

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

以光碟讀取頭為基礎之加速規設計與特性研究

The Design and Characteristic Research of a

Pick-up-head-based Accelerometer

研究生：簡日韋

指導教授：洪紹剛 博士

中華民國九十九年六月

以光碟讀取頭為基礎之加速規設計與特性研究

The Design and Characteristic Research of a
Pick-up-head-based Accelerometer

研究生：簡日韋

Student：Jih-Wei Chieh

指導教授：洪紹剛

Advisor：Shao-Kang Hung

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Mechanical Engineering

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

以光碟讀取頭為基礎之加速規設計與特性研究

學生：簡日章

指導教授：洪紹剛

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘要

本論文研究目標為以市售的光碟讀取頭為基礎建構加速規。利用光碟讀取頭中的像散感測裝置建構位移感測器，並利用懸吊金屬絲與物鏡組成彈簧質量系統，結合兩者完成加速規的設計。最後使用低通濾波器來提升加速規的操作頻寬。

為了轉換光碟讀取頭具有加速規的功能，本論文中設計了用來架設光碟讀取頭的基座部分與操作光碟讀取頭的電路。為了研究所設計之加速規具有的特性，本論文實際製作以光碟讀取頭為基礎的加速規。特性研究的實驗包含位移感測機制的操作型態、彈簧質量系統的共振頻率、加速規的敏感度與操作頻寬，最後利用低通濾波器提升加速規的操作頻寬。

經過實驗後可知本論文所研究之加速規具備良好的線性度與高敏感度，敏感度為 117V/g ，操作頻寬為 30Hz 。

The Design and Characteristic Research of a Pick-up-head-based Accelerometer

student : Jih-Wei Chieh

Advisors : Dr. Shao-Kang Hung

Department (Institute) of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This thesis presents an accelerometer based on a commercial CD/DVD pick-up-head. The CD/DVD pick-up-head astigmatic mechanism is used as a displacement sensor, and its suspending wires and the objective lens are utilized as the spring-mass system to construct an accelerometer. Furthermore, the operating frequency of accelerometer is extended by adopting a low-pass filter.

In order to transform a CD/DVD pick-up-head into an accelerometer, the base frame and the circuit which is used to operate CD/DVD pick-up-head are designed in this thesis. A CD/DVD pick-up-head-based accelerometer is built to research its characteristics. The experiment of characteristics include operating condition of displacement sensor, spectrum of spring-mass system, the sensitivity and operating frequency of accelerometer. The influence of low-pass filter is also analyzed, too.

The experiments demonstrate that this cost-effective accelerometer has an excellent linearity, an ultra high sensitivity of 117 V/g, and an operating frequency of 30 Hz.

誌謝

兩年的碩士生活中經歷了許多不同的挑戰，在過程中學到了寶貴的經驗，在此獻上最深的感謝給每一位幫助過我的人。

能夠完成碩士學位最感謝的是指導教授洪紹剛老師，老師對待研究嚴謹的態度、對各種不同研究領域淵博的知識與指導學生們的親和力讓我受益良多，也因老師給的機會讓我能夠見識並參與國際級的研討會，增廣了我的視野。感謝口試委員呂宗熙教授與陳美勇教授對研究論文的指教，使我的研究能夠更嚴謹與完善。感謝秦繼華教授在我初入機械領域的時候給予我學習的機會。

精密機電工程實驗室第一屆的同學們，建宇哥在電路製作方面給予莫大的幫助，感謝佑麒在控制軟體與輔助軟體上的幫助，感謝菘哥在各種領域上給的方向。兩年的時光與你們一起生活，一起做研究，一起玩樂，讓我過了充實的兩年研究生生活。實驗室的學弟喬華、立岡、杰緯與盧奕，在你們加入之後實驗室確實熱鬧了許多，希望你們都能夠在研究上進行的順利。機械系的同學們炫和、駱哥、伯儒、富明、毛毛，感謝你們在我遇到各種不同問題時給的幫助。感謝運管系黃仲平、陳聖霖、江奉融在統計上的協助。感謝老朋友雷惟能在電子電路方面的協助，在同個屋簷下生活了六年，終於要跟你說再見了。感謝機械系與運管系系的大家，讓我在課業之餘能夠享受踢足球的樂趣。在新加坡參加研討會期間特別感謝 Queena 姐全家提供我住宿與在當地生活的資訊，願上帝祝福你們。

感謝父親與母親在人生的路上陪我走到現在，並給我無後顧之憂的學習環境，願你們身體健康。

最後將榮耀歸給愛我們的天父。

2010 年 7 月
簡日韋

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iv
圖目錄.....	v
表目錄.....	vi
一、 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.2.1 加速規沿革.....	2
1.2.2 光碟讀取頭的應用.....	8
1.3 本研究之目標.....	11
二、 預備知識.....	12
2.1 加速規原理.....	12
2.2 光碟讀取頭.....	18
2.3 振動量測.....	23
三、 加速規設計.....	26
3.1 加速規架構.....	26
3.1.1 彈簧質量系統.....	26
3.1.2 位移感測機制.....	30
3.2 電路設計.....	31
3.3 軟體.....	33
3.4 加速規實體與操作流程.....	34
四、 實驗.....	36
4.1 加速規測試系統.....	36
4.2 S 曲線界定.....	39
4.3 共振頻率量測.....	43
4.4 敏感度分析.....	45
4.5 操作頻寬界定.....	47
4.6 提升操作頻寬.....	49
4.7 雜訊量測.....	54
4.8 加速規使用正規化.....	56
五、 結論與展望.....	61
六、 參考文獻.....	63

圖目錄

圖 1.2.1	微機電系統電容感應式加速規[5]	3
圖 1.2.2	壓電感應式加速規壓縮型與截斷型結構[6]	4
圖 1.2.3	壓電感應式加速規[7]	4
圖 1.2.4	以光纖為基礎之加速規[9]	5
圖 1.2.5	以差動光學感測法建構之加速規[11]	6
圖 1.2.6	差動光學感測法示意圖	6
圖 1.2.7	雙軸向角度感測器[12]	7
圖 1.2.8	加速規中常見的彈簧質量系統	7
圖 1.2.9	以光碟讀取頭來做物體表面的段差掃描[16]	9
圖 1.2.10	以光碟讀取頭建構之原子力顯微鏡[17]	9
圖 1.2.11	以光碟讀取頭外加彈簧質量系統所組成之三軸加速規[20]	10
圖 2.1.1	加速規原理示意圖	12
圖 2.1.2	加速規運作狀態	13
圖 2.1.3	加速規結構圖之等效系統	14
圖 2.1.4	不同阻尼比對共振放大比的影響	16
圖 2.1.5	正確加速規訊號接地方式[6]	17
圖 2.2.1	光碟讀取頭之外觀	18
圖 2.2.2	光碟讀取頭雷射光路結構圖	19
圖 2.2.3	像散現象示意圖	20
圖 2.2.4	四象限光學感測與 S 曲線示意圖	21
圖 2.2.5	光碟讀取頭中的音圈馬達	23
圖 2.3.1	振動之各種型態[6]	24
圖 2.3.2	衝擊感測器結構[6]	25
圖 2.3.3	衝擊感測器與一般加速規比較[6]	25
圖 3.1.1	以音圈馬達與物鏡組成之彈簧質量系統	27
圖 3.1.2	光碟讀取頭線圈繞組與物鏡(質量塊)與細金屬絲(彈簧)	28
圖 3.1.3	懸臂樑繞度分析	29
圖 3.1.4	光碟讀取頭之雷射二極體電路	31
圖 3.2.1	操作電路實體圖	31
圖 3.2.2	雷射二極體操作電路圖	32
圖 3.2.3	FES 計算電路	33
圖 3.4.1	加速規架設	34
圖 3.4.2	加速規系統實體	34
圖 3.4.3	加速規系統關係圖	35
圖 4.1.1	壓電式奈米定位器實體	36

圖 4.1.2	加速規與壓電式奈米定位器架設.....	38
圖 4.1.3	實驗設備架構.....	38
圖 4.2.1	雷射光源 DVD 與 CD 之 S 曲線.....	40
圖 4.2.2	不適用之 S 曲線.....	42
圖 4.2.3	比較不同反射鏡面之 S 曲線.....	43
圖 4.3.1	共振頻率量測所使用之 S 曲線.....	44
圖 4.3.2	共振影響之頻譜.....	44
圖 4.4.1	加速規敏感度與操作頻寬測試之 S 曲線.....	46
圖 4.4.2	敏感度分析實驗.....	46
圖 4.5.1	操作頻寬實驗.....	47
圖 4.5.2	加速規彈簧質量系統之阻尼比.....	48
圖 4.6.1	不同截止頻率之濾波效果比較.....	50
圖 4.6.2	截止頻率為 70Hz 之低通濾波器效能.....	51
圖 4.6.3	加裝低通濾波後壓抑共振之效果.....	51
圖 4.6.4	濾波後敏感度差異.....	52
圖 4.6.5	裝設低通濾波器後之操作頻寬實驗.....	53
圖 4.6.6	加速規於高頻區域的放大比.....	54
圖 4.7.1	加速規之雜訊量測.....	55
圖 4.8.1	不同光碟讀取頭建構出的 S 曲線.....	57
圖 4.8.2	不同 S 曲線下不使用濾波器的敏感度比較.....	58
圖 4.8.3	不同 S 曲線下使用濾波器的敏感度比較.....	59
圖 4.8.4	光碟讀取頭 B 經調整訊號後與由光碟讀取頭 A 所建構的敏感度比較.....	60

表目錄

表 1	TOP1100S 型光碟讀取頭雷射二極體基本資料[20].....	19
表 2	光碟讀取頭中的音圈馬達資本資料[22].....	22
表 3	雜訊實驗統計結果.....	56

一、緒論

1.1 研究動機

加速規(accelerometer)是一種慣性運動感測器，其功能為利用內建的彈簧質量系統(spring-mass system)在受到加速度時，其質量塊產生與基座間之位移或角度變化來感測基座所受到的加速度值。加速規在日常生活中有著廣泛的應用，像是在全球定位系統(global positioning system, GPS)的應用上，當衛星訊號因為高樓、地形或氣候的影響暫時接收不到時，裝設在車輛上的加速規就能夠協助計算出車輛移動的距離以修正定位。另外像是任天堂公司所研發的電視遊樂器 Wii，也使用了三軸向的加速規來感測使用者的動作，並於遊戲中模擬出各種相對的反應。常見的還有以微機電系統(microelectro-mechanical systems, MEMS)開發的加速規使用於現代汽車的安全氣囊系統上，以偵測碰撞發生時車輛突然的加速度變化，判斷是否該啟動安全氣囊[1-2]。在先進的武器系統中，中長程型飛彈的導航上也於飛彈本身搭載了加速規與陀螺儀，用以修正飛彈路徑以提高射擊的準確性[3]。

在建構一個加速規時，用來偵測質量塊運動的位移感測機制是其中一個必備的部份，其具備的靈敏度是影響加速規性能的重要條件。靈敏度為將加速度值轉換成輸出電壓訊號的比例，高靈敏度表示同樣的加速度值能夠以更高的電壓訊號輸出，由於輸出的電壓訊號受到雜訊的限制不可能偵測到無限小的訊號，因此高

靈敏度也代表能偵測到更小的加速度值。目前已知能夠量測位移變化的方式種類繁多，例如電容式、壓電感應式與應變規等等，在考慮低成本與高效能的前提下，發現在一般光碟讀取頭中具備了一套合適的光學式位移感測機制，並且已經被應用到各種不同的領域達到不錯的效果，因此在本論文中嘗試以光碟讀取頭為主體設計出一套單軸向具備高靈敏度與價格低廉的加速規。

1.2 文獻回顧

1.2.1 加速規沿革

關於加速規的研究與改良，主要可以分成兩大部分：位移感測機制與彈簧質量系統，兩者的性能都會影響到加速規的解析度與靈敏度。

加速規中的位移感測機制依照其量測範圍、精密度、操作頻率範圍、使用溫度範圍與測量物的重量等條件，可以選擇不同的位移感測機制來達到目的。目前有各種不同類型的感測機制可供使用，市售的加速規也常以感測機制的不同作為區別。應用於加速規的位移感測機制之研究，國內外諸多學者提出了許多種不同的研究成果。常見的方式例如電容感應式，相關的研究有 Huilai[4]等學者利用互補金屬氧化半導體(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)建構出一套單軸向的加速規，以質量塊與基座之間電容值的改變量來量測位移值。Rogers[5]等人利用印刷電路(printed circuit processing techniques)的製程方式建構出一套微機電系統(microelectro mechanical systems, MEMS)之電容感應式的加速規，其結

構圖如圖 1.2.1 所示。電容感應式最大的優點在於低耗電與小體積，缺點則在於易受到電磁干擾。

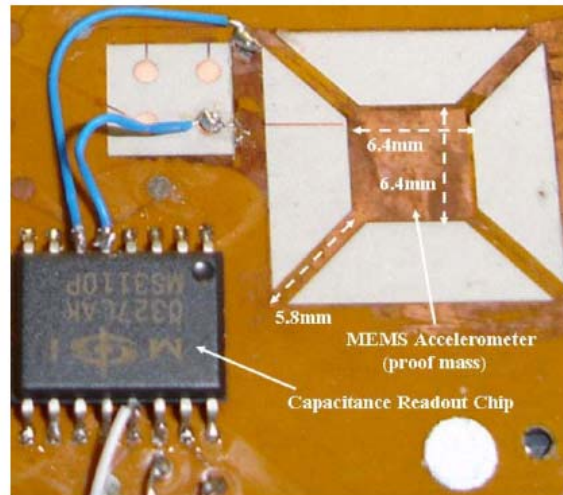


圖 1.2.1 微機電系統電容感應式加速規[5]

另一種常見方式為採用壓電感測方式來測量質量塊與基底間距離的變化，壓電感應式的加速規依照構造可以分成壓縮型與截斷型兩種類型[6]，一般在使用上的特徵為壓縮型具備較大的加速度量測範圍，但容易受焦電效應(pyroelectric effect)影響，而截斷型因為操作溫度比較低，因此較不受焦電效應的影響，壓縮型與截斷型結構如圖 1.2.2 所示。

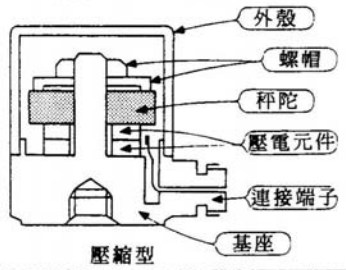
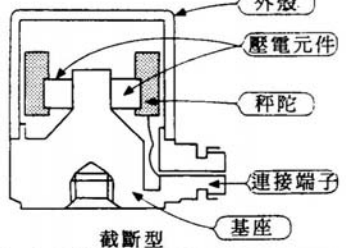
	構造	特徵
壓電型		<ul style="list-style-type: none"> ● 構造簡單，可用於大加速度之測定。 ● 壓縮型在溫度急劇變化時，相對的輸出也會跟著變（易受焦電效應影響） ● 小型 <ul style="list-style-type: none"> 加速度：~ 1000G 頻率：2~ 10,000Hz 溫度：- 50~ 200°C 重量：10~ 100g
		<ul style="list-style-type: none"> ● 是為高感度型，由於接著劑之使用，在高溫時感度弱。 ● 截斷型有較不受焦電效應影響的特點。 ● 小型 <ul style="list-style-type: none"> 加速度：~ 400G 頻率：1~ 8,000Hz 溫度：- 50~ 160°C 重量：10~ 100g

圖 1.2.2 壓電感應式加速規壓縮型與截斷型結構[6]

壓電式的位移感測機制比較其他類型的優點在於結構設計簡單與訊號易於擷取，缺點在於敏感度低與易受溫度的影響。相關研究如 Scheeper[7-8]等學者將壓電材料裝置在彈簧質量系統的彈簧上，當彈簧因為質量塊的移動而產生形變時，利用壓電材料的正壓電效應偵測形變量，成功建構出一套加速規，如圖 1.2.3 所示。

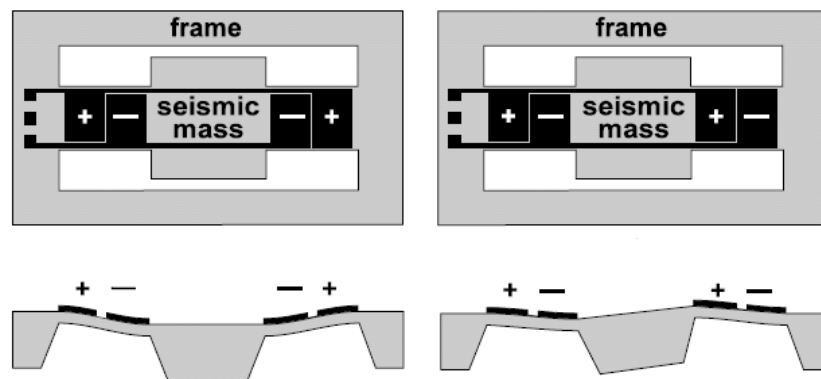
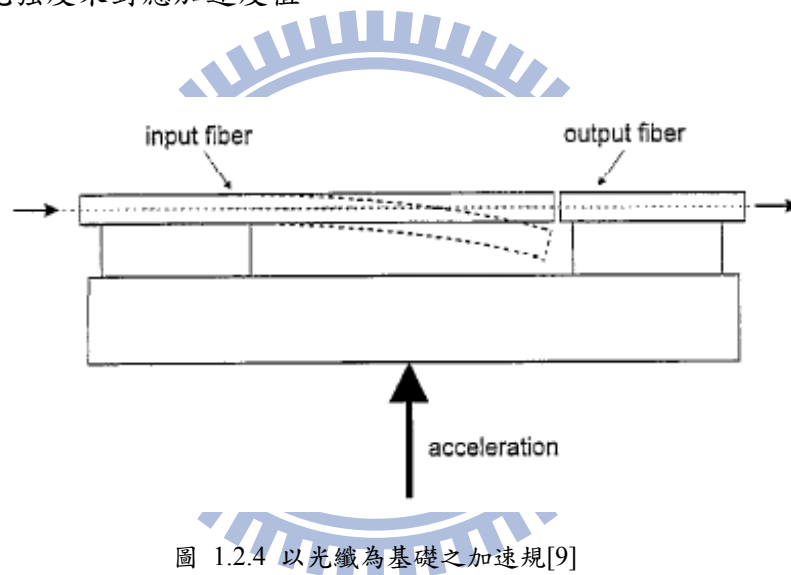


圖 1.2.3 壓電感應式加速規[7]

光學感測的方式在使用上能夠避免掉以上兩種方式的缺點，達到高解析度與精準度且可量測的頻率較高，缺點在於光訊號的處理與分析較上述兩種為困難。相關的研究如 Kalenik[9]等學者利用光纖建構出一個單軸向的加速規，結構圖如圖 1.2.4 所示。設計方式為利用光纖的管束製作成一個懸臂樑，將光從左側打入通過懸臂樑光纖，最後再量測通過右側固定端光纖管束光的強度。當懸臂樑光纖因加速度產生彎曲時，所接收到光的強度也會跟著減弱，因此可以利用通過固定光纖管束的光強度來對應加速度值。



Bochobza-Degani[10-11]等學者利用差動光學感測法(modulated integrative differential optical sensing, MIDOS)建構加速規，以 MEMS 製成的彈簧質量系統架設於 CMOS 晶片上，並將發光二極體(light emitting diode, LED)光照射於質量塊上，偵測在質量塊因加速度產生移動時位於質量塊下的光感測器之變化而得到加速度值，加速規之架構如圖 1.2.5 所示，MIDOS 之示意圖如圖 1.2.6 所示。

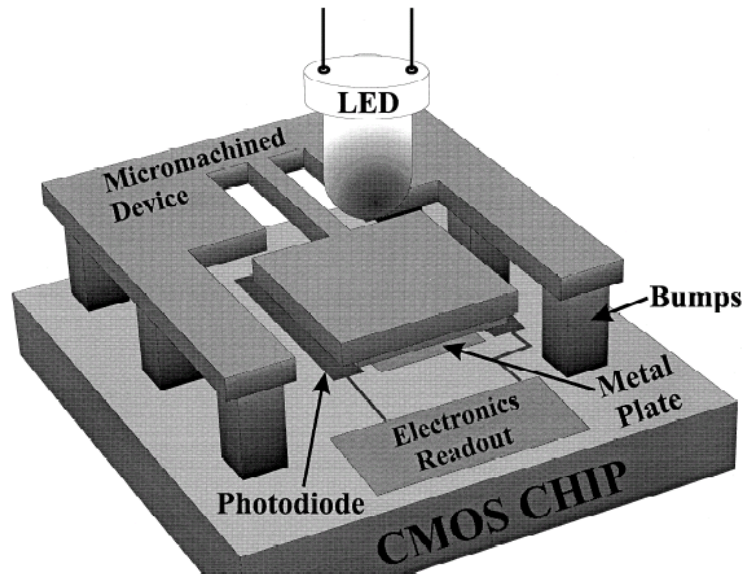


圖 1.2.5 以差動光學感測法建構之加速規[11]

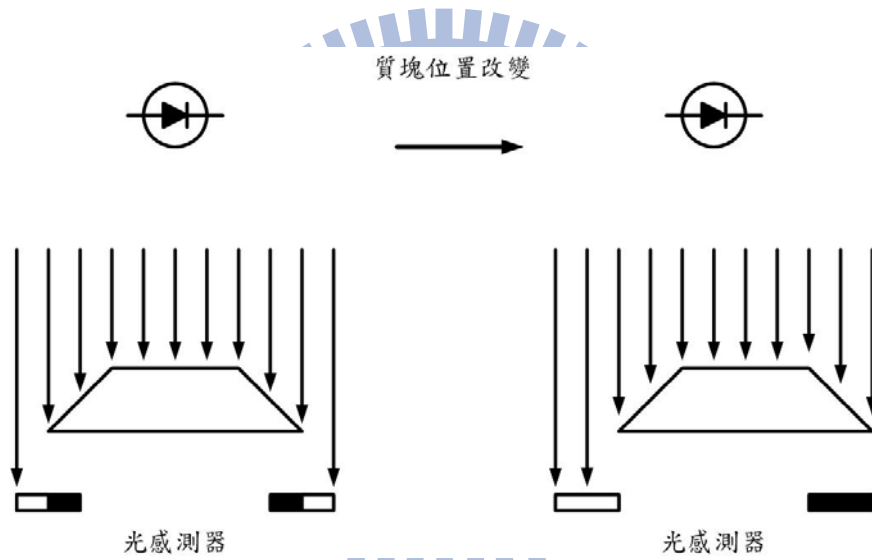


圖 1.2.6 差動光學感測法示意圖

Fang[12]等學者將雷射光透過 L 型反射鏡面，利用 L 型反射鏡面轉動時入射角度變化造成最後反射光線射出位置的不同發展出雙軸向的角度感測器，其角度量測的範圍為 ± 35 度，誤差小於 ± 0.01 度，角度感測器示意圖如圖 1.2.7 所示。

Fang[13]利用相同的技術，偵測受到加速度時質量塊角度的變化來建構一套雙軸向加速規，量測範圍可達 $177g(9.8m/s^2)$ ，誤差小於 $\pm 0.1g(9.8m/s^2)$ 。

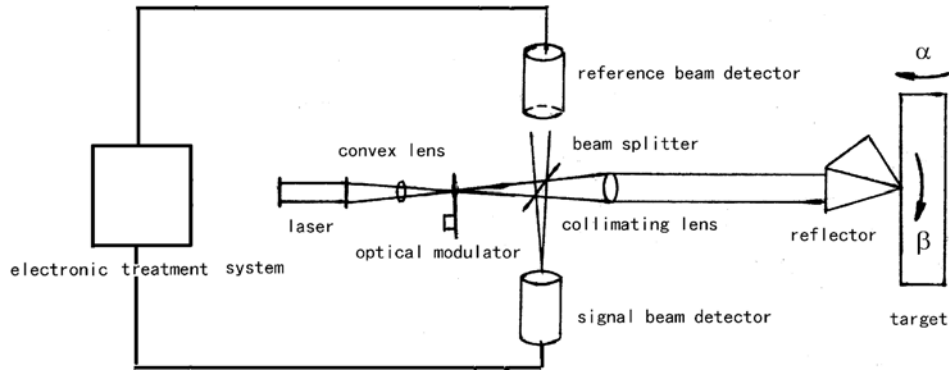


圖 1.2.7 雙軸向角度感測器[12]

除了上述所提的之外，電阻或電磁等可以量測質量塊與基底之間位移變化的方式[14]，都是能夠應用在加速規上的技術。

加速規中所使用的彈簧質量系統就彈簧與質量塊之間的位置關係可以區分成以下三種類型：彈簧與質量塊成懸臂樑型[9-11]、彈簧分布於質量塊四周的雙邊或多邊固定型[7-8]與彈簧壓縮型[6]，簡易結構分別如圖 1.2.8 所示。前兩種類型結構的優點在於在加工時易於將質量塊與彈簧一體成形製成，特別在 MEMS 的加速規中常使用，而且較易於量測質量塊的移動與導引質量塊呈線性移動，在運動分析上皆可簡化成彈簧、阻尼與質量系統來分析。

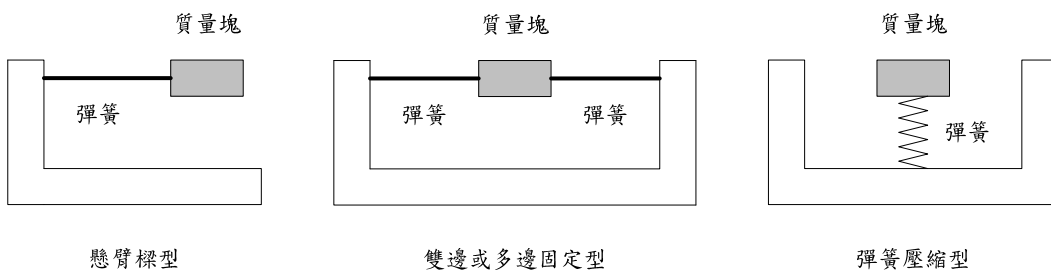


圖 1.2.8 加速規中常見的彈簧質量系統

加速規中彈簧質量系統的建構依照使用的條件、位移感測機制或是體積大小的不同而在配置上有許多不同種的變化，在分析時首要關注的地方在於此彈簧質量系統的共振頻率與阻尼值，這兩個數值影響到彈簧質量系統在不同頻率下所受到的響應[15]，進而影響到加速規的操作頻寬。

1.2.2 光碟讀取頭的應用

光碟(compact disc, CD)與數位多功能光碟(digital versatile disc, DVD)的使用在現代的社會中已經是非常的普及，光碟讀取頭的製作也是一項成熟的技術。在光碟讀取頭中具有一套精密的位移感測機制來協助光碟讀取頭做對焦與尋軌的動作，並且因著光碟讀取頭價格便宜且解析度高的特性，目前在許多的研究中選擇應用其內建的光學式位移感測機制來當作量測工具。

Fan[16]等學者應用光碟讀取頭來做物體表面的段差掃描，藉由光碟讀取頭的位移感測機制回傳的訊號控制物鏡保持在對焦的狀態，如此偵測物鏡所對焦的物體表面型態的變化，在數百微米的範圍內呈現高度的線性關係，具有 200 μm 的量測範圍，解析度可達 0.2 μm ，其成果如圖 1.2.9 所示。

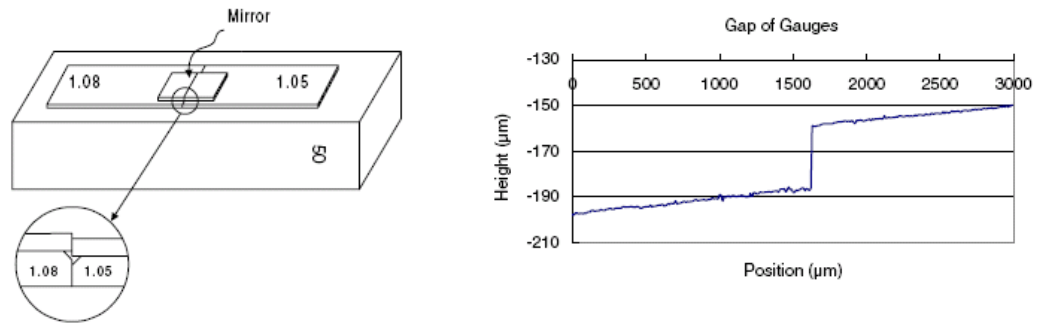


圖 1.2.9 以光碟讀取頭來做物體表面的段差掃描[16]

光碟讀取頭也被應用在原子力顯微鏡中，Hung[17]將光碟讀取頭的物鏡固定後使雷射光束聚焦於探針的背面，藉由光碟讀取頭內部的位移感測機制量測出探針的撓曲程度進而推算出探針所偵測物體表面型態的變化，並利用光碟讀取頭質量輕的優勢完成掃針型原子力顯微鏡。其結構如圖 1.2.10 所示，此種新型的原子力顯微鏡系統樣本為完全靜止狀態，也不會產生偽撓曲(false deflection)的現象。

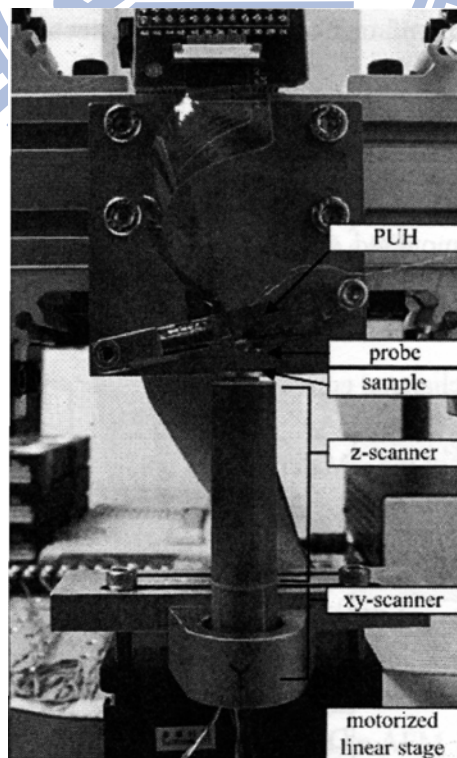


圖 1.2.10 以光碟讀取頭建構之原子力顯微鏡[17]

Armstrong[18]等人以光碟讀取頭為基礎，發展出一套低成本的自動視準儀 (autocollimator)，將其中的聚焦物鏡移除使雷射光直接進入四象限感測器，再將四象限感測器分成左右各成一組或上下各成一組兩種型態，利用雷射光點照射於四象限感測器上的強度大小偵測出兩垂直方向的角度變化，量測範圍為 $1200\mu\text{rad}$ ，解析度為 $\pm 0.006\mu\text{rad}$ 。

另外朱志良[19]學者等人將讀取頭內部加以改造，利用自行設計的彈簧質量系統結合讀取頭內部的光學位移感測機制成功建構出單軸加速規，其後又對彈簧質量系統作出改良並結合多個光碟讀取頭，建構出可以量測三個軸向的加速規 [20]，其架構如圖 1.2.11 所示。這些研究都證明了光碟讀取頭具備了一個低成本且精準的位移感測機制。

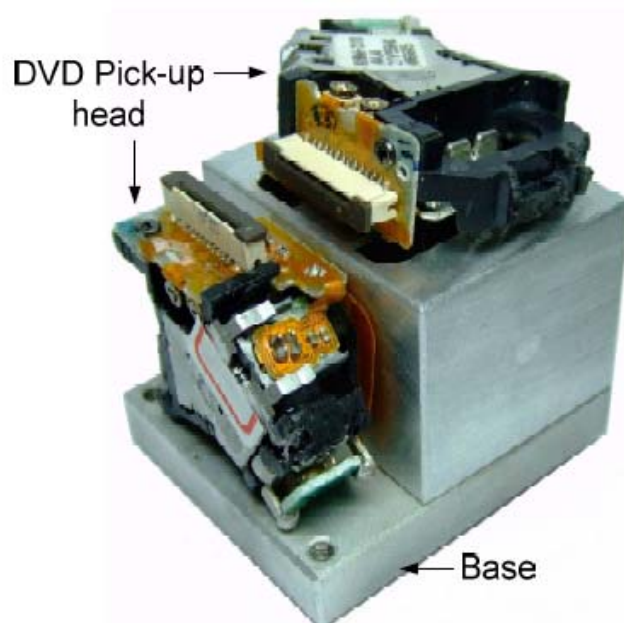


圖 1.2.11 以光碟讀取頭外加彈簧質量系統所組成之三軸加速規[20]

1.3 本研究之目標

本研究的目標為利用光碟讀取頭為基礎建構出可操作的加速規，在結構的設計上希望不改變光碟讀取頭內部的結構，也不另外加裝彈簧質量系統達到設計的簡單化與降低成本，完全利用光碟讀取頭內部現有的組件來完成加速規所需要的位移感測機制與彈簧質量系統建構。

利用光碟讀取頭的工作型態評估，預期所建構出的加速規具有量測低頻率且在 $1g$ 以下加速度值的功能。能夠使用在量測載具正常行駛時產生的加速度，偵測這類型的加速度變化可應用於 GPS 等定位系統的校正上。或是偵測車輛在受到撞擊時產生的加速度以當作其他裝置的觸發訊號。另外像是利用加速規來量測工作區的人員走動產生的樓地板振動，其產生的 $1\sim 3\text{Hz}$ 加速度變化[20]在精密量測時可能造成誤差產生，量測振動訊號以輔助系統校正也是加速規被廣泛應用的一門領域[21]。

要能夠量測此類微小加速度的加速規會需要高靈敏度與精確的彈簧質量系統與位移感測機制，市面上像是壓電感應式、電容感應式的加速規在製造上的技術需求高，容易受到環境因素(溫度、濕度、電磁波等)干擾，其價格也是相當昂貴。因此本研究希望能利用光碟讀取頭為基礎建構出一套具備高敏感度、高解析度、不易受環境因素影響、適用於低頻率且價格低廉之加速規。

二、 預備知識

在本章節中首先探討加速規內部的機械結構，以了解在設計加速規所需考量的因素。其次介紹於本研究中所使用的光碟讀取頭的構造，以了解在建構加速規時能運用的組件。

2.1 加速規原理

加速規的設計原理為利用彈簧質量系統受到加速度的時候，當此彈簧質量系統受到的加速度對質量塊產生的施力與彈簧的拉伸力平衡時，質量塊與基座之間的距離便會因為加速度的大小而有所改變。因此只要能夠偵測出此彈簧質量系統中質量塊與基座之間距離的變化，就能夠推論出彈簧質量系統所受到的加速度值，如圖 2.1.1 所示。

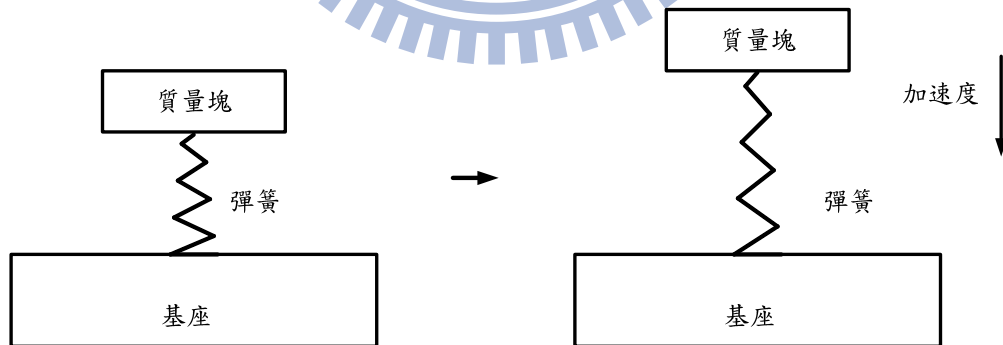


圖 2.1.1 加速規原理示意圖

本研究中所使用的彈簧質量系統為雙懸臂樑型，屬於之前提到的雙邊或多邊固定型的一種，此設計有利於導引質量塊呈線性移動並防止旋轉。位移感測機制

裝設於質量塊上以測量質量塊與基座之位移變化，此系統之運作如圖 2.1.2 所示。加速規所受到的加速度值在實驗中以基座的正弦波振動來產生，利用對基座位移運動方程式進行兩次微分後可得到彈簧質量系統所受到的加速度值，此加速度值同時受到振幅與頻率的影響。基座的振動將會產生加速度帶動其上的彈簧質量系統也產生正弦波之振動，兩振動弦波之間頻率相等且可能具有相位角差。

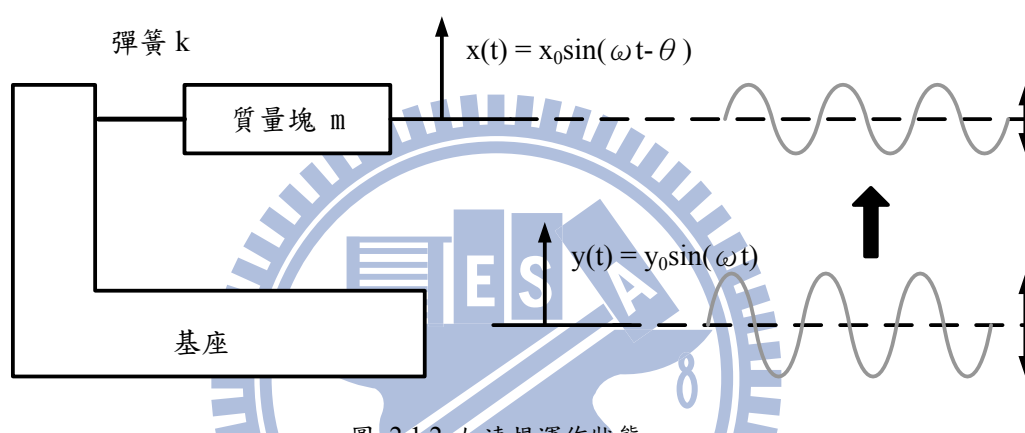


圖 2.1.2 加速規運作狀態

$x(t)$ ：質量塊位移

x_0 ：質量塊振幅

$y(t)$ ：基座位移

y_0 ：基座振幅

θ ：相位角差

為了描述上述彈簧質量系統的運動方式，在不考慮彈簧的質量下將其簡化成如圖 2.1.3 的等效彈簧阻尼系統：

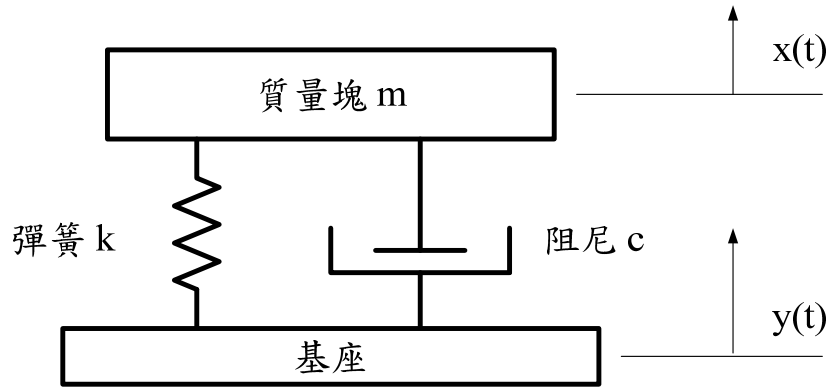


圖 2.1.3 加速規結構圖之等效系統

$x(t)$ ：質量塊位移

$y(t)$ ：基座位移

k ：彈性係數

c ：阻尼係數

m ：質量塊之質量

此系統的運動方程式可用方程式(2-1)來描述。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky - mg + F_{vcm} \quad (2-1)$$

在操作此系統前需要使用音圈馬達(voice coil motor, VCM)施力調整質量塊至位移感測機制量測範圍中。定義 VCM 施力為 F_{vcm} ， F_{vcm} 與重力造成質量塊與基座間產生位移量 z_0 其值為 $(F_{vcm} - mg) / k$ ，此施力將會造成質量塊初始位置的變動，但不影響加速度造成質量塊的位移變動量。

接下來定義代表質量塊與基底間距離的方程式 $z(t)$ 為 $x(t) - y(t) - z_0$ 帶入，並假設基座的運動方程式 $y(t) = y_0 \sin(\omega t)$ ， ω 為其激振頻率，可得到方程式(2-2)

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = m\omega^2 y_0 \sin(\omega t) \quad (2-2)$$

求解方程式(2-2)後可得到 $z(t)$ 的運動方程式(2-3)

$$z(t) = \frac{\omega^2 y_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_n\omega)^2}} \sin\left\{\omega t + \left[-\tan^{-1} \frac{2\xi\omega_n\omega}{(\omega_n^2 - \omega^2)}\right]\right\}$$

其中

(2-3)

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

$$\xi = c / 2\sqrt{k/m}$$

對方程式(2-3)左右各乘 ω_n^2 可得到方程式(2-4)

$$\omega_n^2 z(t) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \omega^2 y_0 \sin(\omega t - \theta)$$

(2-4)

其中

$$r = \omega / \omega_n$$

θ 值為質量塊運動的相位角差，在只考慮振幅的情況下可暫時忽略，方程式

(2-4)中 $\frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$ 為質量塊振幅在不同的操作頻率下由共振現象所帶來

的放大比。只考慮質量塊與基座振幅的情況下，方程式(2-4)可簡化成方程式(2-5)

$$\omega_n^2 z(t) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \omega^2 y_0 \sin(\omega t)$$

(2-5)

$\omega^2 y_0 \sin(\omega t)$ 即為加速規受到之加速度值， ω_n 可由彈簧質量系統的特性取得且

為定值，共振所帶來的放大比可藉由阻尼比來估算在操作頻率下的值，並藉由實

驗驗證之， $\omega_n^2 z(t)$ 則為質量塊因加速度產生與基座之間位移的變化，可利用位移

感測器量測之。故利用方程式(2-5)的關係得知，可以藉由偵測出基座與質量塊的

相對位移量推算出相對應之加速度值。

共振頻率之外另一個影響放大比的因素為彈簧質量系統的阻尼比，放大比在不同的阻尼比下與 r 值的關係曲線如圖 2.1.4 所示。

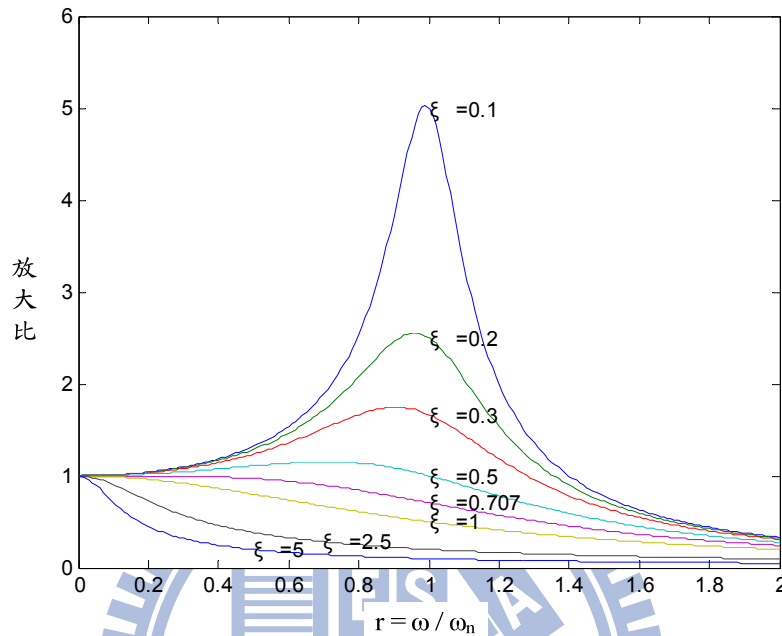


圖 2.1.4 不同阻尼比對共振放大比的影響

由圖 2.1.4 可知當加速規的彈簧質量系統的阻尼比越低的時候，共振所帶來的影響程度會越明顯，在低阻尼比($\zeta=0.1$)的情況時放大比在 $r = 0.2$ 之後偏離 1 超過 4%，而加速規在使用上會希望盡可能不受共振的影響，因此在低阻尼比的情況下預估可供操作的頻率為共振頻率的 20%。當阻尼比增加時則會使放大比極大值所在的 r 值減小，直到臨界阻尼 $\zeta=0.707$ 時放大比極大值所在的頻率為共振頻率的 65%，此時可供操作的頻率也大概是共振頻率的 65%。當阻尼比大於臨界阻尼時，放大比在頻率增加時則是會快速的下降。因此從加速規的共振頻率與阻尼比可以估算出其可操作的頻率範圍。

加速規在使用的時候有幾個注意事項，首先是加速規本身的質量與待測物體

質量的比例，待測物體在加裝加速規後整體質量的變化會影響到共振頻率，被帶動的質量也變成兩者之總和，造成待測物體的運動模式產生變化。因此加速規與待測物體之間質量的關係需要特別注意，選用相較於待測物體越輕的加速規越不會影響待測物體原本的運作模式。

加速規在安裝的時候也有以下幾點需要注意的事項：

(1) 安裝的方向性：加速規中的彈簧質量系統的感受度會隨著與加速度方向之間不同的角度而有強弱的不同，因此在裝設時待測的加速度方向應該盡量與彈簧質量系統一致。

(2) 電纜線：電纜線宜架設固定以避免拉扯力造成干擾，傳輸線的種類宜使用同軸電纜線降低雜訊的干擾。

(3) 訊號接地的方式：加速規的位移感測機制、訊號放大器與輸出訊號接收器的接地方式宜以多點連接，因為在接地的各點之間會有電流通過造成誤差，因此接地宜統一輸出以減少誤差，如圖 2.1.5 所示。

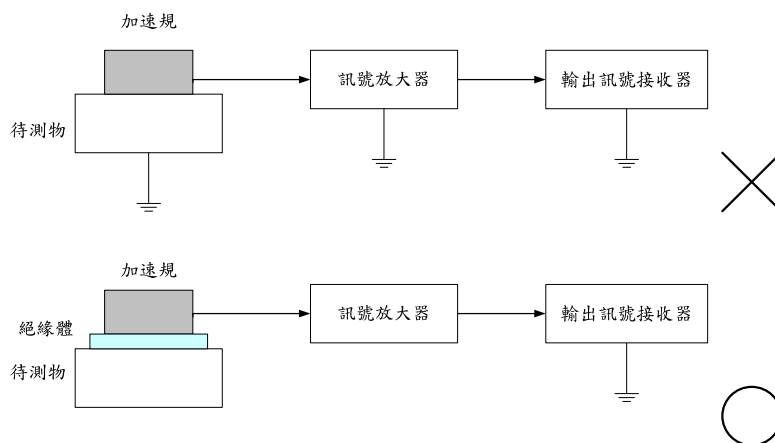


圖 2.1.5 正確加速規訊號接地方式[6]

2.2 光碟讀取頭

本研究中所使用的光碟讀取頭為 TOP1100S, TopRay Technologies[22]，外觀如圖 2.2.1 所示，結構可以區分成以下幾個部份：雷射光源系統、光電感應積體電路(opto-electric integrated circuit, OEIC)、音圈馬達(voice coil motor, VCM)與物鏡，本節分別對於這些部份做介紹：

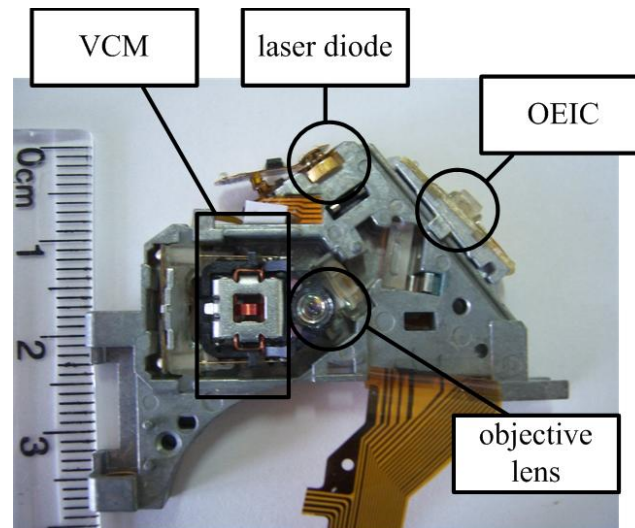


圖 2.2.1 光碟讀取頭之外觀

雷射光源系統：TOP1100S 型可供使用的雷射光源總共有兩種，分別為供 DVD 使用的波長 655 nm 雷射光源與供 CD 使用的波長 790 nm 雷射光源，兩者皆可供使用於位移感測機制，兩雷射光源的基本資料如表 1 所示。

表 1 TOP1100S 型光碟讀取頭雷射二極體基本資料[20]

LASER	DVD	CD
wavelength	655 nm	790 nm
typical power	0.23 W	0.25 W
operating current	82 mA	88.5 mA
operating voltage	2.7 V	2.5 V
OBJECTIVE LENS		
numerical aperture	0.6	0.47
focal length	2.33 mm	2.33 mm
working distance	1.28 mm	0.91 mm

雷射光之路徑如圖 2.2.2 所示，雷射二極體產生出的雷射光束經由光柵產生繞射後經過偏極分光鏡(polarization beam splitter)，透過雙物鏡後雷射光束聚焦在碟片表面上，碟片反射後的雷射光束經由偏極分光鏡反射投影到光感應積體電路，以供偵測物鏡到碟片表面的距離。

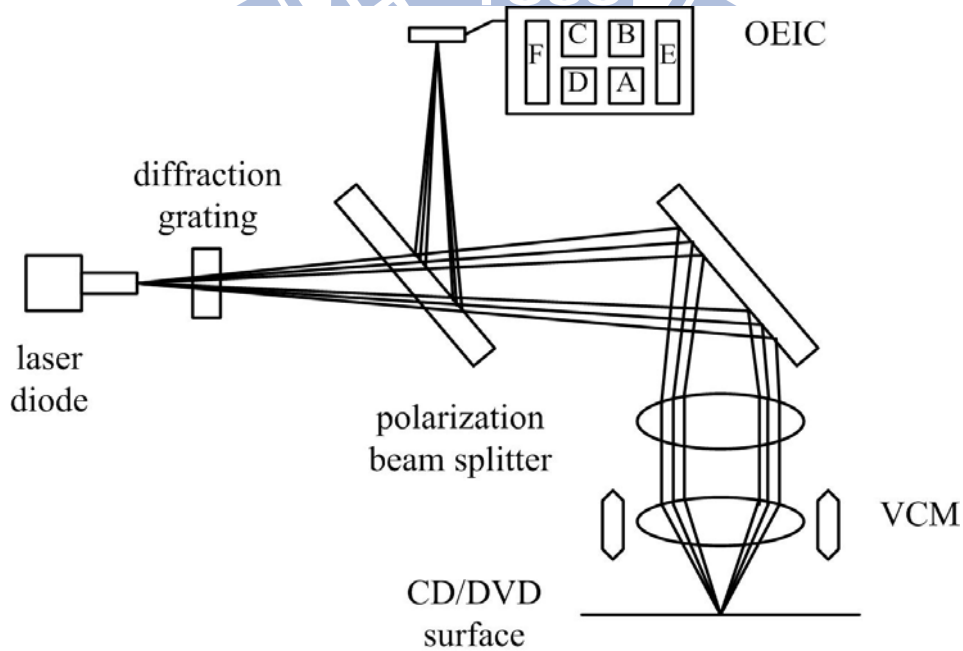


圖 2.2.2 光碟讀取頭雷射光路結構圖

光電感應積體電路(OEIC): 光電感應積體電路的基本原理是將光訊號轉換成電壓訊號，再經由偵測電壓訊號的數值可以得到光訊號的強度。雷射光透過物鏡聚焦於碟片表面，碟片表面反射回來的雷射光經由分光鏡的反射聚焦在光碟讀取頭內建的光電感測器 OEIC 上，如圖 2.2.2 所示。此光電感測器總共被分成 A-F 等六個區塊，其中 E 與 F 的區塊只有在使用 CD 時用來輔助尋軌，A-D 的部份則是使用 CD 或 DVD 對焦所用的區塊，因此在本研究中使用的區塊為 A-D。在使用的時候 A-D 四個區塊會因為所受到照射之雷射光點的大小與亮度分別輸出四組不同的電壓訊號，雷射光點因物鏡與碟片表面距離改變而投影到光電感測器上的形狀會受到雷射光像散的特性影響[23]。雷射光經由透鏡折射後因為折射的角度不同，在(a)到(b)的區域之間光點大小會從橢圓變化成圓形，在此定義聚焦雷射光點為圓形的地方為焦點，過焦點後由圓形變成另一軸向橢圓如圖 2.2.3 所示。

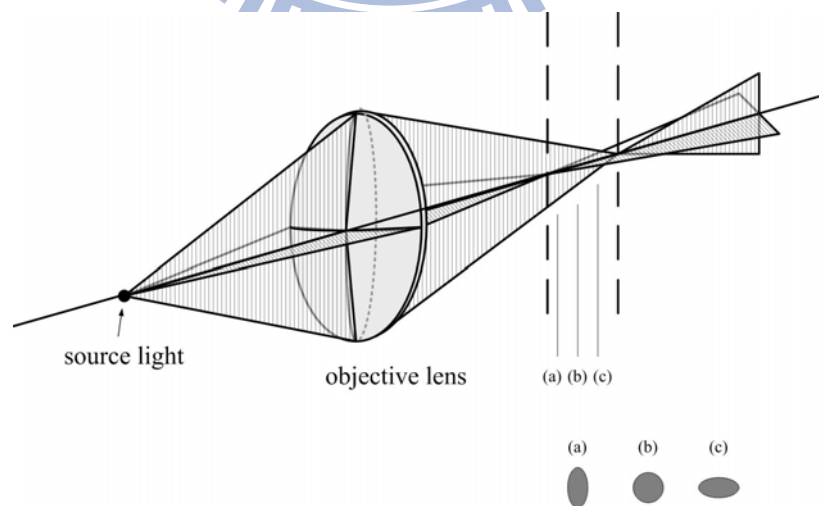


圖 2.2.3 像散現象示意圖

利用四象限的光電感測器量測雷射光點的變化，定義從 A-D 四個光電感測器的輸出電壓訊號為 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D ，接下來對這四個訊號做處理，定義出聚焦誤差訊號(focus error signal, FES) = $(S_A + S_C) - (S_B + S_D)$ ，當光碟讀取頭的物鏡與碟片表面產生位移變化時，FES 與位移變化的關係如圖 2.2.4 所示：

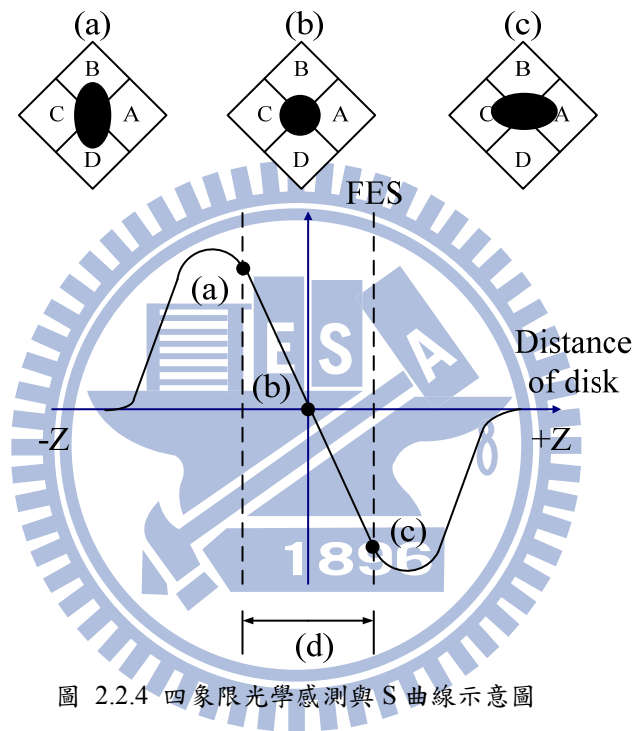


圖 2.2.4 四象限光學感測與 S 曲線示意圖

圖 2.2.4 中的(b)表示光碟讀取頭的物鏡所發射出的雷射光恰好聚焦在碟片的表面，當偏離表面而有上下的位移的時候則如圖 2.2.4 的(a)(c)所示。如圖 2.2.4 下半部所示，這種以 FES 來表示物鏡與碟片表面垂直位移所建構出來的圖形被稱之為 S 曲線(S-curve)。S 曲線焦點附近的 FES 與位移呈現良好的線性關係，如圖 2.2.4 中的(d)區域所示，因此本論文中使用這段 $6\mu\text{m}$ 的區域來建構位移感測機制。在本論文中使用光碟讀取頭中的音圈馬達來帶動光碟讀取頭之物鏡移動以

建構出 S 曲線的特性，並利用其線性區域來量測質量塊的位移。

音圈馬達(VCM)：音圈馬達屬於線性直流馬達的一種，由永久磁鐵與線圈繞組構成，為可利用電壓直接驅動與固定行程特性的致動器。命名的由來是因為其結構與揚聲器相似，原本是應用於收音機的揚聲器中，現在則廣泛的應用在光碟讀取頭用來移動物鏡到光碟片上不同的磁軌讀取資料。音圈馬達的推力與流經線圈繞組的電流成正比，並具有線性控制與高位置敏感度等特性。[24]

光碟讀取頭中的音圈馬達如圖 2.2.5 所示，其基本資料如表 2 所示共有兩個軸向的音圈馬達，其功能在於光碟機在運作的時候碟片可能會產生上下振動或是偏心旋轉等不規則的運動型態，所以需要調整物鏡來使雷射光源能夠保持對焦到碟片上。在光碟讀取頭中就是使用音圈馬達來帶動物鏡進行對焦的動作，並利用另一軸向的音圈馬達來做小距離的尋軌動作，因此光碟讀取頭中內建有兩個軸向的音圈馬達可供應用。

表 2 光碟讀取頭中的音圈馬達資本資料[22]

	DVD	CD
Focusing actuator		
Working range	+1.0mm/-0.55mm or more	+0.55mm/-1.0mm or more
DC resistance of coil	4.5 Ω	
Tracking actuator		
Working range	± 0.4 mm or more	± 0.4 mm or more
DC resistance of coil	4.2 Ω	

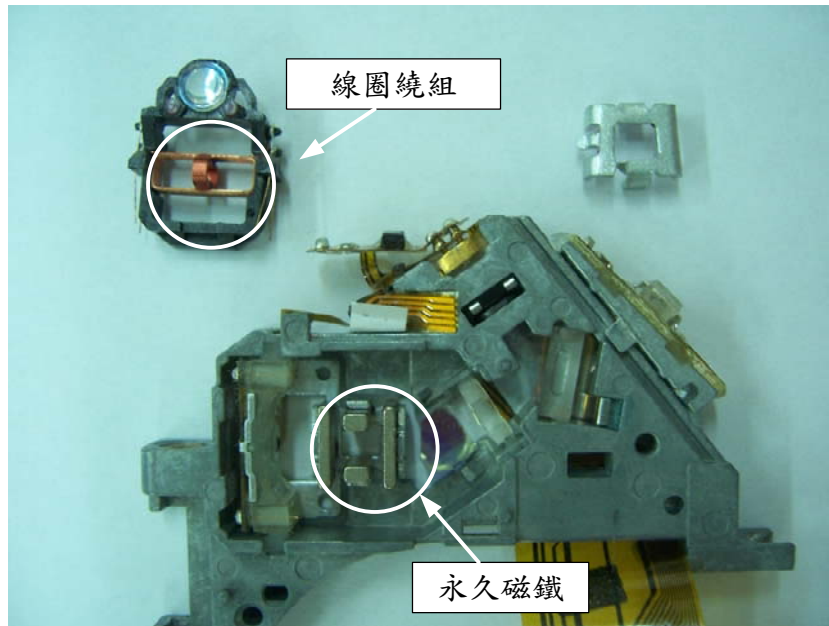


圖 2.2.5 光碟讀取頭中的音圈馬達

2.3 振動量測

由於在研究室中有限的空間中不易有足夠的距離來進行固定加速度值的實驗，因此使用壓電式定位器來產生正弦波形式的振動，再對位移取兩次微分後得到加速度值。振動的定義為位置的改變隨時間變化的一種週期性運動，隨著振動情況的不同，變化程度也會有很大的差異，因此對應不同類型的振動模式量測需要選擇適合的量測工具。由於振動或是衝擊產生時皆會伴隨加速度的產生，因此可以藉由振動感生的加速度值在有限空間中進行加速規的測試。

在此對振動的型態做簡單的介紹，振動的型態可以分成以下幾種，最單純的振動如圖 2.3.1(a)所示，只有單一的基本波產生，例如鐘擺的振盪就屬於這類型。第二種像是活塞運動或是馬達軸承的旋轉振動，這類型的振動對整體的結構有較大的影響，除了基本波以外還會有高階波振動產生如圖 2.3.1(b)。而像是車輛行

走在巔簸路面上時，車輛的振動就混合了多種的振動成分，其振動的型態如圖

2.3.1(c)所示。[6]

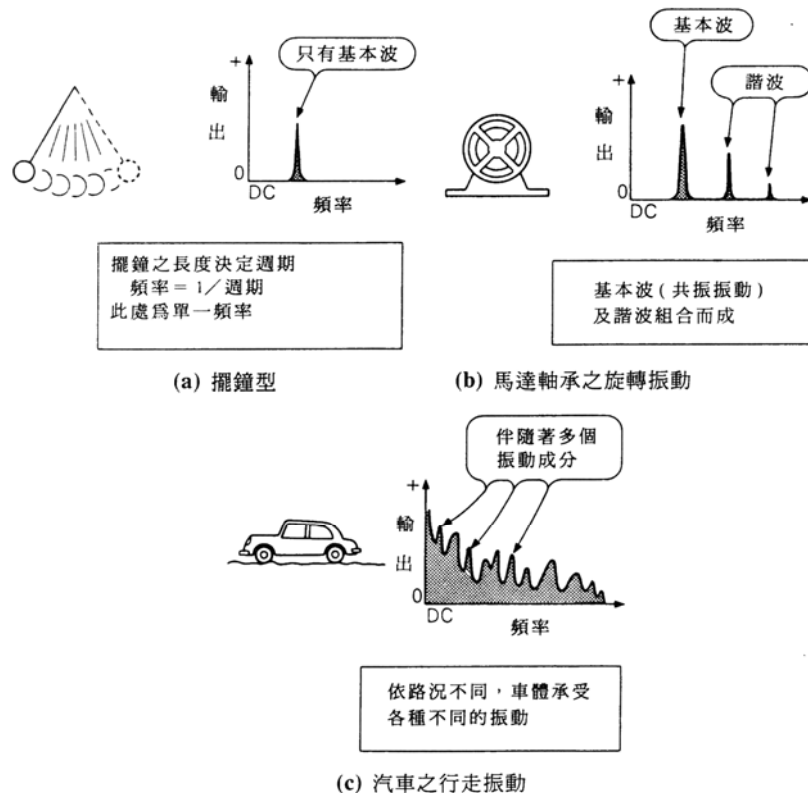


圖 2.3.1 振動之各種型態[6]

振動量測原本是用於產品的檢測或是工業用機器異常監控等，近年來在橋樑及建築物的搖晃振動測試與電車、汽車的搖晃控制等上皆有廣泛的應用。加速規在振動量測上的另一種應用形態為衝擊(shock)感測器，衝擊感測器結構如圖 2.3.2 所示，原理在當振動板直接承受振動(衝擊)波時，壓電材料產生的變形而得到電壓輸出，並可以利用共振板之共振頻率所帶來的影響來達到開關的功能，用來做衝擊波的有無檢驗，實際應用上如汽車的防盜偵測器。

衝擊感測器與一般加速規最大不同在於頻率特性，如圖 2.3.3 所示，加速規在使用上希望在共振頻率之前的放大比越趨近於平坦越好，如此才能夠有較大的頻寬，而衝擊感測器則是依頻率不同輸出特性會有所變化。

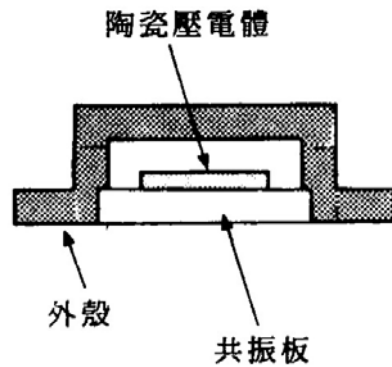


圖 2.3.2 衝擊感測器結構[6]

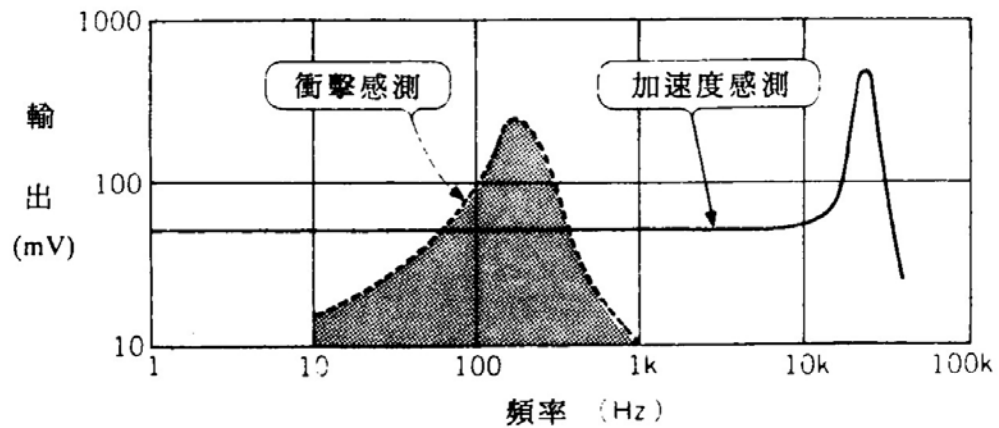


圖 2.3.3 衝擊感測器與一般加速規比較[6]

三、 加速規設計

一個基礎的加速規至少應該具有三個部份：彈簧質量系統、位移感測機制與外框的部份。在本研究中嘗試以光碟讀取頭中現有的組件來完成彈簧質量系統與位移感測機制的部份，並將光碟讀取頭架設在一裝設反射鏡片的外框上完成加速規之建構。為了測試建構出來加速規的特性，採用了自行設計的壓電式奈米定位器來產生穩定與可控的加速度值。光碟讀取頭中的雷射光源驅動與位移感測機制訊號的計算處理使用自製的電路板來完成，並使用資料擷取卡(data acquisition, DAQ)透過電腦來進行訊號的控制與擷取。

3.1 加速規架構

3.1.1 彈簧質量系統

本研究中使用光碟讀取頭中的四條金屬線與物鏡組成彈簧質量系統，在光碟讀取頭中音圈馬達的線圈繞組部分與物鏡藉由四條細金屬絲懸吊如圖 3.1.1 所示，達到平行導引的功能，同時這四條金屬線也兼具傳導電流予兩個線圈繞組的功能。

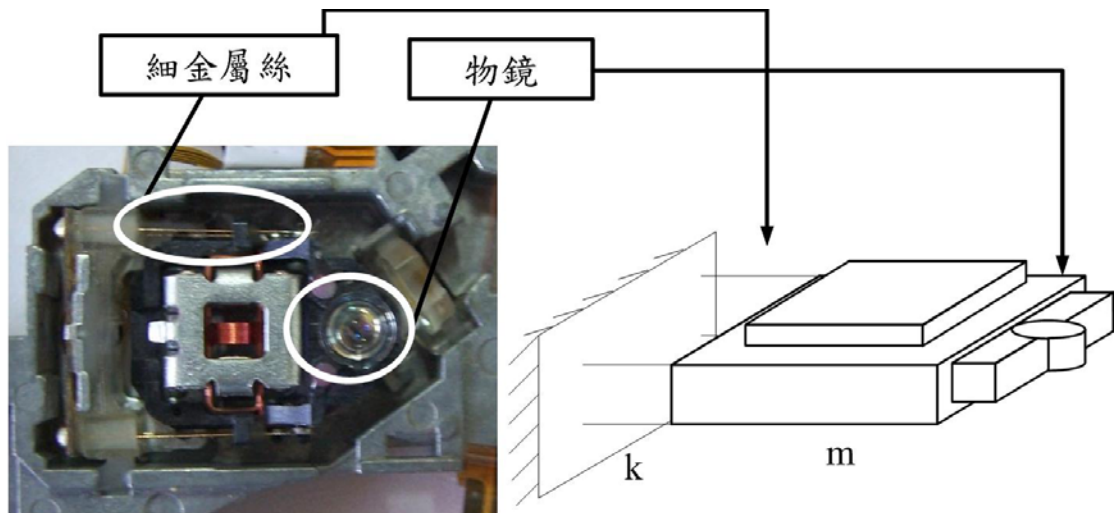


圖 3.1.1 以音圈馬達與物鏡組成之彈簧質量系統

細金屬絲另一端固定於光碟讀取頭之本體上，因此只需將光碟讀取頭固定於設計的外框支架上即完成彈簧質量系統。此彈簧質量系統中的質量塊由音圈馬達的線圈繞組部分與物鏡組成，重量為 0.28 公克，外觀如圖 3.1.2 所示，彈簧部分由懸吊的金屬絲構成，在細金屬絲根部添加有阻尼油提供系統適當的阻尼值，此阻尼值為光碟讀取頭廠商特別設計以避免殘振等情況發生，加速規整體的質量(包含外框與光碟讀取頭)為 38 公克。



圖 3.1.2 光碟讀取頭線圈繞組與物鏡(質量塊)與細金屬絲(彈簧)

本研究中所建構的彈簧質量系統為雙懸臂樑形式，與一般懸臂樑差異在於利用四條金屬絲分布於質量塊四角達到平行導引的效果，質量塊在垂直下降的時候呈現無旋轉的狀況如圖 3.1.3(a)，單一細金屬絲在受力時情況如圖 3.1.3(b)所示。對懸臂樑的撓度分析相當於兩端固定樑在無旋轉狀態右端垂直下降 δ ，可以得到方程式(3-1)。

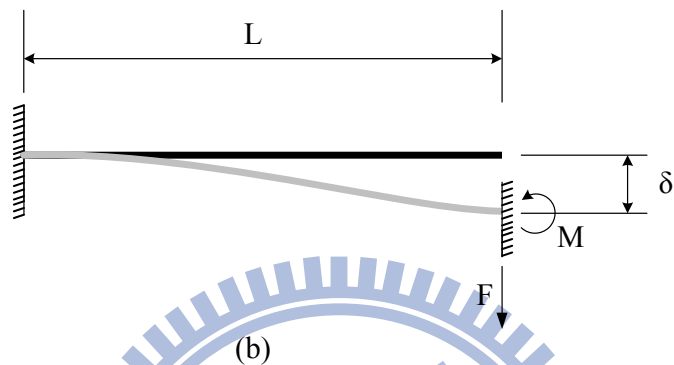
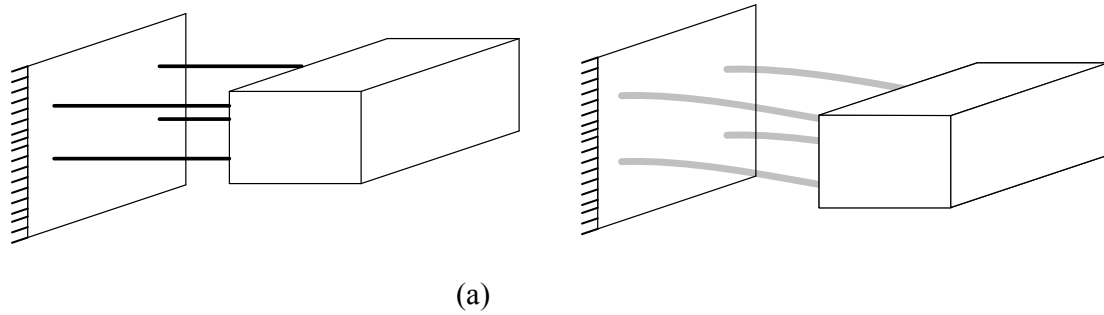


圖 3.1.3 懸臂樑撓度分析

$$\delta = \left(\frac{L^3}{3EI} \right) F - \left(\frac{L^2}{2EI} \right) M$$

$$0 = - \left(\frac{L^2}{2EI} \right) F + \left(\frac{L}{EI} \right) M$$

其中

E：陽氏係數

I：慣性矩

L：細金屬絲長度

F：細金屬絲質量塊端受力

M：細金屬絲質量塊端力偶

δ ：細金屬絲撓度

整理方程式(3-1)後得到方程式(3-2)。

$$F = \left(\frac{12EL}{L^3} \right) \delta$$

$$M = \left(\frac{6EL}{L^2} \right) \delta$$

此將方程式(3-2)的施力與撓度之間的關係換算成彈性係數 k 與加入圓平面的慣性矩得到方程式(3-3)。

$$k = \left(\frac{12EL}{L^3} \right) = \left(\frac{12E(\frac{\pi r^4}{4})}{L^3} \right) = \left(\frac{3E\pi r^4}{L^3} \right) \quad (3-3)$$

藉由方程式(3-3)可得到懸臂樑在質量塊端上下擺動時的彈性係數。經過實際量測，金屬絲的長度 L 為4.43mm，半徑 r 為0.04mm，陽氏係數 E 由於操作手冊上無記載材料，故採用純銅 $1.17 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，計算出來的 k 值為32.45 N/m。利用量測出來質量塊的質量0.28公克，與計算得到的彈性係數 k 為32.45 N/m，經由計算得到此彈簧質量系統的共振頻率為108Hz。光碟讀取頭操作手冊所記載之對焦音圈馬達共振頻率為 $58\text{Hz} \pm 5\%$ ，為公式計算值的53.7%，造成誤差的原因可能為金屬絲的材料並非純銅與阻尼導致共振頻率的下降。

3.1.2 位移感測機制

位移感測機制方面使用光碟讀取頭內建的四象限光感測系統，實際運作方式如 2.2 節之介紹，使用時需要供電予雷射二極體(laser diode, LD)使之運作，並讀取出 A-D 四個象限的光電感測器所得到的電壓訊號，計算後得到 FES 值來對應物鏡與鏡面之間的距離。

雷射二極體的運作方面參考其操作手冊，串聯電阻後由電源供應器施加直流電壓，藉由光碟讀取頭中回授控制的監控二極體(monitored diode, MD)讀取對應雷射二極體亮度的電壓值，設定在 180mV 為工作亮度。CD 與 DVD 光源之雷射

二極體與 MD 的關係如圖 3.1.4 所示。

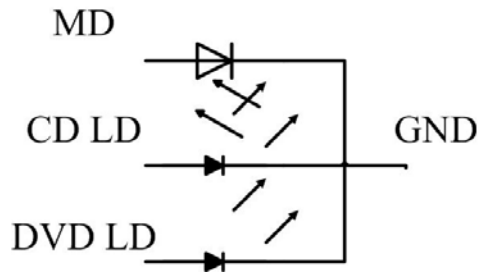


圖 3.1.4 光碟讀取頭之雷射二極體電路

位移感測機制的使用需要先進行物鏡的對焦動作，使其運作在 S 曲線的範圍之內，輸出的訊號則為之前定義的 FES。

3.2 電路設計

電路部份所需要的功能總共有三項：控制 VCM 移動、供給雷射二極體電源與 FES 計算並輸出，實體電路如圖 3.2.1 所示。

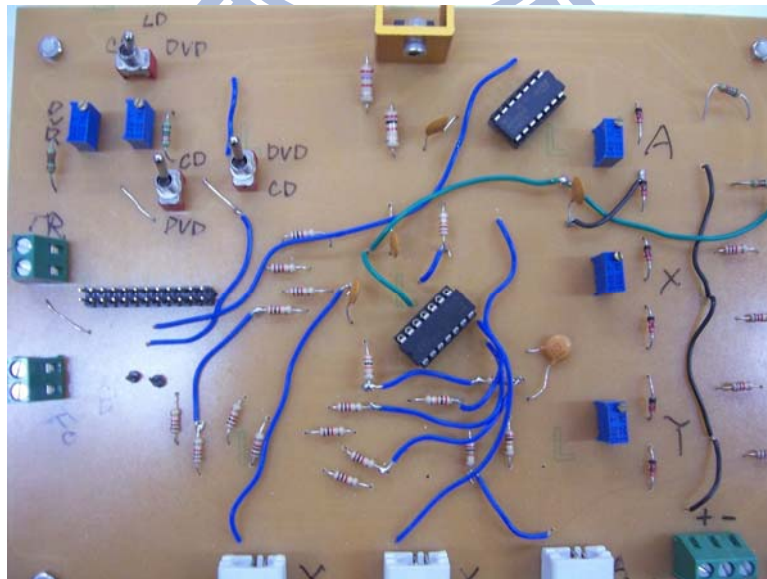


圖 3.2.1 操作電路實體圖

控制 VCM 的部份藉由電腦給予類比電壓訊號來控制線圈繞組的施力，因此在電路板方面設計快拆型的測試接點並連接至 DAQ 卡的輸出埠，另一邊則連接至光碟讀取頭控制音圈馬達的控制埠。

供給雷射二極體電源部分則設計可分別供給 DVD 與 CD 兩種不同雷射光源，為了防止雷射二極體的燒毀與使電路板用電均一化，分別串聯 220Ω 之固定電阻與 200Ω 之可變電阻以因應各讀取頭二極體不同的性能來調整，使雷射二極體的亮度到達工作區域，並設計一開關來切換不同的雷射源，電路圖如圖 3.2.2

所示。

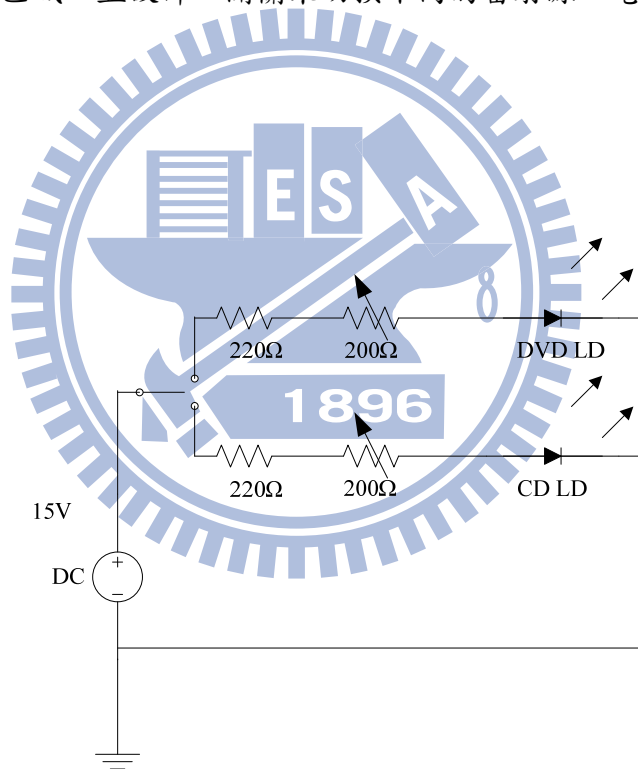


圖 3.2.2 雷射二極體操作電路圖

FES 的計算則使用運算放大器來計算由光電感測器 A-D 之輸出之四組電壓完成 $FES = (S_A + S_C) - (S_B + S_D)$ 的運算，並將訊號放大 10 倍以利於偵測，另外匯入一可調整的電壓以供微調 FES 值，設計電路圖如圖 3.2.3 所示。整體電路具備

VCM 控制、光碟讀取頭之雷射源驅動與 FES 計算三部份。

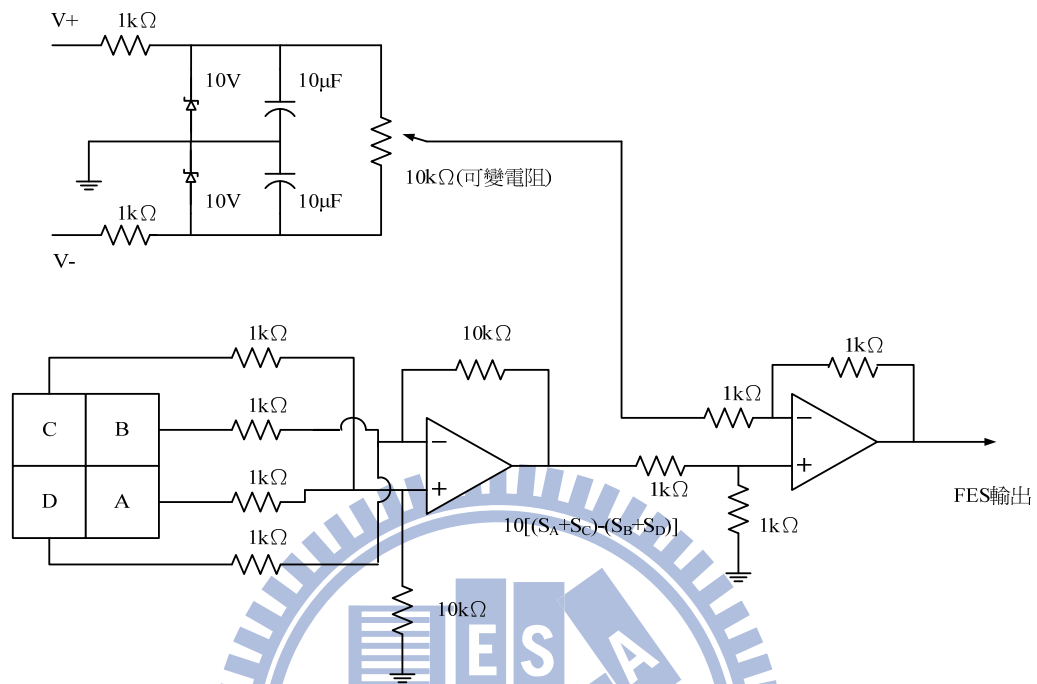


圖 3.2.3 FES 計算電路

3.3 軟體

在訊號控制與擷取上採用的是 LabVIEW 建構於 PC 上使用之控制介面，訊號傳輸上透過 DAQ 卡連接 PC 與光碟讀取頭，輸出類比電壓訊號控制 VCM 與擷取 FES 之訊號以供使用。

本研究中透過 LabVIEW 建構的控制介面有兩種：其一為控制 VCM 帶動物鏡由距離基座反射鏡遠端等距離移動至近端，如此可以用來對比 FES 訊號對應物鏡與反射鏡之間距離的關係，用以建構 S 曲線以供使用。另一種為控制 VCM 移動至 S 曲線的焦點，並將物鏡移動至焦點的位置，如此光碟讀取頭中的位移感測機制才能夠發揮最好的作用。

3.4 加速規實體與操作流程

本研究所建構的加速規系統實際操作的時候共需要三個部份：加速規、操作電路與供電系統。加速規包含彈簧質量系統、位移感測機制與外框，操作電路負責處理位移感測機制所輸出的訊號與控制 VCM，供電系統則提供位移感測機制與操作電路的電源。加速規本體如圖 3.4.1 所示，加速規系統實體如圖 3.4.2，加速規系統之間的關係如圖 3.4.3 所示。

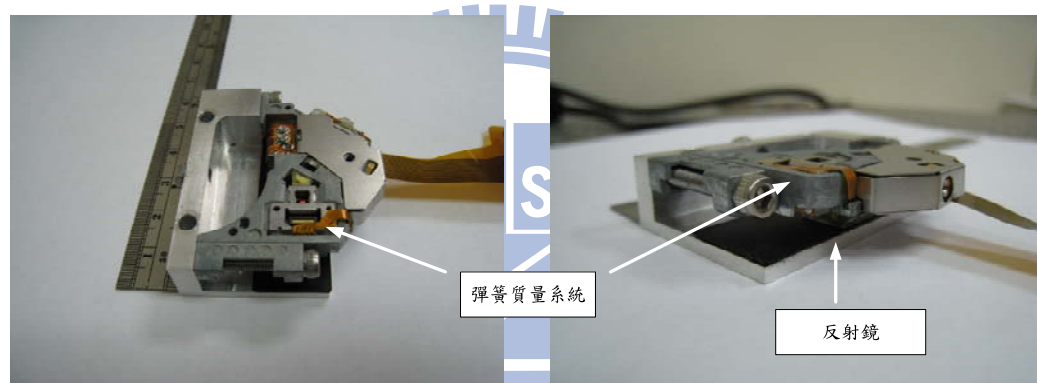


圖 3.4.1 加速規架設

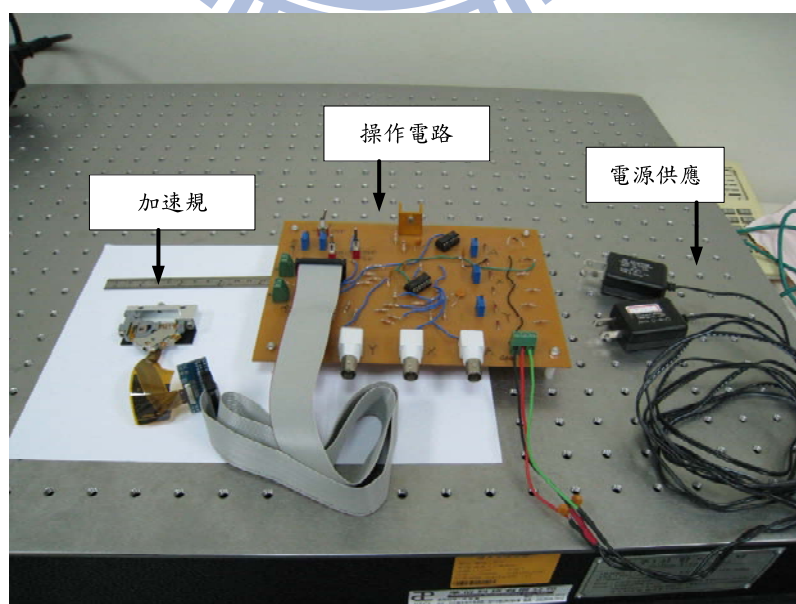


圖 3.4.2 加速規系統實體

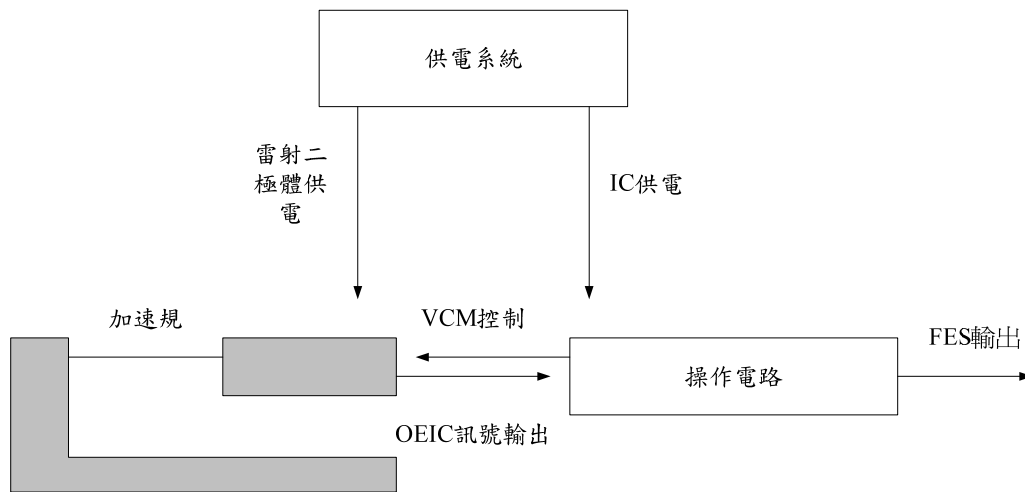


圖 3.4.3 加速規系統關係圖

供電系統啟動後提供操作電路上的積體電路（Integrated Circuit, IC）與位移感測機制的雷射二極體所需要的供電，加速規架設於待測物上，當加速度產生時，OEIC 偵測到訊號後輸出四組電壓訊號經由操作電路換算成 FES 完成加速規系統的運作。

四、 實驗

4.1 加速規測試系統

為了測試加速規所具有的特性，加速規測試系統使用壓電式奈米定位器來產生穩定可控制的加速度值。使用的壓電材料為 Piezomechanik 公司出產的積層式壓電陶瓷 PSt 150/5x5/20。可操作電壓為-30V 至+150V，全行程為 $20\ \mu\text{m}$ ，產品詳細資訊見附錄 A。使用電容式位移感測器(D-510.020, Physik Instrumente GmbH & Co. KG)來量取定位器之位移改變，壓電式奈米定位器實體如圖 4.1.1 所示。壓電式定位器的激振使用訊號產生器(SFG-2010, Good Will Instrument Co., Ltd.)產生正弦波電壓訊號，經由訊號放大器放大後施加壓電材料使之產生正弦波型態長度變化。

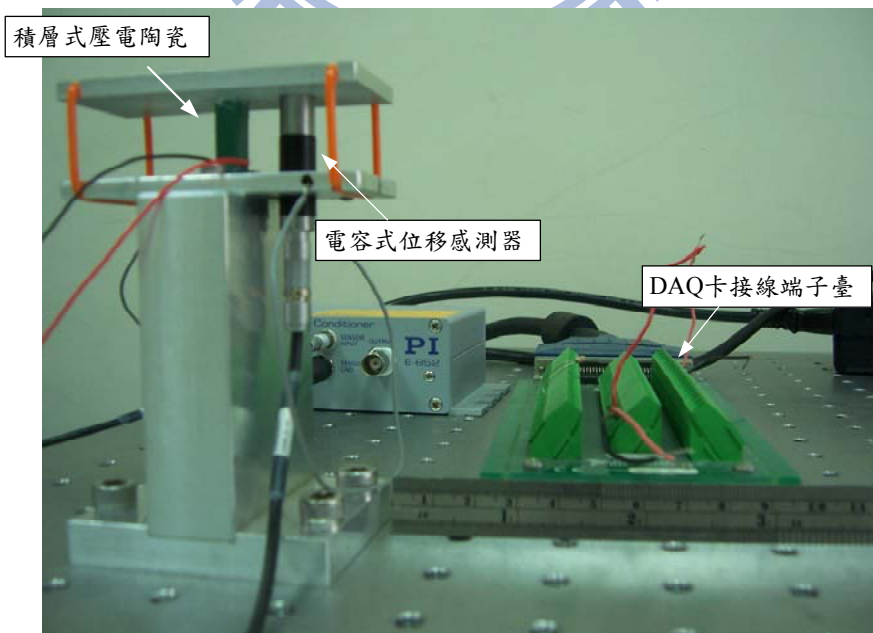


圖 4.1.1 壓電式奈米定位器實體

壓電式奈米定位器運動型態測試上比較電容式位移感測器輸出與直接利用壓電材料特性換算施加電壓之結果，給與壓電材料 10Hz 的正弦波電壓訊號，當輸入電壓訊號振幅為 16.6V 時，利用壓電材料的特性曲線來換算為 $4.426 \mu\text{m}$ ，電容感測器所輸出的訊號振幅值為 1.78V，換算成長度單位為 $3.56 \mu\text{m}$ ，兩者相差 19.6%。頻率維持 10Hz 將輸入訊號振幅調整為 24.2V 接近壓電材料可承受負電壓的極限，位移量為 $6.45 \mu\text{m}$ ，電容感測器所輸出的訊號振幅值為 3.1V，換算成長度單位為 $6.2 \mu\text{m}$ ，兩者相差 3.88%。藉由此實驗可以得知在使用此壓電式奈米定位器時實際的振幅量若直接利用壓電材料特性去換算會有誤差產生，因此在使用壓電式奈米定位器時振幅以電容式位移感測器所量測的實際位移訊號為基準。

實驗中使用之光碟讀取頭加速規測試方法為將其基座固定於壓電式奈米定位器上，使用 LabVIEW 程式透過 DAQ 卡(PCI-6036E, National Instruments)控制 VCM 帶動物鏡進行對焦動作，加速規中位移感測機制的訊號經由電路計算後以鎖相放大器(SR830, Stanford Research Systems, Inc.)擷取 FES 的均方根值(Root mean square, RMS)，以 FES_{rms} 代表 FES 的振幅，如此達成加速規測試系統的建構以比較加速規實際受到之加速度與輸出訊號之間的關係。加速規與壓電式奈米定位器架設如圖 4.1.2 所示。設備架構關係如圖 4.1.3 所示。

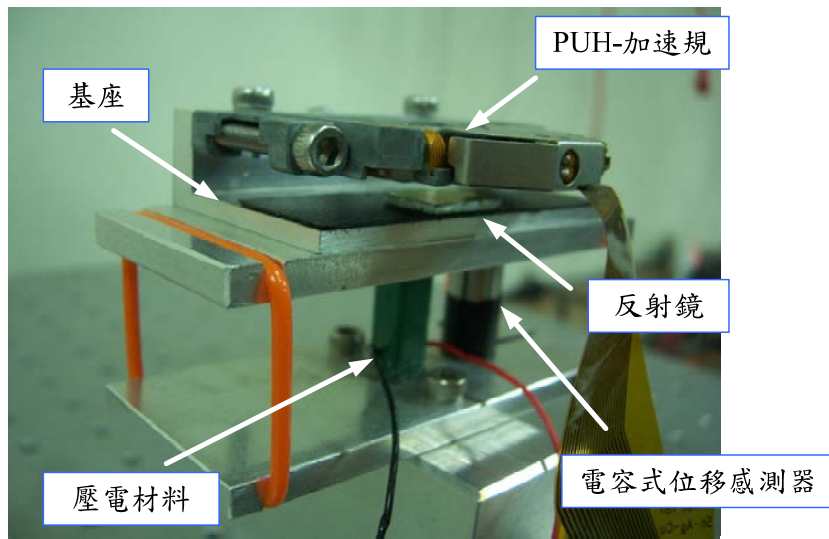


圖 4.1.2 加速規與壓電式奈米定位器架設

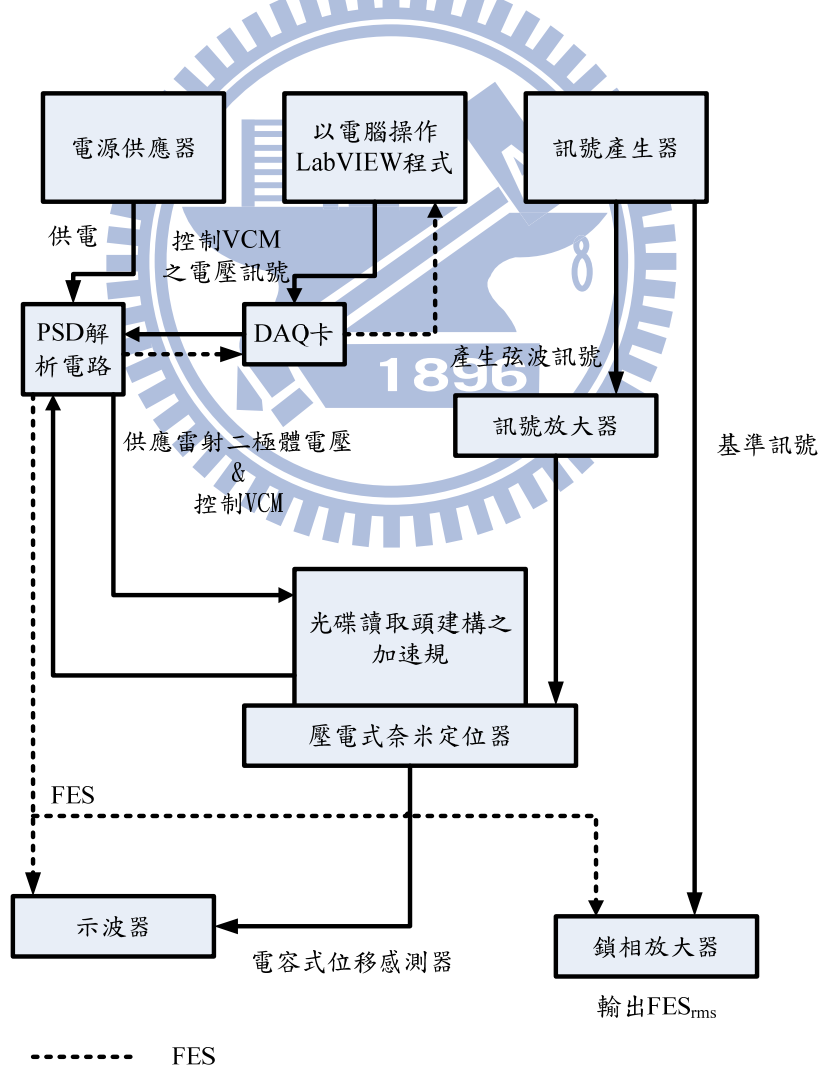


圖 4.1.3 實驗設備架構關係圖

電源供應器提供計算電路與光碟讀取頭中雷射二極體驅動的電源，LabVIEW 程式控制 VCM 移動與 FES 訊號擷取，訊號產生器提供基準訊號給鎖相放大器與經過訊號放大器後用來操作壓電式奈米定位器，FES 經由鎖相放大器處理後得到其振幅。激振加速度值為對壓電式奈米定位器位移微分兩次之後取最大值得到，此加速度值由定位器之振幅與頻率組成，因此可藉由調整激振振幅與頻率改變之。其對應的彈簧質量系統位移即為 FES 之振幅，實驗中利用鎖相放大器擷取 FES 之振幅 FES_{rms} 。

在進行實驗之前必須確認雷射二極體的亮度與調整光碟讀取頭物鏡與反射鏡之間的角度以確保能建構出適用的 S 曲線。

4.2 S 曲線界定

由之前介紹的 2.2 節可知，為了使用光碟讀取頭中的位移感測機制必須將雷射光對焦至 S 曲線的區域中，如此才能夠利用 FES 對應物鏡的位移情況，因此找出 S 曲線的操作區域就是最優先要完成的實驗。本實驗中不操作壓電式奈米定位器，只對光碟讀取頭的 VCM 進行操作，借由 LabVIEW 程式透過 DAQ 卡輸出電壓改變 VCM 施力，帶動光碟讀取頭的物鏡由距離基座反射鏡遠端等距離移動至近端並紀錄 FES 值的變化與當下的 VCM 控制電壓，如此建構出本論文中使用的 S 曲線以及其線性區域的範圍。VCM 的位移量可藉由原廠提供的資料換算操作電壓而得，分別對 CD 與 DVD 雷射光源作量測，實驗結果如圖 4.2.1 所示。

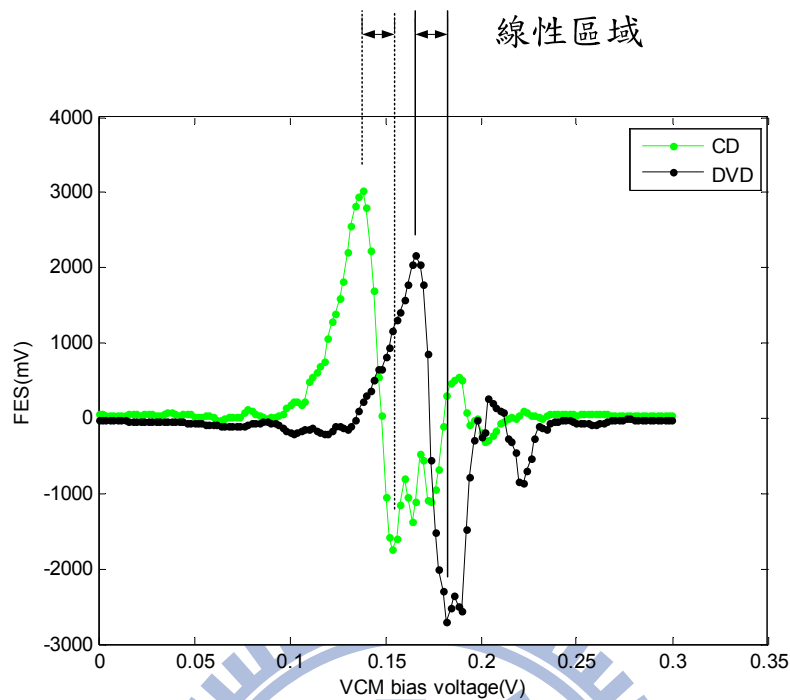


圖 4.2.1 雷射光源 DVD 與 CD 之 S 曲線

由實驗結果可知，在 S 曲線的波峰至波谷之間 FES 與 VCM 位移具有良好的線性關係，也就是位移感測機制所能應用的區域。當物鏡對焦至 S 曲線線性區域的中點時，可使用的 FES 值範圍為 $\pm 2V$ ，此電壓輸出強度可能因為不同的雷射二極體或操作電壓而改變，但所能夠量測的位移區域並不會變動。DVD 光源與 CD 光源所建構出的 S 曲線性質類似，兩者線性區域在 VCM 控制電壓上差距為 $0.028V(1.11mm/V)$ ，換算過後為 $0.02mm$ 與光碟讀取頭說明書上提供兩光源之焦點間距相近。

由實驗結果可得到 CD 與 DVD 雷射光源的 S 曲線性質除了聚焦的 VCM 操作電壓不同外，線性區域所能量測的位移量也是略有差異，使用 CD 雷射光源為 $0.02V(0.0222mm)$ ，使用 DVD 雷射光源則為 $0.0135V(0.0150mm)$ 。FES 波峰至波

谷的輸出 CD 為 4.77V，DVD 為 4.74V 兩者相近，因此由線性區域所能量測的位移量與輸出訊號電壓的關係可以得知，利用 DVD 雷射光源可以得到較高的敏感度，而使用 CD 雷射光源則可得到較大的加速度量測區域。

由於 DVD 的光源為可見光，較容易觀測雷射二極體是否正常運作，並具備較高的敏感度，故以下的實驗採用 DVD 雷射光源來進行實驗。

在使用光碟讀取頭的位移感測機制時，S 曲線的形狀強烈的影響量測上的敏感度與準確性。影響 S 曲線形狀的原因與光碟讀取頭雷射二極體的亮度和物鏡是否與反射鏡保持平行有關。雷射二極體亮度影響到 FES 的訊號強度，因此在實驗時需要注意 MD 是否維持設定的 180mV 以保持雷射二極體的亮度不變。而物鏡與反射鏡之間的角度差則會造成 S 曲線上下的不對稱或是造成線性區減短，如圖 4.2.2 即為不佳的 S 曲線。因此調整光碟讀取頭固定於基座的角度也是在實驗前的重要步驟。在使用光碟讀取頭加速規時需要注意的是，每次重新將光碟讀取頭架設於基座上時，皆會使 S 曲線有些微的變化，因此在每次重新裝設或調整光碟讀取頭後，在做實驗之前都需要重新量測 S 曲線才能確保實驗的正確。

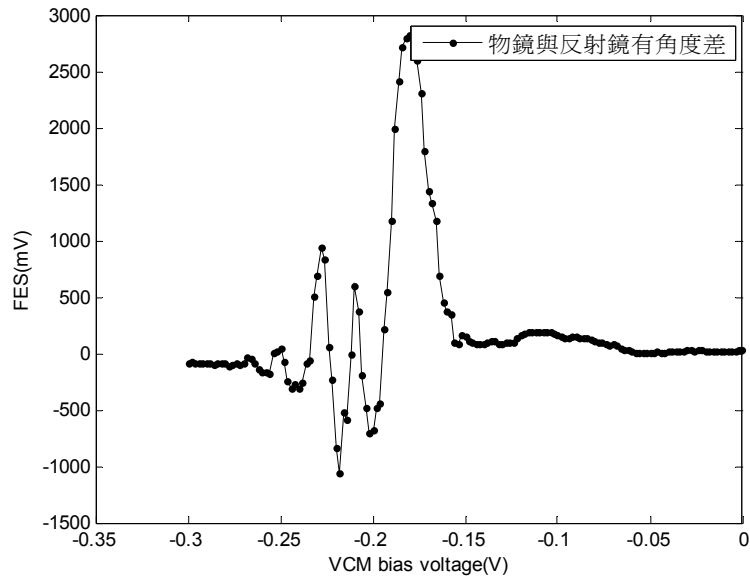


圖 4.2.2 不適用之 S 曲線

另一方面，使用不同反射率的鏡面來反射雷射光也會對 FES 強度產生影響。如圖 4.2.3 所示，在測試光滑反射鏡與市售 CD 當作雷射光的反射鏡實驗上，在雷射光亮度等其他因素不變的情況下，OEIC 因反射率不同所接收到的訊號強度有顯著的變化。因此為了使加速規具有高的敏感度，應當選用反射率高的鏡面作為反射雷射光用。

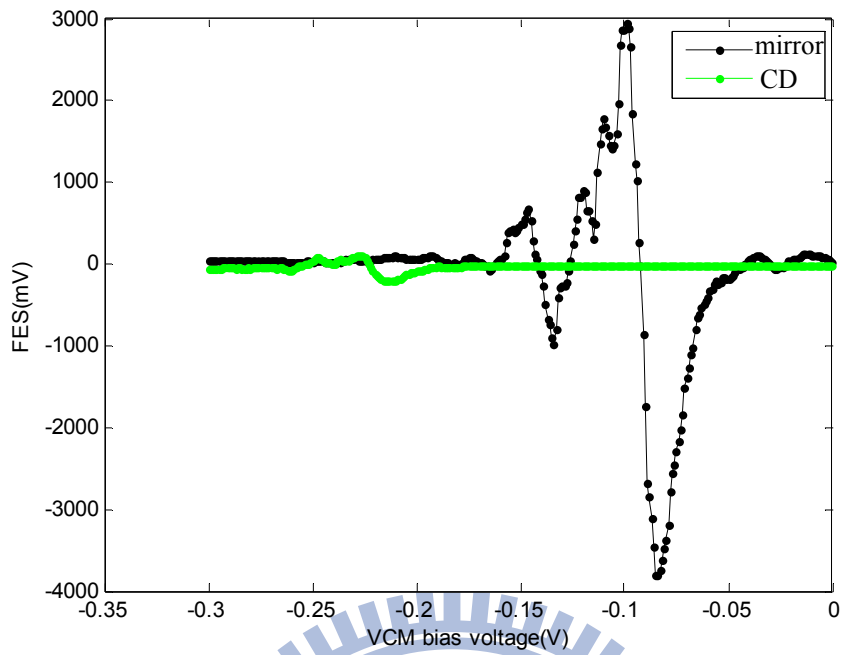


圖 4.2.3 比較不同反射鏡面之 S 曲線

4.3 共振頻率量測

加速規中彈簧質量系統的共振頻率影響到此加速規的操作頻寬，因此欲知道此加速規的操作頻寬首先要量測其共振頻率。實驗方法為固定壓電式奈米定位器激振的振幅為 $1\mu\text{m}$ ，再將激振的頻率由 0.5Hz 開始向上逐漸調整至 200Hz ，利用對壓電式奈米定位器位移微分兩次後得到加速度值，觀察在不同頻率所產生的加速度值下 FES_{rms} 的變化。實驗 4.3 所操作的 S 曲線如圖 4.3.1 所示。

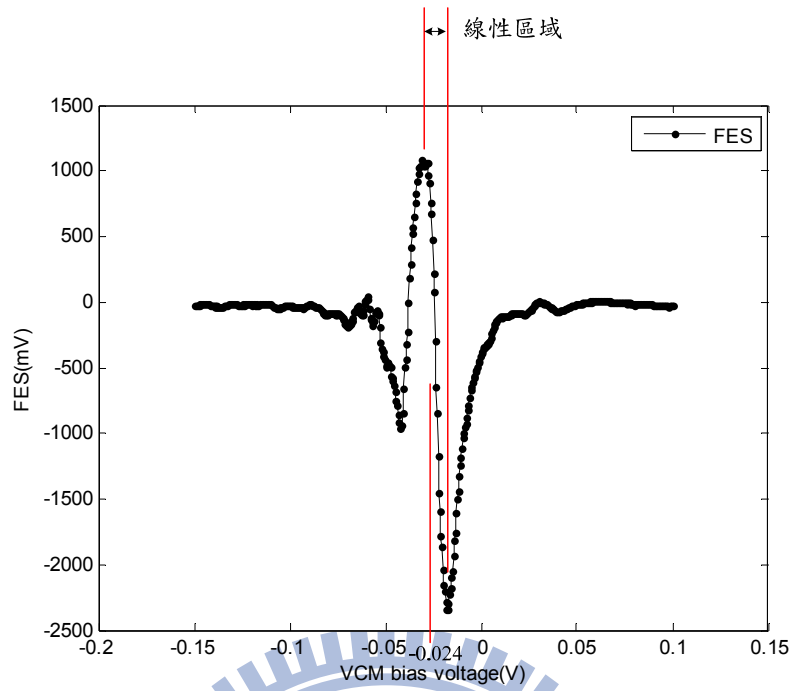


圖 4.3.1 共振頻率量測所使用之 S 曲線

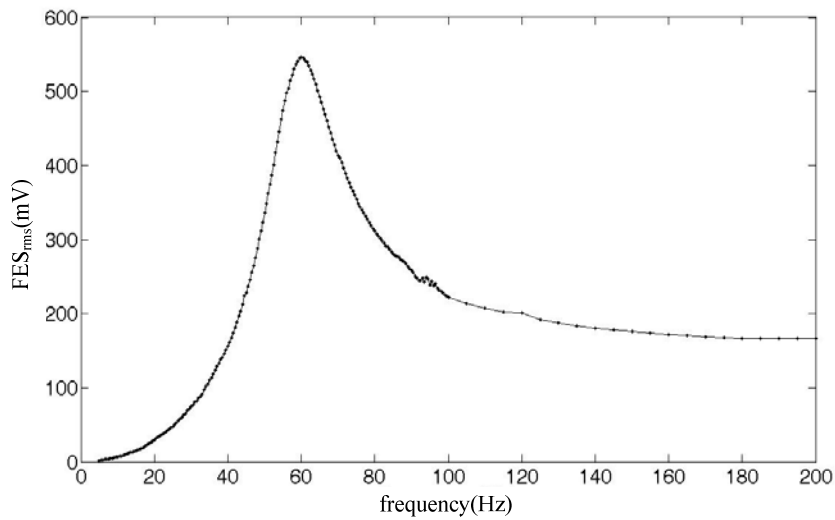


圖 4.3.2 共振影響之頻譜

實驗結果可以從圖 4.3.2 得知所建構的加速規共振頻率為 60Hz，與原廠提供之操作手冊記載的 $58\text{Hz} \pm 5\%$ 相符。由 2.1 節中提到阻尼比與操作頻寬的關係可

知，加速規的彈簧質量系統為低阻尼比的情況時所能夠使用的操作頻寬為其共振頻率的 20%，此範圍也適用於組尼比較高的情況，因此以低阻尼的情況所設定的共振頻率之 20%來估計，操作頻寬為 12Hz。

4.4 敏感度分析

加速規在使用時必須先建構出質量塊因為受到加速度值產生的位移量與實際受到的加速度值之間的關係式，也就是本論文所提到的敏感度。加速規使用上通常質量塊的位移會是一個相對的電壓訊號輸出，在本論文中即為 FES_{rms} 。為了建構有效的 FES_{rms} 與受加速度值之間的關係，必須要在加速規的操作頻寬之內測量各種不同的加速度值下 FES_{rms} 值的變化。由於到這個實驗之前還無法得知加速規確切的操作頻寬，只能夠先由實驗 4.3 結果所推算出的操作頻寬保守估計為 12Hz，因此設定敏感度分析的實驗中控制壓電式位移平台之激振頻率低於 12Hz 以避免共振的影響。本實驗中選擇更保守的估計，以 10Hz 的頻率來操作，藉由固定頻率後逐漸調整振幅由 $1.56\mu m$ 增加至 $5.6\mu m$ 來製造加速度值的變化，紀錄 FES 振幅的變化以建構出加速度與 FES_{rms} 之間的關係式。在實驗 4.5 至 4.7 中使用的 S 曲線如圖 4.4.1 所示，x 軸方向為 VCM 控制電壓，y 軸為 FES 輸出。

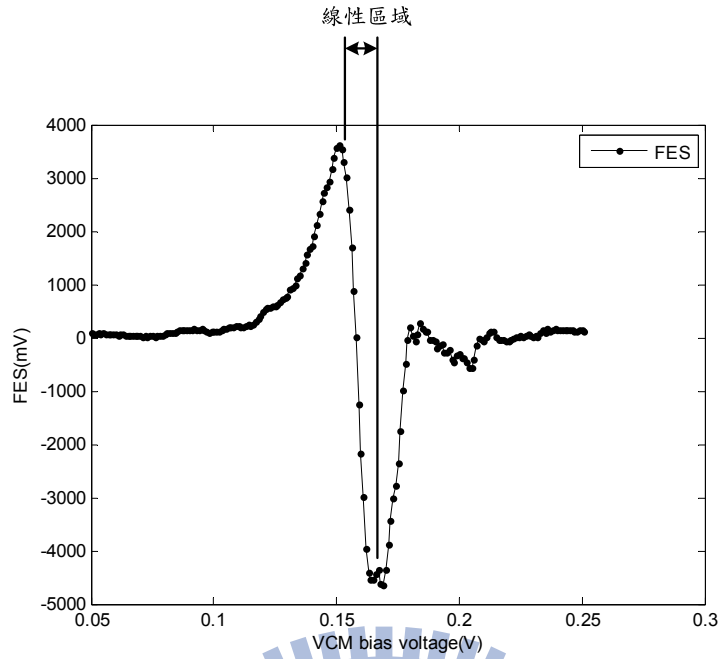


圖 4.4.1 加速規敏感度與操作頻寬測試之 S 曲線

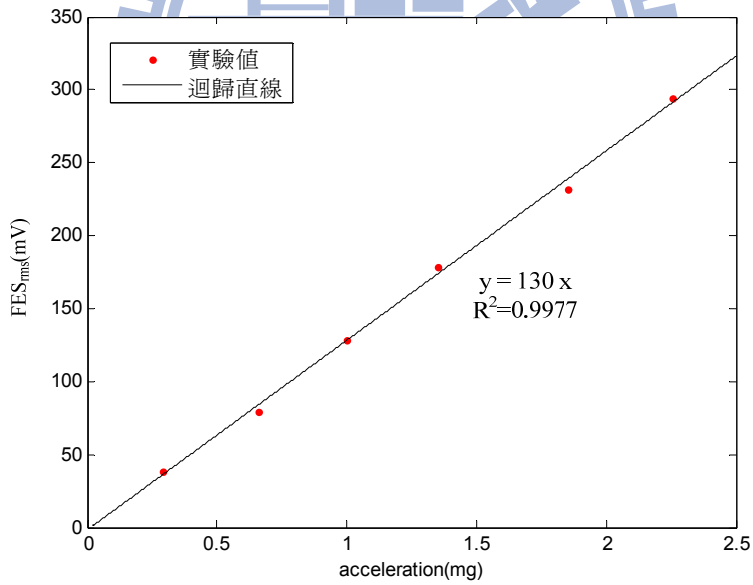


圖 4.4.2 敏感度分析實驗

實驗結果如圖 4.4.2 所示，利用保持頻率 10Hz 調整振幅的方式來改變加速度值，FES_{rms} 對應加速度值呈現良好的線性關係，利用迴歸分析得到其關係式

(130V/g)，如此加速規在使用的時候只要偵測出 FES_{rms} 電壓訊號就能夠藉由此關係式轉換成加速度值。

4.5 操作頻寬界定

實驗 4.4 所建構出加速規的敏感度適用的範圍只有在受到共振影響程度低的情況，因此必須測量出此敏感度適用的頻率極限以界定出操作頻寬。測試方法為藉由固定相同的激振振幅而改變激振頻率的方式來改變加速度值，並紀錄各頻率下之 FES_{rms} 值變化觀察與實驗 4.4 所建構出的敏感度之間的差異，如此可以得知在各頻率下共振現象所帶來的影響。本實驗中採取控制壓電式定位器激振振幅固定 $1.56\mu m$ ，並將激振頻率由 1Hz 逐步調整至 30Hz，紀錄 FES_{rms} 的變化並與前一實驗所建構出的敏感度(130V/g)做比對。

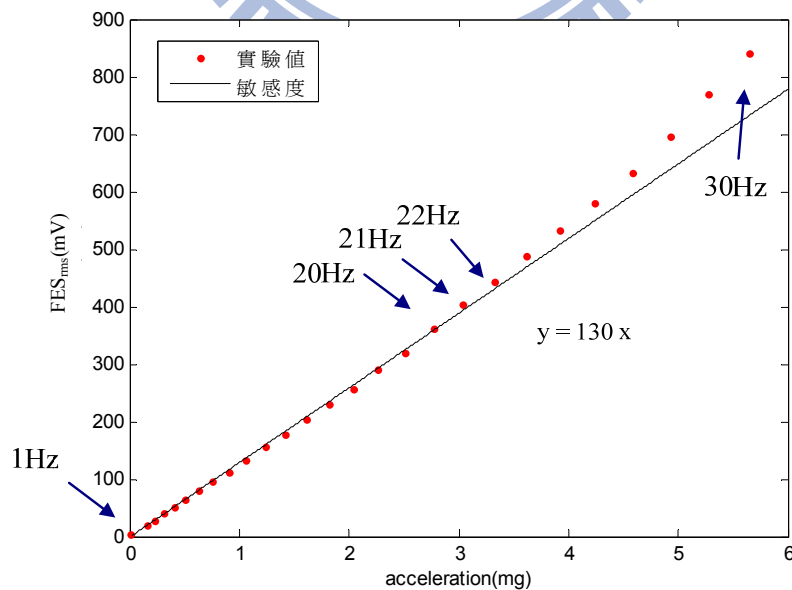


圖 4.5.1 操作頻寬實驗

實驗結果如圖 4.5.1 所示，當激振頻率低於 20Hz 的時候所偵測到的 FES_{rms} 值與建構出的敏感度相當的吻合，誤差值在 1% 以內。但是超過 20Hz 之後因為共振現象帶來的影響，使得 FES_{rms} 開始偏離敏感度曲線，操作頻率到 21Hz 的地方誤差值將超過 3%，誤差量過大將會造成無法以此敏感度曲線來換算 FES_{rms} 成加速度。因此藉由此實驗可以得知，本研究所建構的加速規操作頻寬為 20Hz。

利用實際測量出各頻率下的 FES_{rms} 值與低頻建構出的敏感度之間的關係，可以得知共振在各頻率下的放大比，利用 FES_{rms} 值與敏感度的比值可得到共振所帶來的實際放大比，在各頻率下的關係如圖 4.5.2 所示。如之前探討彈簧質量系統的部份，造成此種特性曲線的主要因素為彈簧質量系統中的阻尼比與共振頻率，從圖 4.5.2 中可以得知此彈簧質量系統與阻尼比 0.2 的理論值相近。得知光碟讀取頭所建構出的彈簧質量系統屬於較低阻尼比的情況，20Hz 的操作頻寬也較以低阻尼比(0.1)估算的 12Hz 為高。

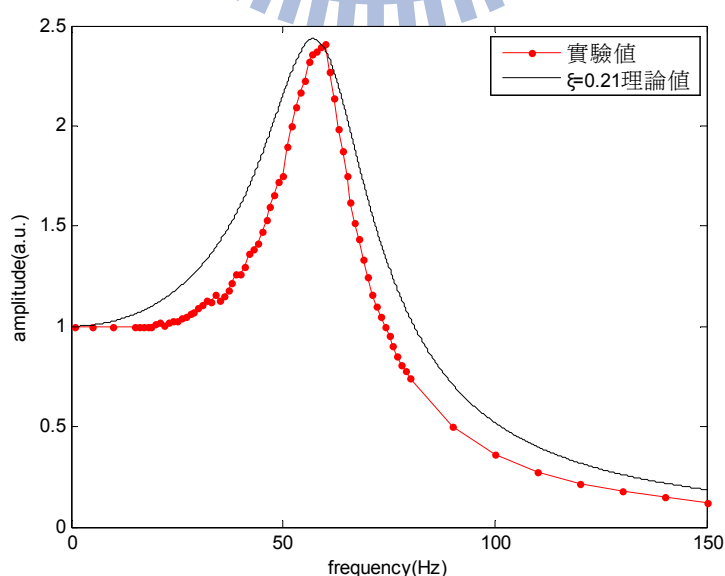


圖 4.5.2 加速規彈簧質量系統之阻尼比

4.6 提升操作頻寬

根據之前的實驗發現，以光碟讀取頭為基礎的加速規在低頻(10Hz)狀態下所建構出的線性敏感度曲線，於不給予任何訊號或機械處理下，當操作頻率高於 20Hz 時，共振現象所造成的影響將會使 FES_{rms} 偏離線性敏感度曲線使其不堪使用，造成操作頻寬受到限制。為了改善這個情況提升可操作的頻率範圍，在本實驗中試圖從 FES_{rms} 的訊號處理上提昇操作頻寬。實驗方法為，將加速規輸出的 FES_{rms} 串聯上一低通濾波器，利用其具有使輸出訊號隨頻率增加而遞減的特性來抑制共振所產生的影響，目標希望能夠讓操作頻寬達到 30Hz。藉由設計低通濾波器的截止頻率可以改變濾波器的效能得到不同的振幅抑制效果，在此先藉由一階 RC 低通濾波器的通式方程式(4-1)，試圖找出能夠達到目標的截止頻率。

$$A(f) = 1 / \sqrt{1 + (f / f_{cut-off})^2}$$

其中

$A = \text{amplitude}(a.u.)$

$f = \text{operation frequency}$

$f_{cut-off} = \text{cut-off frequency}$

(4-1)

利用方程式(4-1)過濾原始加速規在各頻率下的放大比，結果如圖 4.6.1 所示，經由截止頻率為 70Hz 的方程式(4-1)過濾後，在 30Hz 的地方達到所預期的目標，也就是振幅放大比為 1 的情況。當截止頻率設為 55Hz 時的現象，在低頻部份放大比將會被過分的壓抑導致產生大幅度的偏差，因此在經由此方程式模擬

過後決定使用 70Hz 為加裝在加速規上低通濾波器的截止頻率。

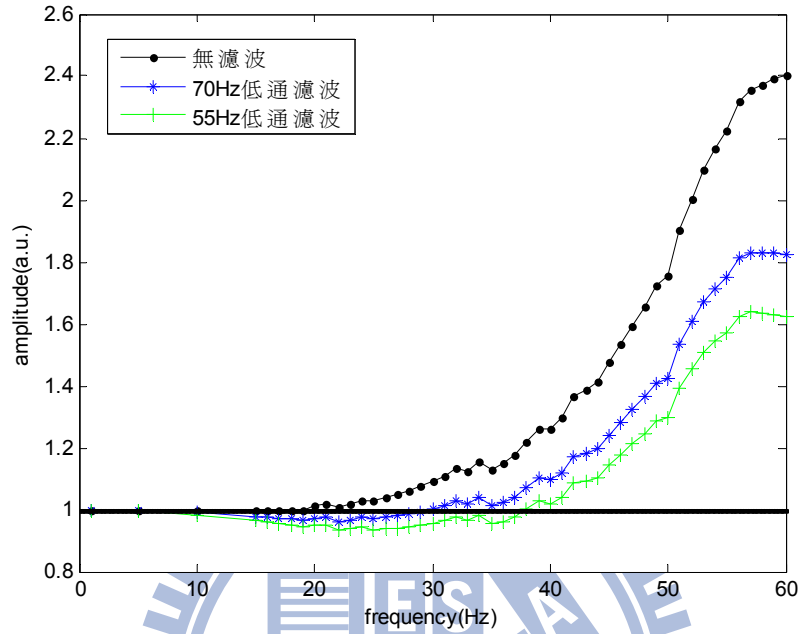


圖 4.6.1 不同截止頻率之濾波效果比較

經過測試後採用截止頻率設定在 70Hz 的低通濾波器，其在各頻率下對振幅的影響如圖 4.6.2 所示：

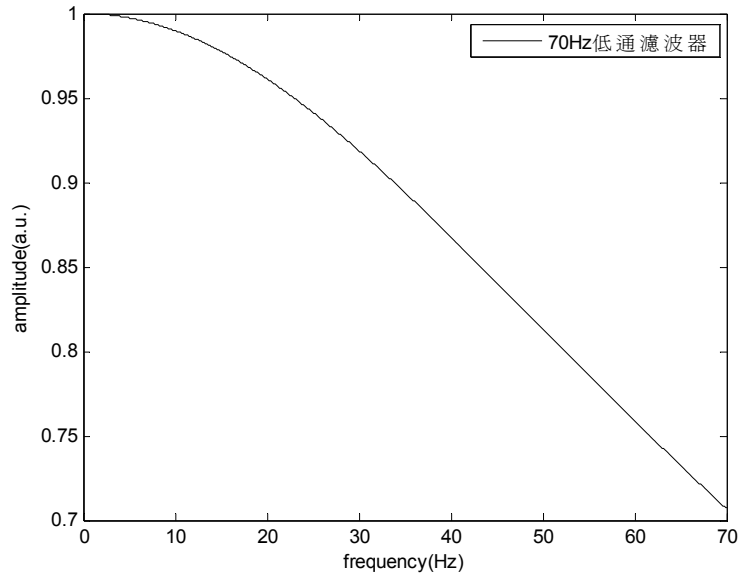


圖 4.6.2 截止頻率為 70Hz 之低通濾波器效能

實際於加速規上裝設低通濾波器後，比較配備低通濾波器的加速規與無配備低通濾波器的加速規訊號輸出。實驗方法同 4.2 節為固定激振振幅調整頻率的方式來改變加速度值，結果如圖 4.6.3 所示，在加裝低通濾波器後確實達到了抑制共振影響的效果，而且對低頻段幾乎沒有影響。

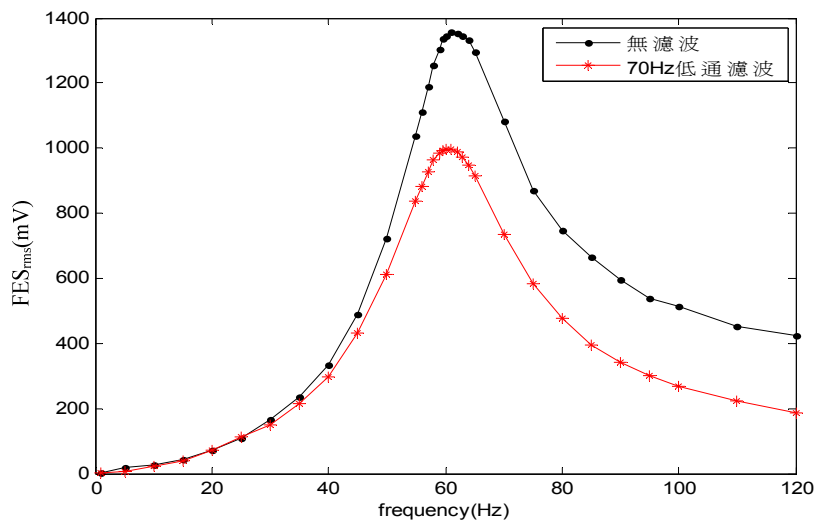


圖 4.6.3 加裝低通濾波後壓抑共振之效果

在敏感度的建立上也重新針對加裝濾波器的加速規做量測，實驗方式同 4.3 節，觀察不同加速度值在操作頻寬內對應的 FES_{rms} 。其實驗結果如圖 4.6.4 所示，發現加裝濾波器後對敏感度有些微的影響，敏感度縮減了 10%，不過仍呈現良好的線性關係， FES_{rms} 與加速度值之間可利用回歸分析得到關係式(117V/g)。

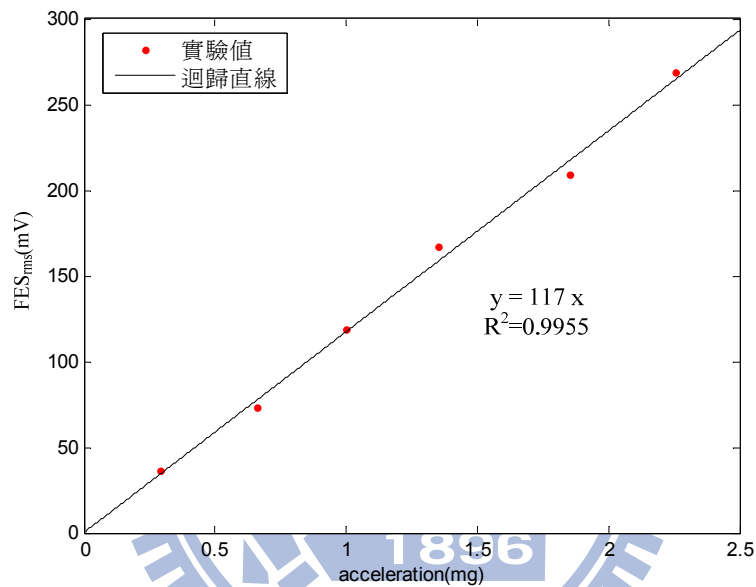


圖 4.6.4 濾波後敏感度差異

加裝濾波器後實際提升的操作頻寬之實驗同 4.4 節，固定激振振幅為 1.56 μ m，並將激振頻率由 1Hz 逐步調整至 40Hz，比較在低頻(10Hz)時所建構的線性敏感度(117V/g)，實驗結果如圖 4.6.5 所示。

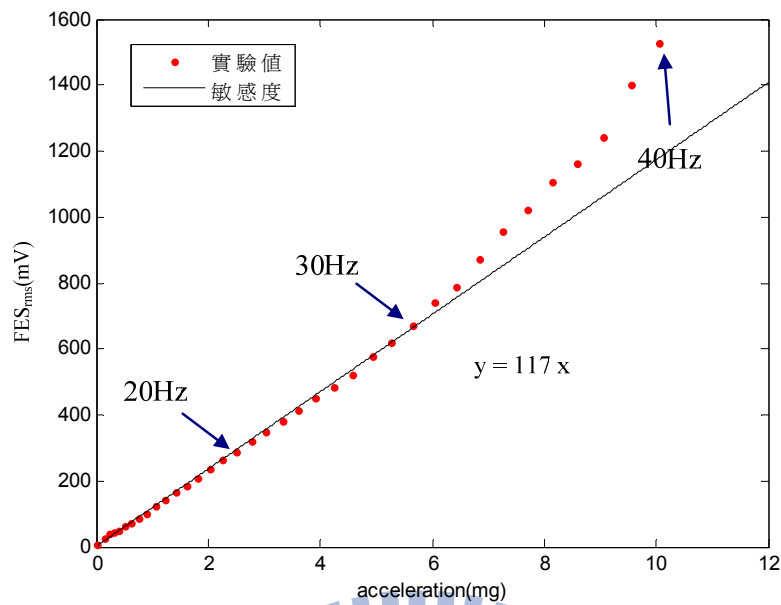


圖 4.6.5 裝設低通濾波器後之操作頻寬實驗

在加裝濾波器之後發現，當激振頻率超過 30Hz 之後才會因為共振現象帶來的影響，使得 FES_{rms} 開始偏離敏感度曲線，造成無法以此敏感度曲線來換算 FES_{rms} 成加速度，達到預期提昇操作頻寬的效果。但是在 22-27Hz 附近因為低通濾波器的影響造成些微的偏離敏感度曲線，誤差值在 3% 以內。由此實驗可得知，在加裝適當低通濾波器之後本研究所建構的加速規操作頻寬可提升至 30Hz，誤差值在 3% 以內。

另一種可以用來提昇操作頻寬的方法為找出共振在不同頻率下的放大比，再利用即時的數學運算來對輸出訊號做補正的動作。因此首要的條件就是先計算出 FES_{rms} 在各種頻率下放比的數學式，在這邊一樣使用 FES_{rms} 與低頻建立的敏感度之間的比值來當作被放大的倍率，加裝濾波器與無加裝濾波器狀態下共振所帶來各頻率的放比如圖 4.6.6 所示。

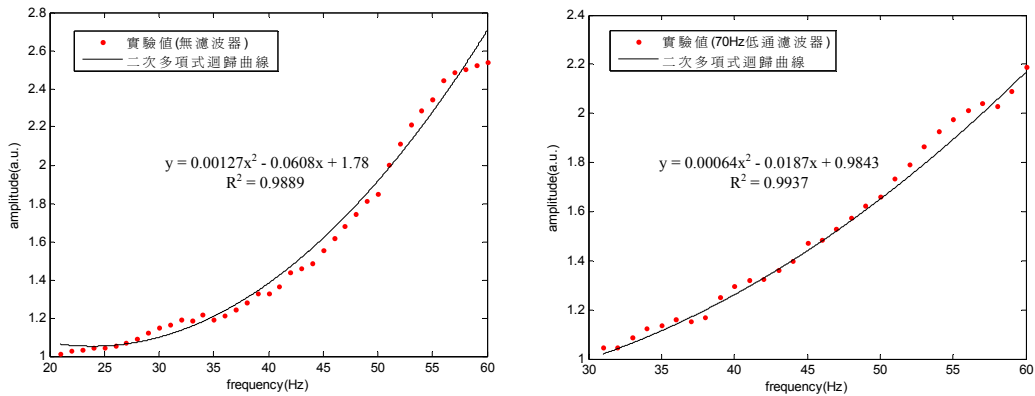


圖 4.6.6 加速規於高頻區域的放大比

利用統計分析的方式來計算兩者的迴歸曲線，發現能夠以二次多項式的迴歸分析式建構相近的趨勢線，因此只要在擷取 FES_{rms} 時能夠計算出其訊號的頻率，再加以即時換算，能夠將操作頻寬進一步提升至 50Hz。

4.7 雜訊量測

當加速規在運作的時候，訊號在傳輸過程中會受到一些外在雜訊如來自電磁干擾或是內部雜訊如熱雜訊 (thermal noise) 所干擾。熱雜訊的來源來自電子元件內部電子移動隨機所生的，其強度與環境絕對溫度成正比。加速規所能偵測到訊號的解析度受到這些雜訊的限制，因此必須要量測此加速規在運作時產生的雜訊以了解加速規的解析度。

本實驗的量測方式為不操作壓電式奈米定位器，利用 VCM 將加速規的物鏡對焦於 S 曲線的中心固定之，並記錄其輸出的 FES 值，實驗結果如圖 4.7.1 所示。

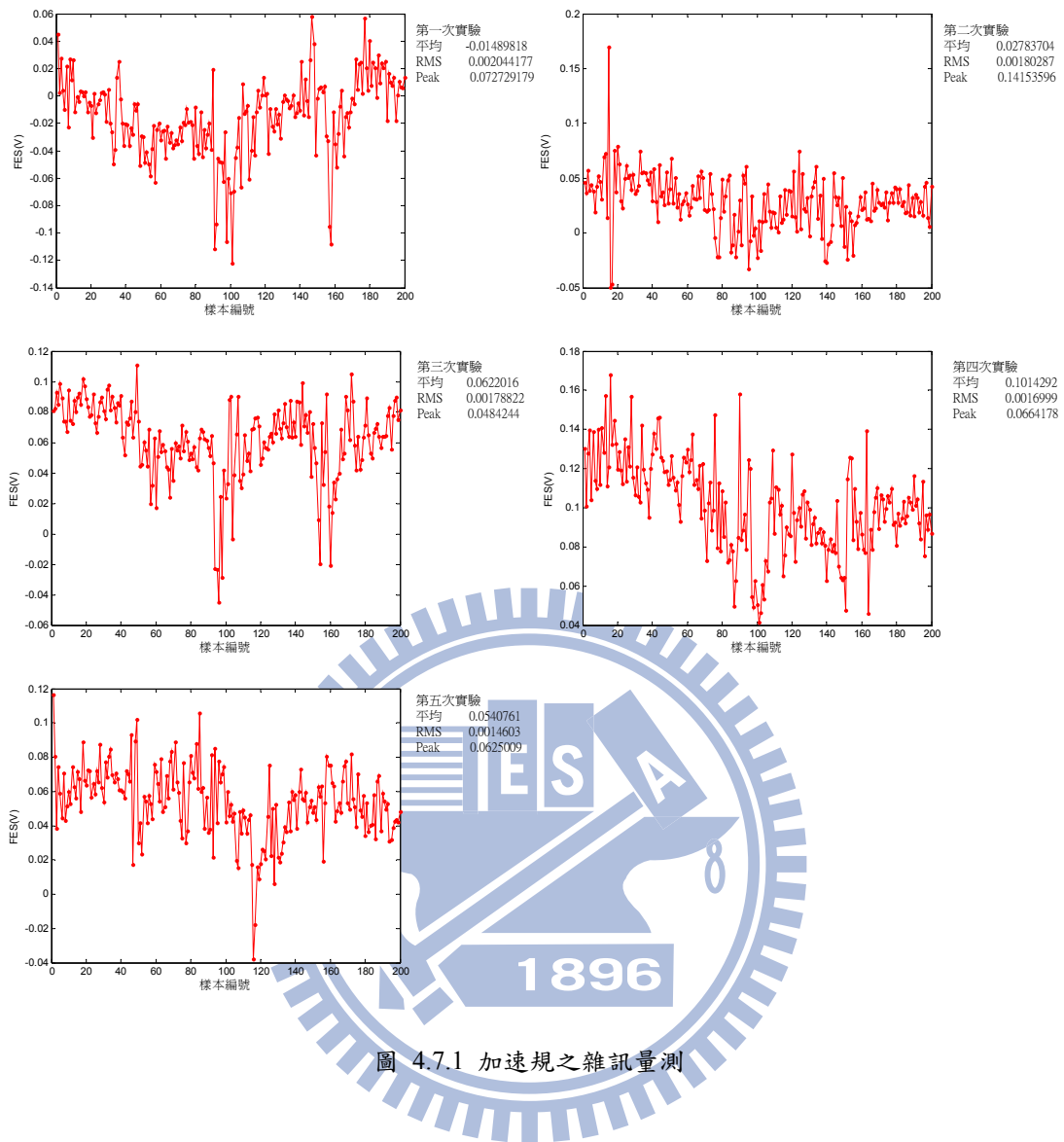


圖 4.7.1 加速規之雜訊量測

表 3 為五次實驗的統計分析資料，分別對每次實驗的 200 筆資料作平均值、均方根(root mean square, RMS)值與峰(Peak)值的計算，計算方式如公式(4-2)。就平均值部份，由於實驗是將物鏡對焦於 S 曲線的中心，因此理論上的平均值應該要是 0，但是實際使用時因為電路雜訊或是物鏡稍微偏離焦點就會造成 off-set 的產生，因此大部分市售的加速規在使用時都會有設定一個 off-set 的值而非將原始訊號設定於 0V。雜訊方面的探討主要是使用 RMS 值來作為標準，從實驗數據可

知本研究建構之加速規雜訊值介於 0.0014V 至 0.0020V 之間，利用敏感度換算為 0.17 $\mu\text{g(RMS)}$ ，即為加速規的解析度。至於加速規能偵測到的加速度極大值則受到 S 曲線線性區域的限制，實驗使用之加速規 S 曲線線性區域有 7V 的範圍，利用敏感度換算為 59mg。實際量測時則因為 S 曲線的線性區域在靠近波峰與波谷的附近線性程度較差，因此實際量測的極限設定在 50mg。

表 3 雜訊實驗統計結果

實驗次數	1	2	3	4	5
平均值(V)	-0.01489818	0.02783704	0.0622016	0.1014292	0.0540761
RMS	0.002044177	0.00180287	0.00178822	0.0016999	0.0014603
Peak	0.072729179	0.14153596	0.0484244	0.0664178	0.0625009

$$\begin{aligned}
 \text{Mean value: } \bar{a} &= 1/N \cdot \sum a_i \\
 \text{RMS value: } a_{rms} &= 1/N \cdot \sqrt{\sum (a_i - \bar{a})^2} \\
 \text{Peak value: } a_{peak} &= \max\{|a_i - \bar{a}|\}
 \end{aligned}
 \tag{4-2}$$

其中

$N = \text{the number of measured samples } a_i$

4.8 加速規使用正規化

在使用光碟讀取頭建構的加速規時遇到最嚴重的問題在於，每次重新組裝與調整位置，或是由不同的光碟讀取頭所建構出的加速規之間 S 曲線的型態或多或少都會有所變動。不同 S 曲線的加速規受到加速度時訊號的變化趨勢雖然相同，但是實際上的敏感度卻會有差異，造成每次架設後都必須要重新量測 S 曲線與建

構敏感度。在本節中假設不同讀取頭之間的彈簧質量系統為一致，再試圖利用它們所建構出不同的 S 曲線之間差異來探討如何利用這些差異來快速建構敏感度。

首先比較不同的光碟圖取頭的加速規所建構出的 S 曲線之間的關係，以下實驗所使用的光碟讀取頭 A 為實驗 4.4 至 4.7 中所使用的加速規，架設位置與雷射二極體亮度皆與之前實驗相同，光碟圖取頭 B 為另外一個新拆封的光碟讀取頭，利用兩個不同的光碟讀取頭分別建構出的 S 曲線如圖 4.8.1 所示。

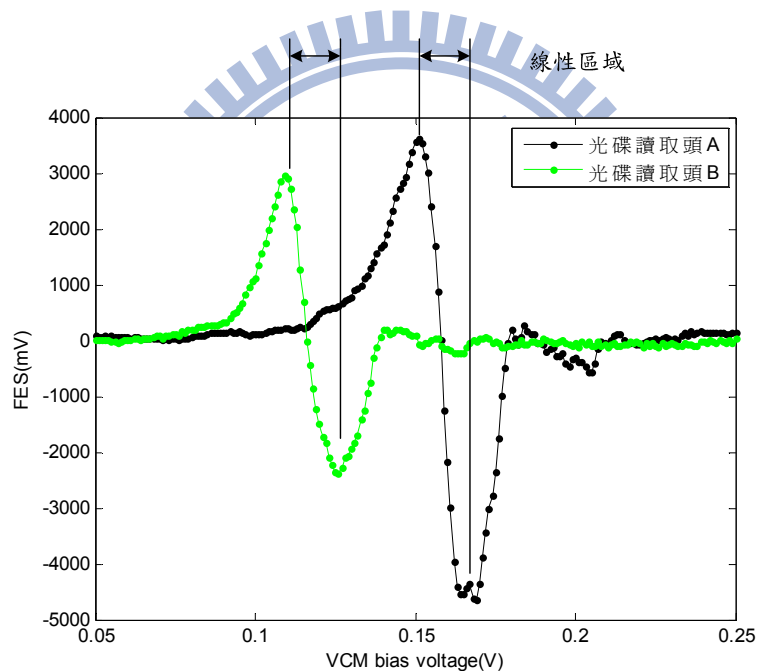


圖 4.8.1 不同光碟讀取頭建構出的 S 曲線

由圖 4.8.1 可知，兩個不同型態的 S 曲線之間主要會有三個不同的地方，第一個為 S 曲線的焦點位置，這個部份可以利用 VCM 的移動來克服，因此對不同的加速規影響不大。第二個為兩個 S 曲線線性區域的 FES 電壓輸出(y 軸)，光碟讀取頭 A 所建構的加速規其線性區域的 FES 電壓輸出相差為 8.26V，而光碟讀

取頭 B 所建構的加速規其線性區域的 FES 電壓輸出相差為 5.34V，兩者相差 1.54 倍。第三個部份為兩個 S 曲線線性區域的長度(x 軸)，光碟讀取頭 A 所建構的加速規其線性區域的長度以 VCM 輸出的電壓來看為 0.016V(1.11mm/V)，光碟讀取頭 B 所建構的加速規其線性區域的長度以 VCM 輸出的電壓來看為 0.017V(1.11mm/V)，兩者的相差不大。由這個結果來比較不同 S 曲線所建構出來的敏感度與其線性區域電壓輸出之間的關係。兩組光碟讀取頭所建構出的敏感度如下圖所示，建構方法如實驗 4.4，圖 4.8.2 為不使用濾波器下 A 與 B 加速規的敏感度比較，圖 4.8.3 為使用濾波器後 A 與 B 加速規的敏感度比較。

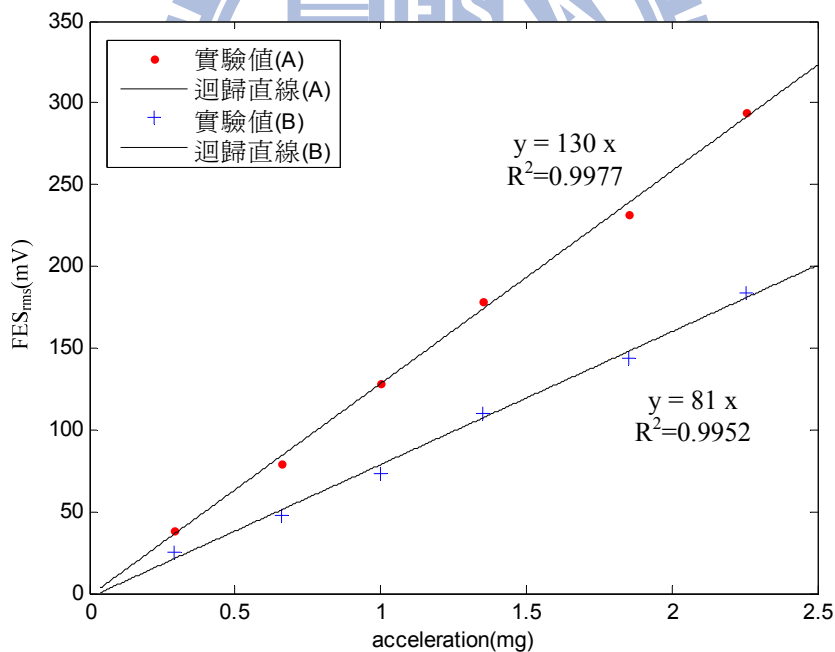


圖 4.8.2 不同 S 曲線下不使用濾波器的敏感度比較

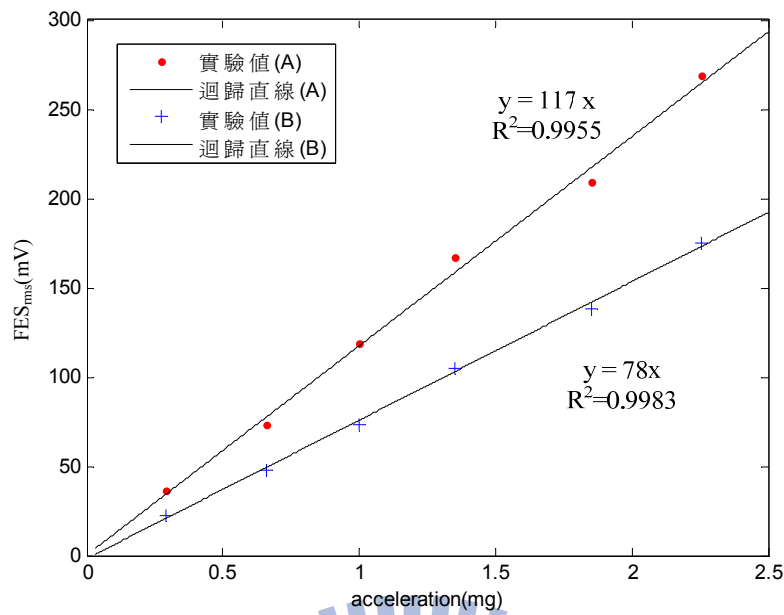


圖 4.8.3 不同 S 曲線下使用濾波器的敏感度比較

比較兩者的斜率，不使用濾波器的狀態下相差 1.6 倍，使用濾波器的狀態下相差 1.51 倍，與 S 曲線線性區域的電壓輸出相差的 1.54 倍皆相近，因此可以判定利用 S 曲線線性區域的電壓輸出之間的差異即可建構出相近的敏感度。最後將光碟讀取頭 B 所建構的加速規依照操作頻率測試的實驗所得到的數據調整與光碟讀取頭 A 之間的 1.54 倍，觀察與光碟讀取頭 A 所建構出的敏感度之間的表現，結果如圖 4.8.4 所示。

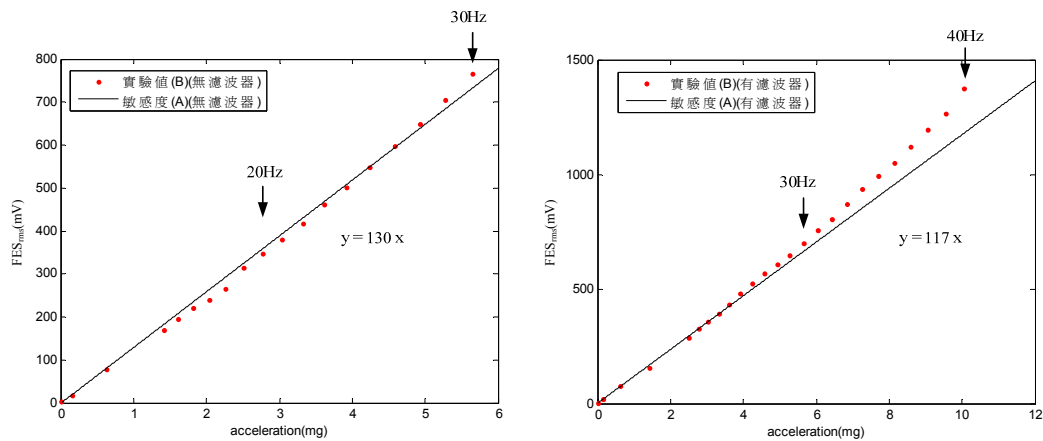


圖 4.8.4 光碟讀取頭 B 經調整訊號後與由光碟讀取頭 A 所建構的敏感度比較

由圖 4.8.4 可知光碟讀取頭 B 經由 S 曲線之間訊號強度的差異來調整訊號之後與由光碟讀取頭 A 所建構的敏感度之間的關係，在不使用濾波器的狀態下調整後的訊號略低於標準的狀態，兩個讀取頭分別測量出來的敏感度倍率為 1.6，調整的倍率為 1.54，造成了 5% 的誤差量。在使用濾波器的狀態下，在 25Hz 之前與敏感度相當符合，在 25Hz 之後開始偏離，於 30Hz 處也達到 5% 的誤差量。因此從這個實驗結果可知，不同 S 曲線線性區域 FES_{rms} 訊號強度之間的比例確實影響到所建構的加速規在同樣加速度下的 FES_{rms} 輸出，但是可能因為每個光碟讀取頭的彈簧質量系統上有些微的差異存在，因此利用 S 曲線線性區域 FES 電壓輸出之間的比例來做正規化效果略遜於直接量測該加速規性能，但還是有一定的精準度存在。

五、 結論與展望

本論文加速規的設計重點為利用光碟讀取頭中現有的組件來達到加速規的功能，而不需要另行加裝彈簧質量系統。利用光碟讀取頭中的物鏡與音圈馬達組成彈簧質量系統，再結合光碟讀取頭中的光學位移感測機制來量測質量塊的位移，使光碟讀取頭具有加速規的功能。利用壓電式奈米定位器產生穩定可控之激振加速度來對加速規進行特性研究，成功驗證其性能。最後再使用低通濾波器來提升操作頻寬，並對加速規的解析度與正規化使用進行特性研究，如此完成以光碟讀取頭為基礎的加速規。

本論文所建構之加速規具有以下特性，不加裝其他輔助設備的原始狀態具有 20Hz 的操作頻寬，敏感度為 130V/g，誤差值在 1% 以內。在使用低通濾波器來提昇操作頻寬後可以達到 30Hz，敏感度為 117 V/g，但會造成誤差值增加至 3%。加速規的解析度為 $0.17 \mu\text{g}$ ，測量的加速度極限為 50mg。

本論文所建構之加速規適用於偵測單一維度與低頻率的加速度訊號。由於細金屬絲無法完美導引質量塊只朝量測方向呈線性移動，因此其他非量測方向的加速度會導致質量塊的旋轉造成誤差，在使用上必須特別注意。應用的範圍適合單維度的加速度值量測，例如樓板的振動、地震的預警系統、交通載具的直線加減速量測或是在精密量測中輔助評估系統所受到的振動影響。

在未來的發展上，可以利用 VCM 進行質量塊位置的控制進而達到另一種型

態的加速規，預期可使加速規具有更大的加速度量測範圍。目前加速規使用上 VCM 的功用為移動質量塊於位移感測機制的測量範圍中心後不再調整控制電壓，使質量塊能夠在位移感測機制的測量範圍內移動，因此可量測的加速度值範圍受限於位移感測機制的測量範圍。為了增加可量測的加速度值範圍，在不改變加速規結構的條件下利用 VCM 將質量塊移動至位移感測機制的測量範圍中心後，將位移感測機制的訊號做回饋控制，當加速度產生導致質量塊移動時，立刻使用位移感測機制的訊號來調整 VCM 的控制電壓使質量塊保持在位移感測機制測量範圍中心。藉由 VCM 提供的施力平衡加速度所產生對質量塊的施力，如此建立 VCM 的控制電壓與加速度之間的敏感度達到另一種型態的加速規。利用這種方法可改善本論文所建構之加速規量測之加速度值受限於 S 曲線的問題，使加速規具備更大的加速度量測範圍。

目前市面上光碟機發展最新的技術為藍光 DVD，使用的藍光雷射波長為 405nm，可對光碟進行高密度記錄與讀取。若是改用藍光雷射二極體(405nm)來取代現在的紅光雷射二極體(655nm)，依照其光學特性可以預期加速規的敏感度會獲得提昇。

六、 參考文獻

- [1] 王金鵬、劉志強，” 車輛安全系統發展趨勢” ，機械工業雜誌智慧車輛與動力技術特輯，第 17 期，民國九十四年。
- [2] Z. Jian, J. Jianyuan, W. Hongxi, and L. Wanli, "A novel threshold accelerometer with postbuckling structures for airbag restraint systems," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 7, pp. 1102-1109, 2007.
- [3] "Missile control & guidance technologies," *Technology Focus*, vol. 11, p. 7, February 2003.
- [4] X. Huikai and G. K. Fedder, "A CMOS z-axis capacitive accelerometer with comb-finger sensing," in *Micro Electro Mechanical Systems, 2000. MEMS 2000. The Thirteenth Annual International Conference on*, 2000, pp. 496-501.
- [5] J. E. Rogers, R. Ramadoss, P. M. Ozmun, and R. N. Dean, "A microelectromechanical accelerometer fabricated using printed circuit processing techniques," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, pp. 015013-015020, 2008.
- [6] 陳丁再，” 機電感測器應用手冊” ，全華科技圖書股份有限公司，民國八十四年。
- [7] R. D. Reus, J. Gull, and P. Scheeper, "Fabrication and characterization of a piezoelectric accelerometer," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 9, pp. 123-126, 1999.
- [8] P. Scheeper, J. O. Gulløy, and L. M. Kofoed, "A piezoelectric triaxial accelerometer," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, pp. 131-133, 1996.
- [9] J. Kalenik and R. Pajak, "A cantilever optical-fiber accelerometer," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 68, pp. 350-355, 1998.
- [10] O. Bochobza-Degani, D. J. Seter, E. Socher, and Y. Nemirovsky, "Comparative study of novel micromachined accelerometers employing MIDOS," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 80, pp. 91-99, 2000.
- [11] O. Bochobza-Degani, D. J. Seter, E. Socher, and Y. Nemirovsky, "Design and noise consideration of an accelerometer employing modulated integrative differential optical sensing," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 84, pp. 53-64, 2000.
- [12] X. Fang and M. Cao, "Theoretical analysis of 2D laser angle sensor and several design parameters," *Optics & Laser Technology*, vol. 34, pp. 225-229, 2002.

- [13] X. Fang and M. Cao, "Theoretical analysis of 2D acceleration laser sensor and several design parameters," *Optics & Laser Technology*, vol. 35, pp. 345-348, 2003.
- [14] T. Meydan, "Recent trends in linear and angular accelerometers," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 59, pp. 43-50, 1997.
- [15] 王栢村, "振動學", 全華科技圖書出版, 修訂二版, 民國九十七年。
- [16] K. C. Fan, C. L. Chu, and J. I. Mou, "Development of a low-cost autofocusing probe for profile measurement," *Measurement Science and Technology*, vol. 12, pp. 2137-2146, 2001.
- [17] 洪紹剛, "新型原子力顯微鏡系統之設計與控制", 國立台灣大學, 電機資訊學院電機工程學系博士論文, 民國九十六年。
- [18] T. R. Armstrong and M. P. Fitzgerald, "An autocollimator based on the laser head of a compact disc player," *Measurement Science and Technology*, vol. 3, pp. 1072-1076, 1992.
- [19] C. L. Chu and C. H. Lin, "Development of an optical accelerometer with a DVD pick-up head," *Measurement Science and Technology*, vol. 16, pp. 2498-2502, 2005.
- [20] 廖鴻維, "三軸向光學式加速度計之研製", 南台灣科技大學, 機械工程研究所碩士學位論文, 民國九十七年。
- [21] J. Vollmer, y. Hu, T. Neumann, and E. Solda, "Construction Kit for Low-Cost Vibration Analysis Systems based on Low-Cost Acceleration Sensors," *Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 463-468, 2009.
- [22] "Optical DVD pick-up specifications (Model. TOP1100S)," *TopRay Technologies*.
- [23] F. Quercioli, B. Tiribilli, and A. Bartoli, "Interferometry with optical pickups," *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 670-672, 1999.
- [24] 陳仁智, "音圈馬達 voice coil motor 簡介", 馬達科技研究中心, 第 41 期, 民國九十二年。

附錄 A PSt150 之材料參數

3.1 Piezo-stack PSt 150, Piezo-rings HPSt 150, osi-type

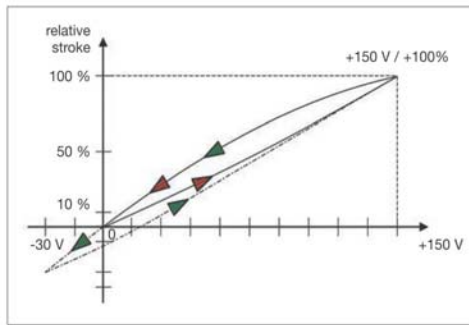


Fig. 23: Stroke / voltage diagram
 — uni-polar operation 0 V/(+)150 V
 — semi-bipolar operation (-)30 V/(+)150 V

Options

Position sensing by strain gages

Spherical end-pieces

(up to cross-sections 10 x 10 mm) (Fig. 24)

Low temperature operation

Cryo option 1: special coating
 Cryo option 2: electrical contact by kapton-insulated Manganin wires for minimizing heat load

Other characteristics:

Temperature range

-273 °C thru approx. +120 °C (depends on coating, see below)
 (beyond 100 °C, PZT-performance degrades reversibly)

Coatings

standard: green, high quality powder epoxy-based encapsulation
 temperature range -50 °C thru +120 °C
 vacuum / UHV grade thickness up to 0.5 mm
 Special coatings optional eg. for cryo applications
 thin coatings for stack packaging (thickness < 50 μm)

Properties of PZT-ceramic

Piezo electric charge constants

d_{31}	-290 picometer/Volt
d_{33}	+640 picometer/Volt
rel. dielectric constant ϵ	5400
Curie temperature TC:	155 °C
(modified PZT for TC = 190 °C on request)	
Density:	8 g/cm ³
Elastic compliance s_{33}	18×10^{-12} m ² /N
(valid for short-circuited electrodes or voltage control)	

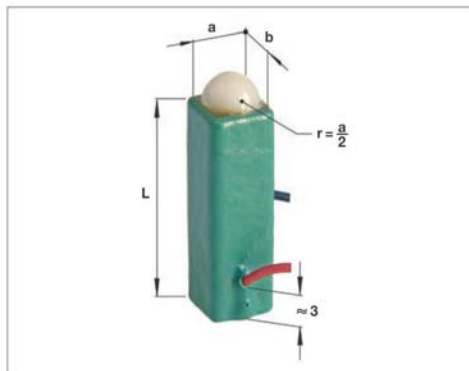


Fig. 24: Actor with spherical end-pieces