

一. 摘要

本計劃為整合型計劃—「超高精度磁浮定位機構之驅動量測與控制」之子計劃三。本年度主要之目標在完成雙軸磁浮平台之精密姿態及位置量測，以及平台之運動控制系統。

傳統之精密定位系統（例如：以伺服馬達配合導螺桿），多有摩擦與背隙之問題，雖已累積多年之設計經驗，可以較好之「誤差預算」加以克服，然其所能達成之精度仍然有限。因此，本整合型計劃欲以磁浮機構配合音圈驅動馬達及精密之光學量測系統，達成精密定位之要求。

本年度中，在高精密度雷射量測方面，本子計畫配合經費之核定分別完成兩軸 3DOF 之高精密度雷射量測，作為平台運動控制之定位訊號，同時亦做為系統校正之標準。而在平台運動控制方面，完成以音圈馬達驅動兩軸運動，並配合軌跡規畫及智慧型控制方法達成高精密度定位之要求。

高反射率，高平面度之平面反射鏡兩組及 Retro-reflect corner cube 鏡組，及雷射發射器，用以設置三軸光路。所量得之資料為 X 軸, Y 軸之行進量及 Y 軸之側偏量 (Yaw)。雷射量測光路圖如下圖 2-1

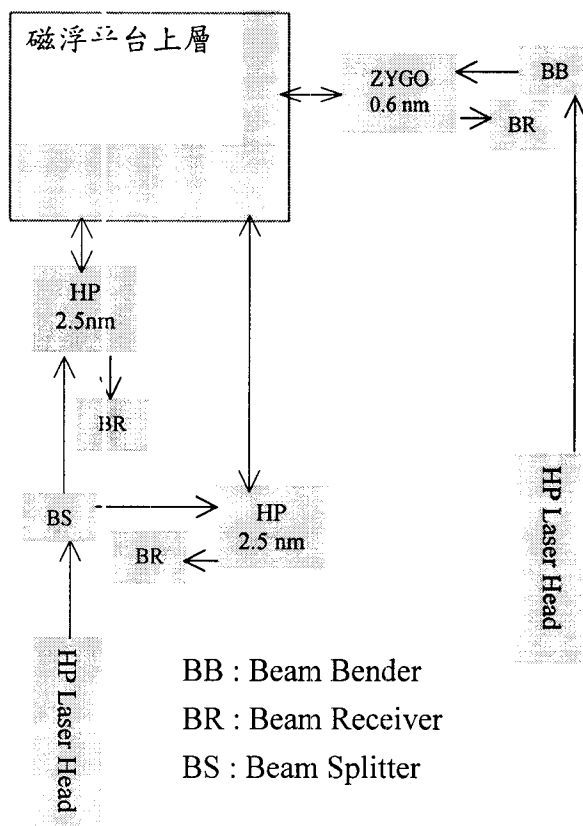


圖2-1：雷射量測光路圖

二. 精密位置量測設計與實驗結果

2.1 量測系統設計

雷射量測系統:

雷射量測設備包括：ZYGO 公司之 0.6 nm 超高精度雷射干涉鏡，及 HP 公司之 2.5nm 之高解析度雷射干涉鏡兩套，配合

電感式位移感測器:

電感式位移感測器的工作原理如圖 2-2 所示，由位在感測器探測頭 (Sensor Head) 之參考線圈 (Reference Coil) 與主動線圈 (Active Coil) 所共同產生的感應磁場，與同樣位在感測器探測頭的導體產生電磁感應，進而在導體與目標物間產生感應電流 (Inductive Current)。而此感應電流又會產生一個磁場去抵銷或減低原

先電參考線圈與主動線圈金屬產生的磁場，而磁場所減少的量會經由主動線圈被分析電路所得到進而被轉換成電壓值輸出。所得的輸出電壓值會與導體、目標物間的距離成正比。其規格如表 2-3。感測器安裝位置如圖 2-4

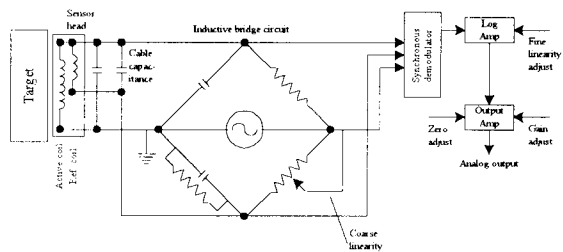


圖 2-2：電感式位移感測器的工作原理

量測範圍		0~2mm
類比電壓輸出	輸出電壓	0~2Volt
	輸出阻抗	100Ω
	解析度	0.1%×量測範圍
	線性度	± 0.1%×量測範圍
	頻率響應	DC~3.3kHz(-3dB)
溫度擾動	感測器	0.03%×量測範圍/℃
	訊號放大器	0.03%×量測範圍/℃
電源供應		110/120/220/240/VAC ± 0.1%，50/60Hz
電源消耗		5VA
重量	感測器	55g
	訊號放大器	320g

表2-3：電感式位移感測器規格表

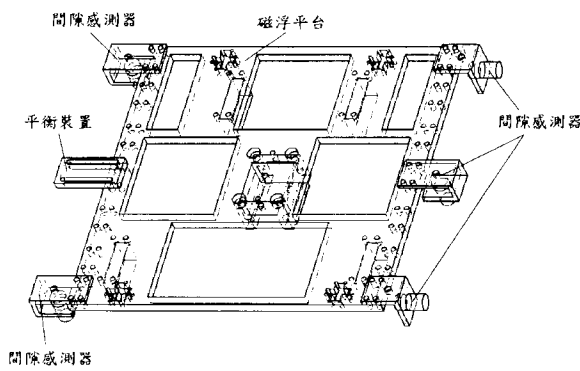
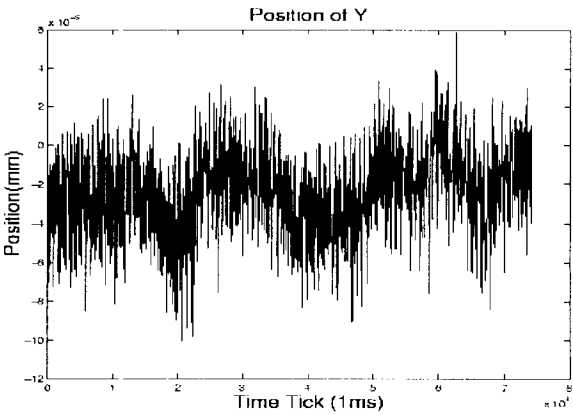


圖 2-4：上層磁浮平臺及電感式位移感測器安裝位置圖

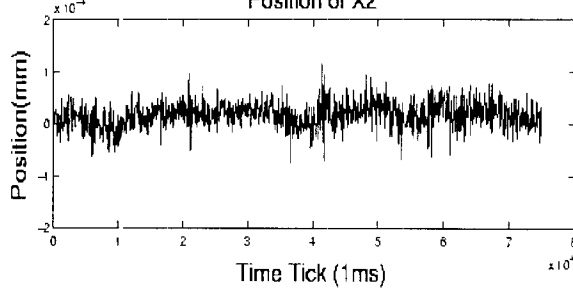
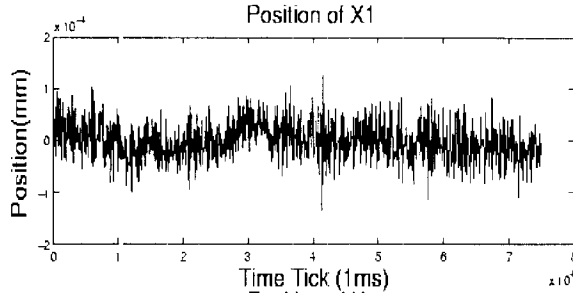
2.2 平台姿態量測

雷射量測:

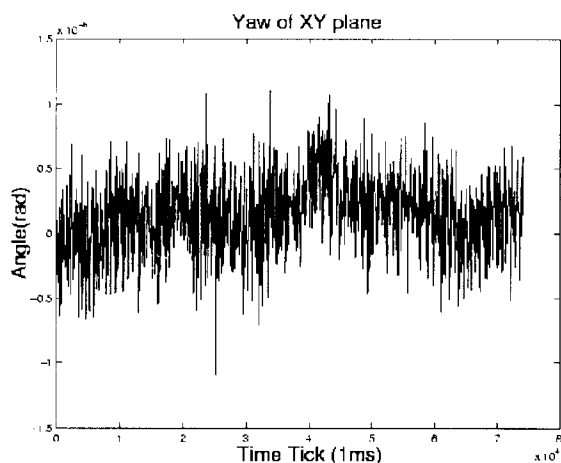
本計劃原定為六軸量測，但由於經費限制量測之設備未能購全，因此選擇三軸進行量測。雷射量測包括 Y, X1, X2 分別為上層平臺之行進方向及上層平臺之側向，其精密度分別為 0.6nm, 2.5nm, 2.5nm。所得之資料經轉換後可得 Y 軸之行進量，X 軸之側偏量及 XY 平面之旋轉量(Yaw)。其靜態量測結果如下圖 2-5，分別為 Y:ZYGO 0.6nm 及 X1: HP 2.5nm , X2:HP 2.5nm 三軸。而其量測之平均值約為 24.6nm, 45nm 及 47nm, XY 平面之旋轉量(Yaw)經計算之平均為 2.1e-7 rad。下圖 a 為 Y 軸，圖 b 上為 X1, 下為 X2，圖 C 為 XY 平面之旋轉量。



(a) Y軸量測資料



(b) X軸(上:X1, 下:X2)量測資料



(c) 由X1, X2轉換所得之XY平面旋轉量

圖2-5：雷射量測之靜態量測資料

電感式位移感測器量測:

實驗平台已經架設完成了五個電感式位移感測器，來測量平台除了推進軸(Y軸)方向之外的五個姿態，圖 2-5 為其靜態量測資料，由結果顯示環境擾動造成的誤差約為數十 μm 。

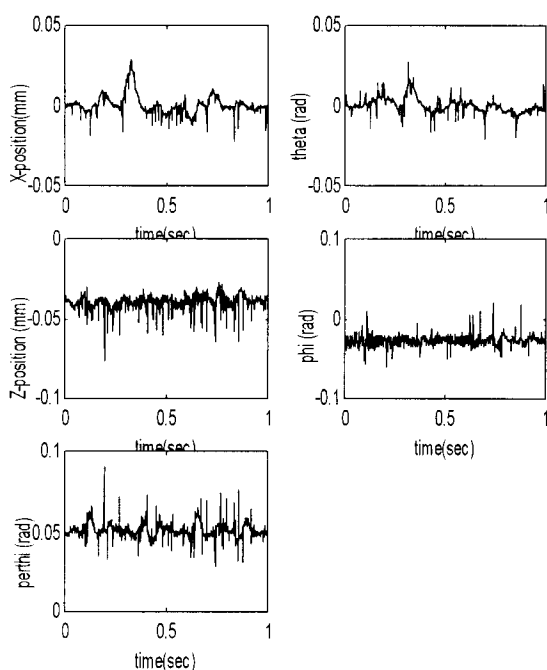


圖2-6：電感式位移感測器之靜態量測資料

三. 控制器之設計與實驗結果

控制器之設計:

極點置放法：這種控制法最主要的就是在回授的路徑中，加入一個常數回授增益 K ，而使得系統可以達到漸近式穩定。通常極點置放法適用於如圖 3-1 狀態空間方程式表示式。

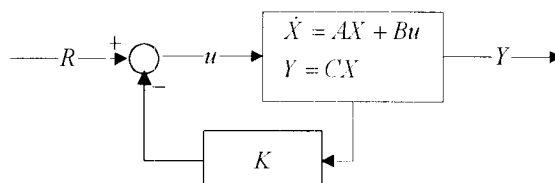


圖 3-1：以狀態回授法來做控制器

其控制的原理是利用 $(sI - (A - BK))$ 這個閉迴路系統的特性方程式之特性，而因為在這個系統中， A 和 BK 都是 24×24 的矩陣，所以可以找出 12 對的極點，而透過使用狀態回授法，使得整個系統在閉迴路的狀態下的極點均為負極點而成為一個閉迴路穩定的系統。至於如何由一個非線性的方程式，得到一個線性化的矩陣，我們則採用 Jacobian 線性化來解決。

滑動模式控制：滑動模式控制強韌控制的一種方法，它主要分成兩部份，第一部份為基本的控制設計，再加上第二部份去處理不確定方面的問題，來解決系統的不確定，滑動模式控制理論是將原本的非線性、且包含著一些不確定因素的 n 階系統，轉換成一階的系統方程式，這會使得系統較容易控制。

在設計中，磁浮平台是一個有十二個自由度，而且以十二個輸入完全控制的系統，在實驗中，上層平台的穩態控制部分僅考慮平台的 X, Z, θ, ϕ, ψ 五個姿態變數，和音圈馬達的部分(Y軸)分開來控制，控制

器設計將極點位置設在左半邊平面，並應用滑動模式控制理論，為每一個姿態變數設計一個滑動面，使得系統轉換成以 s 為變數的1階方程式。

平台姿態穩態控制:

穩態控制的五個自由度之取樣頻率為 $1kHz$ ，而推進方向上之取樣頻率為 $50kHz$ 。在電流輸入方面，先選擇控制五個輸入電流來控制姿態，一個輸入電流來控制音圈馬達的行進部分。

圖 3-2 顯示四種不同的平台初始狀態，狀況一表示 X 值有極大的正偏差，狀況二為 X 值有極大的負偏差，狀況三代表平台對垂直軸，亦即 Z 軸有很大的正旋轉，狀況四則為負旋轉，圖 3-3 是初始條件為狀況三之控制結果。

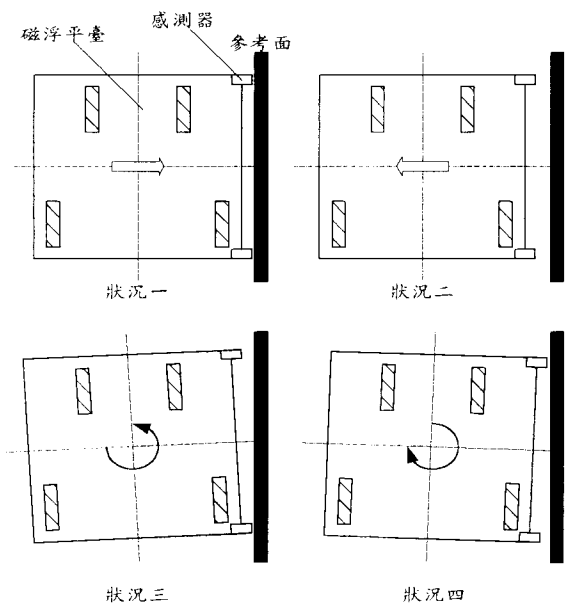


圖 3-2：各種不同的平台初始狀態

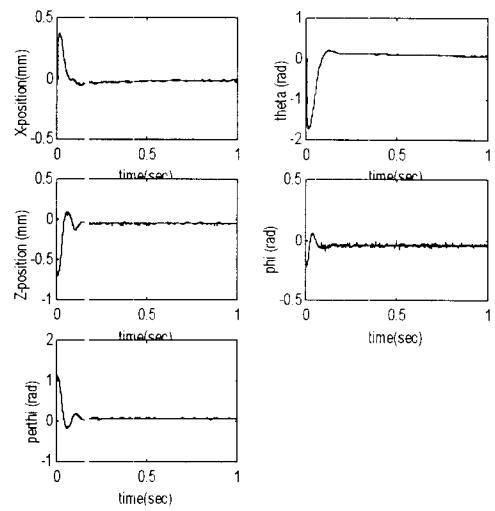


圖 3-3：狀況三的控制結果

圖 3-3 表示當平臺對 Z 軸有很大的正旋轉（狀況三）時的控制情形，可以看出在 0.5 秒內就能達到需要的精度，其穩態量測資料如下表 3-4，由計算的結果，其穩態的響應之誤差為 μm 級。由以上的實驗得知控制器確實可將不同的初始值帶到穩定的一個狀態。

	平均值	標準差
X	$1.4007 \times 10^{-3} mm$	$3.6214 \times 10^{-3} mm$
Z	$-3.8851 \times 10^{-2} mm$	$6.2947 \times 10^{-3} mm$
θ	$2.7196 \times 10^{-3} rad$	$4.7075 \times 10^{-3} rad$
ϕ	$-2.7061 \times 10^{-2} rad$	$6.6991 \times 10^{-3} rad$
ψ	$5.3105 \times 10^{-2} rad$	$6.2947 \times 10^{-3} rad$

表 3-4：狀況三的控制結果穩態量測資料

音圈馬達驅動控制:

接下來是做推進方向（ Y 軸）的實驗，以下的圖3-5、圖3-6為在直線行進軸（ Y 軸）所量得的實驗結果，各有四組 Y 軸位置資料，其取樣頻率為 $50kHz$ 。

圖3-5為外界的干擾對實驗的影響，也就是在穩定器還沒有開的時候，輕輕的敲

打桌子或是打開門，圖左上角為沒有施力的情形，平均值為 $-3.0829 \times 10^{-5} mm$ ，而右下角則為經過1秒後，有人開門所得的結果。有外來干擾的平均值為 $-8.0829 \times 10^{-4} mm$ 可看出環境的影響大致上為百nm級。

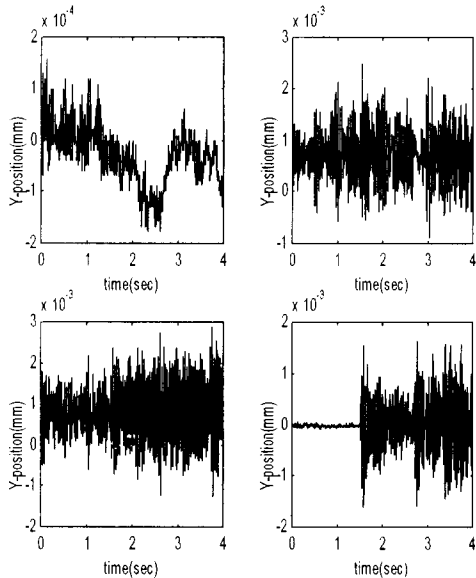


圖 3-5：外界的干擾對實驗的影響

圖 3-6 為開啟 Y 軸行進驅動器的情形。由圖可看出，看出在 0.2 秒內就可以達到所預想的位置，而由計算得知其穩態誤差平均最大者為 $1.8367 \times 10^{-4} mm$ ，標準差最大者約 $8.223 \times 10^{-4} mm$ ，可看出控制效果大約為百 nm 級。

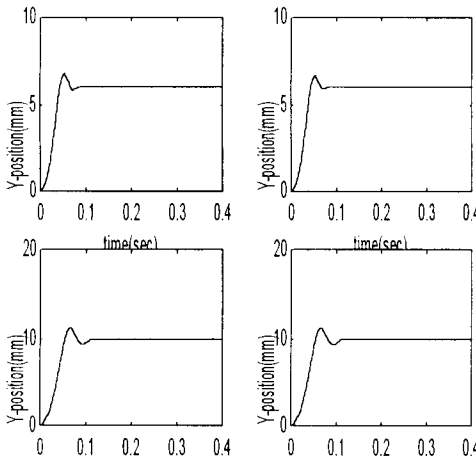


圖 3-6：開啟 Y 軸行進驅動器之實驗結果

實驗結果與誤差討論:

觀察穩態控制實驗結果，發現實驗值的誤差值很小，而且振動量都能控制在 μm 級左右，而在角度方面，控制器也能將它逼近於零之小數後兩位數（2 order）左右。在姿態的控制方面，可以說達到了高精密的要求，且穩定時間也在 0.1 秒左右達成。

而在音圈馬達的推進方面，由實驗的資料看出，就算是平臺本身靜止不動，不開啟任何控制器，也會有數十 μm 級的雜訊存在，這個雜訊可能是由於雷射量測本身而來，例如溫溼度的變化對雷射量測的漂移現象，也有可能是因為環境的震動所影響，如戶外的車輛，亦或是旁邊大樓冷氣的運轉。雖然實驗是在防震平臺上實行，但受到影響也不可忽略。

但是因為現在僅分別控制五個姿態變數和音圈馬達方面的變數，承載平台在控制的過程中，平台的所有自由度都會受電流影響，不單只是如此，還會受到一些外在的環境影響，雖然會達到穩定（asymptotically stable），但仍會看到平台在平衡點附近的些微震動，將這種震動的情況改善，則是未來最重要的課題，未來將考慮加入溫溼度補償，防震效果的再加強。

另外，誤差的來源也可能是因為平台的高度和位置在控制的過程中，純粹由浮動器中的永久磁鐵決定，而磁鐵兩側與中央的磁力有些差距，所以平台的高度也會有些不同，於是讓實驗在軌道中央磁場較均勻處進行，並且讓操作點更接近所定義的平衡點。

四．結論

我們利用極點置換法與滑動模式控制理論，設計出控制器來，並且運用實驗設備，來驗證所設計的控制器是否可行，

結果能夠在極短的時間內達到穩定，誤差的控制良好，達到理想的精密度，而且也能包容系統的一些不確定因素，保有系統的強韌性，證明了滑動模式理論對於磁浮系統的非線性現象，能夠達到所要求的精度。

在實驗的過程中，可以得知環境對於實驗所造成的影響，為了高精密度的控制，在將來勢必加入環境控制這一項，包括有溫溼度控制，震動防制，防止落塵...等等。

未來的工作，將會整合雙軸的磁浮系統，也就是說，到時候將會是十二個自由度的控制問題，而雙軸的磁浮導引系統之間的作用及耦合，都將是控制器設計之時所應考慮的，屆時將會設計一套完整且具有強韌性的控制器，使得高精密度定位控制的目標能達成。

五. 參考文獻

[1] Alexander H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice-Hall, Inc. 1992.
[2] Hewlett-Packard Co., High Performance Motion Control for Precision Equipment, 1990.
[3] Hewlett-Packard Co., Product Note 527A-2 Achieving Accuracy and Repeatability with the Hp 5527A Laser Position Transducer System, 1990.
[4] G. Sommargren, "A New Laser Measurement System for Precision Metrology, " *Precis. Eng.*, Vol.9, No.4, 1987, PP.179-184.
[5] G. Sommargren, "Linear/Angular Displacement Interferometer for Wafer Stage Metrology, " *SPIE Symp. Microlithog.*, San Jose, CA, Feb. 1989.
[6] C. Wang, "Laser Doppler Displacement Measurement, " *Laser Optron*, Sep. 1987,

PP.69-71.

[7] N. Bobroff, "Residual Errors in Laser Interferometry from Air Turbulence and nonlinearity" *Appl. Opt.*, Vol.26, No.13, 1987, PP.2676-2681.
[8] B.Shafai, S.Beale, P.LaRocca, "Magnetic Bearing Control Systems and Adaptive Forced Balancing ", *IEEE control system*, April, 1994
[9] Rajesh Rajamani, J.Karl Hedrick, "Adaptive Observers for Adaptive Automotive Suspensions: Theory and Experiment", *IEEE Transaction of control system tech.*, Vol.3, No. 1, March, 1995
[10] . Suun Jun Joo, Jin H.Seo, "Design and Analysis of the Nonlinear Feedback Linearizing Control for an Electromagnetic Suspension System", *IEEE Transaction of control system tech.*, Vol.5, No.1, Jan, 1997
[11]. Jurg-Shan Lin, Ioannis Kanellakopoulos, "Nonlinear Design of Active Suspensions", *IEEE control system*, June, 1997
[12]. Chen-Sheng Ting, Tzue-Hseng, "Design of Fuzzy controller for active suspension system", *Mechatronics* Vol. 5, No.4, pp 365-383, 1995