

國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



微型三次元量測儀體積誤差補償之研究

**Research on the Volumetric Error Compensation of
Micro Coordinate Measuring Machine**

許世昕

Hsu, Shih-Hsin

指導教授：范光照 博士

Advisor: Fan, Kuang-Chao, Ph.D.

中華民國一百零三年七月

July, 2014

誌謝



在台大六年的求學過程，即將在此告一段落，雖然一直以來很期待能快點畢業，但到了要離開的這個時候還是有點感傷。大學時期因緣際會，初次到了精密量測實驗室打工幫忙，在范光照教授細心指導下學習，沒想到就此對研究生活產生了興趣，在精密量測實驗室寫下了一段充實且有趣的故事。在老師的門下求學研究的我感到非常幸運，老師總是對學生們照顧有加，除了對研究上的問題與瓶頸總是適時給予許多的諮詢與幫助，更提供了許多的機會讓我能夠看到學校以外的世界。在研究生涯中，從實驗室與老師身上學到知識與技術外，更學到了面對難題的態度與解決問題的能力，老師在研究上的辛勤努力我們更是望塵莫及，影響我面對未來挑戰的態度。同時也要感謝口試委員修芳仲教授與陳亮嘉教授的寶貴意見，使得論文內容更加嚴謹與完整。

在兩年多的實驗室生活，有大家的幫忙與陪伴讓我的研究生活更加順利：感謝博班學長宏瑜的教導與建議，可以在研究上更加順遂，也祝賀我們可以一起畢業；感謝學長家葦、仲豪、兆民、柏勳、於經驗上的指導與幫助；感謝學長旻君、梓楠、揚喻的傳承，很懷念我們一起度過的種種考驗與美好時光；感謝學長羿宗，你總是在困難時給予最有利的幫助，真是天賜的禮物；感謝同窗好友翰銘與文波，在研究上互相討論，解決困難，生活上互相幫忙，一起度過碩士班最艱困的日子；感謝學弟立民與皓偉，如果沒有你們，很多實驗無法如此順利，也預祝你們未來研究順利；另外要特別感謝助理雅淑，謝謝你為實驗室大家的繁瑣事務的幫忙，讓我們可以專心研究。

除此之外，求學的路上還有許多同學與好友，一路上有你們的陪伴與幫助，讓我的生活更精采。最後感謝我的家人在我求學過程上的支持與栽培，在我挫折的時候給我溫暖與鼓勵，順利完成學業。最後希望我的家人、師長、朋友們能夠與我一起分享這份成果與喜悅。

摘要



本論文為微型三次元量測儀體積誤差補償之研究，希望藉由本實驗室自行開發的各種系統，回授補償各種誤差，以達體積誤差修正而能提升量測能力之目的，其中包含將量測儀組裝時的各項幾何誤差補償，如垂直度誤差與角度所造成的阿貝誤差以及多自由度量測系統(MDFMS)的波長量測補償模組與量測光面鏡之形貌誤差補。

文中將介紹微型三次元量測儀之各硬體部分，包括共平面平台、Z軸、探頭、波長補償模組及感測器，感測器包含作為位置回授的線性繞射光柵干涉儀(LDGI)以及多自由度量測系統(MDFMS)。

本研究中利用穿透式光柵與自動視準儀結合成波長補償模組，並以市售 SIOS 雷射干涉儀比對校正出感測器之絕對波長，提高平台定位的準確度。另外就體積誤差補償部分，整合面鏡誤差、光程差、阿貝誤差、垂直度誤差與平坦度誤差，推導出一套完整體積誤差模型，在誤差模型下實現體積誤差自校正之功能。

而在探頭球頭部分，則以商用光纖熔接機搭配各項機構，設計出一套低成本快速生產之製程，組裝後的探頭達到直徑 $< 50 \mu\text{m}$ ，真圓度 $< 1 \mu\text{m}$ ，偏心率 $< 1 \mu\text{m}$ ，之需求，將可應用於高深寬比等傳統不易量測之工件。

最後結合接觸式掃描探頭做量測應用，可以觸發功能量測出實際點，利用後處理方式運算，計算出階高與組裝配合誤差。配合掃描程式量測綠點科技微透鏡，推廣了微型三次元量測儀於小型複雜工件之量測應用。

關鍵詞：微型三次元量測儀、MDFMS、波長補償、體積誤差、面鏡誤差

ABSTRACT



In the modern metrological technology, traditional coordinate measuring machines (CMM) is not able to satisfy the required precision and accuracy in micro/nano scale. Therefore, NTU Metrology Lab developed a Micro coordinate measuring machine (Micro-CMM) with high precision.

This research presents the combination of industrial techniques, including an Abbe free XY Co-planar stage, Z-axis ram, scanning probe and high-resolution sensors. Based on these parts, the goal of this research is to improve Micro-CMM, which contains Laser wavelength error and volumetric error.

For the wavelength part, this research designs a wavelength compensator by transmission grating and temperature sensor, and calibrates the real wavelength under temperature variation.

Besides, this research builds a volumetric model, verified by experiments of Abbe error, perpendicular error, flatness error and mirror error. By this volumetric error model, the performance of Micro-CMM will be promoted well.

This research also improves the method of the fabrication process of optical fiber tip ball. By this method, the fiber is heated to melting point and extruded before forming the tip ball. The result tip ball diameter is around 50 μm , and it's much better than commercial products.

Finally, apply the Micro-CMM to measure different parts with various functions, such as small lens and commercial camera model.

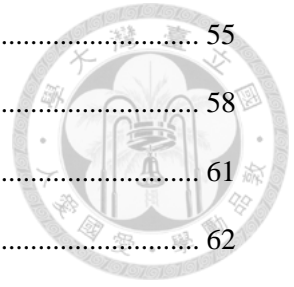
Keywords : Micro-CMM, MDFMS, wavelength compensation, volumetric error, mirror error

CONTENTS

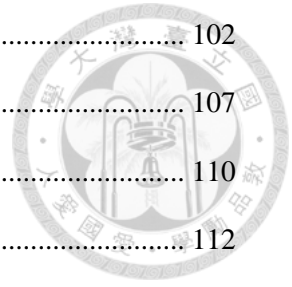


摘要.....	1
ABSTRACT.....	3
LIST OF FIGURES.....	7
LIST OF TABLES.....	11
Chapter 1 緒論.....	12
1.1 研究動機與目的.....	12
1.2 文獻回顧.....	14
1.2.1 各國三次元量測儀簡介.....	14
1.2.2 三次元體積誤差補償.....	29
1.2.3 探球製作.....	33
1.3 研究內容概要.....	34
Chapter 2 微型三次元量測儀之整體架構.....	35
2.1 共平面平台.....	36
2.2 寶塔式橋架配重主軸.....	38
2.2.1 寶塔式橋架結構.....	38
2.2.2 配重式主軸.....	40
2.3 線性繞射光柵干涉儀.....	42
2.3.1 量測原理.....	42
2.3.2 光柵繞射與督都卜勒頻移.....	43
2.3.3 線性光柵尺.....	46
2.4 多自由度量測系統.....	47
2.4.1 干涉儀量測原理.....	48
2.4.2 自動視準儀補償原理.....	51
2.4.3 波長補償原理.....	52
2.5 超音波馬達.....	53
2.5.1 超音波馬達結構及特性.....	53

2.5.2	Nanomotion 超音波馬達	55
2.5.3	超音波馬達驅動器 AB2 driver 介紹	58
2.5.4	超音波馬達運動控制	61
2.6	接觸式掃描探頭.....	62
Chapter 3	波長量測補償模組	65
3.1	波長補償光路.....	65
3.2	波長補償模組實驗架設.....	66
3.2.1	四象限光感測器	66
3.2.2	實驗架設光軸校準	67
3.3	波長模組校正補償實驗.....	68
Chapter 4	微型三次元量測儀體積誤差	73
4.1	面鏡誤差.....	76
4.2	光程差.....	78
4.3	阿貝誤差.....	79
4.3.1	定位誤差找阿貝臂	80
4.3.2	探頭與光軸校準	82
4.3.3	更換探針時求阿貝臂	84
4.4	垂直度.....	84
4.5	平坦度.....	88
4.6	三次元體積誤差求實際座標.....	91
4.6.1	XY 共平面平台分析.....	91
4.6.2	X-Y-Z 三次元座標量測儀運作時	91
Chapter 5	接觸式探頭	93
5.1	探頭矩陣校正.....	93
5.1.1	探頭矩陣定義	93
5.1.2	矩陣參數校正	95
5.2	探頭探球製作.....	99



5.2.1	製作流程	102
5.2.2	探球組裝	107
5.3	探頭觸發量測	110
5.3.1	階高塊量測	112
5.3.2	實驗用玻片厚度量測	113
5.3.3	CCD 模組量測	114
5.4	探頭掃描量測	117
5.4.1	透鏡掃描	118
Chapter 6	結論與未來展望	120
6.1	結論	120
6.2	未來展望	120
REFERENCE	122



LIST OF FIGURES



圖 1.1 製造技術預測圖[1].....	12
圖 1.2 Traditional CMM 與 Nano-CMM 的比較	15
圖 1.3 摩擦滯滑傳動機構設計	16
圖 1.4 Nano-CMM 之三維運動臺設計圖.....	16
圖 1.5 Small CMM 示意圖	17
圖 1.6 Small CMM 之探頭設計與示意圖	17
圖 1.7 High-Precision CMM 示意圖	18
圖 1.8 High-Precision CMM 之探頭設計示意圖	18
圖 1.9 Ultra Precision CMM 示意圖.....	19
圖 1.10 Ultra Precision CMM 示意圖	19
圖 1.11 Special CMM 示意圖	20
圖 1.12 Special CMM 之探頭設計示意圖.....	21
圖 1.13 重量補償機構示意圖	22
圖 1.14 NMM 機台示意圖與實體圖	22
圖 1.15 M3 分子量測機示意圖.....	23
圖 1.16 量測鏡組排列示意圖	23
圖 1.17 次原子量測機台示意圖	24
圖 1.18 METAS Ultraprecision Micro-CMM	25
圖 1.19 METAS 撓性機構探頭	25
圖 1.20 F25 精密 CMM	26
圖 1.21 精密 CMM.....	27
圖 1.22 UA3P 及其探頭	27
圖 1.23 東京大學 M-CMM.....	28
圖 1.24 東京工業大學 STM-based CMM.....	29
圖 1.25 張國雄教授等推導之三次元體積誤差模型[25].....	30
圖 1.26 沿軸運動造成偏擺誤差	30
圖 1.27 Fan 等量測 X-Y 平台動態誤差實驗架設	31
圖 1.28 AFM system[30]	32
圖 2.1 Micro-CMM 整體架構圖.....	35
圖 2.2 具阿貝誤差之共平面平台	36
圖 2.3 結構未對稱之共平面平台	37
圖 2.4 結構對稱且符合阿貝原則之共平面平台	37
圖 2.5 以麥克森干涉儀做為感測器之共平面平台	38
圖 2.6 結構不對稱之配重主軸	40
圖 2.7 Z 軸內部結構.....	41

圖 2.8 寶塔式橋架主軸	41
圖 2.9 簡易光柵干涉儀之架構	42
圖 2.10 光柵繞射示意圖	44
圖 2.11 LDGI 光路圖	47
圖 2.12 多自由度量測系統光路圖	48
圖 2.13 Michelson 干涉儀光路架構.....	50
圖 2.14 自動視準儀原理示意圖	52
圖 2.15 超音波馬達基本架構示意圖	54
圖 2.16 Nanomotion 超音波馬達基本架構示意圖	56
圖 2.17 Nanomotion 超音波馬達驅動示意圖	56
圖 2.18 Nanomotion 多層堆疊壓電陶瓷組馬達 HR8 結構圖	57
圖 2.19 Nanomotion 之 High Resolution 系列超音波馬達	58
圖 2.20 AB2 Driver 系統方塊圖.....	59
圖 2.21 DC mode 磁滯曲線關係圖	61
圖 2.22 Gate-mode step response control.....	61
圖 2.23 DC-mode step response control.....	62
圖 2.24 三種接觸式探頭(a) 硬式探頭 (B)觸發探頭 (C)類比掃描式	62
圖 2.25 懸浮片示意圖	63
圖 2.26 探頭內部結構圖	64
圖 3.1 波長補償模組實體圖	65
圖 3.2 四象限感測器光點位置與輸出電壓關係圖	67
圖 3.3 四象限校正同軸度示意圖	67
圖 3.4 利用四象限進行光軸校準	68
圖 3.5 逼近法求得實際波長	69
圖 3.6 溫度變化與繞射角度變化對應波長圖	72
圖 4.1 共平面移動平台誤差示意圖	75
圖 4.2 三次元量測儀實際運作示意圖	75
圖 4.3 面鏡誤差於不同位置的角度變化	77
圖 4.4 面鏡誤差形貌圖	78
圖 4.5 反射鏡偏擺產生光程差示意圖	79
圖 4.6 利用定位誤差求阿貝臂	80
圖 4.7 X 軸阿貝誤差補償殘差比較圖.....	81
圖 4.8 X 軸阿貝誤差補償殘差圖.....	81
圖 4.9 Y 軸阿貝誤差補償殘差比較圖.....	81
圖 4.10 SIOS 光軸校準探頭中心流程圖.....	82
圖 4.11 SIOS 光軸校準探頭中心實驗架設示意圖	83
圖 4.12 實際求出兩軸阿貝臂與 MDFMS 關係	83
圖 4.13 更換不同長度探頭時阿貝臂修正	84

圖 4.14 平台與 SIOS 調整同軸.....	85
圖 4.15 垂直度量測示意圖	85
圖 4.16 X-Z 垂直度.....	86
圖 4.17 Y-Z 垂直度	86
圖 4.18 垂直度角度變化	87
圖 4.19 垂直度誤差補償示意圖	87
圖 4.20 平坦度示意圖	88
圖 4.21 Mahr 光學平板.....	89
圖 4.22 光學平板平坦度	89
圖 5.1 探頭方向與校正方向示意圖	93
圖 5.2 探頭矩陣校正實驗示意圖	95
圖 5.3 探頭校正方向示意圖	96
圖 5.4 探頭負 X 方向校正.....	96
圖 5.5 探頭校正 Y 方向示意圖.....	97
圖 5.6 探頭正 Y 方向校正.....	97
圖 5.7 探頭正 Z 方向校正	98
圖 5.8 雷射運用熱融拉方式製造的光纖尖端[48].....	100
圖 5.9 拉伸後燒製之光纖球頭[49].....	100
圖 5.10 光纖融接設備	101
圖 5.11 設備架設模擬圖：(1)、(3)光纖載具，(2)光纖，(4)光纖熔接機... ..	101
圖 5.12 (左)(右)兩側載具圖	102
圖 5.13 光纖熔接機內部圖	102
圖 5.14 體積計算示意圖	104
圖 5.15 探球尖端不明顯	106
圖 5.16 完成之光纖探球	106
圖 5.17 量測示意圖	107
圖 5.18 探頭組裝台	108
圖 5.19 探頭組裝示意圖	108
圖 5.20 上膠組裝實圖	109
圖 5.21 組裝完成圖	109
圖 5.22 組裝完成並安裝於探頭系統	110
圖 5.23 觸發點判斷準則	111
圖 5.24 量測點與最小平方平面	112
圖 5.25 點到面距離	112
圖 5.26 階高塊	113
圖 5.27 王安邦教授實驗室玻片	114
圖 5.28 手機照相模組	115
圖 5.29 模組量測示意圖	115

圖 5.30 NB 照相模組.....	116
圖 5.31 NB 照相模組示意圖，夾角為 0.0818°	116
圖 5.32 掃描流程示意圖.....	117
圖 5.33 綠點科技透鏡.....	118
圖 5.34 綠點凹透鏡.....	118
圖 5.35 綠點凸透鏡.....	118
圖 5.36 Micro-CMM 與輪廓掃描儀比較圖.....	119

LIST OF TABLES



表 1 Traditional CMM 與 Nano-CMM 的設計規格比較	16
表 2 不同橋架結構之剛性比較	39
表 3 AB2 Driver 規格	59
表 4 定位逼近法	69
表 5 正確波長值和模組計算波長值比較表	72
表 6 光學平板平坦度量測(單位: μm)	90
表 7 校正斜率重複性	98
表 8 拉伸實驗數據	104
表 9 探球燒製數據	105
表 10 完成之光纖探球數據表	107
表 11 階高塊(6 μm)數據	113
表 12 玻片量測數據	114
表 13 量測結果	115
表 14 CMM 與輪廓儀規格比較	119

Chapter 1 緒論



1.1 研究動機與目的

自 1960 年代起，理論及工業技術快速發展，微米級的加工技術日漸盛行，加工成品的尺寸與精度也越來越小，如 Taniguchi 所預期，已經進入微奈米加工與製程，如圖 1.1 所示，僅以傳統的量測工具與技術，將遇到如準確度與解析度不足或是工件外型過於複雜而造成量測困難等障礙，在如此需求之下，發展出了三次元座標量測儀 (coordinate measuring machines, CMM)，這對製造工業有很大的助益，不但可以快速的量測工件尺寸，更準確的得到外觀形狀與輪廓。

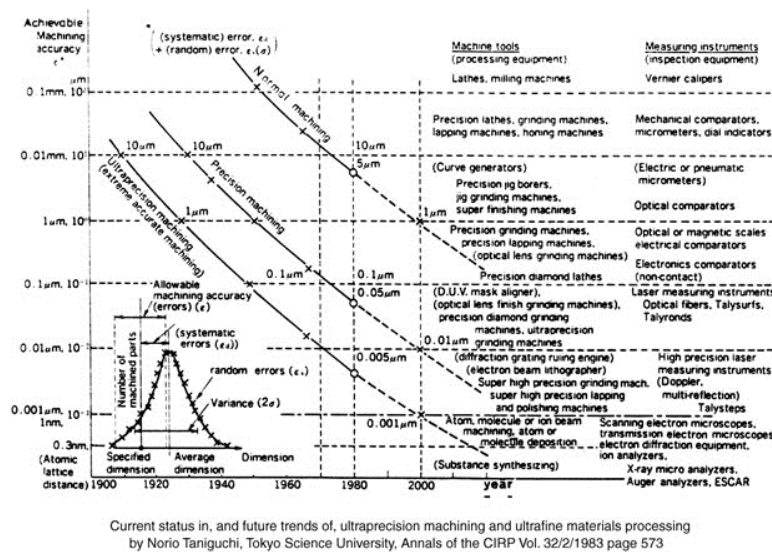


圖 1.1 製造技術預測圖[1]

對工件進行最基本的長度量測，必須自工件上實際取點，再與標準的長度進行比較。而幾何形狀的量測，也是自工件上進行取點之後在加以進行數據處理而後獲得。因此三次元座標量測儀是在一定範圍之內，對於工件之幾何形狀、長度、角度等量測能力的儀器。而整體又可分為硬體設備與軟體兩大項，硬體方面大致可以分為導引機構、進給機構、量測系統與探頭系統，軟體方面則是進行數據之分析與處理。

藉由運動平台，工件可在光學尺所建立起的座標系統中進行定範圍的移動，而探頭在工件表面所取得的位置資料點再經由軟體運算，就可以獲得工件尺寸與外型等相關數據。

然而隨著科技進步，精密機械工業、光機電系統、微結構加工等產業皆朝向精密化、微小化發展，因此對產品的精確度與準確度的要求也越來越高，相對的檢驗量測技術上也有更進一步的需求，才能準確提升微小化產品的品質與可靠度。而其中探頭所扮演的角色更是整個三次元量測機台中最重要的部分，探頭的精度影響了整個量測的結果。在現今微機械元件越來越小，微機電與微奈米技術持續發展下，傳統之三次元座標量測儀已經無法滿足需求，因此發展了微米級三次元座標量測儀。

微型三次元量測儀(Micro-CMM)並非國際統一的名稱，而是以尺寸微小化為概念而得名[2]，且屬於超高精度的量測儀器，多屬於國家級研究單位或世界級重點大學花費大量資源與人力長期投入才有可能開發的項目。而一台微型三次元量測儀須符合下列幾個基本要素：

1. 整體尺寸微型化：學術界研究的尺寸其三軸行程約在 $50\text{mm} \times 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ 以下，而業界考量量測形成較大，一般在 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 25\text{mm}$ 以下。
2. 各軸位移解析度：各軸位移解析度需在 10 nm 以下，故一般以雷射干涉儀做感測器居多，因此造價昂貴，非學術機構研究經費可負擔。
3. 量測探頭微型化：探頭本身尺寸為了配合整體三次元座標量測儀，尺寸也需要微型化，具接觸式/非接觸式量測功能，接觸式探頭探球越小越好，但剛性要夠且均向性，重複性與量測精度要高。
4. 量測總精度：整體精度要小於 100 nm 以下，越小越好。

本研究所介紹的微型三次元量測儀是由國立台灣大學精密量測實驗室所開發的第三代機型，創新寶塔型橋式架構共平面運動平台設計，完全符合力平衡與

阿貝原則設計，加上配重式主軸、接觸式掃描探頭以及作為感測器之線性繞射光柵干涉儀、多自由度量測系統，同時配合 Nanomotion 所發展之超音波馬達驅動微型三次元量測儀之三軸運動並經由軟體開發整合運動量測功能，此機型在近年已獲全球精密量測領域各方重視。

然而有關 Micro-CMM 的研究發展議題進入到系統功能與精度提升，本研究為了增加量測儀的精度與實用性，並希望在現有的感測器架構上對所有可能存在的誤差進行量測補償與功能修正，其中包括感測器溫度變化下之波長量測補償、阿貝誤差補償、垂直度誤差與平坦度誤差，並補償感測器反射鏡的面鏡形貌誤差，完成這些誤差量測並整合整體系統，實現體積自校正理論於微型三次元量測儀與其應用。

1.2 文獻回顧

關於傳統三次元量測儀的發展、設計分析、體積誤差補償、量測路徑規劃...等的文獻資料相當豐富，然而隨著 3D 量測精度需求達奈米等級，傳統的三次元量測儀以無法滿足這些需求，這幾年來漸漸地有相關研究單位與學者投入體積小、高精度、具奈米級量測的三次元量測儀研究。雖有其研發的必要性，然而由於三次元量測儀的基本組成包括：X、Y、Z 三軸精密定位系統、位置量測系統、量測探頭與量測軟體等，為一需整合開發的研究，如此龐大的工程通常需要投入大量經費與人力方能完成，因此全世界研究高精度三次元的單位，大多由當地國家重點實驗室或相關單位結合該領域知名的專家學者共同研發。

1.2.1 各國三次元量測儀簡介

茲將這幾年來各國投入三次元的文獻資料整理如下：

日本東京大學(Tokyo University of Japan) Takamasu 提出 Nano-CMM 之構想與規格[3]，如圖 1.2，將奈米級三次元的各種規格訂定為傳統三次元量測儀的 1/100 到 1/1000 倍；為達成如此高精度規格目標，Takamasu 以伺服馬達為定位致

動器[4]，配合導螺桿傳動機構與 V 型溝槽導軌設計出奈米三次元量儀之 X/Y 軸定位系統雛形，但導螺桿傳動機構引入直線度誤差，因此 Takamasu 將其更改為摩擦滯滑傳動機構設計[5]，如圖 1.3，使 XY 雙軸量測範圍為 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ，直線度誤差小於 60 nm，重複性約 20 nm；東京大學並於 2003 年提出 Nano-CMM 之 Z 軸相關[6]，並且提出一些修正方式，將 Z 軸位置架於 Y 軸上，減低運動時重心不平衡的影響，及減少探頭與平臺重心偏位的距離，減低探頭感測端於平臺移動時產生角度所造成之誤差，如圖 1.4，其 Z 軸直線度誤差約 40 nm，重複性 20 nm。

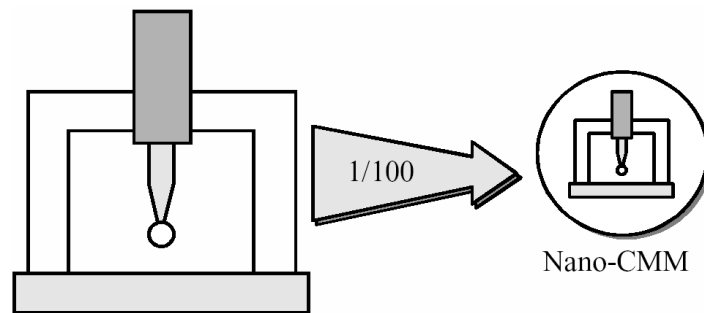


圖 1.2 Traditional CMM 與 Nano-CMM 的比較

表 1 Traditional CMM 與 Nano-CMM 的設計規格比較

	傳統三次元座標量測儀	奈米三次元座標量測儀
量測儀體積	$(2000 \text{ mm})^3$	$(200 \text{ mm})^3$
量測儀重量	1000 kg	10 kg
可測量範圍	1 μm	10 nm
解析度	1 μm	10 nm
準確度	5 μm	50 nm
球徑	5 mm	50 μm
量測接觸力	10^{-1} N	10^{-3} N
光學尺精確度	1 μm	10 nm

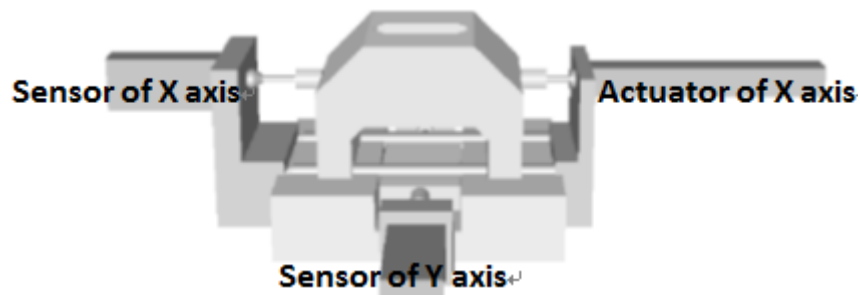


圖 1.3 摩擦滯滑傳動機構設計

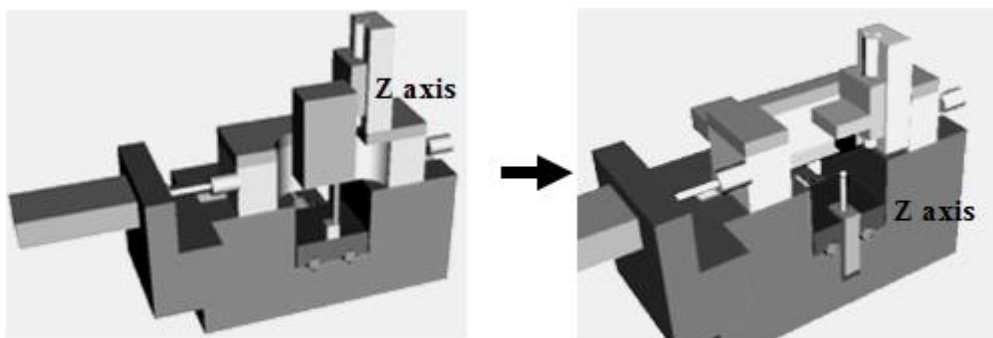


圖 1.4 Nano-CMM 之三維運動臺設計圖

英國 National Physical Laboratory(NPL)[7, 8] 於特殊形狀設計的小型三次元量測機台(Small CMM) 上架設三套雷射干涉儀，如圖 1.4 所示，每套具四雷射光源，可同時量取位置與角度的變化。該機台具有 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 的量測範圍與小於 50 nm 的量測不確定度。探頭製作，則利用三個直徑 3 mm 與厚度 1 mm 的鋁盤與三根碳化鎢管、三條鈹銅合金線與三個電容感應器組成三組呈 120° 的接觸式量測探頭，該探頭的重量為 370 g 、球直徑 1 mm 、量測範圍 $\pm 20 \mu\text{m}$ 、解析度 3 nm ，且於量測桿變形 $10 \mu\text{m}$ 時其探頭接觸力小於 0.1 mN ，如圖 1.5 所示。

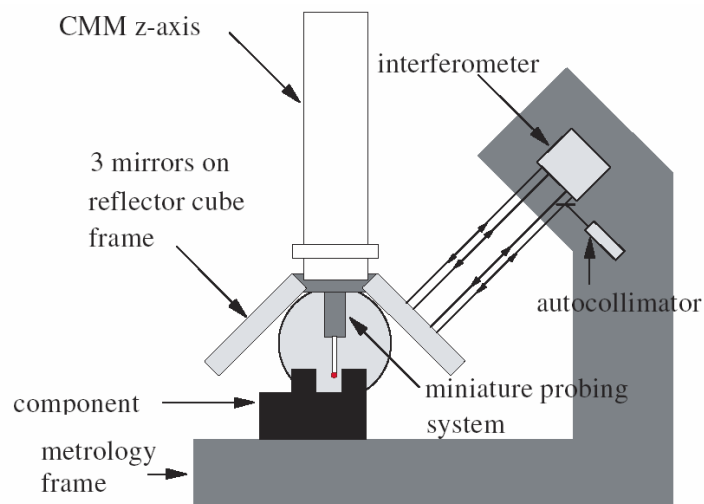


圖 1.5 Small CMM 示意圖

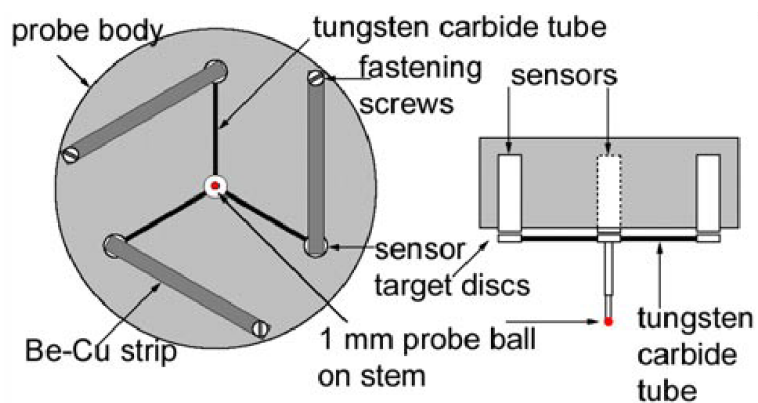


圖 1.6 Small CMM 之探頭設計與示意圖

荷蘭 Eindhoven 大學[9]設計 High-Precision 3D-CMM，機台尺寸長、寬、高為 $0.6 \times 0.6 \times 1.4 \text{ m}^3$ ，量測範圍為 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ ，如圖 1.7 所示。此機台根據 Abbe 原則、Bryan 原理設計消除量測上誤差，可減少透過軟體補償精度的設計。驅動上採用空氣軸承配合線性馬達，並利用光學尺與干涉式光學頭作為回授，機台量測不確定度小於 $0.1 \mu\text{m}$ ；量測探頭可同時架設 2D 與 3D 接觸式探頭，整體量測探頭設計利用微機電 (MEMS) 技術製作完成，如圖 1.8 所示，設計方式類似於英國 NPL 的量測探頭設計，不同處在於此探頭設計採四象位光學感測元件作為量測數據的輸出，該量測探頭的球直徑為 0.3 mm 、量測範圍 $100 \mu\text{m}$ 、量測不確定度小於 25 nm 。

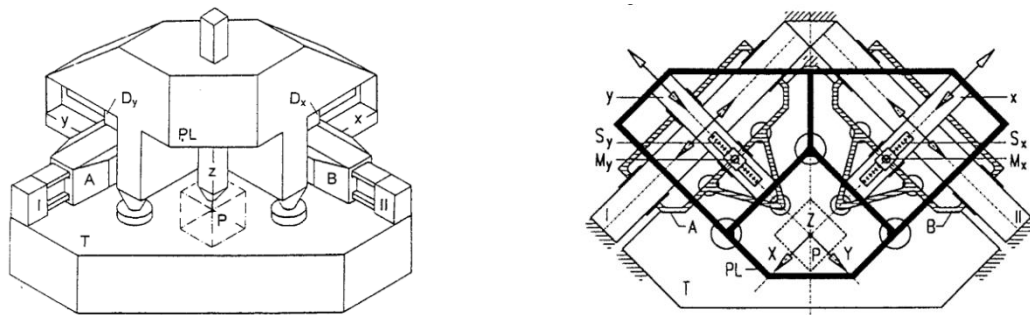
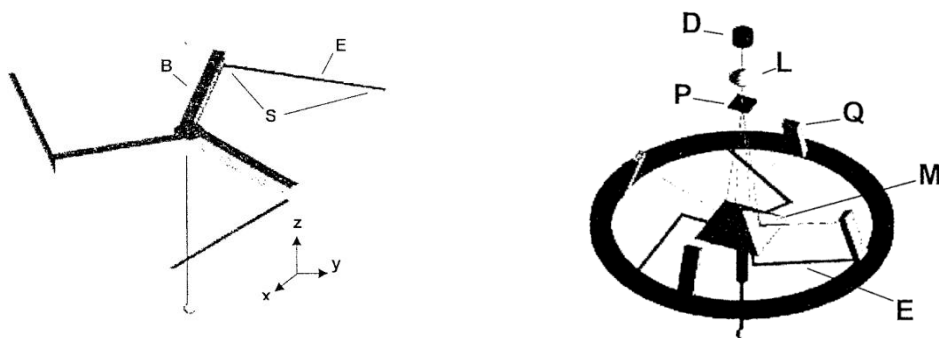


圖 1.7 High-Precision CMM 示意圖



E : elastic elements, B : frame bars, S : Piezo & strain gages, D : Laser diode,

P : Grating, Q : Quadrant Photodiode, M : Mirror, L : Lens

圖 1.8 High-Precision CMM 之探頭設計示意圖

荷蘭 Delft University of Technology 大學與 Philips 公司合作研發 Ultra Precision CMM[10]，與 High-Precision 3D-Coordinate Measuring 相異處，在於使用雙軸雷射干涉儀回授，補償來自移動平臺嚙合件不平整接觸面所造成之角度誤差，機構上則運用兩個外楔形塊及一個內楔形塊構成三軸方向移動，機台三軸皆符合 Abbe 原則、Bryan 原理，且三量測軸相交於探頭之端點，量測範圍 $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ ，體積誤差不確定度 50 nm ，示意圖如圖 1.8、圖 1.9 所示。

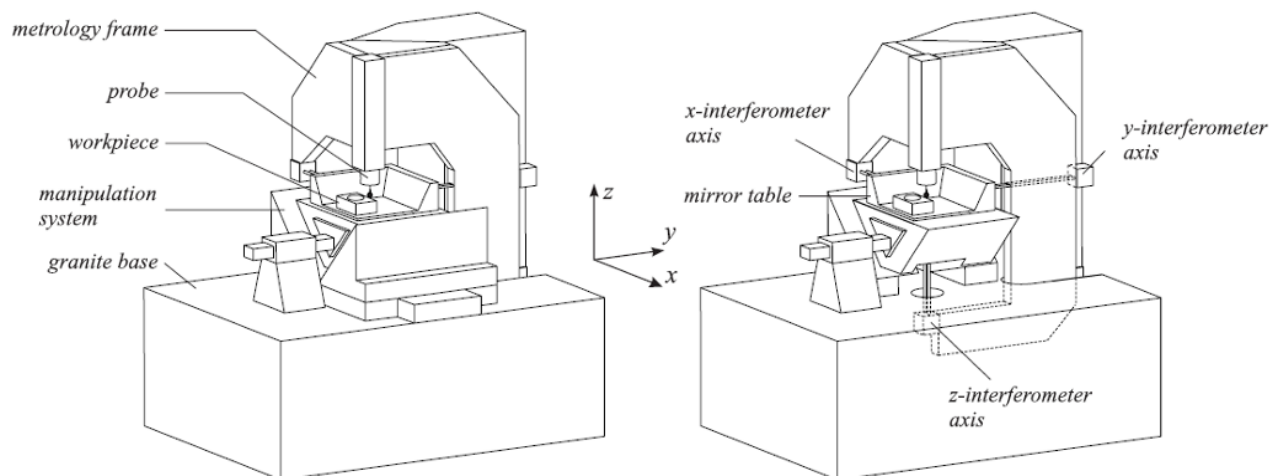


圖 1.9 Ultra Precision CMM 示意圖



圖 1.10 Ultra Precision CMM 示意圖

德國 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)[11]改良商業用的三次元量測機台，如圖 1.10 所示，架設可同時量取位置與角度的雷射干涉儀製作出 Special CMM，量測範圍 $25 \times 40 \times 25 \text{ mm}^3$ ，量測不確定度小於 $0.1 \mu\text{m}$ 。Z 方向同時安裝兩個 Z 軸運動機構，其中一軸架設一利用光纖末端自行形成所謂的“probe pin”作為量測接觸圓球[12]，如圖 1.11 示，此圓球的直徑為 $25 \mu\text{m}$ ，在配合光路設計與 CCD 取像後，此 2D 與 3D 光纖接觸式量測探頭具 $0.1 \mu\text{m}$ 的量測不確定度與小於 $1 \mu\text{N}$ 的探頭接觸力。另一軸則架設一利用矽薄膜製作成突出形狀的 3D 量測探頭，經由磁觸探針使突出處受力變形，進而由突出處的壓電感應元件輸出量測資訊。此探頭具 1 mm 的量測範圍與 80 nm 的量測不確定度。

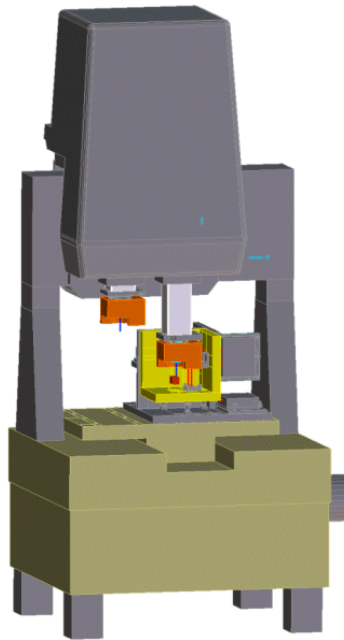
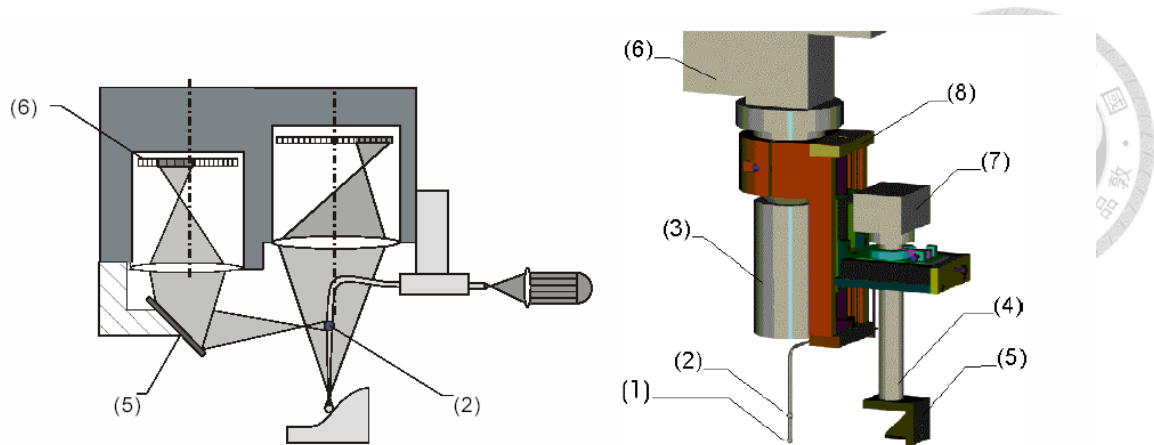


圖 1.11 Special CMM 示意圖



Sensor for opto-tactile 3D measurements with components: (1) probing element and target for the XY-measurement, (2) target for the Z-measurement, (3) optical system for the measurement of the XY-displacement, (4) optical system for the measurement of the Z-displacement, (5) reflecting mirror, (6) camera for XY-evaluation, (7) camera for Z-evaluation, (8) adjusting device.

圖 1.12 Special CMM 之探頭設計示意圖

德國 Ilmenau 工業大學研製 Nanopositioning and Nanomeasuring machine[13, 14]，量測範圍 $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ ，結構材料皆選用低膨脹係數之 Zerodur、Invar 和鋁合金，為避免量測平臺於運動時之角度變化造成量測誤差，移動平臺內嵌入了四個音圈馬達，可調整量測平臺之微小角度與 Z 軸高度變化，使得量測平臺於量測過程中皆保持相同角度，並設計圖 1.13 機構，用以修正移動台於 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 中重心的變化，平臺移動、角度之感測器選用商用雙雷射軸干涉儀，並使三測量軸相交於同一點以符合 Abbe 原則，解析度 1.24 nm，如圖 1.14 所示

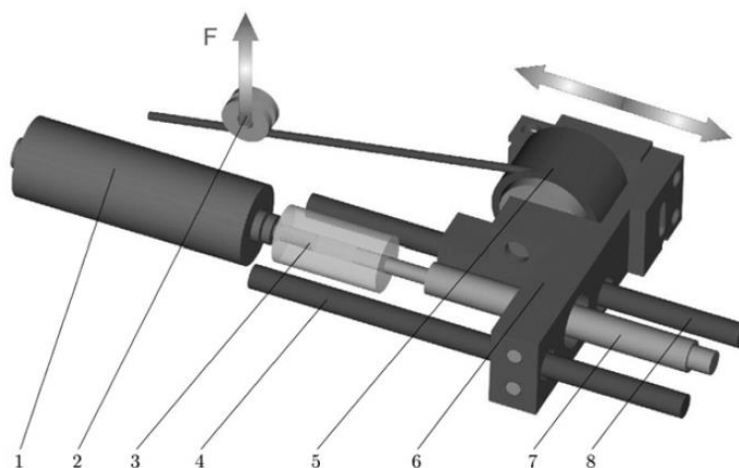


Figure 6. Weight force compensation principle. 1: stepper motor, 2: connecting point to vertical stage, 3: flexible coupling, 4: ancillary guide, 5: leg spring on mandril, 6: sliding assembly, 7: drive screw, 8: main guide.

圖 1.13 重量補償機構示意圖

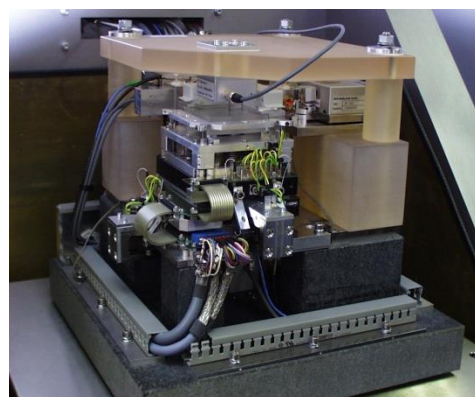
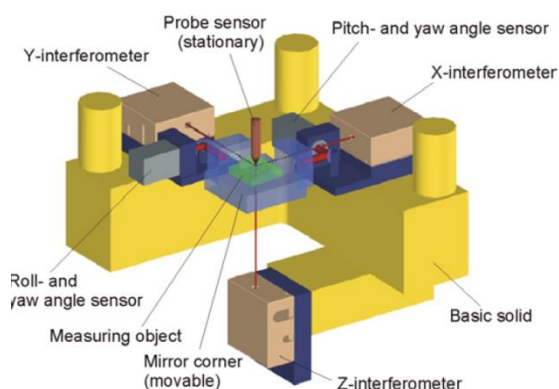


圖 1.14 NMM 機台示意圖與實體圖

美國 National Institute of Standard and Technology (NIST) 型號 M3 之分子量測機台 (Molecular Measuring Machine) [15-17]，如圖 1.14 所示，於雙軸 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 量測範圍內可實現 10 nm 的準確度 (Accuracy)，此機台設計注重外界環境變動 (溫度、溼度、震動) 所造成之量測誤差，以隔音、隔振、恆溫與真空之腔體，並且選用 Zerodur 和 Invar，無氧銅為機構材料，結構設計為球狀，主要是為了結構剛性、受力對稱性、熱平衡和穩定性。移動平臺機構分成 Coarse Stage 和

Fine stage ， Coarse Stage 為減少磨耗於嚙合面上鍍鎳， Fine stage 由平行撓曲機構組成，其行程範圍約為 10 μm 。因量測鏡組排列限制，機台存在 10 mm *Abbé* offset，如圖 1.15 所示，驅動上選用線性壓電陶瓷馬達以減少熱能產生。

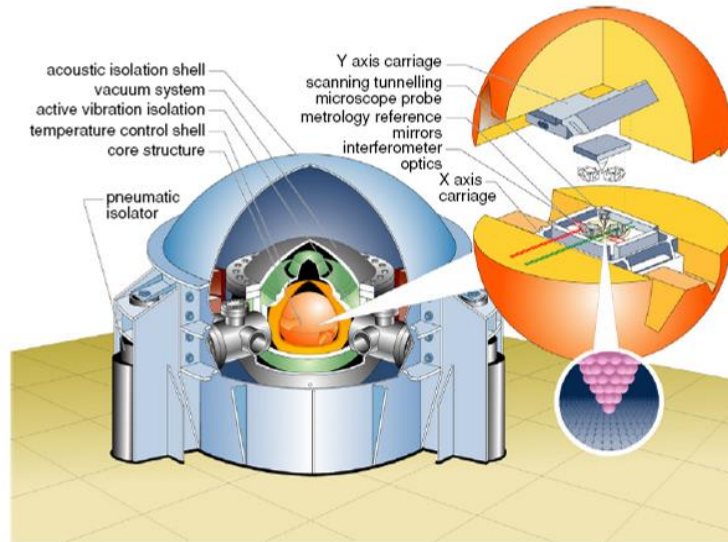


圖 1.15 M3 分子量測機示意圖

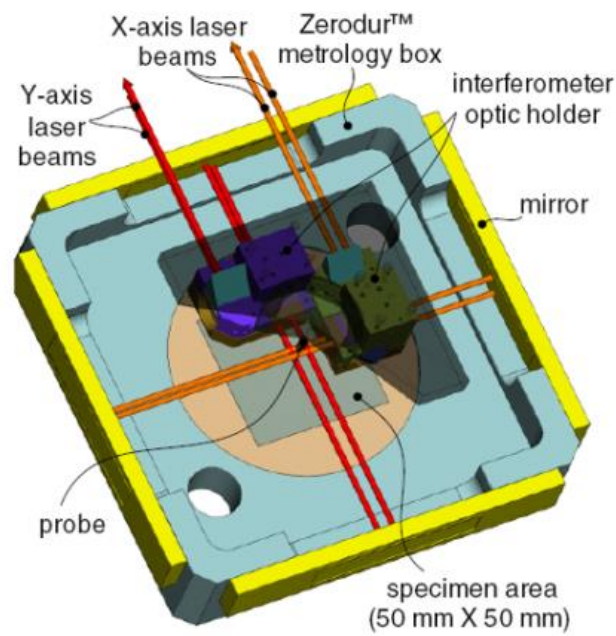


圖 1.16 量測鏡組排列示意圖

美國北卡州立大學與麻省理工學院聯合研製的次原子量測機台 (Sub-Atomic Measuring Machine)[18]，於 $25 \times 25 \times 0.1 \text{ mm}^3$ 量測範圍內，三軸之定位解析度可達 0.12 nm、0.082 nm、1.45 nm，運用四個線性馬達完成移動平臺之六自由度的運動，平臺距離、角度以三個雷射干涉儀與三個電容感測器量測，並配合 PID 法則控制運動平臺；為增加抗震性，平臺設計為中空狀並注入黏滯係數 10000 cs 之液體，機器與地面間使用氣壓式隔震裝置，用以防止外界干擾，並選用 Zerodur 材料降低熱變形造成之誤差，示意圖如圖 1.17。

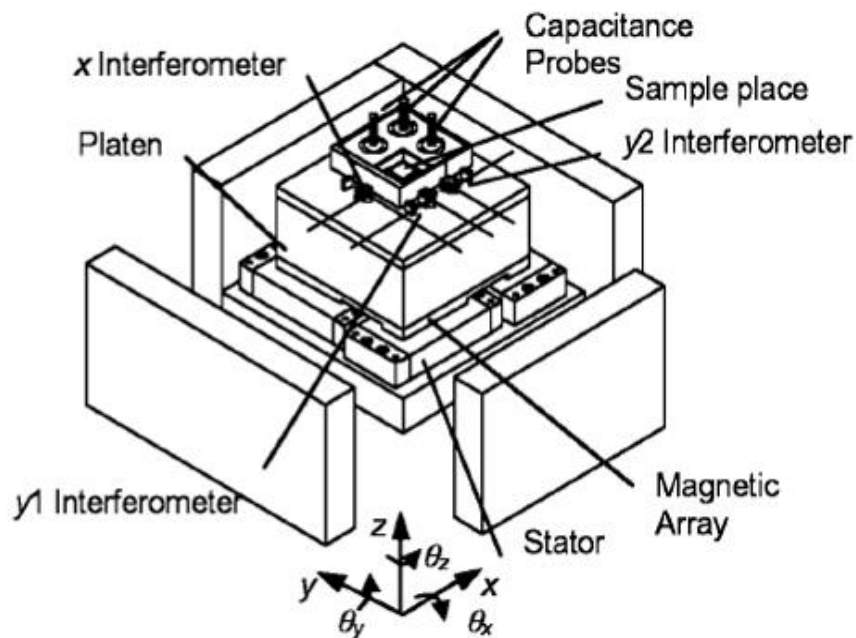


圖 1.17 次原子量測機台示意圖

瑞士計量院 (METAS) 所研製之三次元量測儀[19]，如圖 1.18 所示，量測範圍為 $90 \times 90 \times 38 \text{ mm}^3$ ，一維量測不確定度為 50 nm，與 Philips 公司合作，結合 Philips CFT 的高精度平臺，此平臺採分離式結構設計，驅動器置於底座，承載探頭之 Z 軸框架僅靜態變型問題，驅動時底座動態變型不會影響置探頭，探頭系統不移動，平臺利用 V 型結構，只需移動二維方向即能達三方向之運動，Z 軸框架結構材料部分採用 Invar steel；使用三套雷射干涉移量測三維位置，並且

完全遵守阿貝原理，其探頭採用撓性機構組成，如圖 1.18 所示。

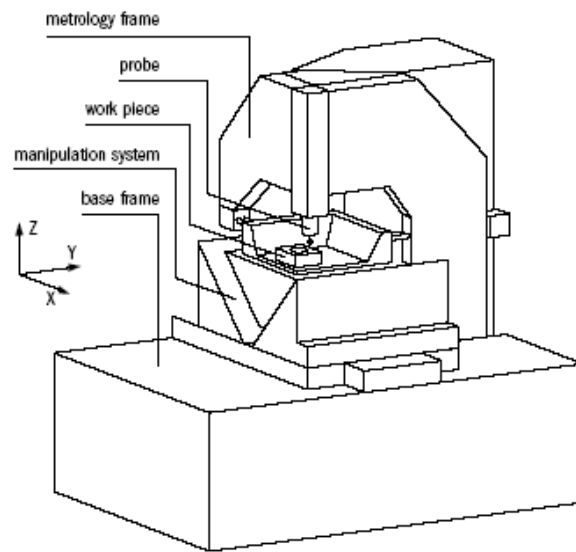


圖 1.18 METAS Ultraprecision Micro-CMM

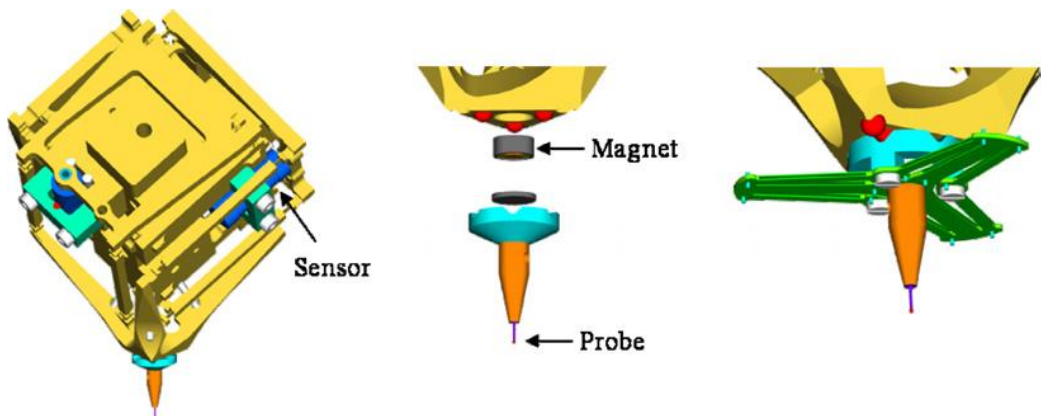


圖 1.19 METAS 撓性機構探頭

此外，業界也進行超精密量測儀之研製，如德國 Carl Zeiss 公司的 F25[20] 和日本 Mitutoyo 公司的 NANOCORD[21]；其中德國 Carl Zeiss 公司也推出型號為 F25 的 CMM，為前述 Eindhoven 大學技轉之機台，量測範圍 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ ，量測解析度 7.5 nm，量測不確定度 250 nm，運用接觸式探頭進行 3D 形貌量測，並運用 ViSCAN camera sensor 進行二維與階高的量測，其接觸式探頭由感測器測杆與 $6.5 \times 6.5 \text{ mm}^2$ 的壓電薄膜(矽片)相連，測尖最小直徑達 $120 \mu\text{m}$ ，

可接觸測量直徑 1 mm 以下之小孔；測桿最大長度 4 mm，測量力 0.5 mN/μm 以下，圖 1.19 圖 1.20 為此奈米三次元量床之示意圖。



圖 1.20 F25 精密 CMM

NANOCORD 的奈米級的三次元量測儀，量測範圍 $300 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$ ，量測不確定度 $(0.3+L/1000) \mu\text{m}$ ，可更換兩種接觸式探頭與非接觸式探頭，兩種接觸式探頭分別為極小精密型 (UMAP) 與大範圍奈米型 (LMP)，UMAP 是接觸型式並且接觸力小於 $1 \mu\text{N}$ ，探針直徑尺寸為 $15 \mu\text{m}$ ，三個標準差之重複性為 $0.1 \mu\text{m}$ ，LMP 則是主要用來工件的大範圍量測，接觸力為 10 至 $750 \mu\text{N}$ ，圖 1.20 為此精密三次元量床之示意圖。



圖 1.21 精密 CMM

Panasonic 的 Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer (簡稱 UA3P)[22]，發展多台量測範圍不同之量測儀，其中 UA3P-L 之量測範圍為 $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ ，其量測精度為 $\pm 0.15 \text{ }\mu\text{m}$ ，並使用原子力探頭，精度為 $0.01 \text{ }\mu\text{m}$ ，如圖 1.22 所示。

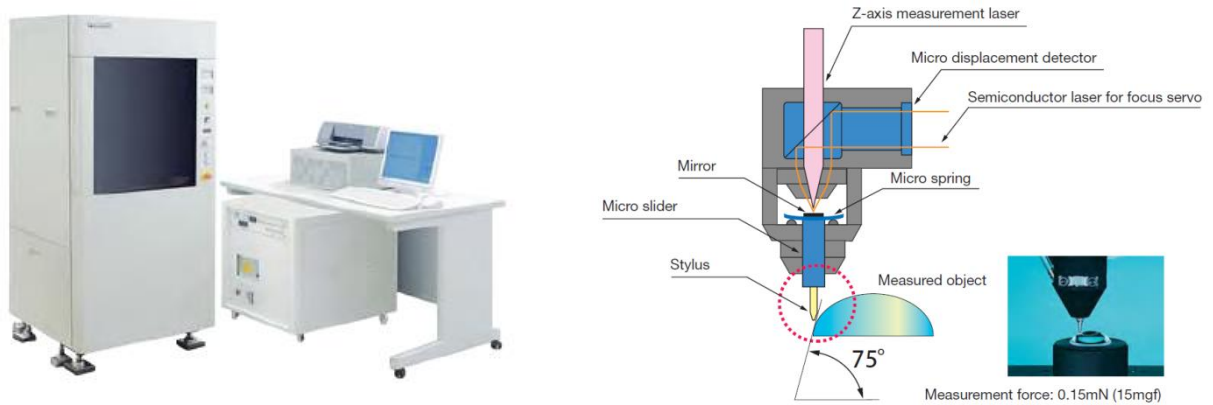


圖 1.22 UA3P 及其探頭

日本東京大學 (Tokyo University of Japan) Takamasu 所研發之 micro-CMM (簡稱 M-CMM)[23]，利用堆疊式的空氣軸承滑塊做為 XY 軸，分離式的 Z 軸與可換探頭系統，行程為 160 mm × 160 mm × 100 mm，量測範圍 30 × 30 × 10 mm³，驅動器為超音波馬達，以自動視準儀量測平台偏擺角，X 軸與 Y 軸之直線度在 500 nm 以下，Z 軸直線度在 300 nm，最小尺寸之探頭在 30 μm，預計整體系統之精度在 50 nm，如圖 1.23 所示。

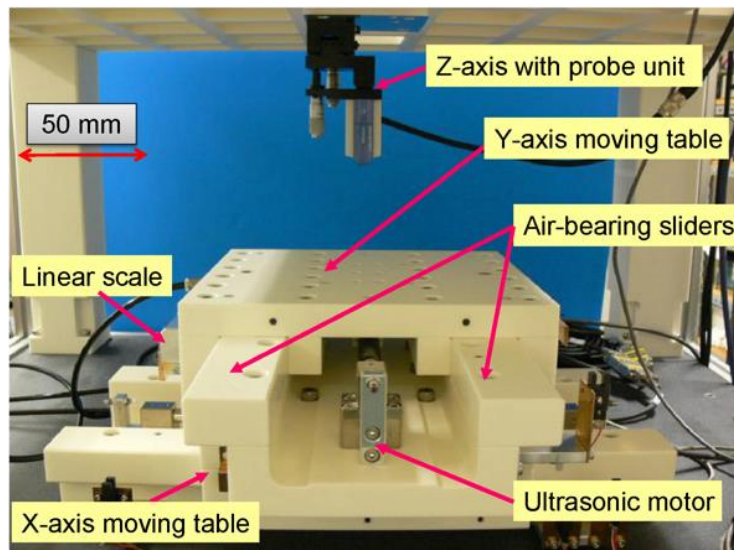


圖 1.23 東京大學 M-CMM

日本東京工業大學所研發的 STM-based CMM[24]，搭配利用尖端放電原理之 STM 探頭，音圈馬達驅動，三組雷射干涉儀做為感測器回授訊號，結構上均符合阿貝原則，量測範圍 $18 \times 18 \times 10 \text{ mm}^3$ ，解析度在 1 nm ，結構如圖 1.24 所示。

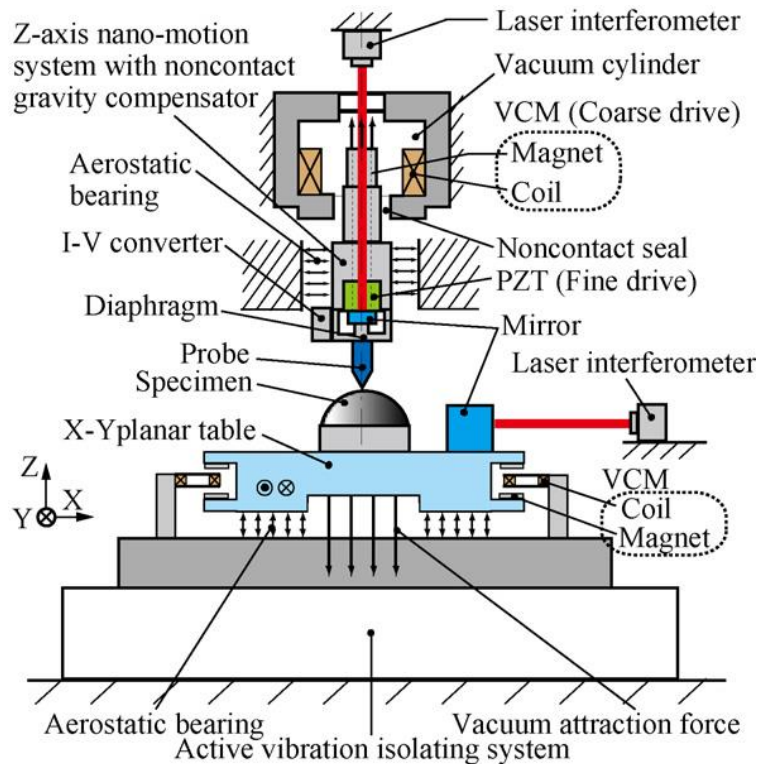


圖 1.24 東京工業大學 STM-based CMM

1.2.2 三次元體積誤差補償

各國致力於開發三次元量測儀，除了儀器本身的性能穩定性方向開發之外，對於將高重複性的誤差分離補償，藉以提高三次元量測儀之性能也是開發的重要目標。

傳統體積誤差(Volumetric Error)理論在精密機械領域的發展在近年已經非常成熟，將機台各軸運動所產生之定位誤差、直線度誤差、偏角誤差以及垂直度誤差來求得，Zhang[25]利用齊次座標轉換矩陣 (HTM, Homogeneous Transformation Matrix)描述三次元體積誤差的數學模型，如圖 1.25，對 X-Y-Z 軸進行座標定位，以機構鏈方式推導探頭端點相對於參考座標系之相對關係。

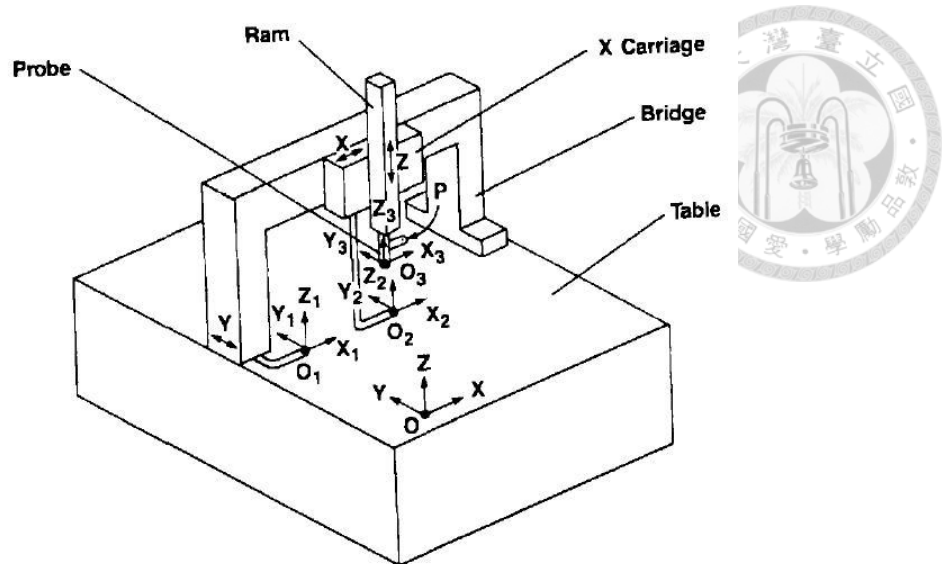


圖 1.25 張國雄教授等推導之三次元體積誤差模型[25]

Shaowei Zhu[26]等利用 21 項幾何誤差，建立出一套積分體積誤差模型，並利用此數學模型提出一套 NC Code 修改軟體，以達到補償體積誤差的效果，改善機台性能。

Weekers 等[27]針對動態量測中的 CMM 之動態誤差作分析與分離補償，該研究以龍門型 CMM 作為模型，分析整體之動態誤差，並分析機台運作時對床台連結與結構變形，如圖 1.26 所示，並建立誤差分析模型，以後端軟體補償誤差。

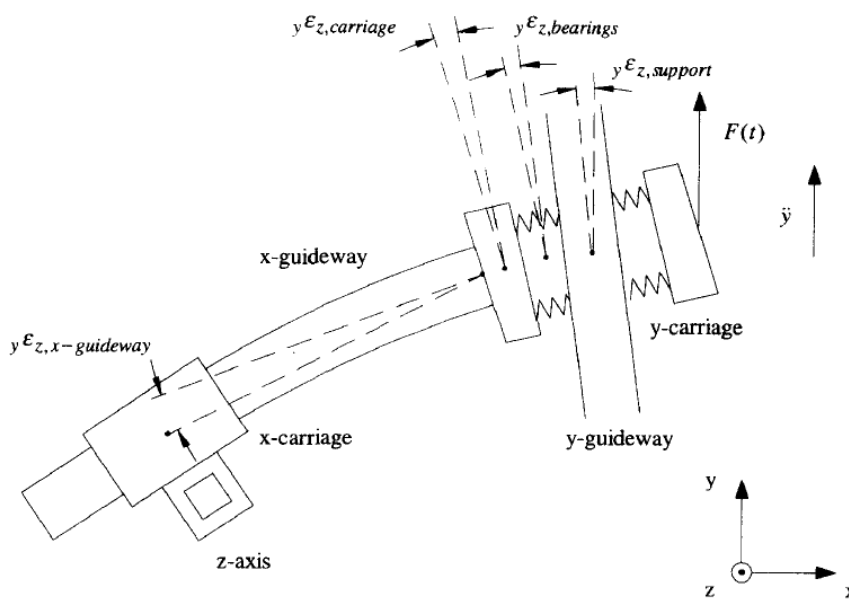


圖 1.26 沿軸運動造成偏擺誤差



2000 年，范光照教授提出可同時進行平台 6 個自由度的量測系統[28]。該系統利用四個雷射都卜勒儀與兩組四象限感測器，進行平台上反射鏡的線性位移與角度進行量測。除此之外，利用分光鏡與 2 組四象限感測器即可量測出 2 個直線度與旋轉誤差，搭配 HP5528A 系統證實系統位置量測誤差可達 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 於全行程 200 m，垂直度誤差可達到 $1.5 \mu\text{m}$ 於 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 範圍內。角度方面， $\pm 50 \text{ arc-secs}$ 範圍內，俯仰角與偏擺角度誤差為 $\pm 1 \text{ arc-sec}$ ，旋轉角度誤差可達 $\pm 3 \text{ arc-sec}$ 。

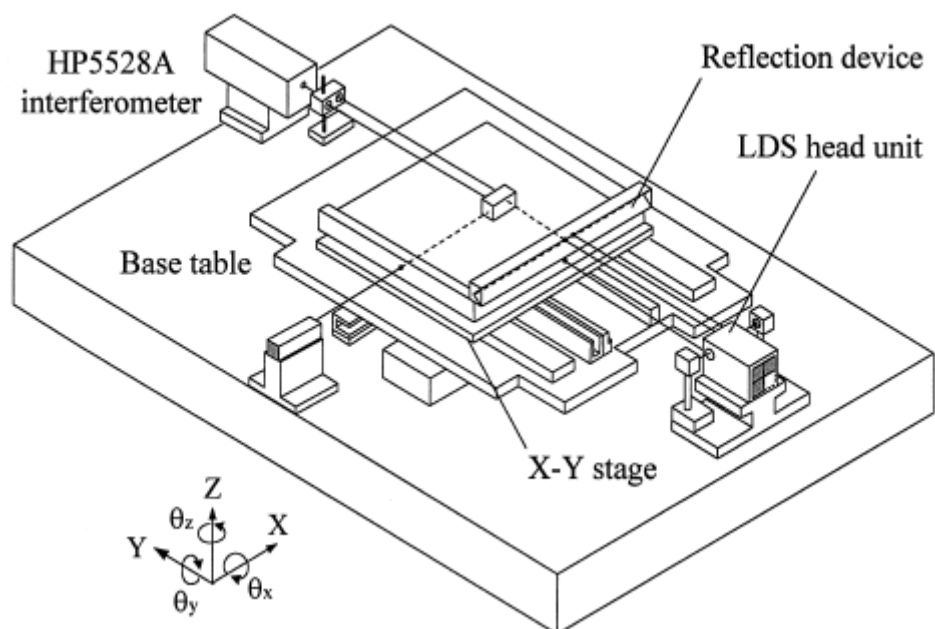


圖 1.27 Fan 等量測 X-Y 平台動態誤差實驗架設

而同年(2000) N.A. Barakat 等人則以 DEA CMM 為例，分析三次元量測儀之各項誤差，包含幾何誤差、動態誤差、剛性誤差和熱誤差等，並就幾何誤差為主建立數學模型，以 HTM 齊次座標轉換矩陣分析各項誤差，並使用最小平方解出誤差模型的矩陣係數分離體積誤差，改善了原誤差 75% 以上，表示了方法的可行性。

而 Uwe Brand 於 2005 年，以該研究團隊 PTB 所開發之 micro-CMM 做研究，分析接觸式探球之影響[29]。此研究使用微晶玻璃立方體 (Zerodur cuboid) 讓探

頭與干涉儀做比對，分離接觸式探頭量測時的誤差，降低量測之不確定度。

除了傳統三次元量測儀外，原子力顯微鏡(AFM, Atomic force microscope)在量測上也有相同研究。Dongmin Kim [30]等對於該團隊 AFM 之 XY scanner 也做了相對誤差補償，以更微觀的尺度分析位移平台之幾何誤差： Abbe error、Cosine error 和 Non-orthogonality error，以及干涉儀本身誤差和環境誤差。

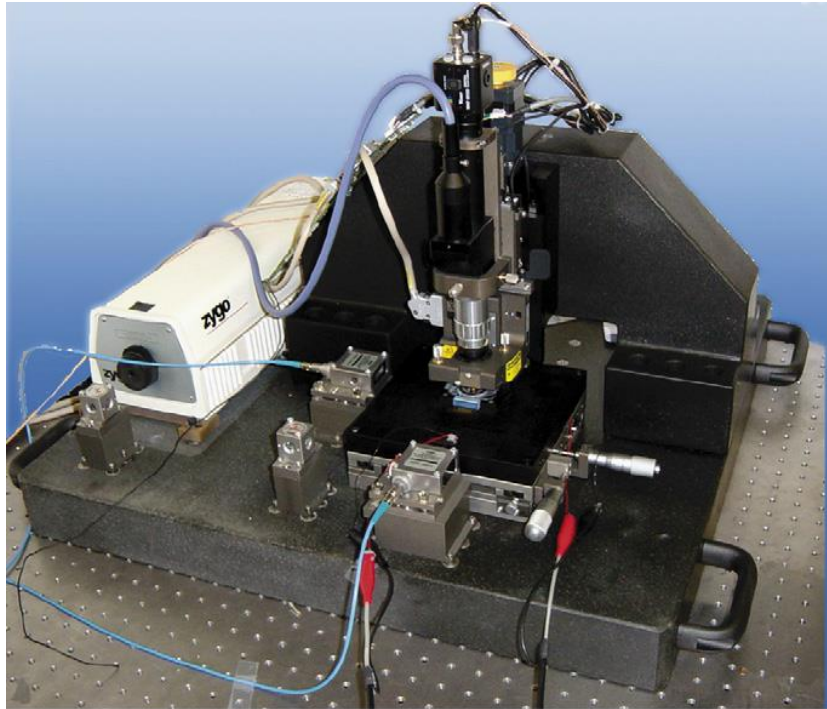


圖 1.28 AFM system[30]



1.2.3 探球製作

各研究機構所提出的微奈米探頭中所使用的探球，除了傳統三次元座標量測儀所使用的紅寶石球探之外，也同時在尋找其他新方法製造探球以及探桿。其製作方法共分三大類：

A. 膠合法

即一般市面常見製作方法，將球頭與探桿分開個別製造，最後再將兩者組為一體。德國 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) [31, 32]，以光纖製成感測桿上設置的兩探頭圓球，分別以融化及黏著的方式所製成。然而此方法易產生黏著時探球與探桿之間的偏移。

B. 材料移除法

此法以一個圓棒最為探桿，利用材料移除的方法直接在探桿上加工出一圓形球頭。利用微放電加工的方式，將鎢棒製成一微小探球。首先以線放電研磨(wire electro-discharge grinding)將市售 300 μm 鎢棒修成 50 μm 以作為電極，再以單一脈衝放電(one pulse electro discharge, OPED)的方式使鎢棒前端融化，並因表面張力形成一球徑 40 μm 微小圓球，然而此方法相當耗時費工，且加工材料因放電加工的方式，受限於可導電的金屬材料。

C. 熔融聚縮法

以外加方式加熱光纖，使光纖尖端因表面張力聚縮成一半球體，以作為透鏡，如 2008 年 Fan[33]等人以市售光纖融接機燒製探球，並以影像量測方式探測探球之真圓度、球徑、偏移量等物理性質。其系統以水平擺放方式，易受重力影響造成偏位，因此實驗分為兩大步驟，先以較大的放電強度製成前端圓球，後以較弱之放電強度修正尖端球之偏移量。

1.3 研究內容概要

本論文為進行微型三次元量測儀體積自校正理論的實驗與開發之研究，其中包含將量測儀運作時的各項幾何誤差補償，並對多自由度量測系統的波長量測補償模組做修正。補償的誤差包含面鏡直度、阿貝誤差、垂直度與平坦度。本論文將分成六個章節討論。

第一章 緒論：說明研究動機、目的與論文架構。

第二章 微型三次元量測儀之整體架構：簡介微型三次元量測儀之架構，包含 XY 平台、Z 軸與探頭系統。

第三章 波長量測補償模組：介紹波長量測補償模組之原理、公式推導分析、硬體光路系統與校正補償結果。

第四章 微型三次元量測儀體積誤差分析：進行 Micro-CMM 之光程差、面鏡誤差、阿貝誤差、垂直度誤差與平坦度分析與誤差補償。

第五章 接觸式探頭：簡介自製光纖探球與鎢絲探球及其組裝、校正接觸式探頭之轉換矩陣和觸發式量測與掃描式量測之應用。

第六章 結論與未來展望：本研究之結論及未來改進方向。

Chapter 2 微型三次元量測儀之整體架構

本章將介紹微型三次元量測儀組成之關鍵架構，包括雙軸移動平台、Z軸、量測探頭，以及作為位置感測器之奈米光學尺、多自由度量測系統(MDFMS)等，並將各元件結合，使微型三次元量測儀整體架構完整，如圖 2.1 為 Micro-CMM 整體架構圖。

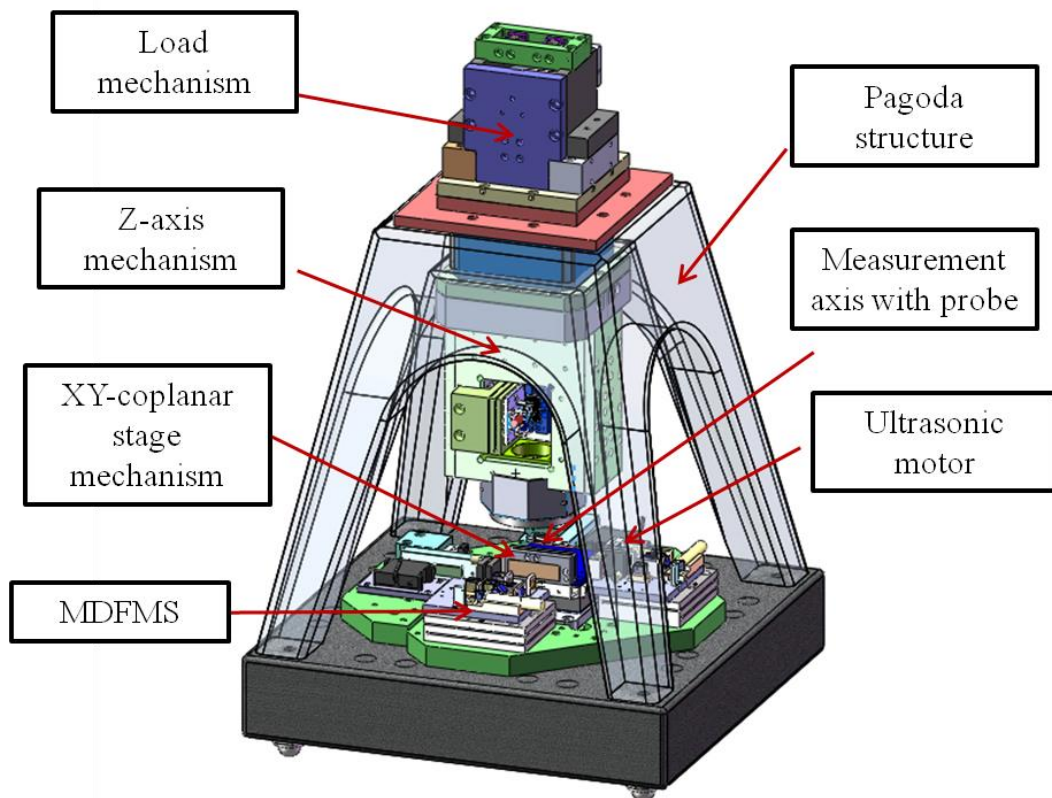


圖 2.1 Micro-CMM 整體架構圖



2.1 共平面平台

傳統的 XY 平台都是採用兩個單軸移動平台堆疊而成，而以此方法堆疊而成的平台將無法避免軸間與位置相關的互相干擾，且位於底部的單軸移動平台會因為有較大的阿貝偏移量產生較大的阿貝誤差，因此設計共平面平台用以取代堆疊式平台，並使之符合三維座標 Abbe 原則。臺灣大學精密量測實驗室共設計出三代的共平面平台，以下將分別進行介紹。

2004 年，臺灣大學童昌賢研製第一代的共平面平台[34]，雖然已經避免因垂直自由度誤差所造成的阿貝誤差，但此平台單邊驅動另一邊感測，所以量測儀器的軸線與待測工件之軸線不在同一直線上，由水平直線度所造成的阿貝誤差依然存在，如圖 2.2 所示。

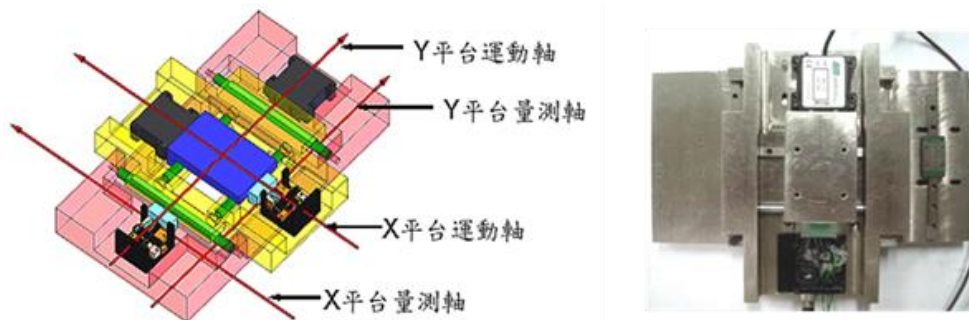


圖 2.2 具阿貝誤差之共平面平台

2007 年，臺灣大學吳佩璉研製第二代的共平面平台[35]，修正了第一代共平面平台幾項設計缺失，但卻未保持平台結構對稱性，並且因驅動馬達與感測器同端，馬達之高頻雜訊將導致感測器訊號之不穩定，如圖 2.3 所示。

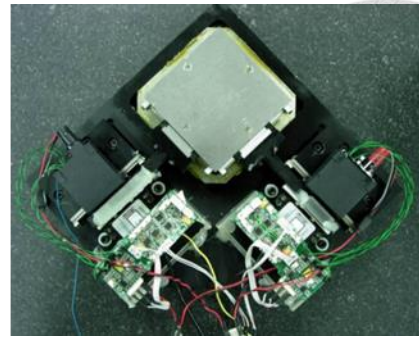
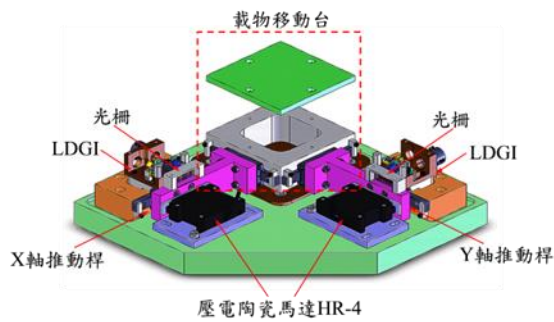


圖 2.3 結構未對稱之共平面平台

2010 年，臺灣大學柯志遠研製第三代之共平面平台[36]，結構設計上修正第二代共平面平台之缺點，使之呈現結構對稱性，結構材料部分採用低熱膨脹係數之鈦鋼，驅動馬達與感測器之配置則各自於同一軸之兩端，並且為了避免驅動馬達所產生之震動，將兩軸感測端與驅動端安置於分開之底座，但由於線性滑軌之徑向間隙將造成定位上之誤差，於感測端加上 DVD 讀取頭補償此誤差，如圖 2.4 所示。但由於 DVD 電壓跳動量過大，以及平台運行時 LDGI 光柵的 yaw 產生的光程差會造成 LDGI 讀值誤判。



圖 2.4 結構對稱且符合阿貝原則之共平面平台

2012 年，臺灣大學林仲豪為了改善 LDGI 讀值因 yaw 角度所產生的誤判，因此在感測器上更換為麥克森干涉儀，將原本裝設光柵的推桿與滑軌拆除，在平台上固定長條平面反射鏡，使得感測器可以直接讀到平台移動量，減少許多結構上造成的誤差，如圖 2.5。但更換成麥克森干涉儀會因環境所造成的波長不穩定使平台定位精度降低，針對此問題本論文在麥克森干涉儀旁加上波長補償模組，為了確實的校正實際波長值，波長補償模組部份會在第三章會仔細的介紹。

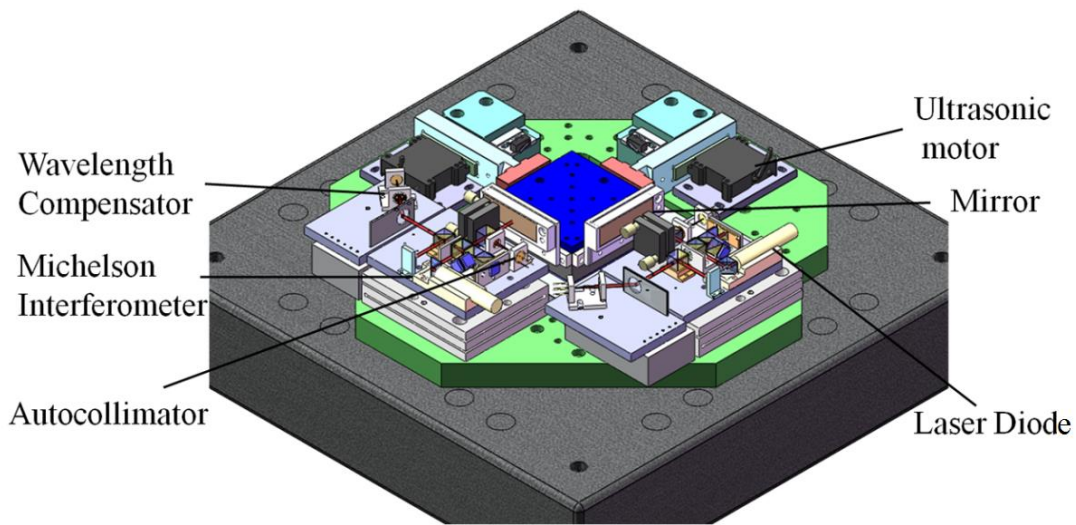


圖 2.5 以麥克森干涉儀做為感測器之共平面平台

2.2 寶塔式橋架配重主軸

2.2.1 寶塔式橋架結構

矩型橋架經常是精密三次元座標量測儀裝置 Z 軸及探頭採用的結構。在過去矩型橋架被選用是因為工具機結構對稱性以及大型工件對微米等級的精度要求，但值得注意的是長方型橋架只有一個平面有對稱性。橋架中央的形變量對於量測結果有顯著影響，因為主軸重量，驅動負載和探針接觸力都會反應在橋架上。雖然橋架和 Z 軸本身的重量所導致的靜態形變並不會影響量測精度，但驅動器所產生的作用力，雖然此作用力並不大，卻會導致橋架次微米等級的動態形變。

為了達到奈米量測上的高精度要求，橋架的剛性設計需納入考量。矩型以外的橋架結構也曾在現代超精密微米或奈米級三次元座標量測儀結構上被採用過，例如 Zeiss F-25[9, 20]和 IBS ISARA 400[37, 38]。

為了比較不同橋架結構的剛性以達到微型三次元座標量測儀的標準，設計出相同寬 220 mm，高 110 mm，厚度 60 mm，及 70 mm×100 mm×40 mm 的支撐板，並使其皆承受相同的 z 軸重量，29.4 N。橋架原料為密度 2660 (kg/ m³)、楊氏系數 60 Gpa、蒲松比 (Poisson's ratio) 0.3 的大理石。藉由 ANSYS 7.0 軟體的 FEM 分析後，每種型態的橋架結構中央變形量比較，如表 2 所示。

表 2 不同橋架結構之剛性比較

橋架型式	自重形變	自重加 Z 軸重形變
矩型	0.156 μm	0.362 μm
圓型	0.102 μm	0.174 μm
拱型	0.090 μm	0.154 μm
最佳拱型	0.060 μm	0.131 μm
寶塔型	0.060 μm	0.115 μm

由此可見，在所有的結構裡寶塔型橋架結構有最好的剛性並且是唯一一個有力平衡設計的結構。然而即使驅動器的力量較橋架的靜態承載重量小許多，不可避免地，從驅動器產生的動態驅動力在奈米等級上還是會對橋架造成一些影響，舉例來說，1 牛頓的動態驅動力就會對長方型橋架中央部分造成 12.3 奈米的形變量，但是寶塔本身的形變量只有 3.9 nm。因此可以確保在量測過程中相同的量測誤差產生，寶塔橋架結構確實對於外來的干擾有最小的影響。



2.2.2 配重式主軸

2007 年，臺灣大學吳珮聰設計之主軸[35]，運用定滑輪組與鋼繩連接配重塊與量測 Z 軸，用以減低因 Z 軸重量造成不同方向驅動時的困難度，但其剛體與運動機構不對稱，且未避免驅動馬達造成感測器之干擾，其結構示意圖如圖 2.6 所示。

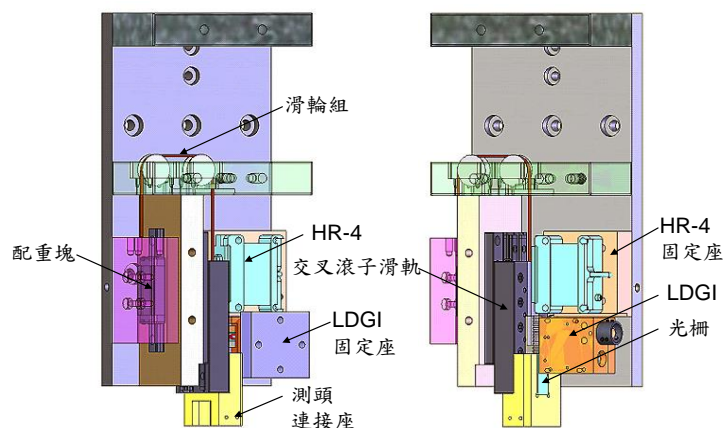


圖 2.6 結構不對稱之配重主軸

2010 年，臺灣大學柯志遠設計之主軸[36]，將 z 軸安裝在平板上方的橋架中央，且同軸的配重可以平衡驅動力。圖 2.7 為 z 軸的內部結構，配重由超音波馬達推動，所以振動不會傳遞至裝置探頭的部分。感測器安裝於 z 軸中央與探針的量測軸同軸。z 軸的兩側安裝於兩個線軌上，且底部可夾持量測用的探頭，最後將此配重主軸搭配結構亦對稱之寶塔式橋架，如圖 2.8 所示。

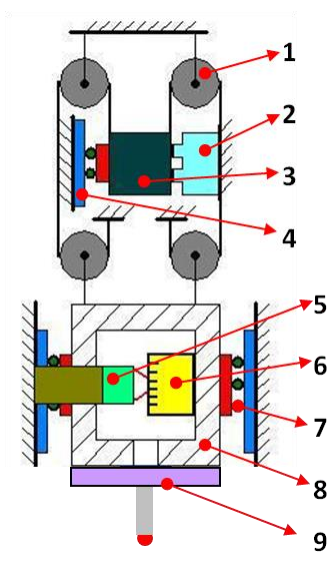


圖 2.7 Z 軸內部結構

1 為滑輪，2 為超音波馬達，3 為配重，4 為線性滑軌，5 為感測器，
6 為光柵，7 為交叉滑軌，8 為 Z 軸框架，9 為探針

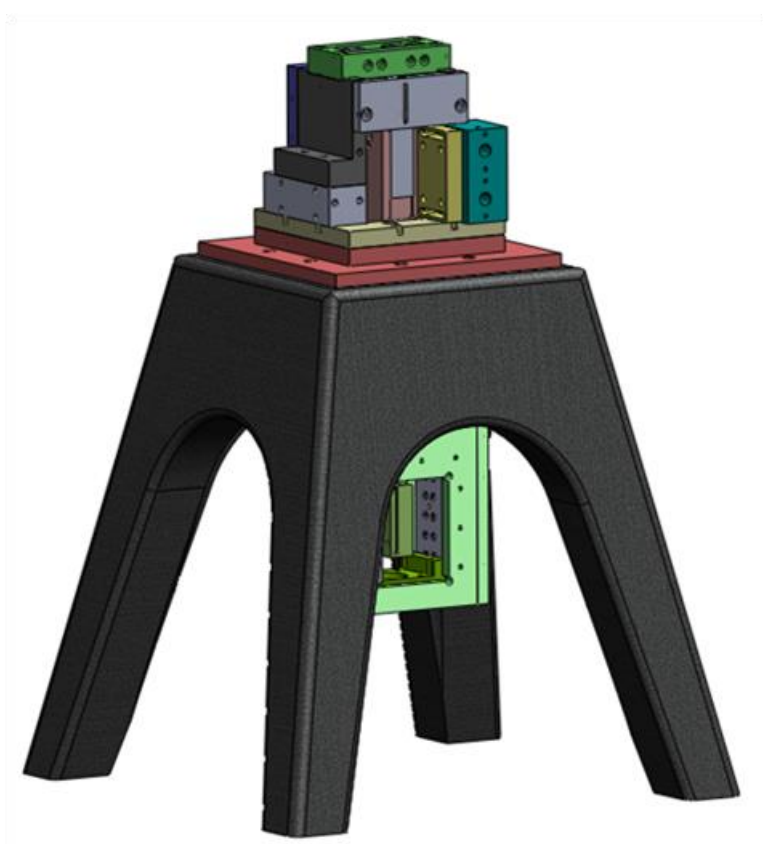


圖 2.8 寶塔式橋架主軸



2.3 線性繞射光柵干涉儀

最簡單的光柵干涉儀架構如圖 2.9 所示。其基本原理是使光入射在光柵上產生繞射光，當光柵移動時兩道光將產生等值且反向的都卜勒頻移(Doppler frequency shift)，若將兩道繞射光疊合後將產生差頻干涉現象。若透過光電二極體接受光強之相位變化，再由電路解析光電訊號即可實現對光柵位移之量測。

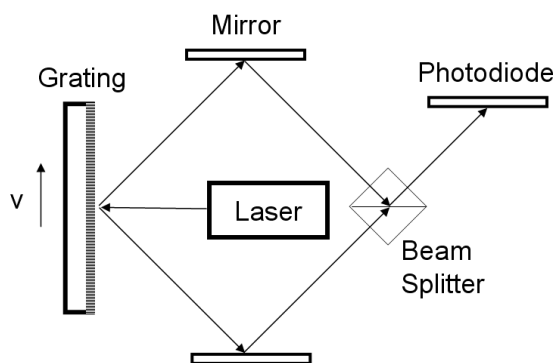


圖 2.9 簡易光柵干涉儀之架構

2.3.1 量測原理

測長干涉儀的起源為 1881 年 Albert Michelson 所提出，此架構在經過科技進展的推波助瀾下已成為具備高精度的測長儀器。其量測原理為基於光源波長，計數其干涉條紋之變化並換算成位移，會受到週遭介質的干擾。

單色光源導入分光鏡分成量測光和參考光，分別經移動鏡和參考鏡反射後沿原光路回射，此時兩道光之電場分別為：

$$\vec{E}_1 = E_1 e^{i(\omega_1 t + \vec{k}_1 \vec{r}_1 - \phi_1)} \hat{a}_1 \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_2 = E_2 e^{i(\omega_2 t + \vec{k}_2 \vec{r}_2 - \phi_2)} \hat{a}_2 \quad (2.2)$$

其中 E_1 和 E_2 分別為對應的電場強度， ω 為角頻率， t 為時間， \vec{k} 為場傳遞常數， \vec{r} 為位置向量， ϕ 為光的絕對相位， \hat{a}_1 、 \hat{a}_2 為兩電場偏振方向。當光返回分

光鏡後會合成一道光束，其電場將會疊加。在此我們假設兩電場的振動方向相同，此時感測器上所接收到的光強變成了；

$$\begin{aligned}
 I &= \epsilon_0 c \langle \vec{E}^2 \rangle \\
 &= \epsilon_0 c (E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\Delta\omega t + k(r_2 - r_1) - (\phi_2 - \phi_1)))
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

其中 ϵ_0 為真空介電常數， c 為光速， k 為場傳遞常數($k = \frac{2\pi}{\lambda}$)， r_1 為參考光行進的路程， r_2 為量測光行進的路程。若不考慮 $\epsilon_0 c$ 造成的微小影響，且考慮光柵干涉儀在量測時的兩束光之光程相等則 $r_1 = r_2$ 且兩光來自同一單頻光源則 $\phi_1 = \phi_2$ ，此時餘弦函數裡的項僅與光行進的角頻差 $\Delta\omega$ 有關。為了進一步簡化式子，另兩電場振幅一樣($E_1 = E_2 = I_0$)則干涉光強變化簡化成為：

$$I = 2I_0(1 + \cos(\Delta\omega t)) \tag{2.4}$$

式中的 $\Delta\omega$ 為光柵移動時，兩道重疊光之角頻差，以下以光柵繞射原理和都卜勒效應繼續推導此參數。

2.3.2 光柵繞射與都卜勒頻移

許多等寬的狹縫等距離地排列起來的光學元件稱為光柵。在一透光基板上（如玻璃）以刀刻出一系列等寬等距的平行刻痕，刻痕處透光率低，未刻過處透光率高，這樣就是一個簡單的光柵。上述為一透射式光柵，而若在反射率高之金屬表面刻出細槽，或者在基板上鍍上一層高反射率物質，就是一個反射式光柵。不論透射或反射，一道光打到光柵後，會因光的不同波長，造成不同的出射角度，因此特點，已經廣泛的被應用在頻譜分析儀中；也因為光柵能將不同角度的入射光分成若干道光，具有分光效果，近來在許多光學系統架構中也使用光柵以取代稜鏡組。

繞射為一種波的特性，當波源通過一與波長尺度相近的障礙物時，會產生波形上的畸變。對於透射或反射式的光柵來說，其基本原理是一樣的。一個反射式光柵的繞射情形如圖 2.10 所示，一道波長 λ 的光，以入射角 θ_i 打到一個具有 d 節距的光柵（ d 可稱為光柵常數），產生若干道繞射光，出射角（繞射角）為 θ_q 。

入射角及繞射角有其對應關連，由基本繞射原理，可寫成以下形式：

$$d(\sin \theta_i + \sin \theta_q) = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.5)$$

此關係式稱光柵方程式（grating equation）[39, 40]。式中 m 為繞射階數。 θ_i 及 θ_q 的正負號取法為，以光柵的法線為 0 度，逆時針方向為正，順時針方向為負；而 m 的正負號判斷法則為，若 θ_i 及 θ_q 為同號，則 m 為正，不同號則為負。當 m 為 0 時（零階繞射），繞射光即為反射光。

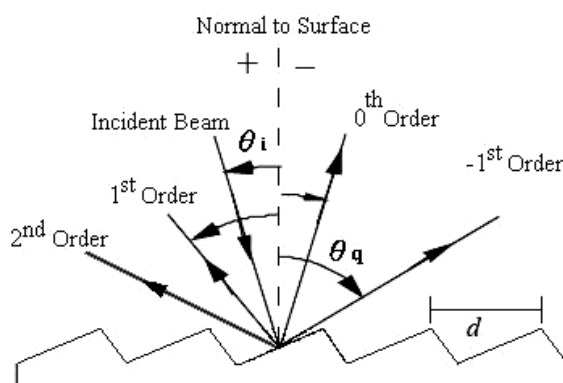


圖 2.10 光柵繞射示意圖

當光柵移動時，如圖 2.10 投射在其上面之光波將會產生都卜勒頻移效應，若入射光源位置 I 及觀測點 O 均保持不動， $I(\theta_i, f_0, \lambda)$ 為頻率 f_0 ，波長 λ ，入射角 θ_i 的入射光， $O(\theta_q, f_q)$ 為觀測到具有頻率 f_q 、繞射角 θ_q 的繞射光束。N 為光柵之法線方向，光柵以速度 v 垂直法線方向移動。經由雙重都卜勒效應，(2.5) 式可改為

$$\Delta f = f_0 \frac{v}{c} (\sin \theta_i + \sin \theta_q) \quad (2.6)$$



代入光柵方程式與光速公式於式(2.6)中可得

$$\Delta f = m \frac{v}{d} \quad (2.7)$$

本研究之光柵干涉儀都是採用正負一階繞射光進行差頻干涉，考慮兩道分別帶有 ω_1 及 ω_2 之角頻率的光，由(2.7)式，兩道光之角頻率可表示為

$$\begin{aligned} \omega_{+1} &= \omega_0 + 2\pi \frac{v}{d} \\ \omega_{-1} &= \omega_0 - 2\pi \frac{v}{d} \end{aligned} \quad (2.8)$$

故兩道光之角頻差為

$$\Delta \omega = 4\pi \frac{v}{d} \quad (2.9)$$

代入式(2.4)，此時光強將隨光柵位移而成為以下關係式

$$\begin{aligned} I &= 2I_0 (1 + \cos(\Delta \omega t)) \\ &= 2I_0 \left(1 + \cos \left(4\pi \frac{v}{d} t \right) \right) \\ &= 2I_0 \left(1 + \cos \left(4\pi \frac{1}{d} \int_0^t v(t) dt \right) \right) \\ &= 2I_0 \left(1 + \cos \left(4\pi \frac{\Delta x}{d} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

其中， Δx 為光柵之位移。上式表示，干涉光強 I 會有弦波形式之干涉條紋，並隨著光柵位移 Δx 而產生亮暗之變化，亮暗每變化一次代表相位變化為 2π 。從式中我們可得出光強相位變化 $\Delta\Phi$ 與光柵位移 Δx 之間的關係

$$\Delta x = \left(\frac{\Delta\Phi}{2\pi} \right) \times \frac{d}{2} \quad (2.11)$$

2.3.3 線性光柵尺

採用容易取得之商用一維光柵，配合準直入射技術研製線性光柵干涉儀 (Laser diffraction grating interferometer, LDGI)。比起精度相近的雷射干涉儀，LDGI 具有高穩定性、高幾何公差、等光程量測等優點。

LDGI 之基本光路架構如圖 2.11，LD 經過 VIM 分光後，反射光路經過平面鏡 PM1 反射後以光柵之負一階繞射角入射光柵；另一道透射光路經過 PM2 將光臂偏折 45 度後再經過 PM3 以光柵之正一階繞射角入射光柵。以上入射方式為反射式光柵的一種特殊使用方式[41]，當光束以光柵之繞射角入射光柵時，其繞射光即會循原光路繞射回光學讀頭中，由 VIM 進行疊合干涉處理。若只考慮初階繞射，LDGI 之入射角由(2.5)式變為

$$\theta_{litrow} = \sin^{-1} \frac{\lambda}{2d} \quad (2.12)$$

根據上一節，光柵在進行線性移動時，左右兩光臂會有角頻率之變化，為偵測兩光臂角頻差之干涉儀；同時，量測時光臂並不會有光程之差別，因此稱為等光程式的量測。考慮使用之光柵密度為 1200 lines/mm ，其一階準直角 $\theta_{litrow} = 22.4^\circ$ ，即光柵每進行 416.7 nm 之位移時，干涉圖樣完成一週期之變化，最後利用 HEIDENHAIN IK220 細分卡進行細分，將弦波訊號細分成 4096 份，解析度可達 0.1 nm 。

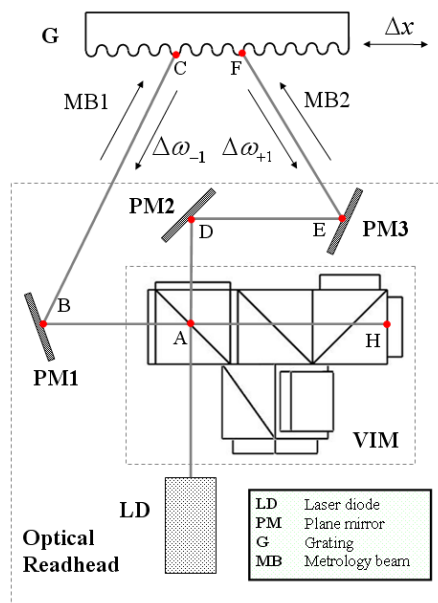


圖 2.11 LDGI 光路圖

2.4 多自由度量測系統

本多自由度量測系統是由一系列光學與機械零組件所構成，其感測模組部分包含了雷射干涉儀，自動視準儀與麥克森波長補償模組，其設計概念為：可即時量測精密平台單軸移動時之移動距離與平台移動時其角度的俯仰與偏擺量，並同時具備高精密度，其基本光路圖如圖 2.12 所示。

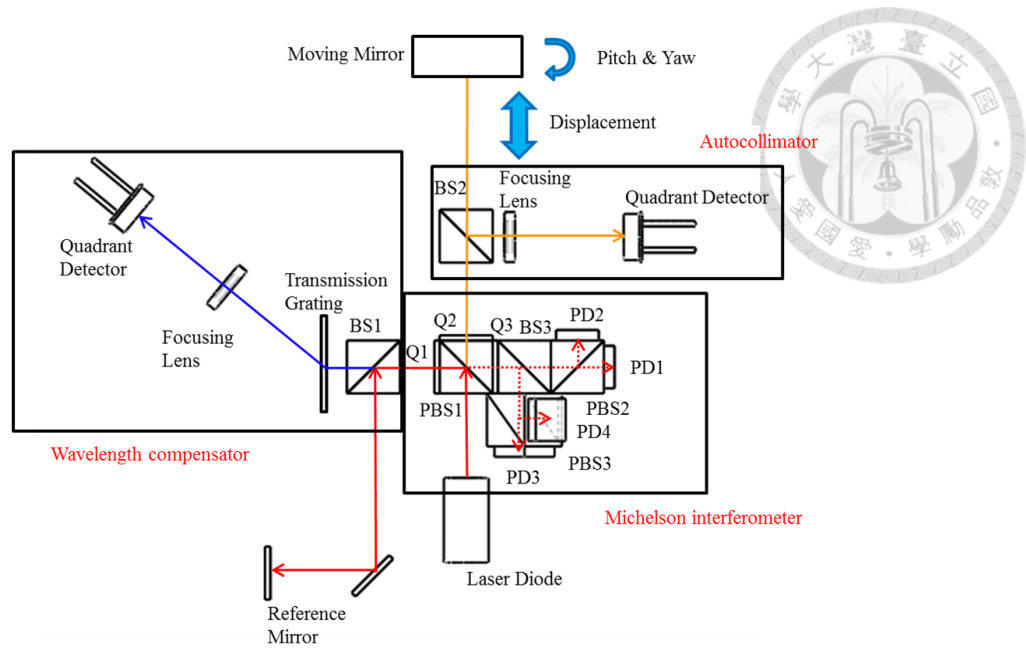


圖 2.12 多自由度量測系統光路圖

以下將就其原理簡單概述：

2.4.1 干涉儀量測原理

當兩個或兩個以上的光波在某個空間中相遇，因為波與波的疊加從而形成新波型的現象稱之為干涉。利用此干涉現象進行幾何或物理性質的量測儀器則稱為干涉儀。

測長干涉儀的起源為 1881 年 Albert Michelson 所提出，此架構經過歲月的推移與科技的進展下已成為具備高精度的測長儀器。其量測原理為基於光源波長，計數其干涉條紋之變化並換算成位移，由於光在介質中行進，故其量測結果會受到週遭介質的干擾。Michelson 干涉儀的簡易架構如圖 2.13。

單色光源導入分光鏡分成量測光和參考光，分別經移動鏡和參考鏡反射後沿原光路回射，此時兩道光之電場分別為：

$$\vec{E}_1 = E_1 e^{i(\omega_1 t + \vec{k}\vec{r}_1 - \phi_1)} \hat{a}_1 \quad (2.13)$$

$$\vec{E}_2 = E_2 e^{i(\omega_2 t + \vec{k}\vec{r}_2 - \phi_2)} \hat{a}_2 \quad (2.14)$$



其中 E_1 和 E_2 分別為對應的電場強度， ω 為角頻率， t 為時間， k 為場傳遞常數， \vec{r} 為位置向量， ϕ 為光的絕對相位， \hat{a}_1 、 \hat{a}_2 為兩電場偏振方向。當參考光反射回分光鏡後會合成一道光束，其電場將會疊加。在此我們假設兩電場的振動方向相同，此時感測器上所接收到的光強變成了：

$$\begin{aligned} I &= \varepsilon_0 c \langle \vec{E}^2 \rangle \\ &= \varepsilon_0 c \left(E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(\Delta\omega t + k(r_2 - r_1) - (\phi_2 - \phi_1)) \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

其中 ε_0 為真空介電常數， c 為光速， k 為場傳遞常數 ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$)， r_1 為參考光行進的路程， r_2 為量測光行進的路程。若不考慮 $\varepsilon_0 c$ 變化時造成的微小影響，角頻差不變且兩光來自同一單頻光源則 $\phi_1 = \phi_2$ ，此時餘弦函數裡僅與光行進的路程差(簡稱光程差，OPD)有關。進一步簡化式子，使兩電場振幅一樣 ($E_1 = E_2 = I_0$) 則光強為：

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)\right) \right) \quad (2.16)$$

當移動鏡移動 Δz 的距離時，量測光所行走的光程差應為 $2n\Delta z$ ， n 為光行進介質之折射率，2 倍則是因為前進和回來造成二倍的關係。此時，光強再次簡化為：

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(2n\Delta z)\right) \right) \quad (2.17)$$

假若光的波長已知，則光強的變化僅與量測鏡的位移有關。cos項為交流項

(AC)，其餘則為直流項(DC)需注意的是，由於沒有一可參考的絕對原點，故其量測方法為增量式量測。

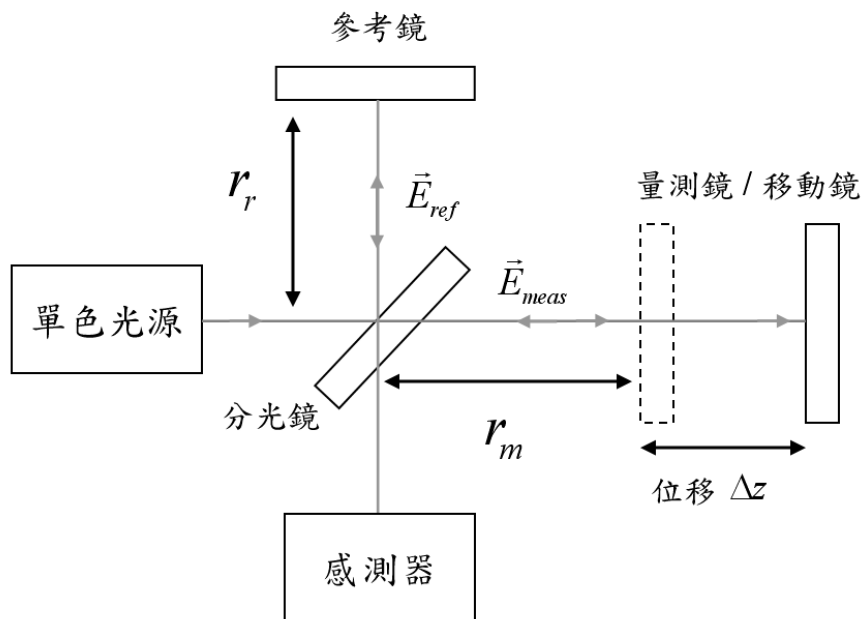


圖 2.13 Michelson 干涉儀光路架構

2.4.2 自動視準儀補償原理

自動視準儀之主要功能為量測微小角度，進而量測真直度，故又稱之為準直儀。最早是由目測的方式進行量測，故稱視準儀，然而由目測人工的方式誤差實在是太大，隨著科技的進步與光電技術的演進，漸漸地演變為一種靈敏且極精確之光學儀器，故稱自動視準儀，其可量測光源經平面反射鏡後所產生極小之角度。

圖 2.14 為其量測原理，圖中有一平面反射鏡置於光束通路中並與準直透鏡 (Collimating lens) 的幾何軸心成正交，將光沿著傳送路線再反射到光源處。如反射鏡與光線成 θ 之微小角度傾斜時，光從傳送路線以等於 2θ 之角度反射，通過透鏡反射光束的任何部分，將被再集中到與焦點相距 $f \cdot \tan 2\theta$ 大小於聚焦平面。由於量測角度 (θ) 極小，因此應注意四項要點：

- (1) 反射光束再匯集的点是靠反射鏡與正交面所成角度而決定 (θ)，而與反射鏡及準直透鏡間的距離無關。
- (2) 角度 θ 不可大至使所給儀錶與反射鏡間的距離太大，而讓所有反射光束都在透鏡以外。
- (3) 高放大率需要長焦距。
- (4) 在水平面上，反射鏡的角度迴轉，僅作反射的像到光源的左邊或右邊之移動。

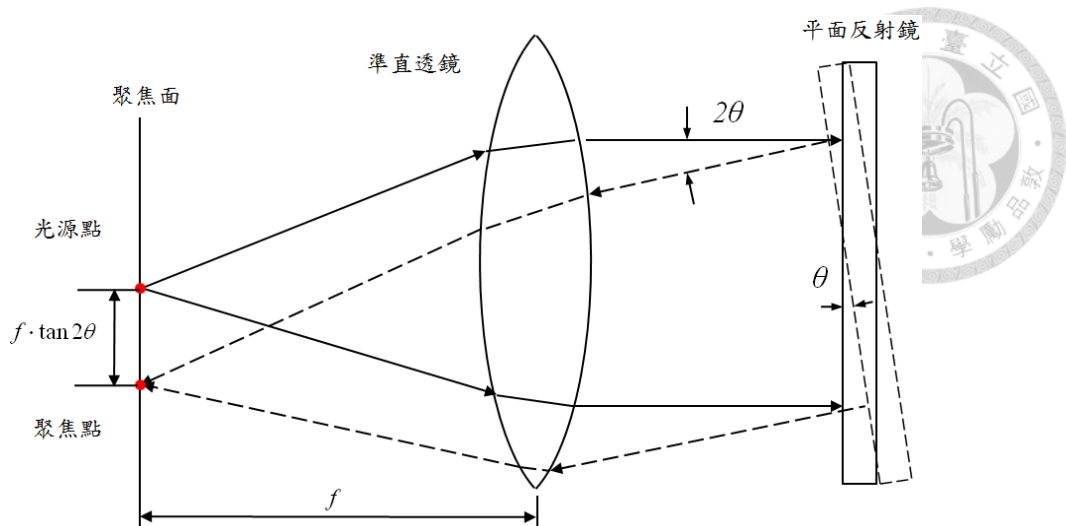


圖 2.14 自動視準儀原理示意圖

2.4.3 波長補償原理

一般常見的光譜儀是指能將複色光分離成光譜的光學儀器。光譜儀有多種類型，除在可見光波段使用的光譜儀外，還有紅外光譜儀和紫外光譜儀。按色散元件的不同可再細分為稜鏡光譜儀、光柵光譜儀和干涉光譜儀等。按探測方法分，有直接用眼觀察的分光鏡，用感光片記錄的攝譜儀，以及用光電或熱電元件探測光譜的分光光度計等。考量到干涉模組使用單色性高的雷射作為光源，而且干涉儀量測依據需要高精度的波長，本研究中的波長補償模組即是在光路中整合了穿透式光柵與自動視準儀。

繞射為一種波的特性，當波源通過一與波長尺度相近的障礙物時，會產生波形上的畸變。當波長有一微小變動時將會影響正負 M 階繞射光的繞射角，進而產生角度變化。對於透射或反射式的光柵來說，其基本原理是一樣的。一個反射式光柵的繞射情形如圖 2.10 所示，一道波長 λ 的光，以入射角 θ_i 打到一個具有 d 節距的光柵 (d 可稱為光柵常數)，產生若干道繞射光，出射角 (繞射角) 為 θ_q 。入射角及繞射角有其對應關連，由基本繞射原理，可寫成以下形式：

$$d(\sin \theta_i + \sin \theta_q) = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

此關係式稱光柵方程式 (grating equation)。式中 m 為繞射階數。 θ_i 及 θ_q 的正負號取法為，以光柵的法線為 0 度，逆時針方向為正，順時針方向為負；而 m 的正負號判斷法則為，若 θ_i 及 θ_q 為同號，則 m 為正，不同號則為負。當 m 為 0 時(零階繞射)，繞射光即為反射光。由此光柵方程式可得知，當光源的波長產生變化時，其產生出的繞射光角度亦會隨之變化，換句話說，可藉由觀測繞射光的角度變化推知現在光源的波長飄移。而與市售精密的干涉儀比對相同一段的位移，可以得知現在麥克森干涉儀的波長。

然而當光柵本身會受溫度變化，柵距將會在熱膨脹係數影響線性變化，雖然柵距影響的比例十分微小，但卻影響波長量測的準確性甚重，故本研究引入溫度變化的影響，使此模組可隨溫度量測波長變化。

2.5 超音波馬達

2.5.1 超音波馬達結構及特性

人耳所能感知的聲音頻率範圍約由 50 Hz ~ 20 kHz 之範圍，所以超音波為 20 kHz 以上的頻率震動或機械震動。超音波馬達[42]即是一種應用超音波的彈性振動方式來獲得驅動動力，然後再利用摩擦力帶動滑動子 (slider) 而驅動的馬達，基本架構如圖 2.15 所示。此系統是由高頻的電源供應器，振動子 (vibrator) 與滑動子所組成。其中振動子是由壓電驅動元件 (piezoelectric driver) 及彈性振動體 (elastic vibrator piece) 構成；滑動子則由一摩擦襯料 (friction spacer) 及可動的彈性體 (elastic sliding piece) 所組成。當壓電驅動元件被通以交流電壓，則會激發振動子的振動，再經由振動子與滑動子間的摩擦力而帶動滑動子的移動或轉動。經由外加交流電壓作驅動源之下的壓電陶瓷，將會產生超音波的交替伸縮

現象，雖然振動子每次振動的幅度大小僅達數微米 (μm)，但因其振動的頻率相當高，每秒伸縮達數十萬次，所以每秒可達數釐米 (mm) 的快速移動。

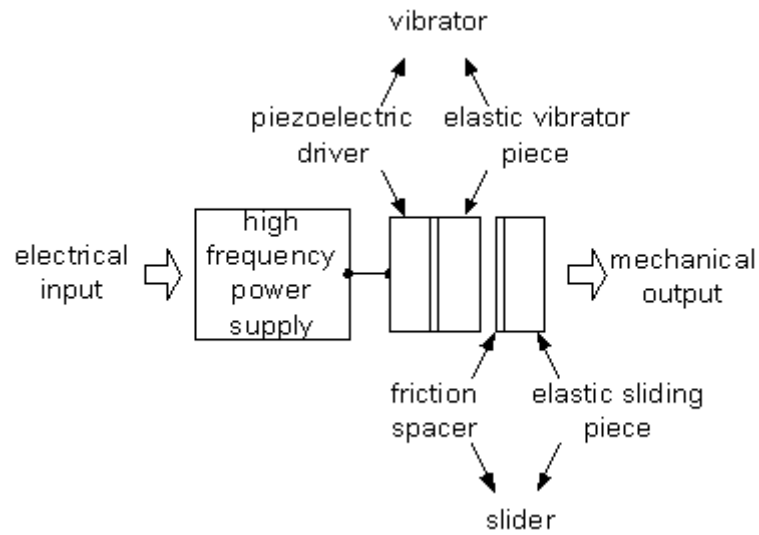


圖 2.15 超音波馬達基本架構示意圖

雖電磁馬達 (electromagnetic motor) 發展至今已有一百多年的歷史，且目前已廣泛應用於各個領域。然而電磁馬達仍存在許多難以克服的問題，例如會受磁場干擾、小型化後效率偏低，低轉速無法達到高轉矩，噪音大等問題，而超音波馬達則可以解決電磁馬達這些缺點，因此近年來超音波馬達的研發漸受重視。

根據 Feamndez 於 2003 年的整理，超音波馬達相對於一般電動馬達具有以下不同的優點：簡單機械結構、在閉迴路控制中可以達到高位置精確度(Accuracy)、不需齒輪傳送機構可達到高速度範圍的驅動、高施力密度(Force Density)、不需能量施加可達到煞車施力(Braking Force)、無限制的移動行程、可忽略反電動力(Electromagnetic Emission)、對電磁場影響不敏感、因超音波頻率驅動於人不可聽到的頻率範圍故噪音小。然而，超音波馬達亦具有以下的缺點：需 10~100 kHz 的高頻電壓供應、摩擦阻力可變使力量產生機制較不穩定

故根據上述特點，利用壓電效應原理驅動的超音波馬達結合高速驅動、高精度等優點，同時亦具有摩擦力可變等需特地考量之處；以下將對 Nanomotion 超音波馬達進行介紹。

2.5.2 Nanomotion 超音波馬達

此處將介紹由 Nanomotion 利用不同壓電致動形式設計並發展的超音波馬達。Nanomotion 在超音波馬達單個接觸端點(Tip)上，利用了四組電極放置於壓電陶瓷片的表面，使產生具彎曲與伸長模態的橢圓運動軌跡。一壓電陶瓷片的上表面具有四個電極 A、A'、B、B' 黏附於上表面如圖 2.16 中所示，每個電極為壓電陶瓷約四分之一的上表面積；而壓電陶瓷片的下表面，整面覆蓋著單一電極，斜對角線的電極 (A 和 A'，B 和 B') 由導線相互連接。

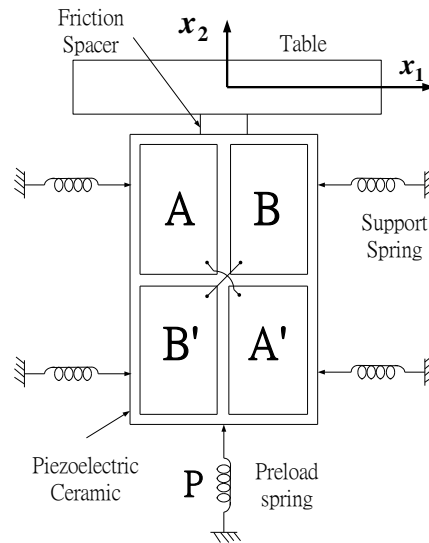


圖 2.16 Nanomotion 超音波馬達基本架構示意圖

因此，當兩組電極 A、A' 及 B、B' 予以一組伸長、一組縮短加以的不同方向驅動時，將使得壓電陶瓷片產生彎曲模態(Bending mode)的運動，而另一方面若予以兩組同時伸長或是縮短時，則產生伸長模態(Longitudinal mode)。

而若是固定其中一組，對於另一組施以弦波加以驅動時，則會往一方向移動。如電極 A 和 A' 固定接地而 B、B' 被輸以激振頻率的交流電壓時，則平台往左驅動。反之，電極 B、B' 固定接地而 A、A' 被輸以交流電壓時，則平台往右驅動。故藉此方法，可以使平台產生方向性的左右移驅動。整個 Nanomotion 超音波馬達驅動的示意圖於圖 2.17 所示。

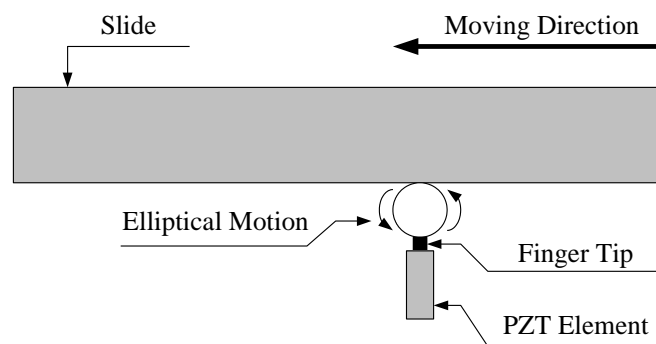


圖 2.17 Nanomotion 超音波馬達驅動示意圖



另外，Nanomotion 藉此原理加以推動的一項不同的優點在於，可以區分彎曲模態與伸長模態的個別驅動，若能藉由端點接觸的形式，直接藉由壓電陶瓷片左右伸致的微小位移量、高保持力的彎曲模態，可達到高解析度的致動。而 Nanomotion 發展的超音波馬達的 HR (High Resolution) 系列，即可直接進行左右彎曲模態的移動。

在需要高驅動力之需求下，Nanomotion 甚至會並聯多組如圖 2.18 所表示之模組，以提升馬達驅動力，同時也增加穩定度，以 HR4 馬達為例，該馬達便採用了兩個模組，共四個並排的壓電陶瓷片，另外 Nanomotion 公司尚有一款 HR8 的超音波馬達，而該馬達共並排了八個壓電陶瓷片，故 HR8 馬達之最大有效推力可較 HR4 馬達提升一倍，由 15 N 增加到 30 N；保持力也由 17 N 提升到 35 N。

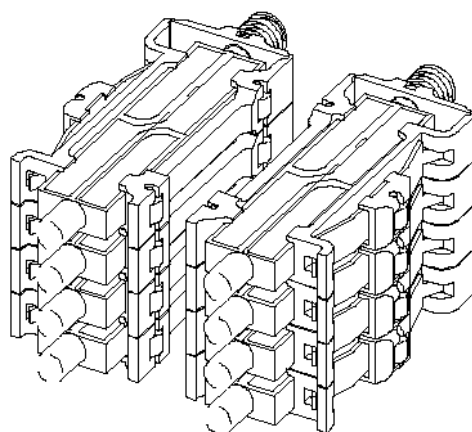


圖 2.18 Nanomotion 多層堆疊壓電陶瓷組馬達 HR8 結構圖

藉由堆疊壓電陶瓷驅動模組之方法，Nanomotion 針對不同之需求，推出了多款超音波馬達，如圖 2.19 所示，其中微型三次元量測儀之共平面平台以 HR4 推動，主軸由 HR8 推動。

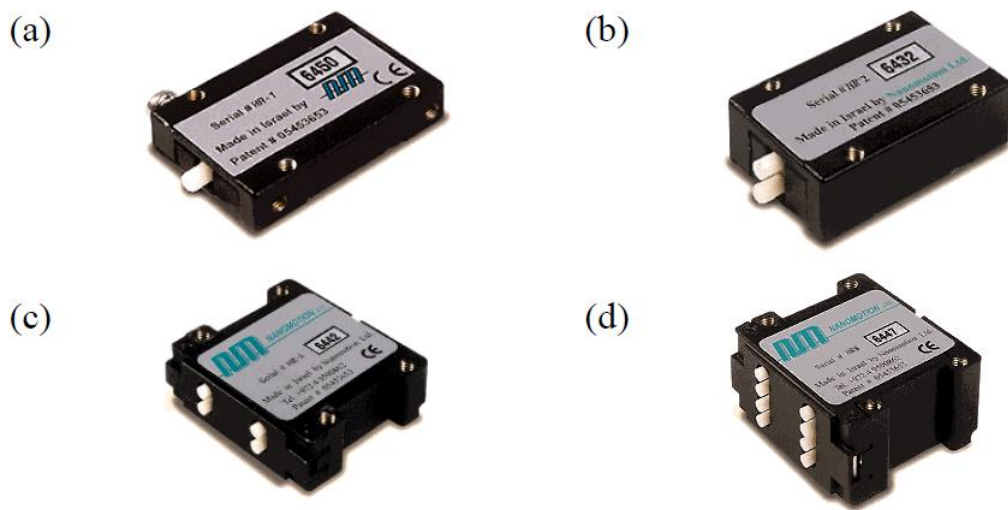


圖 2.19 Nanomotion 之 High Resolution 系列超音波馬達

(a) HR1, (b) HR2, (c) HR4, (d) HR8

2.5.3 超音波馬達驅動器 AB2 driver 介紹

由於系統以 HR (High Resolution) 系列超音波馬達搭配驅動器 AB2 Driver 使用[43]，故對 AB2 Driver 的系統架構及模式進行介紹。

由 Nanomotion 所針對 HR 系列超音波馬達發展的驅動器 AB2 Driver，相較於同系列的 AB1 Driver 增加了直流模式的提供，圖 2.20 及表 3 為驅動器方塊圖與相關規格。除可依輸入直流電壓大小轉換為對應的適於驅動的交流電壓的 AC mode 進行連續驅動以外，對於於 10 μm 以下的位移需求，提供了其他模式的驅動，如使用 TTL (Transistor- Transistor Logic) on/off pulse 及較低電壓於施加電壓瞬間進行微步移動的 Gate mode，以及直接使用彎曲模態(Bending mode)進行數百奈米行程間移動的 DC mode，皆為進行奈米定位系統建置的重要定位方式。

表 3 AB2 Driver 規格

AB2 Driver Specification		
電源輸入		24 V±5%
最大馬達輸出		280 Vrms
無載電源消耗		+24V/200 mA
最大負載電源消耗		+24 V/5 A
電源消耗	HR1	400 mA
	HR2	800 mA
	HR4	1500 mA
	HR8	2800 mA
使用模式		AC/Step/Gate/DC
DC 模式驅動解析度		10 nm↓(參考值)

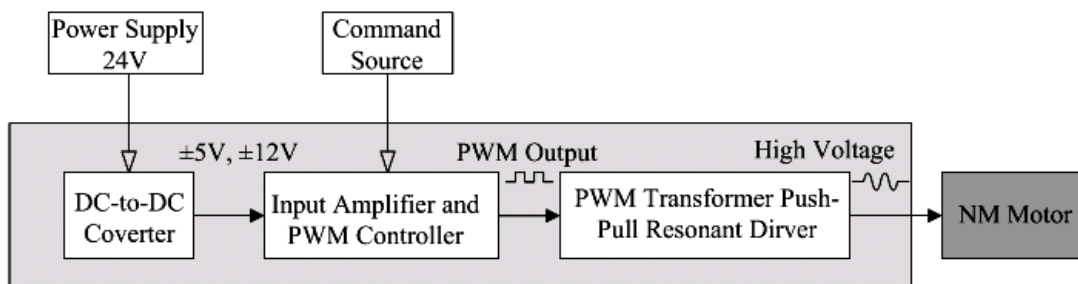


圖 2.20 AB2 Driver 系統方塊圖

AB2 Driver 提供了數種模式用以進行超音波馬達不同行程需求的驅動，因此僅介紹進行驅動所使用之 AC mode、Gate mode、DC mode 此三種模式。

(1) 交流模式 (Velocity / AC Mode)

利用超音波馬達內的壓電陶瓷片結構設計的伸長與彎曲模態的共振頻率 39.6kHz，進行長距離連續的驅動。而透過 $\pm 10\text{ V}$ 的電壓輸入，可在同頻率下的波形訊號進行振幅改變。故電壓大小、電壓正負可作為速度大小及方向控制使用。

(2) 脈衝模式 (Gate Mode)

於 AC mode 上，由一個定義好的 TTL On/Off 驅動波形，加以控制是否施加電壓，可藉由一個外部使用者定義(User Defined) TTL On/Off 訊號控制訊號寬度。

(3) 直流模式 (DC Mode)

DC Mode 直接利用壓電效應的彎曲 (bending) 模態，達到小範圍高解析度的位移。AB2 Driver 的 DC mode 可接受 $\pm 10\text{ V}$ 的訊號，加以轉換為 $\pm 300\text{ nm}$ 的微量位移。但由於而超音波馬達的壓電材料磁滯(Hysteresis) 性質，DC Mode 的來回間將會有間隙存在。圖 2.21 為 Nanomotion 所提供的 $\pm 10\text{ V}$ 對應到 $\pm 300\text{ nm}$ 的驅動曲線。並於實際的使用上，由於推動時馬達推動量將受導軌的阻力與摩擦力影響，其整體位移量將具有改變。

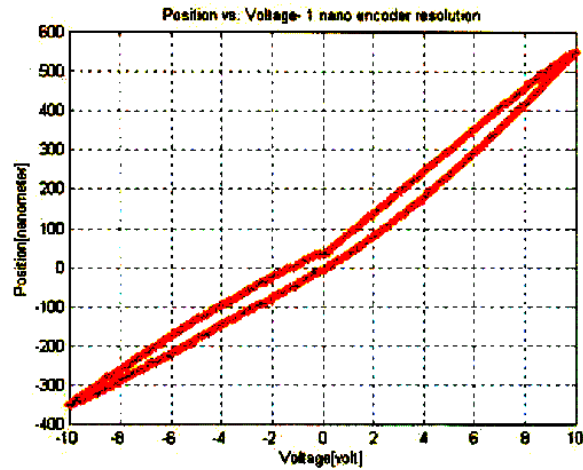


圖 2.21 DC mode 磁滯曲線關係圖

2.5.4 超音波馬達運動控制

(1) Gate mod 運動控制:

如圖 2.22 所示，共平面平台利用控制超音波馬達以 Gate 模式移動目標 10 m，左圖為時間與位移關係圖，右圖為時間與電壓關係，可看出馬達移動控制分為兩個部分，Region I 藉由較大的電壓以大步距進行移動，Region II 當距離目標在 1 m，以小電壓做較小步距的移動直到到達移動目標，移動過程以 BPNN PID 做軟體控制。

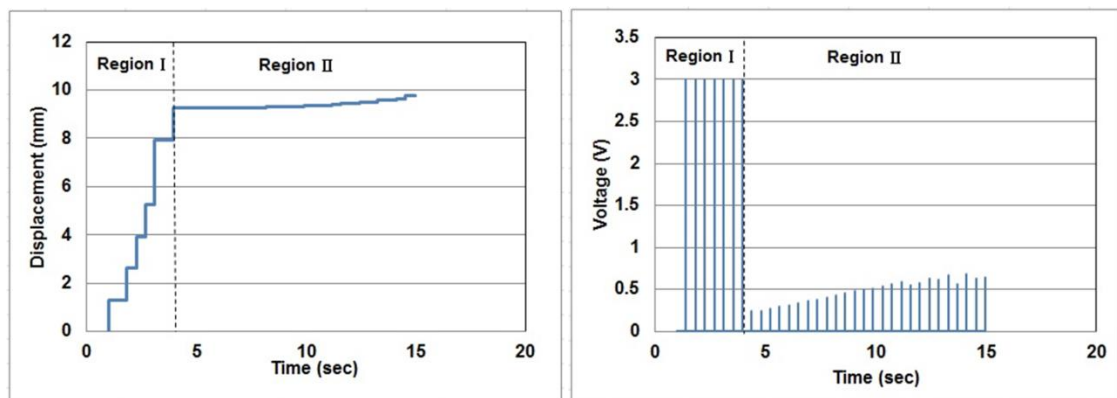


圖 2.22 Gate-mode step response control

(2) DC mod 運動控制:

共平面平台進行 DC 模式可控制平台移動精度在 100 nm 以下，其控制結果如圖 2.23，移動目標為 50 nm，右圖時間與電壓關係圖可看出控制以 1V 至 0.5V 改變量做不同電壓值的位移控制，但是左圖的時間與位移關係圖可發現位移並不是按比例的增加，主要原因是摩擦力在平台各點不盡相同所造成。

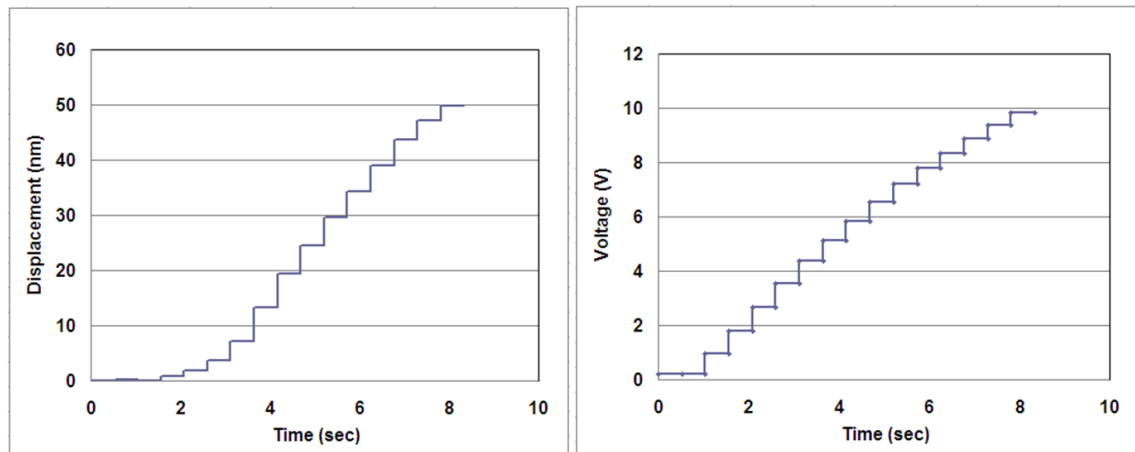


圖 2.23 DC-mode step response control

2.6 接觸式掃描探頭

在三次元座標量測儀中，探頭系統是將工件表面位置與坐標系統連接的重要元件，在探頭接觸到工件表面時提供信號讓控制系統定出其位置，是影響三次元座標量測儀精確度最重要的因素之一，並絕對地影響奈米級三次元座標量測儀的性能。應用在三次元座標量測儀上的探頭系統大致上可分為接觸式和非接觸式。接觸式探頭又有硬式探頭、觸發探頭、類比掃描式探頭三種，如圖 2.24。非接觸式探頭則有中心顯微鏡，中心投影器，影像視訊螢幕、和雷射掃描等方式[40]。

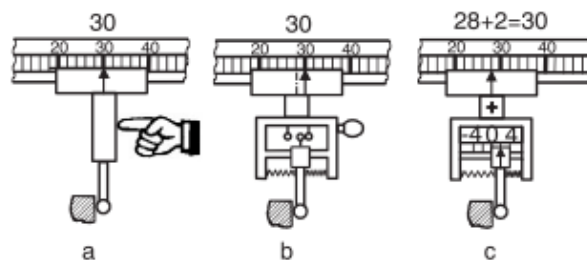


圖 2.24 三種接觸式探頭(a) 硬式探頭 (B)觸發探頭 (C)類比掃描式

2012 年，臺灣大學黃兆民發展出一套用於微奈米級三次元座標量測儀上之低成本、高精度的接觸式掃描探頭[44]，以懸浮片結構結合探針為基礎，再以台灣大學精密量測實驗室自製的三套麥克森干涉儀為感測器，測量探針接觸到工件時探球的三維位置變化。目前 Micro-CMM 先以此接觸式掃描探頭進行實際量測測試，因此將介紹此接觸式掃描探頭。

一般接觸式探頭結構上可分為三大部分：懸浮機構、感測器及主體機構。其中，懸浮機構使工件接觸探球後產生一反力使整體懸浮機構保持一力平衡之狀態，並將球心座標以其他方式表現成其他形式之物理量，感測器可量測其物理量之變化，主體機構則是設計成容易將感測器的量測範圍調整至懸浮片上，並阻絕探頭外部對感測器之訊號干擾，圖 2.25 為懸浮片示意圖。

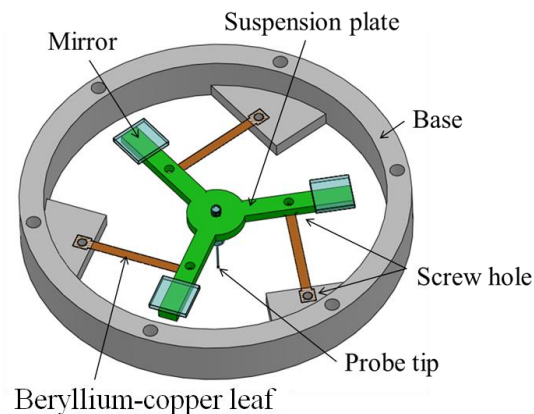


圖 2.25 懸浮片示意圖

三次元量測接觸式探頭以前端探球接觸工件表面，當球頭碰觸到工件後產生的接觸力會使球頭及懸浮機構產生變形，懸浮片在探頭系統中是用來保持力與力矩平衡的裝置。

探頭在量測過程中只有球頭會受到 X、Y 和 Z 三種方向力及其組合，因此探頭在空間中有三個自由度，至少要有三個感測訊號來完成三維的座標量測，故需要三個麥克森干涉儀量測懸浮片上三片鏡子的位移。

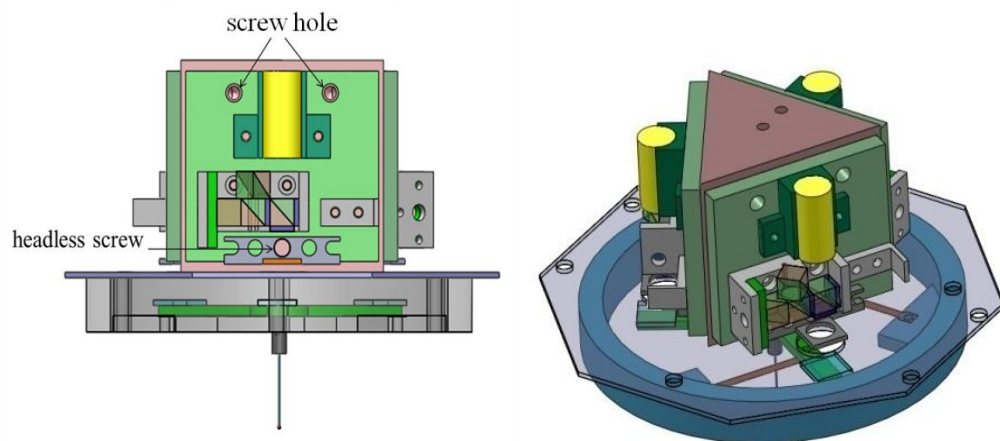


圖 2.26 探頭內部結構圖

為了將干涉儀與鏡片的相對位置關係調整至干涉儀的容許公差內，必須設計微調裝置來達到此目的，如圖 2.26 所示，干涉儀由上方兩個螺絲孔鎖住，利用餘隙配合可以微調整高度及偏擺角，再利用下方的無頭螺絲調整干涉儀的俯仰角，使三組干涉訊號在全行程 $20\ \mu\text{m}$ 內都有訊號。

Chapter 3 波長量測補償模組



本實驗室所開發的多自由度量測系統是由雷射的波長做為距離量測之依據，然而二極體雷射波長隨著驅動電壓、環境溫度與濕度不同，都會影響波長值與其穩定性。為了使本研究量測準確，對於波長的變化有應對的補償，因此開發了波長量測補償模組。本模組理論上可算出當入射角等於零度時，隨著波長變化繞射光的角度偏擺值，但是在實際應用上，伴隨著人工的組裝誤差，理論值必定不與實際情況符合，因此本章將校正出實際波長，並利用實驗室現有儀器與技術，改良波長補償模組，並以更低環境限制的狀況回授正確波長，

3.1 波長補償光路

波長模組安裝於 CMM 上的實體如圖 3.1 所示，模組包含了穿透式光柵、聚焦透鏡、四象限感測器與溫度感測器。因為是要監測並回授麥克森干涉儀的雷射波長，因此波長模組要能接收來自同一支雷射的光源，而在分光的使用上亦不能影響到干涉模組裡光的偏振性，因此在這裡選用非極化分光鏡來達成。透過四象限監測此一階繞射光的角度變化，與 SIOS 雷射干涉儀比對校正後即可得知現在麥克森干涉儀的波長與其變化量。

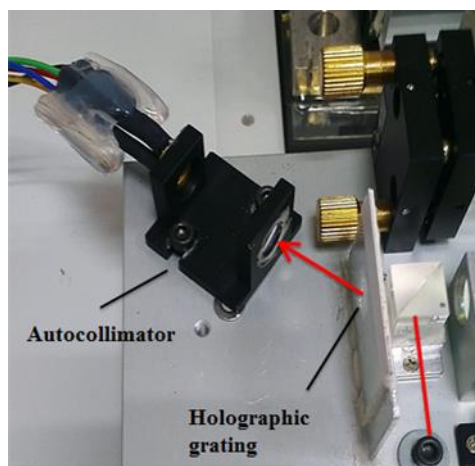


圖 3.1 波長補償模組實體圖



3.2 波長補償模組實驗架設

本研究利用雷射干涉儀比對逼近實際波長值的方式，量測出實際麥克森干涉儀的波長值，量測所需之四項線光感測器、光軸校準方式將在本節介紹。

3.2.1 四象限光感測器

光電感測器(photo detector)包含感光二極體(photodiode)與積體電路(integrated circuits)兩部份，簡稱為 PDIC。感光二極體主要功能是將光訊號轉換為電流訊號，照射在感光二極體上的光強度決定了電流的輸出大小，而積體電路則是將電流放大，並轉換成電壓訊號。

四象限光感測器(QPD, Quadrant Photodetector)是由四片面積接近，且光電性質相同的光感測器所組成，如圖 3.2 所示，其主要材料為矽，中央間隔約為 2 至 12 μm 。當光點投射在感測器上時，隨著光點的位置不同，光感測象限接收到的光強不同，訊號輸出也將不同。可利用簡單的電路對各感測器的輸出做處理，即可得知光點的位置差異，如式(3.1)、(3.2)所示。

$$X = \frac{(V_A + V_D) - (V_C + V_B)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (3.1)$$

$$Y = \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (3.2)$$

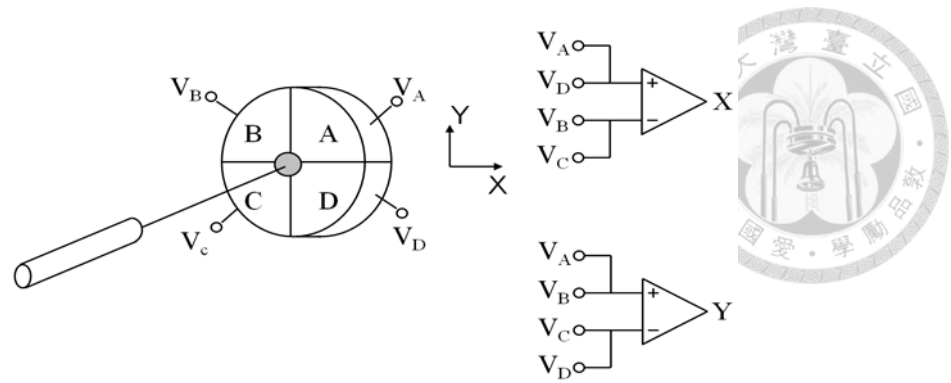


圖 3.2 四象限感測器光點位置與輸出電壓關係圖

而在下一小節，將利用四象限光感測器的性能，量測光點位置以校正光軸。

3.2.2 實驗架設光軸校準

為了消除量測波長時所造成之餘弦誤差，由於雷射干涉儀的光強達一定之量值，便認定雷射干涉儀已與機台移動軸同軸，然而大多數雷射干涉儀皆可容忍一微小的角度，此角度會造成的餘弦誤差為線性誤差，波長誤差也為線性誤差導致無法判斷實際波長值，所以再利用 SIOS 雷射干涉儀在量測時必須先將光軸與平台運動軸校準消除餘弦誤差。

本研究利用四象限感測器 QPD 進行雷射干涉儀的光軸校準，首先將四象限感測器置於移動平台中央，移動平台至近端處後，架設雷射干涉儀使光軸打於 QPD 上，並調整四象限微調座使光點在四象限中點(如圖 3.3 左圖所示)，再移動平台至遠端處，此時光點將會偏離原本中點位置(如圖 3.3 中間圖所示)，調整雷射干涉儀維條座使光點移至相對應的象限後(如圖 3.3 右圖所示)，再將平台移置近端處，重新調整四象限微調座將光點調至中心，反覆多次相同動作，直到確認移動前後時雷射皆於 QPD 正中央，此時雷射干涉儀光軸已校準，圖 3.4 為光軸校準示意圖。

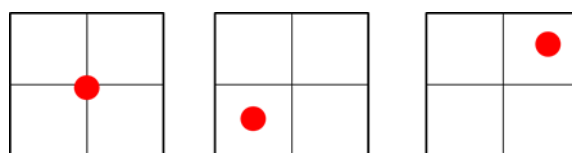


圖 3.3 四象限校正同軸度示意圖

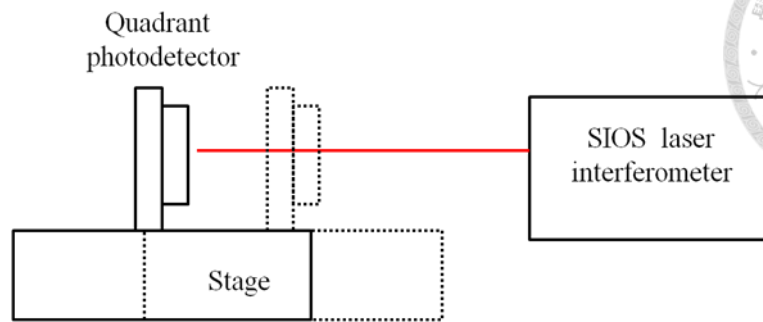


圖 3.4 利用四象限進行光軸校準

光軸校準結果確保光點全行程飄移在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 之內，而根據此結果計算

$$\frac{20000}{\cos\left(\frac{1}{20000}\right)} - 20000 = 2.5 \times 10^{-5} \mu\text{m}$$

故可稱此校準以消除了餘弦誤差。爾後步驟僅需調整阿貝臂以修正阿貝誤差，並將四象限光感測器拆除後，安裝 SIOS 干涉儀所需之平面反射鏡，調整光強至全行程可用之範圍，及可進行定位誤差實驗。

3.3 波長模組校正補償實驗

本實驗室所開發的多自由度量測系統是由雷射的波長做為距離量測之依據，然而二極體雷射波長隨著驅動電壓、環境溫度與濕度不同，都會影響波長值與其穩定性。為了使本研究量測準確，對於波長的變化有應對的補償，因此開發了波長量測補償模組。在本研究中，藉由微調驅動電壓與改變環境溫濕度量測波長改變量，並採用逼近法求得實際波長，將麥克森輸入一假定波長值與校準後的 SIOS 定位誤差比對，由於波長所造成的誤差為累加之線性誤差，因此實際波長與假定波長會存在一固定比例，將此比例係數回乘麥克森假定波長，重複數次以逼近求得實際波長，如表 4 所示。

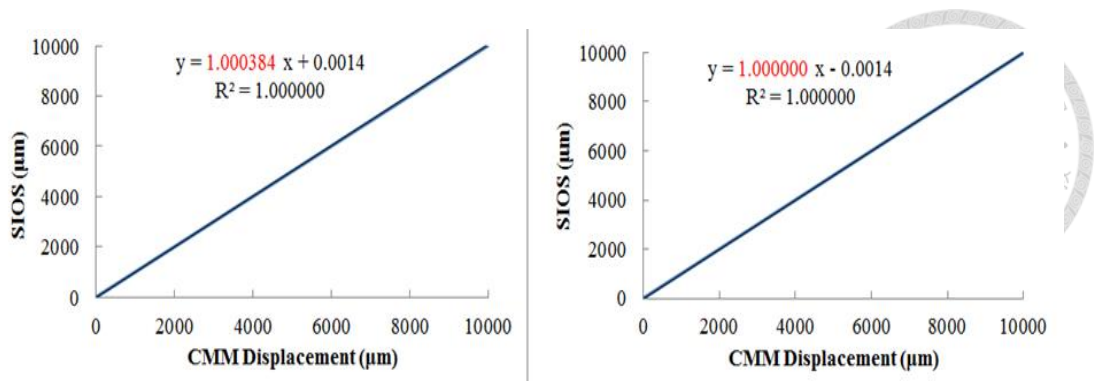


圖 3.5 逼近法求得實際波長

表 4 定位逼近法

MDFMS_逼近前 (μm)	SIOS (μm)	MDFMS_逼近後 (μm)	SIOS (μm)
0.000	0.001	0.000	0.001
9998.198	10002.040	10002.039	10002.040

如圖 3.5 所示，可以發現第一次比對後有一 1.000384 的倍率，造成 10 mm 的長距離移動下有 3.842 μm 的誤差，將此倍率回乘後，比對定位誤差倍率則為 1.000000，移動 10 mm 僅有 1 nm 的誤差。

波長補償模組是利用自動視準儀辨識雷射光因為波長變化而造成一階繞射角角度改變，因此波長補償精度決定於自動視準儀的精度，而其穩定性則是最重要的部分。在本模組靜置並用移動平均除去高頻雜訊，經 2012 年臺灣大學廖柏勛[45]所開發測試，波長不確定度 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 5.5 \times 10^{-6}$ ，符合一般二極體雷射的波長跳動值，且此精度是足夠的。

當二極體雷射波長變動量越大而未即時補償時，作為位置回授訊號，對於 Micro-CMM 之定位準確性是有問題的，因此我們必須分析影響本研究量測之繞射角與受溫度變化之影響。雷射光若打入一穿透式光柵，將產生若干道繞射光，根據光柵方程式(grating equation)，其中 d 為光柵柵距(可稱光柵常數)， λ 為雷射波長， θ_i 為入射角、 θ_q 為出射角， m 則為繞射階數。

$$m\lambda = d (\sin \theta_i + \sin \theta_q), m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$



如圖 2.12 所示， θ_i 及 θ_q 的正負號取法為，以光柵的法線為 0 度，逆時針方向為正，順時針方向為負；而 m 的正負號判斷法則為，若 θ_i 及 θ_q 為同號，則 m 為正，不同號則為負。當 m 為 0 時（零階繞射），繞射光即為反射光。由此光柵方程式可得知，當光源的波長產生變化時，其產生出的繞射光角度亦會隨之變化，換句話說，可藉由觀測繞射光的角度變化推知現在光源的波長飄移。而與市售精密的干涉儀比對相同一段的位移，可以得知現在麥克森干涉儀的波長。

而在本研究中，使用了一階繞射光的變化推斷波長變化，式如下：

$$\lambda = d (\sin \theta_i + \sin \theta_q)$$

並且隨著環境變化造成波長改變，使繞射角變化 $\Delta\theta$ ：

$$\lambda' = d (\sin \theta_i + \sin(\theta_0 + \Delta\theta)) \quad (3-1)$$

考慮熱膨脹係數對光柵造成之影響，我們使用的 Edmund 光柵為透明聚酯 (polyester) 薄膜材料，其熱膨脹係數為 $\alpha = 1.7 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，在標準溫度 25°C ，為 1000 lines/mm，即光柵柵距 d 為 $1000 \text{ nm} = d_0$ 。因此(3-1)中的 d ，應該改為 d_T ，其溫變膨脹關係式如下

$$d_T = d_0(1 - \alpha(25 - T))$$

T 為實驗當下溫度，代入修正過的(3-1)

$$\lambda'_{(\Delta\theta, T)} = d_T (\sin \theta_i + \sin(\theta_0 + \Delta\theta))$$

得

$$\lambda'_{(\Delta\theta, T)} = d_0(1 - \alpha(25 - T))(\sin\theta_i + \sin(\theta_0 + \Delta\theta)) \quad (3-2)$$

其中， $\sin\theta_i$ 、 θ_0 皆為常數，與整體儀器架設的狀況有關，而 $\sin(\theta_0 + \Delta\theta)$ 項展開之後可得到：

$$\sin(\theta_0 + \Delta\theta) = \sin\theta_0 \cos\Delta\theta + \sin\Delta\theta \cos\theta_0 \quad (3-3)$$

而 $\Delta\theta$ 在本實驗中變化非常小， $\Delta\theta \cong 0$ ，故 $\sin\Delta\theta \cong \Delta\theta$ ， $\cos\Delta\theta \cong 1$ ， $\cos\theta_0$ 為常數，故：

$$\sin(\theta_0 + \Delta\theta) \cong \sin\theta_0 + \Delta\theta \cdot \cos\theta_0 \quad (3-4)$$

將本部分(3-4)代回(3-2)，合併所有常數部分，原函數可整理為：

$$\lambda'_{(\Delta\theta, T)} = d_0(1 - \alpha(25 - T))(\sin\theta_i + \sin\theta_0 + \Delta\theta \cos\theta_0) \quad (3-5)$$

因此我們將(3-5)令為目標函數，根據前述各項已知參數， d_0 、 α 為常數， $\alpha = 1.7 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ， $d_0 = 1000 \text{ nm}$ ，找出 $\lambda'_{(\Delta\theta, T)}$ 與 $\Delta\theta$ 、 T 之間的關係，決定一組入射角 θ_i 與繞射角 θ_0 使得函數與數據點最符合，即可建立本波長量測模組。

由於本研究所設立之模型並非一般二元二次方程式或者一般線性函數，而是有耦合項以致無解析解 (Analytical expression)存在，故本研究使用商用軟體 matlab[46]的最佳化指令已求數值解 (numerical analysis)，也就是序列二次規劃法，(Sequential Quadratic Programming, SQP)，對本目標函數進行模擬運算，將各溫度區間的波長變化、繞射角與溫度變化帶入運算後，在可行解區域找出最佳化方程式。利用最佳化模型，代入實驗數據，預測最佳參數得：

$$\lambda'_{(\Delta\theta, T)} = -0.00001076 \times T + 788.14899377 \times \Delta\theta + 0.00001340 \times \Delta\theta \times T + 632.89292108$$

並且得到結果如表 5，可以看出實際波長在座標系上分布點幾乎都落在擬合方程式之上，如圖 3.6。而計算誤差比時，大多落在 10^{-6} 數量級，換算回全行程 20000 μm 誤差最大影響約在 14~160 nm。

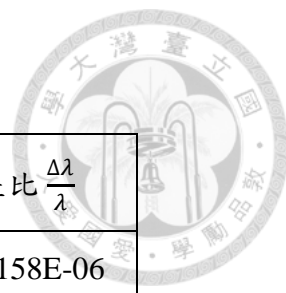


表 5 正確波長值和模組計算波長值比較表

實驗次數	校正波長 (nm)	實驗波長 (nm)	誤差 (nm)	誤差比 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$
1	632.81768	632.82281	-0.00514	-8.1158E-06
2	632.82432	632.82665	-0.00234	-3.6937E-06
3	632.81547	632.81706	-0.00160	-2.5220E-06
4	632.83245	632.83270	-0.00024	-3.8588E-07
5	632.78584	632.78144	0.00440	6.9468E-06

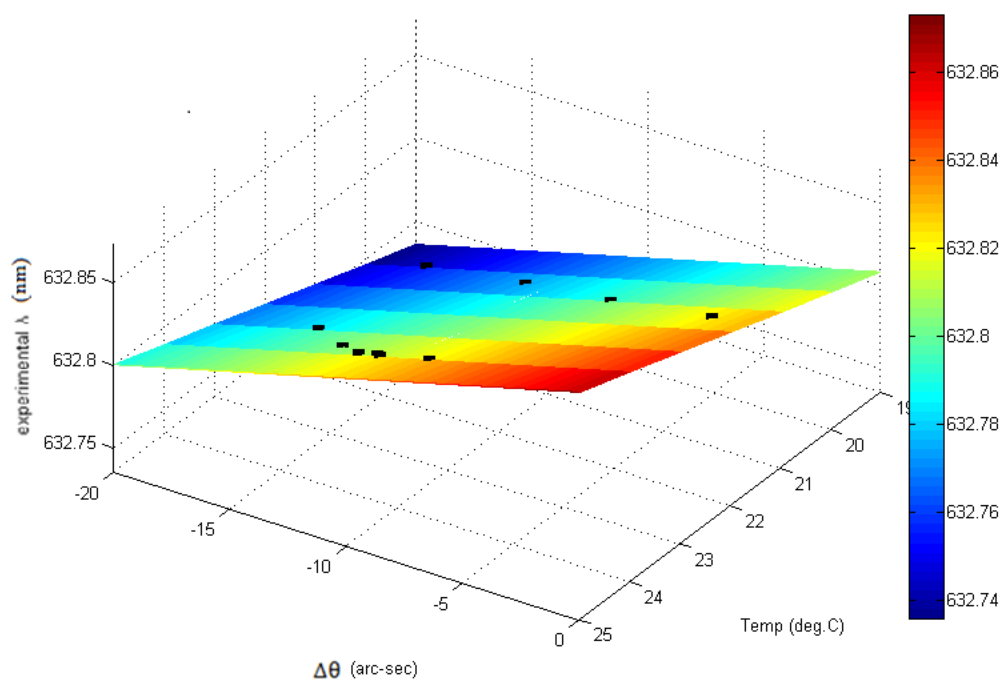


圖 3.6 溫度變化與繞射角度變化對應波長圖

Chapter 4 微型三次元量測儀體積誤差



一般體積誤差主要包含定位誤差、偏角誤差、直線度誤差、垂直度誤差、阿貝誤差、平鏡面誤差、光程差（鏡面偏擺）。本章節將針對本實驗室所開發改良式共平面平台之結構與配重式 Z-axis 主軸，將上述誤差源逐一進行介紹推導。

- 在推導體積誤差公式前，將以下內容使用的通用符號定義如下：

$\delta_j(i)$: i 軸向運動時之 j 方向線性度誤差

$\varepsilon_j(i)$: i 軸向運動時之 j 方向 yaw 角度誤差

$\beta_j(i)$: i 軸向運動時之 j 方向 pitch 角度誤差

$\sigma_j(i)$: i 軸向運動時之 j 方向 roll 角度誤差

$E_i(i)$ i 軸向運動時之反射鏡於 j 方向直線度誤差

$\alpha_{i,j}$: i, j 兩軸向的垂直度誤差角

x, y, z 軸 Laser interferometer 讀值: $L_x(x, y), L_y(x, y), L_z(z)$

x, y, z 軸位置: x, y, z

- 根據 Micro-CMM 結構配置，每個幾何誤差如下所示：

(1) 線性度誤差

x, y, z 軸定位誤差: $\delta_x(x), \delta_y(x), \delta_z(x)$

垂直直線度誤差: $\delta_y(x), \delta_z(x), \delta_x(x)$

水平直線度誤差: $\delta_y(x), \delta_z(x), \delta_x(x)$

(2) 角度誤差

x, y, z 軸 Pitch error: $\varepsilon_y(x), \varepsilon_z(y), \varepsilon_x(z)$

x, y, z 軸 yaw error: $\varepsilon_y(x), \varepsilon_z(y), \varepsilon_x(x)$

x, y, z 軸 roll error: $\varepsilon_y(x), \varepsilon_y(y), \varepsilon_y(x)$

(3) 鏡面誤差

x 軸向運動時 y 反射鏡於 y 方向直線度誤差 $M_x(y)$

y 軸向運動時 x 反射鏡於 x 方向直線度誤差 $M_y(x)$

(4) 垂直度

x 軸與 y 軸 α_{xz}

y 軸與 z 軸 α_{xz}

x 軸與 z 軸 $\gamma\alpha_{xz}$



以本研究主要為一共平面平台與兩組多自由度量測系統(MDFMS)所組合而成，MDFMS 可量測各軸移動量與角度(pitch, yaw)變化量。為使 X-Y 共平面平台達到奈米精度，反射鏡本身誤差與反射鏡偏擺造成的光程差都必須列入考量。

圖 4.1 為共平面移動台誤差示意圖。

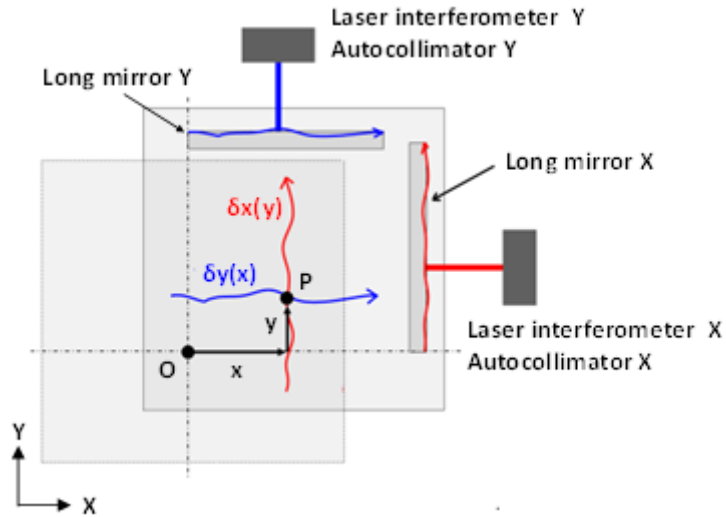


圖 4.1 共平面移動平台誤差示意圖

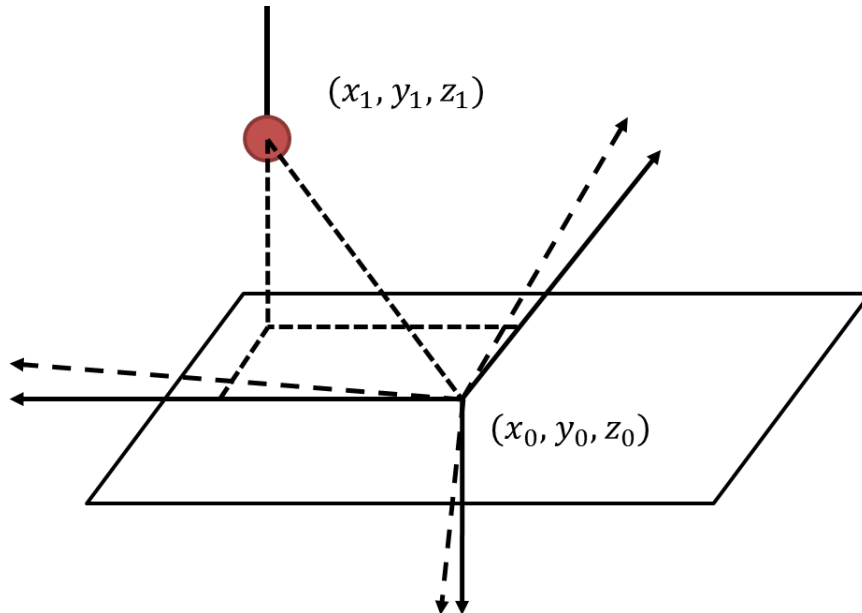


圖 4.2 三次元量測儀實際運作示意圖



P 點座標值除了平台實際移動距離需還包含加上反射鏡誤差、光程差與垂直度誤差。而實際運作時，需代入 Z 軸誤差所造成之影響，如圖 4.2 所示，則各軸雷射干涉儀讀值分別如所下：

X 軸雷射干涉儀讀值:

$$L_x(x, y) = x + \delta_x(y) + M_x(y) - y\gamma_{xy} + \Delta L_x(\text{pitch}, \text{yaw}) \quad (4-1)$$

Y 軸雷射干涉儀讀值:

$$L_y(x, y) = y + \delta_y(x) + M_y(x) + \Delta L_y(\text{pitch}, \text{yaw}) \quad (4-2)$$

Z 軸雷射干涉儀讀值:

$$L_z(z) \quad (4-3)$$

上述式僅代表讀值的物理意義，而推導出實際空間中點與讀值的關係，將在接下來各個小節分析各項誤差，並於本章後段整理。

4.1 面鏡誤差

根據(4-1)與(4-2)，面鏡形貌的誤差將影響到干涉儀在量測位移的實際值，因此單獨分離實際平台位移與面鏡形貌將在以下做一介紹，當平台移動時本身可視為剛體運動，由於共平面平台有兩組干涉儀與視準儀，因此平台移動時所造成的 Yaw 角度變化，兩個視準儀所測得數值應該相同，然而因為面鏡本身具有本身形貌變化，造成量測並非完全同動。藉由上述想法，只要固定單一方向的運動，造成一長條鏡僅固定一點反射，並未有面鏡形貌造成誤差影響，而同時另一長條鏡則在運動過成完整反射面鏡形貌並由自動視準儀測得，藉此將可以分離面鏡誤差。例如：X 方向運動，並固定特定位置的 Y 不動，就可以測得 Y 方向的長條鏡面鏡誤差變化，然而自動視準儀所量得的僅是由面鏡形貌變化所造成的角度變化，因此需要轉回面鏡形貌誤差。根據 2006 年由 Polytechnique Montréal 的 Onat Ekinici 和 JRR Mayer 所提出，裡面利用數學的運算方法找出角度變化與直度關係，因

此兩面鏡誤差 $M_x(y)$ ， $M_y(x)$ 的關係式應為(4-4)和(4-5)：

$$M_y(x) = \int [\varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(x)] dx \quad (4-4)$$

$$M_x(y) = \int [\varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y)] dy \quad (4-5)$$



因此我們可以藉由積分回推面鏡形貌關係。而面鏡反射造成的誤差應為具有重複性的，因此本研究首先測量面鏡誤差於不同的位置之結果，如圖 4.3 所示，面鏡誤差趨勢並未因為位置不同而有所改變，且換算出來的面鏡形貌誤差如圖 4.4 所示，多次量測誤差範圍在 10 nm 之下，應為容許範圍，故以此換算為面鏡形貌誤差。

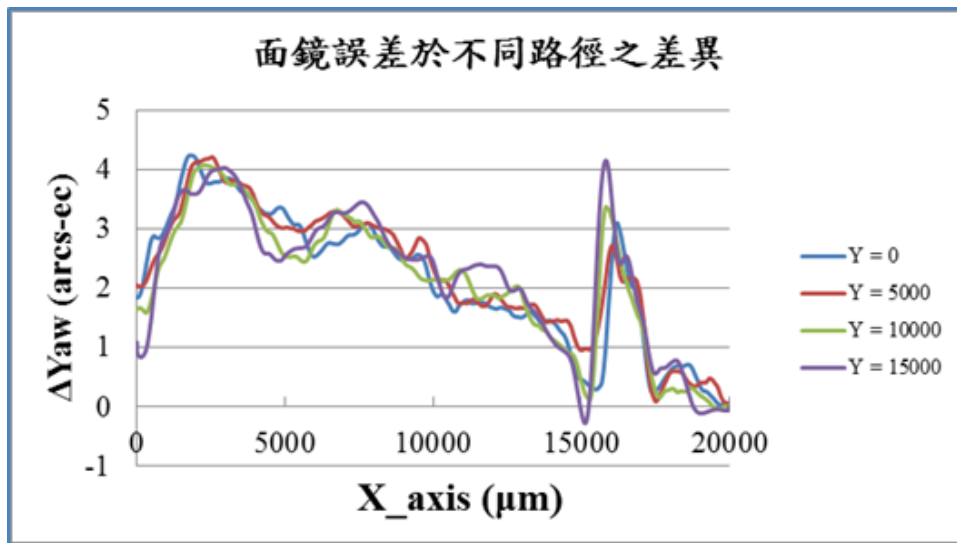


圖 4.3 面鏡誤差於不同位置的角度變化

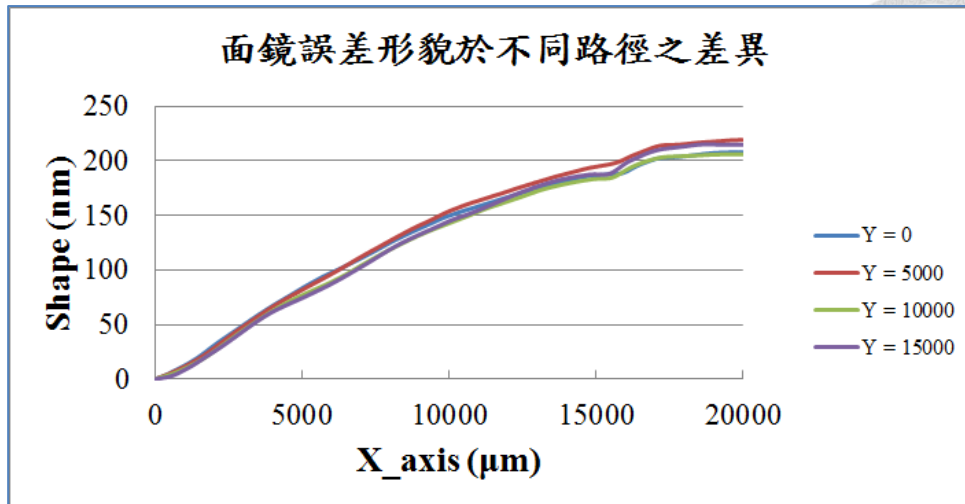


圖 4.4 面鏡誤差形貌圖

4.2 光程差

由(4-1)與(4-2)得知反射鏡偏擺造成的光程差同樣影響到干涉儀在量測位移的實際值，因此針對偏擺所產生的光程差在以下做一介紹分析。(4-1)中的 $\Delta L_x(pitch, yaw)$ 係因 X 軸長條反射鏡因偏角所產生的 X-干涉儀光程差 $L_x - L_0$ ，為 $(x, \varepsilon_y(x), \varepsilon_z(x))$ 的函式， L_0 為長條反射鏡無偏角時的理想光程， L_x 為長條反射鏡有偏角時的實際光程。依下圖 4.5 反射鏡偏擺產生光程差示意圖的幾何關係， $\Delta L_x(pitch, yaw)$ 可表示如下

$$L_x = L_0 \left(\sqrt{1 + \tan^2(2\varepsilon_y(x)) + \tan^2(2\varepsilon_z(x))} \right) \quad (4-6)$$

$$\Delta L_x(pitch, yaw) = L_x - L_0 = L \times \left(1 - \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \tan^2(2\varepsilon_y(x)) + \tan^2(2\varepsilon_z(x))} \right)} \right) \quad (4-7)$$

同理，因 Y 軸長條反射鏡因偏角所產生的 Y-干涉儀光程差 $\Delta L_y(pitch, yaw)$ ，可表示如下：

$$\Delta L_y(\text{pitch}, \text{yaw}) = L_y - L_0 = L \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2(2\varepsilon_x(y)) + \tan^2(2\varepsilon_z(y))}} \right) \quad (4-8)$$

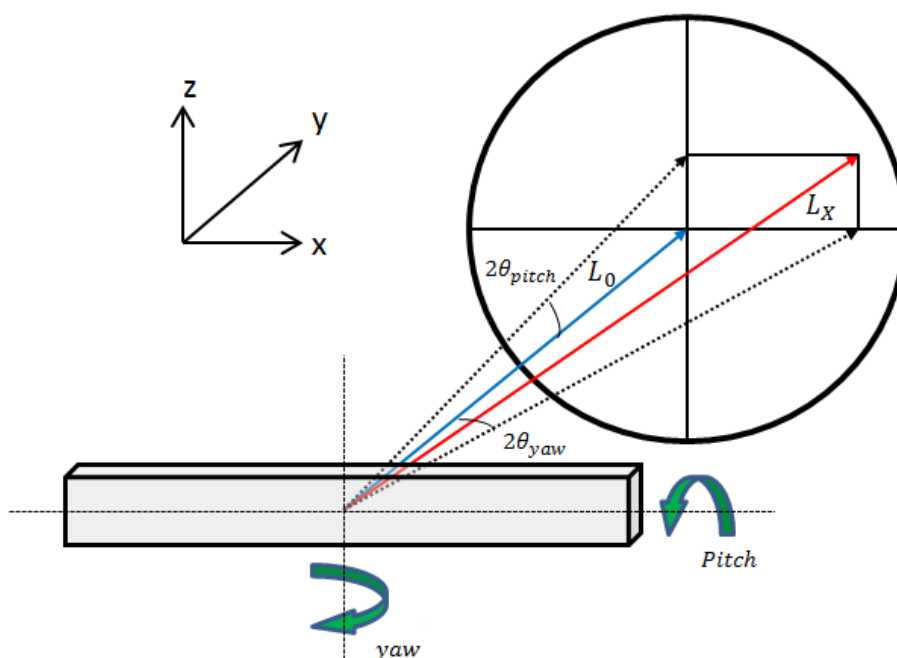
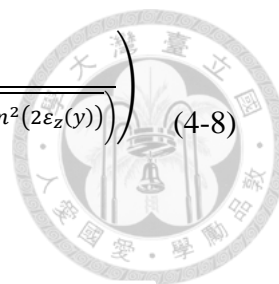


圖 4.5 反射鏡偏擺產生光程差示意圖

但實際 Pitch 和 Yaw 的偏擺角度都在 $20''$ 以下，假設共平面平台的 L_0 最大約 20mm 代入(4-7)、(4-8)可知 ΔL 約為 0.2 nm ，故(6.1)、(6.2)式中因反射鏡面偏擺產生的光程差影響可忽略。

4.3 阿貝誤差

但是當考慮入三軸空間中的誤差，就需開始計入 Z 軸阿貝誤差與垂直度誤差的影響。阿貝誤差的產生是由於量測軸與待測物軸線存在一阿貝偏位，量測時又有角度誤差的產生，因此量測結果存在一阿貝誤差，測軸與待測物軸線之偏位即阿貝臂，最常見具有阿貝誤差之量具為游標卡尺，消除誤差最常見的方法是使量測軸與待測物軸線重合，如同分厘卡的設計；或是將角度減小也能夠把量測時的

阿貝誤差降低。

共平面平台在移動時會有俯仰角與偏擺角變化，雖然 CMM 在組裝時符合三維座標 Abbe 原理，但當 Z 軸高度改變時會具有 Pitch 方向阿貝臂而產生阿貝誤差，平台角度可利用多自由度量測系統得到，阿貝臂因麥克森光軸被平面反射鏡阻擋無法明確定義，本章節將以 2013 年台大精密量測實驗室鄒旻君所提出的方法[47]，精準地將阿貝誤差補償消除。

4.3.1 定位誤差找阿貝臂

首先進行共平面平台 X 軸定位誤差實驗，先利用 QPD 進行雷射干涉儀光軸校準，校正完成後進行移動平台的定位控制，每 1 mm 定位一次移動，定位誤差結果消除掉線性的餘弦誤差之後剩下的非線性誤差即為角度造成的阿貝誤差。如圖 4.6 所示，雷射干涉儀在架設時高度沒有與 MDFMS 在同一高度上而造成一阿貝偏位 L_z ，所以平台的俯仰角 ε_y 將會造成雷射干涉儀讀值包括阿貝誤差 δ 。

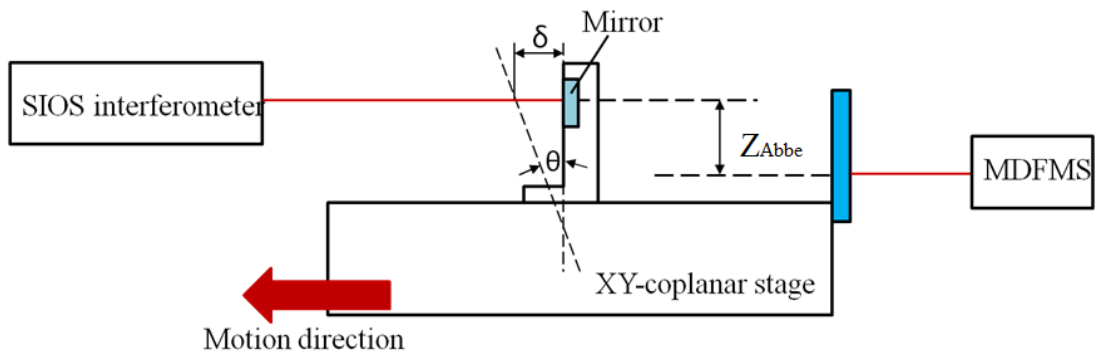


圖 4.6 利用定位誤差求阿貝臂

如圖 4.5 反射鏡偏擺產生光程差示意圖 所示，定位誤差包括餘弦誤差與阿貝誤差，消除線性的餘弦誤差後誤差 E 為已知，平台俯仰角 Pitch 也為已知，即可求得阿貝偏位 L_z 。實驗結果如圖 4.7 所示，在未補償阿貝誤差前定位誤差在 700 nm 的區間內，補償完落在 40 nm 區間內，阿貝偏位為 9.08 mm，將阿貝偏位準確求到數十微米，則對於系統造成之阿貝誤差僅數奈米。而 Y 軸阿貝誤差也以相同的方法，補償後殘差也落在 40 nm 區間內，阿貝偏位為 9.13 mm。

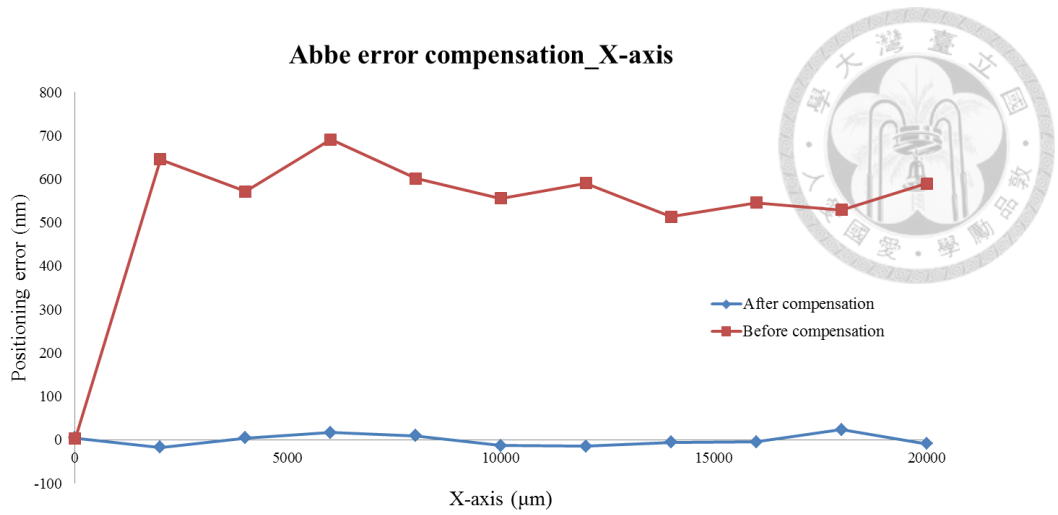


圖 4.7 X 軸阿貝誤差補償殘差比較圖

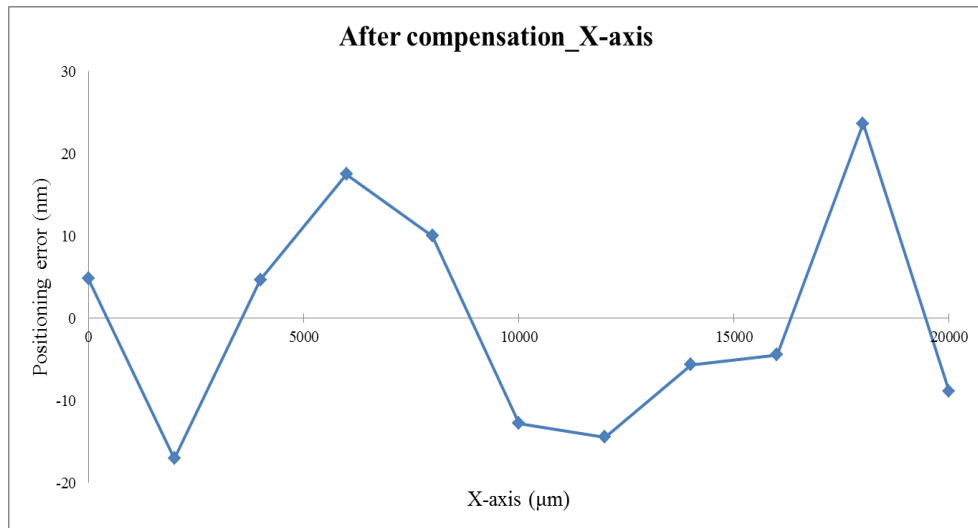


圖 4.8 X 軸阿貝誤差補償殘差圖

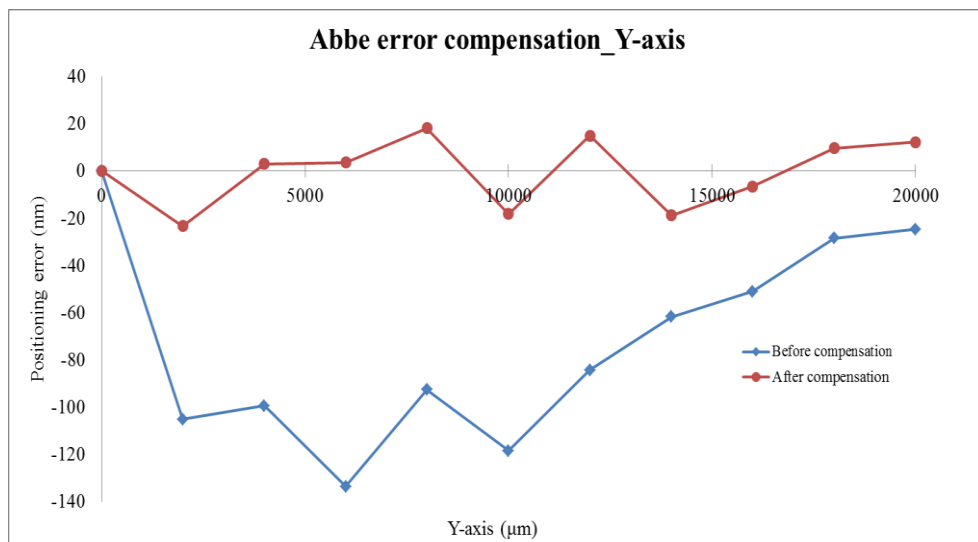


圖 4.9 Y 軸阿貝誤差補償殘差比較圖



4.3.2 探頭與光軸校準

利用定位誤差求得阿貝臂 L_z 實際上為麥克森光軸與 SIOS 雷射干涉儀光軸之距離，但在補償 CMM 阿貝誤差時，阿貝偏位應是隨著 Z 軸高度變化而變化的探頭至麥克森光軸之距離，探頭球心與雷射光對準由於球頭尺寸較小無法用力聚焦面之方式校準，此小節將介紹光軸與球心之校準方式。前一小節已將兩光軸之間距離求出，只需使探頭對準 SIOS 雷射干涉儀。

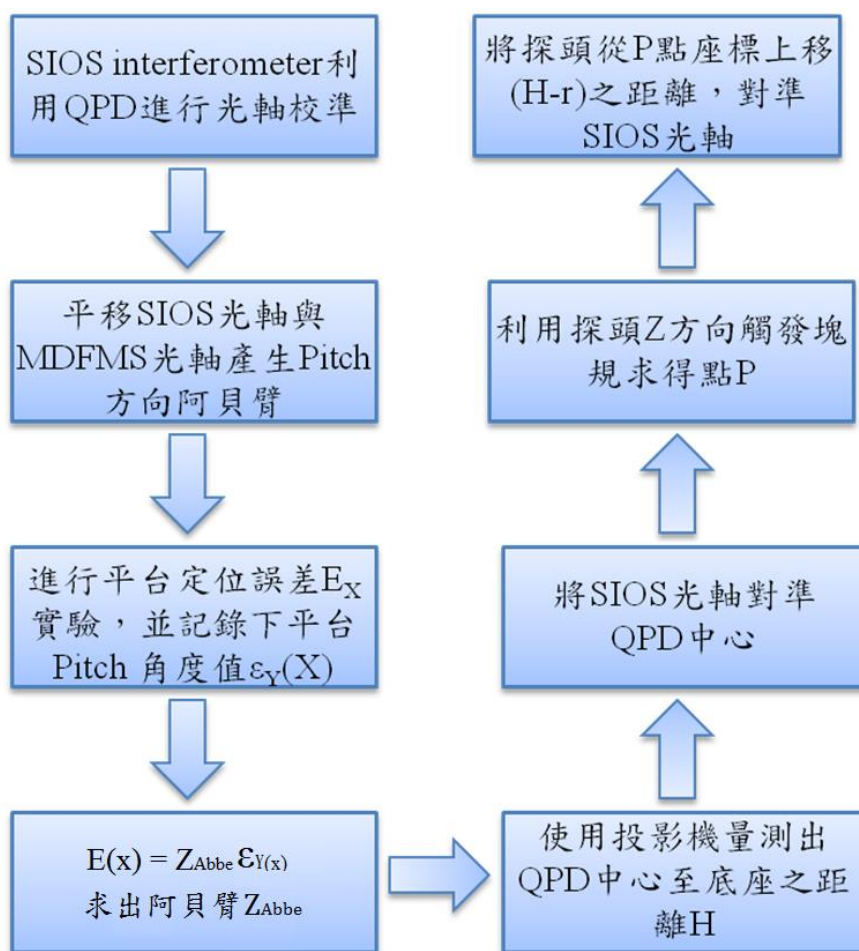


圖 4.10 SIOS 光軸校準探頭中心流程圖

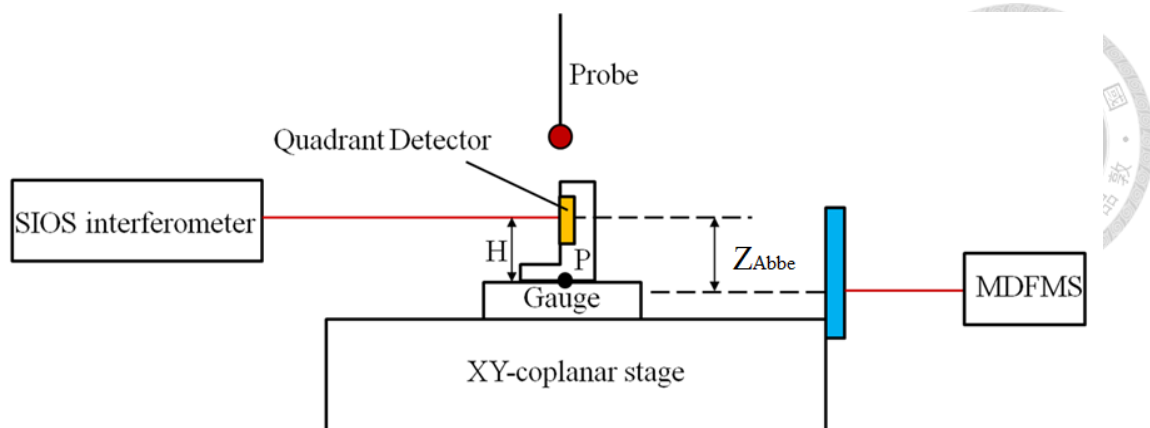


圖 4.11 SIOS 光軸校準探頭中心實驗架設示意圖

如圖 4.10、圖 4.11 所示探頭對準光軸的流程依序為先將 SIOS 光軸利用 QPD 與運動軸校準，向上平移 SIOS 光軸使其產生一 Pitch 方向之阿貝臂，接著進行定位誤差實驗求出阿貝臂 L_z ，將塊規與 QPD 固定於共平面平台上，並事先藉由光學投影機量測出 QPD 中心至夾具底部之距離 H ，SIOS 對準 QPD 中心後將 QPD 移去，利用接觸式探頭做 Z 方向觸發塊規得到點 P ，點 P 與 SIOS 光軸距離為 H ，但探頭球心與光軸之距離應為 $(H-r)$ ， r 為球頭半徑，因此要將探頭球心對準光軸需將探頭從點 P 高度向上移 $(H-r)$ 之距離，此時探頭完成與 SIOS 光軸對準之動作，即探頭與麥克森光軸具有高度為 L_z 的阿貝偏位，如圖 4.12。

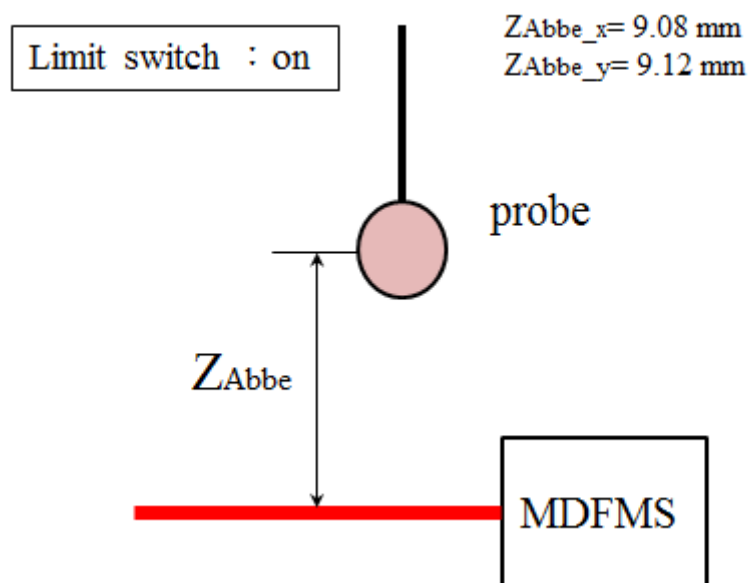


圖 4.12 實際求出兩軸阿貝臂與 MDFMS 關係



4.3.3 更換探針時求阿貝臂

CMM 為了達到更換不同長度與不同尺寸探頭的需求，探頭系統上之探針與懸浮片機構是以螺紋的方式固定，但是在更換不同長度與不同尺寸的探頭時阿貝偏位會隨著改變，因此需要經過校準的動作找到新的阿貝偏位與 Z 軸高度之關係，但不必再利用 SIOS 雷射干涉儀做定位誤差求阿貝臂如此繁瑣之過程。如圖 4.11 所示當從探頭 1 更換至探頭 2 時，可以利用塊規先後做 Z 方向觸發來得到新的阿貝偏位，探頭 1 距離塊規之距離為 $H1$ 阿貝偏位為 $L1$ ，探頭 2 距離塊規之距離為 $H2$ 阿貝偏位為 $L2$ ，其中 $L2$ 為更換探頭後之偏位是未知，但可由圖 4.13 得知 $L2=L1-(H1-H2)$ 。藉由此簡單的校準流程可準確地得知新探頭與麥克森光軸之阿貝偏位，以利後續系統阿貝誤差之補償消除。

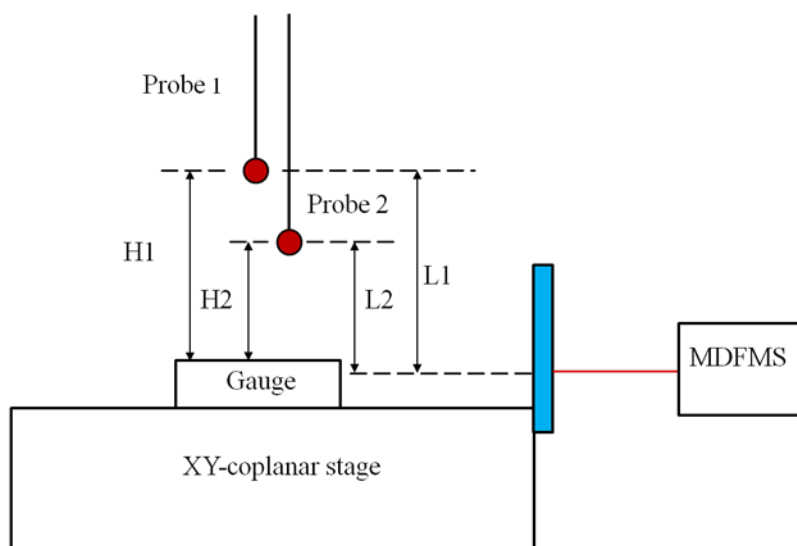


圖 4.13 更換不同長度探頭時阿貝臂修正

4.4 垂直度

在組裝 Micro-CMM 時皆符合三維座標 Abbe 原理，共平面平台兩軸垂直度也經過調整校正，但是 Z 軸與共平面平台之間的垂直度並沒有經過量測校正，使垂直度成為造成量測誤差的多項原因之一，因此規劃一實驗分別測量出 ZX 軸與 ZY 軸之垂直度，並將實驗結果後續利用軟體方式做補償消除。

本實驗設計 2013 年由台大精密量測實驗室鄒旻君所提出[47]。量測垂直度首

先如圖 4.14 所示，先調整運動軸與 SIOS 雷射光同軸，接著架設打入五角稜鏡內形成夾角 90° 垂直光，接著將 QPD 安裝在 Z 軸上並使 SIOS 雷射光入四象限內，Z 軸移動全行程 6 mm，當 Z 軸與平台垂直時 QPD 上方光點位置應固定不變，如有垂直度誤差時四象限上方光點位置應隨移動距離增加而偏移量增加，如圖 4.15。

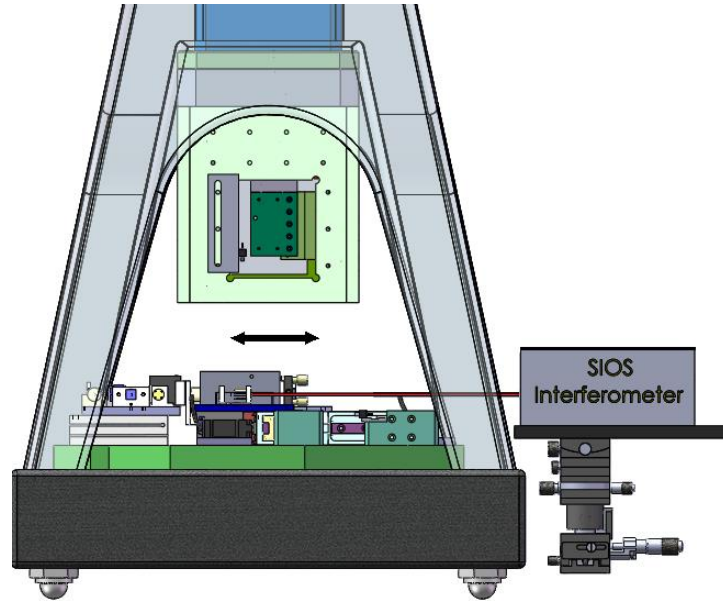


圖 4.14 平台與 SIOS 調整同軸

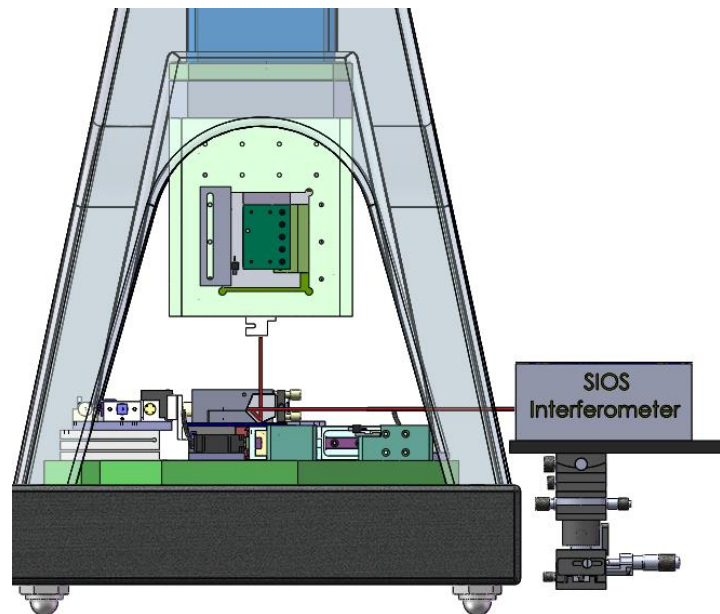


圖 4.15 垂直度量測示意圖

而兩軸垂直度數據則如下：

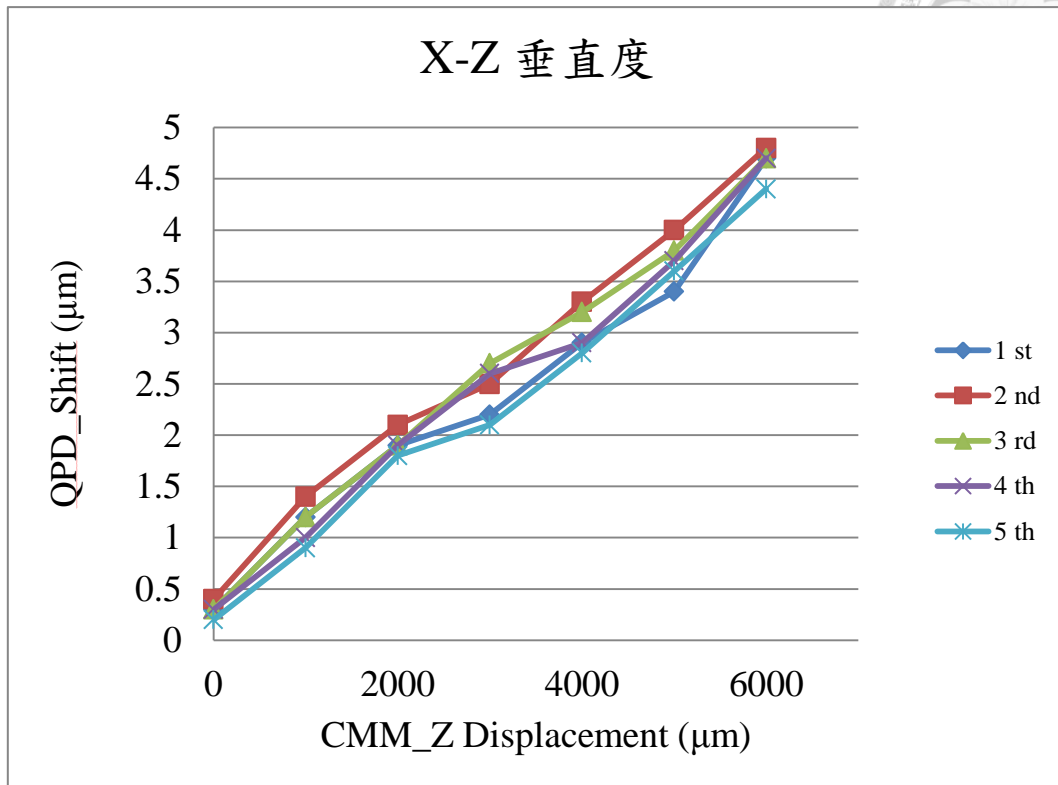


圖 4.16 X-Z 垂直度

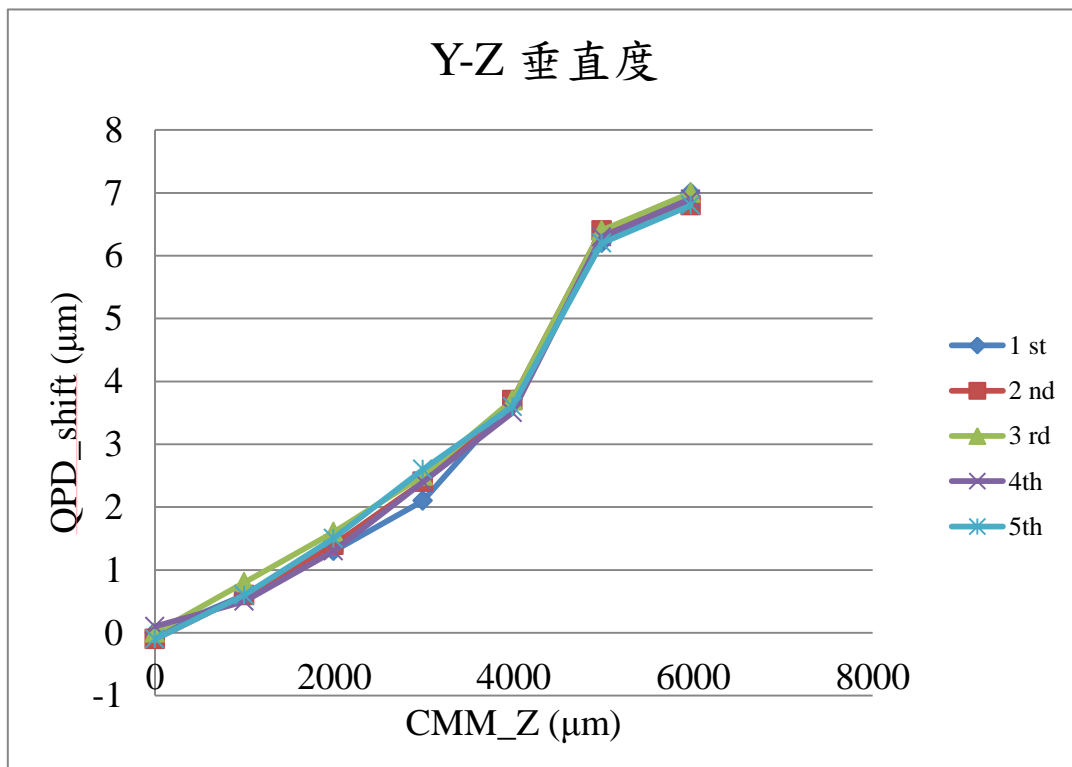


圖 4.17 Y-Z 垂直度

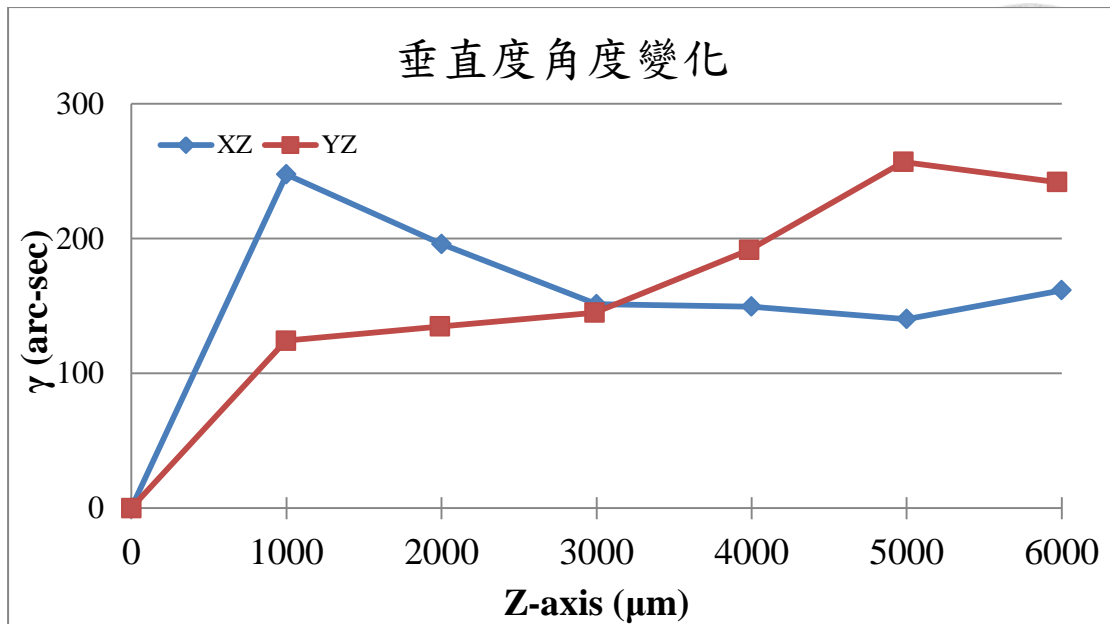


圖 4.18 垂直度角度變化

量測結果皆小於 90° ，角度變化整理後如圖 4.18 所示。如圖 4.19，三次元量測儀實際運作時，探頭移動時的垂直度造成 X 軸讀數的影響，將可藉此補正。

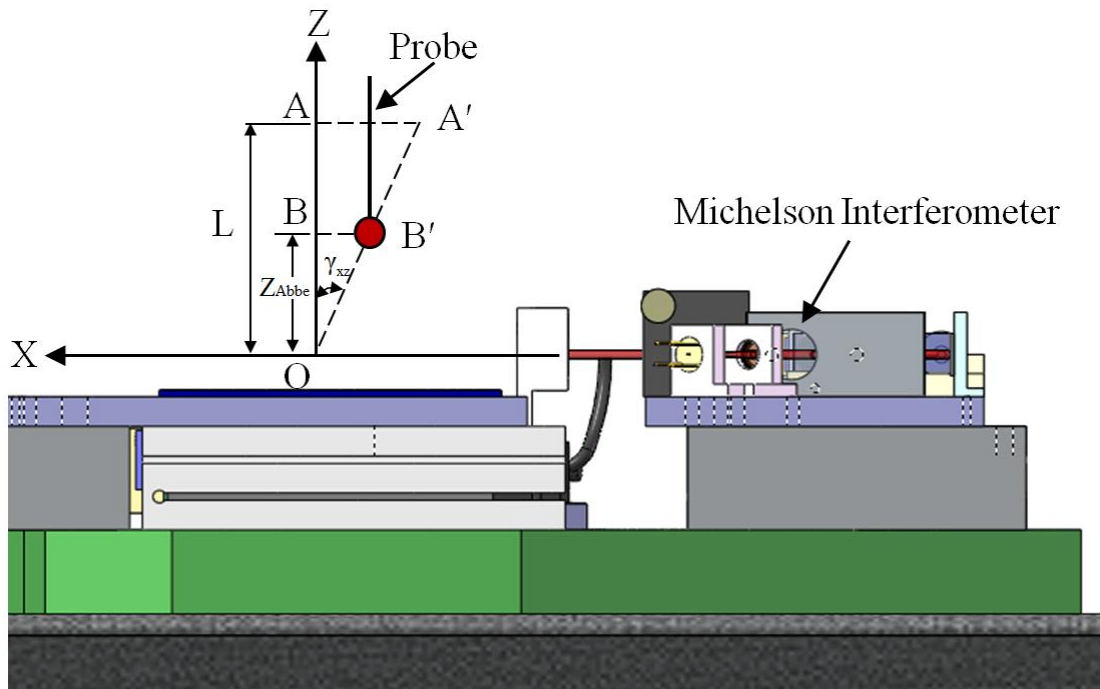


圖 4.19 垂直度誤差補償示意圖

4.5 平坦度

Micro-CMM 由於是立式主軸結構，與 SIOS 研發之 Nanopositioning and Nanomeasuring machine 三軸雷射光交於平台中心不同，又 CMM 共平面平台移動時是在鋼鋼鏟花面上滑動，若是因鏟花平面平坦度不佳所造成的平台 Z 軸方向移動系統並無法得知移動量來控制修正。因此本章節將結合 XY 兩軸垂直直線度 $\delta_y(x)$, $\delta_x(x)$ ，以平坦度 $\delta_z(x, y)$ 表示。

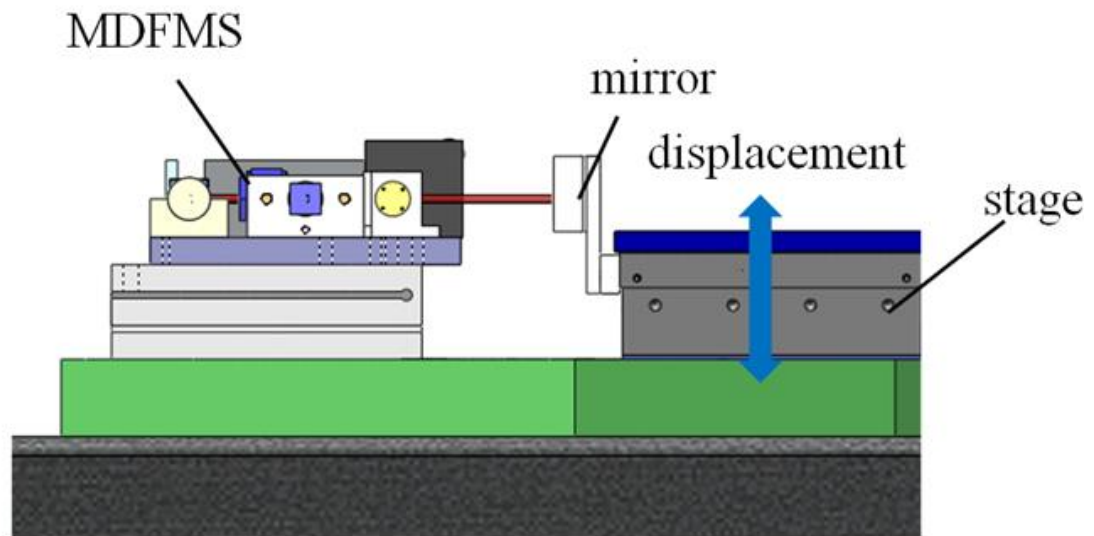


圖 4.20 平坦度示意圖

量測校正平坦度的方式為利用一平坦度良好且為已知的標準件[47]，擺放至 CMM 上操作接觸式探頭做 Z 方向觸發量測出平坦度，得到每個位置的高低起伏後用數學方法計算出最小平方面，每個點到最小平方面之垂直距離即補償值，輸入至軟體以相對於原點之方式建立補償表。此實驗量測之標準件為 Mahr 所出廠的光學平板，如圖 4.21 所示，其平坦度小於 $0.1 \mu\text{m}$ 。



圖 4.21 Mahr 光學平板

接觸式探頭利用 Z 方向觸發可得知光學平板每個位置之高度變化，藉由方格法在 CMM 上全範圍量測，X 軸與 Y 軸跨距皆為 2 mm，因此共觸發紀錄下 121 個點之高低變化，計算出各點至最小平方面之距離建立補償表，量測結果如圖 4.22，其平坦度為至最小平方方法面最高 $0.65\ \mu\text{m}$ 與最低 $-0.53\ \mu\text{m}$ 之距離，平坦度為 $1.18\ \mu\text{m}$ ，將其各點高底利用 Matlab 軟體繪製成平坦度圖，如圖 4.22 所示，量測時座標方向依照 CMM 座標而定，因此平坦度 $\delta_z(x,y)$ 結果如表 6。

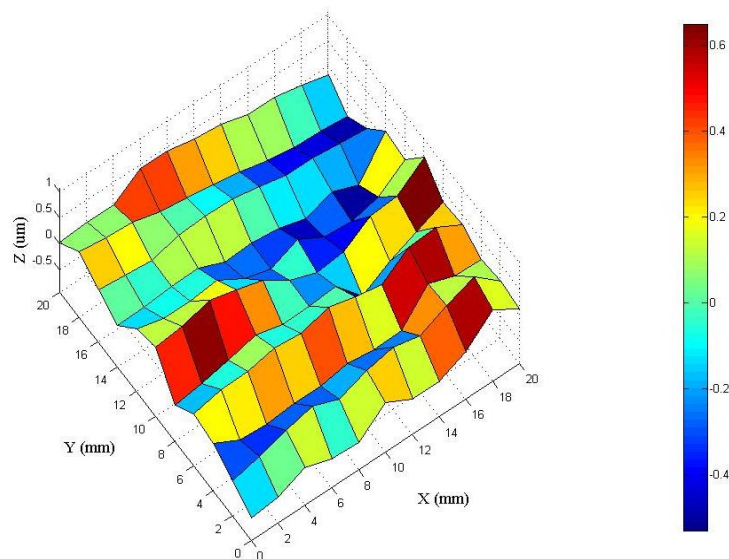


圖 4.22 光學平板平坦度

表 6 光學平板平坦度量測(單位: μm)



-0.16	-0.48	-0.24	0.19	0.11	0.65	0.25	0.3	0.11	0.17	0.12	20
-0.02	-0.43	-0.19	-0.51	-0.26	0.24	0.02	0.59	0.13	0.59	0.43	18
0.08	-0.4	-0.13	-0.29	-0.39	0.19	-0.2	0.55	0.32	0.39	-0.04	16
0.1	-0.32	-0.11	-0.47	-0.35	-0.16	-0.53	0.16	-0.24	0.14	-0.27	14
0.26	-0.19	0	-0.31	-0.05	-0.22	0	0.28	-0.26	0.26	-0.26	12
0.31	-0.09	0.12	-0.26	-0.28	-0.02	-0.04	0.41	-0.19	0.15	0.01	10
0.42	0	0.12	-0.28	-0.13	0.32	-0.06	0.25	-0.28	-0.05	-0.41	8
0.42	0.06	0.1	-0.06	0.18	0.47	0.08	0.31	-0.28	0.15	-0.39	6
0.07	0.2	-0.05	-0.08	0.12	0.62	-0.06	0.21	-0.33	0.03	-0.22	4
0.07	0.25	0.01	-0.14	0.13	0.46	-0.17	0.2	-0.3	-0.14	-0.45	2
0.02	0.32	0.07	-0.14	0.27	0.4	-0.24	0.07	-0.03	-0.27	-0.51	0
20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0	Y X



4.6 三次元體積誤差求實際座標

經過上述各節整理與實驗數據，將可以分析 MDFMS 讀值與實際座標點關係，並且逐步代入補償的結果。

4.6.1 X-Y 共平面平台分析

首先僅考慮 XY 共平面平台移動，從座標原點移到(x,y)位置時：

X 軸雷射干涉儀讀值：

$$L_x(x, y) = x + \delta_x(y) + M_x(y) - y\gamma_{xy} \quad (4-9)$$

Y 軸雷射干涉儀讀值：

$$L_y(x, y) = y + \delta_y(x) + M_y(x) \quad (4-10)$$

因此可求得共平面平台移動雙軸時，實際座標點 $P(P_x, P_y)$ 為：

$$P_x = x + \delta_x(y) - y\gamma_{xy} = L_x(x, y) - M_x(y) \quad (4-11)$$

$$P_y = y + \delta_y(x) = L_y(x, y) - M_y(x) \quad (4-12)$$

由此可得知，符合阿貝原則的共平面平台只需要在讀值上扣除面鏡誤差，X 及 Y 軸雷射干涉儀讀值已包含直線度與垂直度誤差，毋須再做補償。

4.6.2 X-Y-Z 三次元座標量測儀分析

CMM 在 Z 軸移動時會有阿貝誤差的影響，阿貝誤差的產生是由於量測軸與待測物軸線存在一偏位，量測時又有角度誤差的產生，因此量測結果存在一阿貝誤差。共平面平台在移動時會有俯仰角與偏擺角變化，雖然 CMM 在組裝時符合三維座標 Abbe 原理，但當探頭 (Z 軸) 在量測不同物件時，高度變化會有 Pitch 方向阿貝臂而產生阿貝誤差。而當探頭在 Z 高度量測工件時，共平面平台的阿

貝誤差及 Z 軸與共平面平台的垂直度誤差都會影響實際量測點的位置。(4-1)和(4-2)中的最後一項光程差影響因很小可以忽略。因此，CMM 三軸移動到空間 P 點(x, y, z)時，X 及 Y 軸雷射干涉儀的讀值同(4-9) 和(4-10) (4-10)兩式，Z 軸 LDGI 的讀值只顯示 z 高度位置同(4-3)所示。因此 P 點實際座標(P_x, P_y, P_z)在空間處的實際位置可由下三式表示：

$$P_x(x, y, z) = x + \delta_x(y) + \delta_x(z) + M_x(y) - y\gamma_{xy} + z\gamma_{xz} + Z_{Abbe_x}\varepsilon_y(x) \quad (4-13)$$

$$P_y(x, y, z) = y + \delta_y(x) + \delta_y(z) + M_y(x) - z\gamma_{yz} + Z_{Abbe_y}\varepsilon_x(y) \quad (4-14)$$

$$P_z(x, y, z) = z + \delta_z(x) + \delta_z(y) \quad (4-15)$$

代入(4-9)，(4-10)和(4-3)，且在前面章節建立了座標原點與阿貝臂之關係，

將可得：

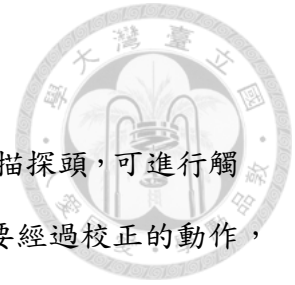
$$P_x(x, y, z) = L_x(x, y) - M_x(y) + Z_{Abbe_x}(z)\gamma_{xz} + Z_{Abbe_x}\varepsilon_y(x) \quad (4-16)$$

$$P_y(x, y, z) = L_y(x, y) - M_y(x) + Z_{Abbe_y}(y)\gamma_{yz} + Z_{Abbe_y}\varepsilon_x(y) \quad (4-17)$$

$$P_z(x, y, z) = L_z(z) + \delta_z(x) + \delta_z(y) = L_z(z) + \delta_z(x, y) \quad (4-18)$$

因此利用兩軸 MDFMS 與 Z 軸 LDGI，將可推導出空間中實際位置點 $P(P_x, P_y, P_z)$

Chapter 5 接觸式探頭



Micro-CMM 配合國立台灣大學黃兆民[44]研發之接觸式掃描探頭，可進行觸發與掃描兩種不同模式的量測，但是任何儀器在使用之前都需要經過校正的動作，探頭安裝於 CMM 上時也必須知道探頭訊號與球心位置的相對關係，可由當探球接觸工件表面而產生空間上的位移時麥克森位移計量測懸浮片三點之位移變化，經過校正轉換矩陣得到球心位置。依序在本章節介紹探頭矩陣校正、掃描量測應用與平坦度量測。

5.1 探頭矩陣校正

5.1.1 探頭矩陣定義

表示探頭架設於 Micro-CMM 機台時的校正方向，A、B、C 分別表示麥克森位移的量測訊號，校正的目的在於找出變數 A、B、C 與球心座標 X、Y、Z 的關係，假設此關係為線性關係，可由一校正矩陣 $T_{3 \times 3}$ 將訊號向量 $U_{3 \times 1} = (A, B, C)^T U_{3 \times 1} = (A, B, C)^T$ 轉換成球心座標向量 $V_{3 \times 1} = (X, Y, Z)^T$ ，如(5-1)所示 $V_{3 \times 1} = (X, Y, Z)^T$ 。換言之，探頭須經由校正程序後確認矩陣 T 的九個元素，以便後續量測時可以隨時計算出球心位置，如(5-2)所示。

$$V_{3 \times 1} = T_{3 \times 3} U_{3 \times 1} \quad (5-1)$$

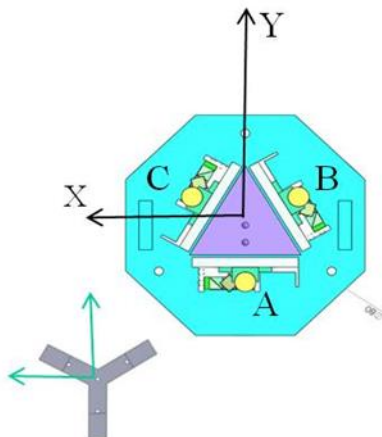


圖 5.1 探頭方向與校正方向示意圖



$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}$$

(5-2)

一般在校正時，因 T 矩陣有九個元素，故至少需要校正三個方向才能透過線性代數的方法找出校正矩陣 $T_{3 \times 3}$ 。由於校正過程中可控的變數為球心向量 V，可利用 Micro-CMM 機台給予球心 X、Y、Z 方向的位移，並同時記錄三個麥克森干涉儀的位移變化，即可得知 $S_{3 \times 3}$ 矩陣的各項元素，如(5-3)所示

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

(5-3)

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(5-4)

$$\begin{aligned}\Delta A &= \frac{\partial A}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial A}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial A}{\partial Z} \Delta Z \quad (\Delta Y = \Delta Z = 0) \\ &= \frac{\partial A}{\partial X} \Delta X = S_{11} \times \Delta X\end{aligned}$$



由(5-5)可看出，當探頭進行 X 方向校正時，並不會給予球心 Y 方向及 Z 方向的位移，此時，A 麥克森的訊號變化單純來自於 X 方向球心的位移，A 麥克森訊號對 X 方向位移的斜率即為 S_{11} ，同理，B 麥克森訊號對 X 方向位移的斜率即為 S_{21} ，C 麥克森訊號對 X 方向位移的斜率即為 S_{31} 。X 方向校正後可以得到 $S_{3 \times 3}$ 矩陣第一行的三個元素，依序完成 Y 方向及 Z 方向校正後， $S_{3 \times 3}$ 的全部元素皆可完成校正，進行反矩陣運算後，即是 $T_{3 \times 3}$ 矩陣。

5.1.2 矩陣參數校正

探頭進行校正時，球頭與待測工件保持接觸關係，以 Micro-CMM 平台驅使塊規進行單一方向位移，並且同時記錄平台座標與探頭訊號，如圖 5.2 所示。

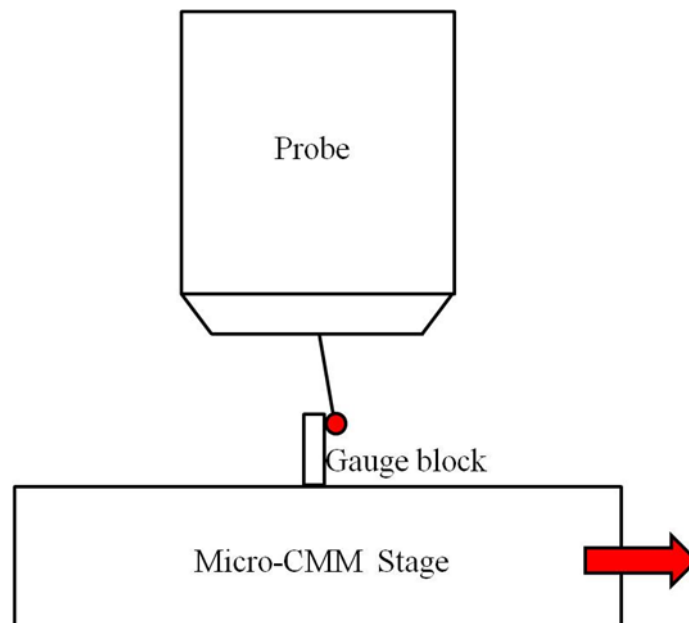


圖 5.2 探頭矩陣校正實驗示意圖

圖 5.3 為負 X 方向校正示意圖，紅色箭頭為平台移動方向，在此定義懸浮片與麥克森干涉儀靠近方向為正向，遠離方向為負向，因此 A 麥克森讀值在 10 μm 校正下幾乎沒有變化，麥克森 B 則因為懸浮片靠近而讀值增加，麥克森 C 則因為懸浮片遠離而讀值減少，圖 5.4 為探頭負 X 方向校正圖。

圖 5.5 為正 Y 方向校正示意圖，紅色箭頭為平台移動方向，麥克森 B、C 因為懸浮片靠近而讀值增加，麥克森 A 則因為懸浮片遠離而讀值減少，圖 5.6 為探頭負 X 方向校正圖。圖 5.7 為正 Z 方向校正校正圖，Z 軸連帶探頭往平台方向移動，麥克森 A、B、C 因為懸浮片靠近而讀值增加。

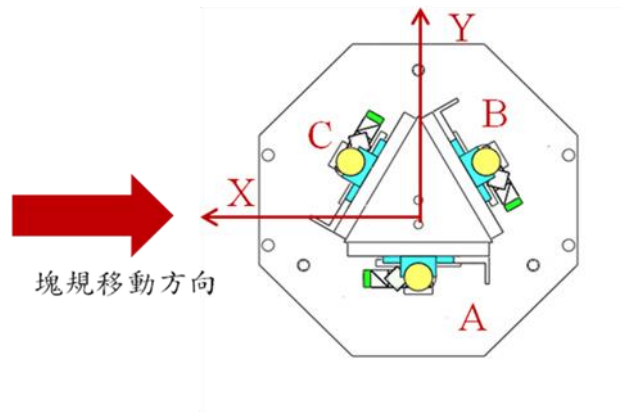


圖 5.3 探頭校正方向示意圖

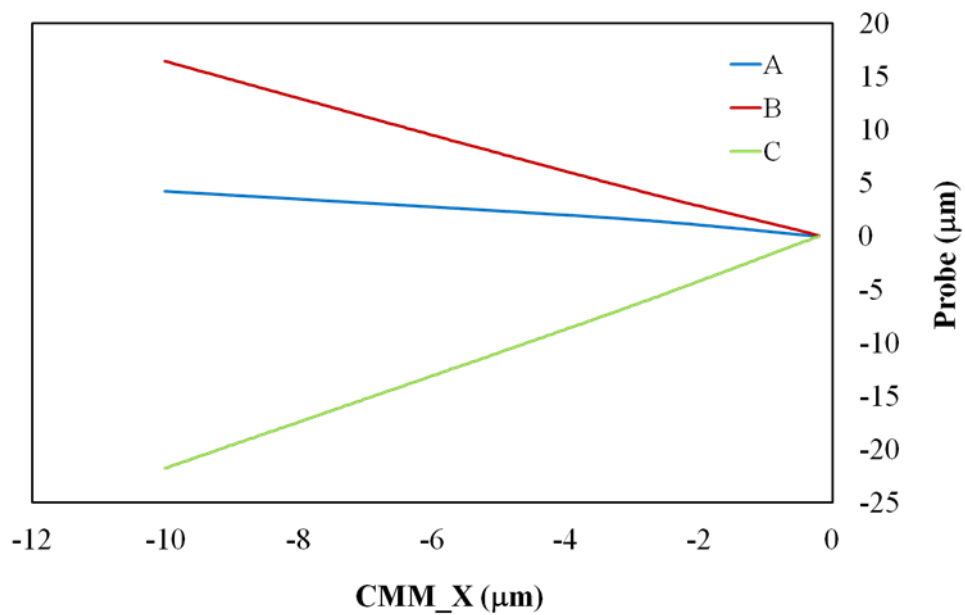


圖 5.4 探頭負 X 方向校正

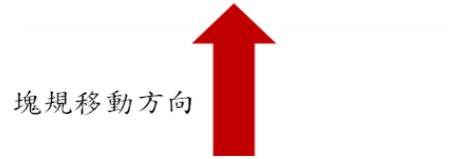
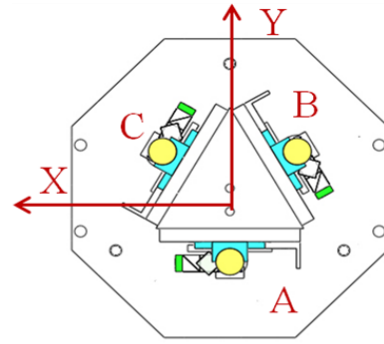


圖 5.5 探頭校正 Y 方向示意圖

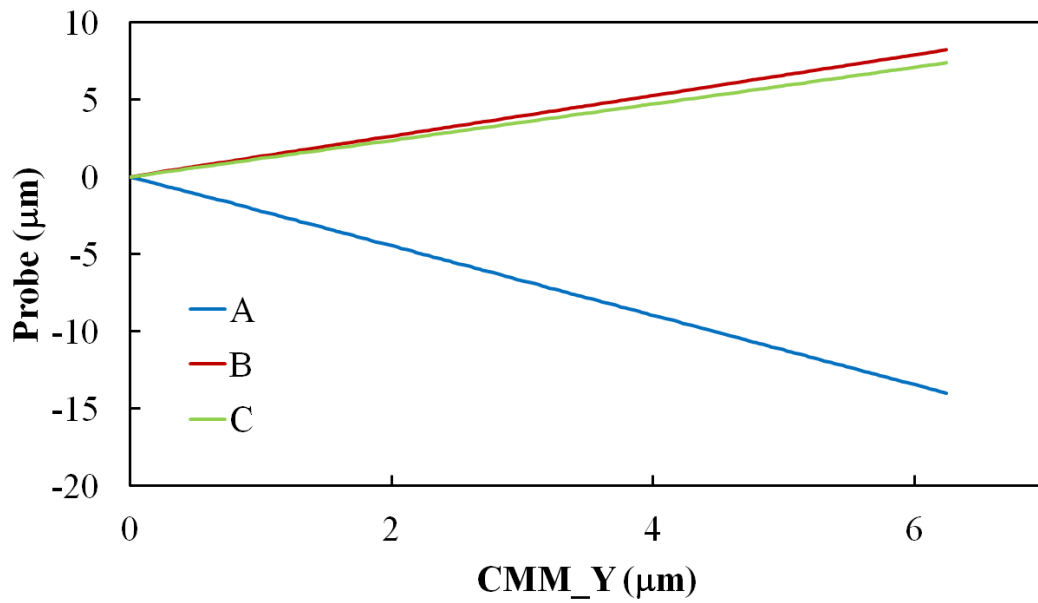


圖 5.6 探頭正 Y 方向校正

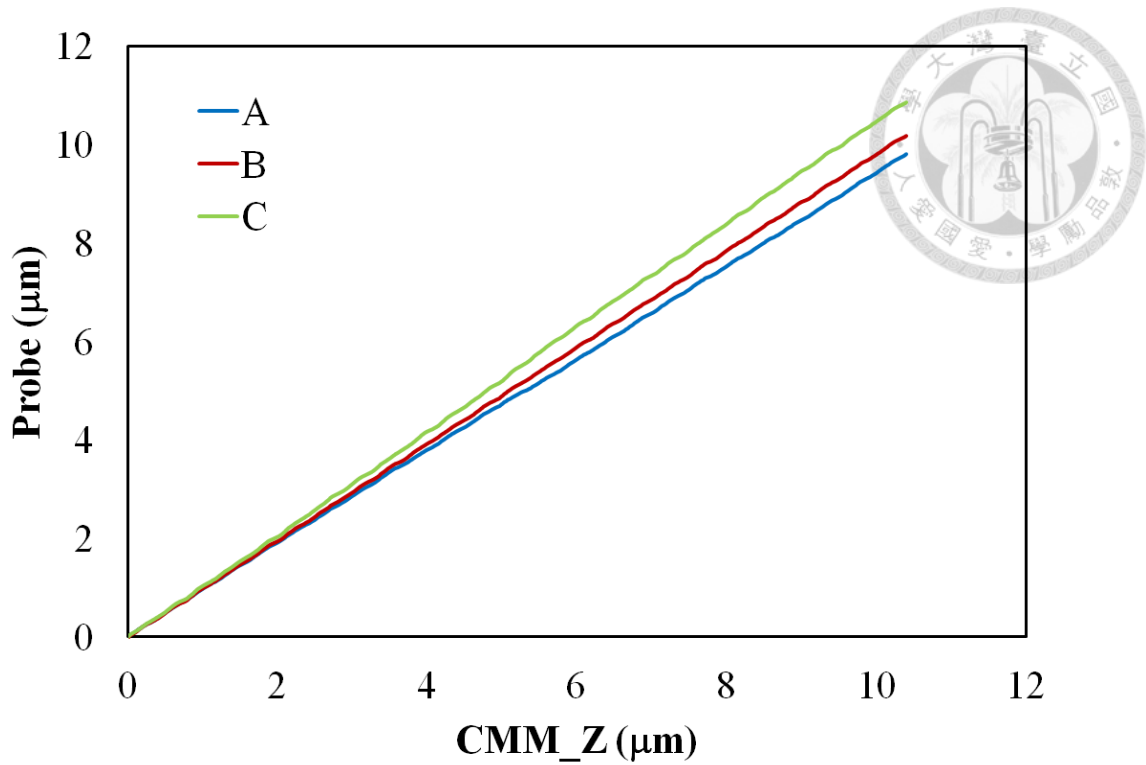


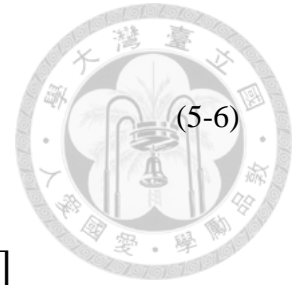
圖 5.7 探頭正 Z 方向校正

重覆進行五次實驗後，計算校正斜率及矩陣參數的重複性，表 7 為校正斜率重複性，取每次校正的平均值作為矩陣元素的依據，並且進行反矩陣運算可依序計算出 $S_{3 \times 3}$ 及 $T_{3 \times 3}$ ，如所示：

表 7 校正斜率重複性

	校正斜率(重複五次實驗)					
	A		B		C	
	AVG	STDEV	AVG	STDEV	AVG	STDEV
X	-0.134	0.0019	-1.726	0.0021	2.101	0.0214
Y	-2.187	0.0016	1.064	0.0014	1.287	0.0055
Z	0.987	0.0033	0.991	0.0027	0.980	0.0017

$$S_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} -0.134 & -2.187 & 0.987 \\ -1.726 & 1.064 & 0.991 \\ 2.101 & 1.287 & 0.980 \end{bmatrix} \quad (5-6)$$



$$T_{3 \times 3} = S^{-1}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.018 & -0.270 & 0.255 \\ -0.300 & 0.175 & 0.125 \\ 0.353 & 0.350 & 0.310 \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

$T_{3 \times 3}$ 矩陣為探頭量測時的重要參數，其數學意義在於將三個麥克森干涉儀所量測的垂直位移變化轉化為球心的位移向量，爾後量測時感測到的干涉訊號皆須透過 $T_{3 \times 3}$ 矩陣轉化成球心座標，並且輸出成 XYZ 三方向的位移量供給 CMM 軟體。

5.2 探頭探球製作

在本研究中，三次元量測儀所配備之接觸式探頭為了可以滿足高深寬比、尺寸微小等特殊需求，利用市面上光纖融接機開發製作探針尖端探球製程，並且希望達到尺寸小、接觸力小、可替換探針等需求，並希望規格可以達到：

- 真圓度 $< 1 \mu\text{m}$
- 球心對於主軸中心之偏移量 $< 1 \mu\text{m}$
- 球徑 $\cong 50 \mu\text{m}$ 等條件目標。

不論是氣體或液體，其分子間都有一短程的吸引力，對團聚的液體分子而言，其所受吸引力來自於周遭分布均勻的分子，但對於氣液分相界面的邊緣液體分子而言，液體與氣體間和液體與液體間所造成之吸引力不同，若液體間吸引力大於液氣間的吸引力，則造成液體分子合力指向液體內部造成收縮。而本實驗利用此一性質，在高溫下融融狀態使分子內聚，在尖端形成一圓球。

然而尖端所形成的圓球與光纖燒融時的母材物理特性有極大關係，而其中最直觀的部分就是光纖融燒時的直徑。然而市面上所售的光纖，在去除外層之包覆

後，最小直徑約為 125 μm ，而為了能夠燒出更小的光纖探頭尖端球，引入了光纖拉尖技術。1996 年 Williamson 等[48]，提出一套以 CO_2 雷射融拉的技術，製造出一個近場光學用的透鏡，如圖 5.8 所示，2008 年台灣大學林家佑利用光纖透過加熱將部份區域融融[49]，並在融融區域兩端施以拉力，使光纖因為內聚力的作用形成一個長且極細的尖端。故光纖拉尖技術是將光纖架於光纖融接機，並對稱的對光纖兩側施以定力，同時搭配旋轉、清潔放電強度與時間之參數調控，透過加熱將部份區域融融，並在融融區域兩端施以拉力，使光纖因為內聚力的作用形成一個長且極細的尖端，以得到一對拉細之光纖探針。因此為了達到細微光纖探球的目標，本實驗將光纖球頭之融燒分為兩大部分，光纖前端直徑拉細與尖端球頭之燒成。

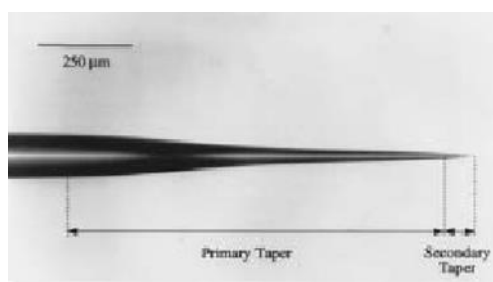


圖 5.8 雷射運用熱融拉方式製造的光纖尖端[48]

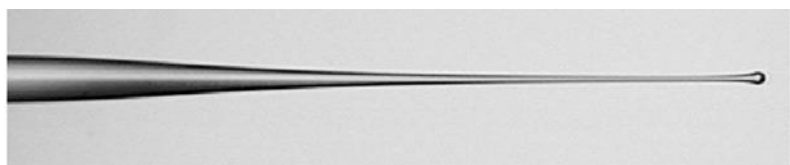


圖 5.9 拉伸後燒製之光纖球頭[49]

本實驗以市售光纖融接機作為實驗裝置，藉由光纖融接初期所使用的清潔放電功能，製作微奈米級的光纖探球，搭配具有降低重力效應之旋轉平台的光纖載具，並且使用光纖載具控制器與光敏電阻，設計一最佳實驗流程。



圖 5.10 光纖熔接設備

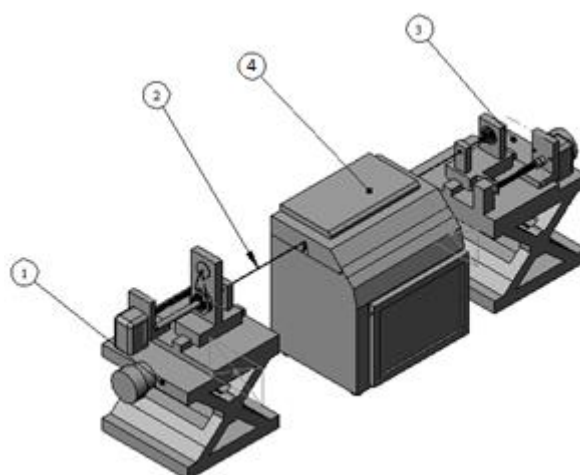


圖 5.11 設備架設模擬圖：(1)、(3)光纖載具，(2)光纖，(4)光纖熔接機

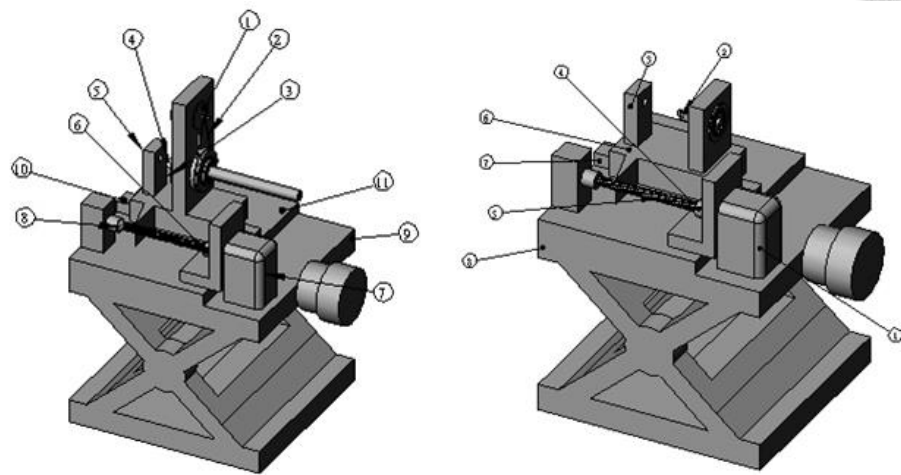


圖 5.12 (左)(右)兩側載具圖

(左)：(1)直流馬達(2)傳動皮帶(3)軸承(4)光纖夾具(5)光纖支撐座(6)聯軸器(7)步進馬達(8)螺桿(9)高度調整平台(10)滑軌(11)移動平台

(右)：(1)直流馬達(2)光纖夾具(3)光纖支撐座(4)聯軸器(5)螺桿(6)移動平台(7)滑軌(8)高度調整平台

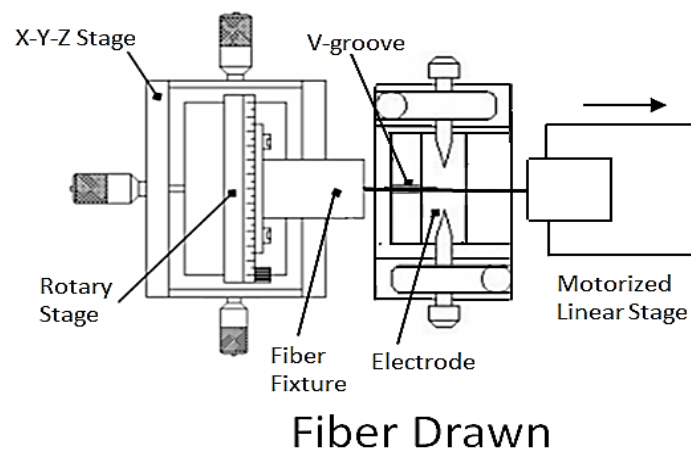


圖 5.13 光纖熔接機內部圖

5.2.1 製作流程

光纖探針拉伸：將光纖直徑拉細是引用了光纖拉尖技術，是光纖球頭燒製重要的前置步驟，需要小心的處理光纖。首先，取一段長度適宜之光纖段，將其中央需接受電弧加工段落之外層包覆去除，並用酒精溶液擦拭乾淨，裸露出乾淨之

光纖。其次，將光纖架於光纖載具上，兩端同時使用夾具固定，並將欲加工段落至於兩電極中。最後選擇適當之參數，啟動清潔放電功能，並同時啟動兩端夾具之拉伸移動與旋轉，經由適當放電與拉伸，將拉斷光纖並可得一對前端拉細之光纖。

尖端球頭燒製：將前一步驟燒好之拉細光纖，使用夾具固定於一端載具之上，同時調整好旋轉、放電強度與時間等參數。另一端則使用光纖熔接機本身固定夾，夾一小段誘發放電用之光纖，放置於方便觸發放電之位置，啟動清潔放電之功能。由於光纖熔接機本身附有固定夾，誘發放電後將會移動光纖，此時以控制器調整光纖之移動作為光纖位置之補償，在經過此程序後，將可得一燒製完成之球頭。

參數控制：在實驗過程中有許多參數可以控制，不同的參數設定會大大地影響燒出球頭的品質，為了要找到最佳之參數，運用了實驗設計的概念來有效率地找出關鍵參數並且對其加以優化。

透過實驗設計(experiment design)的方式，有效率地找出影響較大的製程參數及最佳化參數。並有助於對系統參數及其效用的了解，製作出品質穩定的光纖探球，設置光纖載具後進行探球燒製，並調整光纖熔接機及光纖載具之參數，可得到不同球徑、真圓度及球心偏移的探球。為了更了解此一系統，並製作品質穩定的光纖探球以下將逐一進行實驗設計之步驟。

藉由實驗數值分析，在拉伸光纖探針的時候，以光纖熔接機放電後快速拉伸，因此選定放電的電弧強度與拉伸速度作為製作參數，以找出此二因子與探針長度之關係；製作光纖探頭時，使用現有的設備在燒製的過程中對光纖進給、旋轉，因此，在選定製作時的參數有電弧強度、進給速度、放電時間及旋轉速度，其中進給速度與放電時間乘積之影響是光纖母材融燒的量，因此為了簡化實驗流程，進給速度將固定為不變因子僅分析放電時間。放電強度及放電時間是依照 FITEL S199S 的單模光纖熔接機內部設定作為參考，旋轉速度則是由電源供應器提供馬達的電壓作為參考依據，因此以上總計三項因子，希望找出此三項因子與探球品質的關係。

在光纖拉伸上，由於本實驗希望可以製作出直徑 50 μm 的探球，因此我們選定了拉伸後，直徑小於 50 μm 的光纖纖錐長度作為成果評斷的依據。由於一般量測光纖纖錐斷面約為 6 μm ，假設體積守恆之情況下，所列出方程式我們可以求得此一纖錐與所形成之球體積兩者之間的關係，如下圖 5.14：

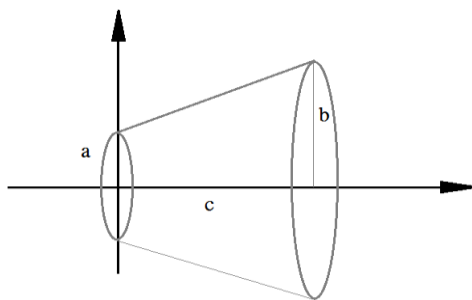


圖 5.14 體積計算示意圖

按照示意圖，纖錐體積為 $V = \frac{\pi c}{3}(a^2 + b^2 + ab)$ ，將會等於球體體積

$V = \frac{4\pi}{3}r^3$ 代入其中一組量測數據：尖端斷面直徑 $a=6\mu\text{m}$ 、粗端斷面直徑以當初所需設為 $b=50\mu\text{m}$ 、纖錐長度 $c=760\mu\text{m}$ ，解方程式可得成果球半徑約為 51.3 μm ，因此初步推估所需纖錐長度應大於 750 μm 較有助於形成理想的球頭。

表 8 拉伸實驗數據

實驗編號	放電強度	拉伸速度(mm/sec)	纖錐長度(μm)
1	10	0.3052	600
2	10	0.1526	522
3	5	0.3052	740
4	5	0.1526	650

根據實驗所拉伸的結果，放電強度較低，且拉伸速度快，可以拉出較長之纖錐。但若就個別參數下，拉伸速度所造成的影響較為明顯，且熔接機本身可調整之最低放電強度有界限，所以調整拉伸速度則為較理想的方法。根據上述結論，本實驗調整後最終選用放電強度 5，拉伸速度 1.22 mm/sec 之參數，拉伸出超過

1000 μm 之光纖纖錐。此步驟的突破是本研究重要之關鍵，因為纖錐長短將會直接影響球頭燒製的品質，過長的纖錐偏心率難以控制，過短的纖錐則使球頭直徑過大，無法達成要求。

在細微光纖球頭燒製的部分，流程是利用前一部分光纖探針拉伸的部分加以推進融燒，依融燒得之體積結成球頭，因此足夠長度的光纖探針才能夠燒結出完整的探球。而評估探球的品質上，如本研究前述所提，以探球直徑、真圓度及與探桿的偏心率做為評比。影響球頭直徑變化最初要求需要有足夠長且細的光纖母材作為融燒，而除此條件要達成外，經評估後認為影響球頭變化共有放電強度、旋轉速度、放電時間等四大項，其中進給速度與放電時間相關，主要影響的是融燒母材的量，因此本實驗將固定其為不變因子，分析旋轉速度、放電時間及放電強度所造成的影響。

本研究設計多次實驗，用以分析各因子對探球品質的影響，以下列出其中影響較為明顯者：

表 9 探球燒製數據

放電強度	放電時間	旋轉速度	直徑 (μm)	真圓度 (μm)	偏心率 (μm)
150	100 ms	5 V	25	< 1	17
200	4500 ms	12 V	320	1	< 1
230	300 ms	5 V	40	< 1	5
230	100 ms	12 V	64	< 1	3
230	500 ms	5 V	89	1	3

由實驗結果，可以推估出因子的影響：放電強度與放電時間一同影響了探球直徑，但若為了縮小球徑而降低放電強度，會造成放電過久，而探球形成不明顯，如圖 5.15 所示，因此若要燒製球頭，應該調低放電時間、維持高放電強度；而旋轉速度，則可以看出對偏心率有影響，但在低放電時間下不明顯；所以放電強

度應該屬於與另外兩項因子相依的變異因子。經過多次實驗後，利用放電強度 230，放電時間 100 ms，旋轉速度 12 V，之下，穩定製作出可以使用的探球，如圖 5.16 和表 10。



圖 5.15 探球尖端不明顯



圖 5.16 完成之光纖探球

表 10 完成之光纖探球數據表

編號	直徑 (μm)	真圓度 (μm)	偏心率 (μm)
1	38	< 1	4
2	64	1	9
3	40	1	1
4	50	1	2
5	50	< 1	5
6	50	< 1	1



探針量測主要是量測纖維的長度，取其小於 $50\mu\text{m}$ 的纖維長度來測量；而探頭量測主要是量測圓形端的幾何形狀，分別為真圓度、直徑與偏心率，前二者利用擬和圓形就可以量測，後者則是利用探桿(原線材部分)做幾何作圖，利用探桿外徑擬和一條中心線，在計算擬和圓和中心線距離，量測圓形之偏擺量。

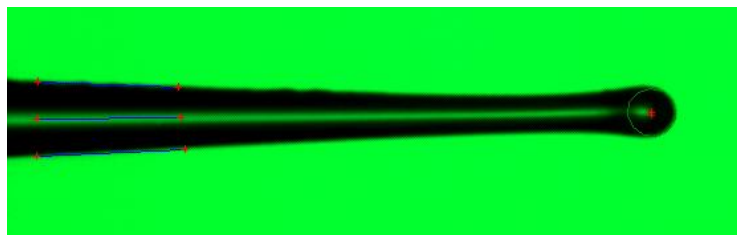


圖 5.17 量測示意圖

5.2.2 探球組裝

製成的光纖探針尺寸在微米等級，就算整體光纖桿長也僅有 $10\sim 20\text{ mm}$ 之長，若僅徒手拿取、組裝，是困難且容易出錯失準的，因此本研究利用微調座、塊規

簡易組裝成探頭微控組裝台，並架設於 2.5 D 投影儀下，組裝時僅需控制單軸微調座，僅可準確膠黏針管與探頭，如圖 5.18。



圖 5.18 探頭組裝台

拉伸與燒製的成果，其尺度皆在毫米至微米等級，量測的精度必須達到 $1\ \mu\text{m}$ 以下，因此利用智泰科技的 MUMA 的 2.5 D 投影儀對探頭做量測。

燒製完成的微小光纖探頭包含桿長僅 10~20 mm 之長，但須使其保有剛性並能安裝於探頭系統還須將探頭安裝於探針之上，如圖 5.19 所示：

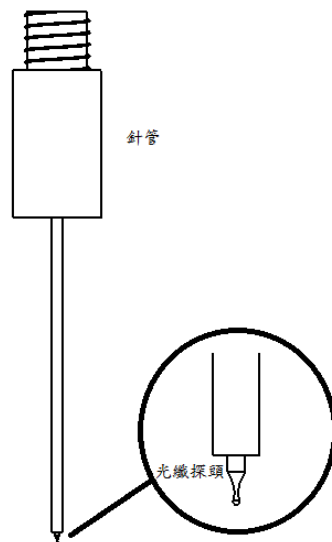


圖 5.19 探頭組裝示意圖

因此為了組裝探頭，便架設了組裝台，利用單軸微調座調整已經點上 UV 膠的光纖調整位置，定位後照射 UV 光固定探針即完成，如圖 5.20，圖 5.21 和圖

5.22。

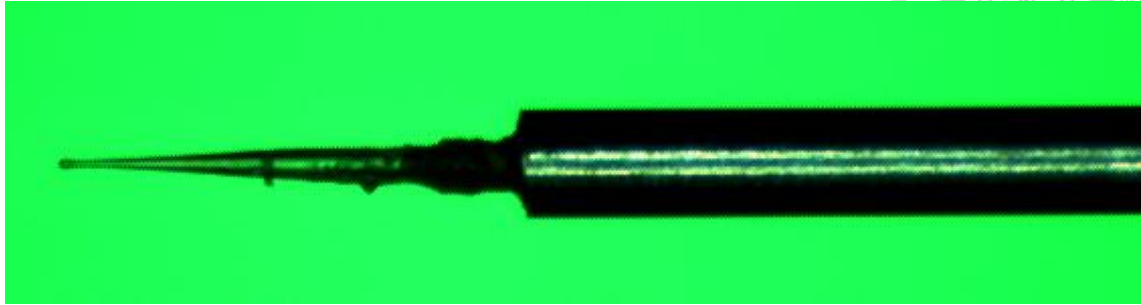


圖 5.20 上膠組裝實圖

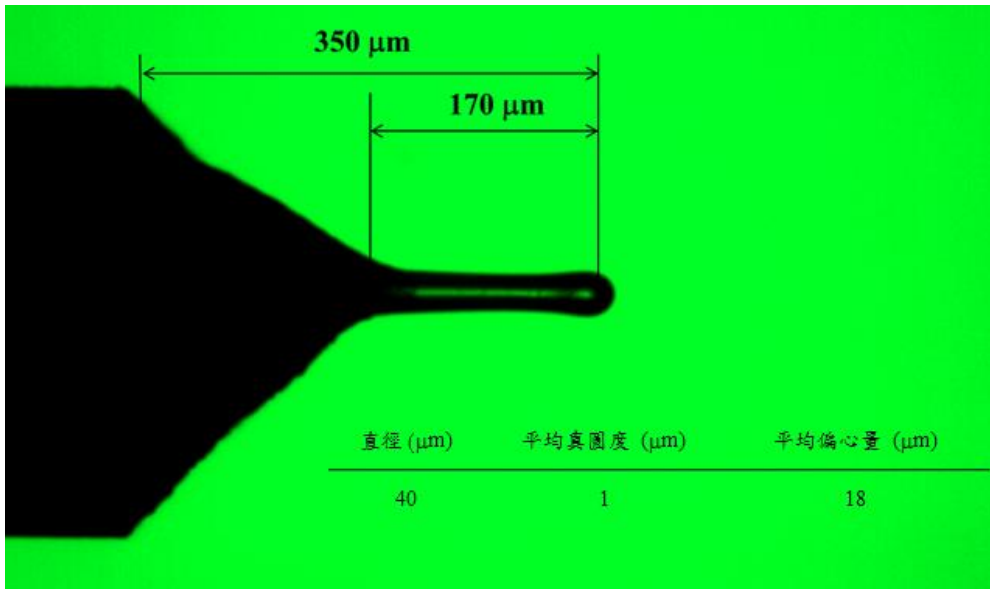


圖 5.21 組裝完成圖

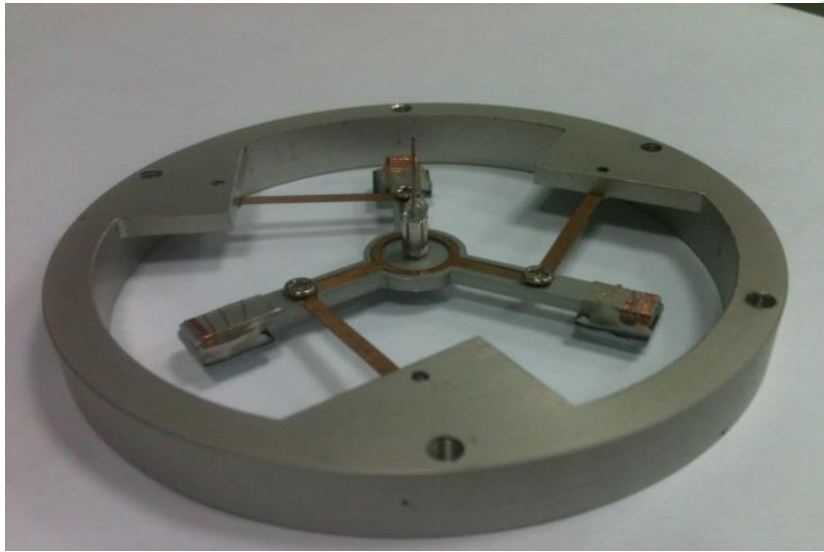


圖 5.22 組裝完成並安裝於探頭系統

5.3 探頭觸發量測

接觸式探頭可因應不同的量測條件而選擇使用掃描(Scanning)模式或觸發(Trigger)模式，觸發模式與掃描模式的最大差異點在於探球會離開工件表面後再靠近工件觸發，因此，工件表面的表面情況對量測結果會有很大的影響，環境濕度和溫度也須注意，降低表面張力對量測結果的影響。

進行過掃描實驗後校正矩陣 $T_{3 \times 3}$ 的所有元素皆已知，因此球頭受到任意方向位移時即可從三麥克森干涉儀推算出球頭的各方向位移量，考慮敏感性的因素後，選用比較正向的向量作為觸發判定的依據會使量測結果較為精準

本研究之探頭以懸浮片作為媒介，將探球伸入欲量測之工件區塊，在透過上方干涉儀量測懸浮片的三個維度用以換算球心位置，觸發點的判別如圖 5.23 所示，觸發訊號分為三個部分：接觸前近乎水平區段、表面作用力影響區段和探頭訊後線性變化區段。

1. 接觸前近乎水平區段(a)：

理論上探頭訊號在觸碰前應一固定之讀值，但受到懸浮片震動或是數位

資料擷取裝置穩定度影響，在取動態平均前會呈現某種程度跳動。若探頭架設不夠穩定，則探頭訊號在 Z 方向跳動量會比 XY 方向明顯許多，為求精準地判斷觸發點，氣場隔絕及防震措施甚為重要。



2. 表面作用力影響區段(b)(c)：

Bos 等人整理表面作用力可能的主要來源有四：凡德瓦爾力(van der Waals forces)、靜電力(electrostatic attraction)、表面張力(surface tension)和卡西米爾力(Casimir force)，此四種力合稱表面作用力，對探球及工件在很小距離時會產生相互吸引力，造成球頭被反向吸引至工件，整體訊號因而產生一折返點，此一現象造成不易判斷觸發點，因而須將此區段之訊號捨去。

3. 探頭訊後線性變化區段(d)：

前述所提及之表面作用力相當小(小於 0.3mN)，故需設定一閾值捨去表面作用力的影響範圍，過了閾值後的資料進行線性擬合，與水平區段的交點定義為觸發點(Trigger point)或零接觸力點(Zero probing force point)。

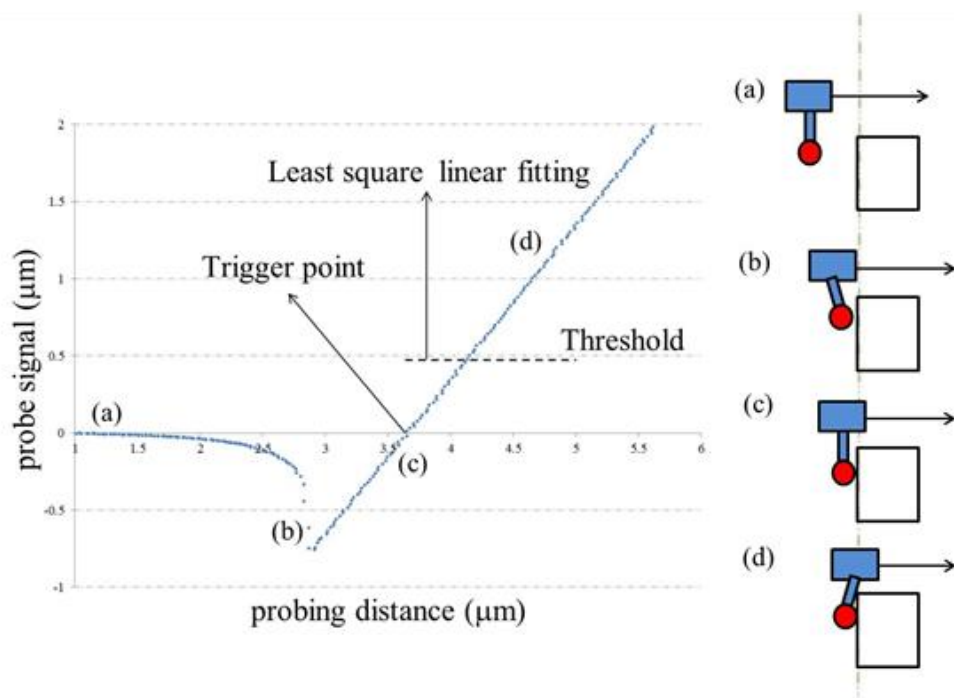


圖 5.23 觸發點判斷準則

對於觸發量測工件形貌有許多幾何量測應用，而物件形貌階高則是結合量測與後部運算的實用量測。量測階高首先需選定相對應的基礎面，並在基礎面上選

擇至少四點，並以最小平方方法建立最佳平面，取得其法向量，得平面方程式並運算，如圖 5.24。

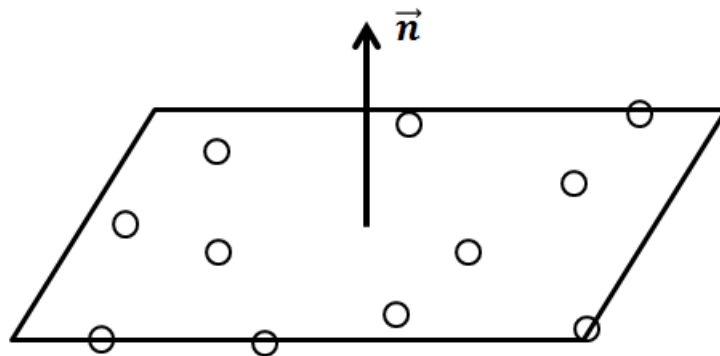


圖 5.24 量測點與最小平方平面

5.3.1 階高塊量測

國立台灣大學精密製造中心委託量測高精密階高塊，以上述方式建立最佳平面後，並計算相對應面之點到面距離：

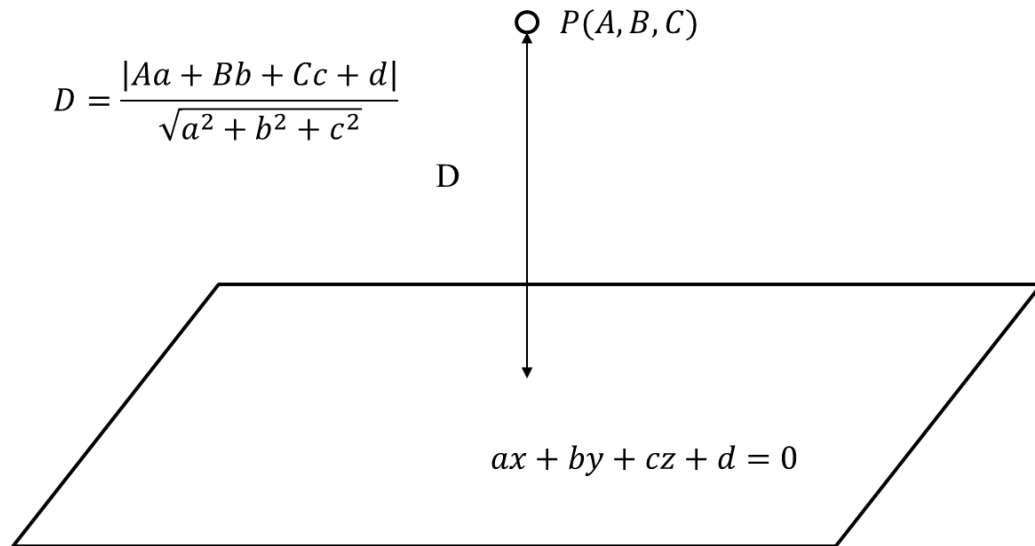


圖 5.25 點到面距離

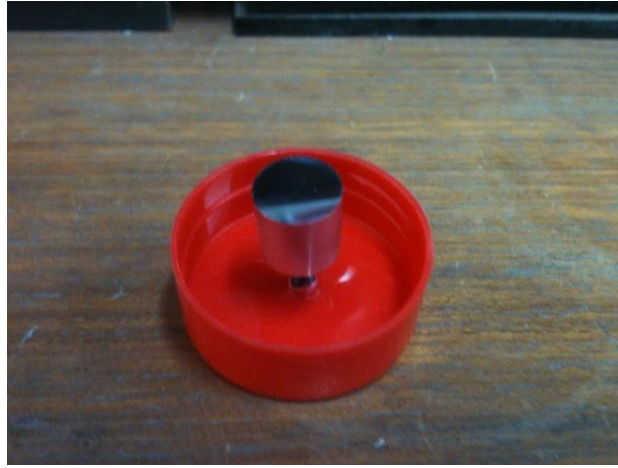


圖 5.26 階高塊

表 11 階高塊(6 μm)數據

量測值計算階高 (μm)	平均值 (μm)	標準差 (μm)
6.030	6.050	0.259
5.986		
6.001		
5.761		
6.472		

5.3.2 實驗用玻片厚度量測

台大應力所王安邦教授實驗室委託量測玻片厚度，由於試件極薄，若未固定容易彎曲，因此先以 UV 膠固定於載玻片上，同上一節以量測階高的方式測量。

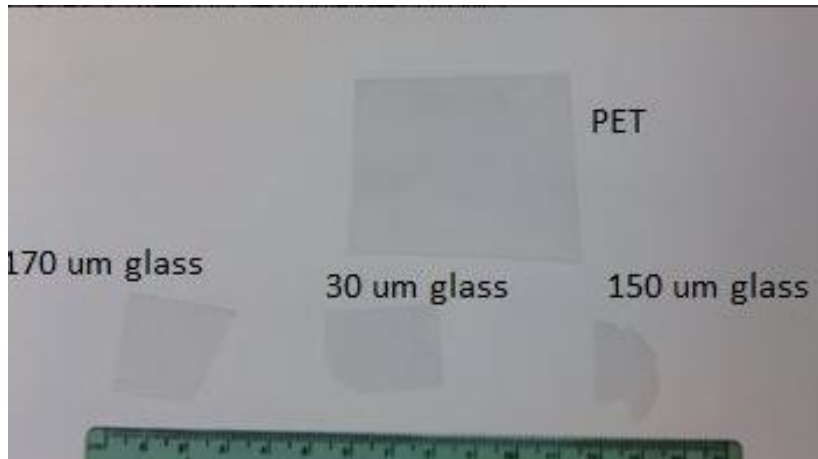


圖 5.27 王安邦教授實驗室玻片

表 12 玻片量測數據

	光學斷層 掃描 (μm)	磁力式 厚度計 (μm)	Taylor Hobson 形狀量測儀 (μm)	micro-CMM (μm)
150 μm 玻片	145.85	145.86	149.5816	151.782
100 μm 玻璃	106.83	105.81	108.8789	105.05458
30 μm 玻璃	28.36	27.17	27.1358	27.4628
PET	40.6	39.1	NA	36.467

5.3.3 CCD 模組量測

實盈光電委託量測工件對位誤差，則需要量測組裝面間之夾角，同本節所利用的最佳平面法向量，利用內積計算法向量夾角即可計算出對位面夾角誤差。

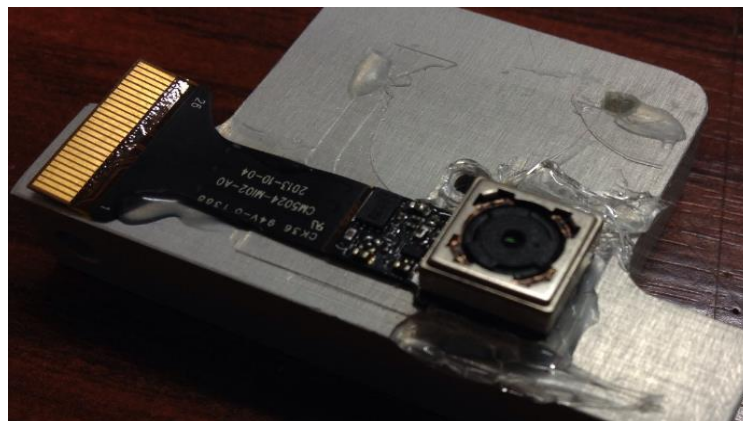


圖 5.28 手機照相模組

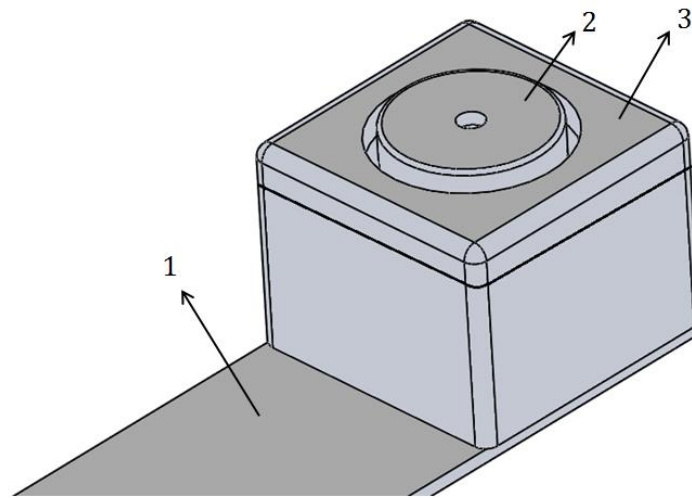


圖 5.29 模組量測示意圖

表 13 量測結果

Angle between planes	deg.
1 & 2	0.7839
2 & 3	0.6637
3 & 1	0.1926

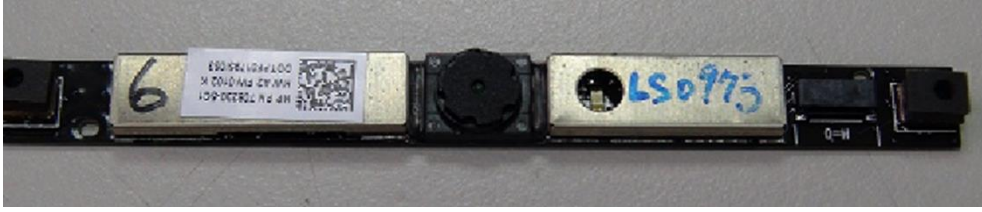


圖 5.30 NB 照相模組

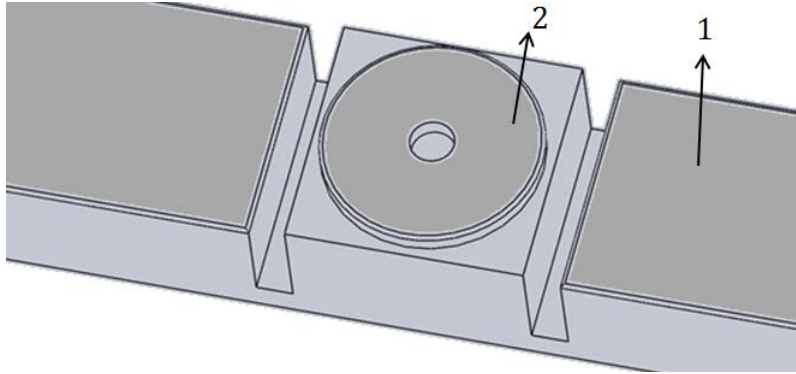


圖 5.31 NB 照相模組示意圖，夾角為 0.0818°

5.4 探頭掃描量測

接觸式探頭可因應不同的量測條件而選擇使用掃描(Scanning)模式或觸發(Trigger)模式，掃描與觸發之不同點為前者是持續與待測物表面接觸，可量測出連續的表面輪廓。圖 5.32 為掃描流程圖，此掃描為量測 YZ 截面之流程，開始掃描前必須設定 Y 軸預計量測的總行程，以及依照待測物表面起伏不同所設定 Z 軸移動閾值，為了避免探頭離開工件表面先將 Z 方向預壓 3 至 5 mm 的移動量，當程式開始執行掃描時 Y 軸將用 AC 模式以 10 mm 當作步距前進，每前進一步距便判斷是否超過 Y 軸總量測行程，若為是將結束掃描，否則繼續前進，若 Y 軸移動未超過總行程但探頭 Z 方向因工件表面起伏而位移超過閾值，則 Y 軸先停止移動將 Z 軸移動至 Z 方向探頭位移小於 100 nm 內才會繼續移動 Y 軸，重覆此流程直到 Y 軸位移超過總行程掃描量測將結束。

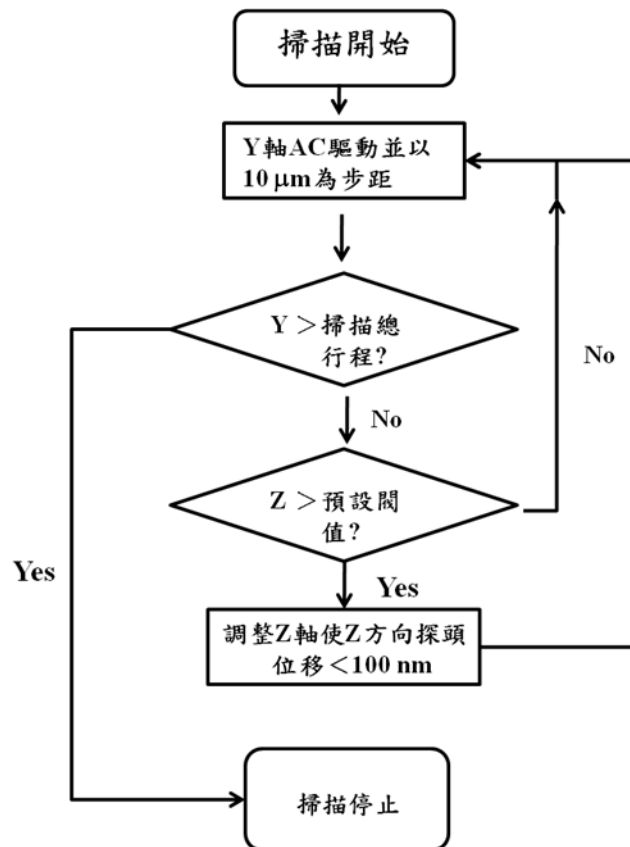


圖 5.32 掃描流程示意圖

5.4.1 透鏡掃描

本實驗掃描之透鏡為綠點科技之微小透鏡，屬於非球面鏡。將透鏡固定如 Micro-CMM 上進行 YZ 方向掃描，掃描全行程為 3 mm。

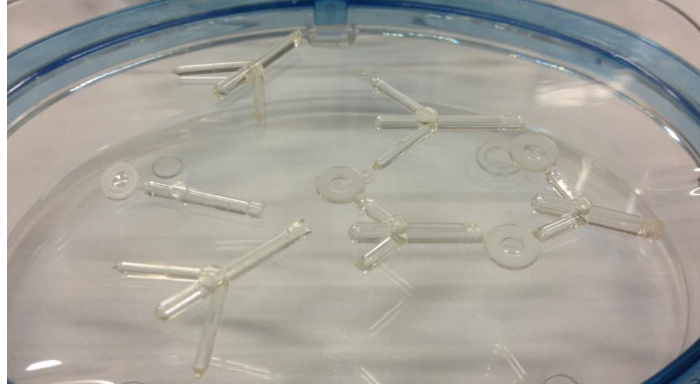


圖 5.33 綠點科技透鏡

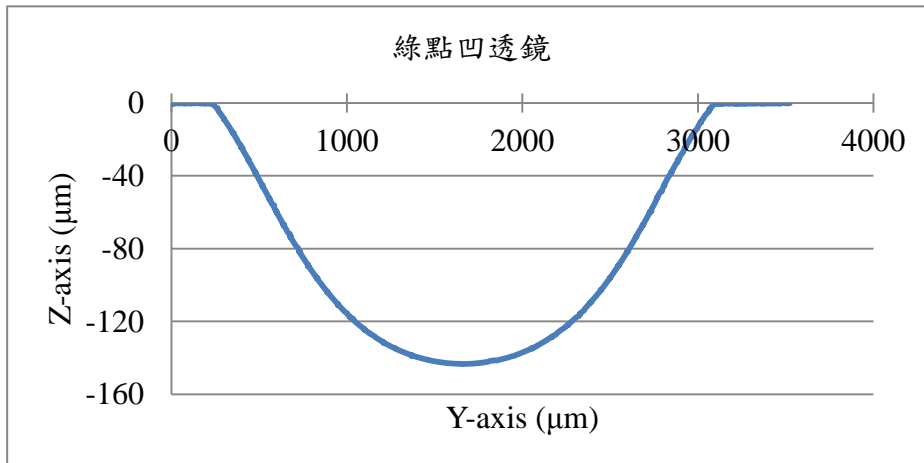


圖 5.34 綠點凹透鏡

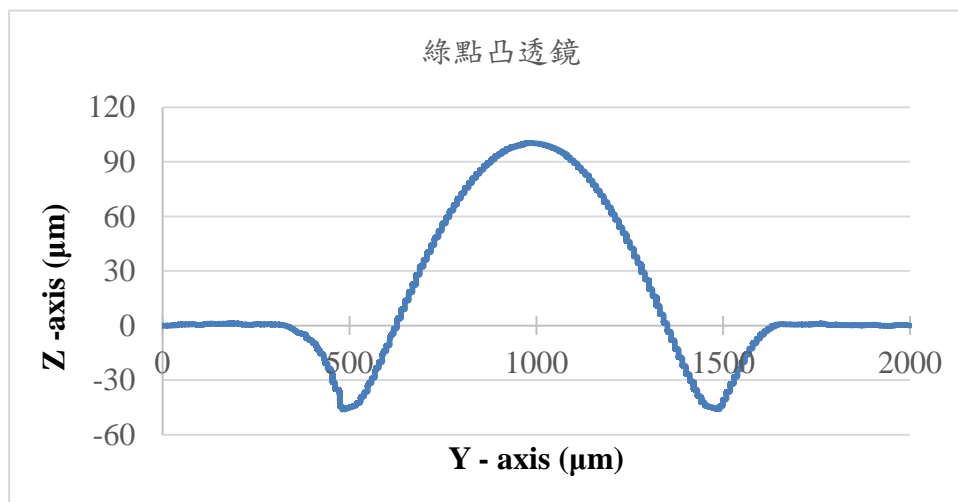


圖 5.35 綠點凸透鏡

而掃描結果經過與輪廓掃描儀比對，結果如，可看到全行程比對下，結果非常接近，而 Taylor Hobson 輪廓掃描儀簡介如下表 14。

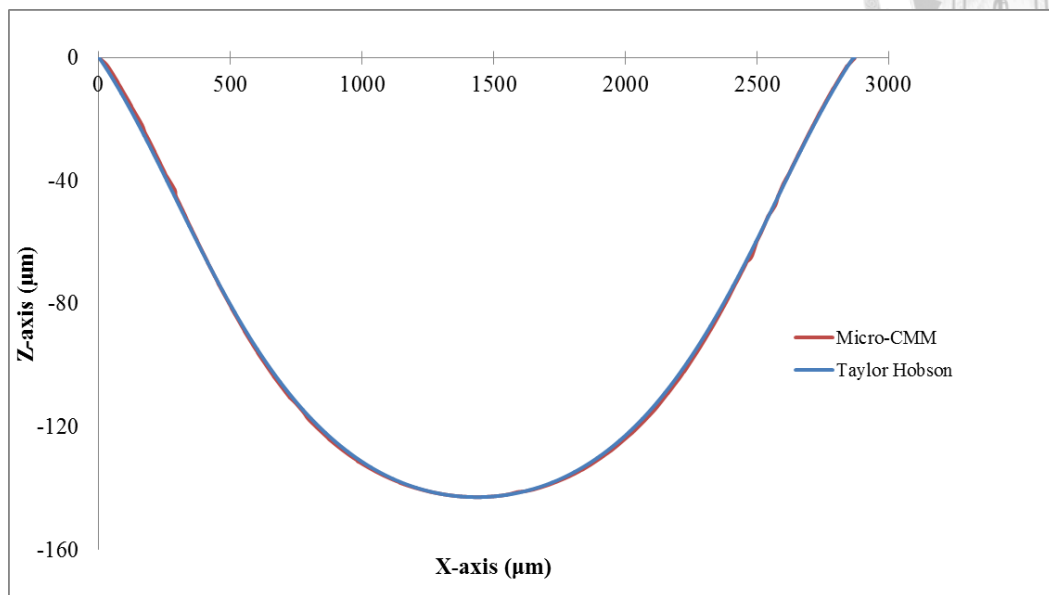


圖 5.36 Micro-CMM 與輪廓掃描儀比較圖

表 14 CMM 與輪廓儀規格比較

	Micro-CMM	Form Measuring Instrument
廠牌	NTU Meas Lab	Taylor Hobson
行程	20 mm*20 mm*5 mm	200 mm*12.5 mm
探針直徑尺寸	300 μm	4 μm
重複性	24 nm	50 nm

Chapter 6 結論與未來展望



6.1 結論

本研究針對微型三次元量測儀的各項誤差做補償精度提升，利用機台現有感測器達到體積自校正之功能以提升精度。在感測器方面麥克森干涉儀具有波長誤差造成平台定位不精準之問題，利用穿透式光柵與自動視準儀所結合成的波長補償模組，加上溫度感測器回授後，經過校正之後可有效的補償絕對波長值。在未補償波長值前誤差比 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10^{-3}$ ，表示全行程 20 mm 內累積誤差將可達到 20 μm ，波長補償後誤差比 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10^{-6}$ ，因此移動 20 mm 距離定位精度可在正負 20 nm 內。

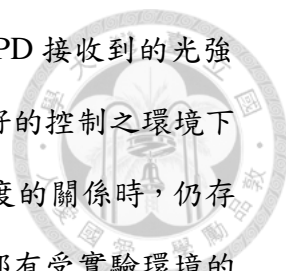
而三次元測量儀則引入面鏡誤差、光程差、阿貝誤差、垂直度誤差與平坦度誤差，推導出一套完整體積誤差模型，並個別設計實驗檢驗各項誤差，完成體積誤差模型。其中光程差之影響對於機台性能影響不大，將不另外補償；水平直度與 XY 兩軸間垂直度將因為共平面平台之設計，MDFMS 讀值已包含了這些誤差。而阿貝誤差與垂直度誤差則實際設計了實驗以分離出這兩項誤差，補償之後 XY 共平面平台之定位誤差將可達到 ± 20 nm 以下。最終僅利用雙軸多自由度感測器與 Z 軸干涉儀所感測讀值，在誤差模型下實現體積誤差自校正之功能。

而在探頭球頭部分，則以商用光纖熔接機搭配各項機構，設計出一套低成本快速生產之製程，自製微型高精度光纖探球，並自行組裝，應用於三次元量測儀等接觸式量測機台，組裝後的探頭達到直徑 $< 50 \mu\text{m}$ ，真圓度 $< 1 \mu\text{m}$ ，偏心率 $< 1 \mu\text{m}$ ，之需求，將可應用於高深寬比等傳統不易量測之工件。

最後結合接觸式掃描探頭做量測應用，可以觸發功能量測出實際點，利用後處理方式運算，計算出階高與組裝配合誤差。配合掃描程式量測綠點科技微透鏡，推廣了微型三次元量測儀於小型複雜工件之量測應用。

6.2 未來展望

Micro-CMM 目前已對各項誤差量測與建立補償模型，並配合波長做監控改



善量測時波長的累積誤差，但由於二極體雷射功率不足導致 QPD 接收到的光強較弱，環境所造成的訊號跳動量還是過大，實驗還是必須在良好的控制之環境下使用。但實驗環境仍無法嚴格經過控制，使得在校正波長和角度的關係時，仍存在著量測誤差，甚至像是校正麥克森干涉儀、自動視準儀時，都有受實驗環境的溫度變化、壓力、濕度或者是震動等影響，因此感測器方面仍有精度提升的空間。針對此點已開始測試較高功率的二極體雷射，若能有效提升光強訊號增加感測器穩定性，則將大大提升 Micro-CMM 之實用性。

量測應用方面軟體已經具有多種幾何形貌之量測程序，從實驗結果可以得知，機台重複性也良好，未來可進行 Micro-CMM 與 SIOS NMM 之球陣列比對校正，以追溯量測精度，可得出各位置機台之系統誤差。

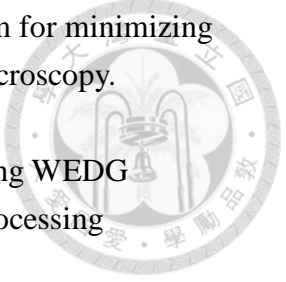
REFERENCE



- [1] Taniguchi N. Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1983;32:573-82.
- [2] Hansen HN, Carneiro K, Haitjema H, De Chiffre L. Dimensional micro and nano metrology. *Cirp Ann-Manuf Techn*. 2006;55:721-43.
- [3] Takamasu K, Ozawa S, Asano T, Suzuki A, Furutani R, Ozono S. Basic concepts of nano-CMM (coordinate measuring machine with nanometer resolution). *Jpn-China Bilateral Symp on Advanced Manufacturing Eng*. 1996;155.
- [4] Takamasu K, Hiraki M, Enami K, Ozono S. Development of Nano-CMM and Parallel-CMM—CMM in the 21th Century—. *International Dimensional Metrology Workshop*. 1999:10-3.
- [5] Takamasu K, Fujiwara M, Naoi H, Ozono S. Friction drive system for nano-CMM. *Proc Mechatronics, Poland*. 2000:565-8.
- [6] Fujiwara M, Takamasu K, Ozono S. Evaluation of Properties of Nano-CMM by Thermal Drift and Tilt Angle. *Proc XVII IMEKO World Congress (June, Dobrovnik, Croatia)*. 2003;1797.
- [7] Peggs GN, Lewis AJ, Oldfield S. Design for a Compact High-Accuracy CMM. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1999;48:417-20.
- [8] Richard L, Jane H, Keith J, Andrew L, Simon O, Andrew Y. Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory. *Nanotechnology*. 2001;12:R1.
- [9] Vermeulen MMPA, Rosielle PCJN, Schellekens PHJ. Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1998;47:447-50.
- [10] Theo A.M. Ruijl JvE. Novel Ultra Precision CMM based on Fundamental Design Principle. *American Society for Precision Engineering*. 2003.
- [11] Uwe Brand TK-B, Heinrich Schwenke. Development of a special CMM for dimensional metrology on microsystem components. *Proc of the 2000 Annual Meeting of the ASPE, Scottsdale*. 2000.
- [12] Schwenke H, Wäldele F, Weiskirch C, Kunzmann H. Opto-tactile Sensor for 2D and 3D Measurement of Small Structures on Coordinate Measuring Machines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2001;50:361-4.
- [13] Schmidt I, Hausotte T, Gerhardt U, Manske E, Jäger G. Investigations and calculations into decreasing the uncertainty of a nanopositioning and nanomeasuring machine (NPM-Machine). *Measurement Science and Technology*. 2007;18:482.
- [14] Jäger G, Manske E, Hausotte T, Büchner HJ. The Metrological Basis and

Operation of Nanopositioning and Nanomeasuring Machine NMM-1 Metrologische Grundlagen und Wirkungsweise der Nanopositionier- und Messmaschine NMM-1. tm - Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik 2009. p. 227.

- [15] Teague EC. The National Institute of Standards and Technology molecular measuring machine project: Metrology and precision engineering design. Journal of Vacuum Science & Technology B. 1989;7:1898-902.
- [16] J. Kramar JJ, W. Penzes, F. Scire, C. Teague, J. Villarrubia, E. Amatucci, D. Gilsinn. THE MOLECULAR MEASURING MACHINE. Proceedings of the 1998 International Conference on Mechatronic Technology. 1998.
- [17] John AK. Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine. Measurement Science and Technology. 2005;16:2121.
- [18] Hocken RJ, Trumper DL, Wang C. Dynamics and Control of the UNCC/MIT Sub-Atomic Measuring Machine. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2001;50:373-6.
- [19] Küng A, Meli F, Thalmann R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. Measurement Science and Technology. 2007;18:319.
- [20] ZEISS. <http://www.zeiss.com>. 2010.
- [21] Mitutoyo. <http://www.mitutoyo.com>. 2010.
- [22] Panasonic. <http://industrial.panasonic.com>.
- [23] Yang P, Takamura T, Takahashi S, Takamasu K, Sato O, Osawa S, et al. Development of high-precision micro-coordinate measuring machine: Multi-probe measurement system for measuring yaw and straightness motion error of XY linear stage. Precision Engineering. 2011;35:424-30.
- [24] Sawano H, Gokan T, Yoshioka H, Shinno H. A newly developed STM-based coordinate measuring machine. Precision Engineering. 2012;36:538-45.
- [25] Zhang G, Veale R, Charlton T, Borchardt B, Hocken R. Error Compensation of Coordinate Measuring Machines. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 1985;34:445-8.
- [26] Zhu S, Ding G, Qin S, Lei J, Zhuang L, Yan K. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012;52:24-9.
- [27] Weekers WG, Schellekens PHJ. Compensation for dynamic errors of coordinate measuring machines. Measurement. 1997;20:197-209.
- [28] Fan K-C, Chen M-J. A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of XY stages. Precision Engineering. 2000;24:15-23.
- [29] Brand U, Kirchoff J. A micro-CMM with metrology frame for low uncertainty measurements. Measurement Science and Technology. 2005;16:2489.

- 
- [30] Kim D, Lee DY, Gweon DG. A new nano-accuracy AFM system for minimizing Abbe errors and the evaluation of its measuring uncertainty. *Ultramicroscopy*. 2007;107:322-8.
- [31] Sheu D-Y. Multi-spherical probe machining by EDM: Combining WEDG technology with one-pulse electro-discharge. *Journal of materials processing technology*. 2004;149:597-603.
- [32] Sheu D-Y. Micro-spherical probes machining by EDM. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2005;15:185.
- [33] Fan K-C, Hsu H-Y, Hung P-Y, Wang W. Experimental study of fabricating a microball tip on an optical fibre. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2006;8:782.
- [34] Tung C-H. Design and Research for High Precision Coplanar Stage: NTU, 2004.
- [35] Wu P-T. The Development of a Precision Abbé-free Three-axis Moving Stage: NTU, 2007.
- [36] Ke Z-Y. Design and assembly methodology of the structure of high precision 3-axis linear stage in nanometer accuracy: NTU, 2010.
- [37] Ruiji T. Ultra Precision Coordinate Measuring Machine - Design, Calibration and Error Compensation. The Netherlands: Delft University of Technology,, 2001.
- [38] Spaan H, Donker R, Widdershoven I. ISARA 400: enabling ultra-precision coordinate metrology for large parts. Proc of 10th Int'l Symposium on Measurement and Quality Control2010.
- [39] F. L. Petrotti LSP. Introduction to Optics. 2nd ed: Prentice-Hall,Englewood Cliffs, 1996.
- [40] 范光照, 張郭益. 精密量測: 高立圖書有限公司, 2003.
- [41] Loewen E. Diffraction Grating Handbook2005
- [42] Uchino K. Piezoelectric ultrasonic motors: overview. *Smart Materials and Structures*. 1998;7:273.
- [43] Nanomotion AB2 Driver User Manual.
- [44] Huang C-M. Fabrication of a tactile Scanning Probe fr Micro/Nano CMM: NTU, 2012.
- [45] Liao B-S. Development of Michelson Interferometer with Wavelength Compensator and Dual Angle Measurements: NTU, 2012.
- [46] Matlab. fmincon,<http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>.
<http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>.
- [47] Tsou M-C. Research on the Accuracy Improvement of Micro Coordinate Measuring Machine: NTU, 2013.
- [48] Williamson R, Miles M. Melt-drawn scanning near-field optical microscopy

probe profiles. J Appl Phys. 1996;80:4804-12.

[49] Lin C-Y. The Analysis and Fabrications of a Contact Type Measuring Probe for Micro/Nano CMM with an Observing Unit 2008.

