max}} \quad (i=1\sim 26, j=24) \quad (1)$$

$$\bar{G}_{v_i v_i}(f) = G_{v_i v_i}(f) * R_i \quad (i=1\sim 26) \quad (2)$$

頻率域方法，使用兩顆加速規所量測數據 $G_{a_f a_f}(f)$ -琴橋、 $G_{a_f a_f}(f)$ -面板，令 $G_{a_f a_f}^i(f_1)$ 為頻率域第1峰值所對應量值，取 $G_{a_f a_f}^j(f_1)$ 為基準值，進行比例縮放，求得 K_i ，可表示成：

$$K_i = \frac{G_{a_f a_f}^j(f_1)}{G_{a_f a_f}^i(f_1)} \quad (i=1\sim 26, j=24) \quad (\text{琴橋、面板}) \quad (3)$$

$$\bar{G}_{v_i v_i}(f) = G_{v_i v_i}(f) * K_i \quad (i=1\sim 26) \quad (4)$$

表 1 儀器設定表

儀器	型號	Window	靈敏度	單位
雷射位移計	Polytec OFV-534	Boxcar	2083.512	mV/(m/s)
加速規(琴橋)	ENDEVCO-27AM1	Boxcar	10.350	mV/g
加速規(面板)	ENDEVCO-27AM1	Boxcar	11.299	mV/g

表 2 琴弦模態振型比對表

FEA	OMA $G_{v_i v_i}(f)$		OMA 數據分析 $\bar{G}_{v_i v_i}(f)$		
	原始數據 Ch3 雷射位移計	時間域方法 Ch3 雷射位移計	頻率域方法 Ch1 加速規(琴橋)	頻率域方法 Ch2 加速規(面板)	
F-01	O-01	T-01	A-01		
F-02	O-02	T-02	A-02		
F-03	O-03	T-03	A-03		

4. 結果與討論

將雷射位移計所量測數據 $G_{v_i v_i}(f)$ ，分別進行 OMA 數據分析後，與 FEA 模態振型進行 ODS 辨識。實驗數據是雷射位移計量測訊號 $G_{v_i v_i}(f)$ 進行 ODS 辨識，因此對應模態振型只會有實數部訊號，不會產生虛數部訊號。表 2 為琴弦模態振型比對表，包含了 FEA 理論分析所得模態振型、雷射位移計 $G_{v_i v_i}(f)$ 所對應 ODS 和透過 OMA 數據分析後所得新數據 $\bar{G}_{v_i v_i}(f)$ 所對應 ODS。取前三模態進行模態振型比對，

首先進行 FEA 與雷射位移計量測數據 $G_{v_i v_i}(f)$ 對應 ODS 比較，F-01 模態振型有 1 個波峰，O-01 也呈現出 1 個波峰，所以雷射位移計量得 ODS 整體趨勢與分析有符合，但如果細部放大觀察，O-01 點與點之間的起伏與整體趨勢是不對應的，原因是因人為撥奏琴弦時，無法控制每次撥奏琴弦的力道都是相同的，造成雷射位移計所量測訊號 $G_{v_i v_i}(f)$ 對應 ODS 起伏會與整體趨勢不符合。

接著探討 FEA 與透過時間域方法與頻率域方法對應 ODS 進行比較，F-02 模態振型呈現出 1 個波峰與 1 個波谷，T-02 與 A-02 都呈現出 2 個波峰，因此判斷 ODS 整體趨勢對應良好，T-02 與 A-02 透過模擬撥弦力道一致，所以波峰附近的點數起伏是較平順的，點與點之間的起伏較 O-02 平穩。

透過琴弦模態振型比對可以得知，在實驗過程中，如果撥奏琴弦施力力道沒有一致，會造成 ODS 辨識出現錯誤，因此需要透過 OMA 數據分析，模擬撥弦力道一致，本文提出了時間域方法與頻率域方法進行 OMA 數據分析，在琴弦位移模態振型呈現上，也有與理論分析 FEA 模態振型對應，驗證 OMA 數據分析是可行的。

5. 結論

本文為了取得小提琴琴弦模態振型，針對琴弦進行模態實驗，主要採用 OMA 方法，使用雷射位移計量測琴弦振動訊號，並搭配加速規量測輸入的撥弦力道的參考訊號，進行琴弦位移模態振型辨識。為了改善輸入力是由人為撥奏琴弦不穩定，造成 ODS 辨識有誤，因此提出了時間域方法與頻率域方法模擬撥弦力道一致。最後取得正確的琴弦位移模態振型。其結論主要如下：

- 以往取得結構模態振型大多使用 EMA 進行實驗，但小提琴琴弦結構不適合使用衝擊錘進行激振，加速規黏貼琴弦也會造成質量效應，因此本文透過 OMA 方法進行實驗量測，以獲得琴弦位移模態振型。
- OMA 模態實驗，可以透過頻率響應函數進行模態振型辨識，不過本次實驗，輸入力由人為進行撥奏琴弦，因此無法產生穩定的隨機訊號，造成無法透過頻率響應函數進行 ODS 辨識，所以本文使用雷射位移計之自身功率頻譜圖進行 ODS 辨識。

3. 本文針對 OMA 數據分析提出了時間域方法與頻率域方法，以解決操作狀態下施力不穩定，而造成無法取得正確模態振型。
4. 本文所提出的 OMA 實驗步驟與數據分析方法，可以運用於操作狀況於未知施力大小下的結構，取得結構之位移模態振型。

6. 誌謝

本文感謝科技部研究計畫經費補助，得以完成「小提琴琴弦之操作模態分析於位移模態振型量測」，計畫編號：108-2221-E-020-018。

7. 參考文獻

1. T. Aditanoyo, I. Prasdtiyo, I. B. A. Puta, Study on Vibro-acoustics Characteristics of Bamboo-based Violin, *Procedia Engineer*, Vol. 170, pp. 286-292.
2. 王栢村，龍暉，潘忠岳，林偉智，李哲綸，馬凱齡，小提琴實驗模態分析與振動特性探討，第二十七屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，桃園，論文編號：C15，2019
3. A. Mamon-Main, S. L. Moyne, F. Ollivier, C. Besnainou, Prestress Effects on the Eigenfrequencies of the Soundboards: Experimental Results on a Simplified String Instrument, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 131, pp. 872-877, 2012
4. 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論文集，台南，論文編號：A7，2006
5. M. J. Elejabarrieta, A. Ezcurra, C. M. Santamaria, Coupled Modes of the Resonance Box of Guitar, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 111, No. 5, pp. 2283-2292, 2002
6. 王栢村，龍暉，馬凱齡，李易緯，楊彥哲，溫儒琳，應用 CAE 與 EMA 於小提琴面板素材之機械性質測定，2019 第 17 屆精密機械製造科技研討會，屏東，論文編號：A042，2019
7. 王栢村，陳昱成，陳勇全，車架之實驗模態分析與振動模態特性探討，中華民國振動噪音工程學會第 18 屆學術研討會，台北，論文編號：C-150，2010
8. 王栢村，黃愈憲，應用實驗模態分析與操作模態分析於平台模型驗證之探討，*機械技師學刊*，第 2 捲，第 1 期，第 1-7 頁，2009

Operational Modal Analysis of Violin String to Determine Displacement Mode shapes

Bor-Tsuen Wang¹, Way Long², Bing-Shiang Su¹, Kai-Ling Ma¹, Ying-Hui Wu³

¹Department of Mechanical Engineering,
National Pingtung University of Science and
Technology

²Department of Wood Science and Design,
National Pingtung University of Science and
Technology

³Machinery Division, National Senior
Agricultural-Industrial Vocational School
MOST Project No. : MOST 108-2221-E-020-018

Abstract

Violin is a kind of string instruments. The sound generation mechanism is from the frictional effect between the bow and string to induce the string vibration and so forth the generation of sound via sound box. This work tends to determine the mode shape of string vibration modes. Because of the nature of string, which is the thin wire, to measure vibration modes by conventional modal testing or experimental modal analysis (EMA) is difficult. The impact hammer is not suitable to excite the string, and the accelerometer with relatively large mass is not easy to attach and measure the string motion. This work proposes an operational modal analysis (OMA) method to identify the string mode shapes. The operating condition is to apply the plucking force on the string by finger, i.e. the applied force is essentially unknown. While the non-contact laser vibrometer is used to monitor the string motion after plucking, the accelerometers are applied at the bridge and top plate, respectively, as the reference signals. The concept of OMA is reviewed and detailed the experimental procedure for measuring the string response. The post processing on the measured data from OMA is also introduced so as to obtain the string vibration mode shapes. Results show the frequency response functions (FRFs) between the string displacement and referenced acceleration are not able to predict mode shapes properly, because of unsteady plucking force excitation. This work proposes two methods, i.e. time and frequency domain approaches, to adjust the laser response signals account for unevenly plucking forces. The approaches can reasonably identify the first few displacement mode shapes of string vibration modes. This work develops the OMA method to obtain the string displacement mode shape successfully. The proposed OMA procedure and post-processing methods on the measured data can also be applicable to determine structural mode shapes or operational deflection shapes (ODS) for structures or machineries subject to unknown operating conditions.

Keywords : Violin string, Operational Modal Analysis (OMA), displacement mode shape, vibration modes