

南台科技大學  
九十五學年實務專題製作成果報告

專題  
名稱

可變阻尼機構與控制系統設計實作

補助  
經費  
來源

教學卓越計畫

學校年度預算

經費核

定序號

109

系 所： 機械工程

指導老師： 劉雲輝

專題學生： 49213009

(學號)

49213038

49213003

何祥裕

(姓名)

葉育豪

余憲政

中華民國 九十六 年 五 月 十 五 日

南台科技大學 95 學年實務專題製作  
參與國際/全國性競賽成果

競賽名稱	2007 年台北國際發明暨技術交易展
作品名稱	可變阻尼機構與控制系統設計實作
指導老師	劉雲輝
參賽學生	何祥裕、葉育豪、余憲政、謝志忠
競賽結果	尚未開始報名
檢附競賽 成果資料	<input type="checkbox"/> 作品照片 <input type="checkbox"/> 頒獎照片 <input type="checkbox"/> 獎狀影本(以一位同學獎狀影本為代表) <input type="checkbox"/> 獎牌、獎盃照片 <input type="checkbox"/> 獲獎新聞剪報 <input type="checkbox"/> 其他：

## 可供推廣之研發成果資料表

<無此項事實者，可免於提供此表>

■ 可申請專利(研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容)

■ 可技術移轉

作品名稱	可變阻尼機構與控制系統設計實作
指導老師	劉雲輝
技術/創作名稱	可變阻尼機構與控制系統
發明人/創作人	劉雲輝、
技術說明	中文： 1. 運用模糊控制等方法進行可變阻尼機構的動作控制 2. 成品可以運用於 AOI 等精密製程設備之振動控制 3. 可變阻尼機構與控制系統主要應用在精密製程設備與量測機台上，主要功能在可調整控制組尼效果的變化，於平台上機構無作動情形下時阻尼之效果很小，用來隔絕外在環境對設備所造成的振動，當平台上設備作動時，阻尼效果立即變大，用以快速抑制機台本身所造成的擾動。
可利用之產業 及 可開發之產品	TFT-LCD 產業設備之防振產品
技術特點	快速抑制機台本身所造成的擾動，而又不降低地板環境振動隔離效果
推廣及運用的價值	可以作為 TFT-LCD 產業設備之防振產品

# 可變阻尼機構與控制系統設計實作

何祥裕 葉育豪 余憲政 劉雲輝  
南台科技大學 機械工程學系

## 摘要

本專題將研發可控制式阻尼器與水平調整閥再配合彈簧整合成半主動式隔振系統。其中阻尼器之效果作用係由於邏輯開關電路去控制氣壓缸作動，再帶動夾持機構進而產生阻尼的效果，當阻尼器夾持(ON)時，阻尼變大可縮短隔振平台晃動的時間，達到降低隔振平台自然頻率的晃動，而阻尼器放開(OFF)時，阻尼變小則可隔絕外在環境的振動，此阻尼器機構具有三方向(x y z)的減振功能，構造簡單，成本低廉。

## 1. 前言

由於近年來電子技術、精密製程與檢測技術不斷地朝向微小化演進，加上自動化的創新演進，使得製程設備與量測機台所要求的振動規範也越來越嚴格。雖然許多精密儀器設備普遍都採用氣墊式系統來作為隔振的功能。但遇到質量大的物件移動時(如機台上的移動載具)，往往造成機台不停的振動搖晃，影響製造或檢測的進行。以用於面板產業的自動線寬量測機為例，機台上的 400~500 kg 的水平方向移動載具之移動行程高達 1 公尺，若是只使用氣墊彈簧則會因支撐太軟而晃動不停，加入阻尼器可以使擾亂能量快速衰竭，但是因增加支撐的硬度而造成隔振效果降低，其中水平振動會造成影像模糊，垂直振動則會造成影像失焦問題。因此如何改善此種振動之問題是相關產業十分重視的主題。控制理論為模糊控制演算法則。模糊控制是以類似人類經驗法則 if-then 模糊性的思考模式為決策過程[1、4]。對複雜或難以用明確數學模型來表示的系統，若以直覺或經驗為基礎的模糊控制，亦可獲得不錯的控制效果[1、2、3]。

依廣義隔振系統的控制方式可分為三種：被動控制系統、主動控制系統、半主動控制系統。被動控制是利用振動時產生的位移或是阻尼器因振動產生依反方向的控制力來削減或是阻止振動，不需外加能量來操控[1]。主動控制是藉由感應器測得振動，經由主動控制理論的計算立即求出最佳的控制力，再由制動器控制結構物的反應[1]。半主動控制是近年興起的一項熱門的研究，反應速度快。目前半主動阻尼器有磁流變液式、電流變液式、可變摩擦式、可變油壓缸式…等[1、4]。

許多超精密設備考慮到成本問題而選用被

動式隔振系統時，往往採用可以隨時調整高度之氣墊彈簧(air spring)以保持機台之水平。與金屬彈簧相比，它的優點是自然頻率很低，通常有效隔振頻率下限可以達到 2~3 Hz。然而被動式隔振系統都面臨到同一個問題，在機台上有其他的擾動源(如水平方向的移動載具)時，整個機台會以隔振系統自然頻率晃動而很慢才會停止，往往影響到設備儀器的運作。一般改善的方案是加上傳統阻尼器抑制自然頻率的晃動，然而此會降低隔離地板振動的效果。因此，如何選擇適當阻尼係數的阻尼器一直是隔振專業人員困擾的問題。

被動式隔振系統的另一個問題是對於低頻率振動的隔離效果不佳，尤其是隔振系統自然頻率的振動。對於結構第一自然頻率超過 20、30 Hz 的多數儀器設備而言，這些無法隔離而傳遞上來的低頻率地板振動在經過設備儀器結構體時，已經大幅衰弱而沒有明顯的影響。然而對於現代微奈米等級的精密設備儀器而言，許多都對 2、3 Hz 的低頻率振動十分敏感，變化緩慢的低頻率振動可能對於承載大質量元件的樑結構造成類似靜態彎曲的明顯位移，造成系統內各個元件的相對運動，嚴重影響其定位的精度。近年來，市場上已經有各種主動式隔振系統的產品，以加強低頻率振動隔離的效果。然而此種隔振系統成本很高，並且不是所有精密儀器設備都需要使用到如此高規格之隔振系統，因此，可變阻尼機構與控制系統的研發應運而生。

C. Erin 等學者[6]針對雙空腔之氣墊彈簧的數學模型進行理論與實驗之研究，參考圖 1，在早期的理論建模研究中忽略了振動膜(diaphragm)的效應，使得實驗與理論預測產生了明顯的誤差。C. Erin 將此影響納入到數學模型中，改善了模型預測的準確性。目前有許多氣墊彈簧產品採用此種雙空腔之型式，藉由改變限流器的孔隙來改變隔振器之阻尼效果。

國外進行振動主動控制的研究有越來越多的趨勢，L. Benassi 與 S.J. Elliott[7]運用慣性激振器進行主動隔振平台的研究，並以相對位移量回饋至 PID 控制器進行慣性激振器自然頻率與阻尼值的調整。慣性激振器相對於其他致動器的不同點是不需要反作用力的支撐基礎，為了保證主動隔振控制器良好的穩定性，慣性激振器必須有低的自然頻率與良好的阻尼特性，但是前者會導致慣性激振器過大的靜態位移，而他們提出之前述方法可以有效克服此項問

題。在平台的主動隔振上則採用振動速度回饋控制來達到減振的目的。

Kim 等學者[8]運用阻抗方法建立主動隔振平台的運動方程式，幫助瞭解隔振平台的運動現象與進一步控制機制的研究。在實驗部分，以分散式速度回饋控制電磁式致動器進行隔振平台的主動控制研究，在平台的四隻腳都各自安裝與彈簧阻尼平行並聯而獨立運作的電磁式致動器，每隻腳支撐設備的位置安裝加速規，振動加速度量測值經由積分器獲得速度值，再經過可以調整增益的功率放大器後回饋至致動器。由模擬與實驗結果顯示，在 200 Hz 以內的振動能量可以降低 14dB 以上。在實驗方面，使用電磁式致動器可能會因為剛性不夠而有控制過程中的彈回現象，在微振動控制上可能會較為困難。後來他們以此篇研究為基礎，提出針對彈性結構進行振動主動控制的研究成果[9]，文獻中以前一篇所提之主動隔振系統架構置於彈性設備結構與地板基座之間，其中地板基座有彈性與剛性兩種情形，以相同的控制方式進行 0~200 Hz 頻率範圍振動的主動控制研究。從實驗的控制結果來看，自然頻率振動的主動控制效果較佳，而在高頻範圍則效果有限。

交通大學白明憲教授[10]亦運用電磁致動器作為控制驅動器，白教授分別運用 LQG(linear quadratic Gaussian)與  $\mu$  synthesis 兩種控制方法，針對兩種主動隔振架構進行數值計算與實驗研究，其中兩種硬體架構的不同在於是否使用中間質量塊，中間質量塊是用來減少負載動態行為以及致動器之間交互作用對整個系統的影響，這些影響可能造成系統不穩定。在實驗架構上採用加速規與電磁致動器作為控制感測與驅動器，實驗顯示  $\mu$ -synthesis 比 LQG 控制有較好的強健性。

除了電磁式致動器之外，壓電致動器亦常被運用在振動控制上，Skullestad [11]即運用 PID 控制以及壓電致動器與壓電效應之力感測器訊號回饋進行太空船上精密儀器隔振的主動控制，這些精密儀器多數使用六足平台(hexapod platform)進行定位，平台的每隻腳完全一樣，因此作者只針對其中一隻腳安裝主動控制系統進行相關研究。依據文獻的實驗結果，在振幅 2- 20 m、頻率 2-20 Hz 的單頻振動皆可以達到-15dB 以上的減振效果。不過此隔振腳若是用在太空船上，為了考量重量因素，結構的剛性不足可能會造成多模態的振動，而致動器與感測器的間距亦會導致成為非最小相位(non-minimum phase)系統，使得實際控制設計更為複雜。

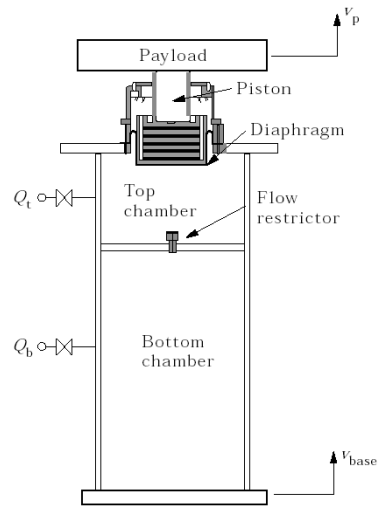


圖 1 雙空腔之氣墊彈簧

## 2. 研究方法

本計畫主要以回饋控制技術研究為主題，發展可變阻尼機構與控制系統。由感測器獲知機台上之振動現況，經演算法得到控制訊號以驅動致動器帶動傳動機構調整阻尼器的機構，進而改變阻尼器的阻尼係數(damping coefficient)以適應不同振動現況的需求。研究工作分成四個部分，分別是機構設計、控制方法研究、分析軟體設計、系統整合與測試。在進行機構設計同時，亦發展適用於可變阻尼機構控制方法。接著建立系統模型，進行控制方法的電腦模擬分析，藉以修改控制法則。最後，我們將實驗驗證此控制方法的減振效能與穩定性，並進行系統整合設計。以下分別詳細說明各部分之研究工作內容：

### 2.1 機構設計：

機構設計部分包含阻尼器元件與傳動元件等等設計。可變阻尼機構藉由感測機台振動行為的狀況而隨時改變隔振系統的阻尼常數，使隔振系統具有軟硬變化的效果，藉以適時有效的消散機台的擾動行為，亦可達到隔離地板高頻率振動的良好效果。因此，本研究工作之第一步將進行阻尼器的機構設計。我們將利用電腦輔助設計軟體來設計機構模型，請參考圖 2 之整體機構立體組合圖。整體機構分為三個部份，最下方為一面開口之六面體容器，內置黏性流體；中間為另一個上方開口之六面體容器，內部放置汽缸與夾持機構，底部並裝設彈簧使其與下方六面體容器底部保持一定的間隙；最上層機構則固定於機台，作為中間夾持機構夾持的對象。

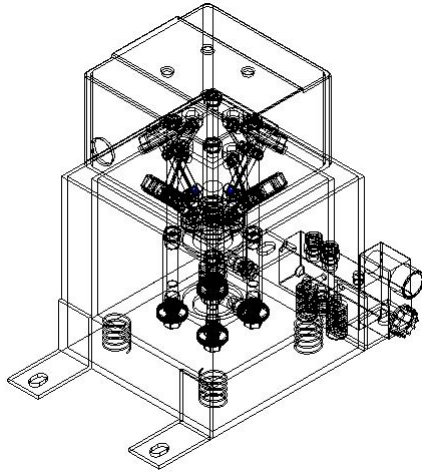


圖 2 整體機構立體組合圖

## 2.2 控制方法研究

控制理論為模糊控制演算法則，模糊控制是以類似人類經驗法則 **if-then** 模糊性的思考模式為決策的最佳化過程，請參考圖 3 之控制流程圖。模糊控制架構包含五個主要項目：定義變數、模糊化、知識庫、邏輯判斷及解模糊。其控制理論建構設計步驟如下：

- (1) 量測控制器輸入變數之明確值。
- (2) 將輸入變數之明確值正規化。
- (3) 模糊論域分割之隸屬函數，找到相對應的模糊標籤與隸屬度。
- (4) 解模糊化將一模糊數值轉換為一明確值，以此明確值來控制實際系統。

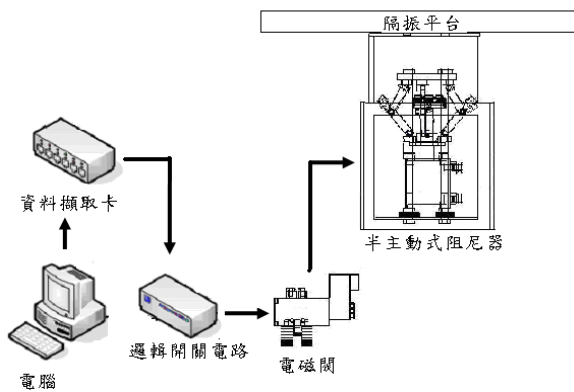


圖 3 控制流程圖

另外，我們亦研究另一種控制方法，擬採用 3 輸入/1 輸出的類神經模糊方法，其中輸入分別為振動之位移訊號、速度訊號、與加速度訊號，其系統架構如圖 4 所示。

若是全部有  $N$  條規則，則其中第  $m$  條規則定義如下：

**Rule  $m$** ：若  $x_1$  是  $A_{1i}$  且  $x_2$  是  $A_{2j}$  且  $x_3$  是  $A_{3k}$ ，則

輸出為  $y_m$  (6)

其中， $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分別是輸入， $A_{1i}(i=1\sim p)$ 代表  $x_1$  的模糊集合， $A_{2j}(j=1\sim q)$ 代表  $x_2$  的模糊集合， $A_{3k}(k=1\sim r)$  代表  $x_3$  的模糊集合，而  $m = [(i-1)q + j-1]r + k$ ， $y_m$  代表第  $m$  條模糊規則的輸出。第  $m$  條模糊規則之真實度使用點積運算法(product operator)可以表示如下：

$$w_m(x_1, x_2, x_3) = A_{1i}(x_1)A_{2j}(x_2)A_{3k}(x_3) \quad (7)$$

其中， $A_{1i}(x_1)$ 代表  $x_1$  的真實度， $A_{2j}(x_2)$ 代表  $x_2$  的真實度， $A_{3k}(x_3)$ 代表  $x_3$  的真實度。由重心法得解模糊化輸出

$$y = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r w_m(x_1, x_2, x_3) y_m}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r w_m(x_1, x_2, x_3)} \quad (8)$$

類神經模糊學習演算法的目的在於調整歸屬函數之參數及每條模糊規則的輸出值，使其達到最佳化。目標函數定義為

$$E = \frac{(\varepsilon^* - \varepsilon)^2}{2} \quad (9)$$

其中  $\varepsilon^*$  為控制結果期望值， $\varepsilon$  為類神經模糊模式的實際控制結果。本研究所引用的規屬函數為三角形(其他類型的歸屬函數如鐘形函數、梯形函數等亦可考慮使用)，考慮歸屬函數  $A$ ，其中心值為  $a$ ，寬度為  $b$ ，如圖 5 所示，則歸屬函數  $A$  可以表示成  $A(a, b, x)$ 。由定義得

$$A(a, b, x) = \begin{cases} 1 - \frac{2|x-a|}{b} & a - \frac{b}{2} \leq x \leq a + \frac{b}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

本計畫所提出的類神經模糊學習演算法是應用最陡坡降法，使目標函數  $E$  最小化，即

$$a(t+1) = a(t) - \alpha \frac{\partial E}{\partial a} \quad (11)$$

$$b(t+1) = b(t) - \beta \frac{\partial E}{\partial b} \quad (12)$$

$$y_m(t+1) = y_m(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial y_m} \quad (13)$$

其中  $t$  代表疊代次數， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  為學習率。

以上是本計畫初擬之類神經模糊方法基本概念，至於詳細之推導、修正、與訓練學習步驟則是本計畫的研究工作。圖 6 是初擬之類神經模糊控制方塊圖。



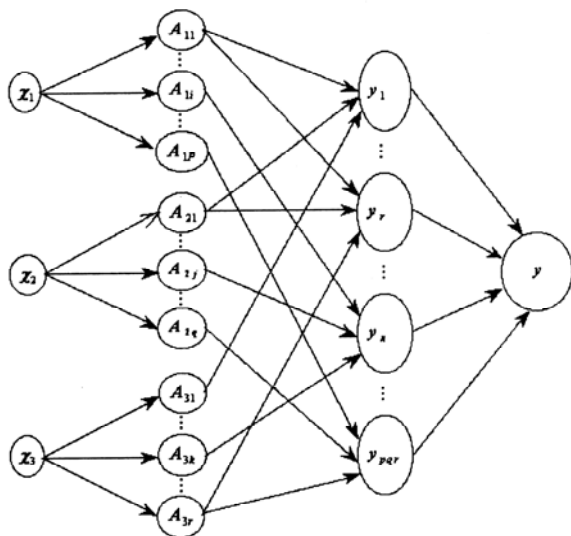


圖 4：類神經模糊模式示意圖

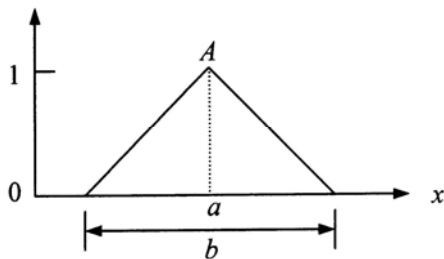


圖 5：歸屬函數定義域

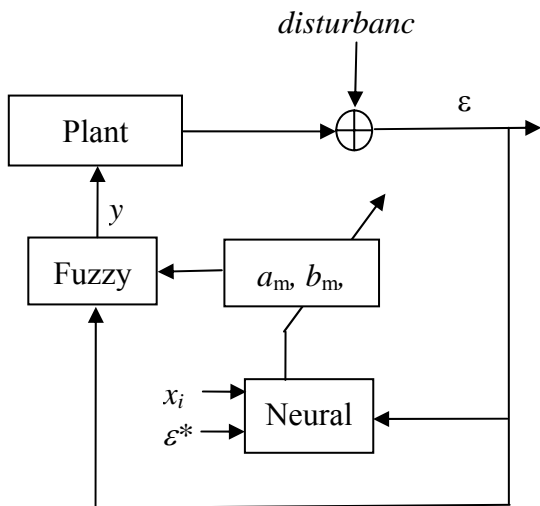


圖 6：類神經模糊控制方塊圖

### 2.3 分析軟體設計

在資料擷取方面的介面卡將採用美商慧基儀器股份有限公司所開發的 NI6034E 之介面卡，擷取由加速規量測之平台機構作動所造成的加速度訊號。再使用圖控式程式語言「LabVIEW」，設計圖控式介面應用系統，依照所得加速度訊號經由模糊控制最佳化後控制調

整步進馬達的作動來達到適時的減緩機台本身所造成的振動。

### 2.4 系統整合與測試

首先將裝置好的半主動式阻尼組裝置再隔振平台底下，利用一固定機構於平台上製造重複性高的振動訊號源，於平台上的加速規傳回量測的振動訊號，經由資料擷取(DAQ)介面卡傳送訊號給控制器的模糊控制系統處理，使用模糊控制系統最佳化的訊號來控制調整步進馬達改變阻尼效果的大小，使得整個擾動過程中阻尼的效果能依照震動加速度大小的改變而調整至最適合的值，而適時的減緩抑制擾動的振動，當平台上的擾動消除後又能迅速將阻尼效果調整至最小，隔絕外在環境震動對設備所造成的影響。

- (1) 完成半主動式阻尼組機構設計製作，及適合本專題控制目地之模糊控制法則
- (2) 此專題可以讓我從實務研究工作中驗證課堂上所學的力學與控制理論，並培養獨立思考與解決問題的能力。
- (3) 在 LabVIEW 軟體設計方面，將會增加我在程式設計的邏輯觀念與能力，此專題的實務經驗對我將來在職場上會有很大的幫助。

圖 7 為可控制式阻尼器機構實體圖。可變阻尼機構與控制系統藉由感測機台振動行為的狀況而隨時改變阻尼常數，使隔振系統具有軟硬變化的效果，藉以適時有效的消散機台的擾動行為，亦可達到隔離地板高頻率振動的良好效果。許多超精密設備考慮到成本問題而選用被動式隔振系統時，往往採用可以隨時調整高度之氣墊彈簧(air spring)以保持機台之水平，因此必須具備可以偵測機台水平並隨時調整充放氣的機構，圖 8 則為我們自行設計製作之水平調整閥(leveling valve)機構圖



圖 7 可控制式阻尼器機構實體圖



圖 8 水平調整閥(leveling valve)機構圖

### 3. 實驗流程

我們將用一個隔振平台，分別在平台 4 角落下均各放一顆彈簧，在彈簧的上下均有橡膠墊，4 顆彈簧主要支撐平台之重量，再將可控制式阻尼器的外筒裝滿齒輪油，阻尼器以木板鎖住再用 C 型夾固定在隔振平台之下方，由圖控式介面控制程式，經由資料擷取卡，傳送訊號給邏輯開關電路，由邏輯開關電路去控制電磁閥操作氣壓缸，使夾持機構作動來控制阻尼器的 ON-OFF 狀態。我們將分別測試阻尼器夾持與放開(ON-OFF)狀態的阻尼效果與阻尼器切換時的衝擊影響。

#### a. 阻尼器夾持(ON)與放開(OFF)的阻尼效果

經測試後可從圖 9、圖 10 得知當阻尼器放開(OFF)時，且施加外力將平台往下壓一個初始位移，快速放開，此時平台會以自然頻率在振盪，並以指數型態衰減，恢復到平衡位置，所經的時間約 4 秒，反之，當阻尼器夾持(ON)時，阻尼會抑制平台晃動，會快速衰減至平衡位置，其時間大約花 1 秒，因此可得知阻尼器夾持與放開，時間相差約 4 倍左右。阻尼器夾持時可快速縮短晃動至平衡所經的時間，明顯達到抑制效果。

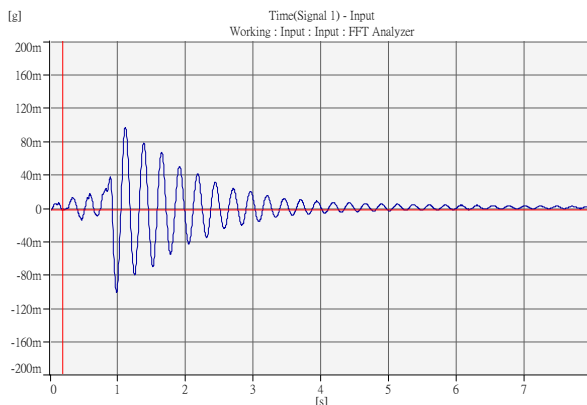


圖 9 阻尼器放開(OFF)時的時域圖

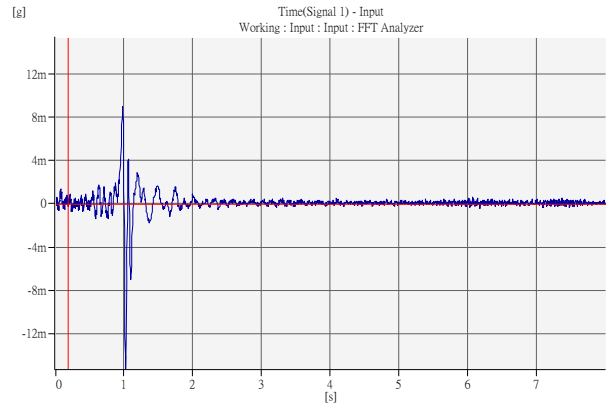


圖 10 阻尼器夾持(ON)時的時域圖

#### b. 阻尼器切換時的衝擊影響

當阻尼器夾持或放開時都會影響平台的擾動，可由圖 11、圖 12 得知阻尼器切換從 ON 變 OFF，衝擊所造成的最大峰值為 20.1mg，且緩慢的衰減至平衡位置。當阻尼器切換從 OFF 變 ON 時衝擊所造成的最大峰值為 70.1mg，快速衰減至平衡位置，大約一秒就能衰減下來。

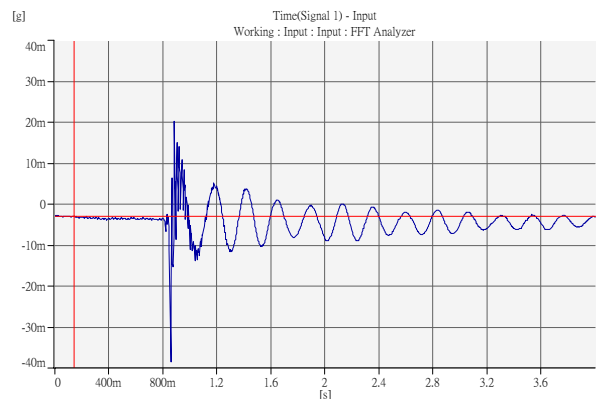


圖 11 阻尼器切換從 ON 變 OFF

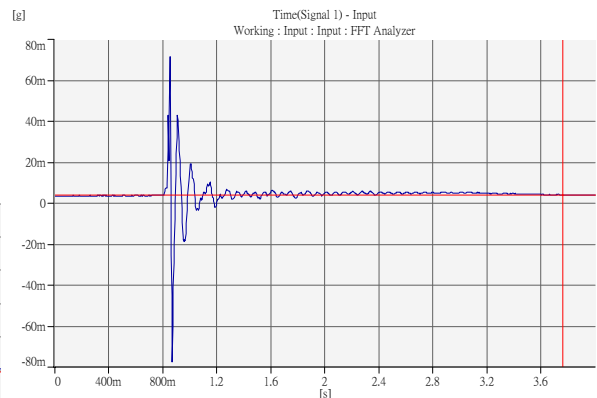


圖 12 阻尼器切換從 OFF 變 ON

### 4. 結果與討論

a. 當阻尼器夾持(ON)時，阻尼變大可縮短



隔振平台晃動的時間，隔振平台從晃動至平衡位置所經的時間由四秒縮減為一秒，且可降低隔振平台自然頻率的振幅，而阻尼器放開(OFF)時，阻尼變小則可隔絕外在環境的振動。因此使用可控制式阻尼器可以依照設備當時情況的需求改變阻尼大小快速減緩機台本身所造成的擾動。

**b.** 阻尼器夾持或放開時會影響平台的擾動，當阻尼器切換從 ON 變 OFF，衝擊所造成的最大峰值為 20.1mg，且緩慢的衰減至平衡位置。當阻尼器切換從 OFF 變 ON 時衝擊所造成的最大峰值為 70.1mg，快速衰減至平衡位置，大約一秒就能衰減下來。

### 誌謝

感謝南台科技大學提供本研究計畫的經費補助。

### 參考文獻

- [1] 徐德修，磁流變阻尼器之結構半主動模糊控制，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
- [2] 莊志湧，模糊控制應用於立體視覺伺服 XZ 機械平台，中原大學機械工程學系碩士學位論文。
- [3] J. Lin, Wei-Zheng Liu, Experimental evaluation of a piezoelectric vibration absorber using a simplified fuzzy controller in a cantilever beam, Department of Mechanical Engineering
- [4] 盧煉元，半主動摩擦阻尼器於結構防震運用之探討，國立高雄第一科技大學營建工程研究所碩士論文。
- [5] 虛擬儀控程式設計[LabVIEW 7X]，蕭子健、王智昱、儲昭偉編著，高立書局。
- [6] C. Erin, B. Wilson, J.Zapfe, 1998, "An Improved Model of a Pneumatic Vibration Isolator: Theory and Experiment", Journal of Sound and Vibration, 1998, 218(1), pp. 81-101
- [7] L. Benassi, S.J. Elliott, 2004, "Active vibration isolation using an inertial actuator with local displacement feedback control", Journal of Sound and Vibration, Vol.278, pp.705-724
- [8] S.M. Kim, S.J. Elliott, and M.J. Brennan, 2001, "Decentralized control for multichannel active vibration isolation", IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 9, No. 1, pp.93-100
- [9] X. Huang, S.J. Elliott, and M.J. Brennan, 2003, "Active isolation of a flexible structure from base vibration", Journal of Sound and

Vibration, Vol.263, pp.357-376

- [10] M. R. Bai, W. Liu, 2002, "Control design of active vibration isolation using  $\mu$ -synthesis", Journal of Sound and Vibration, Vol. 257, No. 1, pp.157-175
- [11] A. Skullestad, 2003, "Improved instrument accuracy using active vibration damping", Mechatronics Vol. 13, pp.451-464