

# 奈米級三次元量測儀研製(2/3) - 子計畫一：奈米級三次元量測儀結構之設計與分析

## Design and Analysis of A Nano-CMM Structure

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-055

執行期限：88年08月01日至89年07月31日

主持人：鍾添東 國立台灣大學機械系

### 一、中文摘要

本計畫為整合型計畫“奈米級三次元量測儀研製”之子計畫一：奈米級三次元量測儀結構之設計與分析(II)。”本年為三年計畫之第二年，主要目的為設計與分析一奈米級三次元量測儀結構之初型。其量測範圍在 X 軸，Y 軸，及 Z 軸方向分別為 20mm，20mm 及 10mm。本年度針對滑軌接點發展一套有系統的模擬與分析方法，建立含接點的有限元素模型，進行結構靜態分析，動態特性分析等，利用調整細部設計尺寸使滿足各種結構特性要求。本年度將進行初型之製作及性能量測，以驗證設計及分析之正確性。

關鍵詞：奈米級三次元量測儀結構，接點模擬，有限元素法。

### ABSTRACT

This project is the first sub-project of the integrated-project named “Design and Fabrication of a Nano-CMM(Coordinate Measuring Machine)” and is the second year of the whole three year project. The main object of this sub-project is to design and analyze a prototype of a Nano-CMM Structure. The measurement range of this machine would be 20mm, 20mm and 10mm in x, y and z axes respectively. This project develops a systematic approach for simulation and analysis of guideway joint. In this joint model, a series of finite element analysis, such as static analysis and dynamic characteristics analysis, are carried out such that the detail sizes are modified to satisfy different structure requirements.

In this year, a prototype of the final design will be manufactured and different structural responses will be measured. The validity and correctness of the whole design process can be verified from the response measurement.

Keywords: Nano-CMM Structure, Joint simulation, Finite Element Analysis.

### 二、計畫緣由與目的

近年來我國半導體工業及微機械工程快速發展，在微機械元件越做越小，晶片的最小線寬越來越細的情況下，傳統的三次元量測儀 [Coordinate Measuring Machines (CMM)] 已不敷使用。尤其在半導體製程中，對於平台的定位精度，通常需要量測到奈米級( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ )的精度，因此發展奈米級的三次元量測儀技術，以應現今各種產業之用，乃當務之急。Takamasu[1]研究傳統之三次元量測儀與奈米級三次元量測儀之比較，發現奈米級三次元量測儀的各種規格大約是傳統三次元量測儀的 1/100 到 1/1000，在此極為精密的規格下，各種元件的設計與製造，都必須加以重新評估與考量。本研究針對此需求，其目的為設計與分析一奈米級三次元量測儀結構之初型。其量測範圍在 X 軸，Y 軸及 Z 軸方向分別為 20mm，20mm 及 10mm，量測解析度為 10nm。研究項目包含結構設計、結構材料的選用、各方向滑動平台的設計及滑軌的設計等。

### 三、研究方法與研究進度

#### 1. 奈米級三次元量測儀結構之初型製作

本研究的目的是在於針對奈米級三次元測量儀之結構部分進行設計與研製。經過上年度的設計與分析，訂出奈米級三次元量測儀結構之初型如圖 3.1.1 所示，其主要結構包含花崗岩平台、橋架及 X/Y/Z 平台等。由於花崗岩材料的剛性大，熱膨脹係數小，用來製作三次元量測儀的工作平台，可以提供一個良好的量測參考面。對於橋架的設計則採用固定式橋架，其橫樑是固定於支柱上，而 X/Y 平台是可移動的。由於固定式橋架之剛性較大，可得到較高的精密度，因此本計畫採用此結構形式，其中橫樑及支柱均採用花崗岩製作。

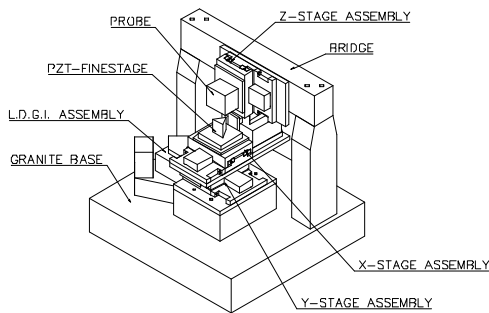


圖 3.1.1 奈米級三次元測量儀之系統架構示意圖

X/Y/Z 平台則採用 Anorad 公司製作的鋁合金平台[2]。其特性為每一平台均以兩組交叉滾子導軌(Cross Roller Guide) [3]支撐，提高了平台在線性運動方面的剛性及精度，並提供了平穩的運動及降低磨耗的損失。並以壓電陶瓷磁線性馬達 [Piezo Ceramic Linear Moter (PCLM)] [2]加以驅動。X 平台上置放 PZT-微動平台，Z 平台上安裝雷射聚焦探頭，機台上保留位置給 L.D.G.I.光學校正系統，其中平台整合示意圖如圖 3.1.2 所示。

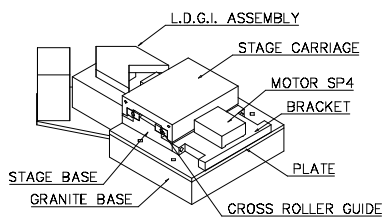


圖 3.1.2 Y 平台示意圖

## 2. 奈米級三次元量測儀結構接點分析

接點對結構之影響已廣為人知，因此對考慮接點問題的有限元素分析方法亦漸漸為人所發展。本研究探討導軌接點有限元素分析法。

奈米級三次元量測儀的每一平台均以兩組交叉滾子導軌支撐。此滾動導軌運用滾動件的低摩擦性來幫助滑動。導軌的特性主要受到滾動件的特性影響，導軌間的變形及剛性係數可用 Datta[4]對單一滾動件之非線性彈性係數計算公式(3.2.1)式及(3.2.2)式求得。

$$u = \frac{4.05 Q^{0.925}}{10^5 l_{eff}^{0.85}} \text{ (mm)} \quad (3.2.1)$$

$$k_{bn} = 56065.7 l_{eff}^{0.92} u^{0.08} \text{ (Nt/mm)} \quad (3.2.2)$$

上式中  $Q$  為接觸力(Nt)， $l_{eff}$  為滾動件真實的接觸長度(mm)。導軌之阻尼係數則假設主要受油膜的影響。Fort[5]對於導軌中的油膜阻尼特性作研究，並推導出滑軌中油膜的阻尼公式解如(3.2.3)式及表 3.2.1 所示，有助於導軌阻尼係數的求得。

$$C = 0.61s \sim L_o b^{2.82} / e^{2.91} \text{ (Nt.s/m)} \quad (3.2.3)$$

其中  $C$  為阻尼係數、 $L_o$  為油膜的長度、 $b$  為油膜的寬度、 $e$  為滑軌間的油膜間隙值、 $\sim$  為油膜的動態黏滯係數，而  $s$  為  $L_o/b$  的函數可由表 3.2.1 求得。

表 3.2.1 計算油膜特性之  $s$  值

$L_o/b$	14	7	5	4	3	2.5	2	1.5	1
$S$	0.96	0.92	0.86	0.82	0.76	0.73	0.63	0.57	0.42

滾動導軌藉由滾動件之滑動現象來傳輸物體，故其特性為具有二維及三維特性之接點。在結構分析上，從有限元素分析軟體 ANSYS 中的元素裡，選出 contac52 及 link11 元素來模擬滾動滑軌之特性。含接點模擬示意圖如圖 3.2.1 所示。

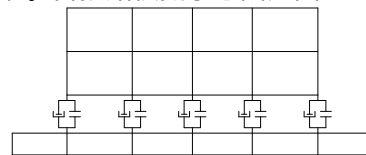


圖 3.2.1 滾動導軌含接點模型圖

滾動導軌模擬的步驟如下[6]：

- (1) 建立滾動導軌的結構模型。

(2) 根據滾動導軌之結構外形建立其有限元素網格。

(3) 參考(3.2.1) (3.2.2) 及(3.2.3)式查出滾動導軌的接點特性及接點元素的選擇方法。

(4) 在兩結構間建入接點元素並將接點特性代入接點元素中，如此即完成滾動導軌的模擬。

### 3. 奈米級三次元量測儀結構分析

奈米級三次元量測儀的結構分析，需從結構靜態與動態分析著手。動態分析又包含結構自然頻率、振形及暫態響應等有限元素分析。

#### (1) 結構靜態特性有限元素法分析

在位移方面，有限元素法中結構受靜態負荷時的位移可以(3.3.1)式來表示：

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (3.3.1)$$

上式中 $[K]$ 為結構的剛性矩陣、 $\{F\}$ 為結構的受力向量、 $\{u\}$ 為結構的位移向量。此外在應力方面，有限元素法中應變及位移間之關係如下式所示：

$$\{\epsilon\} = [B]\{u\} \quad (3.3.2)$$

其中 $\{\epsilon\}$ 為應變向量、 $[B]$ 則為應變內插矩陣。將(3.3.2)式代入(3.3.3)式中，則可利用位移向量求出應力向量，如(3.3.4)式所示。

$$\{\sigma\} = [E]\{\epsilon\} \quad (3.3.3)$$

$$\{\sigma\} = [E][B]\{u\} \quad (3.3.4)$$

於上兩式中 $\{\sigma\}$ 為應力向量、而 $[E]$ 為彈性模數矩陣。圖 3.3.1 為奈米級三次元量測儀結構分析之有限元素模型，本研究採用 ANSYS 商用軟體進行結構分析，並以八個節點的六面體元素加以網格化。共有 862 個六面體元素及 136 個接點元素。

利用此奈米級三次元量測儀結構含接點有限元素模型，進行靜態結構分析。包括結構的位移、變形及應力等，而其靜態負荷則包含結構受重力及受外力負荷等兩種形式。在自然狀態及穩定系統中，不施加外力的情況下所做的自體重量有限元素變形分析及應力分析，變形最大值在 Z

平台中央上方位置，所得變形值為  $2.39 \times 10^{-7}$  mm，最大應力值在橫樑與橋架連接處，應力值為 0.37 MPa，顯示此結構之剛性極高。

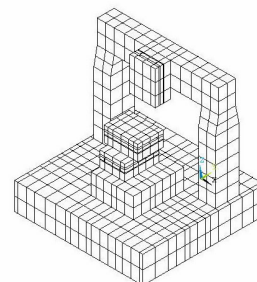


圖 3.3.1 奈米級三次元量測儀之有限元素分析模型

#### (2) 結構暫態反應有限元素法分析

於有限元素法中，暫態反應問題的控制方程式可如下式所示：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.3.5)$$

其中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分別為結構之質量矩陣、阻尼矩陣及剛性矩陣； $\{F(t)\}$ 為結構所受之時變外力向量函數、 $\{u\}$ 為結構之位移向量。於上式中整體結構之質量矩陣及剛性矩陣分別為各元素質量矩陣及剛性矩陣之和，整體結構之阻尼矩陣則包含結構之質量減震效果、剛性減震效果、材料減震效果及各元素減震效果等特性。

本節中利用奈米級三次元量測儀結構有限元素分析模型，從事暫態反應分析。在此對奈米級三次元量測儀結構輸入之時變力以穩定時變力、階梯時變力及脈衝時變力等加以討論，其受力大小為 14.7 Nt，此為線性馬達之最大驅動力。奈米級三次元量測儀結構最重要者為雷射聚焦探頭所在位置之定位精度及穩定性，故於結果輸出方面將考慮 Z 方向移動平台中央之暫態反應問題。圖 3.3.2 至圖 3.3.3 分別顯示此模型在 Y 平台分別受到階梯時變力及脈衝時變力時之暫態反應分析結果。其中施力位置在 Y 平台滑動部分與壓電陶瓷線性馬達接觸部分，施力大小為 14.7 N。由圖中可發現含接點元素模型由於考慮接點特性，其結構之減震效果佳，故受到時變力時，振盪時間較短，且能快速達到穩定。

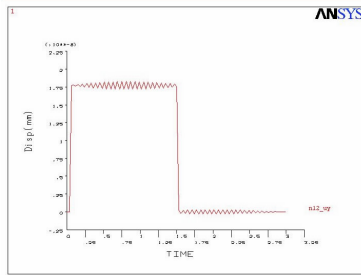


圖 3.3.2 Y 平台受階梯時變力暫態響應圖

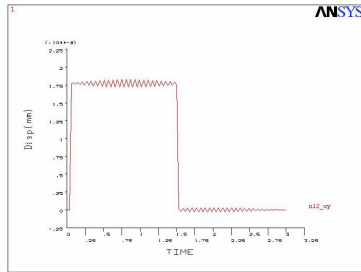


圖 3.3.3 Y 平台受脈衝時變力暫態響應圖

### (3) 結構頻率響應有限元素法分析

若(3.3.5)式中時變外力向量函數 $\{F(t)\}$ 為一週期函數，如(3.3.6)式所示，則結構動態問題將轉變成頻率響應問題。因此頻率響應問題具有和暫態反應問題相同之支配方程式。

$$\{F\} = \{F_{\max} e^{j\ell t}\} e^{iSt} \quad (3.3.6)$$

上式中， $F_{\max}$  為最大外力量值、 $\ell$ 為外力相角、 $S$ 為自然頻率。外力向量 $\{F_{\max} e^{j\ell t}\}$ 已知時，可使用如 3.3.1 節中解靜態問題(3.3.1)式之方法求得其解。圖 3.3.4 顯示此模型在 Y 平台受到簡諧力時之頻率響應分析結果，由此頻率響應分析結果可知和系統的第二振形產生共振，故在進一步設計中應避開此頻率。

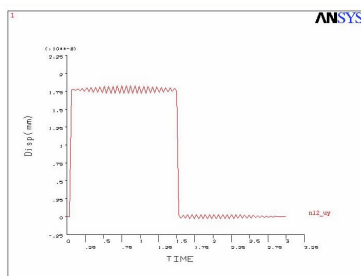


圖 3.3.4 Y 平台受簡諧力之頻率響應圖

## 四、結論與討論

奈米級三次元量測儀的主結構部分，目前已製作完成。在結構接點剛性模擬及動態特性分析

部分，本研究將接點視為結構的一部分，改善傳統結構分析中忽略接點對結構特性影響的缺點，使結構分析結果更能符合實際狀況。此外採用系統化方式處理接點，使結構分析得以忽略接點原有之複雜外形而得到其統一的接點模擬方式，改善以往接點模擬須配合不同結構系統作運算調整的侷限性，使接點模擬更為可行。對存在多種形式接點之大型結構仍能有效率地模擬，且得到合理的結構分析結果。

本研究配合商用有限元素法軟體研究接點特性，改善傳統結構分析須使用數值方法或結構分析法對接點個別處理的不便，使接點模擬方法得到合理簡化。

## 參考文獻

- [1] K. Takamasu, S. Ozawa, T. Asano, A. Suzuki, R. Furutani and S. Ozono, "Basic Concepts of Nano-CMM(Coordinate Measuring Machine with Nanometer Resolution)", The Japan-China Bilateral Symposium on Advanced Manufacturing Engineering, pp.155-158,1996.
- [2] Specification of the Piezo Ceramic Linear Motors, Anorad Corporation.
- [3] Specification of the Cross Roller Guide, THK Corporation.
- [4] J. Datta and K. Farhang, "A Nonlinear Model for Structural Vibrations in Rolling Element Bearings: Part I-Simulation and Results", Journal of Tribology, Transactions of The ASME, Vol. 119, pp. 126-131.1997.
- [5] P. Fort, "Industrial Experiences Made with Hydrostatic Bearings and Guideways", Annals of the CIRP, Vol. 28, No. 1, pp. 287-292, 1979.
- [6] 胡興凱, *常用機器接點之分析與模擬*, 台大機械系碩士論文, 1998。