

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

雙軸超高精度磁浮定位機構之驅動量測及設計

總計畫(III)

計畫編號：NSC-88-2213-E-002-082

執行時程：87年8月1日—88年7月31日

計畫主持人：傅立成 國立台灣大學電機系教授

中文摘要

在本計劃中，我們承襲第一、二年所設計的單軸磁浮導引系統的經驗及成果，將架構延伸到雙軸，並深入的探討此雙軸磁浮導引系統的動態行為，推導出該系統的完整十二個自由度的數學模型，並且設計了一個適應控制器設計來克服承載變化以及系統物理參數未知的問題，並經由模擬及實驗的驗證，可以發現系統具有快速反映的特性及優良的抗雜訊與腦動的能力，展現出控制器的可行性與優異的性能。

英文摘要

In this thesis, a prototype of a dual-axis magnetically levitated position-ing platform is proposed. It is a repulsive maglev system with a carrier, a upper track carrier and a lower track base. The levitation forces are exerted by hybrid magnets, whereas the stabilizing forces comes from electromagnets. Then, its analytical model with complete DOFs (degree-of-freedom) is derived and analyzed. Next, an adaptive controller which deals with unknown parameters is designed here to regulate the 12 DOFs in this system. From the simulation and experimental results, the good performance including stiffness and resolution

have been achieved. This implies the improvement of the performance is possible by use of a more delicate control rather than a more expensive hardware setup.

一、計畫緣由與目的

精密定位技術一直是一個重要的研究及發展課題。由於工業進步，各項工業產品對於其生產精密度的要求正不斷提升，世界各國亦紛紛以其生產加工所能達到之精密度，做為其工程水準進步的指標，所謂的生產品精密度，一般而言，其定義並不明確，人們經常以加工中可準確達到的最小解析度作為生產精密度的指標。以我國目前工業界的能力而言，事實上，也還沒有進入超精密加工的領域。自然，從研究的角度來看，應該從研究中建立起工業界進步提昇所需要的技術。以目前的工業技術而言，在多數精密機械儀器中的作法都是以多段式的量測與驅動來達成高精密度的目標，利用一個行程較長之驅動器來驅動一大行程的運動，再以一個運動較小但極精密之驅動器來驅動極精密的小動作。如果考慮在前段落中所敘述之精密機械定義，這種機構可以圓滿的達成原先的設計規格，且這種觀念已經在許多高精密度的儀器設備(如光碟機、步進器等裝置中)廣泛的使用。

一般傳統中之精密定位機構，大都以直流或交流伺服馬達配合導螺桿造成極大的轉數比來完成精密定位的任務。在軟早期以及目前較為平常的步進器中，此種伺服及定位的方式仍然被廣泛的使用。此種系統由於其機構本身之限制，有極度嚴重的摩擦力問題產生，而此摩擦力將影響系統精密度甚劇。在傳統的克服摩擦方法中，除了在系統硬體上加強加工精度外，並配合極精密的潤滑油來減少摩擦力，且在控制法則上以各種方法來估計摩擦力大小，並施以一反向力以抵摩擦力的影響。不過這些方法都沒有比避免機械上的接觸來的有效，因此，磁浮機構及音圈馬達之設計及發長將成為本計劃研究之主要課題。

磁浮系統的控制方式，目前尚在發展階段，且所得之結果並不顯著。近年來，在國內外補償方式達成控制目的，而忽略系統之非線性項，此方法雖然可能達成大部份的控制目的，但在理論上仍欠缺完整。此外，在磁浮系統的參數辨識方面，也有些許的研究，但大部份均採統計方法算出參數的近似值。國內在磁浮系統控制方面的研究，過去已有一些學術單位投入研究，如成大航太所、清大動機所等，並且以實驗來驗證此系統的可行性，但此結果離實際工業應用階段仍有一段距離。故本計劃將更進一步應用磁浮系統於實際工業之中為目標。

在本計畫中，我們即以建立一套非接觸式的磁浮導引系統，並完成其穩定控制為目標，為磁浮系統應用在精密定位的領域上，跨出重要的一步。

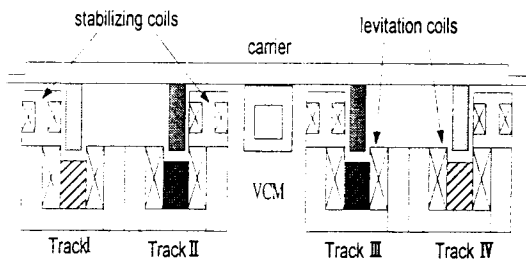
二、研究方法及成果

在本計畫中，沿續著第一及第二年設計非接觸式單軸磁浮導引系統的經驗，給予適當的整合，將系統延伸到雙

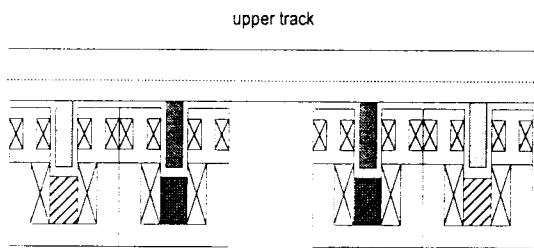
軸的定位系統，基於單軸導引系統之理論架構，我們將它擴充為雙軸系統：將上軸直接架在下軸上。在雙軸系統，長行程的推動方向除了音圈馬達的推動力外，還會有軌道作用力的存在，這跟單軸系統是不一樣的，所以定位軸必須與導引軸相互考慮，給予一些機構設計上所需的考量與討論，並對系統的動態行為作一番分析，利用 Newton-Euler 法導出其數學模型，我們將之延伸為一套非接觸式雙軸磁浮定位系統推導出該系統的完整十二個自由度的數學模型，且設計了一個適應控制器設計來克服承載變化以及系統物理參數未知的問題，同時對未知力量常數的狀況下，應用適應控制器來控制上軸及下軸側向的自由度。並經由子計畫二模擬及實驗的驗證，展現出控制器優異的性能，並達到了令人滿意的結果。這些討論和結果將提供給未來發展堅實而有力的基礎。

首先，我們介紹系統的建構情形。它是由四條主動導軌(track)與一個被動滑台(carrier)所構成，導軌是採用長直橢圓繞線方式，可以提供一個沿著長直軌道長行程定位方向幾乎沒有磁場變化（沒有磁力變化）的自由度供給子計畫一所設計之音圈馬達做超精密定位使用。同時軌道設計包含了浮動器(levitator)與穩定器(stabilizer)：浮動器是由混成磁鐵所構成，永久磁鐵提供主要的斥力，藉以抵抗重力，而線圈則用以微調平台的高度；穩定器則用來控制平台的左右偏移。另外必須考慮電磁影響，盡量減少上平台的重量，藉以避免在下平台使用過多的線圈或過大的電流來產生較大的磁場，而對上平台產生不必要的電磁干擾，所以上平台軌道採用的是單邊穩定器，並使用混成磁鐵來做浮動器，藉以減少線圈數，減輕平台重量，並將多餘的軌道長度去除；而

下平台的採用雙邊穩定器，藉以消掉不必要的作用力。另外，為減少載具移動時，造成下平台重量不均衡，所帶來架構限制與控制難度，載具重量應盡量減輕。並且在雙軸系統，長行程的推動方向除了音圈馬達的推動力外，還會有軌道作用力的存在，這跟單軸系統是不一樣的，所以定位軸必須與導引軸相互考慮。

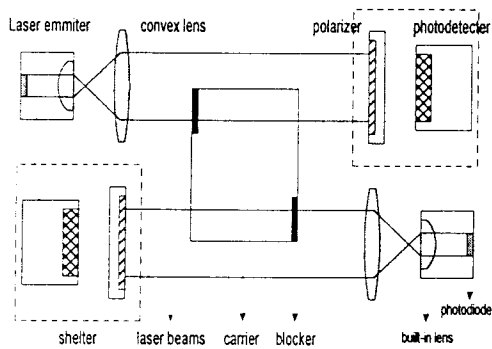


圖一、磁浮系統上軸平台架構

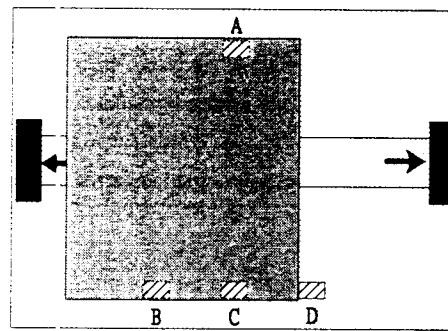


圖二、磁浮系統下軸平台架構

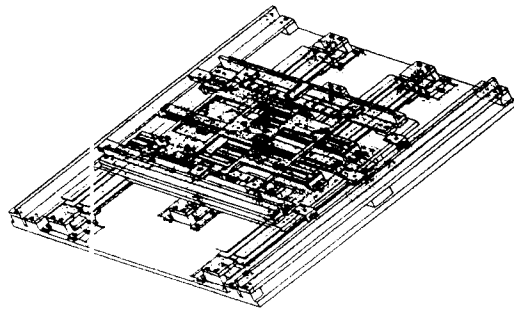
為使平臺上盡量保持無負載之狀態，故量測系統皆架構於平臺之外如圖三及圖四所示



圖三、水平位置量測系統



圖四、垂直位置量測系統



圖五、雙軸磁浮導引系統立體圖

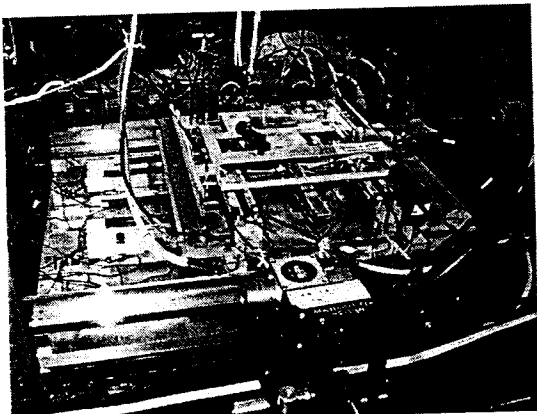
在模型推導的過程中，為了讓推導的過程簡化與推導結果是易於分析的，在過程中會有些假設，因此和真實系統會有一些差異。所以在控制器的設計上，我們必須考慮這些數學模型的不確定因素，最後，我們決定採用適應控制器的設計理念，考慮全部或部分系統參數未知，來適應調整控制器參數，以保證系統的穩定性。

經由子計畫二所設計的控制器，配子計畫一設計的音圈馬達，實驗結果充分顯現本機構優越的超控性，且結合子計畫三所設計的超高精密度雷射干涉量測設備，能使本系統達到精密定位的目的。由子計畫二的實驗，在暫態響應中，我們可以觀察到系統的啟動時間與響應頻寬，而系統的精度則由穩態響應來決定。其結果顯示，這樣的系統設計與控制，能有別於接觸式的機構，成功的克

服機構製造上的誤差，且能達到令人滿意的效果，可見本機構的設計是相當優越的。

三、實驗及討論

我們整合了這套磁浮導引系統，包括實驗本體，控制硬體，量測設備與驅動系統的規劃設計狀況。實驗的結果在暫態響應上，包含了載具及上軸平台各五個自由控制之負載情形，可從其中觀察到系統的垂直方向動態，以及在穩態響應上，可以反應出系統的控制精度。從這些結果中，系統的性能均能達到令人滿意的結果。



圖六、磁浮導引系統實驗本體

從子計畫二之雙軸設計中，發現所設計之適應控制器經由 Lyapunov 穩定性分析，我們可以證明閉迴路系統是漸進穩定的(asymptotically stable)。再由電腦模擬的結果，可以看出這樣的控制器設計，確實能達到很好的控制效果。

四、結論

在本計劃中，延續了第一、二年設計單軸磁浮機構的理念與經驗，將之拓展為雙軸的磁浮定位系統，並對系統的動態行為作詳細分析，導出其完整自由度的數學模型，提出並實現了一個適應控制器，在系統參數未知的狀況下，成

功地控制了系統的十二個自由度，並從實驗的結果中，可以發現該控制器的優異效能，達到了令人滿意的結果，朝實現磁浮定位系統的理想邁進了一大步。

五、參考書籍

- [1]. E. P. Ronald, *Magnetically Levitated Micro-Robotics*. PhD dissertation. The University of Texas at Austin, 1988.
- [2]. Charara, Ali, Miras, Jerome, Caron, Berrard." Nonlinear control of a magnetic levitation system without premagnetization." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 4, 5, Sep. 1996.
- [3]. Lih-Chang Lin, Tzyh-Biau Chau, "Feedback Linearization and Fuzzy Control for Conical magnetic Bearings" *IEEE tran. on Control Systems Technology*. vol. 5, no. 4, July 1997.
- [4]. Nayfeh, Munir H. *Electricity and magnetism*. New York: Wiley, c1985.
- [5]. K. Watanabe, et al. "Combination of H_∞ and PI Control for an Electromagnetically Levitated Vibration Isolation System" *Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control*, Dec. 1996.
- [6]. I. Y. Wang. *A Magnetic Levitation Silicon Wafer Transport System*. Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin, 1993.
- [7]. M. Chopadhyay, S.C., et al. "A New repulsive type magnetic bearing - modeling and control" *Proc. of the Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems* 1, 1997
- [8]. W. Braunbek, "Freely Suspended Bodies in Electric and Magnetic Fields", *Zeitschrift fur Physik*, 112, 0.753, 1939.
- [9]. K. S. Narendra and A.M. Annaswamy, *Stable Adaptive System*, Prentice Hall, 1989.
- [10]. S. Carabelli, et al. "Control of a Two Active-Axes Suspension for Maglev Vehicles" *Proc. of the American Control Conf. Albuquerque*, 1997.
- [11]. Park, Kyihwan, et al. "Magnetic levitated high precision positioning system based on antagonistic mechanism." *IEEE Trans. on Magnetics* 32, 1, (Jan, 1996)
- [12]. M. Y. Chen, K. N. Wu and L.C. Fu, "Adaptive Control and Experiment of a Maglev Guiding System for wafer Transportation", I.F.A.C. Workshop on Motion Control Conference, 1998
- [13]. M. Y. Chen, M. J. Wang and L.C. Fu, "Modeling and Controller Design of a Maglev Guiding System for Application in Precision Positioning", American Control Conference, 1999
- [14]. M. Y. Chen, M. J. Wang and L.C. Fu, "Dual-Axis Maglev Guiding System Modeling and Controller Design for Wafer Transportation", The 38th IEEE Conference on Decision and Control, 1999