

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

氣潤式精密平台系統研製及其滯滑特性研究

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC-90-2212-E-164-001

執行期間：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：鈕健

共同主持人：趙崇禮、趙崇偉

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：修平技術學院電機工程系

中華民國九十一年十月三十一日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

氣潤式精密定位平台系統研製及其滯滑特性研究

The Development of an Air-lubricated Precision Positioning System and Its Stick-slip Motion Characteristic Study

計畫編號：NSC-90-2212-E-164-001

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：鈕健 修平技術學院電機工程學系

共同主持人：趙崇禮 淡江大學機械工程學系

共同主持人：趙崇偉 醒吾技術學院企業管理系

計畫參與人員：陳淑卿 中正理工學院兵器系統工程研究所
碩士班研究生

一、 中文摘要

鑽石車削是現今高科技產業上應用極為廣泛的精密加工方式；對脆性材料加工而言，鑽石切削(1)切削深度大於臨界值時將造成工件次表面的破壞並加速刀具磨耗，(2)當車刀進給率大於某一臨界值時，也會使材料去除模式由塑性變形改變成脆性破壞；故此一加工方式必須要有高精度、高強健性及高復現性 X-Y 精密定位平台加以配合，方能確保所工件之輪廓精度及表面粗糙度。

滯滑誤差是 X-Y 精密定位平台運動時產生的誤差之一，它的產生原因已被證明是因為系統內摩擦力所造成，且會在平台運動速度接近於零時急劇加大，這對鑽石車削必須應用較低的車刀進給率產生不利影響。為解決這個問題，本研究發展氣潤式精密定位平台，利用在機構接觸面間產生高壓氣膜支撐負荷的原理來減少系統中之機械接觸、降低機構中接觸面摩擦力來減輕滯滑現象並提升鑽石加工定位平台精度。最後結果證明，氣潤式精密定位平台在執行 $1\ \mu\text{m}$ 、 $0.1\ \mu\text{m}$ 、 $0.05\ \mu\text{m}$ 及 $0.02\ \mu\text{m}$ 步階運動時，在系統到達穩態後產生之滯滑誤差均在 $\pm 15\ \text{nm}$ 之內。

關鍵詞：鑽石車削、滯滑誤差、X-Y 定位平台、氣潤式軸承

Abstract

Design and fabrication of an air-lubricated precision positioning stage is conducted in this research. Owing to the nanometer level positioning accuracy of the machine tool axes is one of the most important requirements for diamond turning. However, the non-linearities in the system such as stick-slip caused by friction and lost motion introduced by backlash make the precision positioning extremely difficult (particularly at low feed rate).

The air-lubricated precision positioning stage to be used in this research will be consisted of an air lubricated friction drive, air lubricated slides and DC servo motor. A PC-based DSP PID controller and laser interferometer position feedback will be used in the control system for signal processing and position measuring. As the results, accuracy better than $\pm 15\ \text{nm}$ without any overshooting in all conditions tested is achieved in this study.

Keywords: Diamond Turning, Stick-slip, Precision Positioning Stage, Air lubricated Bearing

二、緣由與目的

鑽石車削(Diamond Turning)是現行生產各種精密零組件重要加工方式之一，其產品主要應用於精密光學或機械元件上，如雷射系統中之平面、球面、非球面鏡片(Aspheric lenses) 紅外線光學元件(Infrared lenses)、繞射光學元件(Diffractive optical components)或是精密機械氣浮軸承(Air bearing)。對鑽石切削脆性材料而言，相關研究已經證明當切削深度小於某一臨界切削值時，脆性材料是在延性模式機制下進行加工，如此將降低加工時對工件次表面的破壞並減緩刀具磨耗[1、2]。由於切削深度要控制在微米或甚至次微米間，因此須有奈米級精度的定位平台系統加以配合，方能確保所加工工件之輪廓精度及表面粗糙度。

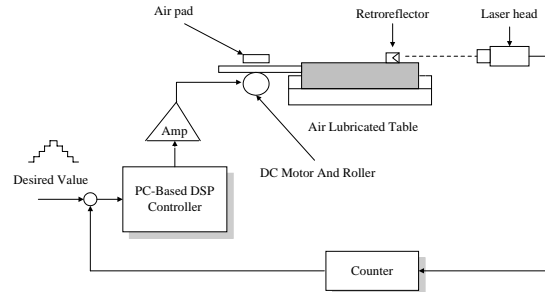
由於鑽石切削脆性材料除要控制切削深度使之小於某一臨界值外，另外一個要控制的加工參數就是車刀進給率；當車刀進給率大於某一臨界值時，也會使材料去除模式由塑性變形改變成脆性破壞；基於這個原因，定位平台必須具備極佳的慢速運動能力。許多研究已經證實，高精密定位平台中各組件間機械接觸面(Mechanical Contact)間存在的非線性摩擦力會在平台運動時造成滯滑移動而嚴重影響定位精度(如造成 Limit Cycle 現象)，雖然定位平台系統中均有控制器藉由回授方法來改善定位精度，但由於滯滑移動這種物理現象之存在，使得傳統控制器往往難以將之輕易克服。許多研究希望利用現代控制相關理論將滯滑現象所產生的誤差加以補償，但這種現象受非線性(Non-linear)摩擦力影響表現出高度的不確定性且難以估測，因此雖有精良的控制技術仍無法將之確實消除[3-5]。

為解決此前述各項問題，本計劃藉由平台機構研究改進方式(主軸、滑軌、動力產生及轉換機構等)，將定位系統內存在之機械接觸面利用氣潤(Air-lubricated)方法把摩擦力予以盡量降低，則自然減少由其所引起的滯滑現象，如此定位平台可以用最簡單的控制系統(如 PID 控制器)來完成定

位控制，並使響應到達穩態時產生之定位誤差範圍大幅縮小。

三、結果與討論

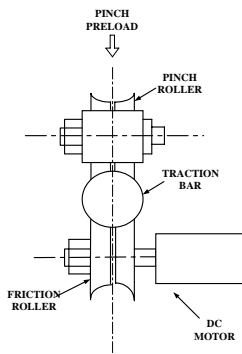
圖一為氣潤式精密定位平台系統方塊示意圖，現今定位平台發展技術中，對驅動平台方法多為以(一)線性馬達(Linear Motor)直接產生驅動力推動平台及(二)迴轉馬達(Rotary Motors)產生旋轉扭力再經動力轉換機構轉換成驅動平台運動之力。線性馬達雖然具備可直接驅動定位平台的優點，但也同時將一些如馬達參數變化(Parameter Variations)、系統內/外部擾動(Internal /External Disturbance)等機電誤差直接導入定位系統中、這些誤差將降低定位系統精度。除此之外，線性馬達驅動系統具備的剛度(Stiffness)明顯較迴轉馬達結合轉換機構系統為低，這些缺點都是應用線性馬達於精密定位平台時尚待解決的問題[6、7]，因此，本研究將採取迴轉馬達產生扭力方式驅動平台。



圖一：氣潤式精密定位平台系統方塊示意圖

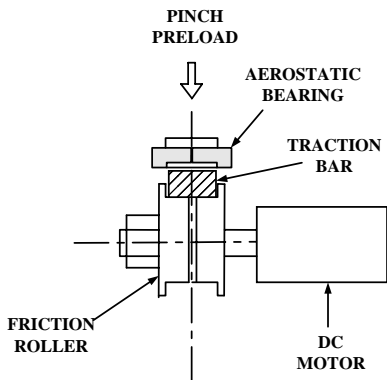
直流馬達(DC Motor)配合摩擦驅動裝置(Capstan Drive)可作為 X-Y 定位平台系統之動力產生及轉換機構，由於這種組合具備有易保養、小背隙及容易加工設計等優點，因此已經廣泛被用於超精密加工機之上。傳統常用的摩擦驅動裝置由於是利用兩只滾輪挾持推桿的方式來將直流馬達產生的旋轉動力轉換為推動平台的直線推力(如圖二)；但是這種利用兩只滾輪挾持推桿的挾持機構中會存在極大的摩擦力，

而這種摩擦力必定會造成 X-Y 精密定位平台機構中的滯滑誤差，並進而影響鑽石車削加工後工件之精度。



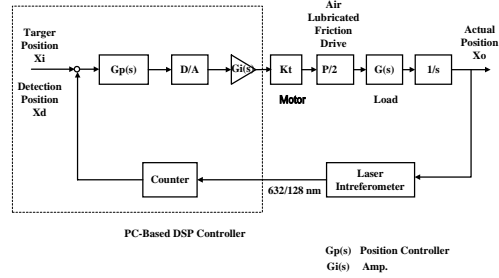
圖二：兩只滾輪挾持推桿的方式摩擦驅動裝置

為了改善這個缺點，本研究利用氣靜壓式軸承(Aerostatic Bearing)取代從動壓力輪；由於氣潤式軸承可有效降低摩擦驅動裝置推桿間接觸面摩擦力，因此 XY 定位平台定位精度必將因滯滑現象之減輕而獲得提升。



圖三：氣潤式軸承挾持推桿方式的摩擦驅動裝置

圖四為氣潤式精密平台定位系統方塊圖，系統元件包括提供平台推動扭力的直流馬達、摩擦驅動裝置、將控制器數位信號轉換為類比信號的 D/A 及 OP 放大器、雷射干涉儀回授。控制迴路為具備位置、速度及加速度控制迴路之 PC-Based DSP Galil 32Bits 四軸運動控制器(接收 12MHZ 雷射干涉儀回饋信號 0.4 毫秒指令執行時間)。



圖四：氣潤式精密平台定位系統方塊圖

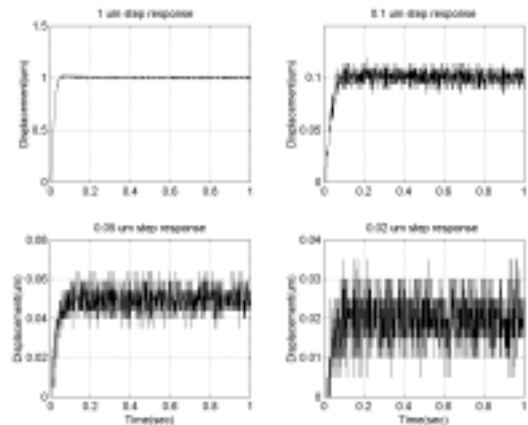
系統控制律係採 Second Order Model-Based PID Controller，其中

$$K_p = \frac{4\xi_o\phi_{cl}\omega_o\omega_{cl} - \omega_o^2}{4K_0\phi_{cl}^2}$$

$$K_I = \frac{\omega_{cl}\omega_o^2}{2K_0\phi_{cl}}$$

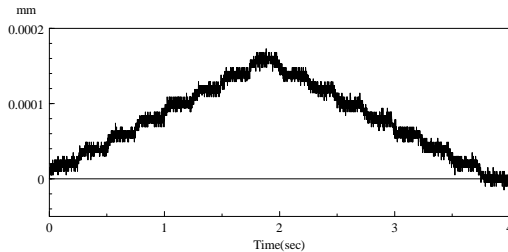
$$K_D = \frac{4\phi_{cl}^2\omega_{cl}^2 - 4\xi_o\omega_o\xi_{cl}\omega_{cl} + \omega_o^2}{8K_0\phi_{cl}^3\omega_{cl}}$$

圖五為氣潤式精密定位平台分別執行 (1)1 μm(2)0.1 μm(3)0.05 μm(4) 0.02 μm 等四種不同衝程運動時之步階響應結果；由於 PID 控制器中之積分控制項雖然解決了比例控制所不能解決的穩態誤差問題，但如果系統中存在有較大摩擦力，此種非線性擦力特性將會造成定位平台穩態時之滯滑現象。圖五結果顯示，當平台執行 1 μm、0.1 μm、0.05 μm 及 0.02 μm 步階運動時，在系統到達穩態後均無滯滑現象產生。



圖五：氣潤式精密定位平台執行不同衝程運動時之步階響應結果

圖六此定位平台進一步執行 20nm 前後八次往返運動之響應圖。圖中結果也同時證明，利用在定位平台機構接觸面間產生高壓氣膜(High Pressure Air Gap)支撐負荷的原理，將可減少系統中直接的機械接觸(Mechanical Contact)，因此具備有低速運動時產生摩擦力極小的特性，此一特性將可解決機構中摩擦力與滯滑移動之問題。



20 nm 步階時域響應圖

圖六：氣潤式精密定位平台執行 20nm 前後八次往返運動之響應圖。

四、 計劃成果自評

本研究計劃完成項目及獲致之成果如下：

(一)、完成氣潤式精密定位平台設計及製造，並藉由平台機構研究改進方式(主軸、滑軌、動力產生及轉換機構等)，將定位平台內存在之機械接觸面利用氣潤方法把摩擦力予以降低，使得定位平台可採工業界應用最廣泛及最簡單的 PID 控制器來完成精密定位控制；實驗結果顯示，當平台執行 $1\ \mu\text{m}$ 、 $0.1\ \mu\text{m}$ 、 $0.05\ \mu\text{m}$ 及 $0.02\ \mu\text{m}$ 步階運動時，在系統到達穩態後均無滯滑現象產生。

(二)、本計劃最終完成奈米(Nanometer)級超精密定位技術，並可將之應用鑽石切削脆性材料，藉由控制加工條件來降低加工時對工件次表面的破壞並減緩刀具磨耗。此外，並可應用於如半導體製程生產及檢測設備、微機電系統(MEMS)元件加工機、精密光學技術中複合式微光件量產及檢測等領域應用。

(二) 現今 PC-Based DSP Controller 已成為工業用微電腦控制器硬體發展主流,尤其是應用程式之設計、網際網路遠端監控等功能之發展，使 PC-Based DSP Controller 拓展出更多樣化的整合運用。本計劃在定位平台回授控制器製作時採 PC-Based DSP 控制器硬體架構，如此可以將本計劃研究結果轉換為實際工業界之用。

五、 參考文獻

- [1] Jiwang Yan, Katsuo Syoji, Tsunemoto Kuriyaguwa, Hirofumi Suzuki, "Ductile Regime Turning at Large Tool Feed", J of Materials Processing Technology, 121 (2002),p363.
- [2] T. P. Leung, W. B. Lee, X. M. Lu, "Diamond Turning of Silicon Substrates in Ductile-regime", J of Materials Processing Technology, 73 (1998),p42.
- [3] Amerstring, B. H., Dupone, P. and Canud de Wit, "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction," Automatica, 1994, Vol .30, No.7, p1083.
- [4] Iezawa, M., and Imaga, A., "High Precision Control of AC Servo Motor Positioning under The Influence of Stiction and Coulomb Friction," J.of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1998.
- [5] Trang, Y. S .and Cheng, H. E. " An Investigation of Stick-Slip Friction on The Contouring Accuracy of CNC Mechine Tools," Int. J of Mach. Tool, 1995, Vol 35,No 4, p565.
- [6] Bin Yao, Li Xu, "Adaptive Robust Motion Control of Linear Motors for Precision Manufacturing", Mechatronics, Vol. 12, 2002, p595.
- [7] Ohnishi K, Shibata M, Murakam T, "Motion Control for Advanced Mechatronics", IEEE/ASME, Trans Mechatronics, 1996(1), p56.