

雷射位移計校正與振動量測之實務應用

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

科技部計畫編號：108-2221-E-020-018

摘要

由於產品微型化，結構振動量測為了準確採集數據，有必要使用非接觸式感測器來避免諸如一般接觸式感測器的質量效應。本文介紹了雷射位移計與其校正方式，以及實際應用於測量不同結構之振動響應，如響鈴板、小提琴琴弦和雨刷膠條。透過使用標準激振源產生加速度、速度與位移之參考標準簡諧波，進行校正程序可分別得到雷射量測位移和速度的校正靈敏度。本文也探討雷射感測頭之訊號反射程度、量測距離與偏斜角度對量測結果的影響，結果顯示，訊號反射程度與量測距離對量測結果影響微小，偏擺角度則會明顯影響量測結果。在實務應用中，同時以加速規及雷射位移計量測響鈴板的振動響應，由加速度轉換得到的速度自身功率頻譜密度函數(auto PSD)與雷射位移計之速度量測結果吻合，證明使用雷射位移計量測結果的可靠性。小提琴琴弦的振動響應量測實驗中，雷射位移計與麥克風量測之auto PSD對應良好，皆可明顯觀察到琴弦共振所引起的頻率峰值。另外，量測雨刷膠條刷拭於半乾溼狀態玻璃，膠條刀口量測到明顯的振動響應，可提供後續診斷的依據。本文介紹雷射位移計操作流程與校正程序，並實務應用於結構振動量測，確認雷射位移計量測之可行性及可靠性，特別是可應用於測量微型結構，有助於振動特性診斷和模型驗證，幫助後續相關研究的推動。

關鍵字：雷射位移計、校正、標準振動源、自身功率頻譜密度函數

1. 前言

隨著科技的發展，人們對於振動量測的精確度要求越來越高，而傳統的接觸式感測器由於先天上的限制已無法滿足需求，進而使用非接觸式的雷射位移計來進行振動量測，雷射位移計可精準的量測待測物體的位移與速度變化量，並可避免接觸式感測器的質量效應，達成精確量測的目的。

進行實驗之前，需探討雷射位移計量測原理與應用，並確保實驗系統架設合理，參考文獻對雷射位移計的應用與探討，陳等人[1]介紹雷射位移計原理，乃是利用雷射三角測距原理量測距離，量測結果顯示，

雷射位移計量測訊號除了高精度外也具有高穩定性。黃等人[2]透過雷射位移計與加速規量測懸臂樑振動響應並進行模態分析，結果顯示雷射位移計量測之實驗自然頻率與分析結果對應良好。張等人[3]研究雷射陀螺動態特性，利用雷射都卜勒測振儀對角振動台進行非接觸式量測，以無質量效應的特性輔佐判別雷射陀螺量測結果是否失真。Lin et al. [4]將靜電驅動微探針整合都卜勒振動計，用於非接觸式掃描探針顯微鏡系統，通電之探針可等距在樣品表面移動，藉由雷射儀確認探針起伏距離，最終得到表面樣貌，系統精度約為 10 奈米。李等人[5]為了提升振動量測品質，使用雷射校正系統來協助感測器的校正，其原理為條紋記數法，此系統可直接量得振動振幅，整體不確定度小於 0.6%，並於文中提供靈敏度校正的計算過程。

實驗量測及校正前皆需要適當的流程規劃，提升執行效率與可靠性，王等人[6]介紹典型的三種振動試驗，分別為隨機、單一正弦波和掃描正弦波測試，試驗標準規範用於驗收振動試驗機，文中之試驗規劃及作業流程可作為儀器設備功能校正程序的參考，並有助於實務應用。王等人[7]為了提升研發及品管之效率，建立標準化量測與診斷作業流程，首先闡述 SPR 噪音源 (Source)、傳輸路徑 (Path) 與收受端 (Response) 之理念，接著以雙螺桿壓縮機為例建立噪音量測程序與診斷流程，分別進行收受端與傳輸路徑測試，最終比對得知運轉時可能有共振效應。王等人[8]為了瞭解壓縮機系統匹配的振動噪音問題，以收受端測試 (Response Test) 方法探討迴轉式壓縮機與冷氣機之噪音特性，結果顯示壓縮機組裝於冷氣機後，原先壓縮機主要高噪音貢獻頻帶 1600Hz 有明顯降低，在冷氣機則出現了 400Hz 高噪音的中心頻率，表示激振力經由不同結構路徑傳導會造成不同的響應結果。

綜合上述的說明，可瞭解雷射位移計量測原理與實務應用。本文將介紹實驗系統架設流程及雷射位移計校正方法，探討雷射感測頭之訊號反射程度、量測距離與偏斜角度對量測結果的影響，並實務應用於響鈴板、小提琴琴弦及雨刷膠條之振動響應量測，同時比對加速規與精密麥克風等感測器之量測結果，探討雷射位移計量測之可行性與可靠性。



(a)雷射感測頭 (b)訊號控制與解碼器

圖 1、雷射位移計實際照片

表 1、雷射位移計規格表

參數項目	參數值
型號	Polytec OFV-534
雷射等級	Class 2, < 1 mW, 護眼
雷射波長	633nm, 可見紅光雷射
最短工作距離	200mm
鏡頭形式	標準
對焦方式	手動

2. 雷射位移計簡介與操作流程

由於近年來產品微型化，為準確採集結構振動量測數據，有必要使用非接觸式感測器來避免一般接觸式感測器的質量效應，本文使用的雷射位移計即是一種非接觸式感測器。

2.1 雷射位移計簡介與特點

雷射位移計實際外觀如圖 1 所示，由雷射感測頭與訊號控制解碼器所組成，其可以精準量測待測物體的位移量。雷射位移計具有 (1) 量測高精度 (2) 可避免質量效應 (3) 量測時不受待測物之材質或外觀限制 (4) 可進行待測物於極端工況下之量測，如高溫、高濕之待測物狀況。本文所使用之雷射位移計型號為 Polytec OFV-534，硬體詳細規格如表 1 所示，最短工作距離為 20cm，雷射對焦方式為手動對焦。訊號控制解碼器有兩個輸出端，分別可以輸出速度與位移的電壓訊號。

2.2 操作流程

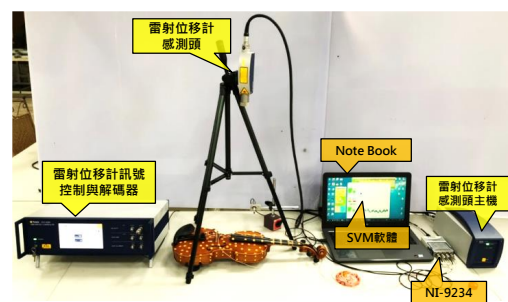
實驗量測之前需進行儀器系統設置，包含實驗儀器架設、靈敏度 (Sensitivity) 與單位設定，以及靈敏度校正。圖 2(a) 為儀器架設圖，硬體設備包含雷射位移計、訊號擷取卡 (NI-9234) 與筆記型電腦，使用振動噪音量測系統 (SVM) 處理實驗量測訊號。圖 3(a) 為儀器架設流程圖，雷射感測頭連接訊號控制解碼器，訊號控制解碼器的位移與速度輸出端連接訊號擷取卡通道，訊號擷取卡透過 USB 連接電腦中的 SVM 軟體，完成硬體架設。

雷射位移計量測到的訊號流程如圖 2(b) 所示，待測物激振產生位移與速度，雷射感測頭量測待測物

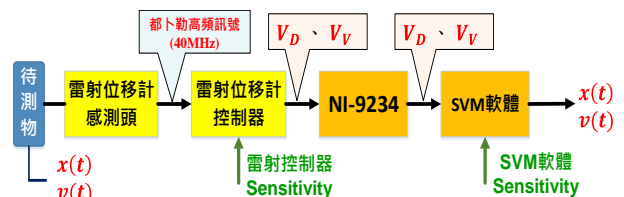
後輸出都卜勒高頻訊號 (Doppler signal 40 MHz) 至訊號控制解碼器，經過解碼器靈敏度計算後輸出位移電壓 V_D 與速度電壓 V_V 至訊號擷取卡，再傳輸到 SVM 軟體，經由 SVM 靈敏度轉換得到位移與速度的時間域訊號 $x(t)$ 、 $v(t)$ 。

根據實驗的需求，在 SVM 軟體進行量測設定，如圖 2(c) 所示，SVM 軟體介面分為量測頻道設定 (channel setup)、快速傅立葉轉換設定 (FFT setup) 與主視窗。量測頻道設定有三個主要設定：(1) 視窗加權函數 (2) 感測器靈敏度 (3) 0dB 參考值。快速傅立葉轉換參數視窗設定 (FFT setup) 包含：(1) 有效截取頻寬 (2) 頻率解析度 (3) 觸發設定 (4) 平均次數。實驗量測後於主視窗查看位移及速度之量測結果。

為了確保量測數值的正確性，需校正 SVM 軟體感測器設定之靈敏度，圖 3(b) 為校正與量測流程圖，設定訊號控制解碼器及 SVM 軟體之靈敏度與單位後量測標準激振源之激振訊號，校正 SVM 軟體設定之靈敏度，直到量測值與標準機振源標準值吻合即完成校正程序。進行量測之前，雷射光束需手動調整對焦於待測物上，並參考訊號控制解碼器上的訊號反射程度百分比，量值越高則代表雷射反射訊號接收得越完整。



(a) 儀器架設圖



(b) 量測示意與訊號流程圖



(c) SVM 軟體介面

圖 2、實驗儀器架設與量測訊號流程示意圖

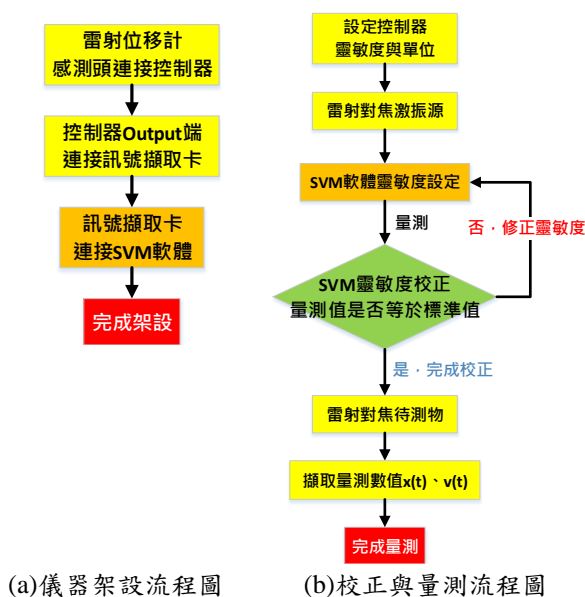


圖 3、實驗儀器架設流程圖

3. 雷射位移計之校正程序與量測測試

實驗量測前感測器的校正是不可忽視的一環，校正程序為針對 SVM 軟體中之靈敏度進行校正，本章除了校正之程序介紹外，也評估(1)雷射訊號反射程度(2)雷射感測頭量測距離(3)雷射感測頭偏擺角度，三種情況對量測結果的影響。

3.1 校正程序流程

校正主要目的為確保雷射位移計所量測到的位移與速度量值具有可靠性。本文校正手法是利用標準激振源所產生的穩定振動訊號作為標準值，再透過調整 SVM 軟體中感測器靈敏度使量測值與標準值吻合。圖 4 為標準激振源實體圖，其輸出之標準振動參數如表 2 所示，激振頻率為 159.2Hz，速度參考值為 $10(mm/s)_{rms}$ ，位移參考值為 $10\mu m_{rms}$ 。

雷射位移計靈敏度校正程序如圖 5 所示，標準激振源產生之位移 $x(t)$ 、速度 $v(t)$ ，經由雷射位移計量測振動物理量，透過訊號控制解碼器將物理量轉換為電壓訊號，其位移與速度之訊號控制解碼器靈敏度分別為 S_{0D} 與 S_{0V} ，經轉換的位移與速度電壓訊號分別為 V_D 與 V_V ，接著將 V_D 與 V_V 輸入 SVM 軟體進行分析得到量測值位移 $x_0(t)$ 、速度 $v_0(t)$ ，若量測值與參考值吻合，則於 SVM 軟體可以不修正靈敏度，不修正之位移與速度靈敏度分別為 $1/S_{0D}$ 與 $1/S_{0V}$ ，關係如(1)式：

$$V_D \times \frac{1}{S_{0D}} = x_0(t); V_V \times \frac{1}{S_{0V}} = v_0(t) \quad (1)$$

若量測值與參考值不吻合，則需修正 SVM 軟體之靈敏度，修正後的位移與速度靈敏度分別為 $1/S_{cD}$ 與 $1/S_{cV}$ ，接著確保量測之位移 $x_c(t)$ 與速度 $v_c(t)$ 與標準激振源之位移 $x_0(t)$ 與速度 $v_0(t)$ 參考值吻合，即完

成靈敏度校正程序，以上關係如(2)所示：

$$V_D \times \frac{1}{S_{cD}} = x_c(t); V_V \times \frac{1}{S_{cV}} = v_c(t) \quad (2)$$

將(1)式與(2)式移項處理，可得到(3)式與(4)式：

$$\frac{S_{0D}}{S_{cD}} = \frac{x_c(t)}{x_0(t)}; \frac{S_{0V}}{S_{cV}} = \frac{v_c(t)}{v_0(t)} \quad (3)$$

$$S_{cD} = \frac{x_0(t) \times S_{0D}}{x_c(t)}; S_{cV} = \frac{v_0(t) \times S_{0V}}{v_c(t)} \quad (4)$$

實際量測標準激振源後結果如圖 6 所示，時間域皆呈現穩定的簡諧波特徵，位移的自身功率頻譜密度函數(auto PSD)單位為 μm_{rms} ，量測得到的頻率為 159.2Hz，量測值為 $10\mu m_{rms}$ ，其與激振源參考值吻合，確認 SVM 的靈敏度設定正確。同理，速度通道的靈敏度也依循上述手法進行靈敏度校正。位移與速度靈敏度校正過程如表 3 所示，經校正後靈敏度之量測結果位移為 $10\mu m_{rms}$ 、速度為 $10(mm/s)_{rms}$ ，皆與標準激振源之參考值有良好的對應，完成靈敏度校正。



圖 4、標準激振源

表 2、標準激振源基本參數表

參數項目	參數值
頻率	159.2Hz ($\omega = 1000rad/s$)
最大負載	70gram
加速度	$10m/s^2$ (RMS)
速度	10mm/s (RMS)
位移	$10\mu m$ (RMS)

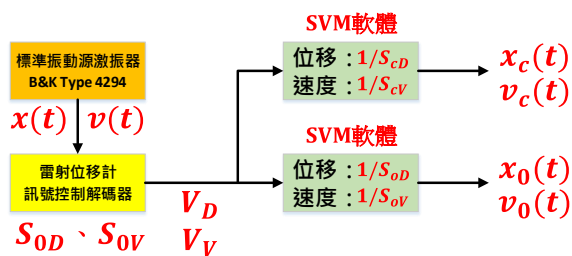
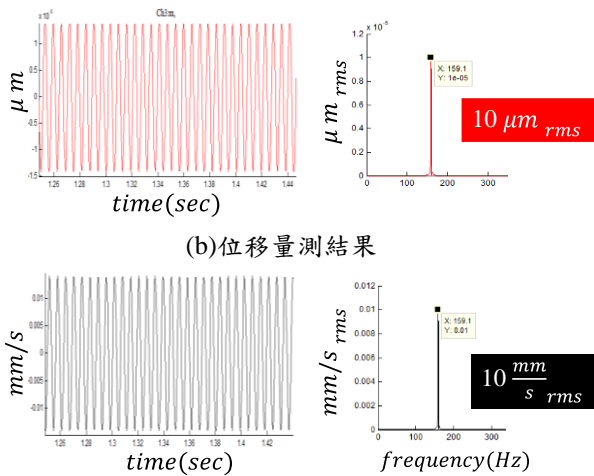


圖 5、雷射位移計靈敏度校正程序



(a) 實際量測照片



(b) 位移量測結果

(c) 速度量測結果

圖 6、雷射位移計量測標準激振源

表 3、雷射位移計靈敏度校正結果表

物理量輸出	第一次量測			第二次量測		
	Ploytec 靈敏度	SVM 靈敏度	量測值	Ploytec 靈敏度	SVM 靈敏度	量測值
位移輸出	5 ($\frac{\mu m}{V}$)	2×10^5 ($\frac{mV}{m}$)	9.910 (μm_{rms})	5 ($\frac{\mu m}{V}$)	1.984×10^5 ($\frac{mV}{m}$)	9.962 (μm_{rms})
速度輸出	5 ($\frac{mm/s}{V}$)	2×10^8 ($\frac{mV}{m/s}$)	9.983 ($\frac{mm}{s} rms$)	5 ($\frac{mm/s}{V}$)	1.982×10^8 ($\frac{mV}{m/s}$)	9.963 ($\frac{mm}{s} rms$)

物理量輸出	第三次量測		
	Ploytec 靈敏度	SVM 靈敏度	量測值
位移輸出	5 ($\frac{\mu m}{V}$)	1.976×10^5 ($\frac{mV}{m}$)	10.00 (μm_{rms})
速度輸出	5 ($\frac{mm/s}{V}$)	1.975×10^8 ($\frac{mV}{m/s}$)	10.00 ($\frac{mm}{s} rms$)

3.2 不同雷射訊號反射程度之量測結果比較

雷射位移計進行量測之前，雷射光束需手動對焦至待測物，並參考訊號控制解碼器上的訊號反射程度百分比，如圖 7 所示，量值越高則代表雷射反射訊號接收得越完整。實務應用中雷射會因待測物表面粗糙度與材質等因素而有不同的反射程度，因此本節將探討不同雷射訊號反射程度與量測結果之間的關係。

雷射感測頭垂直量測狀態下以標準激振源為待測物，透過調整對焦的方式變更訊號反射程度並進行量測，結果如表 4 所示，首先由 100% 訊號反射程度量測 10 次，位移量測值皆於 $10.05 \mu m_{rms}$ 之內，表示量測結果具有重複性，接著逐次降低訊號反射程度至 25% 的量測結果皆於 $10.05 \mu m_{rms}$ 之內，誤差值小於 0.5%，不同訊號反射程度的量測值具有一樣的誤差範圍，表示此測試中訊號反射程度 25% 以上的量測結果是可靠的，且訊號反射程度對量測結果影響微小。

3.3 不同雷射感測頭量測距離之量測結果比較

雷射位移計規格表顯示其最短工作距離為 20cm，並無註記最遠量測距離限制，為了探討雷射感測頭之量測距離是否會影響量測結果，本節將比對雷射感測頭於不同量測距離之量測結果，確認量測距離與量測結果的關係。圖 8(a) 為雷射感測頭量測距離示意圖，垂直量測的狀態下以標準激振源作為待測物，透過捲尺量測雷射感測頭至待測物的距離，本節由近至遠共測試 5 組量測距離，結果如表 5 所示，最短量測距離為 20cm，位移量測值為 $10.03 \mu m_{rms}$ ，最遠量測距離為 130cm，位移量測值為 $10.02 \mu m_{rms}$ ，在 110cm 的量測距離變化之下位移量測值幾乎無改變，速度量測值也得到相同結果，因此判定雷射感測頭在 20~130cm 的量測距離內垂直量測具有可靠的量測結果。

表 4、不同雷射訊號反射程度之量測結果表

訊號反射程度	速度量測值 ($\frac{mm}{s} rms$)				位移量測值 RMS (μm_{rms})			
	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
第一次量測	10.00	10.03	10.04	10.03	10.00	10.03	10.04	10.03
第二次量測	10.02	10.03	10.05	10.02	10.02	10.03	10.05	10.01
第三次量測	10.02	10.04	10.05	10.03	10.02	10.02	10.05	10.02
第四次量測	10.03	10.04	10.05	10.03	10.03	10.02	10.05	10.02
第五次量測	10.03	10.04	10.05	10.03	10.03	10.03	10.05	10.03
第六次量測	10.05				10.05			
第七次量測	10.04				10.04			
第八次量測	10.04				10.04			
第九次量測	10.03				10.03			
第十次量測	10.04				10.04			

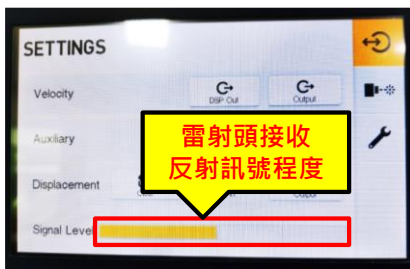


圖 7、雷射感測頭接收反射訊號程度示意圖

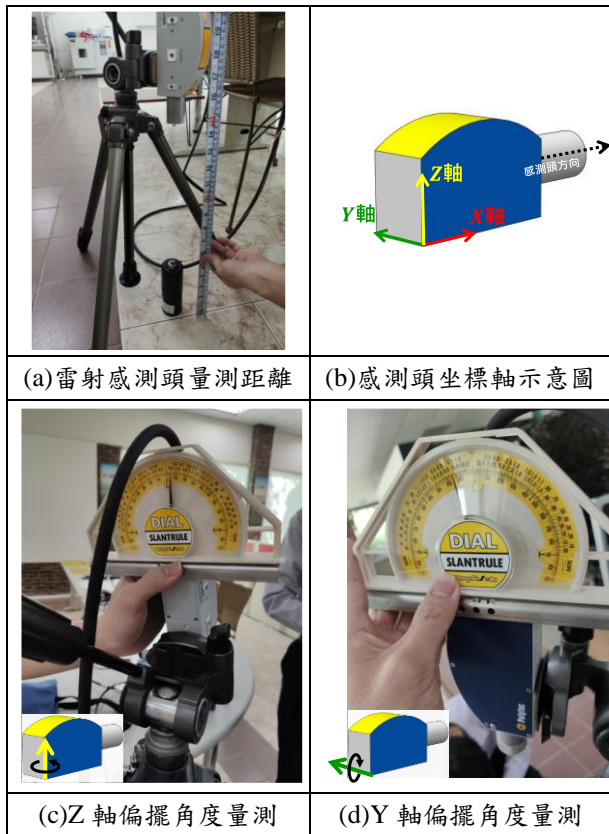


圖 8、雷射感測頭量測距離與偏擺角度量測

表 5、不同雷射感測頭量測距離之量測結果表

量測距離(cm)	速度量測值 ($\frac{mm}{s} rms$)	位移量測值 (μm_{rms})
20	10.03	10.03
30	10.02	10.02
65	10.02	10.02
100	10.02	10.02
130	10.02	10.02

3.4 不同雷射感測頭偏擺角度之量測結果比較

本節探討雷射感測頭偏擺角度對量測結果的影響，圖 8(b) 為雷射感測頭坐標軸示意圖，雷射射線方向為 X 軸，本節針對 Y 軸及 Z 軸之不同程度的偏擺角度進行量測結果比對。圖 9 為雷射感測頭偏擺角度之量測向量示意圖，標準激振源激振後產生位移 $x(t)$ 及速度 $v(t)$ ，雷射感測頭 Y、Z 軸沒有角度偏擺時量測可得到位移量測值 x_M 及速度量測值 v_M ，根據畢氏定理，若雷射感測頭 Z 軸偏擺 θ_Z 角度時，量測值為 M_θ ，如(5)、(6)式所示：

$$x_{M\theta} = x_M \cdot \cos(\theta_Z) \quad (5)$$

$$v_{M\theta} = v_M \cdot \cos(\theta_Z) \quad (6)$$

若雷射感測頭之 Y、Z 軸皆發生偏擺，則僅能量測到分量 x'_M 及 v'_M ，如(7)、(8)式所示：

$$x'_M = x_{M\theta} \cdot \cos(\theta_Y) \quad (7)$$

$$v'_M = v_{M\theta} \cdot \cos(\theta_Y) \quad (8)$$

將(5)式~(8)式移項處理，如(9)式與(10)式所示：

$$x'_M = x_M \cdot \cos(\theta_Z) \cdot \cos(\theta_Y) \quad (9)$$

$$v'_M = v_M \cdot \cos(\theta_Z) \cdot \cos(\theta_Y) \quad (10)$$

圖 8(c) 為 Z 軸偏擺角度量測示意圖，透過水平儀量測雷射感測頭 Y 與 Z 軸之偏擺角度，偏擺程度由小到大共進行 6 組測試。結果如表 6 所示，雷射感測頭之偏擺角度確實會影響量測結果，隨著偏擺角度增加量測值則隨之降低，且預估值與量測值誤差皆小於 1.85%，代表 6 組測試結果均符合畢氏定理，故進行實驗量測前須確保雷射感測頭無偏擺角度之情形。

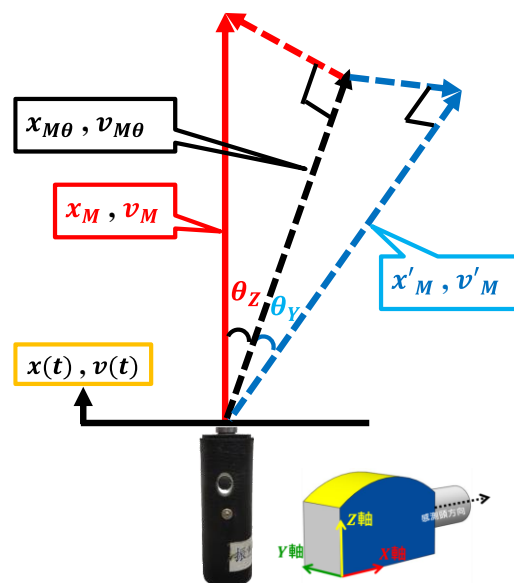


圖 9、雷射感測頭偏擺角度之量測向量示意圖

表 6、不同雷射感測頭偏擺角度之量測結果表

	Z 軸 旋轉 角度	Y 軸 旋轉 角度	速度 預估值 ($\frac{mm}{s_{rms}}$)	速度 量測值 ($\frac{mm}{s_{rms}}$)	差異 百分比 (%)	位移 預估值 (μm_{rms})	位移 量測值 (μm_{rms})	差異 百分比 (%)
Case 1	0	0		10.02			10.02	
Case 2	0	15	9.67	9.69	0.18	9.679	9.69	0.20
Case 3	2	8	9.91	9.91	-0.04	9.916	9.91	-0.05
Case 4	5	15	9.64	9.64	0.01	9.642	9.64	0.01
Case 5	20	20	8.84	8.94	1.12	8.848	8.94	1.13
Case 6	30	30	7.51	7.65	1.85	7.515	7.60	1.17

4. 雷射位移計之實務應用

本章實際應用雷射位移計進行結構振動響應量測，量測響鈴板時比對加速規與雷射位移計之量測結果確認可靠性，並應用於小提琴琴弦與兩刷膠條，確認雷射位移計量測微型結構之可行性。

4.1 平板結構振動量測

本節使用雷射位移計及加速規同時量測激振狀態的響鈴板並比對量測結果。激振點與量測點如圖 10 所示，加速規黏貼於響鈴板中心點，雷射位移計對焦於加速規背面，衝擊錘敲擊響鈴板長邊角落點。SVM 軟體設定量測頻寬 20000Hz，頻率解析度為 1.56Hz，雷射位移計量測速度(m/s)，加速規量測加速度(g)。由於兩者量測的物理量不同，雷射位移計之 $G_{vv}(f)$ 與加速規之 $G_{aa}(f)$ 兩者進行比對前需轉換為相同單位，本節將加速規之 $G_{aa}(f)$ 轉換為 $G_{vv}(f)$ ，並與雷射位移計原始之 $G_{vv}(f)$ 進行比對。

位移、速度與加速度之間的轉換，時間域會有相位差，以下透過標準激振源之單一頻率的餘弦波為例，說明 $x(t)$ 、 $v(t)$ 與 $a(t)$ 三者相位差關係，位移函數如(11)式：

$$x(t) = X \cos(\omega t - \phi) \quad (11)$$

位移振幅 X 、速度振幅為 V 與加速度振幅 A ，三者物理量之振幅關係式如(12)、(13)式所示：

$$V = X\omega \quad (12)$$

$$A = V\omega = X\omega^2 \quad (13)$$

對 $x(t)$ 做一次微分與二次微分，可分別得到速度函數 $v(t)$ 及加速度函數 $a(t)$ ，如(14)、(15)式所示：

$$v(t) = V \cos(\omega t - \phi - \pi/2) \quad (14)$$

$$a(t) = A \cos(\omega t - \phi - \pi) \quad (15)$$

函數 $v(t)$ 與 $x(t)$ 相差 $\pi/2$ 相位角，而 $a(t)$ 與 $x(t)$ 相差 π 相位角，換算角度各為 90 度與 180 度。圖 11 為實驗量測標準激振源之時間域訊號，藉由實驗量測結果佐證理論關係式，為了方便比對，將振幅縮放至相同大小，可觀察到位移與速度之相位差為 90 度，位移與加速度之相位差為 180 度，實驗結果與理論關係式吻合。

位移 $X(f)$ 、速度 $V(f)$ 與加速度 $A(f)$ 傅立葉頻譜(Fourier spectrum)之間轉換關係如(16)、(17)式所示：

$$V(f) = i\omega \cdot X(f) = i(2\pi f) \cdot X(f) \quad (16)$$

$$A(f) = i\omega \cdot V(f) = -\omega^2 \cdot X(f) \quad (17)$$

釐清三者之間的關係後，以下為 autoPSD 與傅立葉頻譜之關係式：

$$G_{xx}(f) = X^*(f) \cdot X(f) \quad (18)$$

$$G_{vv}(f) = V^*(f) \cdot V(f) \quad (19)$$

$$G_{aa}(f) = A^*(f) \cdot A(f) \quad (20)$$

根據上述關係式將響鈴板量測實驗之加速規 $G_{aa}(f)$ 換算為 $G_{vv}(f)$ ，比對結果如圖 12 所示，x 軸為頻率(Hz)，y 軸單位為 dB，加速度位準參考值為 $10^{-6}m/s^2$ ，速度位準參考值為 $10^{-9}m/s$ ，藍色曲線為加速規之原始 $G_{aa}(f)$ ，經由關係式轉換為綠色曲線 $G_{vv}(f)$ ，整體趨勢與雷射位移計原始 $G_{vv}(f)$ 之紅色曲線對應良好。表 7 為響鈴板自然頻率對照表，雷射位移計與加速規量測之自然頻率幾乎無誤差，整體實驗數據對應良好，代表雷射位移計量測結果具有可靠性，並等效於接觸式感測器之量測結果。

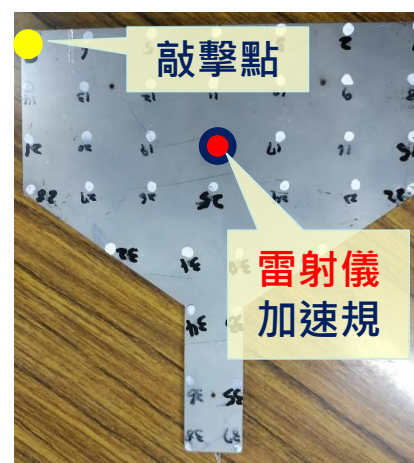


圖 10、響鈴板實驗量測敲擊與量測點規劃

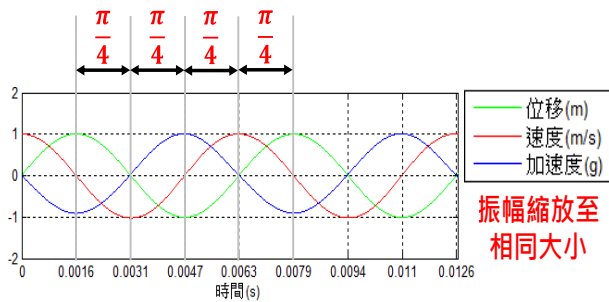


圖 11、實驗量測標準激振源之時間域訊號

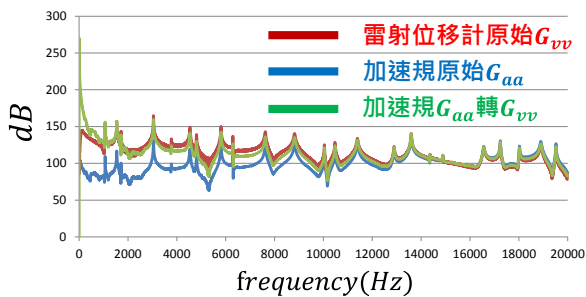


圖 12、響鈴板量測實驗結果

表 7、響鈴板自然頻率對照表

雷射位移計		加速規		差異值 (Hz)	差異百分比 (%)
峰值數	自然頻率 (Hz)	峰值數	自然頻率 (Hz)		
V-01	1067	P-01	1067	0	0.00
V-02	1539	P-02	1539	0	0.00
V-03	1717	P-03	1717	0	0.00
V-04	3045	P-04	3045	0	0.00
V-05	3777	P-05	3777	0	0.00
V-06	4538	P-06	4538	0	0.00
V-07	4806	P-07	4805	1	0.02
V-08	5809	P-08	5809	0	0.00
V-09	6295	P-09	6295	0	0.00
V-10	7625	P-10	7625	0	0.00

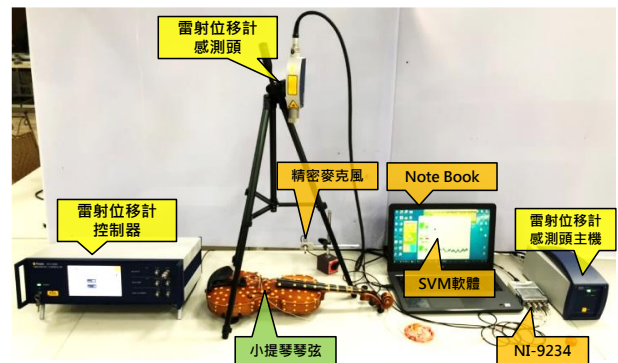
4.2 小提琴琴弦振動量測

接觸式加速規量測小提琴琴弦此類微型結構常伴隨質量效應，以及接觸面積不足的問題。本節使用雷射位移計量測手動撥弦時之小提琴琴弦振動響應，配合精密麥克風量測，確認雷射位移計量測微型結構的可行性。實驗量測點示意圖如圖 13(b) 所示，雷射感測頭對焦於小提琴琴弦 p1 處，麥克風距離琴弦約 10 公分處對準琴弦 p1 處，p2 為撥弦處，由上至下撥動琴弦致使激振。

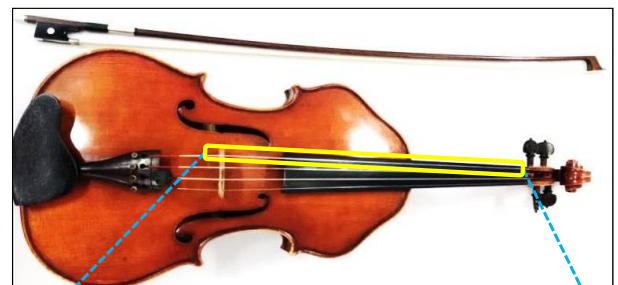
SVM 軟體設定量測頻寬 5000Hz，頻率解析度為 0.39Hz，雷射位移計量測速度 (m/s)，精密麥克風量測聲壓 (Pa) 訊號，經傅立葉轉換得到雷射位移計之 $G_{vv}(f)$ 及精密麥克風之 $G_{pp}(f)$ 。圖 14 為小提琴琴弦

量測實驗系統方塊圖，整體系統之振動源為琴弦上之撥弦力 $f(t)$ ，傳遞至琴弦結構路徑響應為速度 $v(t)$ ，由雷射位移計量測，隨後振動傳遞至琴體結構路徑產生琴體振動，振動傳遞到空氣路徑後產生聲音 $p(t)$ 由精密麥克風量測。實驗量測結果如圖 15 所示，x 軸為頻率 (Hz)， $G_{vv}(f)$ 的 y 軸單位為 $(m/s)_{rms}$ ， $G_{pp}(f)$ 的 y 軸單位為 Pa_{rms} ，雷射位移計之 $G_{vv}(f)$ 與精密麥克風之 $G_{pp}(f)$ 皆出現明顯的琴弦結構自然頻率峰值，兩者整體趨勢對應良好，而 $G_{pp}(f)$ 在 600Hz 以下低頻區域有峰值外的頻率隆起，推測為小提琴腔體及空氣共振引起。

表 8 為小提琴琴弦自然頻率對照表，雷射位移計與精密麥克風所量測到的自然頻率整體差異平均值為 0.13%，差異平方平均根值為 0.27%。整體來說，頻譜趨勢對應良好，自然頻率差異微小，代表雷射位移計量測微型結構具可行性。



(a) 實驗儀器架設圖



(b) 實驗量測點示意圖

圖 13、小提琴琴弦量測實驗規劃

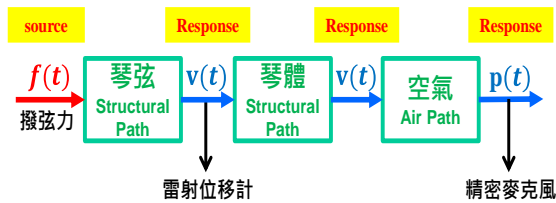


圖 14、小提琴琴弦量測實驗系統方塊圖

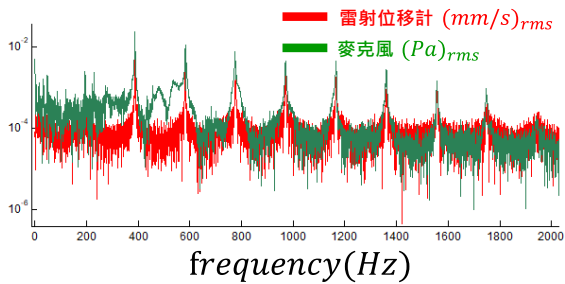


圖 15、小提琴琴弦量測實驗結果

表 8、小提琴琴弦自然頻率對照表

雷射位移計		精密麥克風		差異值 (Hz)	差異百分比 (%)
峰值數	自然頻率 (Hz)	峰值數	自然頻率 (Hz)		
V-01	193.4	P-01	193.8	-0.4	-0.21
V-02	387.9	P-02	385.9	2.0	0.52
V-03	582.0	P-03	582.4	-0.4	-0.07
V-04	776.6	P-04	774.6	2.0	0.26
V-05	971.1	P-05	970.3	0.8	0.08
V-06	1166.0	P-06	1166.0	0.0	0.00
V-07	1361.0	P-07	1361.0	0.0	0.00
V-08	1556.0	P-08	1557.0	-1.0	-0.06
V-09	1752.0	P-09	1748.0	4.0	0.23
V-10	1953.0	P-10	1942.0	11.0	0.57

4.3 兩刷膠條刷拭振動量測

兩刷膠條在刷拭時的抖動狀況是膠條設計評估的因素之一，由於膠條表面光滑接觸式感測器難以黏貼，本節應用雷射位移計對刷拭中的兩刷膠條進行振動量測。圖 16 為兩刷膠條量測示意圖，兩刷膠條接觸刷拭機玻璃並承受固定下壓力，雷射感測頭對焦於膠條刀口處，玻璃於半乾濕狀態拖動膠條並進行量測。

SVM 軟體設定量測頻寬 5000Hz，頻率解析度為 0.78Hz，雷射位移計量測速度 (m/s)，經傅立葉轉換為 $G_{vv}(f)$ ，實驗量測結果如圖 17 所示，由 $G_{vv}(f)$ 頻譜可觀察到 1000Hz 左右有整體隆起的現象，200Hz 以下低頻率區間有明顯峰值，推測可能是膠條刷拭之抖動頻率以及主要的噪音來源，整體來說雷射位移計量測到明顯的兩刷膠條刷拭振動響應，可提供後續診斷的依據。

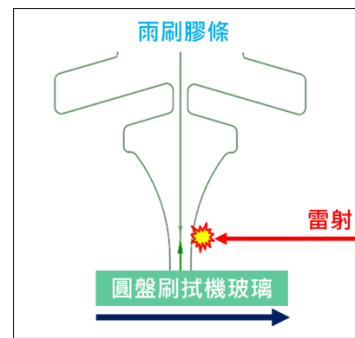
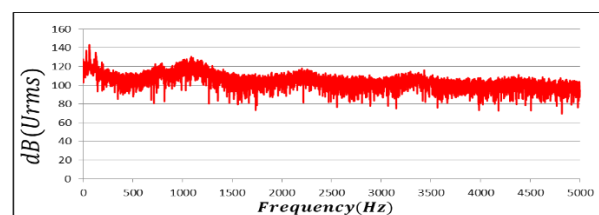
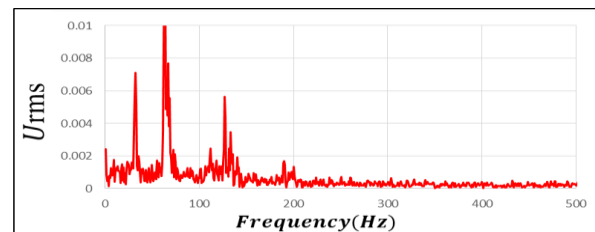


圖 16、兩刷膠條量測示意圖



(a) 自身功率頻譜(0~5000Hz)



(b) 自身功率頻譜(0~500Hz)

圖 17、兩刷膠條量測實驗結果

5. 結論

本文介紹雷射位移計操作流程與校正程序，並探討雷射感測頭之訊號反射程度、量測距離與偏斜角度對量測結果的影響，以及實務應用中配合加速規與精密麥克風等感測器佐證雷射位移計之量測結果可行性與可靠性，得到以下幾點結論與建議：

- (1) 標準激振源測試中訊號反射程度對量測結果影響微小，訊號反射程度 25% 以上的量測結果具可靠性。
- (2) 雷射感測頭在 20~130cm 的量測距離內垂直量測具有可靠的量測結果。
- (3) 雷射感測頭之偏擺角度明顯影響量測結果，在標準激振源測試中，隨著偏擺角度增加量測值則隨之降低，且量測結果均符合畢氏定理，進行實驗量測前須確保雷射感測頭無偏擺角度之情形。
- (4) 響鈴板量測實驗中，加速規的 $G_{aa}(f)$ 轉換為 $G_{vv}(f)$ 後，與雷射位移計之 $G_{vv}(f)$ 比對結果非常

吻合，表示雷射位移計訊號與加速度訊號有等效的量測結果，代表雷射位移計量測具有可靠性，並等效於接觸式感測器之量測結果。

- (5) 琴弦量測實驗中，雷射位移計與麥克風量測結果對應良好，代表雷射位移計量測微型結構之振動響應具可行性。
- (6) 兩刷膠條量測實驗中，應用雷射位移計量測半乾濕刷拭狀態下的膠條刀口，量測到明顯的振動響應，可提供後續診斷的依據。
- (7) 未來可善加利用雷射位移計對微型結構進行振動響應量測，更精確的量測結果有助於振動診斷和模型驗證，幫助後續相關研究的推動

6. 誌謝

本文感謝科技部計畫經費補助，得以完成「雷射位移計校正與振動量測之實務應用」，計畫編號：108-2221-E-020-018

7. 參考文獻

1. 陳思武、胡家銘、林朝宗、陳玲玲，雷射位移計技術，光學工程，第 64 期，第 31~35 頁，1998
2. 黃運琳、黃冠倫、周志委，運用雷射位移計量測及分析樑結構產品的動態特性，中華民國振動與噪音工程學會第十八屆學術研討會，台北、台灣，第 116-122 頁，2010
3. 張澍，葉宗民，激光多普勒測振儀對激光陀螺動態特性測試分析，紅外與激光工程，第 7 期，第 42~46 頁，2017
4. J. M. Lin, P. K. Chang, Integrating MEMS Electro-Static Driven Micro-Probe and Laser Doppler Vibrometer for Non-Contact Vibration Mode SPM System Design, Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 399-407, 2009
5. 李百堂、黃少琦、楊書衡、崔廣義，加速規靈敏度雷射校正系統之建立，中華民國振動與噪音工程學會論文集，第 219-225 頁，1993
6. 王栢村、陳柏儉、王文志、李昆達、吳盈輝，振動試驗機規格與驗收流程，中華民國航太學會學術研討會，台南、台灣，論文編號：B-18，2014
7. 王栢村、王文志、王廷維、黃啟順，機械噪音測量和診斷定制程序：雙螺桿壓縮機之應用，第二十一屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，台北、台灣，第 57-64 頁，2013
8. 王栢村、陳柏儉、余易璋、林聖傑、王文志，迴轉式壓縮機組裝於冷氣機之振動噪音特性探討，第十三屆精密機械與製造科技研討會論文集，屏東、台灣，論文編號：A-036，2015

Calibration of Laser Vibrometer and Practical Applications to Vibration Measurement

Bor-Tsuen Wang¹, Chien-Hsiung Tsai²,
Chyuan-Yow Tseng², Yao-Kuang Tsai¹,
Chun-Lang Tsai³, Ying-Hui Wu⁴

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

²Department of Vehicle Engineering,
National Pingtung University of Science and
Technology

³Taiwan Yunyi Techonlogy Co.,Ltd.

⁴Machinery Division, National Senior
Agricultural-Industrial Vocational School
MOST Project No.: MOST 108-2221-E-020-018

Abstract

For the minimization of products, structural vibration measurements require accurate data acquisition and avoid such as mass effect of sensor by using non-contact sensor. This work introduces the laser vibrometer and its calibration, and so forth its practical applications to measure vibration response of different structures, i.e. a ring plate, violin string and wiper blade. The calibration procedures and equipment setup are shown by using the vibration calibration exciter to generate the reference harmonic acceleration or velocity and displacement. The sensitivity of laser vibrometer in terms of displacement and velocity respectively, can be calibrated. The distance and skew angle effects of the laser head away from the target surface are also investigated and shown little influence, if the focus of laser head is well adjusted and able to reflect the effective signal. In practical application to measure the vibration spectrum response of ring plate, both the acceleration from the accelerometer and the velocity from the laser vibrometer are taken simultaneously. Results show the velocity auto power spectral density

(auto PSD) function converted from the acceleration reveals the good agreement with that from the laser measurement. This demonstrates the feasibility and effectiveness of using the laser vibrometer. The violin string's vibration response, i.e. the velocity auto PSD, is also measured and compared with the sound auto PSD. Both velocity and sound spectra reveals the good agreement in terms of peak resonances of string vibration. The other test is for the wiper blade lateral vibration. The blade velocity spectrum can be obtained and examined for its peak resonances reasonably. This work shows the experimental approach of using laser vibrometer, including the calibration and applications to practical structural vibration measurement. The laser vibrometer is shown feasible in accurate measurement of vibration spectrum, in particular for miniature structures, and applicable to vibration diagnosis and model verification.

Keywords : Laser vibrometer, Calibration, Calibration exciter, Auto power spectral density (PSD) function