

雙軸超高精度磁浮定位機構之驅動、量測與設計--

子計畫一:磁浮平台本體及驅動機構設計(III)

計畫編號：88-2213-E-002-083

執行時程：87年8月—88年7月

計畫主持人：顏家鈺 台灣大學機械系教授

中文摘要

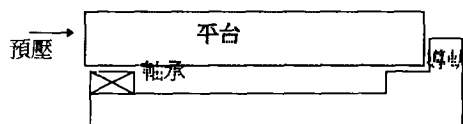
本篇報告的重點在於建立線性斥力磁浮加上音圈馬達的模式，及控制系統在整個20cm的行程中，達到5nm的位置解析度。這篇報告首先介紹整個系統的構造，接下來推導數學模式，並使用回授線性化和最佳控制的方法來控制系統，最後做一些模擬來了解系統特性。

英文摘要

This paper focuses on the modeling of the linear repulsive meglev bearing plus VCM and control issues involved in achieving 5 nanometer position resolution over the full 20 centimeter stage range of travel. This paper begins with an overview of the mechanical configuration of the stage; next, we develop mathematical models of the stage elements and integrate them into a detailed model of the system. This model is used extensively in the Feedback Linearization and LQG of the control system design. After describing these control schemes, we conclude with some demonstrations of the stage's positioning capabilities.

一、計畫緣由與目的

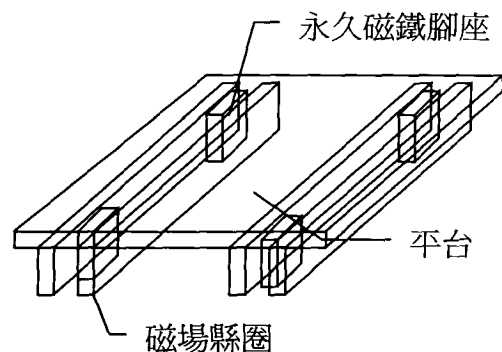
目前的精密定位平台多數是倚靠極高精密度的線性軸承達到高姿態準確度的維持，左邊的軸承只是單純的支撐，右邊的軸承除了支撐之外同時有導軌的作用，所以右邊的軸承製造加工時必需達到非常高級的精密度。



本計畫認為以目前工業上常用的幾種軸承—從滾珠軸承、摩擦軸承、氣墊軸承、到磁浮軸承中，磁浮軸承從控制的角度而言最為直接，同時磁浮軸承具有乾淨，沒有磨損或顆粒，亦不需要潤滑作用，同時最主要的它可達成無摩擦，無背隙的動作。本計畫因此決定採向研究以磁浮軸承作為載具的承載機構的方

向。為達成類似主動軸承的觀念，此軸承必需留下足夠的間隙作為主動間隙調整之用。同時雖然本系統為二維的定位機構，考慮其定位及姿態的準確性時必需考慮本系統六個自由度的運動。主動軸承的所在位置必需可以容易的改變平台姿態自由度中的任一個自由度。

依原計劃所設計，本計劃嘗試設計製造一高精度雙軸定位機構。



為求提高動態特性，不採取一般多重驅動的方式，而研究單純以一層高精度驅動器做為驅動機構的可行性。為達成在大多數場合（例如真空，或是充填特種氣體の場合）中使用的條件，本計劃以磁浮方式作為承載的線性軸承。雙軸的定位準確度以多軸雷射量測儀作為量測方式。為達成高精密度，高頻寬（高動態性能）的驅動要求，並研究以音圈馬達作為驅動的方式。

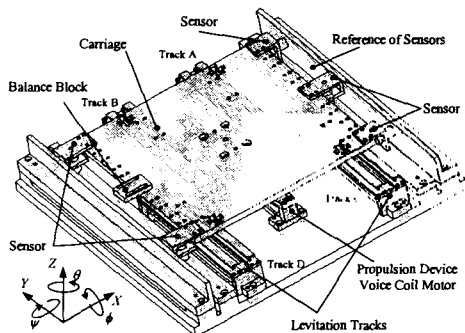
二、磁浮系統之控制

主要的系統可分成兩部份，一為直線型斥力式磁浮軸承 (linear repulsive magnetic levitation bearing)，另一為音圈馬達 (voice coil motor)。而本階段之目標為完成後者之定位控制，並進而完成二維的定位機構。

在音圈馬達的定位控制中，我們使用雷射量測設備來量測平台的位置，以作為回受訊號來進行控制。

直線型斥力式磁浮軸承（圖一）是一種四

軌式之磁懸浮系統，其每一軌包含一組穩定器 (stabilizer)，和一組致浮器 (levitator)。其中超動器又可分為主動式致浮器 (active levitator) 和被動式致浮器 (passive levitator)。前者乃是以電磁鐵與永久磁鐵間所產生的斥力來作為浮力產生之來源；而後者則是使用兩個同極相向的永久磁鐵來產生斥力。本系統加入被動式致浮器的主要目的在於希望可以藉此被動式致浮器所產生的斥力來浮其整個平台。如此便可避免在原始設計中以主動式致浮器作為斥力源的危險作法。因為若是單純的以主動式致浮器來浮起平台，我們必須不斷的通入電流，在這種情形下，線圈將非常容易發熱，將會提高線圈覆漆融化的機率。這對我們系統將會造成很大的危害。在加入被動式致浮器之後，上述的問題便可以解決，而主動式致浮器將被賦予新的任務，那就是用來提高系統的剛性。



圖一、直線型斥力式磁浮軸承之立體圖

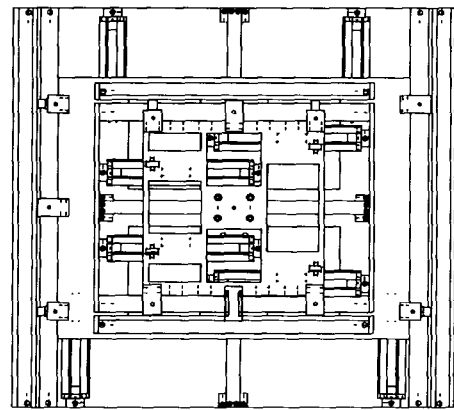
在本年度的研究中，我們首先要完成下層直線型斥力式磁浮軸承的姿態控制。此系統為一五個輸入五個输出的複雜系統。其五個输出即為圖一中五個間隙感應器所量得的訊號。而其五個輸入與每軌穩定器、致浮器間的關係如表一。其中 I_{stab1} ， I_{stab2} ， I_{lev1} ， I_{lev2} 和 I_{lev3} 便為系統的五個控制輸入電流 (control input current)。

	主動式致浮器	穩定器
Track A	I_{lev1}	I_{stab1}
Track B	I_{lev1}	I_{stab1}
Track C	I_{lev2}	I_{stab2}
Track D	I_{lev3}	I_{stab2}

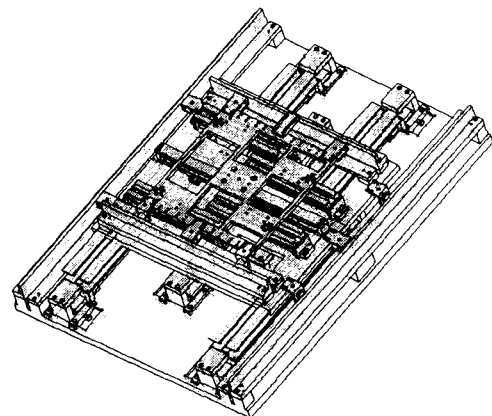
表一

下層平台的設計，雖然在去年度就已完成，但是為了日後操作上的方便，我們又對於原先設計做了一些修改。因為原始設計中並未考慮到系統負荷改變的狀況，主要的浮力皆由

永久磁鐵產生，線圈只是用來修正平台姿態，所以線圈所能產生的浮力不大，因此當系統負荷改變時，就必須增加或減少永久磁鐵，如此就必須將平台拆下更換，造成使用上不便；為此我們將軌道的高度設計成可以改變，當系統因為外加負荷稍微改變時，可以藉由改變軌道的高度，改變永久磁鐵的間隙，進而改變永久磁鐵所產生的致浮力，而不需改變永久磁鐵的數量。此改變可從圖二與圖三比較而得知，圖二為原先設計，圖三為變更之後的設計。在尺寸的設計上，因為考量到防震桌的大小，以及雷射量測設備的架設空間，所以對於下層平台的尺寸必須以滿足這兩項要求為優先，因此我們將軌道的距離拉近，以避免寬度太大而妨礙雷射量測設備的架設。對於其他的尺寸，我們也做了對應的必要修正。

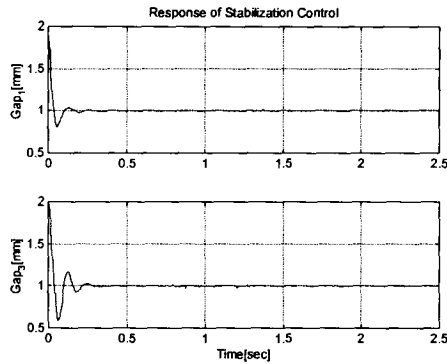


圖二、原先之設計圖

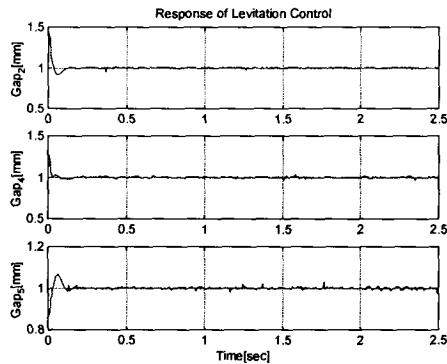


圖三、變更後之設計圖

對於下層平台的姿態控制，由於下層平台與上層平台的基本架構是相同的，只是尺寸、線圈數及永久磁鐵的體積不同，因此在姿態控制上我們仍然是沿用上層的控制方法，所不同的只是系統參數的不同，而實驗結果如圖四、圖五所顯示，達到了良好的控制效果。



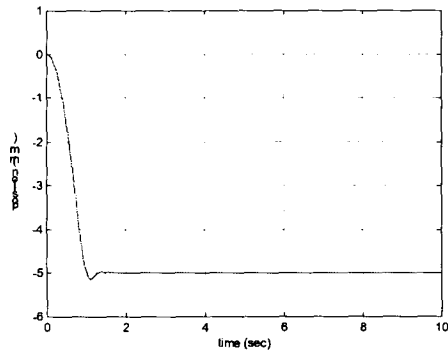
圖四、磁浮軸承穩定子系統的輸出



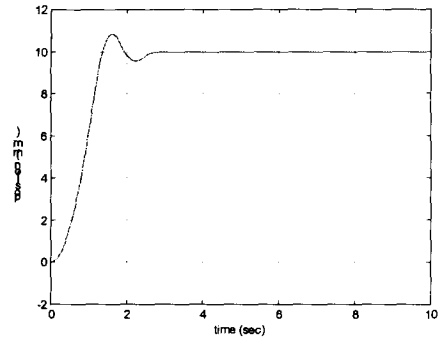
圖五、磁浮軸承致浮子系統的輸出

接著我們所要完成的是音圈馬達的定位控制，音圈馬達是一個單輸入單輸出的系統，其輸出是由雷射干涉儀所量得的位置訊號，其輸入則是通入線圈的控制輸入電流（control input current）。

為了先確認系統可以達到不錯的控制，我們首先以簡單的 PID 控制來做為我們的控制器。而藉由實驗的結果，我們可以看到系統的控制效果還不會太差，因此在更換使用其他較精確的控制法來做為控制器後，應該可以比 PID 得到更好的效果，因為 PID 的參數是用嘗試錯誤法來找的。



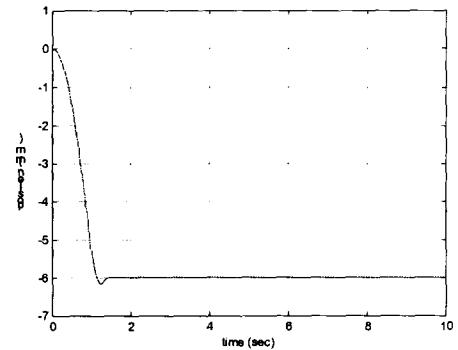
圖六、上層音圈馬達的輸出



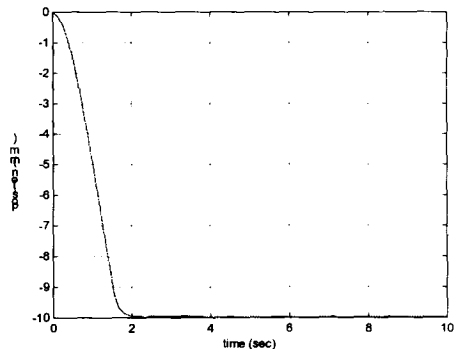
圖七、下層音圈馬達的輸出

對於個別兩軸的運動，從實驗結果可以看出確都可以有一定的控制效果存在，但是當我們嘗試將兩軸同時驅動時，便發現到出乎預期之外的問題，當兩軸同時安裝時，用來浮起下層平台的被動致浮裝置，其磁力會嚴重的干擾到上層平台的控制，因為磁力增強，使的原先負載較小的上層平台，其致浮力及側向偏移力也都大幅增加，以致於原先設計利用較小電流來控制姿態的上層平台，其控制電流並無法將平台的姿態控制好，進而造成音圈馬達無法量測到其位置的回受訊號。

為了在最小的變動下消除下層平台永久磁鐵對上層平台的影響，我們只好改變平台的配置，不依據原先設計的方式，而將上層平台的軌道、音圈馬達、sensor 的 reference 全部墊高，如此才使的下層永久磁鐵的影響減小，使得系統得以控制。



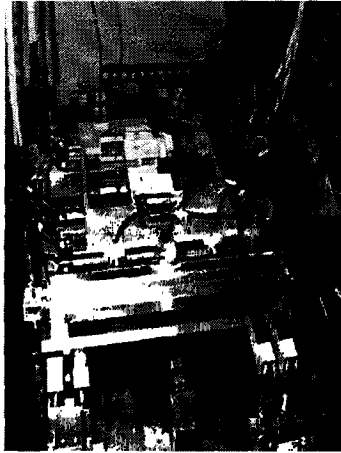
圖八、上層音圈馬達的輸出



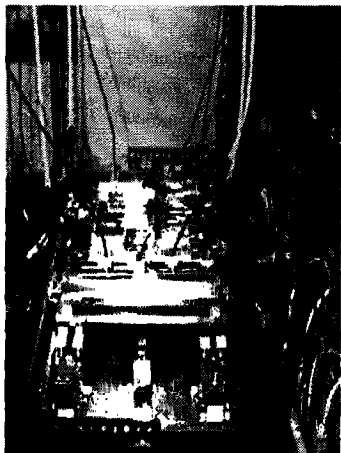
圖九、下層音圈馬達的輸出

三、系統架構

系統的實際外觀，就如同下圖所示，因為拍攝角度的關係，所以造成影像有失真。



圖十、系統外觀一



圖十一、系統外觀二

五、參考書籍

- [1]. E. P. Ronald, *Magnetically Levitated Micro-Robotics*. PHD dissertation. The University of Texas at Austin, 1988.
- [2] I. Y. Wang. *A Magnetic Levitation Silicon Wafer Transport System*. PHD. Thesis, The University of Texas at Austin, 1993.
- [3] Edward J. Haug , *Intermediate Dynamics* , Prentice-Hall, Inc. 1992.
- [4] J. G. David, *Introduction to Electrodynamics*. Prentice-Hall, Inc., 1981.
- [5] P. Lorrian and D. R. Corson, *Electromagnetism, Principles and Applications*. WH. Freeman and Company, San Francisco, 1979.
- [6] E. M. Purcell , *Electricity and Magnetism*,

Berkeley Physics Course vol 2. McGraw-Hill, 1965.

- [7] Michael A. Henson and Dale E. Seborg, *Nonlinear Process Control*, Prentice-Hall, Inc. 1997.
- [8] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, *Applied Nonlinear Control* , Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [9] J. M. Maciejowski , *Multivariable Feedback Design* , Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [10] Brian D. O. Anderson and John B. Moore, *Optimal Control, Linear Quadratic Methods*, Prentice-Hall, Inc. 1989.
- [11] J.-P. Calvet and Y. Arkun. *Feedforward and Feedback Linearization of Nonlinear Systems and Its Implement Using Internal Model Control (IMC)*, Ind. Eng. Chem. Res., 27:1822-1831,1988.
- [12] T. A. Kendi and F. J. Doyle, *An Anti-windup Scheme for Input-output Linearization*, In Proc. European Control Conf., Rome, Italy, 1995.
- [13] V. Nevistic and L. Del Re, *Feasible Suboptimal Model Predictive Control for Linear Plants with State Dependent Constraints*, In Proc. American Control Conf., pages 2862-2866, 1994.