

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

智慧型高速真圓度測定儀-

子計畫三：智慧型探頭設計

計畫編號：NSC 90-2213-E-002-056

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：顏家鈺

臺大機械系教授

計畫參與人員：張美雲 張愷倫 臺大機械系

一. 中文摘要

探頭 (Probe) 在各種座標測定儀器中是一項非常關鍵的技術，探頭本身所有的誤差直接造成量測的不準度。因此探頭的設計直接牽涉到系統整體量測的準確度。本計劃將以力回饋控制法則建立穩定的探針接觸力，同時以減振控制壓制探針因摩擦表面索引器的振動。預計達成移動速度 9m/min，旋轉速度 2 ~ 6 rpm，同時在量測範圍 ± 1 mm 之內達到 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 之解析度。

關鍵詞：真圓測定、智慧型感應器、力回饋控制、數位訊號處理器

Abstract:

Probe design is a crucial part in the precision coordinate measurement equipments. Probe provides the actual contact between the work piece and the measurement equipment. The rest of the equipment, although, also directly contribute to the measurement precision result. They do not directly respond to the geometrical variation of the work piece. Thus any geometrical error on the probe or any dynamical error caused by the contact vibration will directly reflect to the measurement accuracy. This project will look into force-feedback control in conjunction with vibration suppression to achieve smooth

contact between the work piece and the probe. The goal of the project is to achieve 9m/min moving speed, 2 ~ 6 rpm rotation speed, and to achieve $\pm 0.1\mu\text{m}$ measurement resolution at ± 1 mm measurement range.

Keywords: Roundness Test , Force Feedback , DSP

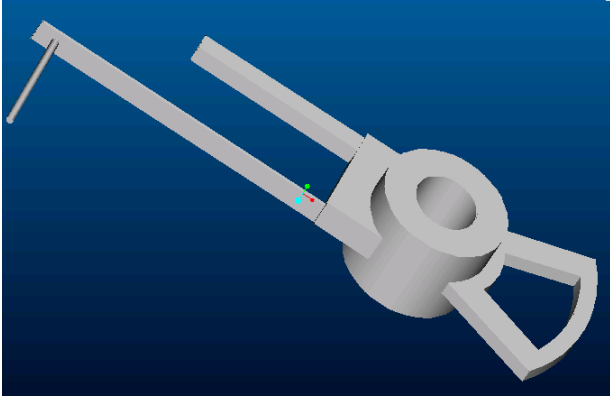
二. 緣由與目的

探頭在所定義的軸向運動的時候，由於工件幾何形狀的改變，會造成探頭垂直於幾何改變軸的運動，一般而言，這個運動會提供這個軸向幾何量測的數據。對於在真圓度測量的應用中，此原理有的時候會應用在不同的運動方向，藉著探針受力位移的狀況了解受測物的幾何形狀，進而達到量測的目的。較為精密的探頭設計都被視為次微米級的量測設計，探測針探測技術的精確度會受到探測頭與待測工件之間相互作用之物理和幾何因素的影響，例如摩擦力、探測時所施加的應力與探測頭的形狀與尺寸等等。而為了兼顧不傷害待測工件表面與維持在一定量測速度下工件和探測頭的充分接觸，在此範圍內探測頭不可以切入待測物件表面太深，因此探頭機構上必須有控制力的裝置，國際間的公認標準值是探針與待測物件表面不超過 70mgW，也就是 0.686mN。

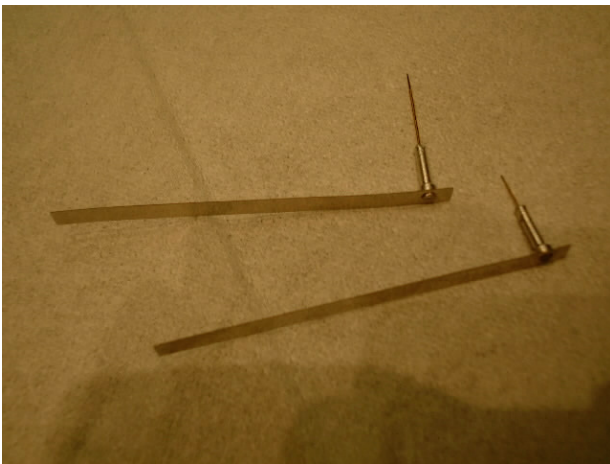
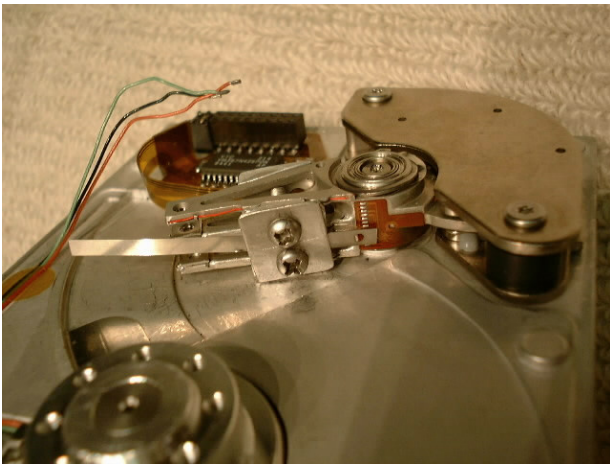
二. 研究方法與過程

(1)探針結構規劃與設計

探針結構(圖一、圖二):音圈馬達的驅動臂之一端為固定探針端(探針懸臂長 50mm、寬 3mm,探頭直徑 0.2mm,如圖三所示),用以探測工件表面,並在根部貼上應變規,同側延伸出一根細樑以推動 LVDT。



圖一 探針結構示意圖



應變規:反映出探針與待測工件表面接觸力。
音圈馬達:精確調整探針的位置,使探針在工件表面維持等力。
線性差動變壓器 LVDT:為機電轉換器的一種。可以將一個物件之直線運動的機械變化

量轉換成相對應的電子信號。LVDT 的可動元件是一個具透磁性之管狀鐵心,此鐵心可以在中空成型之線圈內自由移動,並和欲測量位置之物件結合在一起。LVDT 的輸出信號就是兩組次級線圈之間的交流電壓差,此電壓差會隨著鐵心在線圈內之位置而改變。通常為了方便使用,此交流輸出電壓會再經由電子回路的處理,轉換為高準位的直流電壓或電流。

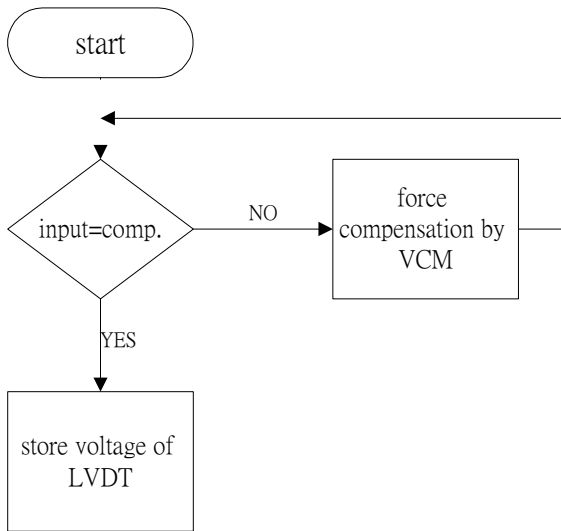
LVDT 在此扮演的角色是要反映出音圈馬達帶動探針懸臂移動的距離,換言之,即為待測工件表面粗糙度。

數位訊號處理器 DSP:德州儀器公司的 TMS320F243 執行指令速度達 10MIPS,指令集設計成可提供大範圍且複雜的計算與高速處理,主要硬體結構有:算數邏輯單元,輔助暫存器算數單元,移位器,32 位元的累積器,乘法器,8 層的硬體堆疊器,硬體計時器和資料信號處理的 16 位元 I/O。

(2)探針力回授的控制流程

過程大致如下(圖四):

探頭與工件的接觸力定於 70 m g W ,此值對應到數位訊號處理器的一個 compare 值,過程中就是不斷的取值來與 compare 值做比較以達到量測環境的穩定。量測之初,工件開始旋轉,應變規的信號輸出線接到數位訊號處理器的輸入,當數位訊號處理器收到與 compare 值不同的訊號時,輸出一訊號以作動音圈馬達去做探針位置的矯正,調整的過程當中,數位訊號處理器不斷地比較輸入值與設定之 compare 值,直到兩者相等,讀取此時 LVDT 之訊號,經由一比例換算,相當於音圈馬達驅動臂有多少位移,也就是工件表面凹凸的情況。



圖四 流程圖

(3)建立探針動態方程式

針對整個探針結構，透過物理模型的建立，可推導出如下的系統動態方程式：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\Lambda^2 K_s}{I} & 0 & \frac{\Omega K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\Lambda K_s}{I} \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix} y$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix}$$

θ : angle of VCM

$\dot{\theta}$: angular velocity of VCM

i : current of VCM

y : displacement of the probe tip

Λ : length between the probe tip and the pivot

Ω : length between the pivot and coil

L : VCM inductance

I : moment of inertia about the pivot

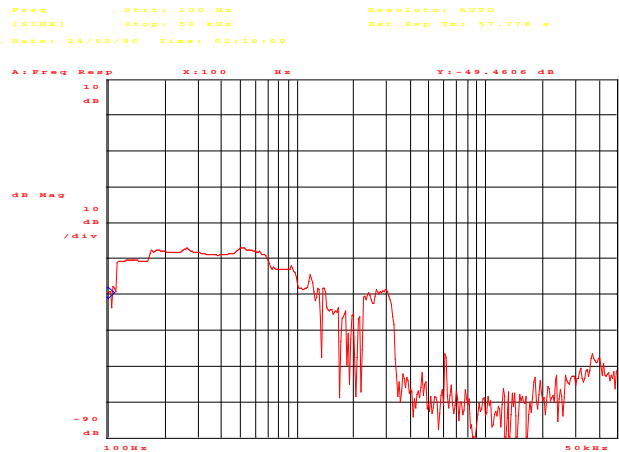
K_s : small spring constant

K_t : VCM torque constant

K_b : VCM back emf constant

(4)系統識別

配合雷射干涉儀和動態訊號分析儀(Dynamic Signal Analyzer---hp 35665A)對初步完成之探針結構進行系統識別，輸入 sweep sine 訊號到音圈馬達，頻率範圍從 100 Hz 到 50k Hz，藉由之前系統動態方程式之推導，模擬出來的系統 Bode Plot 如下



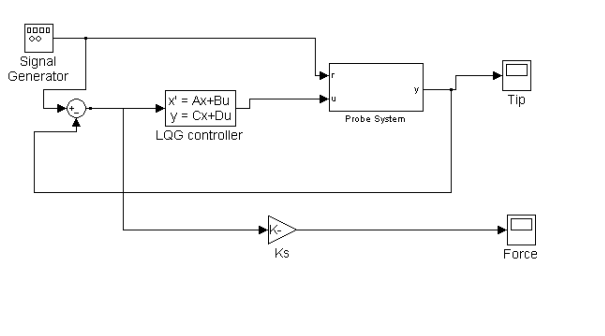
圖五 系統波得圖

假設整個探針結構為一個三階系統模型，系統極點分布的位置分別在 -175.8 和 $-522.5 \pm 2283j$ ，零點位置則為 $3185 \pm 458.5j$ 。

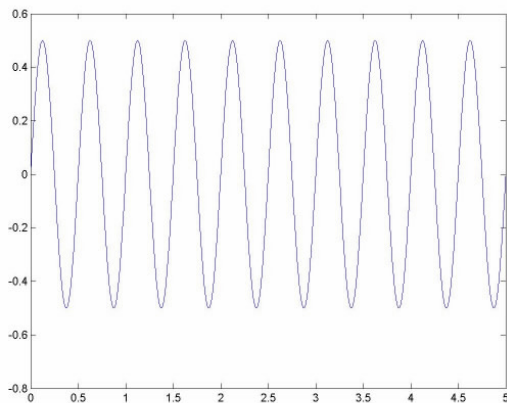
四.研究結果與討論

(1) 使用動態方程式推得的系統模型進行模擬：

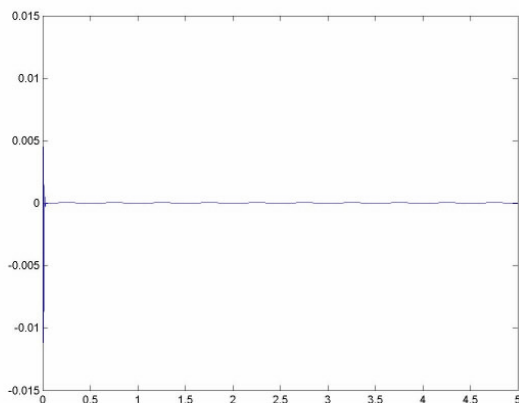
利用 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 控制法則針對之前推得的系統動態方程式建構出來的系統模型進行模擬 (圖六)，給定的參考訊號為一振幅大小為 0.5，頻率為 2Hz 的正弦波，從探針端點的位置可以看出它可以確實的反映出外界進來的參考訊號 (圖七)，換言之，即能忠實的反映出待測物表面的粗糙度，在此過程，探針端與待測工件表面之接觸力在極小範圍內震盪，可視為定值 (圖八)。



圖六 控制方塊圖



圖七 探針位置反應訊號圖

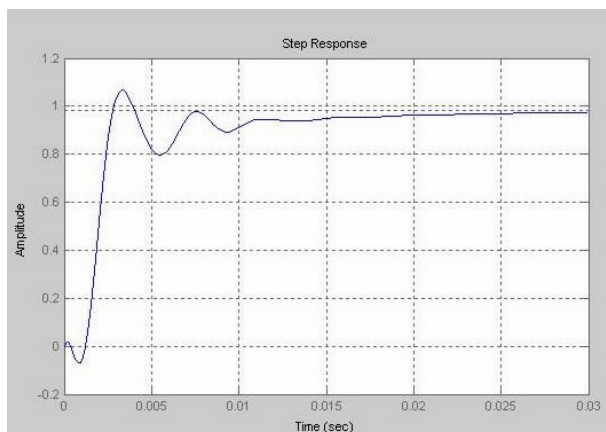


圖八 探針與工件表面接觸力

(2)使用系統識別出來的系統轉移函數進行模擬：

經過調整閉迴路控制器中的參數---增益值為 5870，零點位置在 -103 和 $-246 \pm 2120i$ ，極點位置在 -5 以及 $-522 \pm 2070i$ ，可使系統逐漸趨於穩定（圖九），如此可確保施加在音圈馬達上的力，能使探針尖端在極快的時間內達到所要求的位置並維持其穩定，如此方

能在不傷及待測工件表面及探針探頭的理想量測條件下，達成測量的任務。



圖九 探針步階響應圖

綜上所述，透過對系統建立的動態方程式以及完成的系統識別，我們對整個探針架構已有了初步認知，並且可以從模擬的結果看出整個控制規劃之可行性。

在硬體方面，我們也進行了探針結構體中的應變規及線性差動放大器（LVDT）的線性度測試並完成初步的裝配，接下來要將探針架構的部分整合到真圓度機台，並利用數位訊號處理器（DSP）來實現力回授控制流程當中的精密量測。

五.參考文獻

- [1]. http://www.mitutoyo.com/product/product_c_3.html
- [2]. <http://www.sensor.com.tw/icon.html>
- [3]. <http://www.prowave.com.tw>.
- [4]. Taylor/Hobson accessories catalogue.
- [5]. U.S.Patent No. 5,694,339.
- [6]. Russel, R. Andrew and Parkinson, Simon, "Sensing surface shape by touch," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, pp.423-428, 1993.

清華大學出版社，北京

- [7]. Chetwynd, D.G., Liu, X. and Smith, S.T., "A controlled-force stylus displacement probe," *Precision Engineering*, No.19, pp. 105-111, 1996.
- [8]. Kiyono, S. and Gao, W., "On-machine measurement of large mirror profile by mixed method," *JSME Journal*, Series C, Vol.37, No.2, pp.300-306, 1994.
- [9]. 薛實福、李慶祥，精密儀器設計，
- [10]. Smith, S.T. and Liu, X., "A profilometer for surface proximity probe applications," *Nanotechnology*, No.3, pp.37-41, 1992.
- [11]. Dawei, Tu, "In-process sensor for surface profile measurement applying a common-mode rejection technique," *Optics & laser Technology*, Vol.27, No.6, pp.351-353, 1995.