

小型微/耐米級三座標測量機之研製

Development of a Small Coordinate Measurement Machine with Micro/Nano Accuracy

范光照^{1,2}, 朱志良³, and 鍾添東²

¹ 合肥工業大學儀器儀表學院

² 台灣大學機械系, 台北, 台灣

³ 南台科技大學機械系, 台南, 台灣

1. 摘要

本文介紹研製一套低成本的小型三座標測量機過程，作為微/耐米級超精密測量設備。整體機台結構採花崗岩材料；X/Y 軸的移動平台利用壓電材料摩擦驅動與撓性變形原理可達長短兩行程 25mm 範圍及 5nm 的微位移，藉由自行研發的衍射干涉激光尺，位置回饋量測系統可具有 0.025nm 的分辨率；測量探頭則取自一般 DVD 光讀取頭的自動聚焦原理改裝，最佳分辨率可達 2.5nm。本離形機可適合微機電元件、微型器件及膜厚等量測用。

關鍵詞：小型三座標測量機、納米定位平台、衍射干涉激光尺、自動聚焦探頭

2. 前言

在廣泛地在工業產品尺寸精度檢測上，三座標測量機是一個不可或缺的工具，近年來由於微納米技術的興起，使得產品趨於微細化，當器件尺寸小到幾個厘米且公差要求在亞微米以下時，傳統之三座標測量機已不敷使用。因此，近年來國內外已有相關研究單位投入體積小、高精度、具納米級(100nm 到 1nm)的三座標測量機研制，但大多属于国家级研究单位或世界级重点大学的研究项目，茲分析整理如下：

(一) 美国 NIST 的 MMM [1]

线栅尺 (line grating scale) 的刻印技术于九十年代初期因半导体制造，微机电制造，激光刻，电子束刻等技术革新的开发已趋成熟，美国 NIST 于 1987 年在 Teague 博士的领导下开始研制分子测量机 (Molecular Measuring Machine, MMM) 的计划，主要是希望建立国家级线栅尺的校正标准。机台测量范围为 50mm×50mm 二维平台，以激光干涉仪作为位置感测，探头采用 SPM，在重重环境控制罩的保护下 (隔震、隔音、真空、恒温恒湿)，希望达到小于 1nm 分辨率及 10nm 总体精度的指标，研究仍繼續進行中。

(二) 英国 NPL 的 SCMM [2]

由英国国家物理实验室 (National Physical Lab.) 所承担的小型三维测量机开发，主要是针对微型器件的三维尺寸测量。设计构想是在传统的高精度 CMM (Leitz) 台面上加装高精度位移感测微型机台及在原探头座上加装微型探头，探头直径为 0.5 或 1mm，触发感测原理为特殊设计的三点电容感应。采用工件台静止，三轴位移由探头座运动的原 CMM 功能，安装六具微型激光干涉仪可同时测得探头移动的六个自由度。测量范围为 $50 \times 50 \times 50 \text{mm}$ ，各轴线性分辨率为 0.31nm，总体测量不确定度为 50 至 100nm，已可进行工业界委托测量。

(三) 德国 PTB 的 Special CMM [3]

采用传统的高精度 CMM 机台，发展接触式的光学感应及非接触式 CCD 感应的双探头系统，测量范围为 $25 \times 40 \times 25 \text{mm}$ ，各轴重复精度为 10nm，总体不确定度为 100nm，至今仍未宣布完成。

(四) 日本东京大学的 Nano-CMM [4]

此为大学最早投入的研究，由 Takamatsu 教授于 1995 年开始，机台设计采用传统 CMM 缩小化的原理，移动桥式机台由摩擦轮做横向推动，利用 Mitutoyo 公司的光栅尺感测位移，特点为二维运动台为共平面设计，所设计的接触式光学感应探头直径为 $50 \mu\text{m}$ ，具有 10nm 的分辨率，测量范围为 $10 \times 10 \times 10 \text{mm}$ ，位移重复性为 20nm，总体精度为 50nm，至今仍在改善中。

(五) 美国 MIT 与北卡大学合作的 Subatomic 测量机 [5]

主要是提供 AFM 探头操作时的双轴定位平台，于 1998 年开始合作，平台由磁浮驱动，激光干涉仪感应位置，测量范围为 $25 \times 25 \times 0.1 \text{mm}$ ，轴向分辨率达 0.1nm，重复性达 1nm，总体精度为 10nm。

(六) 荷兰 Eindhoven 大学的高精度 3D-CMM [6]

采用三点对称式机台设计，符合阿贝原理的位置感测，电子式接触触发探头原理与 NPL 的相似，探头直径 0.3mm，不确定度 25nm，探头座用 MEMS 制作，测量范围为 $100 \times 100 \times 100 \text{mm}$ ，各轴不确定度为 100nm，总体不确定度亦为 100nm。

(七) 德国 SIOS 公司的三维定位及测量机台 [7]

此为 Ilmenau 大学 Jäger 教授所研制的设备，技术转让给 SIOS 公司商品化，XY 平台采用线性电机驱动，丝杆副传动的两个一轴运动台堆栈 (stack up) 组合，虽用光纤导引的激光干涉仪测量定位，但因存在固有的运动误差，故须加装 PZT 微动台来补偿，供 SPM 探头做三维定位测量。测量范围为 $25 \times 25 \times 5 \text{mm}$ ，各轴分辨率为 1.24nm。

綜觀歷年的相關研究，得知各國於小型三座標測量機的研究上，皆大量使用昂貴的定位與測量設備(如激光干涉儀)，因此如何以較低成本開發此小型三座標測量機，藉以掌握各項關鍵技術，為本研究的主要考量。

3. 系統架構

本研究所設計的小型三座標測量機整體構想如圖 1 所示。主要結構包含花崗岩平台與橋架、X/Y 定位平台、繞射干涉激光尺(LDGI)、及 DVD 與 CCD 雙測量探頭等。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台面與固定式橋架，可以提供一個良好的參考面。長行程的 X/Y 精密定位則採用美國 Anorad 公司的雙軸移動台，各軸使用以色列 Nanomotion 公司的壓電陶瓷線性馬達 (Piezo Ceramic Linear Motor, PCLM)加以驅動[8]，此長行程可達 20mm 範圍及 5nm 的微步。各軸機台邊裝置一維精密衍射干涉激光位置量測系統(Laser Diffraction Grating Interferometric System, L.D.G.I.)，作為 PCLM 之雙軸位移感測。X 平台上置放一 PZT 驅動的 XY 微位移平台以做 PCLM 的定位誤差補償。橫樑上可同時安裝自行開發的自動聚焦量測探頭與 CCD 探頭，藉由滑動機構的定位，使該系統能同時進行 Z 軸高度與二維形狀尺寸量測。

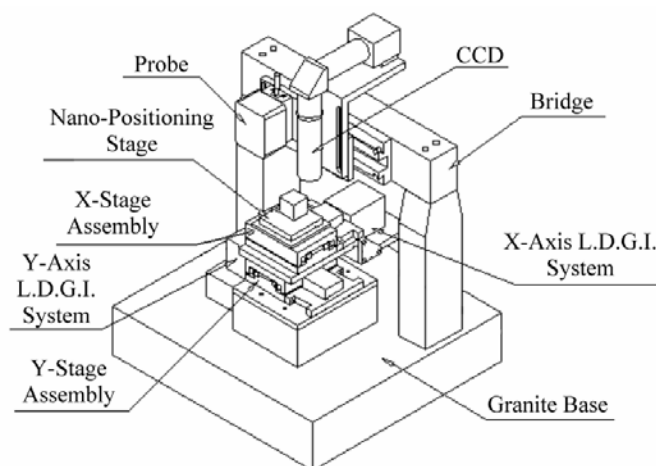


圖 1: 微型三座標測量機之系統架構示意圖

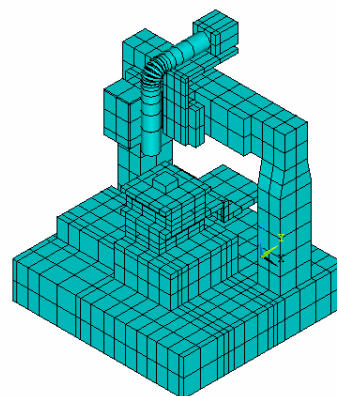


圖 2: 有限元素分析模型

4. 機台結構分析

機台本體主要分成工作平台、橫樑與橋架三大部分，總尺寸為 360mm x 380mm x 380mm，總重量約為 20Kg。

在理論分析方面，本研究採用 ANSYS 商用有限元軟件來進行機台結構分析。圖 2 為以 8 節點四面體元素所分割的網格模型。共有 1115 個元素、1932 個節點、11585 個自由度。在實驗方面，採以衝鏈法 (Impulse Method) 配合加速規的使用進行結構之自然頻率測量與分析。

表 1 所示為其自然頻率之實驗值與 ANSYS 分析值的比較，單純機台本體的第一共振頻率為 302Hz，全部組件加入時為 187Hz，最大誤差為 8.99%，為可接受之誤差範圍。

表 1 微型三座標測量機自然頻率之實驗值與分析值比較

量測	結構組成	模態	自然頻率(Hz)	誤差(%)
----	------	----	----------	-------

編號		編號	實驗值	分析值	
Case 1	機台本體	Mode 1	301.31	302.92	0.53
		Mode 2	628.07	620.13	1.26
Case 2	1+定位平台	Mode 1	296.75	292.35	1.48
		Mode 2	608.73	611.24	0.41
Case 3	2+探頭系統	Mode 1	186.23	187.77	0.83
		Mode 2	286.13	304.49	6.42

5. 測量探頭之研製

5.1 自動聚焦探頭原理 [9,10]

測頭之研製是以市售的光碟機(DVD-ROM)內之光學讀取頭(Pickup head)的自動聚焦行為進行研究。圖 3 所示為 SONY 公司的 KHM220，該讀取頭系統的光學聚焦方式，乃由二極體激光經由光柵產生衍射後，分為三道檢測光束，再經分光鏡、準直透鏡後將激光變成一準直光束，此準直光束經過一鏡片中央呈現有間隔十到數百 μm 同心圓狀溝槽的 Fresnel 透鏡時，光束分離成兩部分，聚焦成適合 DVD 與 CD 光碟片之資料儲存位置的雙焦點。反射光束則循原路徑後穿越柱狀像散透鏡，而投射至四象限光感測器(four-quadrant photo detector)上。四象限感測器會根據光點在四個象限上的光分佈，輸出一失焦訊號(Focus Error Signal, FES)。這個失焦訊號經過運算放大及補償處理，可反饋推動音圈馬達(Voice Coil Motor, VCM)，將物鏡推到碟片可以在聚焦平面上的位置，達到鎖焦的目的。此時讀取頭再根據反射光的強度變化來讀取碟片上的數位訊號，完成資料存取的動作。

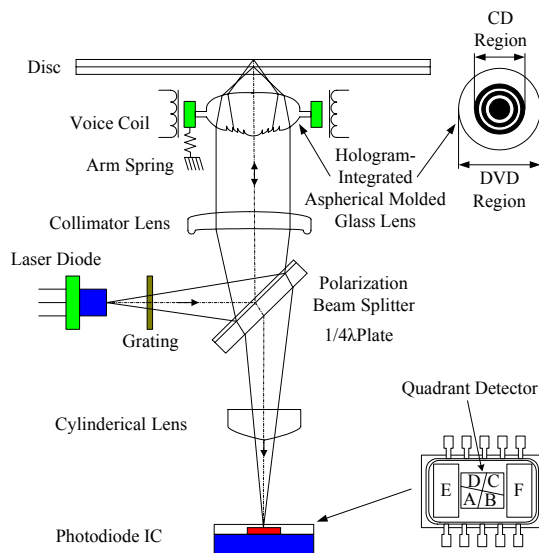


圖 3: SONY 光讀取頭的內部結構圖

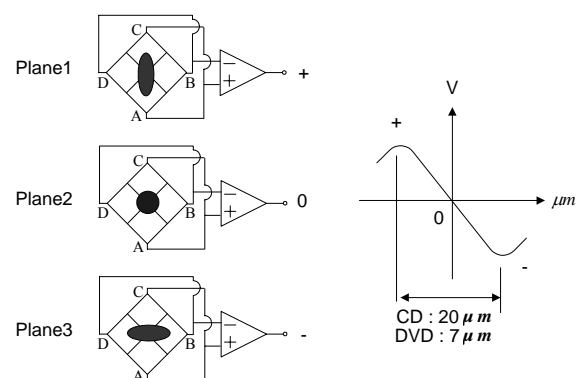


圖 4: 四象限感測器之訊號處理與 S-曲線

本研究所使用的 DVD 讀取頭其聚焦原理為像散法，當物體偏離透鏡前焦面位置時，在四象限光感測器上之成像光點呈現橢圓變化(Plane 1、Plane 3)，當物體於透鏡之正焦位置時，成像光點呈現圓形(Plane 2)，經四象限之(A+C)-(B+D)，可得失焦誤差訊號的 S-曲線，如圖 4。此 S-curve 的線性範圍很短，且會隨材質的光反射率變化，

若待測件表面起伏在此範圍時可直接測量，超出此範圍時就需驅動音圈馬達做聚焦行為的控制。

如圖 5 所示，在自動聚焦的過程中，當物體反射面位於透鏡的焦點時，失焦訊號為零，軌跡落在 S 曲線的中點，當物體反射面離開了焦平面，都會使失焦訊號輸出一個不為零的值，這個值經過控制法則的處理後，回去驅動 VCM，使透鏡朝失焦訊號為零的方向移動，最後與彈簧達力平衡，透鏡停止於失焦訊號為零的位置上。此時維持透鏡不動所需的電流，轉換成電壓訊號，即是 VCM 的驅動電壓訊號。

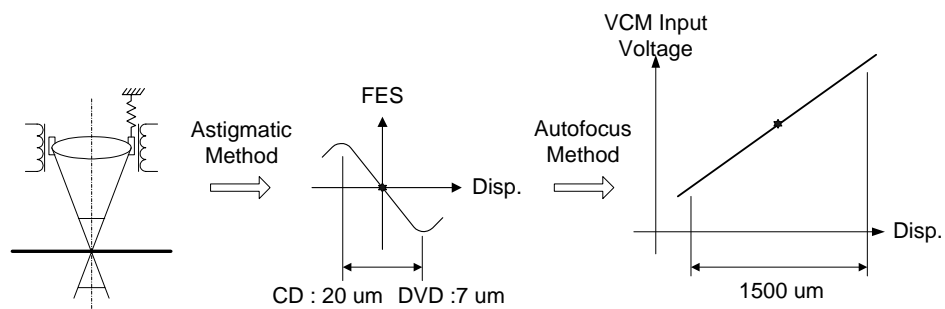


圖 5 自動聚焦原理示意圖

5.2 實驗架設

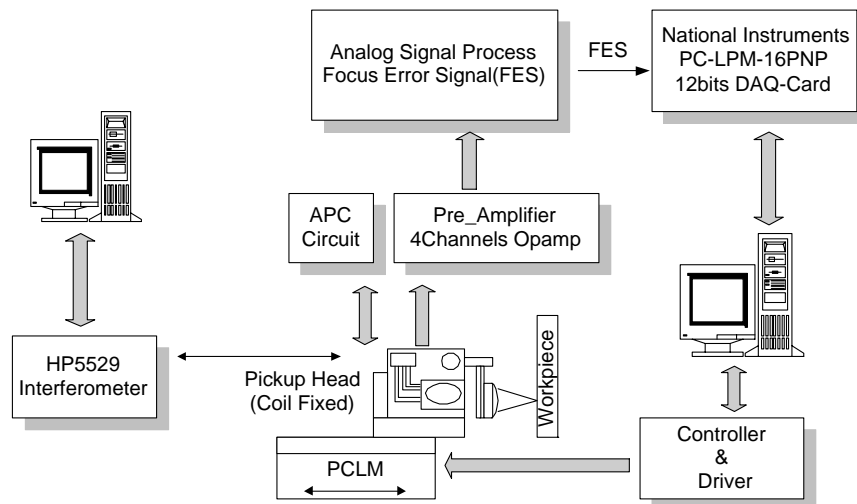


圖 6: 實驗架設圖

如圖 6，探頭架設於一維 PCLM 平台上，平台的實際位移是由 HP5529 激光干涉儀量取，APC 電路供應二極體激光穩定電壓，探頭訊號利用前置放大器加以處理，最後以 A/D 轉換進入 PC 記錄。整個的測量以 PC 為中心，首先將 PCLM 的平台移至適當位置，而後每次移動 1 μ m，到達定位時，觸發 A/D，抓取探頭的輸出訊號 FES 與平台位移值，如此我們可以得到平台位置與探頭輸出 (FES) 的對應關係，此關係

便是 S 曲線。當位移超出 S 曲線時則驅動 VCM，移動透鏡回到工件聚焦點，透鏡的位移量可由 HP5529 量得。圖 7 為實際量測碟片同時具有 DVD 與 CD 的 S 曲線，CD 的線性區約為 10 μm 而 DVD 為 5 μm ，利用 12bitA/D 的資料擷取卡且將輸出電壓放大到 $\pm 5\text{V}$ 時，CD 段的分辨率可得 5.8nm、DVD 段為 2.5nm，經過九次重覆實驗所得的平均位移誤差分別為 34nm 及 29nm。圖 8 為 DVD 自動聚焦的特性曲線，取中段較線性區的 200 μm 分析，平均位移誤差為 0.18 μm ，分辨率為 40nm。

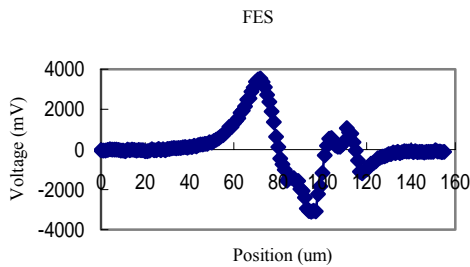


圖 7：量測出的 S 曲線

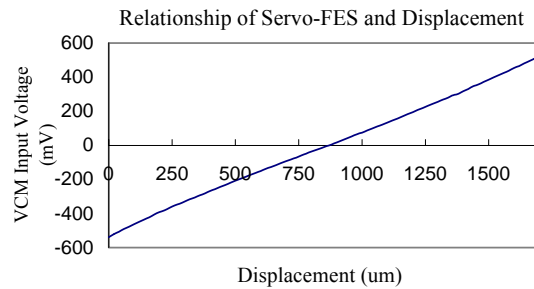


圖 8：DVD 自動聚焦特性曲線

6. 雙軸定位平台之設計與分析

6.1 長行程 X/Y 軸精密定位平台

本研究採用美國 Anorad 公司出品的壓電陶瓷線性馬達 [Piezo Ceramic Linear Motor (PCLM)] 的 XY 定位平台，驅動原理為以超音波共振產生磨擦運動，每一平台均以兩組交叉滾子導軌支撐，具有 25mm 行程及 5nm 分辨率。

6.2 精密衍射干涉式激光尺研製[11]

精密激光衍射干涉位置測量系統 [Laser Diffraction Grating Interferometric System (L.D.G.I.)] 為一種光柵干涉儀，它利用細密光柵間距做為測量尺規，貼於 PCLM 移動台側面作為長行程之雙軸定位值輸出。圖 9 為 L.D.G.I. 光學位置量測系統之架構圖，其基本原理是：採用一反射式線性全息光柵作為感應與訊號轉換傳輸元件，使光束經光柵衍射後，具有等值、反向雙重都卜勒頻移的兩束 ± 1 階衍射光。該兩束光分別經反射鏡、分光鏡後疊加，形成“差頻干涉”，因此可通過檢測接收拍頻信號的相移變化，來實現對光柵運動位移的測量。為使檢測器輸出端能得到一組彼此正交的弦波訊號，當干涉訊號進入檢測器前利用一透鏡(Condenser Lens)來調整干涉條紋的大小，使其與 photodetector array 上光電二極體單元的幾何形狀相配合。本研究採用傳統的 4 分割技術與振幅細分法，並結合 DSP 作高速電子細分割處理。目前此系統使用光柵常數 $d=0.833\mu\text{m}$ ，因此利用 16380 細分割後之系統分辨率為 0.025 nm。

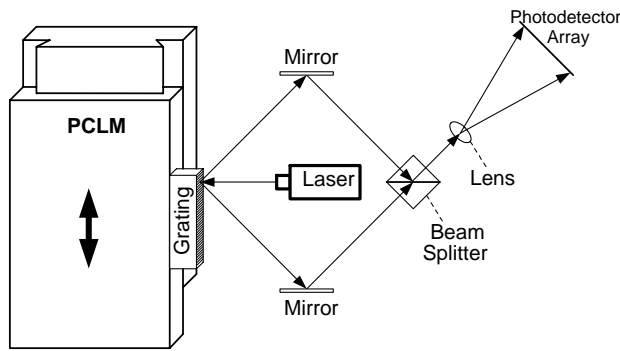


圖 9：平台位移量測架設示意圖

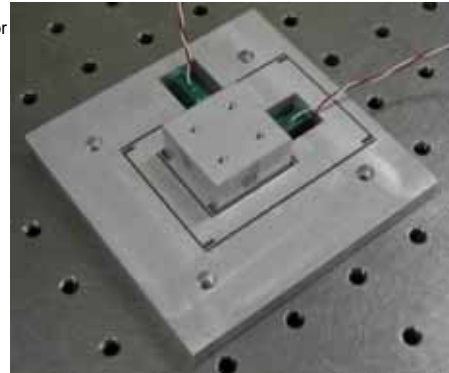


圖 10：耐米微動平台

6.3 雙軸耐米微動平台研製

長行程的 PCLM 平台經由 HP5529 校正可知在 25mm 行程內有約 $0.1\mu\text{m}$ 的定位誤差，此誤差將由置於其上的雙軸耐米微動平台作最終的定位補償。此微動台採共平面撓性結構設計，利用壓電致動器可提供 $10\mu\text{m}$ 之行程，圖 10 為完成的實體圖，實驗測試可得 30nm 的微位移。

7. 系統實際測量

本系統除了上述各項關鍵模塊之外，另加入一非接觸影像量測系統作為二維邊緣檢測，整台微型 CMM 置放於一恆溫恆濕的防振腔內操作，以減少環境誤差。圖 11a 為結合 CCD 影像系統的邊緣測量及自動聚焦探頭高度測量結果的手錶小齒輪三維形貌；圖 11b 為以同方法但高度變化的硬幣三維形貌測量。另外亦測量一已被蝕刻的硅晶圓表面，此表面為光阻(Photo Resistance)所披覆，經蝕刻後造成一條條的光柵軌跡，由於並未將光阻完全蝕刻完畢，所以其表面皆是相同的材質，對於我們而言，即是相同的反射率。利用 AFM 量測可得知其表面輪廓如圖 12a，此試片的波峰至波谷高低差距大約在 $0.6\mu\text{m}$ 至 $1.1\mu\text{m}$ 左右，而每一蝕刻的軌距平均為 $2\mu\text{m}$ 。圖 12b 即為使用本系統自動聚焦探頭系統量測之結果。經觀察得知，在波峰至波谷高低的差距為 $0.6\mu\text{m}$ 至 $1\mu\text{m}$ ，而蝕刻軌距約為 $2\mu\text{m}$ ；此量測結果與 AFM 所得之結果十分近似。

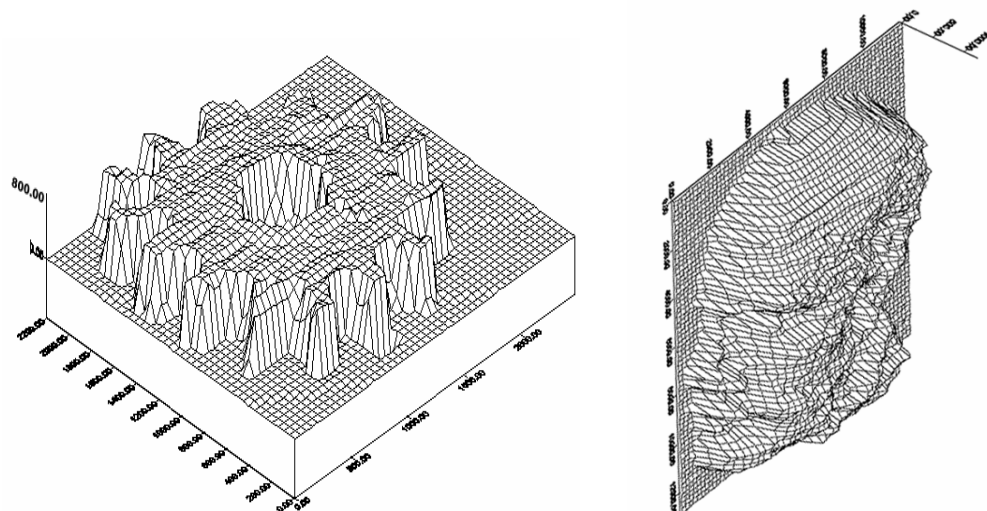


圖 11a：手錶小齒輪的三維形貌測量結果

圖 11b：硬幣三維形貌測量

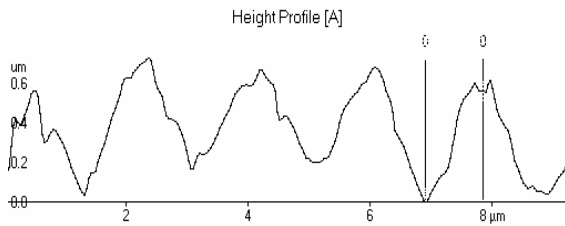


圖 12a：以 AFM 測量的硅蝕刻剖面圖

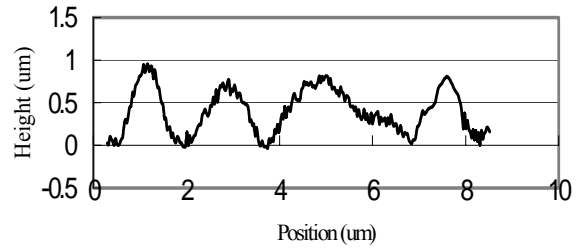


圖 12b：以本系統測量結果

8. 結論

本研究發展了一套低成本的小型三座標測量機，整體系統除採用 Anorad 公司的 PCLM 長行程定位台外，其餘各模塊皆自行研發，確實掌握了自主性關鍵技術。測量精度目前為 30nm，已可對微機電產品、微模具、微器件等進行測量。未來將朝 10nm 精度提升，以達到耐米級 CMM 的開發。

參考文獻

- [1] Kramar, J., "Molecular measuring machine research and development," Internet access, <http://www.mel.nist.gov/div821/webdocs-14/m3.pdf>, 2003.
- [2] NPL, "Measurement of miniature components and features," Internet access, <http://www.npl.co.uk/length/dmet/science/small-cmm.html>, 2003.
- [3] Schwenke, H., et al., "Future challenges in co-ordinate metrology: Addressing metrological problems for very small and very large parts," Proc. of the IDW2001, Knoxville, 2001.
- [4] Takamasu, K., et al., "Development of nano-CMM and parallel CMM—CMM in the 21th century," Proc. of the International Dimensional metrology Workshop, Tennessee, USA, 1999.
- [5] Hocken, R.J., Trumper, D.L. and Wang, C., "Dynamics and Control of the UNCC/MIT Sub-Atomic Measuring Machine", Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, pp. 373-376, 2001.
- [6] Haitjema, H., et al., "Development of a silicon-based nanoprobe system for 3-D measurements," Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, pp. 365-368, 2001.
- [7] SIOS GmbH, "Nano positioning and nano measuring machine," <http://www.siso.de>, 2003.
- [8] "Specification of the Piezo Ceramic Linear Motors", Anorad Corporation, 1998.
- [9] Fan, K.C., Lin, C.Y. and Shyu, L.H., "Development of a Low-cost Focusing probe for Profile Measurement", Measurement Science and Technology, Vol. 11, No. 1, pp. 1-7, 2000.
- [10] Fan, K. C., Chu, C. L. and Mou, J. I., "Development of a Low-cost Autofocusing Probe for Profile Measurement", Measurement Science & Technology, Vol. 12, pp. 2137-2146, 2001.
- [11] Fan, K. C., Su, C. D. and Mou, J.I., "Error analysis for a diffraction grating interferometric stylus probing system," Measurement Science and Technology, Vol. 12, pp. 482-490, 2001.