

國立成功大學
機械工程學系

專題進度報告書

發展順滑模態控制系統的振動控制並應用於光學檢測系統

專題生：劉樺

指導教授：陳國聲教授

(一)、摘要

在精密機械領域中，已經發展了許多對於結構的研究望可以提升結構的性能，在這些研究中，傳統的被動結構對內部荷載和外部環境的變化非常敏感。因此發展了智慧結構(smart structure)，以感測器、控制器以及相關控制系統，使結構能夠同時響應外部刺激，然後抑制不良影響或增強預期效果，本計畫主要欲抑制的是當機台在高速運動時所產生的振動，依前人發展出的一橡膠平台進行修改，透過增加感測器及發展其對應的控制回授系統，順滑模態控制及 PID 控制，並比較各自的控制效果，減少機台運動後的殘留振動，最後在橡膠平台上安裝 CCD 鏡頭仿照自動化光學檢測 AOI 機台檢測振動抑制效果，目的是要在最短的時間內讓影像清晰可辨。

關鍵字：智慧結構、控制系統、順滑模態控制、光學檢測、振動抑制

(二)、研究動機與研究問題

機械和結構的振動控制在製造、基礎設施工程中有著重要的應用。若結構的自然頻率與機台的受振頻率相同，會形成共振現象，在汽車和航空航天領域中，振動會縮短零部件壽命，在製造行業裡，機械振動會降低最終產品的製造速度和產品質量，因此如何避免機台振動影響製程穩定或者利用有效的控制方法抑制殘留振動是許多領域一直不斷研究的問題[1]。

工程領域中，各式方法均被廣泛應用於振動控制。傳統上，使用阻尼器用於衰減機械振動，也就是彈簧質量系統(spring mass system)[2]，其原理是當一波傳播至樑中時，會產生旋轉及彎矩，此時這個波會與彈簧質量系統產生共振。而當彈簧質量系統以比其局部共振的頻率高一點的頻率振動時，會產生剪切力及彎矩，從而抵銷原先波所產生的旋轉和彎矩，使波停止震盪。而在工業領域上，PID 控制系統[3]利用比例、積分、微分增益來控制調節，因其可透過實時監控取得數據，並及時給予控制命令，在一些領域中也是有被拿來應用。但因為是利用監控取得的數據，當數據部分不完整或者沒有準確的數學模型時，系統控制器的參數就必須要依靠實驗或經驗來調整，隨著精密工程領域對於精度的要求日益增加，PID 若是參數設定不佳，將會無法有效進行控制，卻也因此發展出了許多類型的工程整定方法來調節 PID 控制參數以抑制振動。除了上述兩種控制方法，還有一種為順滑模態控制(Sliding Mode Control)[4]，滑模控制是一種可變結構的高穩定性控制方法，此方法需先設計完一滑動平面後，利用控制手段迫使系統進入此平面，一旦進入平面，軌跡就會逐漸滑向平衡點，為了防止軌跡遠離順滑面，不斷的切換控制訊號使軌跡在平面往返穿梭，順滑控制的優點為響應快速、對於外界的擾動及參數的不確定性都有良好的穩定性，因此在工業領域中也時常被拿來應用。

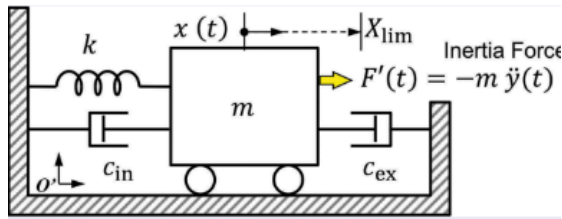


圖 2.1、彈簧質量系統示意圖[5]

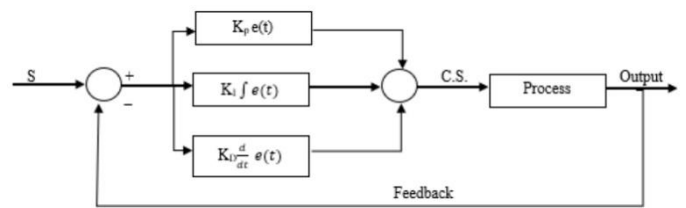


圖 2.2、PID 控制系統示意圖[6]

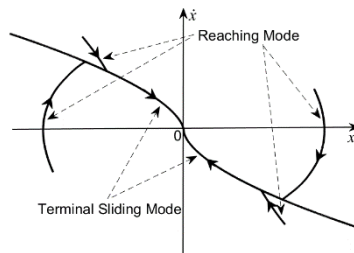


圖 2.3、順滑模態控制示意圖[7]

光學檢測領域中，自動化光學檢測 AOI 機台(Auto Optical Inspection)在產線已經普及並取代以往的人工檢測，AOI 的原理是將待測物與標準影像進行光學比對，若待測物的誤差超過標準，則需評估其缺陷是否要進行修補或者報廢。影像解析度、辨識度是一個對 AOI 系統非常重要的參考指標，但機台在高速運動下會產生慣性力，此時點到點之間的運動會產生振動使影像模糊，如此將會花費更多的時間來檢測影像。鑒於以上問題，本實驗室已有利用橡膠軸承結構設計的一主動平台，並模擬在擾動下其振動抑制的能力[13]，本計畫欲以此基礎，增加額外感測器、設計相對應的控制器及回授控制系統來優化振動抑制的能力，在研讀各類文獻後，本計畫決定以順滑模態控制作為新的控制器設計，雖然此方法在求學階段並未學習到，但期許自己可以在陳國聲教授的指導下成功設計此控制器並提升系統的效能。



圖 2.4、光學檢測[11]



圖 2.5、AOI 光學檢測機台[11]

(三)、文獻回顧與探討

振動是一個很容易使機台結構疲勞並導致故障、系統性能下降的其中一個原因，許多精密儀器本身內部就會有振動源，像是 3D 列印機在機台上高速運

動，而安裝在機台上推進擠出機的馬達便是一個振動源，振動對列印產品的拉伸強度和伸長率等機械性能有重大影響，3D 列印機的系統振動受機器結構、運動方向、加速度大小等多種因素影響，因此控制 3D 列印機加工過程中的振動、有效抑制不利的振動影響對於提高列印產品的機械性能，大幅提升生產效率具有重要意義 [2]。

3.1 文獻探討

想要達到機械或結構的振動抑制可以用以下三種控制系統來完成，分別是被動控制系統(passive control system)、主動控制系統(active control system)和半主動控制系統(Semi-active control system)。被動控制系統的原理是利用改變質量、剛性、阻尼材料等使系統的自然頻率不與激振頻率重疊，避免共振現象。被動控制技術的特點是在不需要任何外部動力源來減少振動的結構中實施設備。這種技術已廣泛應用於土木工程結構，尤其是地震工程領域，但較少應用於精密工程領域[8]。主動控制系統是使用感測器檢測振動訊號，此訊號通過控制器運算後，使致動器施加外部反作用力產生負振動來消除不必要的振動，主動控制系統的特點是可以在較遠距離的地方對系統進行量測並給予反饋，且隔震效果是最好的[8]。半主動控制系統須通過外部提供能量進行操作，並利用結構運動或安裝的感測器所給予的回饋響應，生成所需的命令訊號，使系統的自然頻率避免與激振頻率重疊[8]。本計畫主要會對於利用主動控制系統達到振動抑制的效果進行更深入的探討。

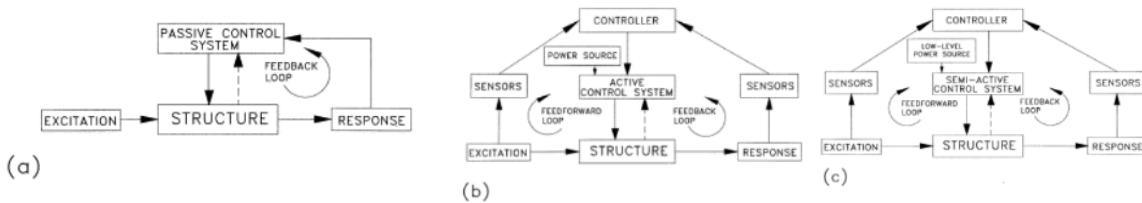


圖 3.1 三種控制系統的示意圖 (a) 被動控制 (b)主動控制 (c)半主動控制[10]

3.2 平台控制

控制系統如圖 3.2 所示，誤差信號 $e(s)=r(s)-y(s)$ 是通過系統輸出 $y(s)$ 與系統輸入 $r(s)$ 比較相差而成的。誤差信號傳遞到補償器 $h(s)$ 並被應用於系統 $g(s)$ 。在設計控制器時，以不影響系統穩定性的情況下找出合適的補償器 $h(s)$ 以產生所需的性能。此外，阻尼結構控制系統回饋的應用可以分為主動阻尼(active damping)和基於模型的回饋(model based feedback)。

主動阻尼的目的是減少閉迴路轉移函數的共振峰值(resonant peak)

$$f(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{g(s)h(s)}{1 + g(s)h(s)}$$

在這種情況下，除了在振幅降低的共振峰附近， $f(s)$ 非常接近 $g(s)$ 。

主動阻尼通常可以利用致動器來實現，此外，當執行器和感測器是並置的，此方法可以在沒有結構模型的情況下實現，並保證穩定性，也就是執行器在感測器觀察結構運動的同一位置施加力，並且具有可忽略的動態。但在實際情況下，要完美實現執行器和感測器搭配是非常困難的，因為在實際系統中，感測器和執行器各自都有明顯的動態特性。

主動控制其中一個困難的目標是將控制變量（頻率、加速度等）保持在工作範圍的所需值內，而且在某些特定頻率範圍內會有外部干擾 $d(s)$ 。

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{1}{1 + g(s)h(s)}$$

我們需要極大值 $g(s)h(s)$ 來降低外部干擾在頻率範圍內所帶來的影響。當 $g(s)h(s) \gg 1$ ，閉迴路轉移函數 $f(s)$ 約等於 1，這意味著系統輸出 $y(s)$ 與系統輸入 $r(s)$ 是準確的，但要實現這樣的目標，需要複雜的數學模型，且此複雜的數學模型需進行降階才能與 $g(s)$ 相似，因此，控制器頻寬 w_c 和有效性受到模型精度的限制，且頻寬之外的未建模結構可能會使系統不穩定[1]。

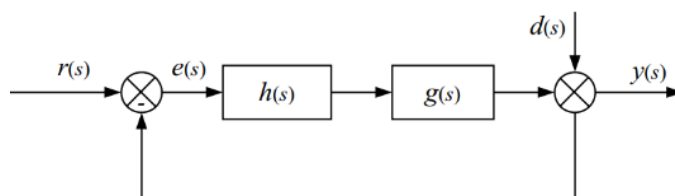


圖 3.2、回授控制系統示意圖[1]

順滑模態控制 SMC (Sliding Mode Control) 是一種可變結構控制技術，它應用切換控制律來改變設備動力，使得設備狀態沿著滑動表面的橫截面滑動，此控制方法在工業信息化領域得到廣泛應用。SMC 的過程通常有兩個階段，迫近階段(reaching phase)和滑動階段(sliding phase)。在迫近階段，被控元件的軌跡被迫到達指定的滑動面上並進行運動。一旦被控元件到達滑動面，閉迴路系統就會轉變為順滑模態，使得被控元件沿著滑動面滑向原點。此持續時間稱為滑動階段。SMC 是兩個以上的子系統及結構函數。理想的特性包括降階以及對參數變化和干擾的穩定性。利用切換函數的概念和 Lyapunov stability theorem 保證了 SMC 的穩定性。順滑控制就是設計一個控制器，使系統的運動趨於滑動面。因此，SMC 的設計包括滑動面的確定和控制器的設計[4]。本計畫在控制器設計方面，會先完成 PID 控制器設計，然後再去學習設計 SMC 控制器，並將這兩者以 Matlab/Simulink 進行控制模擬和狀態回授，決定控制參數及比較最終的控制效果。

(四)、研究方法及步驟

為優化振動抑制的能力，本計畫需設計一平台系統，選定感測器並架設於平台上，而後進行動態測試及建立平台模型，並以此模型設計相應的控制器應

用於控制面板完成定位實驗。最後將平台架設於線性馬達上，搭配控制器完成擾動抑制實驗，並透過 CCD 影像檢測比對振動抑制的效果。

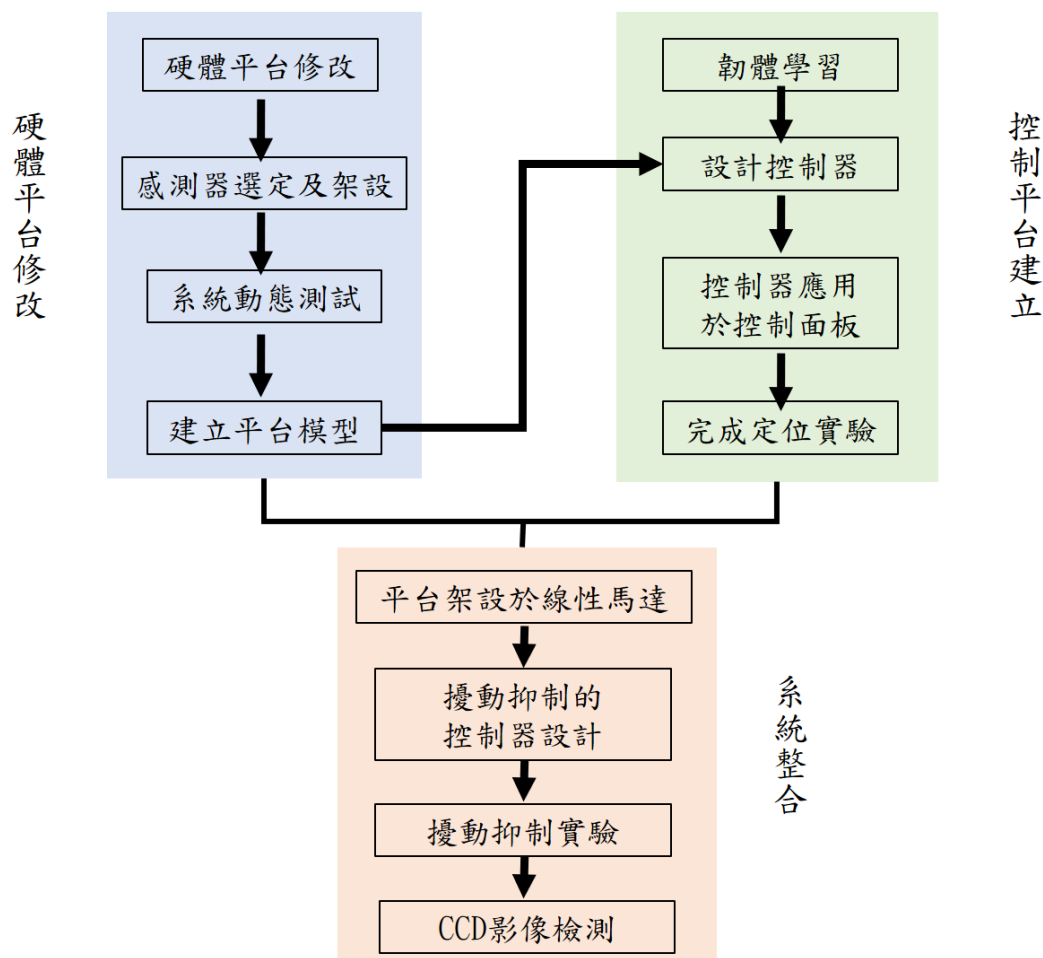


圖 4.1 研究計畫流程圖

4.1 硬體平台修改

平台設計上，指導教授陳國聲老師的實驗室中已有一主動平台，平台上層以四組橡膠搭配中心鋁塊組成橡膠軸承，利用其非等向性剛性可以限制平台運動，下層則為承載能力較強、剛性較低的撓性結構，並於此撓性結構左端選用音圈馬達作為致動器用以產生位移達到振動抑制的效果以及末端搭載感測器傳遞訊號和 CCD 鏡頭用以驗證機台最終的殘留振動，此撓性結構可視為具有末端質量的懸臂樑結構。最後以線性伺服馬達作為驅動器，進行動態測試，並將結果建立數學平台模型。感測器方面，利用電容式探針高解析度的特性用以量測由音圈馬達推動橡膠軸承平台所產生的位移，並利用鐳射位移感測器的量程較電容式探針高的特性量測 CCD 鏡頭的位移。但當平台中心移動速度過快時，撓性結構末端仍會有殘留振動，因此本計畫將以此為基礎並利用加速規體積小的優點，在撓性結構，即懸臂樑末端加裝加速規量測其振動並搭配鐳射位移感測器進行回授控制，提升最終光學檢測效率。

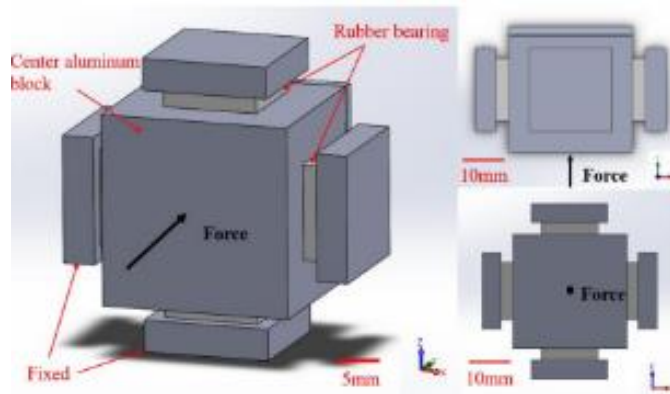


圖 4.1.1 橡膠軸承平台示意圖[11]

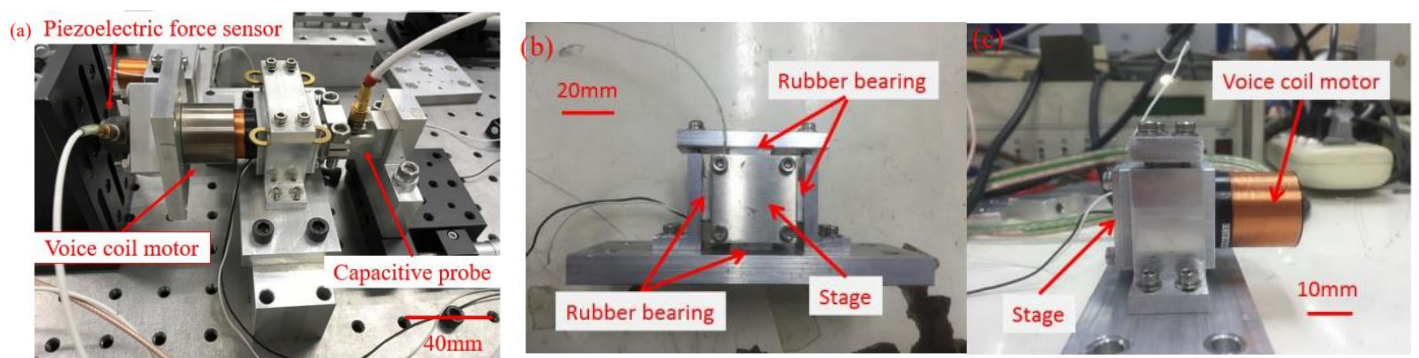


圖 4.1.2 橡膠軸承平台實際圖 (a) 平台架構 (b) 主體正視圖 (c) 主體側視圖[11]

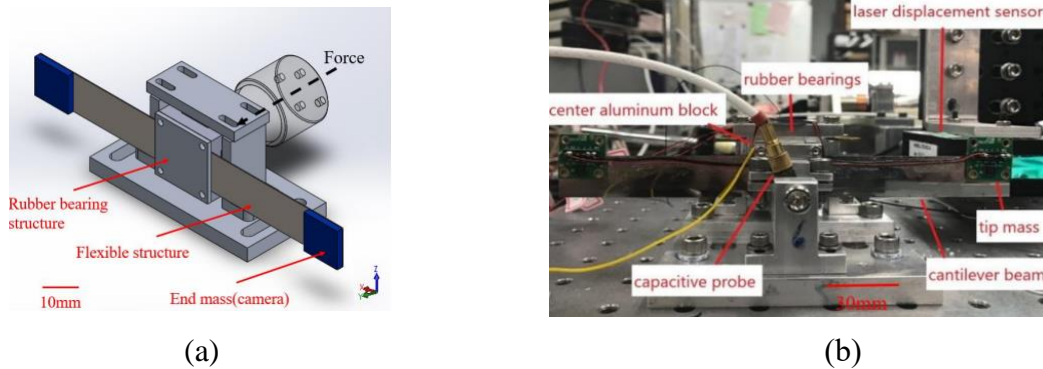


圖 4.1.3 主動平台系統(a)示意圖 (b)實際圖[11]

4.2 控制平台建立

根據之前所建立的模型可以進一步得出主動平台的轉移函數模型，本計畫採用閉迴路控制設計，利用 PID 控制搭配由 Zeigler-Nichols 提出的 PID 參數調整 Z-N 法進行實驗。

PID 控制器的轉移函數可以表示為：

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} + K_d s \right)$$

其中 K_p 為比例增益、 K_i 為積分增益、 K_d 為微分增益。整體控制性能與此三者數值息息相關.而其參數調整可以以 Ziegler Nichols (ZN) Method [3] 進行之。

除了 PID 控制器，本計畫也欲採用順滑模態控制[9 10]做為控制法，此方法須先(1)決定滑動平面及(2)設計滑動控制律。首先先定義滑動面 $s(x,t)$ ，為使系統到達滑動面後不脫離，因此當 $s(x,t)>0$ 時， $s(x,t)$ 值須隨時間增加而遞減，也就是 $\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s}(x,t) \leq 0$ ，當 $s(x,t)<0$ 時， $s(x,t)$ 值須隨時間減少而遞增，也就是

$\lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s}(x,t) \geq 0$ ，整理後可以用數學表示為

$$s(x,t) \cdot \dot{s}(x,t) < 0$$

由此得出滑動面。

至於設計滑動控制律，參考文獻[9 10]，Lyapunov function 可被定義為

$$v = \frac{1}{2} S^T S$$

迫近條件為狀態軌跡接近 $s(x,t)=0$ 的過程，定義為

$$s(x,t) \cdot \dot{s}(x,t) < -\eta |s(x,t)|$$

其中 $S = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ \dots \ S_n]^T$ ， S_i 為滑動變量， η 為一正定常數，當此函數滿足迫近條件及 Lyapunov stability theorem 時，則此控制器可被應用於控制系統中。

在本計畫的定位控制實驗中，使用 dSPACE DS1104 平台構建了實時控制系統，並進行振動控制測試，控制面板需先在 Matlab/Simulink 上編譯程式，加速規所測得的振動信號透過 DAC 端子傳送給驅動裝置(音圈馬達)，再透過鐳射位移感測器連接回 ADC 端子回傳訊號至 Simulink 完成控制迴路，最後進行特徵資料擷取。本計畫將透過 PID 及 SMC 兩種方法比較其各自的控制性能，並選定較優的方法進行後續的振動抑制實驗。

4.3 系統整合

本計畫將利用線性伺服馬達點到點運動的特性模擬高擾動環境，將主動平台控制系統安裝其上方，搭配由 4.2 最後所決定的回授控制系統比較在不同擾動下的振動抑制能力。最後透過 CCD 鏡頭進行最終的檢測將定位效果影像化。CCD 鏡頭在靜止的情況下，可以清晰的拍攝出影像，但在運動過程中，影像會呈現模糊，並在運動停止後逐漸穩定清晰。圖 4.3.3 為系統停止運動後隨時間變化的影像，本計畫最後的目的就是讓系統用最短的時間最快達到影像清晰可辨的狀態，並比較在有無控制狀態下的殘留振動量。

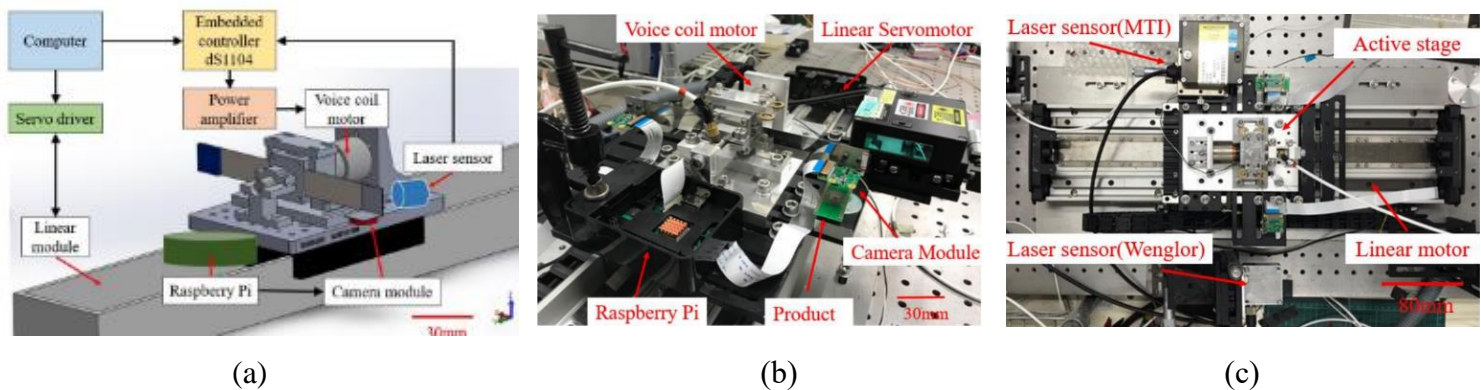


圖 4.3.1 主動平台系統安裝於線性馬達上(a)示意圖(a)等角視圖 (b)俯視圖[11]

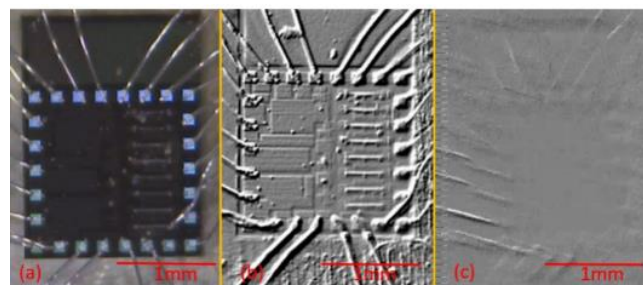


圖 4.3.2 芯片影像 (a)芯片實際圖 (b)標準成像 (c)模糊影像[11]

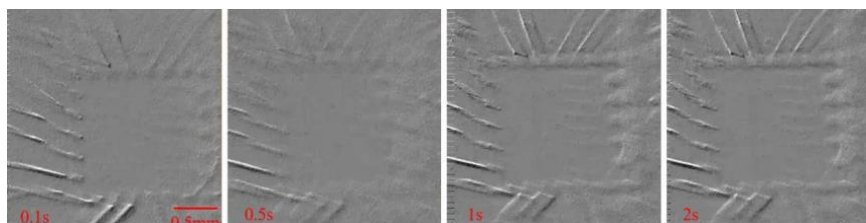


圖 4.3.3 影像狀態[11]

(五)、目前進度

1. 掃頻實驗及數學模型建立：

掃頻實驗是一種可用於確定系統的頻率響應，以深入了解系統的動態性質的有效方法。當我們將不同頻率的訊號輸入到一個系統中，透過觀察輸出的變化，我們能夠獲得系統對於不同頻率的響應。這些數據不僅有助於建立系統數學模型，還能進行模擬和預測系統的動態行為。透過掃頻實驗所獲得的數據，我們能夠推斷系統在頻域中的行為。通過分析輸入和輸出訊號的關係，我們可以利用數學方法推導出系統的轉移函數或其他數學模型。這些模型提供了系統的動態特性，讓我們可以更準確地預測其響應，以利進行後續的控制實驗。

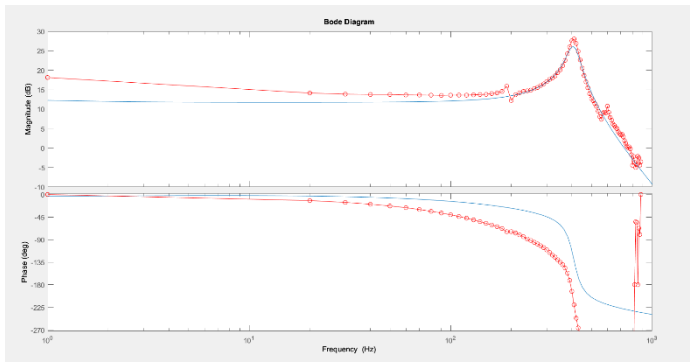


圖 5.1 橡膠軸承掃頻結果

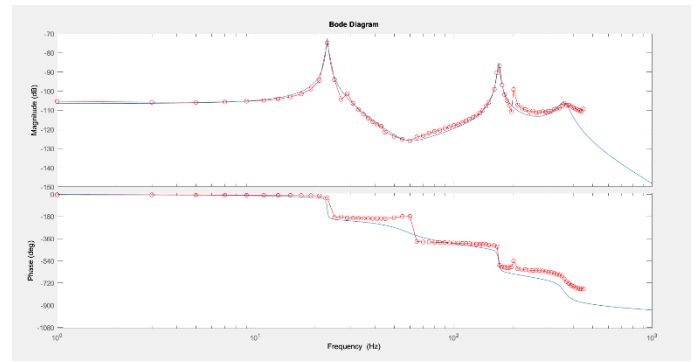


圖 5.1 主動平台掃頻結果

2.平台系統關係：

在一個系統中，透過不同的轉換過程來觀察平台之間的數值比變化，這一連串的轉換過程能夠有效地將訊號從一個形式轉換為另一個形式實現系統的多功能操作。首先，電壓透過功率放大器轉換成電流，這個轉換過程反映了電流和電壓之間的阻抗關係。功率放大器的作用是放大電壓訊號，將其轉換為相應的電流，以滿足系統的需求。接著，電流通過音圈馬達轉換成力，這牽涉到音圈和磁場之間的相互作用。音圈受到電流通過時產生的磁場影響，產生一個力，這個力使得音圈在系統中運動。這種轉換將電能轉換為力，同時體現了電磁學原理在系統中的應用。最後，這個力被用來推動平台，進而導致平台的位移。平台的位移是系統最終期望實現的輸出，而前述轉換過程確保了由電壓開始的輸入能夠在各個階段經過有效的轉換，實現對平台位移的精確控制。這樣的轉換過程使得系統能夠在不同形式的能量或信號之間進行轉換，了解平台系統間的關係，之後可以更好的達到控制效果。



圖 5.3 功率放大器轉換示意圖

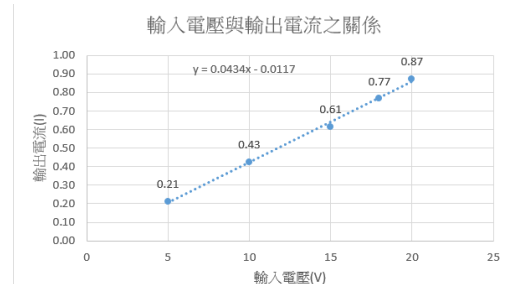


圖 5.4 電壓與電流之關係圖

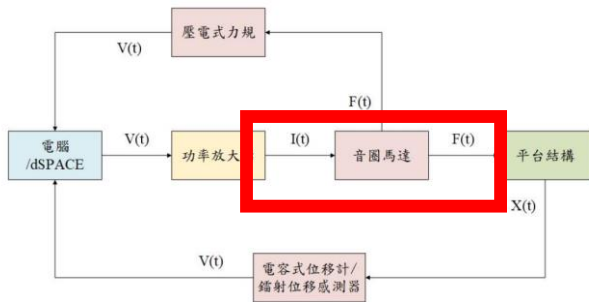


圖 5.5 音圈馬達轉換示意圖

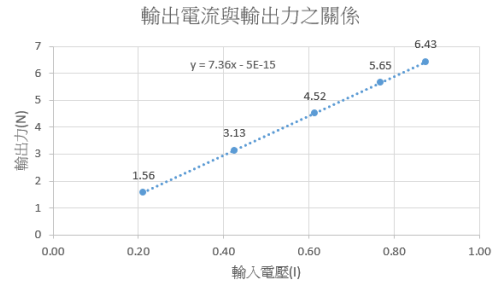


圖 5.6 電流與力之關係圖

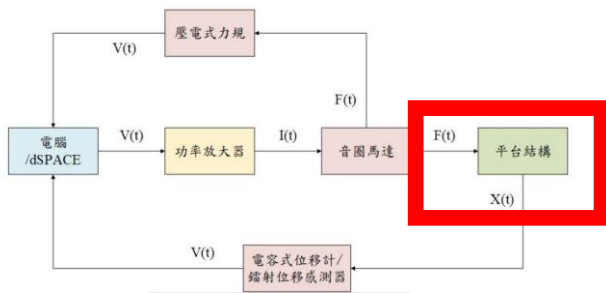


圖 5.7 平台結構轉換示意圖

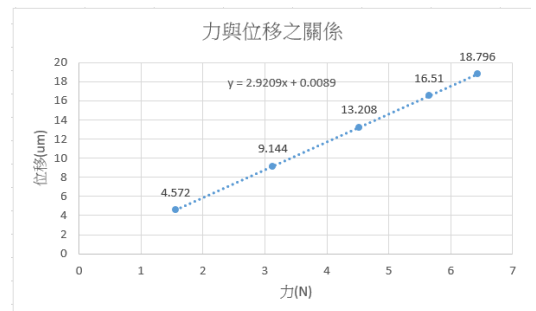


圖 5.8 力與位移之關係圖

3. 控制參數模擬及實驗：

在獲得數學模型後，我們進行控制參數的模擬，該過程包括模擬不同的控制器設置。像是調整 PID 控制器的比例、積分和微分參數以觀察系統的響應。這樣的模擬分析可以深入了解控制系統的行為，並為調整系統以滿足特定性能要求提供有效的工具。

透過改變 PID 控制器的比例參數，我們可以觀察控制器對系統響應的影響。增加比例參數可能加速系統的響應，但也可能導致系統不穩定。調整積分參數可以影響系統的穩定性和穩態誤差，而微分參數的調整則可影響系統對於外部干擾的響應。

參數模擬讓我們能夠分析不同控制器設置下系統的動態特性，根據模擬結果調整控制器的參數，以達到所需的性能，以期望能提高響應速度、減小穩態誤差和增強系統的穩定性，最終以模擬分析的結果來設計控制系統的實驗，利用設計好的參數進行控制實驗，驗證模型的有效性，並最終實現系統的控制目標。

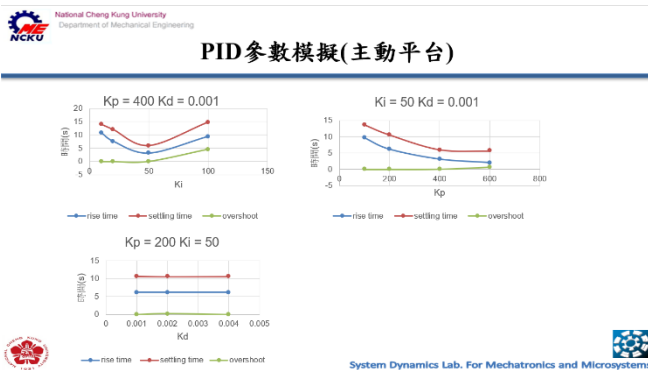


圖 5.9 PID 參數模擬(主動平台)

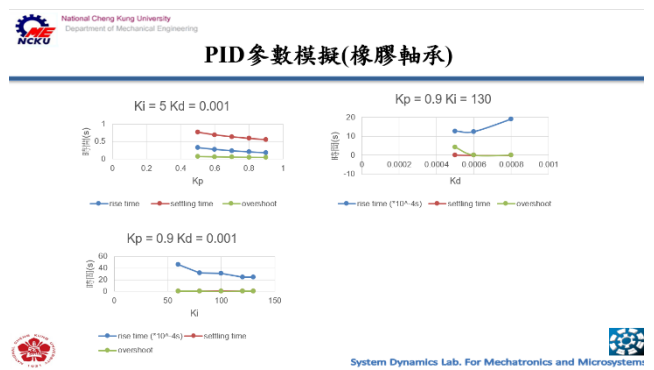


圖 5.10 PID 參數模擬(橡膠軸承)

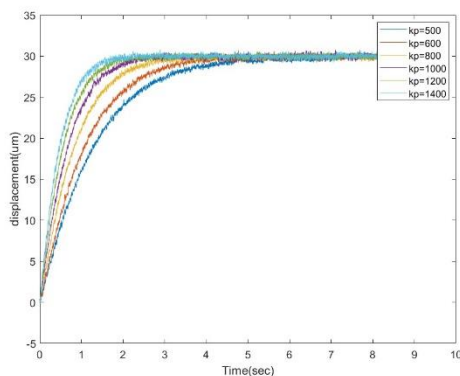


圖 5.10 PID 控制實驗

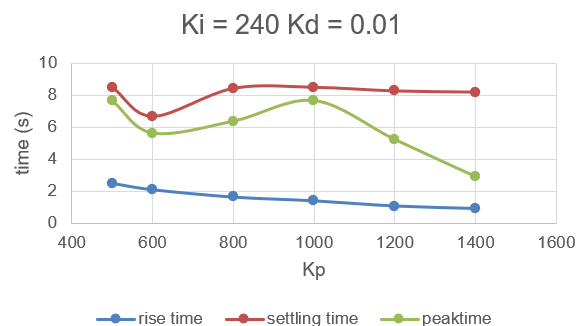


圖 5.11 PID 控制實驗結果

4. 頻率響應分析：

由於控制實驗結果與模擬結果之間存在一些差異，我們進一步分析系統在無控制狀態下的頻率響應和擬和結果，特別是在系統達到穩態狀態（約 6-8 秒）時。在穩態時，實驗所得的雜訊明顯比模擬結果多，為了更深入研究這種現象，我們透過快速傅立葉轉換觀察在 6-8 秒時的頻域訊號，可以發現到，在這段時間內，除了原先的三個系統自然頻率的峰值之外，還觀察到了大量的干擾雜訊。這些附加的頻率峰值可能源於外部干擾、環境因素或者系統內部的非線性特性。這些干擾的存在可能解釋了為何實驗與模擬之間的不一致性，並強調了在真實環境中進行控制的挑戰性質。未來會進一步的研究和分析這些干擾以釐清它們對系統行為的實際影響，同時也為進一步改進實驗設計和控制策略提供了指引。

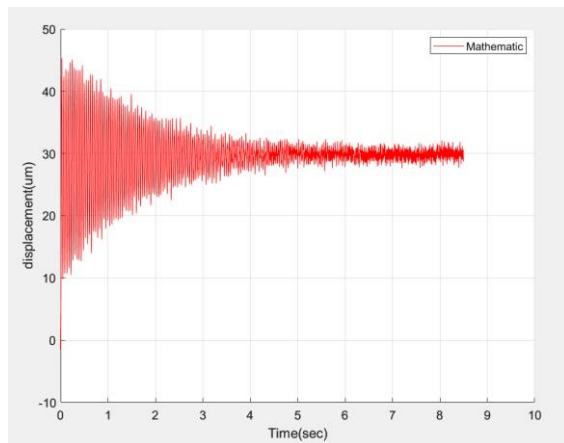


圖 5.12 頻率響應實驗

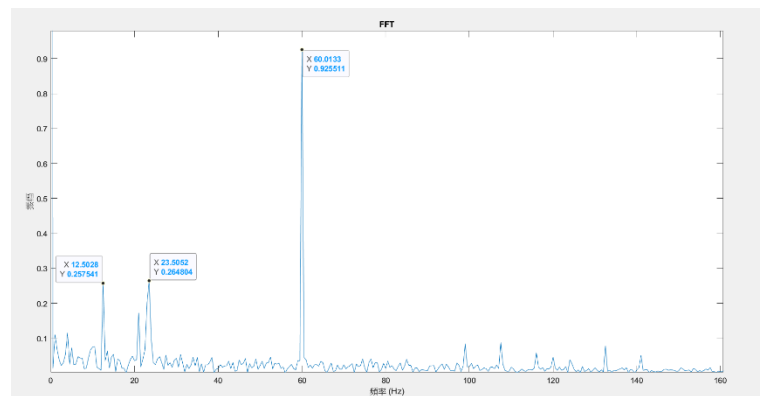


圖 5.13 實驗 FFT 分析

(六)、困難與挑戰

1. **硬體平台修改：**原本的平台的撓性結構上已有鐳射位移感測器、CCD 鏡頭及音圈馬達等多項東西，若要再增加感測器需得考慮左右對稱和是否會影響到中心平台運動等因素。
2. **SMC 控制器設計：**因為 SMC 控制是之前未曾接觸過的領域，若想要成功設計出控制器，須不斷的去學習、翻閱資料、與老師討論，此為一大挑戰。
3. **控制策略比較：**本計畫在控制器上選擇了 PID 控制及 SMC 控制，所需比較的部分包含殘留振動量、最大衝程量、安定時間等各項指標，這些數據是需要透過不斷實驗、修改才能得出的。
4. **實驗操作與結果分析：**本計畫之實驗涉及到許多數學模型，須將此模型進行轉換以利後續實驗進行，以及在實驗中各種感測器測得的訊號需在電腦與平台上來回傳輸，如此不僅涉及到韌體撰寫，也需熟知實驗步驟及流程，雖然之前已有稍微涉獵 Matlab/Simulink，但也僅僅只是略知皮毛，若想要完成實驗並結果分析，仍需在此方面努力，在此學期也修習數值分析等相關課程，望對於實驗有助益。

(七)、預期結果

月份/完成項目	七	八	九	十	十一	十二	一	二
資料收集								
硬體平台修改								
感測器選定及架設								
系統動態測試								
建立平台模型								
控制平台建立								
軟體學習								
設計控制器								
控制器應用								
完成定位實驗								
系統整合								
平台架設於線性馬達								
擾動抑制的控制器設計								
擾動抑制實驗								
CCD影像檢測								
實驗分析與修正								
報告撰寫與修改								

本計畫最終目的為提升光學檢測效率，須完成的項目：

1. 硬體平台修改及優化
2. 兩種控制方法設計及比較
3. 減少主動平台殘留振動
4. 提升平台光學檢測效率

完成以上項目後，可從 CCD 鏡頭拍攝的影像效果來判斷控制結果的成效。雖然目前在產線上機台檢測已經逐漸取代了人工目視檢測。但此計畫在精密工程領域上尚未有應用，不過希望我們對於此領域的學習、振動抑制上的研究會有助益。未來希望對於主動平台振動抑制的研究能夠真正的提升光學檢測效率並被實際應用。

(八)、參考文獻

- [1] Alkhatib, Rabih, and M. F. Golnaraghi. "Active structural vibration control: a review." Shock and Vibration Digest 35.5 (2003): 367.
- [2] S. Dalela, P. S. Balaji, and D. P. Jena, "A review on application of mechanical metamaterials for vibration control," Mechanics of Advanced Materials and Structures, Volume 29, 2022, pp. 3237-3262.
- [3] R. Bansal, A. Patra and V. Bhuria, "Design of PID Controller for Plant Control and Comparison with Z-N PID Controller," International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, V. 2, no. 4, April 2012, pp. 2250-2459.
- [4] Y. Pan, C. Yang, L. Pan and H. Yu, "Integral Sliding Mode Control: Performance, Modification, and Improvement," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 7, pp. 3087-3096, July 2018.
- [5] Hiroshi Toshiyoshi, Suna Ju, Hiroaki Honma, Chang-Hyeon Ji & Hiroyuki

- Fujita (2019) ,“MEMS vibrational energy harvesters,” Science and Technology of Advanced Materials, 20:1, 124-143
- [6] Fahmida Islam, M. M. Nabi, Md. Mehedi Farhad, Preston Peranich, John E. Ball, Chris Goodin, "Evaluating performance of extended Kalman filter based adaptive cruise control using PID controller," Proc. SPIE 11748, Autonomous Systems: Sensors, Processing, and Security for Vehicles and Infrastructure 2021, 1174807 (12 April 2021)
- [7] X. Yu, Y. Feng and Z. Man, "Terminal Sliding Mode Control – An Overview," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 2, pp. 36-52, 2021
- [8] M. D.Symansa, M. C..Constantinoub, “Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review,” *Engineering Structures* vol. 21, no. 6, June 1999, pp.469–487.
- [9] Hu, Junfeng, and Dachang Zhu. "Vibration Control of Smart Structure Using Sliding Mode Control with Observer." J. Comput. 7.2 (2012): 411-418.
- [10] 鄧諺舉, “新型橡膠軸承一維定位平台之分析、設計與控制”, 國立成功大學機械工程學系學位論文, 2015
- [11] 潘思辰, “應用於抑制光學檢測系統振動之主動平台設計與控制”, 國立成功大學機械工程學系學位論文, 2019

(九)、需要指導教授指導內容

本計畫需要指導教授指導之內容涵蓋相關文獻到主動平台修改、SMC 控制器設計與結果分析比較，具體內容如下所示：

1. 設備與平台之修改與操作
2. 控制面板軟體操作
3. SMC 文獻探討及學習
4. 實驗模擬和分析
5. 研究報告撰寫和指導