



雷射振鏡馬達振動分析及除振技術之研究

Research on Inertial-Sensing-Based Vibration Analysis and Suppression System for Laser Galvanometers

周柏寰¹ 許煜亮² 張興政³ 楊士進⁴ 陳昱態⁵ 朱玉鳳⁶

¹工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 研究員

²逢甲大學 自動控制工程學系 助理教授

³逢甲大學 自動控制工程學系 教授

⁴台灣大學 機械工程學系 助理教授

⁵逢甲大學 自動控制工程學系 研究生

⁶工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部

摘要

本研究旨在開發一套基於慣性感測技術之雷射振鏡馬達振動分析與除振系統並應用於抑制雷射振鏡馬達的扭力共振頻率。我們將針對本研究所需相關硬軟體實現、演算法理論及實際應用之開發與設計，完成下列工作項目：(1)開發一套具輕重量、小體積、低功耗、低成本與高可靠度之振動訊號感測模組；(2)開發高效能之振動分析與除振演算法；(3)建構高效能之梳狀濾波器。最後，本研究將整合所研發之振動訊號感測模組、振動分析與除振演算法及梳狀濾波器為一振鏡馬達振動分析及除振系統平台，來加以抑制雷射振鏡馬達的振動問題，進而改善雷射振鏡系統的精準度及穩定度。

Abstract

The objective of this study is to develop an inertial-sensing-based vibration analysis and suppression system for laser galvanometers. The system is designed to measure and analyze the vibrations during rotation motions of galvanometers. Comb filter is designed to effectively restrain the vibrations of the galvanometers. In order to accomplish the objectives, we firstly develop a light, small size, low power, low cost, and reliable inertial-sensing-based measurement module to measure the vibration signals of the galvanometers. Secondly, an efficient and robust vibration analysis and suppression algorithm is developed to deduce the resonance frequency of the galvanometers. Finally, an efficient comb filter is developed to restrain the vibrations of the galvanometers. The vibration measurement module, vibration analysis, suppression algorithm and comb filter are integrated in a platform to restrain the vibrations of the galvanometers, and improve the accuracy and stability of the laser galvanometer scanning systems.

關鍵詞

振鏡馬達、慣性感測技術、振動分析、振動抑制、梳狀濾波器



Keywords

Galvanometer、Inertial Sensing Technology、Vibration Analysis、Vibration Suppression、Comb Filter

前言

近年來，由於電子產品發展趨勢日益微小化及雷射加工技術的蓬勃發展，雷射加工技術在焊接、切割、雕刻、鑽孔、標記、補模、表面處理等工業應用上已逐漸取代傳統機械加工方式。一般而言，雷射振鏡系統架構主要包含了雷射光源、X 及 Y 掃描鏡、振鏡馬達(galvanometer)及控制器所組成，其工作原理為當雷射光源射入至 X 及 Y 掃描鏡時，電腦會將使用者所設定之圖形轉換為用以驅動振鏡馬達的電壓訊號；接著，振鏡馬達則會依照驅動電壓之改變而改變其轉動角度進而改變 X 及 Y 掃描鏡的反射角度；最後，雷射光源會因 X 及 Y 掃描鏡的反射角度聚焦在特定的位置點上執行使用者所設定之圖形；而振鏡馬達透過控制 X 及 Y 掃描鏡的角度，進而控制雷射光源的行進方向，並藉此調整雷射焦距，主要是影響雷射焦點的準確性[1]。由於振鏡馬達的轉動是屬於高速的擺動運動，因此馬達會因為轉動的不平衡而產生扭力共振頻率，其會使馬達產生高溫且產生尖銳的高頻噪音，進而影響振鏡馬達的精準度及穩定度；若不適時地設計振動濾波器來加以抑制，更可能造成馬達線圈的燒毀[2]。由此可知，在驅動振鏡馬達之前匹配適當的濾波器來加以抑制扭力共振頻率，將有效地提升雷射振鏡系統的精

準度及穩定度。因此，本計畫之目標為利用加速度計來加以有效量測到振鏡馬達振動訊號，透過頻譜分析找到其扭力共振頻率，進而設計梳狀濾波器(comb filter)來加以抑制其振動訊號，使雷射振鏡系統具有高精準度及高穩定度之特性[3-5]。

系統架構

為了準確地量測到振鏡馬達轉動時在三維空間中所產生的振動訊號，本計畫將整合 Arduino 微控制器、慣性感測器(加速度計及陀螺儀)及藍牙無線傳輸模組來實現振鏡馬達振動訊號感測模組，來加以量測振鏡馬達轉動時振動所產生的加速度及角速度訊號；為了有效量測及分析振鏡馬達轉動時所產生的高頻振動，本計畫亦採用德國 MMF 的壓電式加速規(KS95B100)來加以量測高頻振動訊號。

1. 基於 Arduino 微控制器之振動訊號感測模組

本計畫目前已完成開發基於 Arduino 微控制器之振動訊號感測模組，其中包含了 Arduino 微控制器、加速度計、陀螺儀及無線射頻模組，尺寸為 40mm × 50mm × 8mm，如圖 1(a)所示。以下就振動訊號感測模組中的主要元件進行簡述：(1)微控制器(arduino pro mini)：Atmega328 之處理器，除了小體積、工作時脈可達到 16 MHz

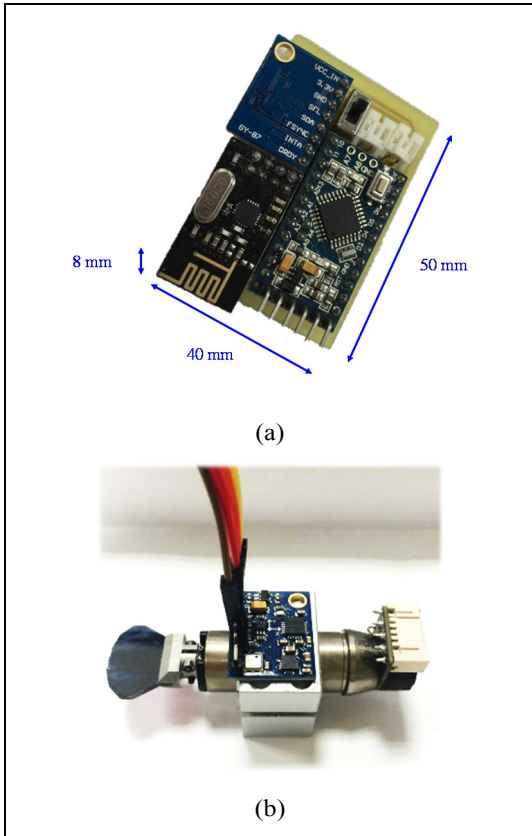


圖 1 基於 Arduino 微控制器之振動訊號感測模組：(a)實體電路圖，(b)實際量測圖。

之外，同時亦包含內部整合電路(integrated circuit, IC)、序列周邊介面(serial peripheral interface, SPI)、通用同步非同步收發傳輸器(universal synchronous asynchronous receiver/transmitter, USART)及通用序列匯流排(USB)等多種不同周邊溝通介面。(2)加速度計(MPU6050)：主要透過內部整合電路與微控制器相互傳遞訊號。在感測器的取樣頻率與量測範圍等相關設定部分，加速度計最大的取樣頻率為 1000 Hz，量測範圍可設定為 $\pm 2\text{ g}$ 、 $\pm 4\text{ g}$ 、 $\pm 8\text{ g}$ 以及 $\pm 16\text{ g}$ ，而解析度則為 16 bit。(3) 陀螺儀(MPU6050)：在溝通介面方面具備

內部整合電路以及序列周邊介面；最大取樣率為 8000 Hz，量測範圍可設定為 $\pm 250^\circ/s$ 、 $\pm 500^\circ/s$ 、 $\pm 1000^\circ/s$ 以及 $\pm 2000^\circ/s$ ，而解析度則為 16 bit。(4)無線射頻模組(nRF24L01)：其除了能夠降低系統的耗能之外還支援多種低功率底下的工作模式，其封裝大小為 $4.0\text{ mm} \times 4.0\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 。在溝通介面方面支援序列周邊介面，並且具備 2.4 GHz ISM 頻段以及空中的資料傳輸速率可達 2M bps。圖 1(b)為使用本計畫所開發之振動訊號感測模組進行量測之實際量測圖。

2. 壓電式加速規

本本計畫選用 Metra Mess-und Frequenztechnik (MMF)公司所開發之 KS95B100 壓電式加速規來量測振鏡馬達振動時所產生之高頻振動訊號，如圖 2(a)所示，其量測範圍可達 $\pm 60\text{ g}$ ，靈敏度為 $100 \pm 5\% \text{ mV/g}$ ，線性頻率範圍在頻率為 3 dB 時介於 0.5~28 kHz，工作電流為 2~20 mA 及工作溫度為 $-20 \sim 120^\circ\text{C}$ 。KS95B100 壓電式加速規之工作模式為單軸感測，其量測軸向為與加速規量測平面垂直之軸向，且必須與待測物接觸後方可量測到加速度訊號；反之，此加速規若沒有與待測物進行接觸則無法量測到任何加速度訊號。此外，KS95B100 壓電式加速規，必須搭配 Pico Technology 公司所開發之 PicoScope 4224 IEPE 示波器，如圖 2(b)所示，透過 USB 2.0 裝置將加速規所量測到的加速度訊號傳送至電腦進行儲存，其中該示波器之電壓範圍為 $\pm 50\text{ mV} \sim \pm 20\text{ V}$ ，解析度可達 12 bits，取樣頻率為 80 MS/s，靈

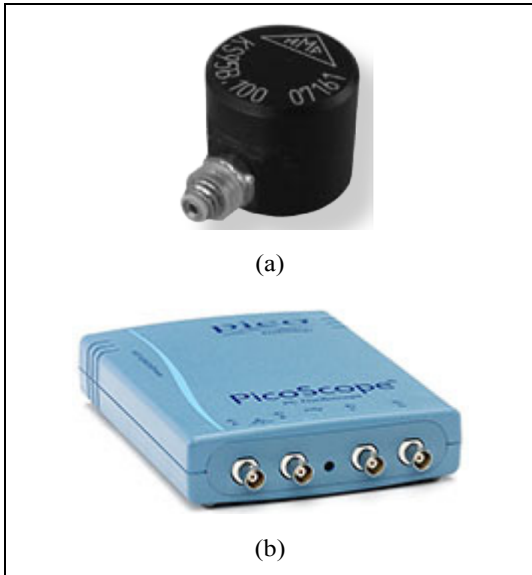


圖 2 壓電式加速規之振動訊號感測模組：(a) KS95B100 壓電式加速規實體圖，(b) Pico Scope 4224 IEPE 示波器。



圖 3 振鏡馬達實體圖

敏感度為 10 mV/div~4 V/div，工作溫度為 0~45°C，濕度範圍則是介於 5~80% RH。

3. 振鏡馬達

振鏡馬達是一種音圈馬達，其利用永恆式磁鐵(定子)產生的磁場與定子磁場交

互作用，提供轉子旋轉所需的扭力，進而控制 X 及 Y 掃描鏡的轉動角度；其具有高轉矩-轉動慣量比、時間常數小、響應速度快、精度高、速度高及穩定性高等優點，但其轉動範圍被限制在一定範圍內且具有散熱不便等缺點。本計畫採用劍橋科技 (Cambridge Technology) 所開發之振鏡馬達 (6220H)，如圖 3 所示，此振鏡馬達組為動磁式閉迴路的振鏡馬達，在設計上擁有較佳的工作速度、較小尺寸及較低的成本，在典型的 5 mm、8 mm、9 mm 和 10 mm 的光束直徑有最佳的準確度。本振鏡馬達採用閉迴路系統，內部包含了位置感測器來量測馬達的位置並進行回授，其馬達的偏轉角度為 $\pm 20^\circ$ ，總偏轉角度為 40° ，轉子慣量為 $0.125 \text{ gm}\cdot\text{cm}^2 \pm 10\%$ ，馬達內部線圈的電阻值及電感值為 $2.79 \pm 10\% \Omega$ 及 $180 \pm 10\% \mu\text{H}$ ，最大峰值電流及方均根電流分別為 20 A 及 3.9 A，最小角度步階響應為 200 μs (裝置 CTI-Y 型鏡子)，其最高線圈溫度為 110°C 。

4. 振鏡馬達振動訊號量測流程及系統架構

圖 4 為振鏡馬達振動訊號量測流程圖，其流程描述如下：首先，透過電腦設定用以驅動馬達之馬達控制命令的波形及頻率，並透過智慧型運動控制平台輸出數位命令訊號；接著，透過伺服驅動器轉接板將智慧型運動控制平台所輸出之數位命令訊號轉換為類比命令訊號，並傳送至振鏡馬達驅動板中的 PID 控制器，來加以驅動振鏡馬達；然後，利用示波器來加以量測振鏡馬達輸出位置(position)訊號，並利用快速傅立葉轉換(fast Fourier transformation,

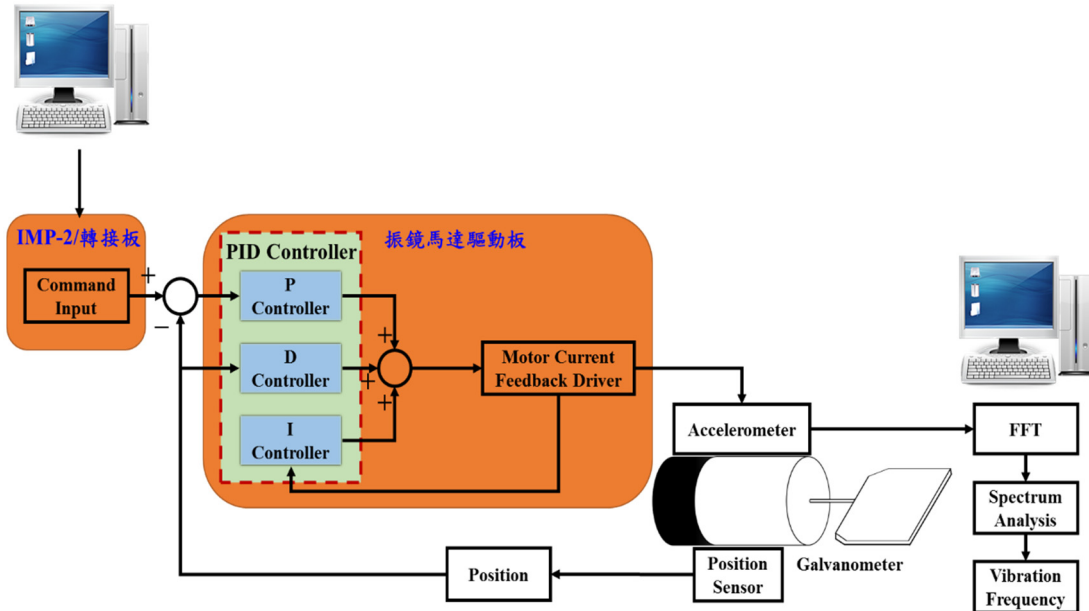


圖 4 振鏡馬達振動訊號量測流程圖

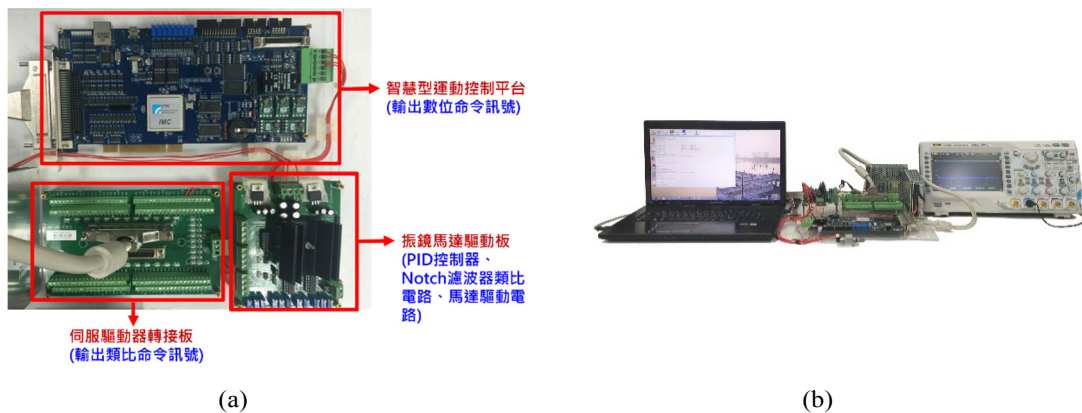


圖 5 (a)振鏡馬達驅動電路架構圖。(b)振鏡馬達振動訊號量測系統架構圖

FFT)進行輸出位置訊號之頻譜分析;此外,亦透過振動訊號感測器量測振鏡馬達振動訊號,並將訊號傳送至筆記型電腦中,透過 MATLAB 進行快速傅立葉轉換(FFT)及振動訊號頻譜分析,來加以找出振鏡馬達轉動時所產生振動頻率。

本計畫中振鏡馬達振動訊號量測系統架構,如圖 5 所示,其包含了:(1)智慧型

運動控制平台(intelligent motion control platform, IMP-2): 主要用以提供振鏡馬達之數位驅動命令訊號,其內建微處理器(PowerPC 440)與即時作業系統(VxWorks RTOS),可單機獨立執行運動控制命令,並整合 PCI-Bus、Ethernet(A+PC 模式)與 RS232(單機模式)等介面,讓使用者在不同模式中下達命令與監控。(2)伺服驅動器轉



接板：主要用以將智慧型運動控制平台所輸出的數位命令訊號轉換成類比命令訊號來加以驅動振鏡馬達。(3)振鏡馬達驅動板：經過轉接板轉換之類比命令訊號必須透過驅動板方能輸出控制訊號來加以控制振鏡馬達，其內含 PID 控制器、Notch 濾波器類比電路及馬達驅動電路。(4)振鏡馬達：採用 6220H 振鏡馬達，其偏轉角度為 $\pm 20^\circ$ 。(5)振動訊號感測器：包含自製振動訊號感測模組及 KS95B100 壓電式加速規與 PicoScope 4224 IEPE 示波器，用以量測振鏡馬達轉動時所產生振動訊號。(6)筆記型電腦：配備 i5-4460 之 CPU 與 8GB 之記憶體，作業系統為 Windows 10 專業版之筆記型電腦作為實驗的運算平台；用以執行 MATLAB、Tempo 與 Wind Rive Workbench 等軟體，來加以輸出馬達控制命令及收集感測器訊號進行振鏡馬達轉動時所產生的扭力共振頻率分析。(7)示波器：採用普源精電科技所開發之示波器 (DS4024) 來量測訊號，本示波器具有四個類比可同時量測，頻寬為 200 MHz，縱向靈敏度與解析度分別為 1 mV/div~10 V/div 與 8 bits，其中在即時波形分析模式中的取樣頻率為 4 GSa/s，記憶深度最高可達 14 億個點，在波形擷取頻率的部分每秒可擷取 11 萬個波形，並可以即時將訊號進行加、減、乘與快速傅立葉轉換等數學運算，本示波器所使用的標準通訊介面為 USB，可將訊號擷取後進行存取。

類比濾波器設計與模擬

本實驗之目的用以探討將馬達在不同

驅動訊號波形與不同驅動頻率下，採取固定方式、裝設置具及裝置鏡片進行驅動，所造成振鏡馬達振動的影響，並透過振動訊號頻譜分析，找出振鏡馬達振動的頻率；最後，根據振鏡馬達振動的頻率進行類比濾波器的推導、模擬、設計與實現來加以觀察類比濾波器的濾波效果。此外，我們亦透過音頻分析來加以分析馬達振動時的所產生的聲音，進而驗證類比濾波器的濾波效果。在本實驗當中，我們將馬達用螺絲固定於壓克力板上，並進行後續的振動分析與類比濾波器的設計，如圖 6 所示。



圖 6 振鏡馬達裝設鏡片實驗設置，螺絲固定於壓克力板。

1. 類比濾波器電路及推導

為了有效地將不同波形及不同驅動頻率所產生的各個振動頻率，在本計畫中我們採用了主動式的 Twin-T notch filter 來加以設計各個振動頻率的陷頻率波器(notch filter)。主動式 Twin-T notch filter 電路[6]，如圖 7 所示，其轉移函數(transfer function)如下所示。



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1}}{s^2 + 4 \frac{1}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{R_5}{R_4 + R_5}\right) s + \frac{1}{R_1 C_1}} \quad (1)$$

若我們進一步將電路中的各個電阻值及電容值設定如式(2)及(3)，則我們可以獲得如圖 8 之經過參數設定後之主動式 Twin-T notch filter 電路，並且透過調整 R_4 及 R_5 的數值來加以調整品質因子(Q)及頻寬(BW)。

$$R = R_1 = R_2 = 2R_3 \quad (2)$$

$$C = C_1 = C_2 = \frac{C_3}{2} \quad (3)$$

我們即可計算主動式 Twin-T notch filter 電路之相關參數：

(1)轉移函數：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s^2 + \frac{1}{RC}}{s^2 + 4 \frac{1}{RC} \left(1 - \frac{R_4}{R_4 + R_5}\right) s + \frac{1}{RC}} \quad (4)$$

(2)中心頻率(f_c)：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5)$$

(3)品質因子(Q)：

$$Q = \frac{R_4 + R_5}{4R_4} \quad (6)$$

(4)頻寬(BW)：

$$W = \frac{1}{RC} \cdot \frac{1}{Q} \quad (7)$$

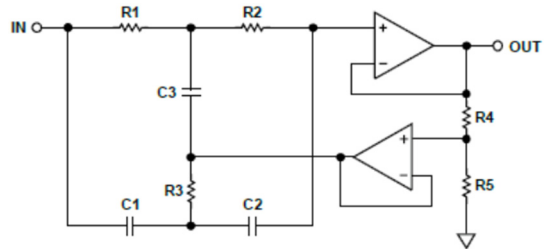


圖 7 主動式 Twin-T notch filter

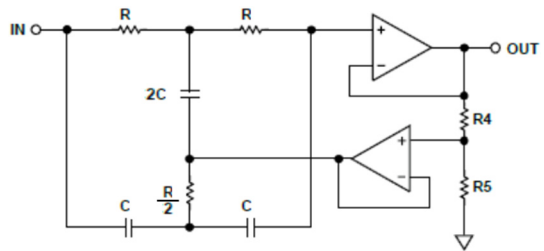


圖 8 經過參數設定後之主動式 Twin-T notch filter

2. 55 Hz 弦波訊號之類比濾波效果

(1) 馬達振動訊號分析

由圖 9 可知透過 KS95B100 壓電式加速規量測振鏡馬達之振動訊號並透過其 FFT 轉換後，其包含了 55.55 Hz、3.111 kHz、5.056 kHz、10.060 kHz 及 15.060 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。由上述可知，振鏡馬達之振動訊號非但包含了本身輸出位置訊號(55.55 Hz)，亦包含了其他 3.111 kHz、5.056 kHz、10.060 kHz 及 15.060 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。

(2) 類比濾波器模擬與設計

由圖 9 可知，振鏡馬達之振動訊號包

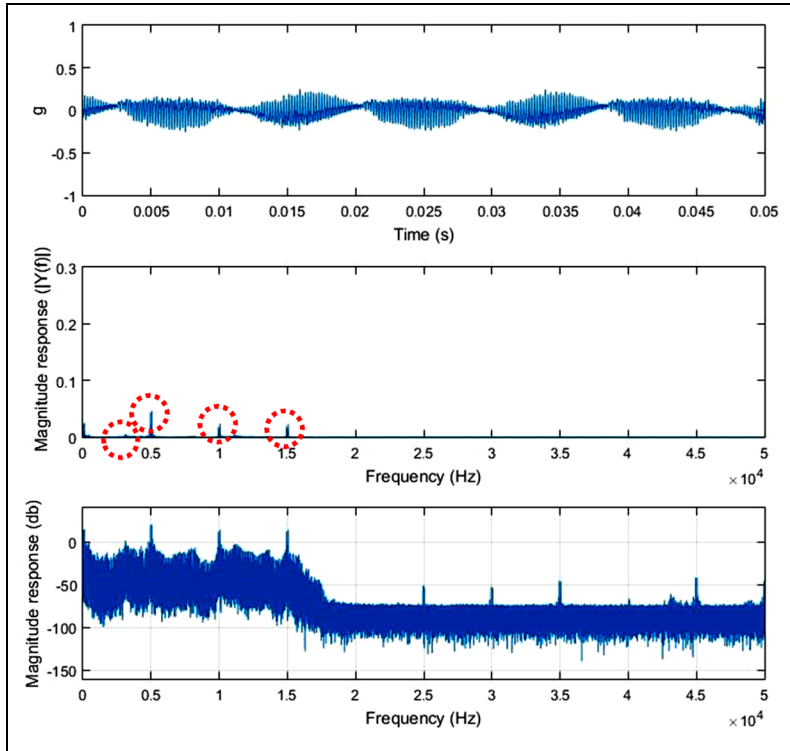


圖 9
弦波 55 Hz (固定方式；
裝設置具；裝設鏡片)之
振動訊號。
(1)KS95B100 壓電式加
速規量測之部分振動訊
號；
(2)振幅頻譜；
(3)頻譜響應。

3 kHz陷頻濾波器				5 kHz陷頻濾波器				10 kHz陷頻濾波器						
	理論		實際電路			理論		實際電路			理論		實際電路	
中心頻率 (kHz)	3.111		3.272		中心頻率 (kHz)	5.056		4.933		中心頻率 (kHz)	10.060		9.775	
截止頻率 (kHz)	2.799	3.422	2.963	3.578	截止頻率 (kHz)	4.550	5.561	4.480	5.371	截止頻率 (kHz)	9.054	11.066	9.034	10.672
頻寬(Hz)	622		615		頻寬(Hz)	1011		891		頻寬(Hz)	2012		1638	
$R_1, R_2(k\Omega)$	5.100		4.870		$R_1, R_2(k\Omega)$	3.100		3.240		$R_1, R_2(k\Omega)$	1.600		1.620	
$R_3(k\Omega)$	2.600		2.490		$R_3(k\Omega)$	1.600		1.620		$R_3(k\Omega)$	0.800		0.806	
$R_4(k\Omega)$	3.500		3.500		$R_4(k\Omega)$	3.500		3.500		$R_4(k\Omega)$	3.500		3.500	
$R_5(k\Omega)$	80		80		$R_5(k\Omega)$	80		80		$R_5(k\Omega)$	80		80	
$C_1(nF)$	10		10		$C_1(nF)$	10		10		$C_1(nF)$	10		10	
$C_2(nF)$	10		10		$C_2(nF)$	10		10		$C_2(nF)$	10		10	
$C_3(nF)$	20		20		$C_3(nF)$	20		20		$C_3(nF)$	20		20	

表 1
針對 55 Hz 弦
波訊號振動頻
率之類比濾波
器設計規格表

含了 3.111 kHz、5.056 kHz、10.060 kHz 及 15.060 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。然而，經由實驗結果我們可以得知 15.060 kHz 之振動頻率為 5.056 kHz 振動頻率之倍頻；所以只要濾除 5.056 kHz 之振動頻率，即可有效地消除 15.060 kHz 之振動頻率。因此，在本實驗當中，我們只需針對

3.111 kHz、5.056 kHz 及 10.060 kHz 之振動訊號進行類比梳狀濾波器之設計。表 1 為利用 OrCAD Capture Lite 軟體針對上述振動頻率所設計的類比梳狀濾波器理論電路及實際電路所找出各個陷頻中心頻率與截止頻率。由表 1 可知由實際電路所設計的類比梳狀濾波器之第一個中心頻率為

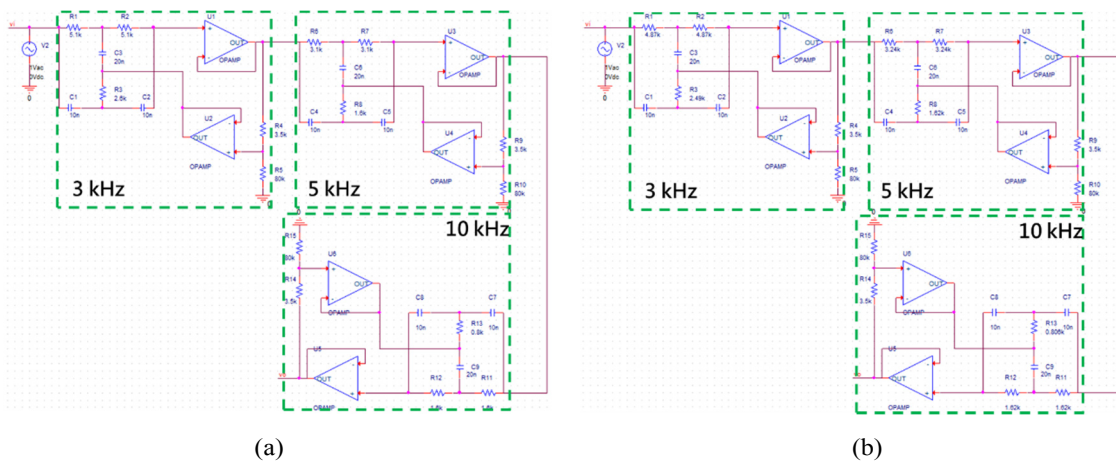


圖 10 針對 55 Hz 弦波訊號振動頻率之類比梳狀濾波器設計：(a)模擬理論電路 (b)實際設計電路

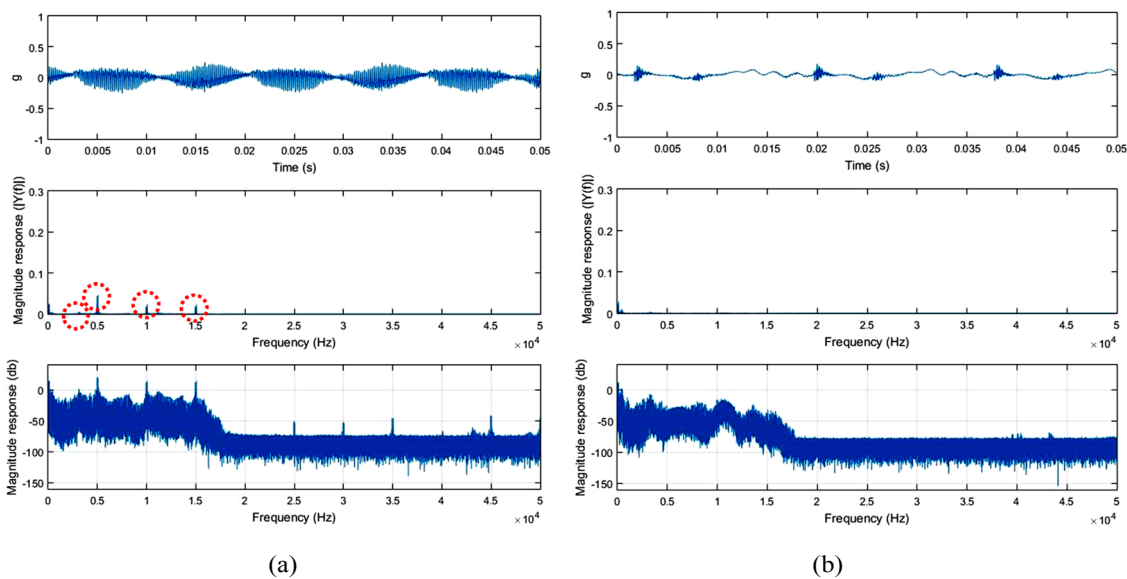


圖 11 針對 55 Hz 弦波訊號振動頻率之類比梳狀濾波器濾波結果：(a)濾波前的振動訊號及其頻譜響應圖 (b)濾波後的振動訊號及其頻譜響應圖。

3.272 kHz，而其截止頻率則分別為 2.963 kHz 及 3.578 kHz；第二個中心頻率為 4.933 kHz，而其截止頻率則分別為 4.480 kHz 及 5.371 kHz；第三個中心頻率為 9.775 kHz，而其截止頻率則分別為 9.034 kHz 及 10.672 kHz。由此可見，我們所設計的類比梳狀濾波器將可有效地濾除 3.111 kHz、

5.056 kHz、10.060 kHz 及 15.060 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。圖 10 為針對 55 Hz 弦波訊號振動頻率之類比梳狀濾波器理論電路及實際電路之電路圖。

(3) 類比濾波器效果

圖 11 為針對驅動訊號波形為弦波、頻率為 55 Hz、馬達採用固定方式、裝設置具



及裝設鏡片之實驗設置環境所產生的振動訊號頻率進行濾波前及濾波後的結果。圖 11(a)為濾波前的振動訊號及其頻譜響應圖；我們可以得知其振動頻率包含 3.111 kHz、5.056 kHz、10.060 kHz 及 15.060 kHz。圖 11(b)則為濾波後的振動訊號及其頻譜響應圖，我們可以得知 3.111 kHz、5.056 kHz、10.060 kHz 及 15.060 kHz 等振動頻率皆已經被類比梳狀濾波器(comb filter)所去除。

(4) 音頻分析

為了驗證我們所設計的類比濾波器之有效性，我們亦採用音頻分析，來加以分析濾波前後馬達振動所發出的聲音訊號。圖 12 為針對驅動訊號波形為弦波、頻率為 55 Hz、馬達採用固定方式、裝設置具及裝設鏡片之實驗設置環境所產生的馬達振動聲音訊號進行濾波前及濾波後的結果。圖 12(a)為濾波前的聲音訊號及其頻譜響應

圖；我們可以得知其聲音訊號頻率包含 4.944 Hz、5.055 kHz、9.944 kHz、10.060 kHz、14.940 kHz 及 15.060 kHz。圖 12(b)則為濾波後的聲音訊號及其頻譜響應圖，我們可以得知 4.944 Hz、5.055 kHz、9.944 kHz、10.060 kHz、14.940 kHz 及 15.060 kHz 等振動頻率振幅皆已經被類比梳狀濾波器(comb filter)所大幅降低。

3. 110 Hz 弦波訊號之類比濾波效果

(1) 馬達振動訊號分析

由圖 13 可知透過 KS95B100 壓電式加速規量測振鏡馬達之振動訊號並透過其 FFT 轉換後，其包含了 111.1 Hz、3.111 kHz 及 10.110 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。由上述可知，振鏡馬達之振動訊號非但包含了本身輸出位置訊號(111.1 Hz)，亦包含了其他 3.111 kHz 及 10.110 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。

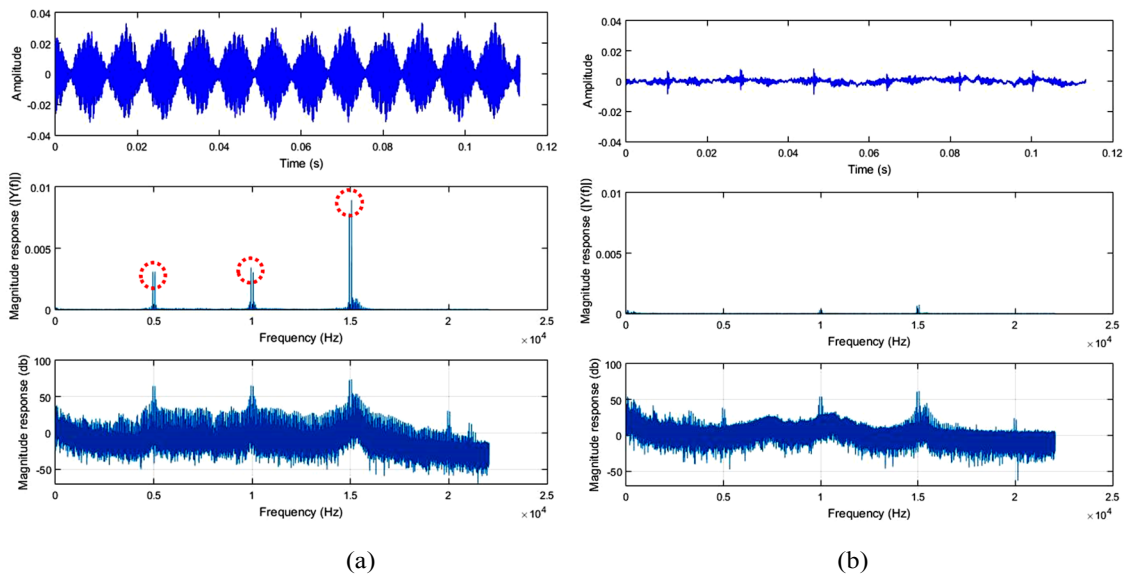


圖 12 針對 55 Hz 弦波訊號振動聲音頻率之類比梳狀濾波器濾波結果：(a)濾波前的振動聲音訊號及其頻譜響應圖 (b)濾波後的振動聲音訊號及其頻譜響應圖

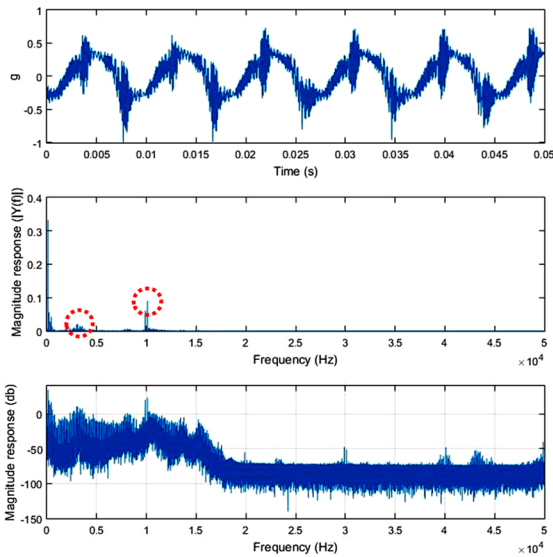


圖 13 弦波 110 Hz (固定方式；裝設置具；裝設鏡片)之振動訊號：(1)KS95B100 壓電式加速規量測之部分振動訊號；(2)振幅頻譜；(3)頻譜響應。

(2) 類比濾波器模擬與設計

由圖 13 可知，振鏡馬達之振動訊號包含了 3.111 kHz 及 10.110 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。因此，在本實驗當中，我們只需針對 3.111 kHz 及 10.110 kHz 之振動訊號進行類比梳狀濾波器之設計。表 2 為利用 OrCAD Capture Lite 軟體針對上述振動頻率所設計的類比梳狀濾波器理論電路及實際電路所找出各個陷頻中心頻率與截止頻率。由表 2 可知由實際電路所設計的類比梳狀濾波器之第一個中心頻率為 3.272 kHz，而其截止頻率則分別為 2.963 kHz 及 3.578 kHz；第二個中心頻率為 9.775 kHz，而其截止頻率則分別為 9.034 kHz 及 10.672 kHz。由此可見，我們所設計的類比梳狀濾波器將可有效地濾除 3.111 kHz 及 10.110 kHz 等不同振動頻率之振動訊號。

圖 14 為針對 110 Hz 弦波訊號振動頻率之類比梳狀濾波器理論電路及實際電路之電路圖。

表 2 針對 110 Hz 弦波訊號振動頻率之類比濾波器設計規格表

	3 kHz陷頻濾波器		10 kHz陷頻濾波器	
	理論	實際電路	理論	實際電路
中心頻率 (kHz)	3.111	3.272	10.110	9.775
截止頻率 (kHz)	2.799	3.422	2.963	3.578
頻寬(Hz)	622.2	615	9.099	11.121
$R_1, R_2(k\Omega)$	5.100	4.870	9.034	10.672
$R_3(k\Omega)$	2.600	2.490	$R_1, R_2(k\Omega)$	1.600
$R_4(k\Omega)$	3.500	3.500	$R_3(k\Omega)$	0.800
$R_5(k\Omega)$	80	80	$R_4(k\Omega)$	3.500
$C_1(nF)$	10	10	$R_5(k\Omega)$	80
$C_2(nF)$	10	10	$C_1(nF)$	10
$C_3(nF)$	20	20	$C_2(nF)$	10
			$C_3(nF)$	20

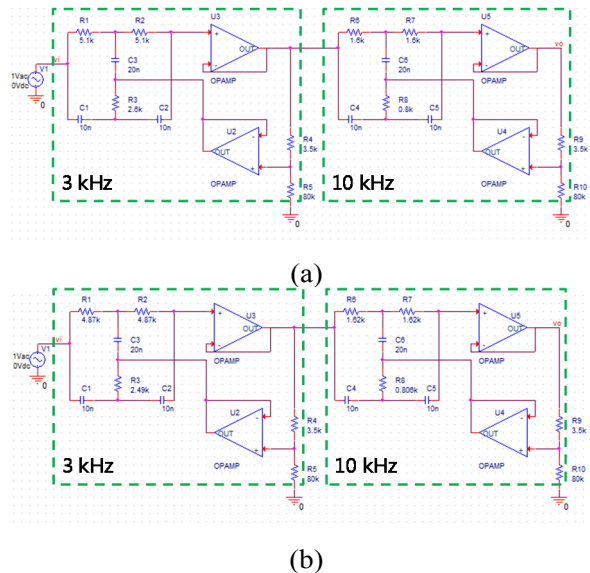


圖 14 針對 110 Hz 弦波訊號振動頻率之類比梳狀濾波器設計：(a)模擬理論電路；(b)實際設計電路。

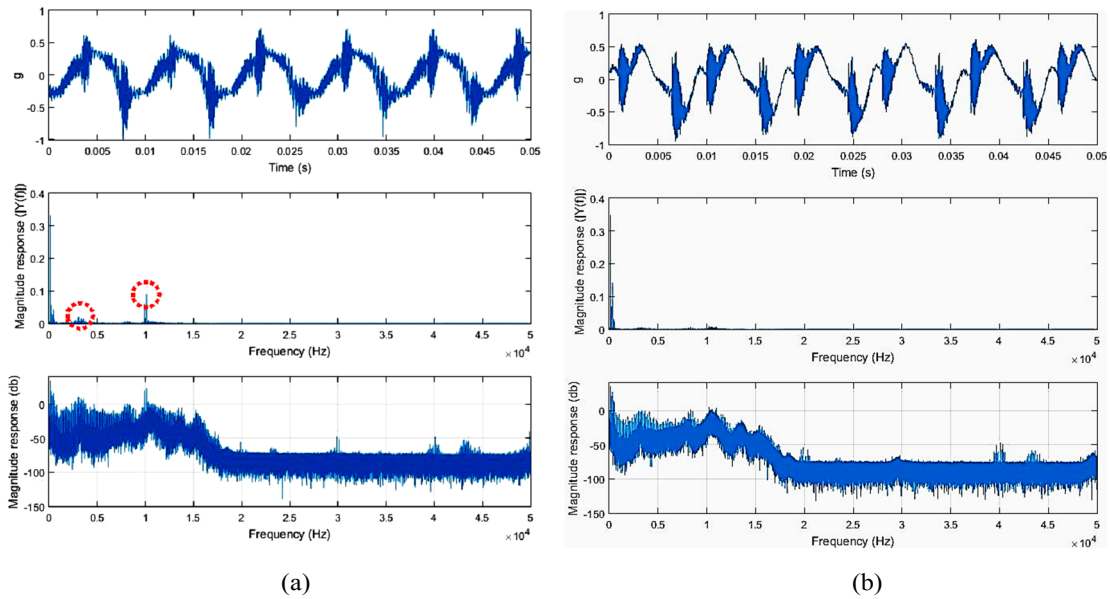


圖 15 針對 110 Hz 弦波訊號振動頻率之類比梳狀濾波器濾波結果：(a)濾波前的振動訊號及其頻譜響應圖；(b)濾波後的振動訊號及其頻譜響應圖。

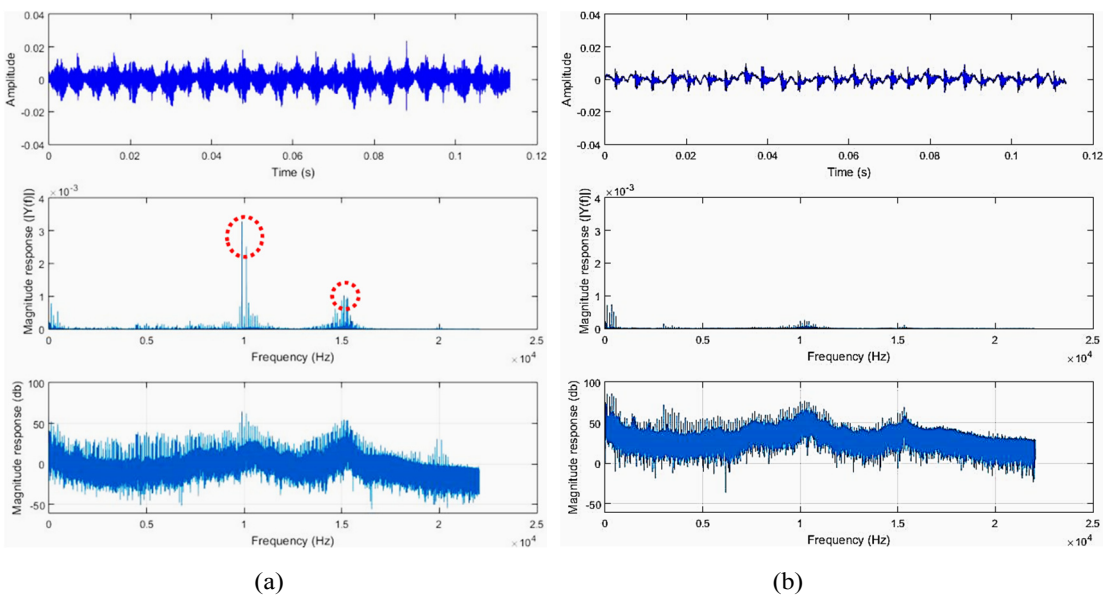


圖 16 針對 110 Hz 弦波訊號振動聲音頻率之類比梳狀濾波器濾波結果：(a)濾波前的振動聲音訊號及其頻譜響應圖；(b)濾波後的振動聲音訊號及其頻譜響應圖。

(3) 類比濾波器效果

圖 15 為針對驅動訊號波形為弦波、頻率為 110 Hz、馬達採用固定方式、裝設置

具及裝設鏡片之實驗設置環境所產生的振動訊號頻率進行濾波前及濾波後的結果。圖 15(a)為濾波前的振動訊號及其頻譜響



應圖；我們可以得知其振動頻率包含 3.111 kHz 及 10.110 kHz。圖 15(b)則為濾波後的振動訊號及其頻譜響應圖，我們可以得知 3.111 kHz 及 10.110 kHz 等振動頻率振幅皆已經被類比梳狀濾波器(comb filter)所大幅降低。

(4) 音頻分析

為了驗證我們所設計的類比濾波器的有效性，我們亦採用音頻分析，來加以分析濾波前後馬達振動所發出的聲音訊號。

圖 16 為針對驅動訊號波形為弦波、頻率為 110 Hz、馬達採用固定方式、裝設置具及裝設鏡片之實驗設置環境所產生的馬達振動聲音訊號進行濾波前及濾波後的結果。圖 16(a)為濾波前的聲音訊號及其頻譜響應圖；我們可以得知其聲音訊號頻率包含 9.888 Hz、10.110 kHz 及 15.110 kHz。圖 16(b)則為濾波後的聲音訊號及其頻譜響應圖，我們可以得知 9.888 Hz、10.110 kHz 及 15.110 kHz 等振動頻率振幅皆已經被類比梳狀濾波器(comb filter)所大幅降低。

4. 實驗結果與討論

- (1) 不論驅動訊號波形為弦波或三角波，其輸出位置訊號頻率會依序驅動訊號頻率而呈現倍頻的現象。
- (2) 不論驅動訊號波形為弦波或三角波，當驅動訊號頻率為 55 Hz 或 50 Hz 時，則會產生接近 5 kHz 的振動頻率(弦波：5.056 kHz；三角波：4.950 kHz)。
- (3) 當馬達採取或懸掛方式僅會在振動訊號振幅大小上有差異，並不會影響其振動頻率。

(4) 當馬達裝設置具時，則會明顯產生較高振動頻率(10 kHz 或 15 kHz)之頻譜振幅。

(5) 當馬達裝置鏡片時，則會明顯產生 3 kHz 及 15 kHz 的振動頻率，並加倍 10 kHz 的頻譜振幅。

(6) 類比梳狀濾波器(comb filter)可有效地去掉振鏡馬達轉動時所產生振動訊號頻率。

結論與未來發展

本計畫成功開發一套基於慣性感測訊號之雷射振鏡馬達振動分析與除振技術演算法，其包含(1)雷射振鏡馬達振動訊號收集：透過加速度感測模組來量測振鏡馬達在轉動時所產生的振動訊號(加速度訊號)；(2)振動頻譜分析：將加速度訊號透過快速傅立葉轉換(FFT)後，進行其訊號的頻譜分析並藉此找出其共振頻率；(3)數位濾波器設計：將數位濾波器的零點(zeros)設置於所偵測到的共振頻率上，來加以設計數位濾波器並藉此抑制振鏡馬達之振動訊號；(4)類比濾波器設計：利用所偵測到的共振頻率來加以設計類比濾波電路，並藉此抑制振鏡馬達之振動訊號。

目前國際技術大多將振鏡馬達之位置輸出訊號進行回授，來加以設計控制器來加以控制振鏡馬達，如圖 17 所示；而本計畫除了透過將位置輸出訊號回授至 PID 控制器進行振鏡馬達之控制外，更加入了濾波器來進一步地將振鏡馬達轉動時所產生的振動頻率加以濾除，若可有效濾除振鏡馬達轉動時所產生的振動頻率，將可大大

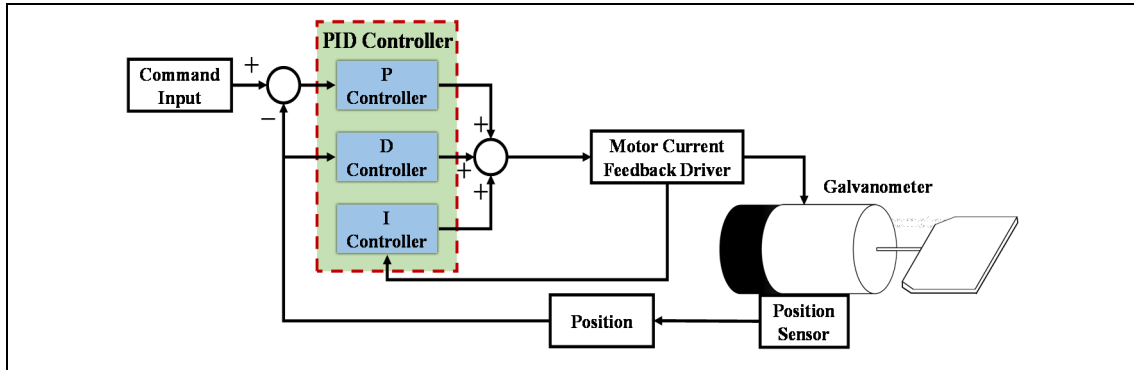


圖 17 透過將位置輸出訊號回授至 PID 控制器進行振鏡馬達控制之機制

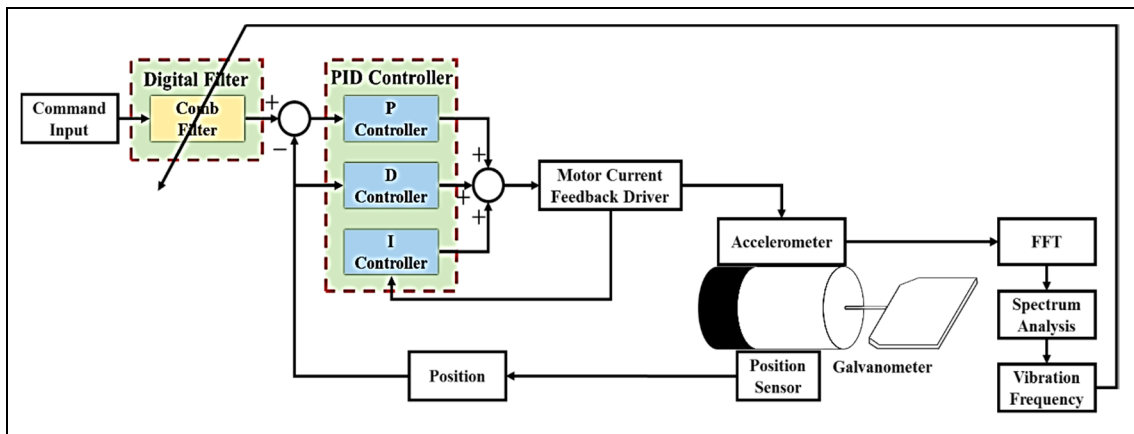


圖 18 具適應性之數位濾波器設計法則之線上即時振動頻率濾波進行振鏡馬達控制之機制

地改善振鏡馬達轉動時的位置控制精度。未來我們更將針對不同驅動訊號及頻率來加以設計適應性演算法之數位濾波器，希冀可以線上即時地來加以濾除振鏡馬達轉動時所產生的振動頻率，如圖 18 所示。

誌謝

感謝工業技術研究院機械與機電系統研究所(計畫編號 G353C91230)的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

[1] R. P. Aylward, “Advances and technologies of

galvanometer-based optical scanners,” *Proc. SPIE*, vol. 3787, pp. 158-164, 1999.

[2] Engelmayer, “New development and applications in scan head technology,” in *Proceedings of ALAC 2005*, pp. 1-7, 2005.

[3] G. S. Maruthi and V. Hegde, “Application of MEMS accelerometer for detection and diagnosis of multiple faults in the roller element bearings of three phase induction motor,” *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 145-152, 2016.

[4] H. Zhang, P. Zanchetta, K. J. Bradley, and C. Gerada, “A low-intrusion load and efficiency evaluation method for in-service motors using vibration tests with an accelerometer,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 4, pp. 1341-1349,



2010.

- [5] Cristalli, N. Paone, and R. M. Rodriguez, "Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 6, pp. 1350-1361, 2006.
- [6] Y. Maeda and M. Iwasaki, "Improvement of adaptive property by adaptive deadbeat feedforward compensation without convex optimization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 466-474, 2015.

