

行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告

奈米級三次元量測儀研製(3/3)－

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-002-132

執行期限：89年08月01日至90年07月31日

主持人：鍾添東 國立台灣大學機械系

E-mail: ttchung@ccms.ntu.edu.tw

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」。本年為三年計畫之第三年，主要目的為分析與量測奈米級三次元量測儀之結構特性及其最佳化設計。首先建立最終設計的量測儀之有限元素模型，分析其靜態及動態特性，並進行最佳化設計，接著以實驗量測其結構性能，與有限元素分析的結果做比較。

本年度進行奈米級三次元量測儀之製作及最佳化設計，並量測結構性能以驗證設計及分析之正確性。

關鍵詞：奈米級三次元量測儀、有限元素法、結構最佳化、

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，主要目的為設計與分析一奈米級三次元量測儀結構。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。研究內容包含結構設計、結構材料的選用、各方向滑動平台的設計、滑軌的設計、結構靜態與動態特性之最佳化、結構性能分析與量測等項目。

最佳化、結構性能分析與量測等項目。

三、研究方法與研究進度

奈米級三次元量測儀經由設計初型之數次修改後，目前已完成其最終設計，圖 1 為其最終設計圖。

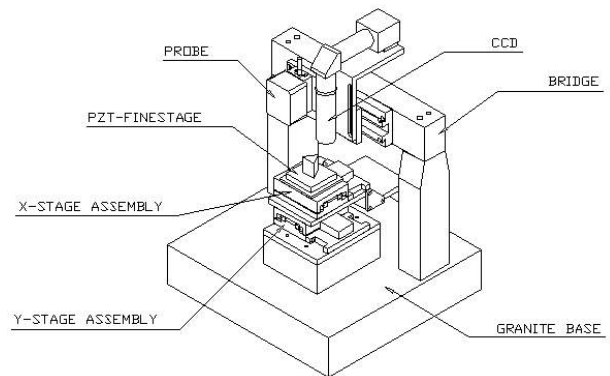


圖1 Nano-CMM之最終設計圖

本年度計畫之主要目的為結構最佳化及其特性分析與量測，各研究項目簡述如下：

1. 建立最佳化問題：

建立結構最佳化問題包括了定義設計變數、目標函數及限制條件等。其設計變數可為模型尺寸，如結構之厚度、寬度或高度等。目標函數可為結構之質量或最大變形量等。將結構行為之限制條件以處罰函數之形式加入目標函數，由不同的目標函數建立各種最佳化問題。

最佳化方法可從非線性程式法 (Nonlinear Programming) 與遺傳演算法 (Genetic Algorithm) 兩種分別進行，前者為傳統最佳化方法，後者為一新興之全域最佳化方法，各有其優缺點及適用領域。

2. 建立最佳化設計之近似問題：

對於非線性程式法之最佳化問題，需將非線性的限制條件加以近似，使得最佳化在進行時可以加快速度，減少運算的時間。

3. 建立靈敏度分析方法：

靈敏度分析(Sensitivity analysis)為結構最佳化設計過程中必備的一道程序，為建構最佳化數值問題時之重要資訊，本研究採用有限差分法，建立各種結構反應的靈敏度分析方法。

4. 結構靜態特性最佳化設計：

以有限元素軟體ANSYS建立結構模型，包含基座、工作平台及CCD等部分，如圖2所示。

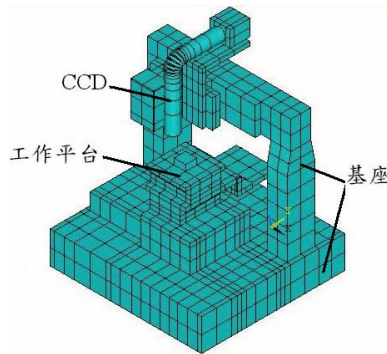


圖2 Nano-CMM之有限元素模型

靜態特性最佳化問題以結構質量為目標函數，設計變數如圖3所示為花崗岩之口型樑寬度，並限制其CCD底端之z方向自重位移量d，如3.1式所示，分別以非線性程式法及遺傳演算法最佳化，以求其結構輕量化。

$$0.80 \sim m \leq d \leq 1.00 \sim m \quad (3.1)$$

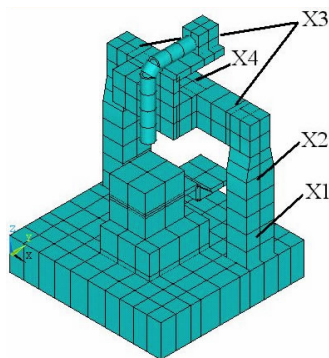


圖3 Nano-CMM之有設計變數示意圖

比較非線性程式法及遺傳演算法之最佳化結果，發現此問題以非線性程式法所得之結果較佳，其口型樑結構初始質量經由輕量化後降低了15.57%，表1為靜態特性之結構最佳化結果。

表1 Nano-CMM靜態特性結構最佳化結果

	原設計值	最佳化值
設計變數X1(mm)	50.00	38.68
設計變數X2(mm)	50.00	45.40
設計變數X3(mm)	50.00	44.52
設計變數X4(mm)	50.00	47.69
CCD底端之z方向自重位移量(μm)	0.90	1.00
口型樑結構質量(Kg)	9.1687	7.7412

5. 結構動態特性最佳化設計：

動態特性最佳化問題亦以結構質量為目標函數，設計變數為花崗岩之口型樑寬度，並限制其結構之自然頻率 w_1 及 w_2 ，如3.2式所示，分別以非線性程式法及遺傳演算法最佳化，以求其結構輕量化。

$$\begin{aligned} 167 \text{ Hz} < \check{S}_1 < 204 \text{ Hz} \\ 257 \text{ Hz} < \check{S}_2 < 314 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (3.2)$$

比較非線性程式法及遺傳演算法之最佳化結果，發現此問題以非線性程式法所得之結果較佳，其口型樑結構初始質量經由輕量化後降低了8.98%，表2為動態特性之結構最佳化結果。

表2 Nano-CMM動態特性以非線性程式法最佳化設計之變數變化

	原設計值	最佳化值
設計變數X1(mm)	50.00	43.49
設計變數X2(mm)	50.00	47.31
設計變數X3(mm)	50.00	46.82
設計變數X4(mm)	50.00	48.69
自然頻率1(Hz)	186.23	187.82
自然頻率2(Hz)	286.13	257.00
口型樑結構質量(Kg)	9.1687	8.3452

6. 最佳化結果比較：

在靜態特性最佳化問題上，以非線性程式法最佳化所得結果較佳， Γ 型樑結構質量可降低15.57%，由9.1687 Kg降至7.7412 Kg。

在動態特性最佳化問題上，以非線性程式法最佳化所得結果較佳， Γ 型樑結構質量可降低8.98%，由9.1687 Kg降至8.3452 Kg。

本研究所進行之結構輕量化雖僅對 Γ 型樑結構尺寸做更改，但由於其機台底部高度對結構特性較無影響，因此若能視實際情況降低高度，可再降低其質量。

7. 結構性能量測：

將奈米級三次元量測儀以衝錘法 (Impulse Method) 配合加速規的使用，進行結構之自然頻率量測實驗。如圖4~7所示將Nano-CMM分別以(基座)、(基座+工作平台)、(基座+CCD)及(整部機台)等四種情況進行量測：

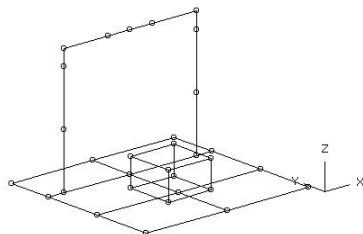


圖4 Nano-CMM之基座簡圖

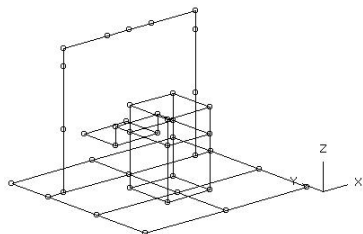


圖5 Nano-CMM之基座及工作平台簡圖

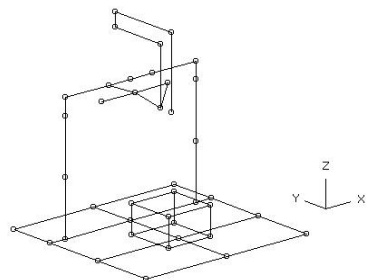


圖6 Nano-CMM之基座及CCD簡圖

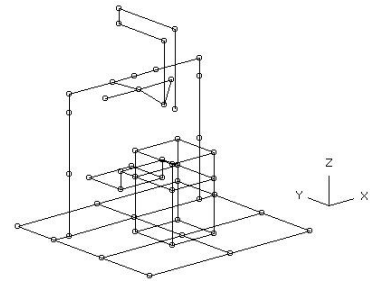


圖7 Nano-CMM之整部機台簡圖

表3為實驗所得的自然頻率值，當基座上加入工作平台或CCD部分後，將使得整體之自然頻率降低，尤其在加入CCD後會出現更低頻率的局部震動模態，如圖8及圖9所示。

表3 Nano-CMM之自然頻率實驗值

量測編號	量測部分	自然頻率(Hz)	
		Mode 1	Mode 2
Case1	基座	301.31	628.07
Case2	基座+工作平台	296.75	608.73
Case3	基座+CCD	201.56	286.68
Case4	整部機台	186.23	286.13

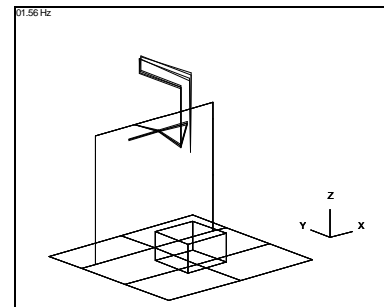


圖8 Nano-CMM基座及CCD之自然振型1

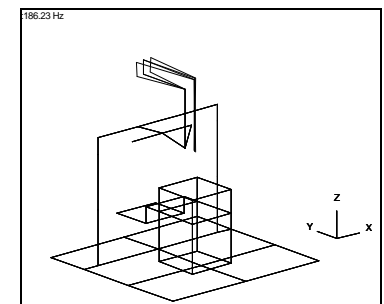


圖9 Nano-CMM整部機台之自然振型1

以有限元素軟體 ANSYS 建立之模型，分析量測儀結構之自然頻率，並與其實驗值做比較。表4為其自然頻率之實驗值與分析值的比較，最大誤差為8.99%。

表 4 Nano-CMM 自然頻率之實驗值與分析值比較

量測編號	量測部分	模態編號	自然頻率(Hz)		誤差 (%)
			實驗值	分析值	
Case 1	基座	Mode 1	301.31	302.92	0.53
		Mode 2	628.07	620.13	1.26
Case 2	基座及工作平台	Mode 1	296.75	292.35	1.48
		Mode 2	608.73	611.24	0.41
Case 3	基座及 CCD	Mode 1	201.56	187.80	6.83
		Mode 2	286.68	312.45	8.99
Case 4	整部機台	Mode 1	186.23	187.77	0.83
		Mode 2	286.13	304.49	6.42

四、結果與結論

奈米級三次元量測儀已經完成結構最佳化及性能量測，其實驗所得結果可驗證分析結果之正確性。

在結構最佳化方面，包含靜態與動態特性的質量輕量化：靜態特性最佳化是限制 CCD 底端之 z 方向自重位移量，其非線性程式法最佳化可將門型樑結構質量降低 15.57%；動態特性最佳化是限制整部機台之自然頻率，其非線性程式法最佳化可將門型樑結構質量降低 8.98%。

在結構性能分析與量測方面，以有限元素軟體建立起結構模型，所分析之自然頻率與實驗量測之誤差最大為 8.99%，在可接受之範圍內。

本研究在奈米級三次元量測儀之結構最佳化及性能量測上可提供確實而有用的參考數據，對於將來的量測儀改良有相當的幫助。

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] Yang-Tai Lin, Tien-Tung Chung and Te-Chang Sun, "Weight Optimization of Nonlinear Truss Structure with Static Response", J of CSME, no.4, vol.13, 1992.
- [3] Tien-Tung Chung and Te-Chang Sun, "Weight Optimization of Reinforced Concrete Beams with Static Nonlinear Response", Structural Optimization, no.2/3, vol.18, pp.173-180, 1994.

- [4] G. Taleb-Agha and R. b. Nelson, "Method for the Optimum Design of Truss-Type Structures", AIAA J., V.14, N.4, pp.436-444, 1976.
- [5] L. A. Schmit and B. arshi, "Some Approximation Concepts for Structural Synthesis", AIAA J., V.12, N.5 pp.692-699, 1974.
- [6] V. Braibant and C. Fleury, "An Approximation Concepts Approach to Shape Optimal Design", Comp. Meth. In Appl. Mech. And Eng., V.53 pp.119-148, 1986.
- [7] W. M. Jenkins, "A genetic algorithm for structural design optimization", Emergent Computing Methods in Engineering design, 1996.
- [8] P. Hajela and E. Lee, "Genetic Algorithms in Topological Design of Grillage Structures", Discrete Structural Optimization, edited by W. Gutkowski and J. Bauer, Springer-Verlag, Berlin, pp. 30-39, 1994.
- [9] J. L. Marcelin and P. Tromprtte, "Optimization of composite beam structures using a genetic algorithm", Structural Optimization 9, 236-244, 1995.

Design and Analysis of A Nano-CMM Structure

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 third year of the whole three years project. The main object of this sub-project is to optimize the structure of a Nano-CMM and measure its responses. The finite element model is established to analyze the static and dynamic characteristics, and to do the optimum design of the structure. Then, the modal measurement of the structure is compared with the analysis results.

In this year, the fabrication and the optimization of a Nano-CMM have been accomplished, and the validity and correctness of the whole design process are also verified from the experimental measurement.

Keywords : Nano-CMM, The Finite Element Method, Structural Optimization