

國立交通大學

機械工程學系
碩士論文

利用原子力顯微術實現快速原型

Rapid Prototype Utilizing
Atomic Force Microscopy



研究生：謝鎮宇

指導教授：洪紹剛 博士

中華民國一百零一年五月

利用原子力顯微術實驗快速原型

Rapid Prototype Utilizing

Atomic Force Microscopy

研究生：謝鎮宇

Student：Jen-Yu Shieh

指導教授：洪紹剛

Advisors：Dr. Shao- Kang Hung

國立交通大學



A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Mechanical Engineering

June 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年五月

利用原子力顯微術實現快速成型

學生：謝鎮宇

指導教授：洪紹剛

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘要

本論文研究目標是利用原子力顯微鏡（Atomic Force Microscopy, AFM）之探針原理，以及紫外線光硬化膠與三軸壓電平台設計一小型的點針式快速原型系統；由於 AFM 之尺度小，解析度高，利用其針尖控制點膠，預計可以製作出微奈米尺度的元件。此外，由於光硬化膠的特性，可以快速的做出理想的元件。

為了控制並完成微快速原型系統，本研究使用 Labview 虛擬儀控軟體進行自動操作，成功完成單層的點陣圖像，並以幾種不同之控制變因瞭解膠點的大小高度之控制法則，經實驗後可知本系統可點出約半徑 $1\mu\text{m}$ 至 $2\mu\text{m}$ 的圓形至橢圓形膠點，並可利用參數控制沾點膠量多寡達成控制高度改變的目標。

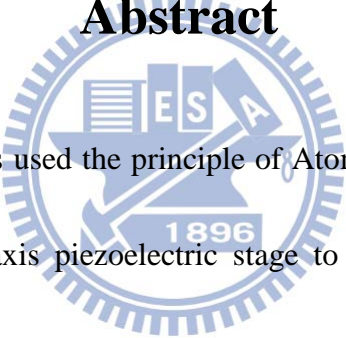
Rapid Prototype Utilizing Atomic Force Microscopy

Student : Jen-Yu Shieh

Advisor : Dr. Shao-Kong Hung

Department (Institute) of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract


The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like border. Inside the circle, there is a stylized building with the letters 'ES' on it, a book, and a microscope. The year '1896' is written at the bottom of the emblem.

This research's object is used the principle of Atomic Force Microscope (AFM) probe, UV resins and a 3-axis piezoelectric stage to design the micro-size Rapid Prototyping (RP) system. Because of the AFM's high resolution and minimum size, we can use its tip to get the UV resins. By the UV properties of resins, we can make the nano-size particles possible.

To control and achieve the micro-RP system, this research using the Labview control software to auto-control, and building the particle successfully. By changing different control variables, this research tries to find the resins points' size and height controlled rules. After experiments, the micro-RP system can build the UV resins point with radius 1~2 μm , what can change the points height and achieve this object.

誌謝

時光荏苒，又到了鳳凰花開的時節，研究所兩年就這麼過去了。在這短短地日子裡中，我學會了許多對未來生涯相當重要的經驗與技能。在此感謝所有曾經在求學道路上幫助過、指導我的人們。首先，我要感謝指導教授 洪紹剛老師，老師那亦師亦友、細心指導的態度，總是能在我困窘時給予我解答，在我迷惑時給予我方向。而我也感謝老師給予我這個特別的研究題目，困難卻有趣，特殊卻具有挑戰性，令我永不失去「繼續做下去」的動力。也感謝我的口試委員、本系徐文祥老師、鐘添淦老師的指導，兩位總是能提出精確而有用的想法與建議令論文能夠臻至完美。



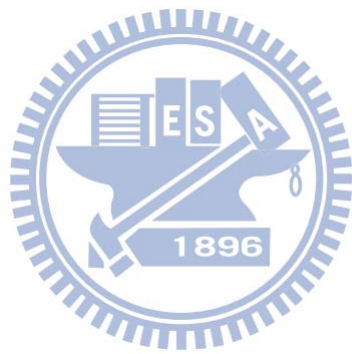
在此感謝同實驗室的 Sly 學長、盧奕、小鋼砲，利用他們的知識與經驗協助我解決問題；還有第一屆的諸位學長，在回來時經常給予我建議。同屆的建樺，在初期系統設計上幫過我不少的忙；正龍與碰北，雖說題目不相近，還是感謝兩位兩年來的相處與幫助；也感謝承燁，在論文的最後關頭與我同進退，互相努力與打氣。最後要感謝可愛的學弟妹們：曜基、宗德、長霖、美嬌，你們的加入讓實驗室多了新的色彩，讓我碩士的最後生活感到開心。另外也感謝在大學生活與音樂社團時認識的好同學與好社員，沒有你們，我的生活不會如此特別而有趣。

最後，我想感謝我的父母與姊妹，沒有你們，我無法成長至此，沒有你們，我就失去了避風的港口，感謝這二十多年來的照顧，請讓我在此至上最深的謝意。

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
一、 緒論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	1
1.4 研究目標.....	2
二、 預備知識	3
2.1 快速原型原理.....	3
2.2 原子力顯微鏡原理.....	8
2.2.1 各式 AFM 分類.....	8
2.2.2 輕拍式之 Akiyama 探針原理：.....	10
2.3 沾筆式奈米微影印刷術.....	12
三、 系統設計	14
3.1 系統架構.....	14
3.1.1 沾膠與點膠控制.....	16
3.1.2 Z 軸漸進式感測系統 (Z-axis Safety Approach)	17
3.1.3 方形路徑移動沾膠程式.....	19
3.1.4 自動掃頻系統.....	19
3.1.5 系統整合人機介面.....	20
3.2 機構設計.....	21
3.2.1 架構整合.....	21
3.2.2 各部硬體架構.....	24
四、 實驗	31
4.1 實驗方法.....	31
4.1.1 機電整合架構.....	31
4.1.2 膠液選擇.....	32
4.2 各項實驗.....	33
4.2.1 探針最大共振振幅與頻率.....	33
4.2.2 Akiyama 探針力圖實驗	34
4.2.2 Z-axis safety approach 測試	34
4.2.3 膠點 5×5 點圖實驗	36
4.2.4 AFM 截面掃圖研究	38
4.2.5 下降穩定度實驗.....	40

4.2.6 單排點圖高度研究.....	44
五、 結論與展望	48
參考文獻.....	50



圖目錄

圖 2.1.1 RP 製作流程圖[1].....	4
圖 2.1.2 SLA 法示意[3].....	4
圖 2.1.3 FDM 示意圖[6].....	5
圖 2.1.4 SLS 示意圖[8].....	6
圖 2.1.5 LOM 示意圖[9].....	7
圖 2.2.1 AFM 原理示意圖[10].....	8
圖 2.2.2 兩原子間的距離與交互作用力的關係示意圖[11].....	9
圖 2.2.3 各種形式 AFM.....	10
圖 2.2.4 Akiyama-Probe 外觀圖.....	10
圖 2.2.5 輕拍式 AFM 原理.....	11
圖 2.2.6 A-Probe 動作示意圖 (a) 結構圖 (b) 共振示意圖[14].....	11
圖 2.3.1 DPN 工作示意圖[16].....	12
圖 2.3.1 三種 DPN 之不同工作方式示意圖[17].....	13
圖 3.1.1 系統控制流程.....	15
圖 3.1.2 沾膠與點膠迴圈流程圖.....	16
圖 3.1.3 SR-830 鎖相放大器外觀.....	17
圖 3.1.5 Z-axis safety approach 作動示意圖.....	18
圖 3.1.6 方形路徑動作示意圖.....	19
圖 3.1.7 自動掃頻系統流程圖.....	20
圖 3.1.8 Micro-RP 系統人機介面圖.....	21
圖 3.2.1 整體架構模型圖.....	22
圖 3.2.2 整體架構實體圖.....	22
圖 3.2.3 微快速原型系統設計圖.....	23
圖 3.2.4 微快速原型系統實體圖.....	24
圖 3.2.5 PI 之 P611-S 3 軸精密位移壓電平台[21].....	25
圖 3.2.6 Olympus BX51M 光學顯微鏡.....	25
圖 3.2.7 MEM-1300 D-PEN 電子目鏡.....	26
圖 3.2.8 Navitar 同軸光源顯微鏡.....	27
圖 3.2.9 DFK-61AUCO2 CMOS 數位相機.....	27
圖 3.2.10 實驗時之側向拍攝即時畫面截圖.....	28
圖 3.2.11 M365L2-C1 紫外光平行光源.....	29
圖 3.2.11 訊號放大電路圖.....	30
圖 4.1.1 機電整合整體架構圖.....	31
圖 4.1.2 本實驗使用之 580370V 光硬化膠.....	32
圖 4.2.1 A-Probe 掃頻結果圖.....	33
圖 4.2.2 A-Probe 探針力圖.....	34

圖 4.2.3 沾膠前探針掃頻圖 (x 軸單位:Hz, y 軸單位:V)	35
圖 4.2.4 沾膠後探針掃頻圖 (x 軸單位:Hz, y 軸單位:V)	36
圖 4.2.5 實驗輸入之 5x5 點陣圖.....	37
圖 4.2.6 50x 物鏡下之膠點點陣圖.....	37
圖 4.2.7 AFM 掃圖結果	38
圖 4.2.8 掃圖截面繪圖.....	39
圖 4.2.9 樣品掃圖 3D 建模圖 (單位:nm)	40
圖 4.2.10 探針下降重現度實驗流程圖.....	41
圖 4.2.8 沾膠下降重現度實驗圖.....	42
圖 4.2.9 點膠下降重現度實驗圖.....	43
圖 4.2.13 4 種不同百分比之 AFM 掃圖截面圖	45
圖 4.2.14 下降百分比 95% 時之圖形截面高度圖	45
圖 4.2.15 下降百分比 94% 時之圖形截面高度圖	46
圖 4.2.16 下降百分比 93% 時之圖形截面高度圖	46
圖 4.2.17 下降百分比 92% 時之圖形截面高度圖	46
圖 4.2.18 各下降百分比平均高度比較圖.....	47



一、緒論

1.1 研究背景

目前在微奈米尺度元件的製作上，主要是利用光刻法製作；然而，由於光刻法的製作時間長，且單次製作量大，使得在設計上的容錯率變低，這點在需要多次設計修改的小型微機電系統上會成為一大障礙。

原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscopy, AFM)，利用其原子間作用力，如凡德瓦力、鮑氏力等，以及約 10~30nm 細小探針與樣品間作用力大小變化進行測量，可得出奈米尺度的物體表面圖像，目前被廣為利用於導體與非導體的樣品掃描上；而 AFM 依據與樣品接觸狀況可分為三種形式：1. 接觸式 2. 非接觸式 3. 輕拍式，三者各有優缺，而其中輕拍式 AFM 由於本身設計的特色，可不需外加使用光學或電子量測系統來計算探針的位置變化，直接測量探針的電壓振幅計算表面，可減少 AFM 體積與花費。

1.2 研究動機

在講求效率與方便性的時代，所有的物品都有著微小化與高性能化的趨勢，人們為了追求電腦的卓越計算能力，不斷地將晶圓電路與機械進行縮小與複雜化，以創造更高效能且便捷的產品。然而，目前的微小尺度物件製作，多採用微機電系統 (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS) 之製程，雖可獲得大量之成品，但耗時極久；目前市面上的快速原型系統，主要適用於製作大型的試作工件，如

車輛模型、建築模型、或是人工骨骼等，然而卻沒有小型、微奈米尺度的快速原型系統；若使用過去一般的製作方式，花費相比之下會極為昂貴。本研究便是嘗試整合目前快速原型技術，以 UV 紫外線光硬化膠為材料，AFM 探針為點針頭，並使用市售之三軸精密壓電位移平台與 Labview 虛擬控制軟體做以控制移動，採用類似沾筆式奈米微影技術(Dip-Pen Nanolithography, DPN)之方法製作一小型的點針式快速原型系統，以實現快速且低廉的系統試作工件製作。

1.4 研究目標

本研究中，將嘗試設計利用機電整合的方法，將其他控制器材與一般光學顯微鏡整合之快速原型系統，且嘗試以不同種類的膠種測試對針尖的黏滯狀況，另外分析各膠種於硬化後之狀況。



二、預備知識

2.1 快速原型原理

快速原型技術（Rapid Prototyping, RP）[1]是一種特別的原型製造技術，它結合了機械工程、CAD、數位控制技術、雷射技術與材料科學，可直接進行快速的原型生產，且生產出之快速原型成品可直接進行修改反饋，為目前大部分工業所採用。

快速原型的原理，主要是使用分層加工的概念，如果將一3維物件層層切開，只要切的夠薄，便可視為一2維平面圖形；反過來說，若將所有2維圖形堆疊起來，便可組合成一3維物件[2]。下圖 2.1.1 為 RP 製作的主要流程：

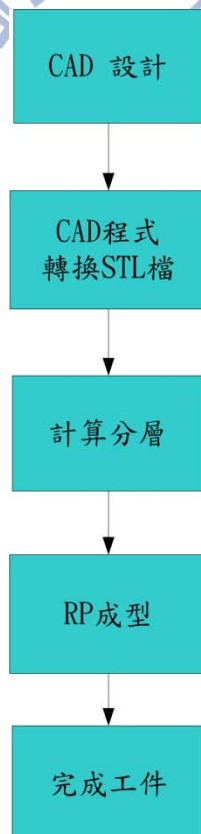


圖 2.1.1 RP 製作流程圖[1]

快速原型技術依照成型方式，可依製作材料分為下列 4 種：液態法、半液態法、粉末法、固態法。

1. 液態法：

液態法原理即利用紫外線或雷射對於液態工光硬化樹脂進行照射，在工作槽中硬化每層圖形並直接堆疊，完成後去除多餘的膠液即可得到工件。光敏樹脂法（Stereo Lithography Apparatus, SLA）[3, 4]、立體光刻法（Solid Ground Curing, SGC）[5]即屬此類型，然而由於製作時是浸在膠液槽之中，所以在工作時需要額外支撐件來分擔製作時之物件重量，與後述之粉末法或固態法相比，工件強度較差，且無法制作太複雜之物品。

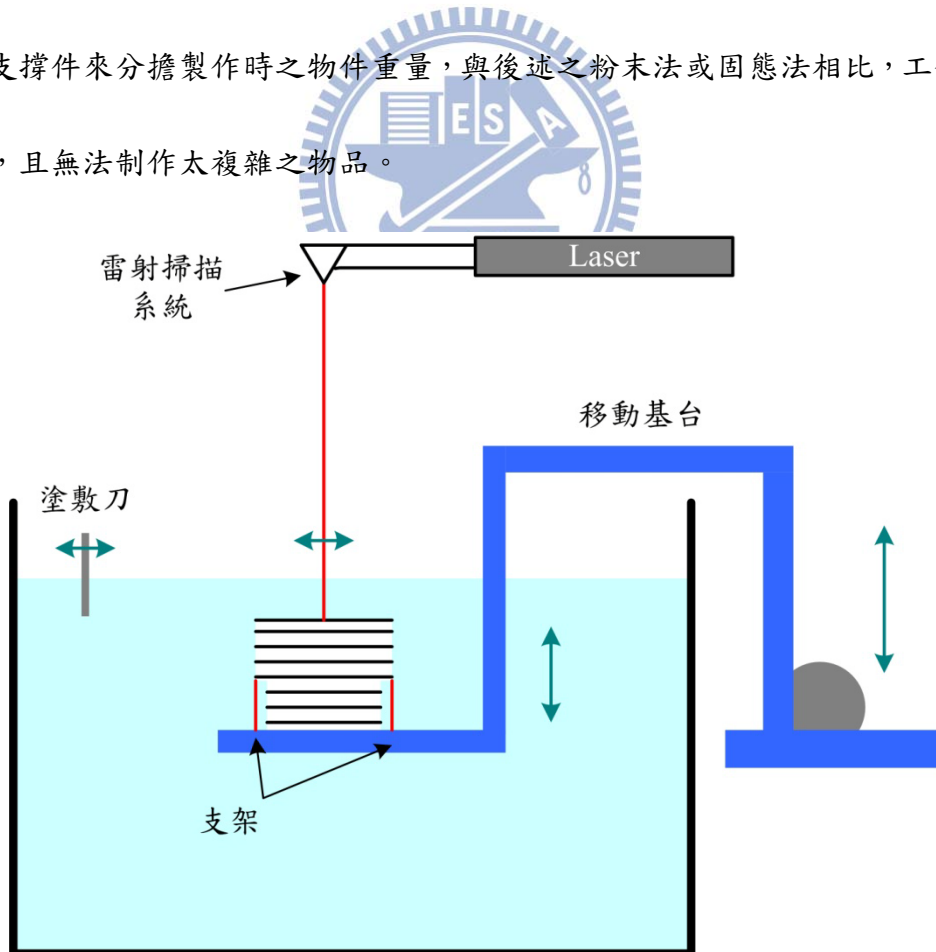


圖 2.1.2 SLA 法示意[3]

2. 半液態法：

半液態法，顧名思義為利用膠狀等半液態材料加熱堆疊後凝固，其與液態法之不同在於，液態法是在大型液態槽對膠液照射進行區域硬化，而半液態法為使用噴嘴直接噴出於需要材料之圖塊，之後直接固化；由於工件是放置於海綿狀軟質基台，所以無 SLA 需謹慎取下工件以免破壞的問題，然而與液態法有著相同的問題：需要支撐材來支撐製作中的物件。熔融沈積法（Fused Deposition Modeling, FDM）[6, 7]即屬於此類型。

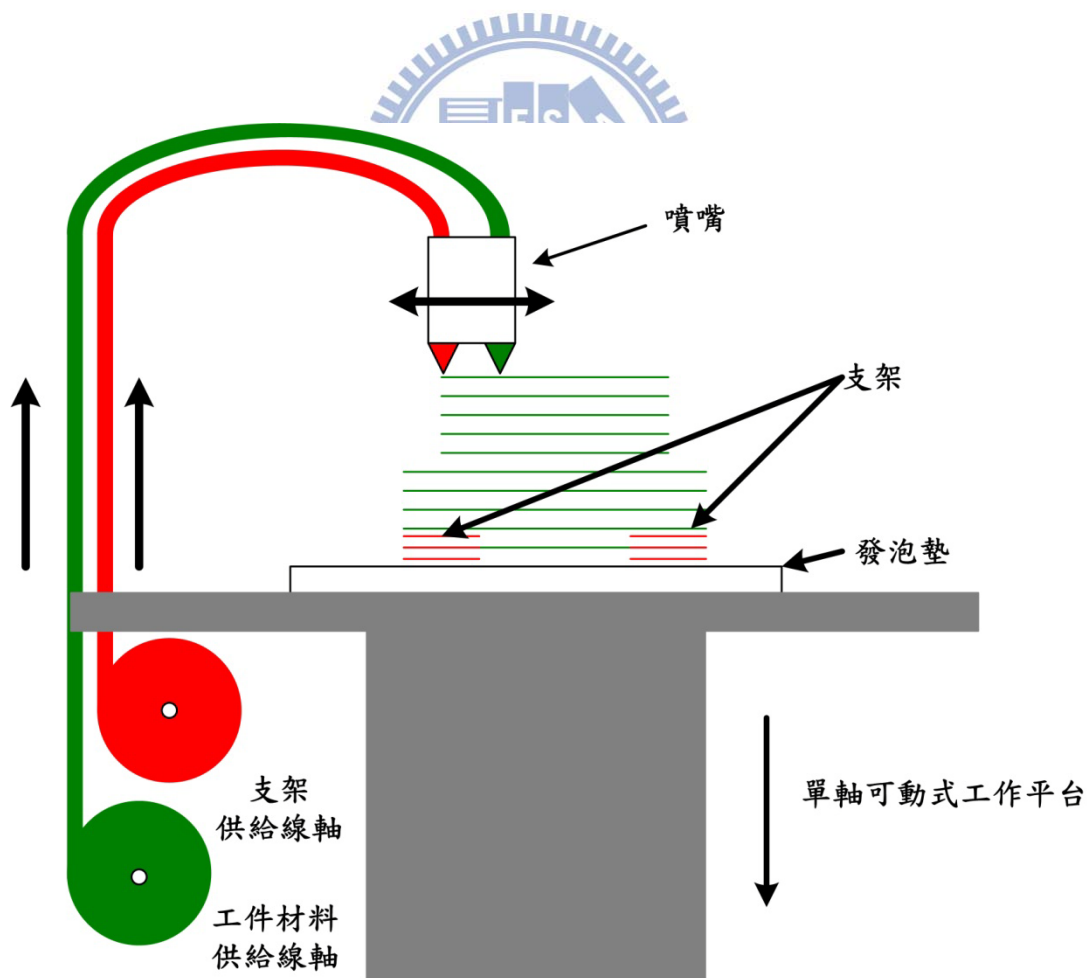


圖 2.1.3 FDM 示意圖[6]

3. 粉末法：

粉末法與 SLA 極為類似，皆利用到雷射照射，但主要材料為陶瓷粉末或其他加熱黏合材料，其原理為：先用滾筒送出一層粉粒狀基材，後用雷射對著物件形狀圖塊照射燒結，固化完成後再度鋪上一層粉粒狀基材製作下一層，週而復始直至完成。其優點在於與 SLA 相比，不需要使用支撐架作為支撐，缺點則是粉粒狀基材在製作後較難完全清除，且粉末可能造成人體危害，主要類型為選擇性雷射燒結法（Selective Laser Sintering, SLS） [8]。

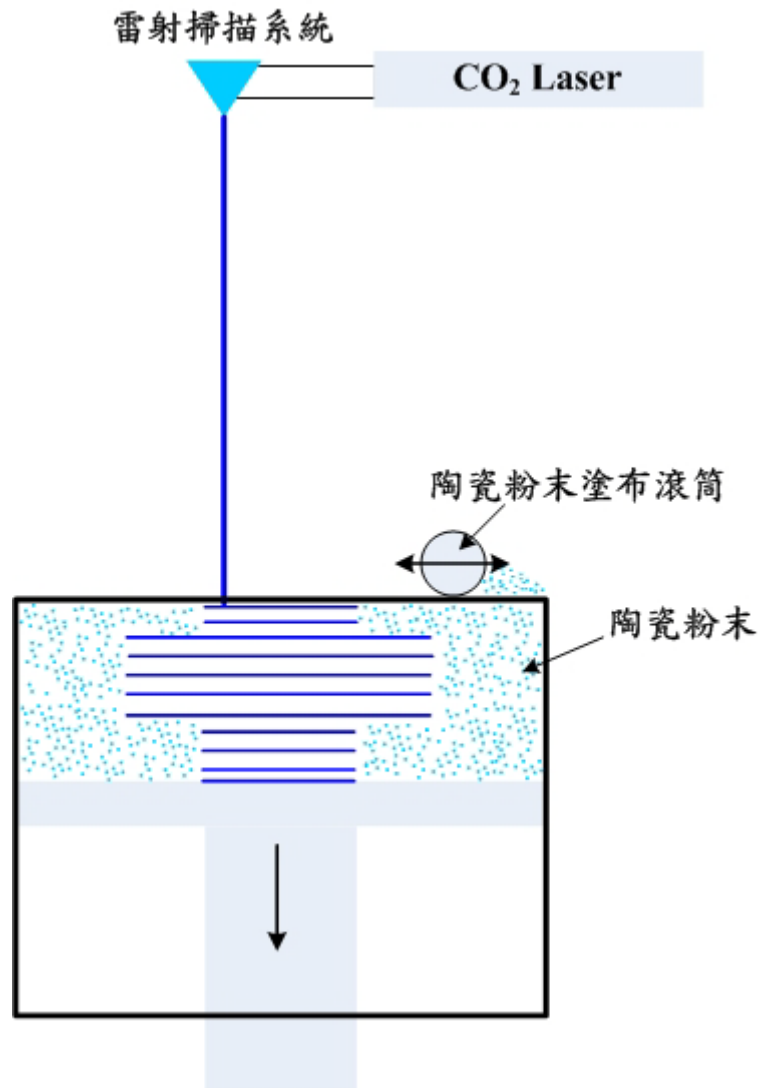


圖 2.1.4 SLS 示意圖[8]

4. 固態法：

固態法即疊層實體製造法（Laminated Object Manufacturing, LOM）[9]，其原理是利用雷射切割黏附熱融性接著劑之薄片材料，並在每層完成後進行滾輪加熱壓實，最後切除外部餘材的方法，其優點在於材料種類多，目前市面上可看見之快速原紙模型皆是使用此法製作，如各類的建築快速模型通常都是使用此法製作。

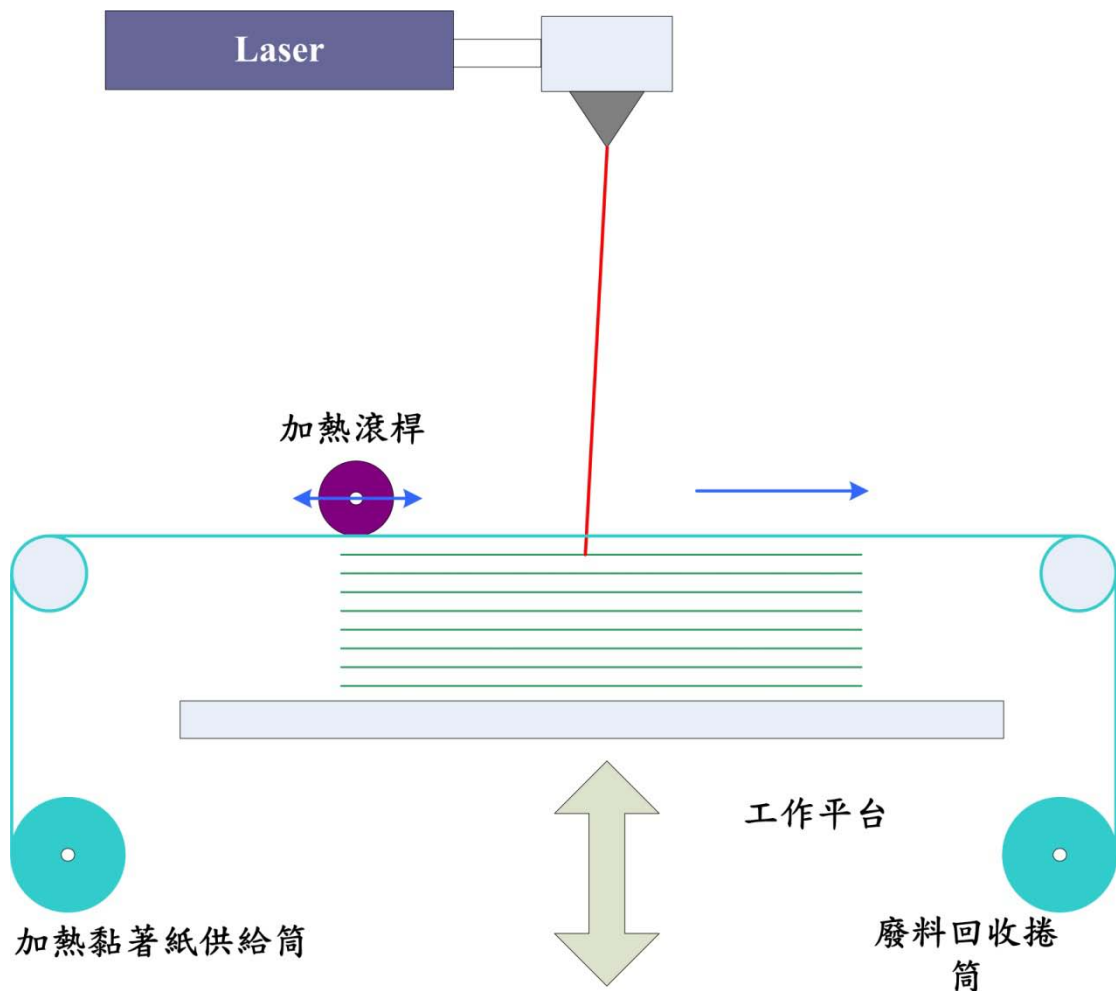


圖 2.1.5 LOM 示意圖[9]

2.2 原子力顯微鏡原理

原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscopy, AFM) [10]之量測原理如圖 2.2.1 所示：當懸臂樑探針靠近樣品表面時，探針末端原子與樣品表面原子產生交互作用力，此交互作用力造成探針撓曲或是運動特性改變，再以一感測系統量測微懸臂探針受作用力所造成的訊號變化，將偵測所得訊號經處理後，輸入回饋系統維持探針與樣品間等作用力，進而獲得樣品表面形貌資訊。

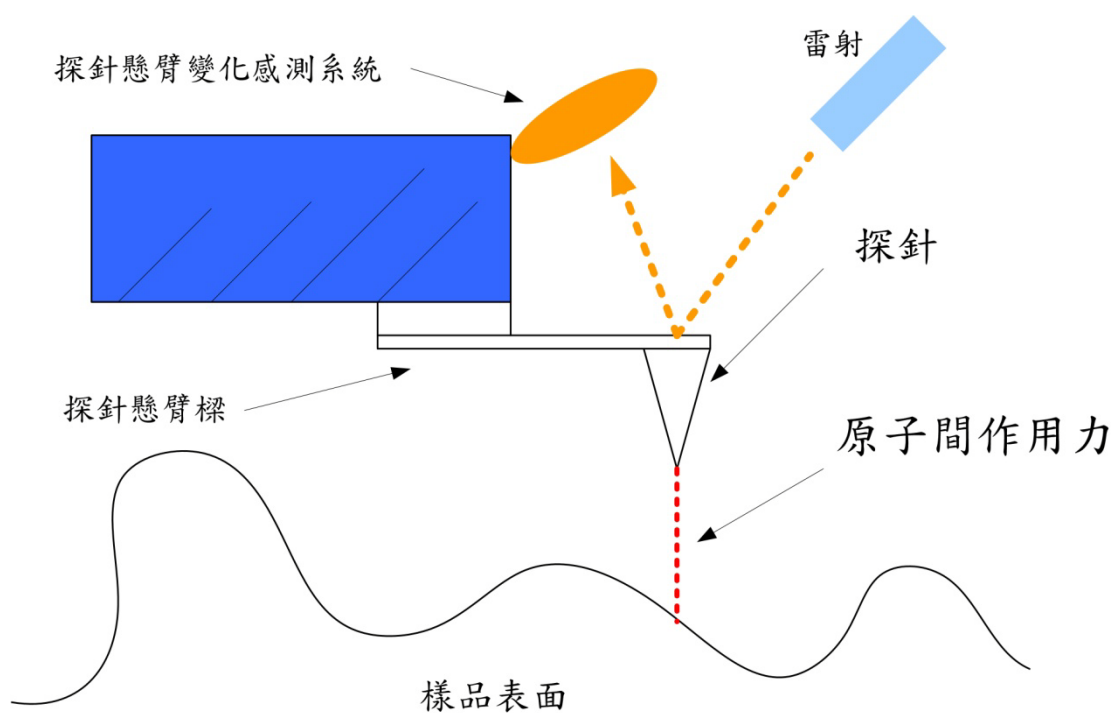


圖 2.2.1 AFM 原理示意圖[10]

2.2.1 各式 AFM 分類

而從探針與樣品間作用力形式，可將 AFM 分為以下三種，如圖 2.2.3 所示：

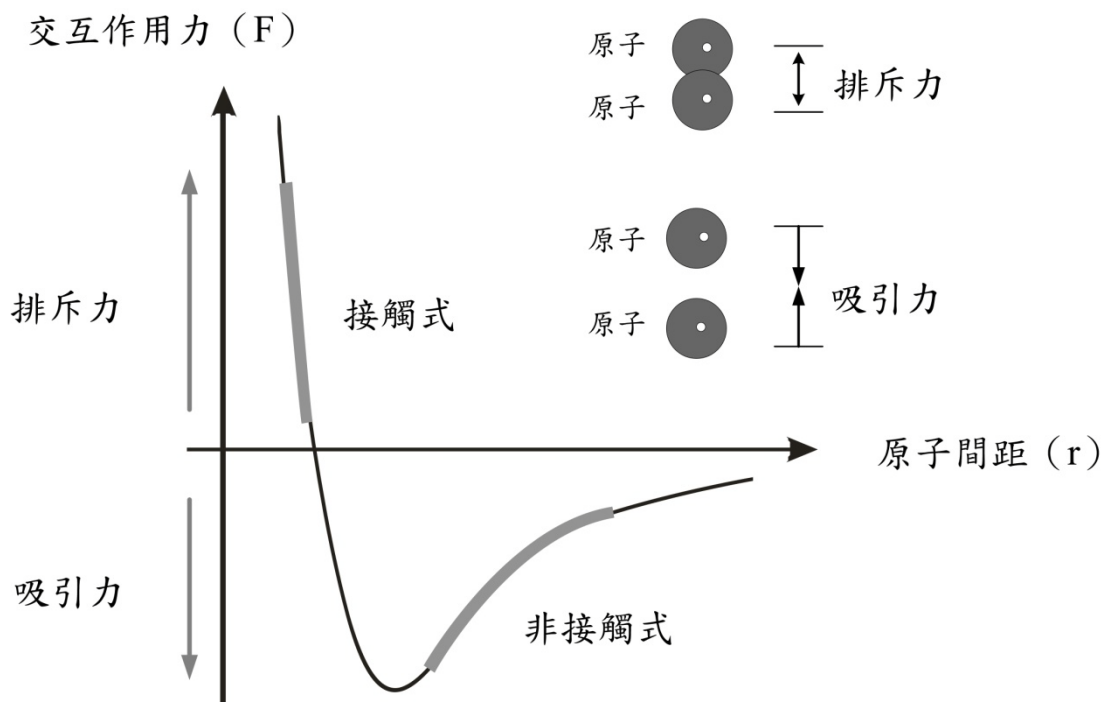


圖 2.2.2 兩原子間的距離與交互作用力的關係示意圖[11]

1. 接觸式：

利用樣品與針尖與原子間的短程斥力變化，測量表面外貌，兩者間距約數個 Å

2. 非接觸式：

利用樣品與針尖原子間長程吸引力變化量測表面形貌，兩者之間距離約為數十到數百個 Å。

3. 輕拍式：

輸入一交流訊號，使懸臂上下擺動輕敲樣品表面，再藉由運動振幅特性改變以量測表面形貌。

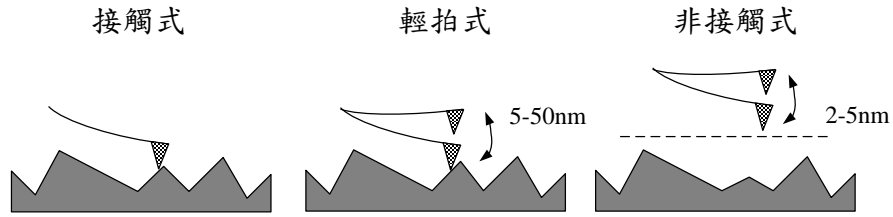


圖 2.2.3 各種形式 AFM

本研究主要使用的是第 3 類輕拍式探針[12, 13]，其優點在於結合接觸式與非接觸式兩者優點，不會刮傷樣品表面，且無需另外的雷射或位移測量系統，只需量測因作用力造成的振幅變化，經計算即可得到樣品表面外貌。

2.2.2 輕拍式之 Akiyama 探針原理：

本研究使用之輕拍式探針為 Akiyama 探針 (Akiyama-Probe, A-Probe)，為 Akiyama Terunobu 教授於 2003 年[14]所提出，其外觀如圖 2.2.4。

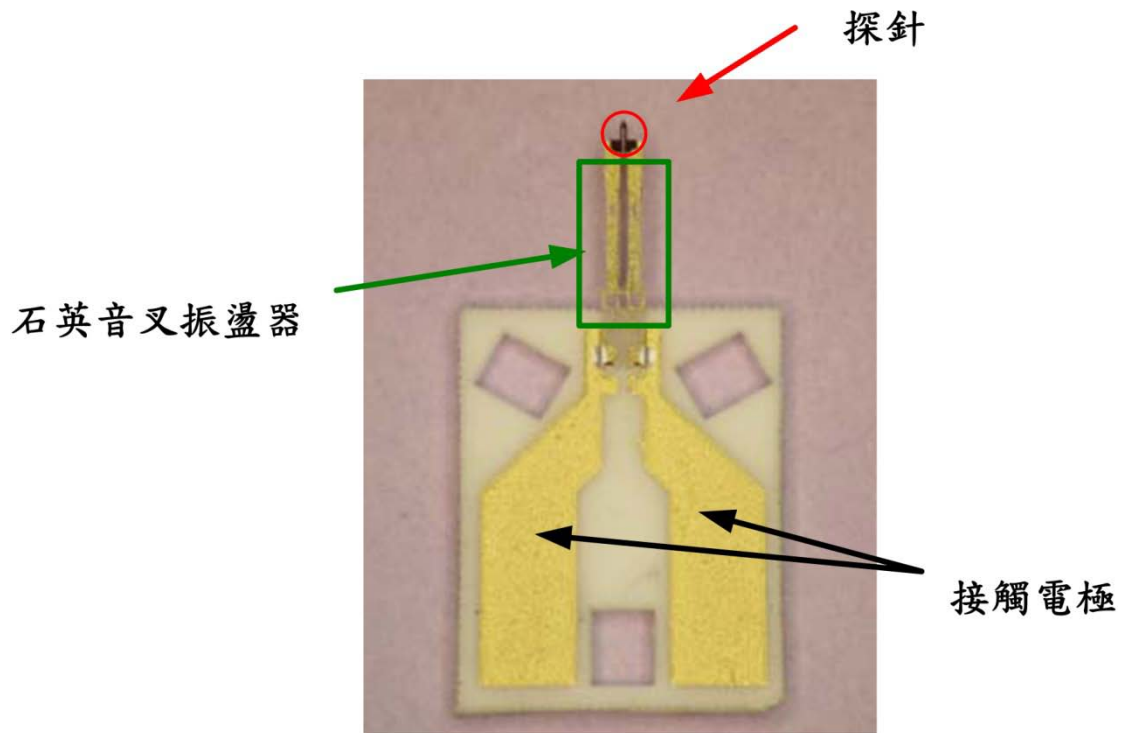


圖 2.2.4 Akiyama-Probe 外觀圖

其原理主要是利用石英音叉之穩定共振頻率進行震盪，造成探針上下擺動一固定振幅；在靠近樣品表面時，由於交互作用力的關係造成振幅變小，此時與原振幅相比並計算後即可得到樣品表面的高低落差。

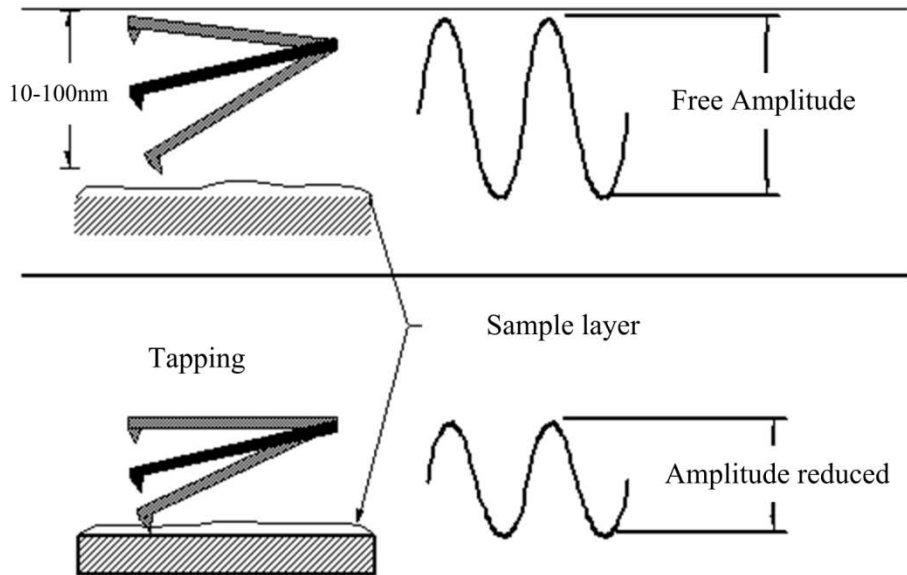


圖 2.2.5 輕拍式 AFM 原理

當石英音叉兩樑向外振動時，會使探針抬起，而當兩者向內振動時，則會使探針下降，造成週而復始的「拍動」效果，此即輕拍式 Akiyama 探針原理。

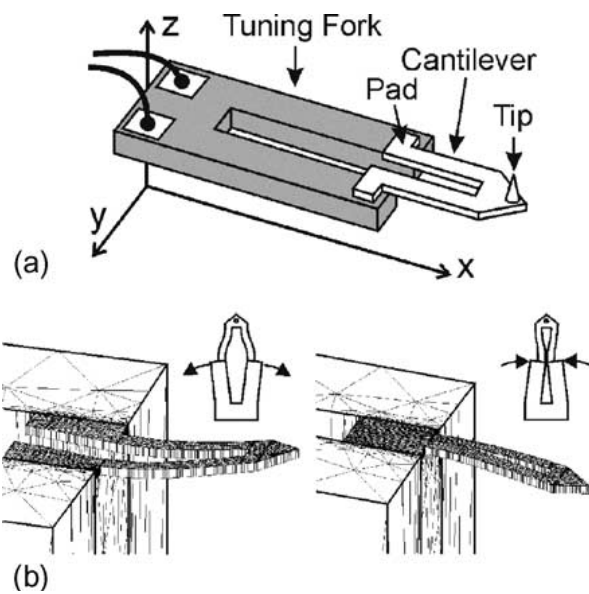


圖 2.2.6 A-Probe 動作示意圖 (a) 結構圖 (b) 共振示意圖[14]

2.3 沾筆式奈米微影印刷術

沾筆式奈米微影印刷術 (Dip-Pen Nanolithography, DPN)，為C. A. Mirkin等人在1999年時提出[15, 16]，其原理是利用AFM的探針，沾取調製後含有所需繪製分子的墨水進行書寫，由於當AFM的探針接近拿來當作書寫紙的金元素基板時，有機分子會借由基板表面溼氣與墨水中的有機溶劑薄膜形成的水橋 (meniscus) 轉移吸附在基板上，如圖2.3.1[16]，便可完成書寫。由於只要改變基板材料，就能書寫不同分子的墨水，生物DNA、金屬分子、非金屬分子等都可以書寫出來，所以相當方便。其分類主要是利用書寫方式，可分為三種：刮除 (Elimination)、附加 (Addition) 與替換 (Substitution)，圖2.3.2為這三種不同的DPN動作示意圖。

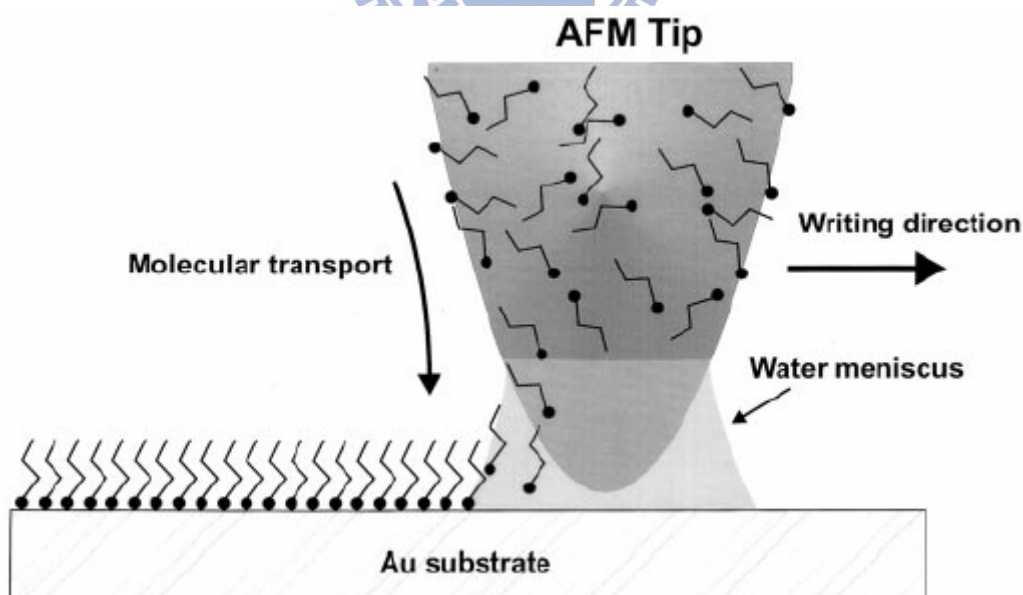


圖 2.3.1 DPN 工作示意圖[16]

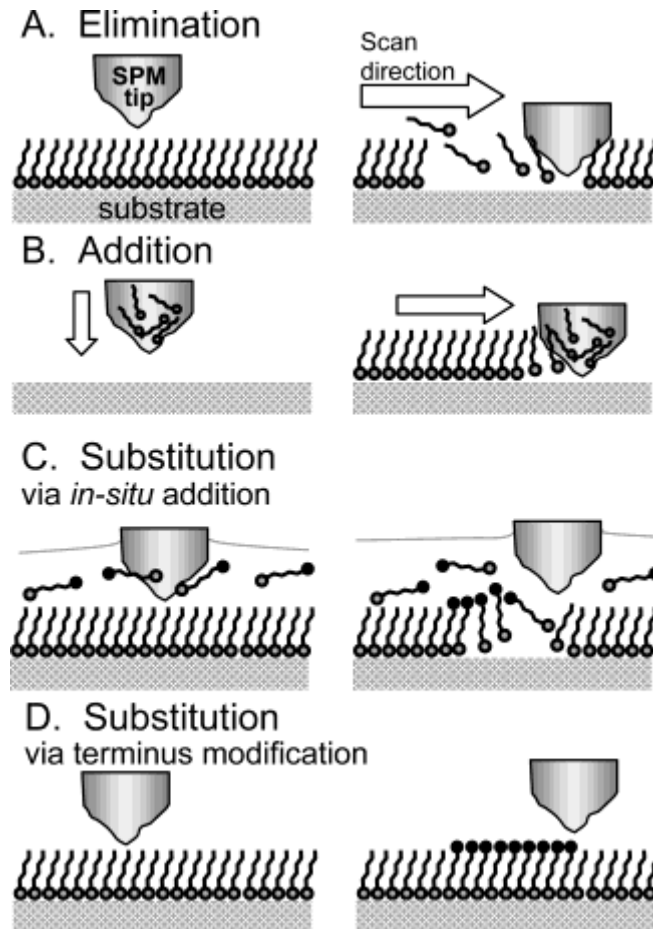


圖 2.3.1 三種 DPN 之不同工作方式示意圖[17]

DPN 其特點在於可以書寫出極細之線條，且可利用環境濕度與探針針尖的接觸面積來改變線條寬度，但是書寫出之字樣的高度通常不高，通常都在 50nm 以下。而本研究便是希望利用過去未曾使用過的光硬化膠來進行改良，製作高度可超越過去 DPN 圖點高度的微型工件。

三、系統設計

本章節主要講解本研究之微型快速原型系統之整體架構，主要分成 2 部份：

1. 程式控制系統，其中程式控制分為 4 個部份，分別講解整體軟體執行流程、Z-approach 漸進系統、方形路徑程式、與自動掃頻系統，最後將其整合。2. 硬體設備架設，展示各硬體架設組合之結果，並介紹微快速原型系統各部份組件。

3.1 系統架構

由於要求尺度極小，雷射與控制方面問題造成不可使用 SLA 等大尺度工件方式進行延伸；且由於 A-Probe 探針極小，所以無法採用與過去 FDM 方式相同之擠膠黏合機制，只能由此延伸[18]。因此，本研究採用「外部沾膠、再點膠」之點針方式進行思考[19]。而在本研究中要求精度極高，所以本研究採用三軸精密位移壓電平台來控制移動，並配合 NI Labview 虛擬儀控軟體操作執行，而圖

3.1.1 為整個系統的流程圖：

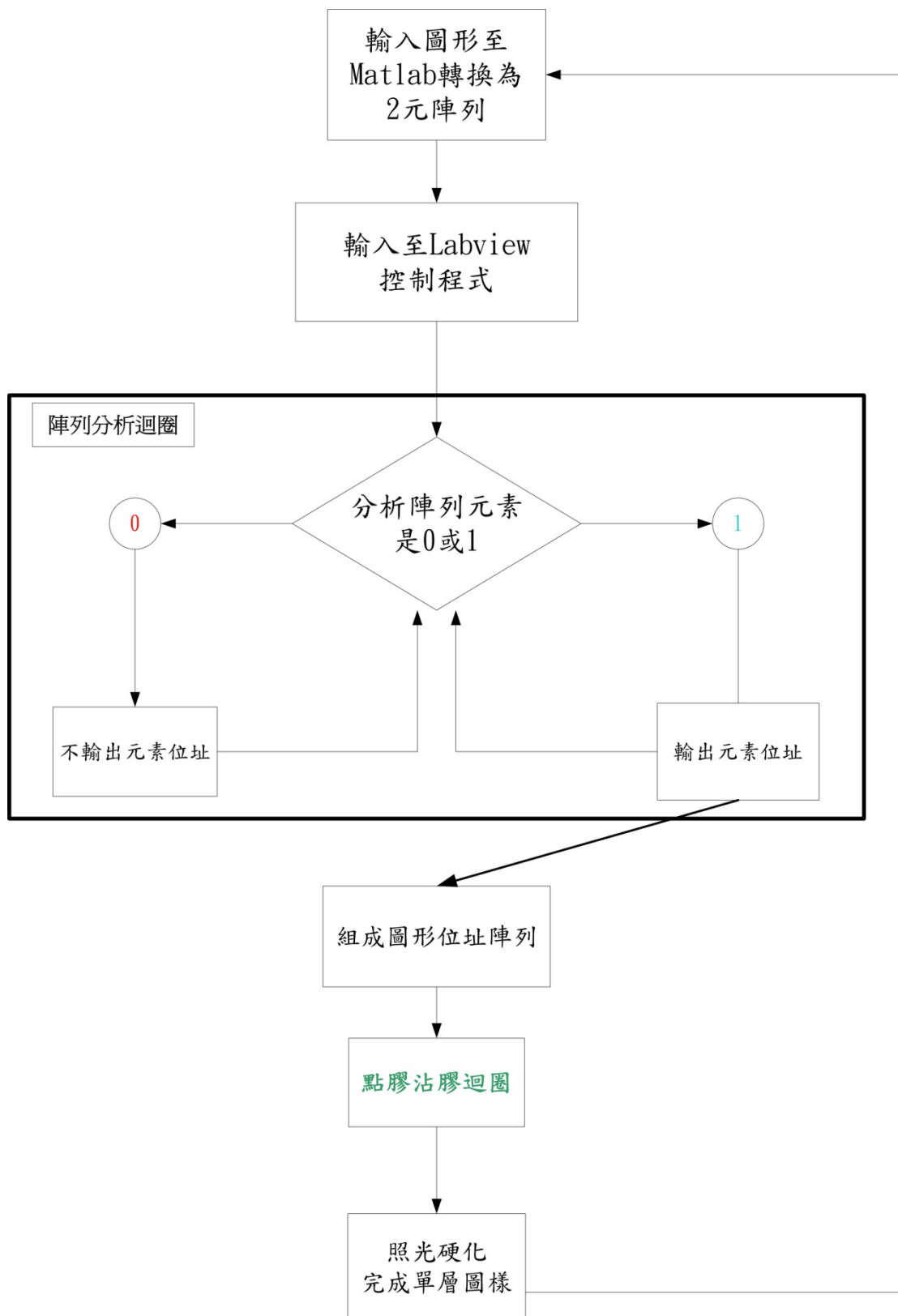


圖 3.1.1 系統控制流程

由於沾膠與點膠迴圈較為複雜，所以以下獨立出來說明。

3.1.1 沾膠與點膠控制

在程式獲取圖形位址陣列後，將用 3 軸位移平台控制 Akiyama 探針進行沾膠；在針尖沾上膠液後，便抬起針尖前往點膠區上方，再放下針尖將膠液點在圖形所需之位置，完成後再移動回沾膠區，週而復始，直至讀取完所有位址。

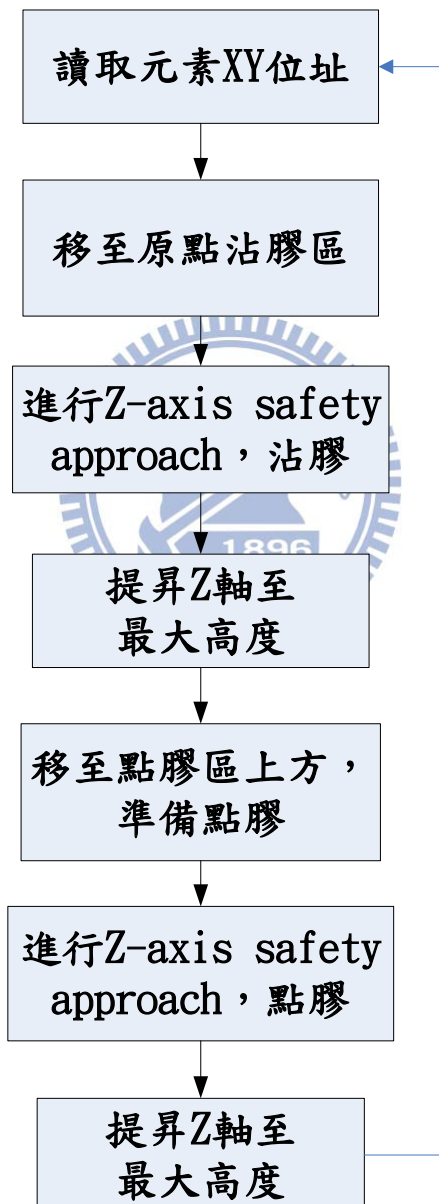


圖 3.1.2 沾膠與點膠迴圈流程圖

而於流程中之 Z-axis safety approach，則獨立於下章節描述。

3.1.2 Z 軸漸進式感測系統 (Z-axis Safety Approach)

由於 AFM A-Probe 針尖極小，肉眼不易觀察，在沾膠與點膠時，需要有一安全系統可確定 Z 軸下降時針尖所沾得之量是過多或是過少，甚至是否已碰觸到目標表面。在此，本研究使用輕拍式 A-Probe 原理：「利用針尖振幅電壓大小變化進行高低差測量」的方式，利用放大電路與 SR-830 鎖相放大器，如圖 3.1.3，

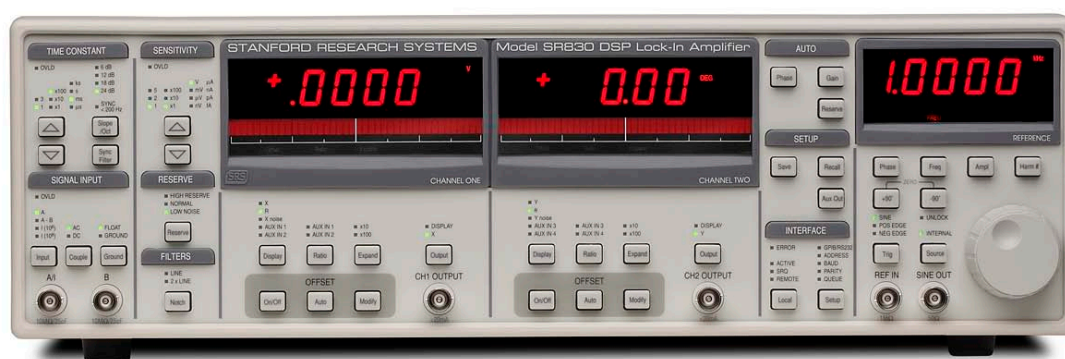


圖 3.1.3 SR-830 鎖相放大器外觀

先找出探針之最大共振頻率與共振振幅，再慢慢迫近膠液的同時讀取振幅的變化；若振幅電壓衰減至某一定百分比時，即確定針尖已沾上膠液或已將膠液點至載台，此時便停止 Z 軸的下降，轉為反向提高 Z 軸至最大高度，進行下一步的動作。此方法可保護探針不會因過度沾膠而無法使用，或是點膠時壓迫在載台上導致針尖斷裂造成探針浪費。

另外，為了避免探針的變化過於靈敏導致誤動作，當針尖因振幅衰減至停止百分比大小後，會再下降一強制浸入/下降深度；此深度較小，用途在於確保針尖已經碰觸至膠液，以進行其他動作。圖 3.1.4 即為 Z-axis safety approach 流程圖。

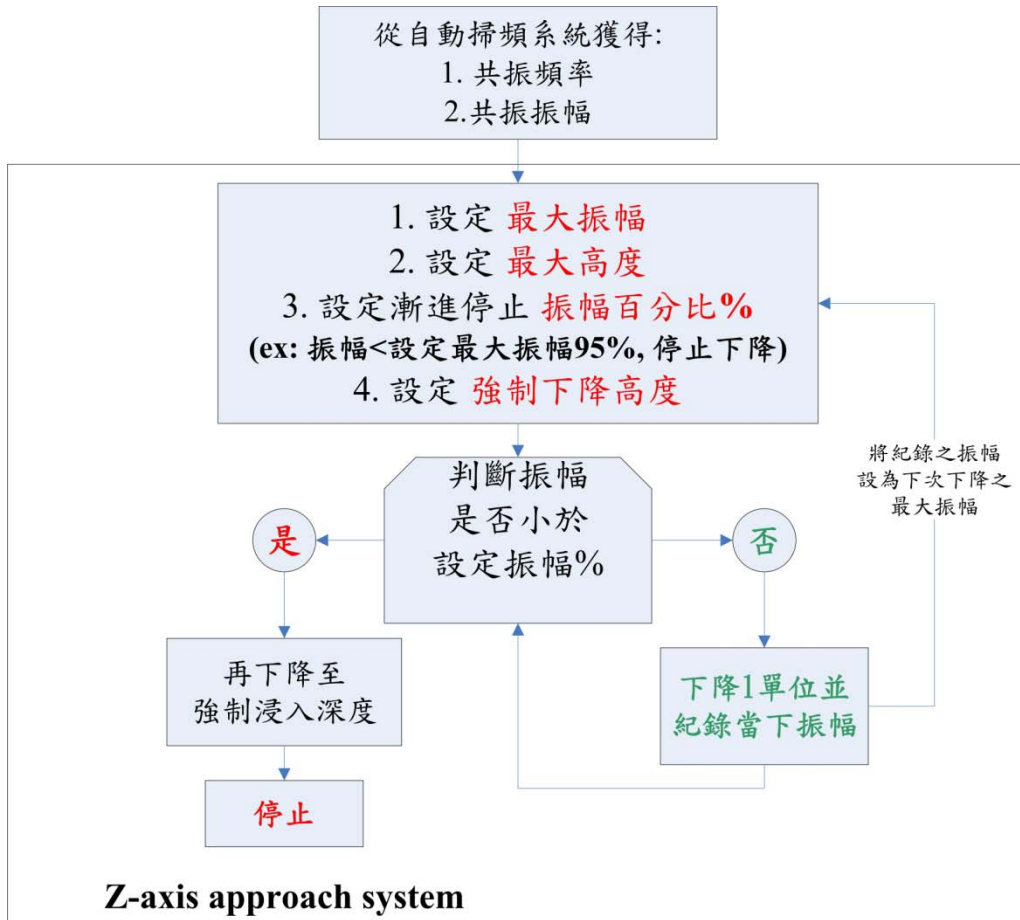


圖 3.1.4 Z-axis safety approach 流程圖

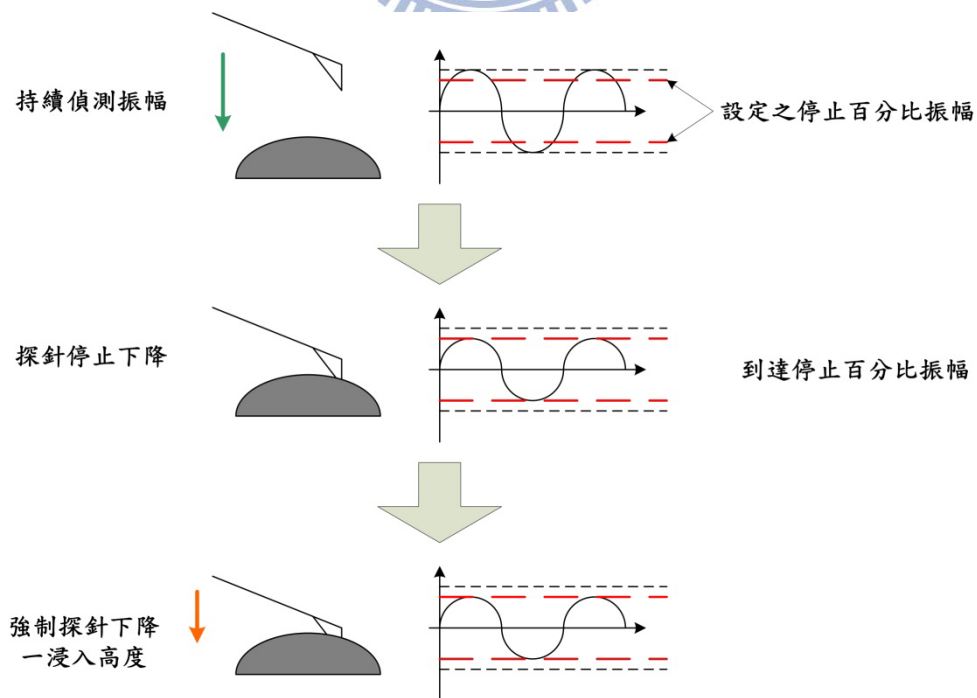


圖 3.1.5 Z-axis safety approach 作動示意圖

3.1.3 方形路徑移動沾膠程式

為了避免在執行完 Z-axis safety approach 後，膠液未充分沾至探針針尖，所以設計了此程式[20]；於下降停止後，讓針尖在膠液上行走一方型路徑，可使針尖確實裹滿膠液。其作動順序如圖 3.1.6

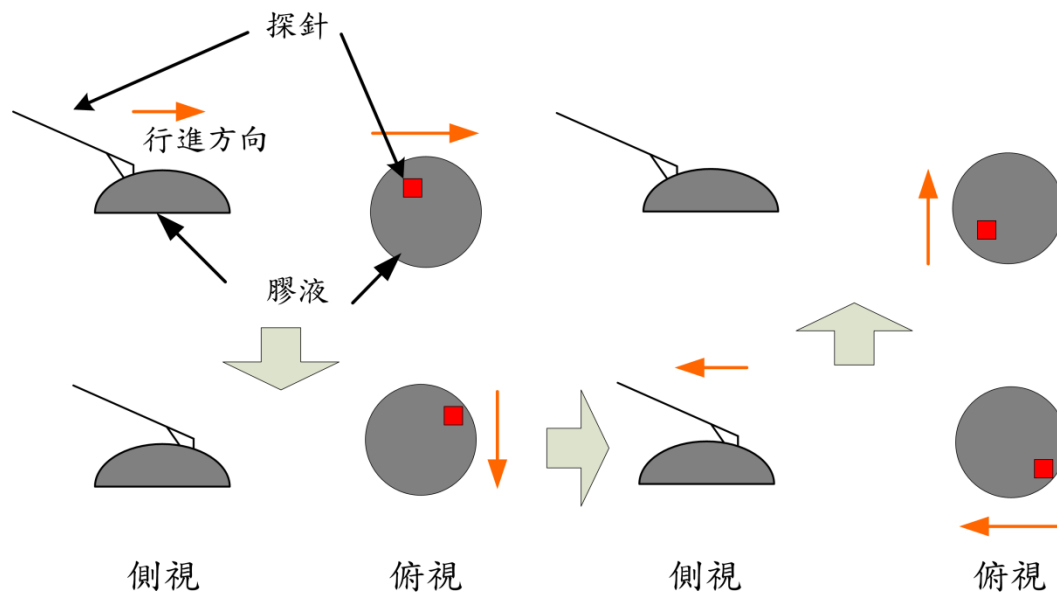


圖 3.1.6 方形路徑動作示意圖

3.1.4 自動掃頻系統

由於每次進行一次 Z-axis safety approach 時，都需要比對原先最大振幅與現在探針振幅之差異大小，所以本研究設計一自動掃頻系統抓取未沾膠或點膠後的最大振幅及其頻率；主要利用 Labview 控制程式控制 SRS SR-830 鎖相放大器進行比對，之後輸出成一振幅陣列，找出最大振幅與其頻率後做為基準振幅，此系統流程圖如圖 3.1.7

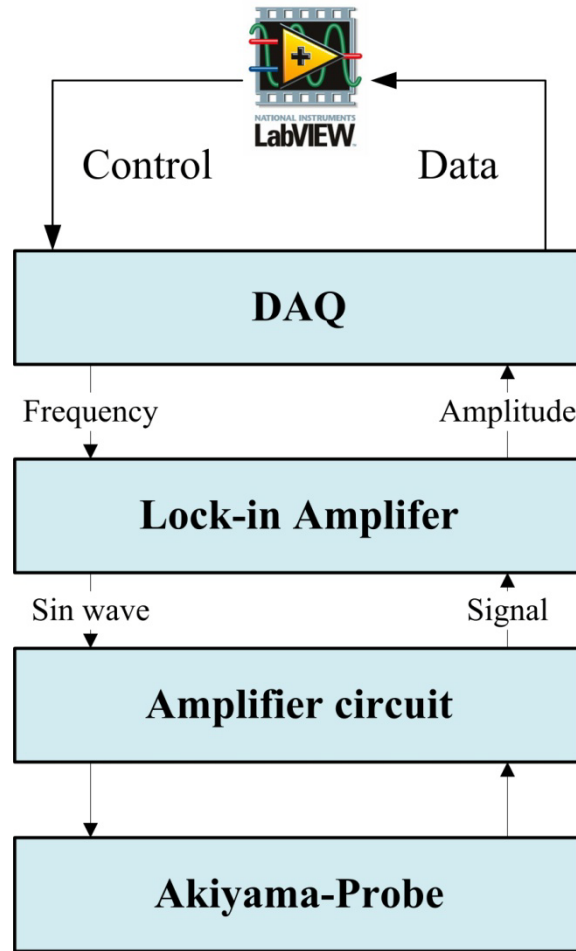


圖 3.1.7 自動掃頻系統流程圖

3.1.5 系統整合人機介面

為了方便控制與監控，本研究將 Z-approach 漸進系統、方形路徑程式、自動掃頻系統、探針移動控制、與觀察用電子目鏡進行整合，製作成一人機介面 Micro-RP System，其優點在於可即時觀察探針移動狀況，並配合額外之同軸光源顯微鏡觀察程式同步監看，人機介面如圖 3.1.8 所示。

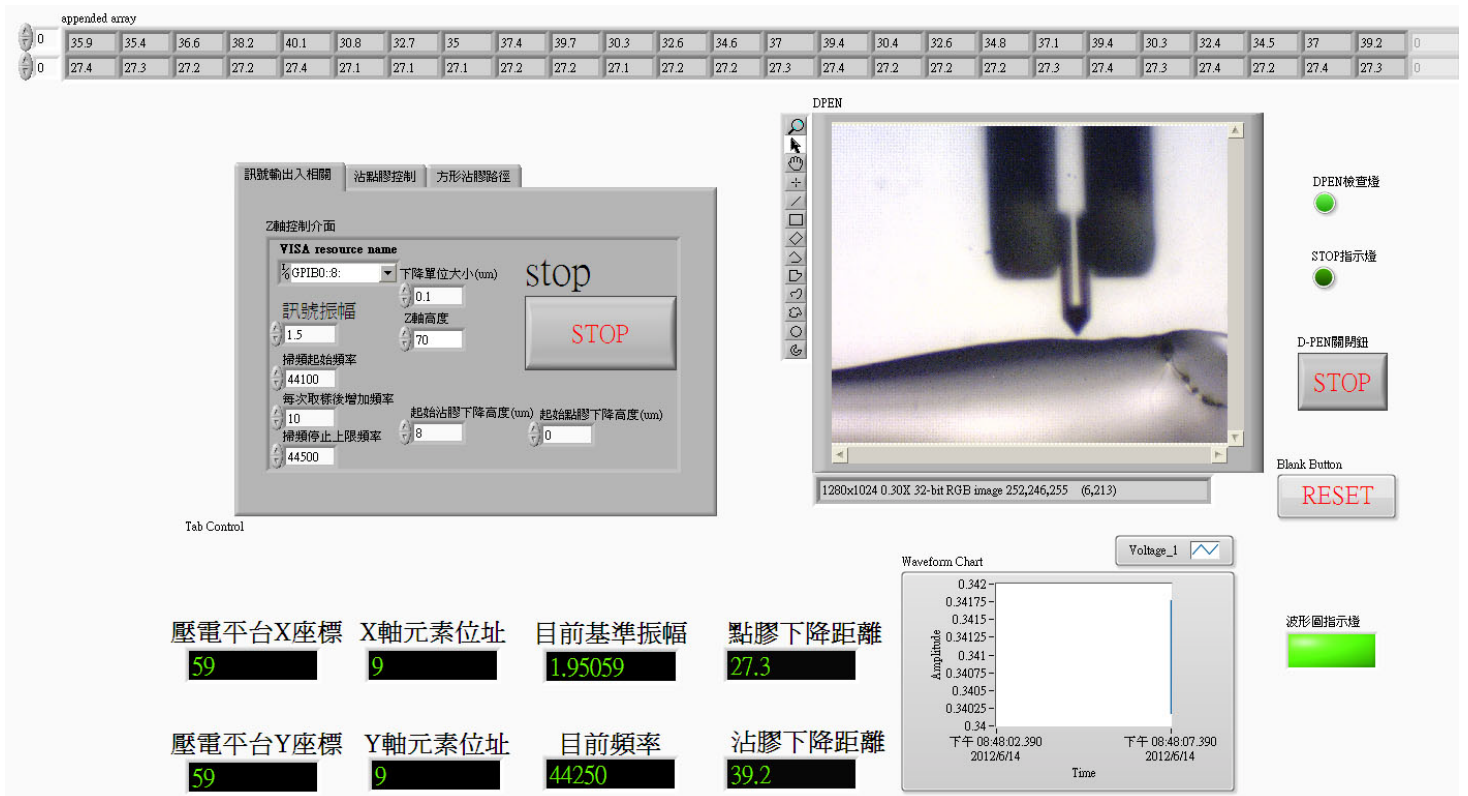


圖 3.1.8 Micro-RP 系統人機介面圖

3.2 機構設計

3.2.1 架構整合

由於進行快速原型測試時需要對成品同時進行觀測，並且從光路系統輸出紫外光源硬化基材，所以本研究的系統主要是固定於 Olympus BX51M 光學顯微鏡之觀察平台，並且側向架設一同軸光源顯微鏡進行觀察；並在 BX51M 的上視光路安裝一紫外光源，於單層圖形完成後照射。圖 3.2.1 是與光學顯微鏡整合之模型圖，圖 3.2.2 為實體之整體系統架構圖：

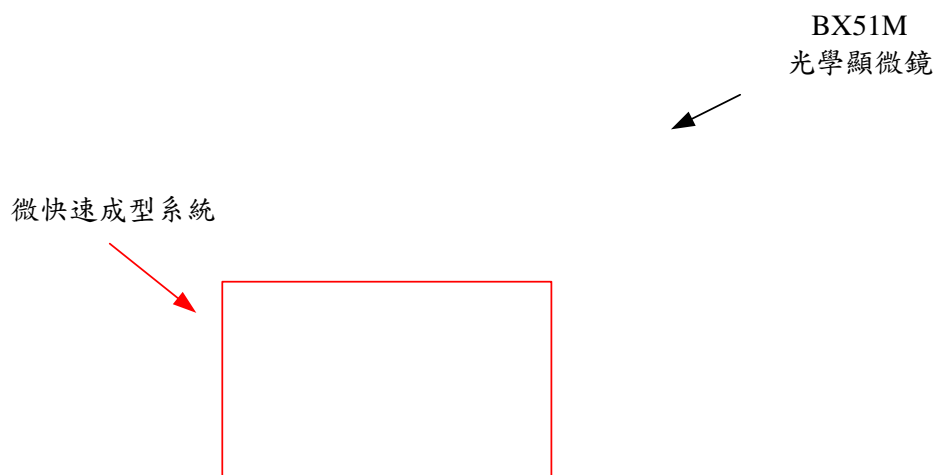


圖 3.2.1 整體架構模型圖

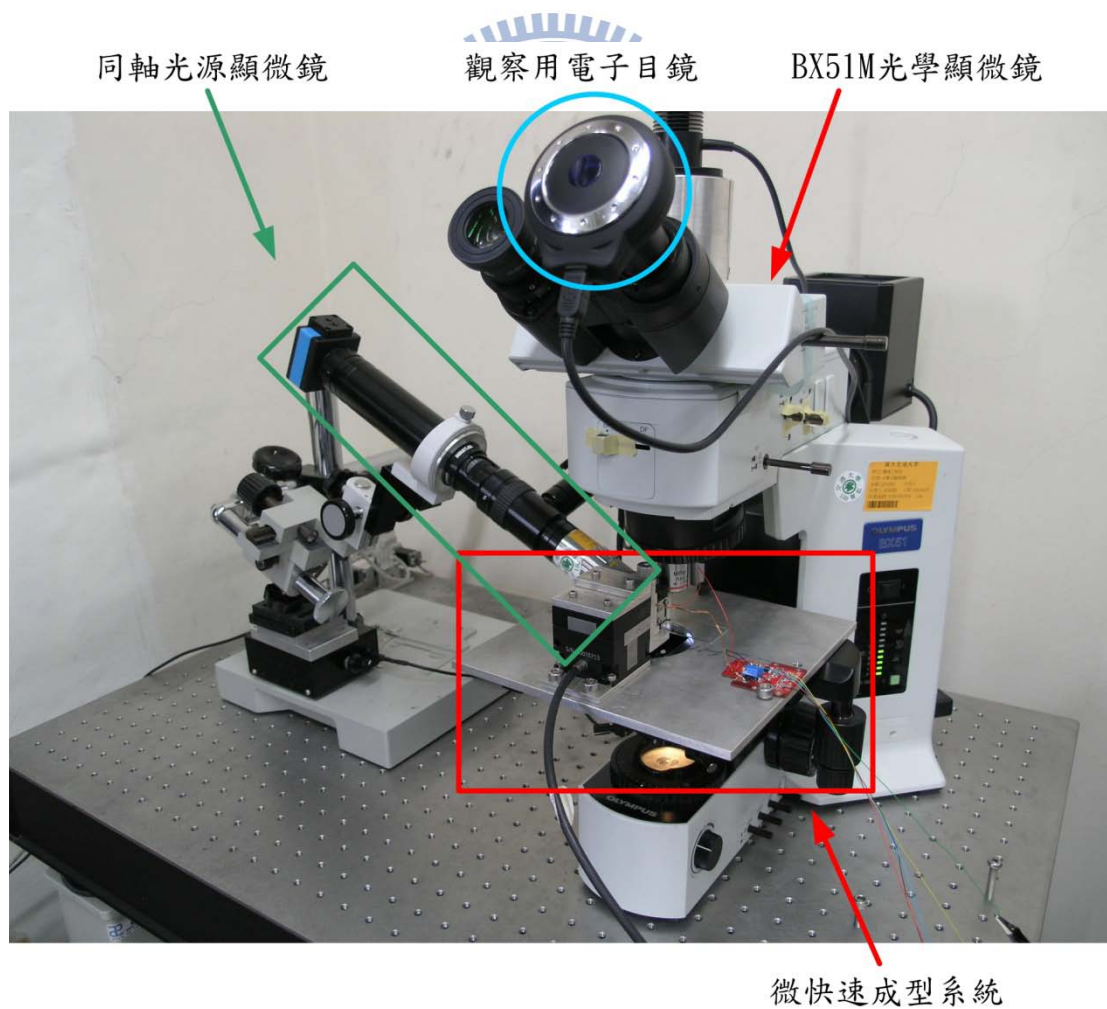


圖 3.2.2 整體架構實體圖

圖 3.2.2 中，BX51M 光學顯微鏡上部有安置硬化用的紫外光源，可視圖形是否完成進行硬化照射；目鏡部份安裝了進行人機介面監看用的電子目鏡，在程式啟動時會自動開啟進行鳥瞰式的監看；而左側的同軸光顯微鏡則可從側面拍攝畫面，即時查看探針的沾點膠動作。其中本研究之微快速原型系統之構造如圖 3.2.3。

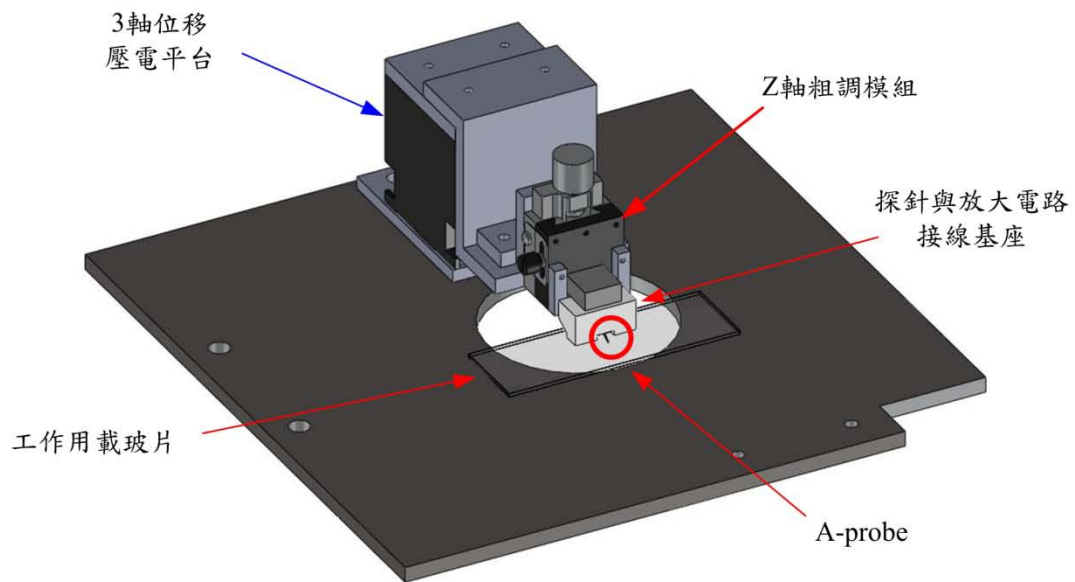


圖 3.2.3 微快速原型系統設計圖

先使用 Z 軸粗調模組與顯微鏡之電子目鏡觀看，將探針高度降至壓電平台行程內後，開始進行作業，最後透過顯微鏡垂直光路系統照射 UV 光硬化單層圖樣，不斷重複直至工件完成。

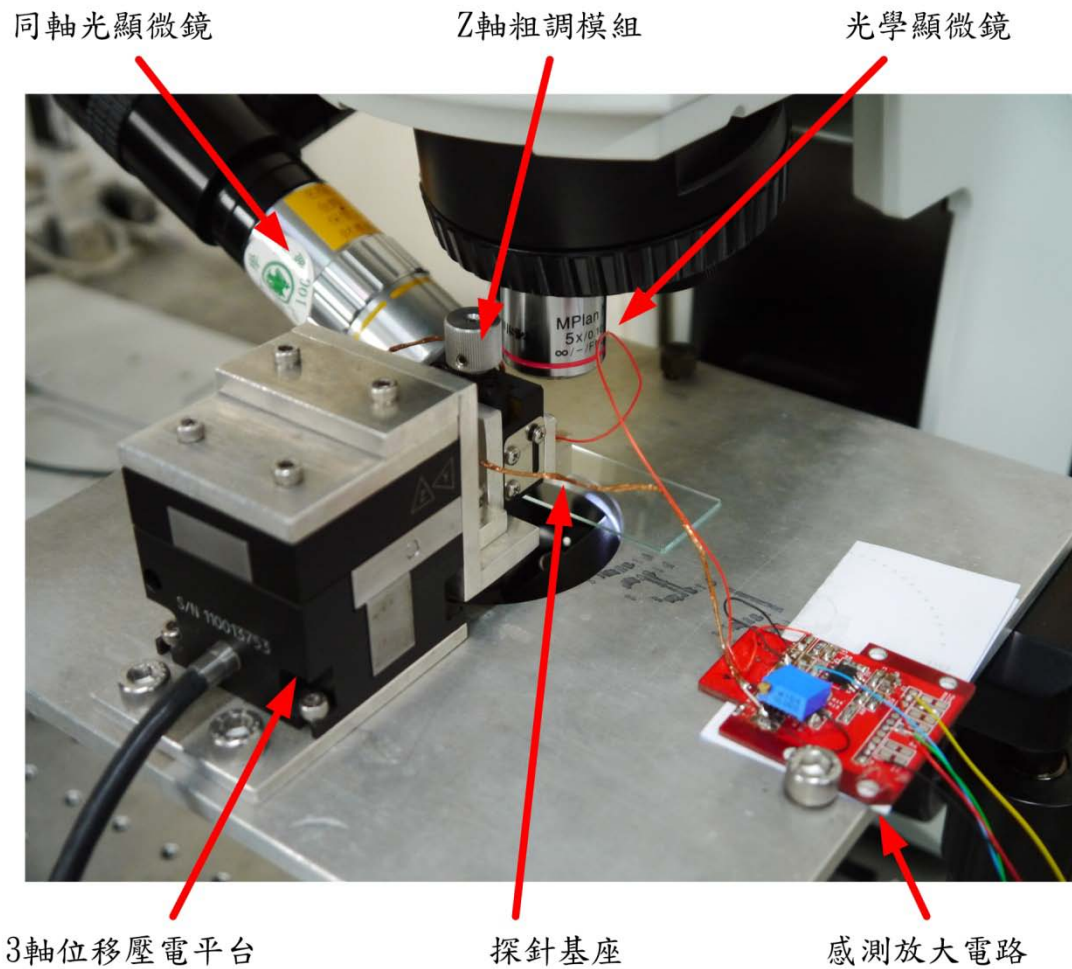


圖 3.2.4 微快速原型系統實體圖

3.2.2 各部硬體架構

3 軸位移壓電平台：

本研究使用之壓電平台為 PI 之 P-611 三軸精密位移壓電平台[21]，透過 DAQ 卡連結 3 軸控制器來進行控制探針的 XYZ 方向調整，總行程 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ ，內建應變規位移感測器，其移動精確度可達 1nm，外觀如圖 3.2.5。

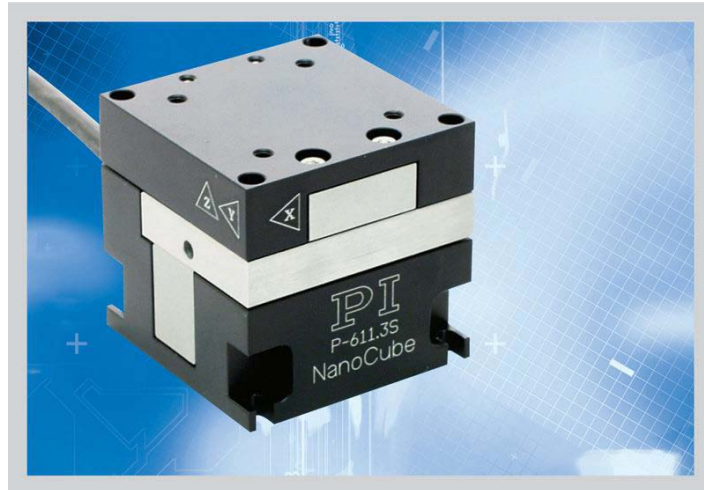


圖 3.2.5 PI 之 P611-S 3 軸精密位移壓電平台[21]

BX51M 光學顯微鏡：

如圖 3.2.6，為 Olympus 公司出品之光學顯微鏡，本研究主要是使用於系統執行程式時之動作觀察監看，最大可使用 100x 物鏡觀察，然其物鏡工作距離極短，本實驗使用 5 倍物鏡即時觀察，於單層圖樣完成後再進行 10x、50x、100x 物鏡切換進行概略觀察。



圖 3.2.6 Olympus BX51M 光學顯微鏡

MEM-1300 D-PEN 電子目鏡：

如圖 3.2.7，1/2”CMOS 感測元件，130 萬畫素，有效解析度可達 1280×1024，主要是運用來即時監測探針之 X、Y 軸動作，在單層圖樣完成後，也可利用其來觀察完成圖形之圖樣變化。



圖 3.2.7 MEM-1300 D-PEN 電子目鏡

Navitar 同軸光源顯微鏡：

利用同軸之光源照射工作區，進而從側面來即時監看探針的 Z 軸移動狀況，前頭裝有 10x 長工物鏡，如圖 3.2.8；後部安裝有 IMAGINGSOURCE 之 DFK-61AUCO2 CMOS 數位相機，可同時將沾點膠動作錄下方便實驗後重複觀看實驗中之情況，即圖 3.2.9，圖 3.2.10 則為實驗時之側向拍攝即時畫面截圖。

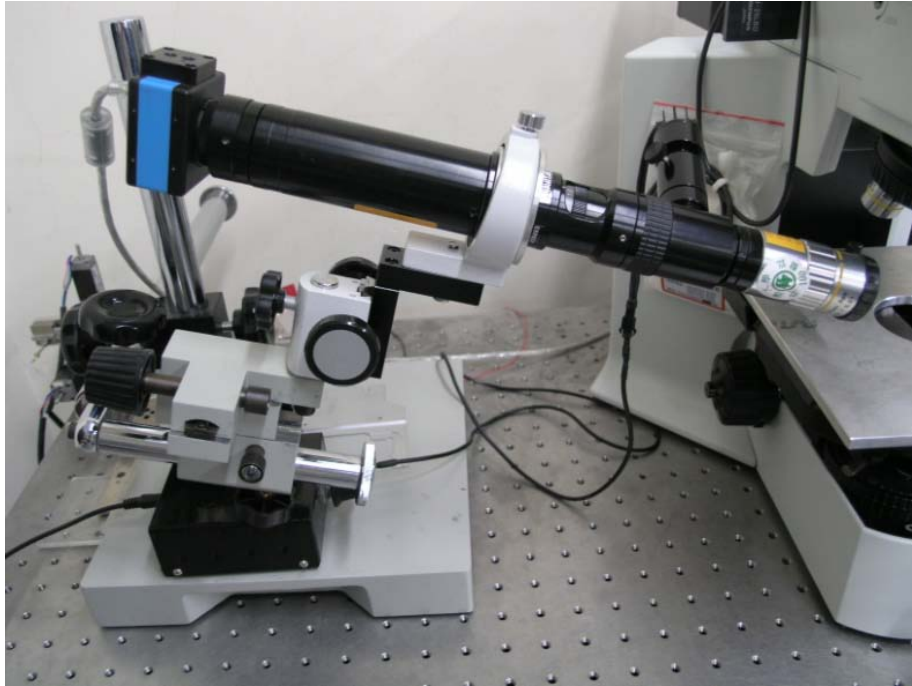


圖 3.2.8 Navitar 同軸光源顯微鏡



圖 3.2.9 DFK-61AUCO2 CMOS 數位相機

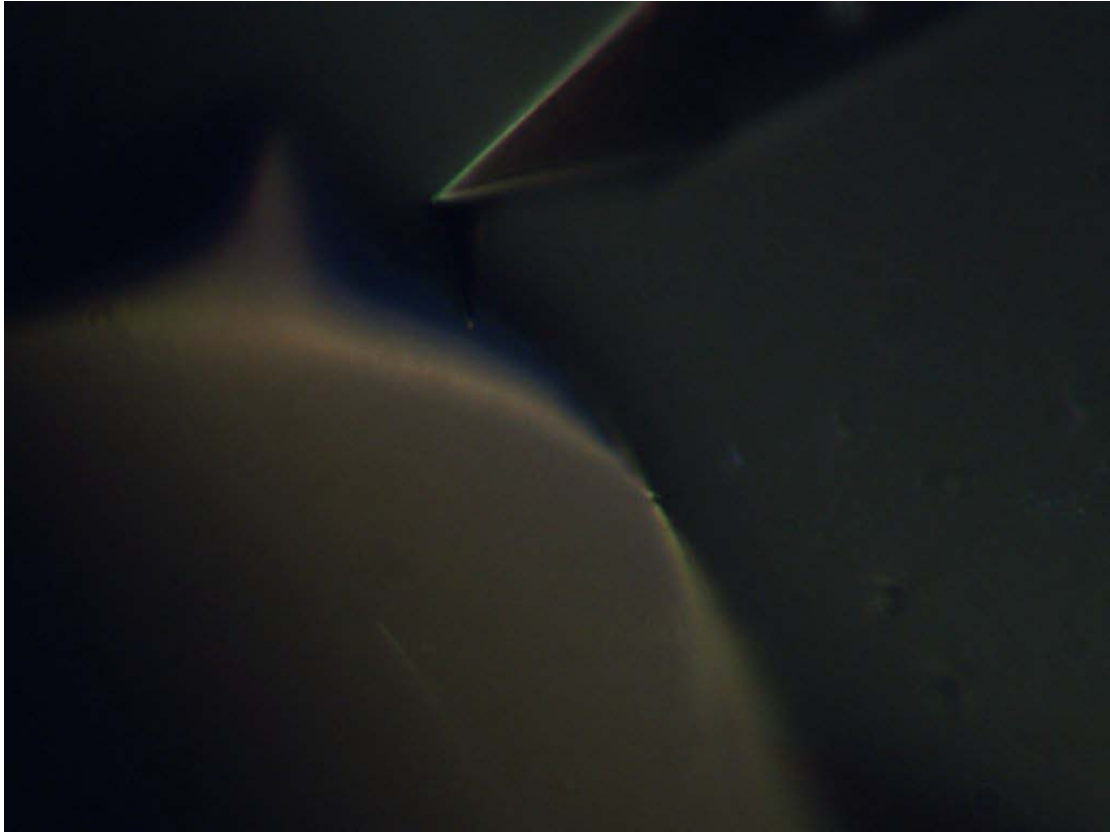


圖 3.2.10 實驗時之側向拍攝即時畫面截圖

M365-L2 紫外光平行光源：

本研究使用 ThorLab 出品之 M365L2-C1 UV 光源，其主要波長為 350nm，符合一般紫外光硬化膠之波長，且利用其平行光之效果，直接從上視光路照射並聚焦於工作載玻片上，確保圖形能完全硬化，圖 3.2.10 為其外觀。



圖 3.2.11 M365L2-C1 紫外光平行光源

訊號放大電路：

本研究中，由於需要將輸入與輸出之 Akiyama 探針訊號放大，所以設計一訊號放大電路，以此將訊號最佳化，如圖 3.2.11 所示，當參考訊號由鎖相放大器輸入後，會使得 Akiyama 探針之石英音叉懸臂樑產生振動，接著輸出滯放大電路轉換成電壓，最後由鎖相放大器讀取並過濾雜訊，最後由 DAQ 卡接收輸入至電腦程式中。

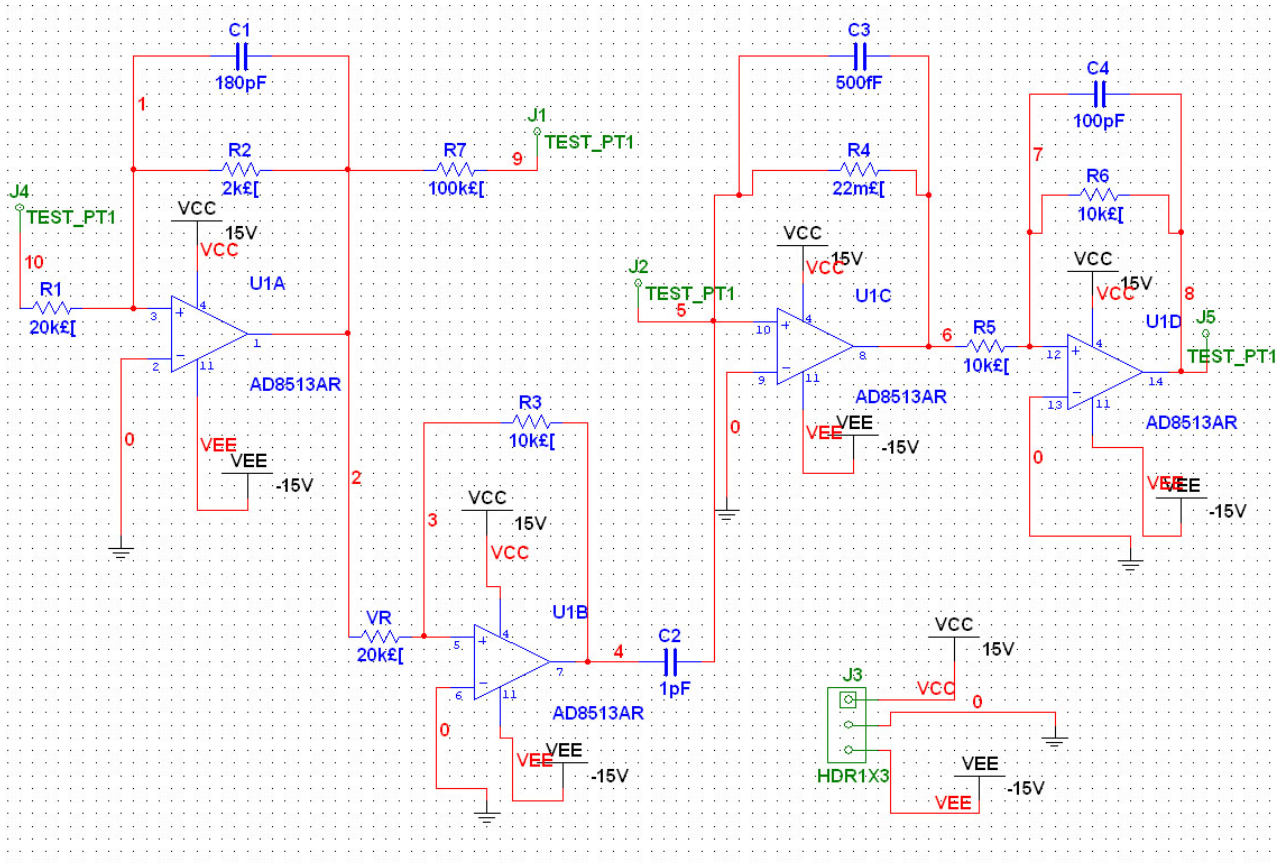


圖 3.2.11 訊號放大電路圖

四、實驗

4.1 實驗方法

4.1.1 機電整合架構

本研究整合了各項機電整合儀器，包括鎖相放大器、三軸位移壓電平台、AFM 探針、監測用電子目鏡、同軸光源顯微鏡、一般光學顯微鏡等，利用此架構進行下列相關的實驗，圖 4.1.1 為機電整合的整體架構圖。

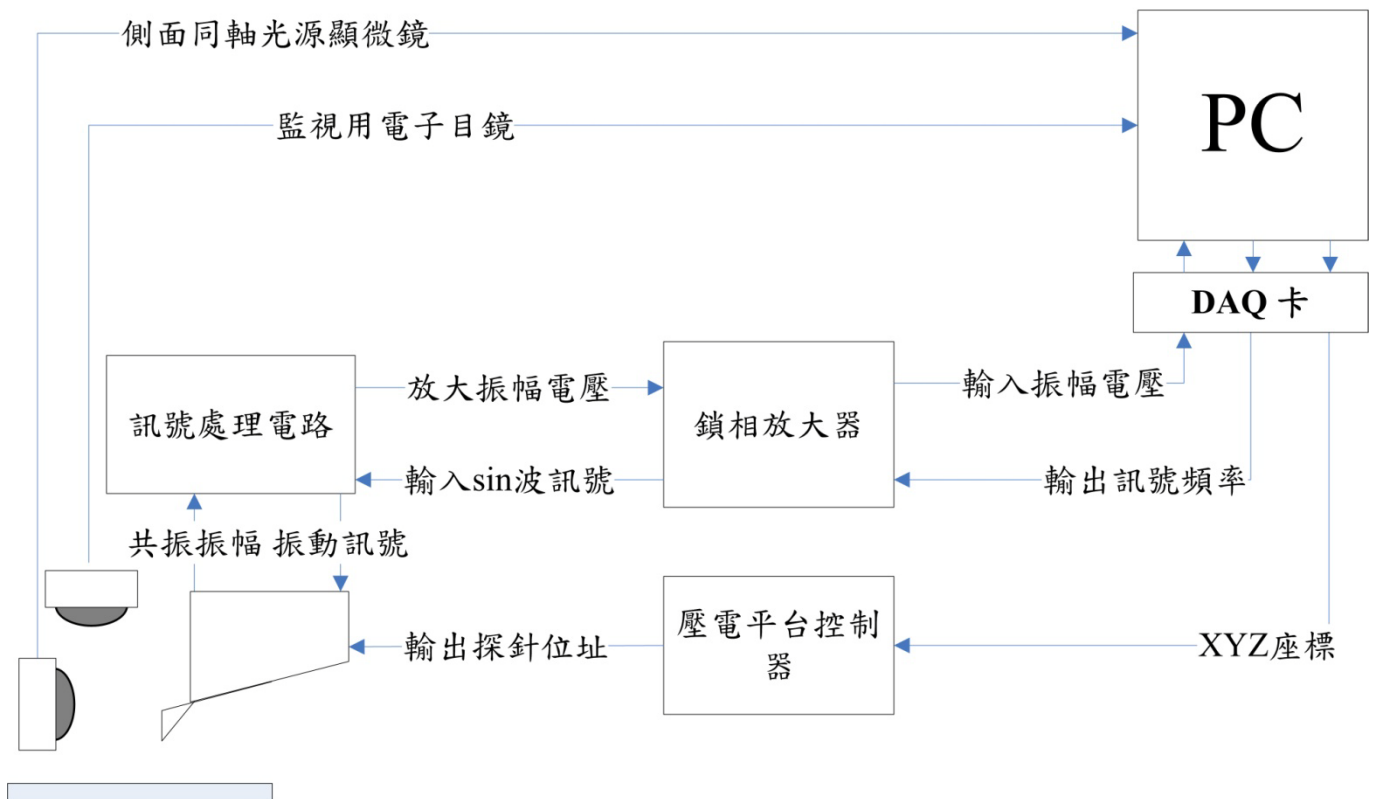


圖 4.1.1 機電整合整體架構圖

4.1.2 膠液選擇

本研究中選擇之光硬化膠需要以下幾種條件：1. 硬化時間不可過長，以免照光時間過久導致整體花費時間過久。2. 膠液內聚力不可過高，以防探針於沾膠時無法將膠液沾起。3. 膠液也不可過稀，若過稀則會導致點膠時膠點過大，造成膠點互相掩蓋。4. 膠液需具有些許顏色或反射率高，在光學顯微鏡下較容易觀察。本研究根據以上幾點，選擇使用 LTE 之 580370V 紫外光硬化膠，如圖 4.1.2，其顏色為粉紅色，黏滯度為 500-800cps，光硬化波長為 350nm，照光後硬度為 D67±2，硬化條件為 1000-1500mj/cm²，黏滯度適中，硬化後硬度適中，適合本研究之實驗使用。



圖 4.1.2 本實驗使用之 580370V 光硬化膠

4.2 各項實驗

4.2.1 探針最大共振振幅與頻率

為了試驗自動掃頻系統之掃頻速度與穩定性，本研究利用機電整合後之微型快速原型系統對市售之 Akiyama-Probe 進行掃頻，並與供應商提供之探針資訊進行比對，找出 Akiyama-Probe 的最大共振頻率。利用鎖相放大器與自動掃頻系統進行實驗，從供應商提供資料，探針之最大共振頻率約在 40-50kHz，而每支 A-Probe 都有些許差異；若針尖斷裂，則最大共振頻率將降至 32.67kHz，即石英音叉懸臂樑之最大共振頻率。

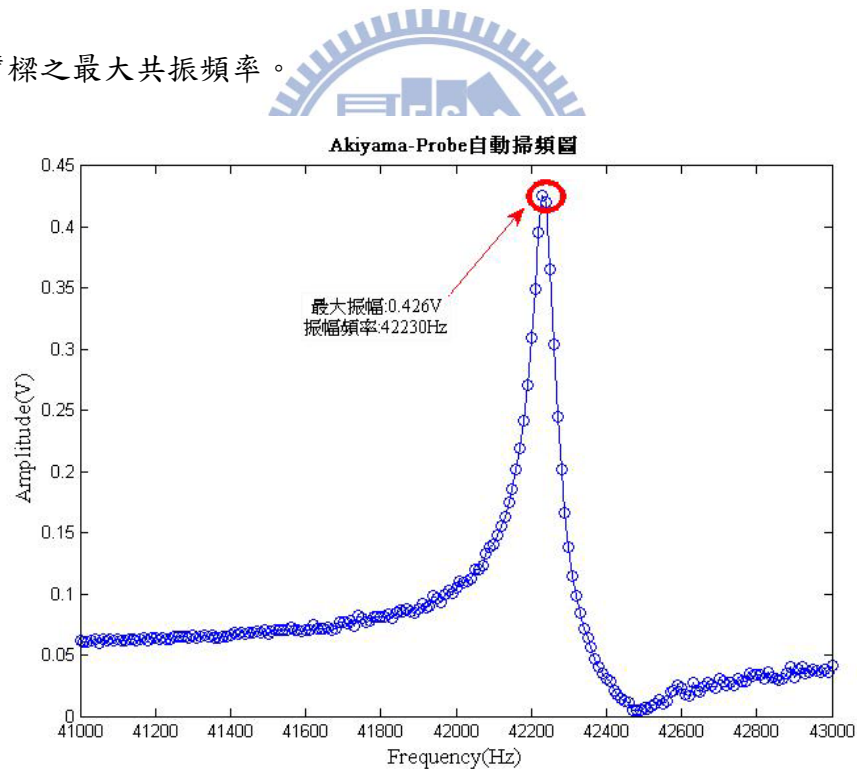


圖 4.2.1 A-Probe 掃頻結果圖

從圖 4.2.1 可知，實驗得知此探針之最大共振振幅出現在約 42.23kHz，

其最大振幅為 50.426V，符合供應商資料。

4.2.2 Akiyama 探針力圖實驗

為了瞭解 Akiyama 探針在接觸到膠液或工作用載玻片時的振幅變化幅度，本實驗對 Akiyama 探針對載玻片進行直接壓迫，並在振幅低於 70% 後停止，以瞭解其探針振幅變化，圖 4.2.2 為 Akiyama 探針之力圖。

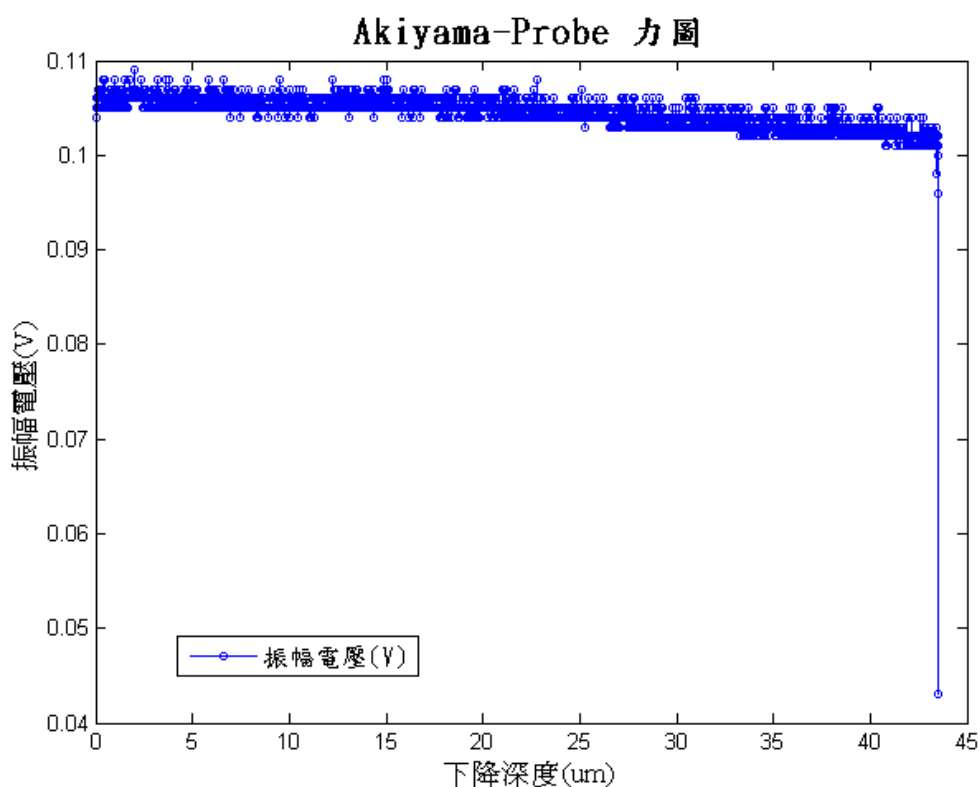


圖 4.2.2 A-Probe 探針力圖

圖 4.2.2 的實驗中，未接觸至在玻片時 Akiyama 探針的振幅約為 0.105V 上下；但在接觸到載玻片後，其振幅迅速下降至 0.043V，變為未沾膠之振幅的 40%，可知 Akiyama 探針在接觸到其他物品後，振幅變化相當的靈敏。

4.2.2 Z-axis safety approach 測試

由上一實驗，我們已經知道 Akiyama 探針的靈敏振幅變化，而本實驗目的

便是在於利用其靈敏變化來測試 Z-axis safety approach 程式是否能正確運作，所以對沾膠前與沾膠後之探針兩者進行自動掃頻近行比對，瞭解探針在沾滿膠液後之頻率與振幅變化，其共振振幅掃頻圖如 4.2.3。

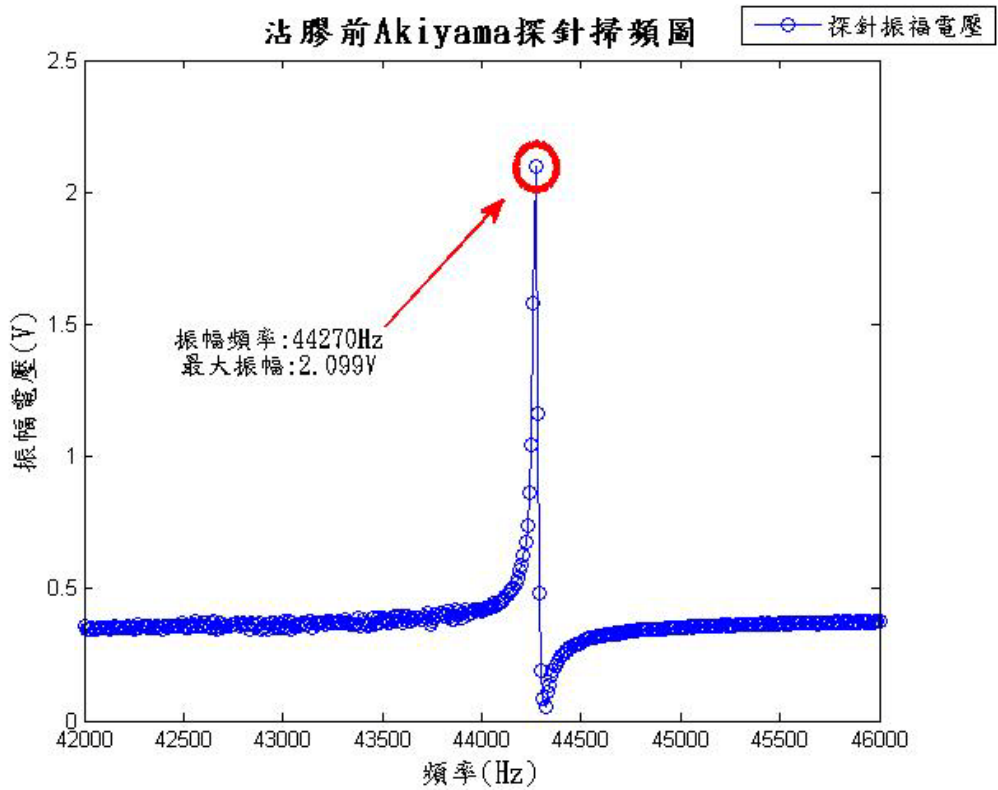


圖 4.2.3 沾膠前探針掃頻圖 (x 軸單位:Hz, y 軸單位:V)

其最大共振頻率在 44270Hz，共振振幅為 2.099V。本實驗將基準振幅設定為最大共振振幅，振幅偏差值 90%，所以當振幅降至 $2.099 \times 90\% = 1.889\text{V}$ 時，即會停止 z 軸的下降動作。在開始執行 Z-axis safety approach 程式後，實驗發現當懸臂樑開始碰觸到膠液時，振幅會大幅下降至 0.06V，遠低於原本設定 90% 的偏差值，所以使程式立刻停止下降，而再抬高回原來最大高度時，其掃頻圖如圖 4.2.4。

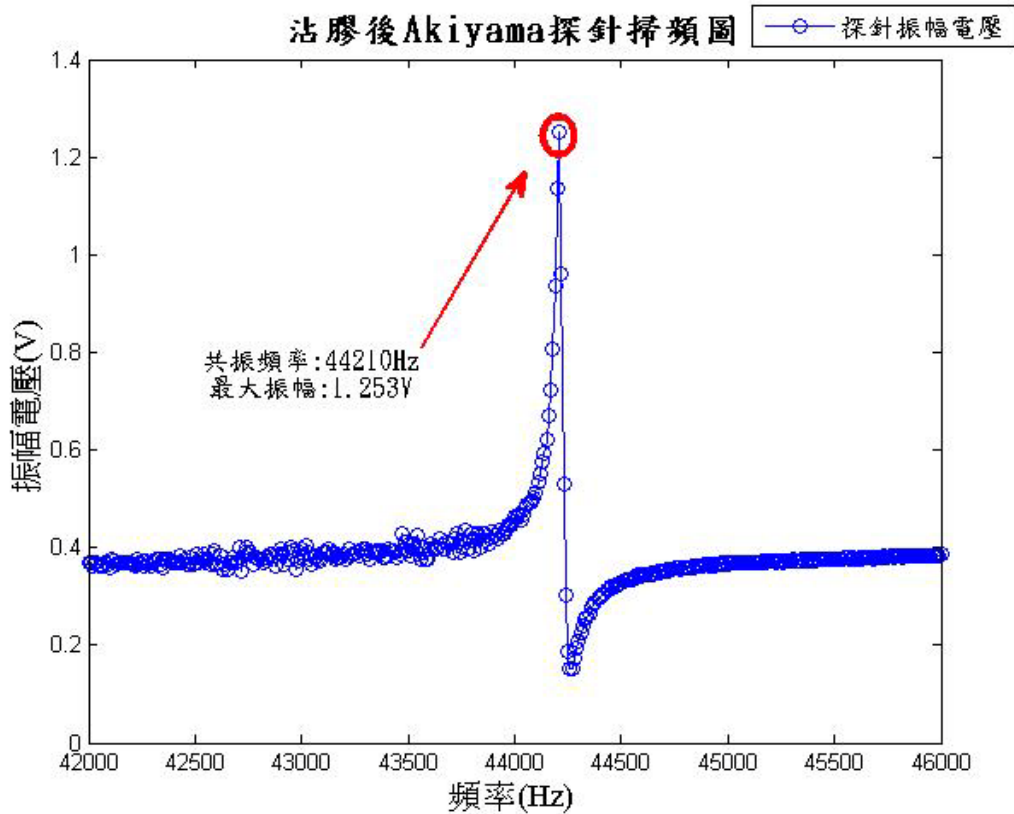


圖 4.2.4 沾膠後探針掃頻圖 (x 軸單位:Hz, y 軸單位:V)

可從圖中看出其振幅降至 1.253V，而共振頻率也稍微前移至 44210Hz，證實假設沾膠後振幅下降是正確的，且 Z-axis safety approach 程式可成功執行。

4.2.3 膠點 5×5 點圖實驗

本實驗的目的在於檢驗 Micro-RP 系統之 Labview 機電控制程式整合狀況，利用 5×5 之方形點陣圖進行實驗如。其控制方法為，利用改變 Z-axis safety approach system 沾膠與點膠的強制浸入/下降深度，找出可使用的一組控制變數，完成一完整的圖形。

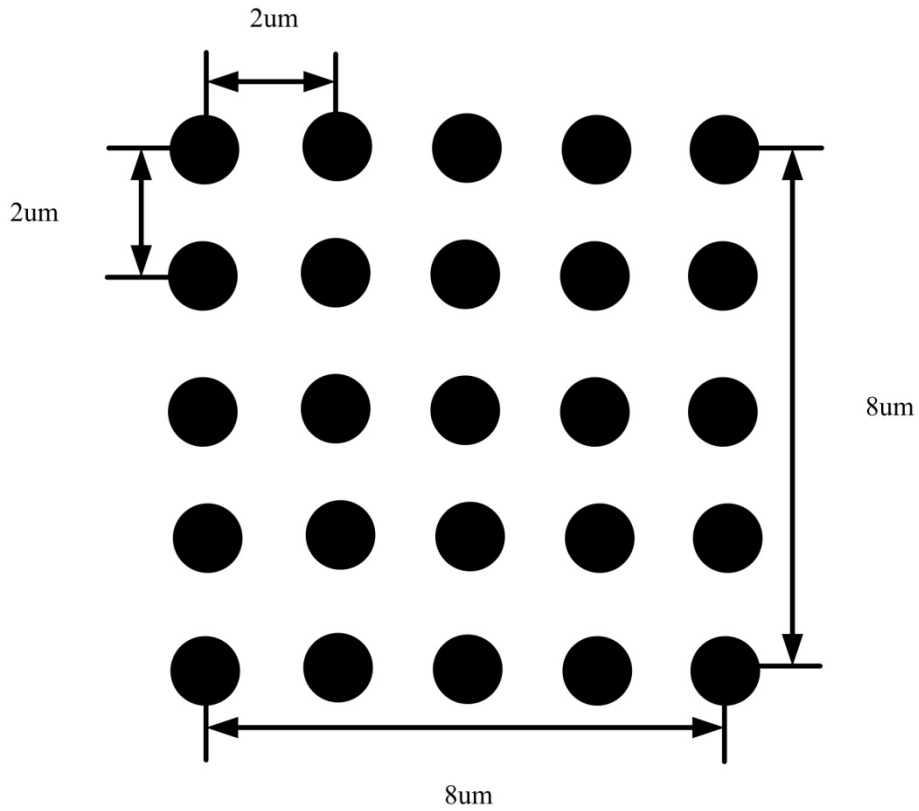


圖 4.2.5 實驗輸入之 5x5 點陣圖

在使 Micro-RP 系統在工作用載玻片點出相同之 5x5 點圖，如圖 4.2.5，其各點間隔為 2µm，以方便使用光學顯微鏡先行大略觀察，如圖 4.2.6。並檢驗系統的可行性，其結果將在 4.2.4 節原子力顯微鏡掃圖進行探討。

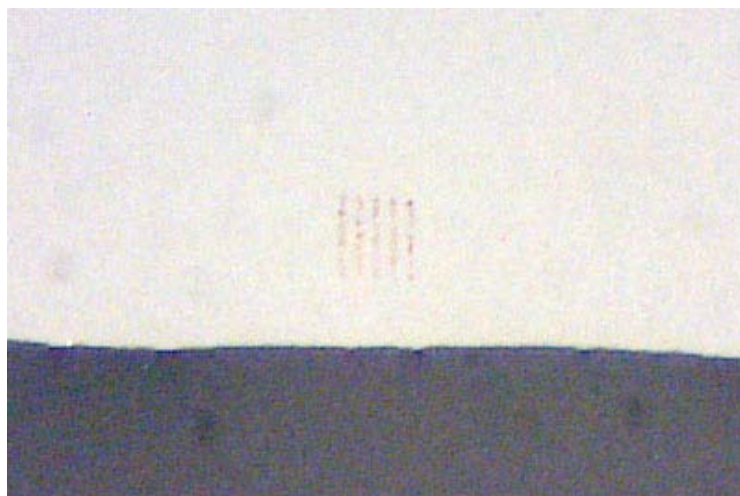


圖 4.2.6 50x 物鏡下之膠點點陣圖

4.2.4 AFM 截面掃圖研究

本實驗是將由 5×5 膠點點圖實驗之完成品照光硬化後，利用 AFM 掃圖觀察其樣品表面形貌，確認點出圖形之情況，並對其進行截面高度分析，瞭解點出之膠點之成果與大小重複性是否足夠。本實驗之樣品在完成點圖後，先透過光學顯微鏡 50X 物鏡照射 3 至 5 分鐘，而後在放入 AFM 掃圖前再直接照射 3 至 5 分鐘紫外光源，圖 4.2.10 為 AFM 掃圖之結果：

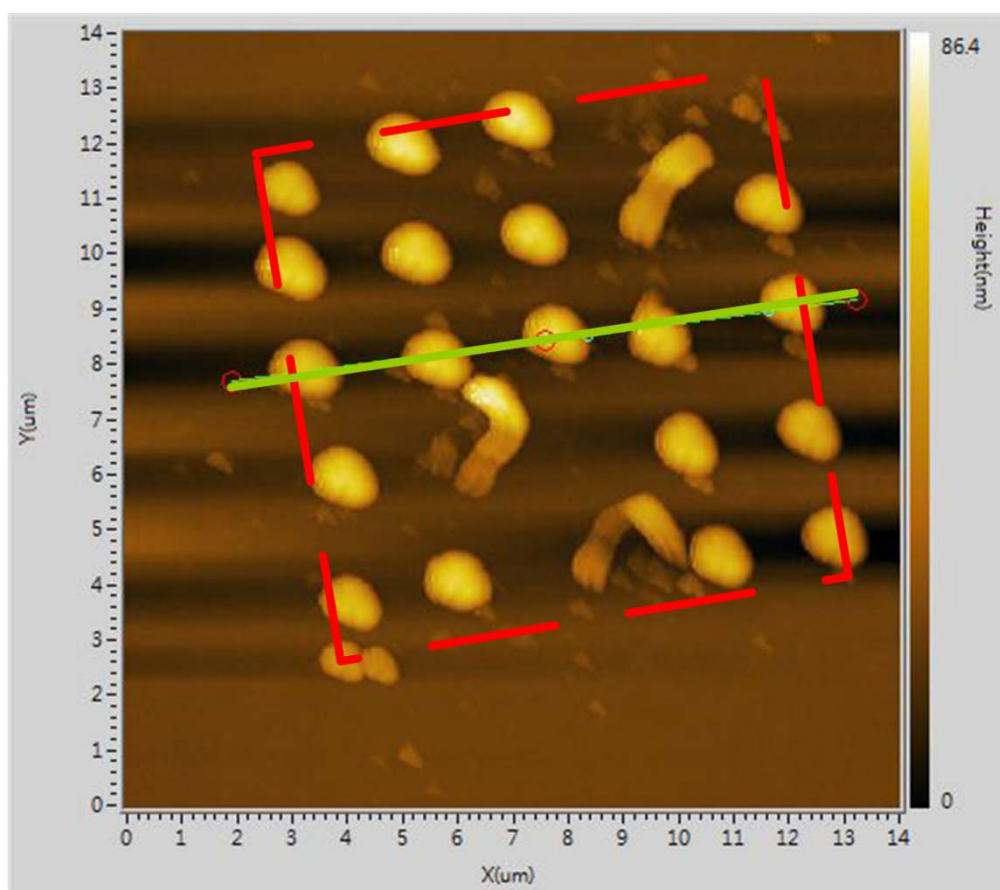


圖 4.2.7 AFM 掃圖結果

此圖的控制條件為：沾膠強制浸入深度 $8\mu\text{m}$ ，點膠強制下降深度 $0\mu\text{m}$ 。從圖中可以看到，圖形呈現方形點陣圖，與當初輸入之圖形相同，而圖中 3 個紅圈

所圈出的條狀圖形為多次掃圖後結構破壞的膠點，實際與當初 5×5 之 25 點圖圖形只缺少 3 個點。從掃圖結果來看，各膠點大小約略都在直徑 1 μ m 左右，算是相當的小，且排列之偏移誤差都在 1 μ m 以內，各點圓心相距約 2 μ m，與原始輸入之 5x5 點陣圖設定相差無幾。之後本實驗對綠線之 5 點截面之高度進行研究，並將其數據繪成圖形，如圖 4.2.11：

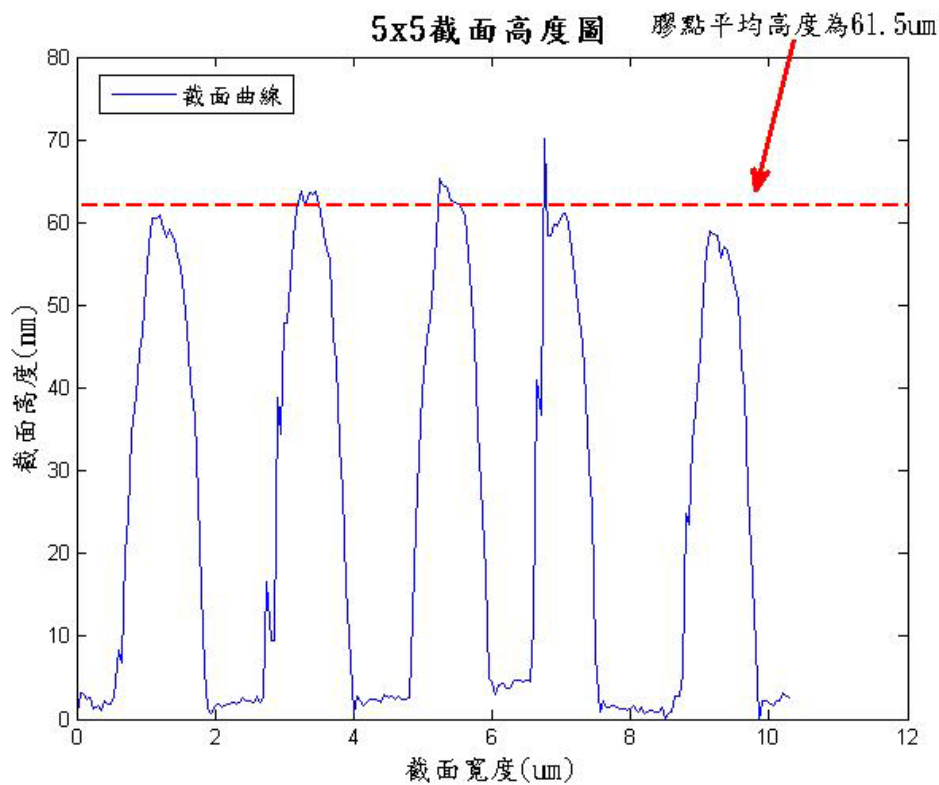


圖 4.2.8 掃圖截面繪圖

在取高度前 25 點較大值取平均後，高度均值為 61.5 μ m，從圖中來看，各點大略確實都在 61.5 μ m 上下，從此可得之本系統的膠點重複性極佳，可確保在單層圖形完成後，各區塊的高度差異極小，使下層圖形繪製時不至於落差過大。接著我們對該樣品進行 3D 建模繪製，可得圖 4.2.12。

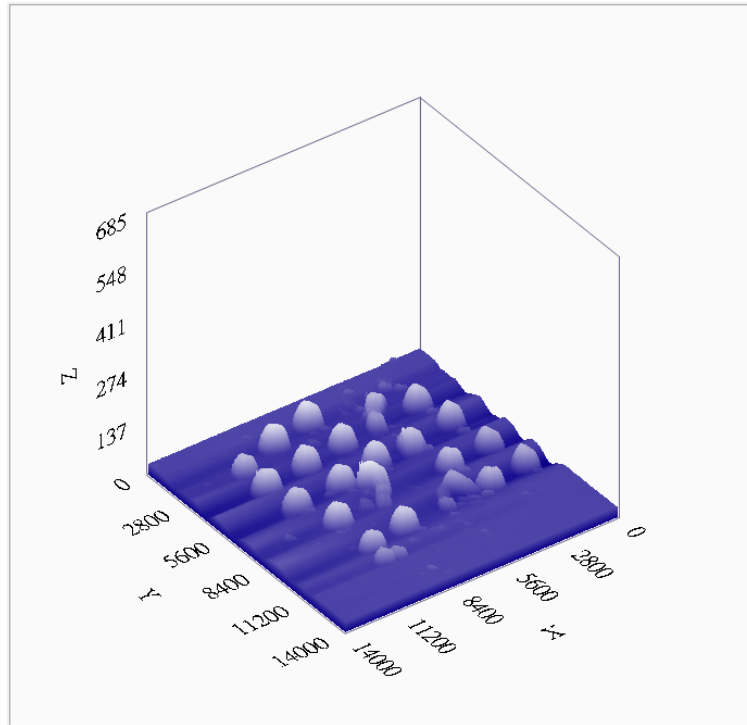


圖 4.2.9 樣品掃圖 3D 建模圖 (單位:nm)

從 3D 建模圖中也可看出，各點高度相當，大小外型也相當接近，可以確定 5x5 點陣圖實驗點出之樣品各點重現度相當高，可以確保下層圖形在堆疊時高度落差不大，可持續的進行繪製。

4.2.5 下降穩定度實驗

本實驗的目的在於，監測 Z-approach 時探針總下降深度的重複狀況，檢驗沾膠與點膠時探針的穩定性，進而瞭解探針能否在實驗時保持統一的沾點膠量。本實驗利用 5x5 點圖圖形之 X&Y 軸位址座標來控制探針強制浸入與下降深度，確保探針在接觸膠液表面後確實沾到膠液，以模擬工作情況下的探針振幅的改變；並將探針之停止百分比設為各 95%，各控制點的強制下降改變單位差為 0.2 μ m，紀錄沾點膠後之深度變化，以研究其重複性。圖 4.2.7 為本實驗的流程圖。

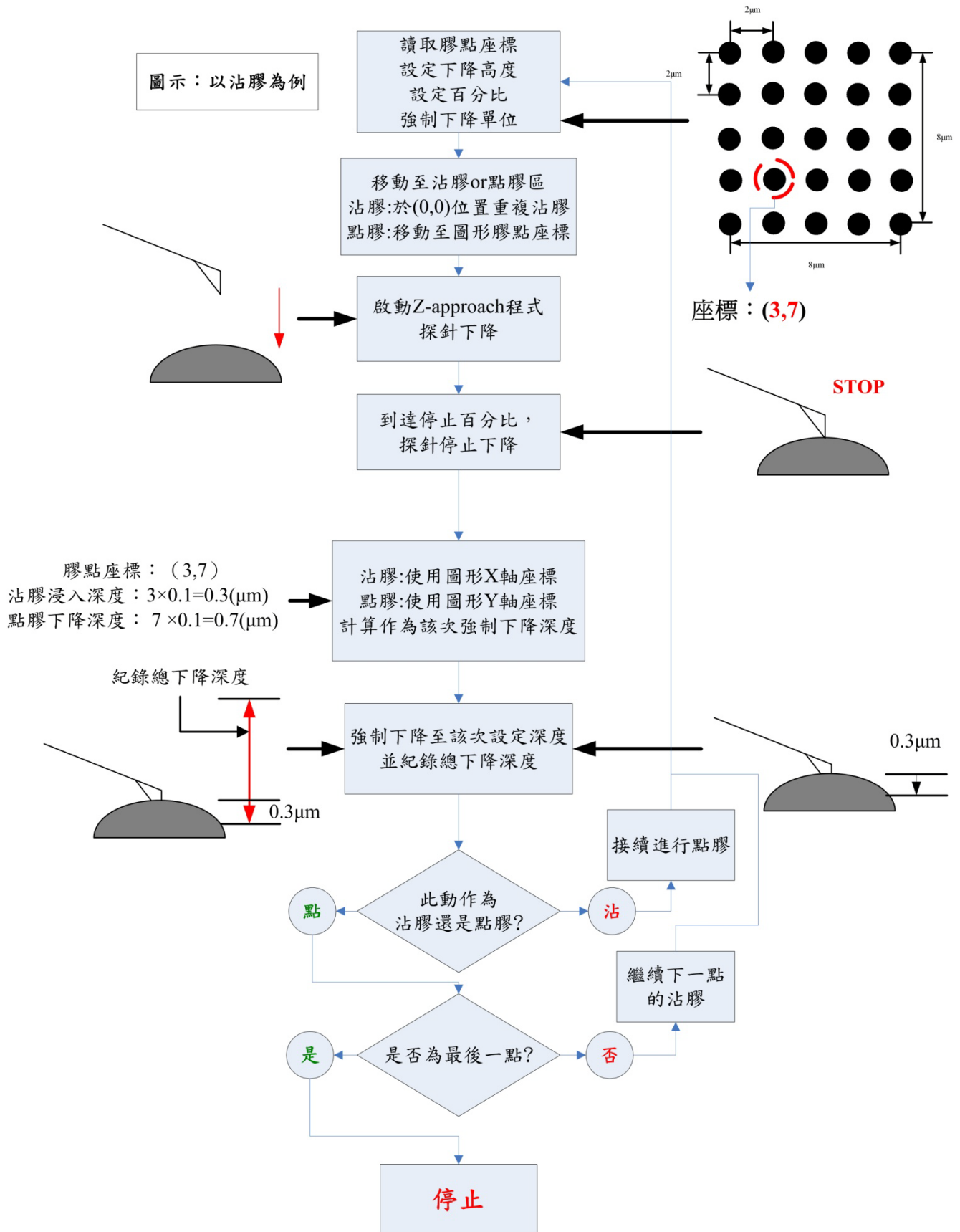


圖 4.2.10 探針下降重現度實驗流程圖

強制浸入與下降高度的控制方式，在沾膠與點膠時分別是利用 X 與 Y 軸位址座標與另外設定之下降單位控制，如圖 4.2.10 中的左右圖示；例如，當要處理 (3, 7) 之膠點，下降單位設定為 $0.1\mu\text{m}$ ，則當 Z-approach 沾膠動作開始至到達停止百分比時，系統會讀取 X 座標 3，並計算 $3 \times 0.1 = 0.3 (\mu\text{m})$ ，再強制浸入 $0.3\mu\text{m}$ ；同理，在點膠時則會下降 $0.7\mu\text{m}$ 之強制下降深度。在完成紀錄後，程式會判斷目前是進行沾膠還是點焦，若是沾膠，則將會照一般控制流程移動探針至點膠區進行點膠，並且再次重複 Z-axis approach 與強制下降深度的計算以進行點膠的總下降深度紀錄；若是點膠，則會判斷目前是否為最後一點，若是，則停止程式完成實驗，若否，則會讀取下一點座標進行重複的沾點膠動作，直至試驗完成。圖 4.2.8 與圖 4.2.9 分別為沾膠與點膠的重現度實驗結果。

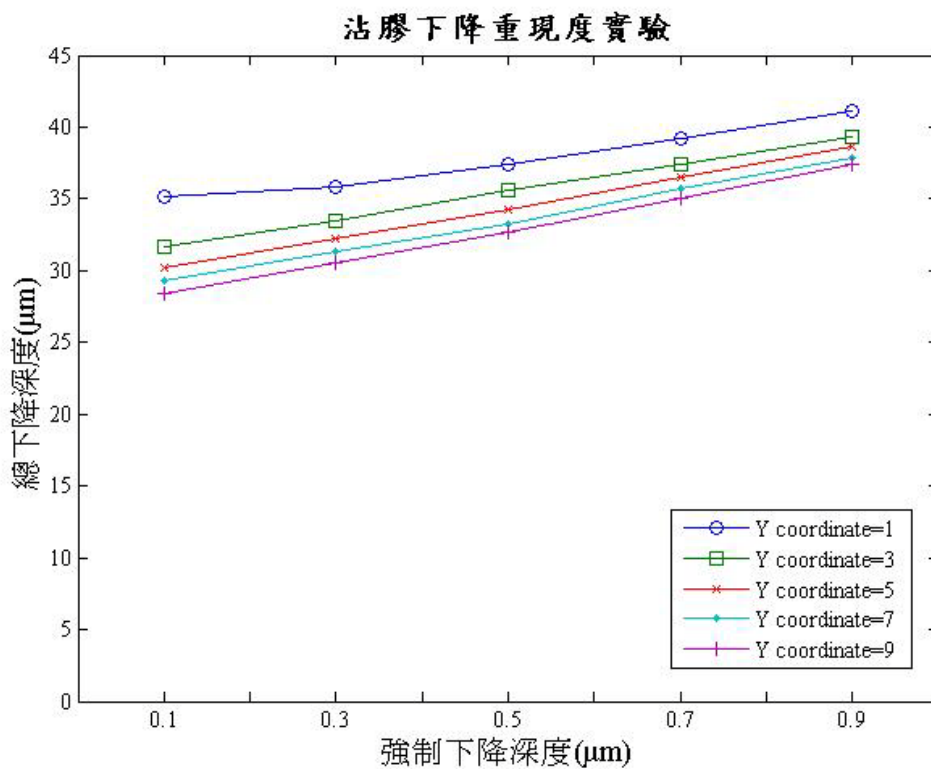


圖 4.2.8 沾膠下降重現度實驗圖

圖 4.2.7 實驗條件為 5×5 點圖，探針停止之振幅百分比為 95%，各點相距間隔 2μm，利用 X 軸位址座標控制，各點強制深度單位差為 0.2μm。從圖上可看出，除了第一列第 1 點，即座標 (1, 1) 之膠點下降深度差異較大外，大部分同 Y 值之膠點下降深度皆成線性增加，符合理論預期：下降深度只受到強制浸入深度影響，其他不會改變下降之深度。而從不同列位置來看，會發現各列會有一誤差偏差量，但是彼此連線互相平行，推論其誤差來自於在 Y 軸方向的一個傾斜誤差，可能是探針基座或是載玻片的傾斜角，造成在不同 Y 軸座標下，座標越大，下降深度越小。

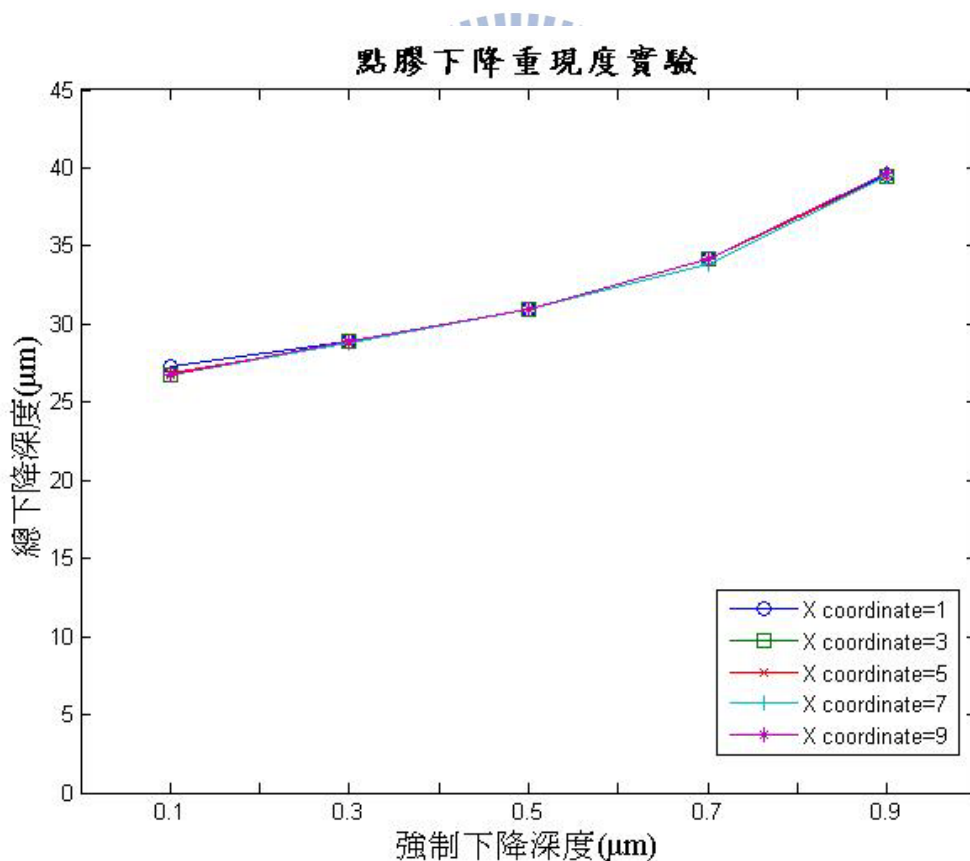


圖 4.2.9 點膠下降重現度實驗圖

圖 4.2.9 為點膠時的下降重現度實驗結果，實驗條件同樣為 5×5 點圖，探針

停止之振幅百分比為 95%，各點相距間隔 $2\mu\text{m}$ ，利用 Y 軸位址座標控制強制浸入深度，同列各點強制深度單位差為 $0.2\mu\text{m}$ 。從圖中可以看出，同一 X 值狀況下，下降深度越來越深，符合當初的期待：深度只會受到強制下降深度影響；而從不同 X 值的狀況來看，各行重複性極高，藉此可推論在 X 軸方向並無傾斜之誤差；值得注意的是，由於此誤差的關係，使得同一 X 之連線不再是線性關係，而更接近 2 次曲線。

本實驗之預期目標為，在同樣的強制浸入與下降深度下，沾膠與點膠的總下降深度應該相同，以保持各點的沾點膠量一定。而從兩次實驗的結果來看，沾膠的下降高度與玻片的傾斜角可能造成沾膠量的不穩定，而點膠則無此誤差。以此結論，我們在實驗前應考慮此誤差，調整或補正玻片或探針之傾斜角誤差，以免在製作成品時各膠點大小高度不均勻，影響工件品質。

4.2.6 單排點圖高度研究

在確認本微快速原型系統能成功點圖後，本實驗將進一步研究控制膠點大小高度的變因；實驗的控制變因為點膠時的下降停止百分比，分別點出 95%、94%、93%、92% 的一排 5 點圖形，之後對各百分比進行截面高度分析，圖 4.2.13 為各實驗樣品之 AFM 掃圖截圖比較。

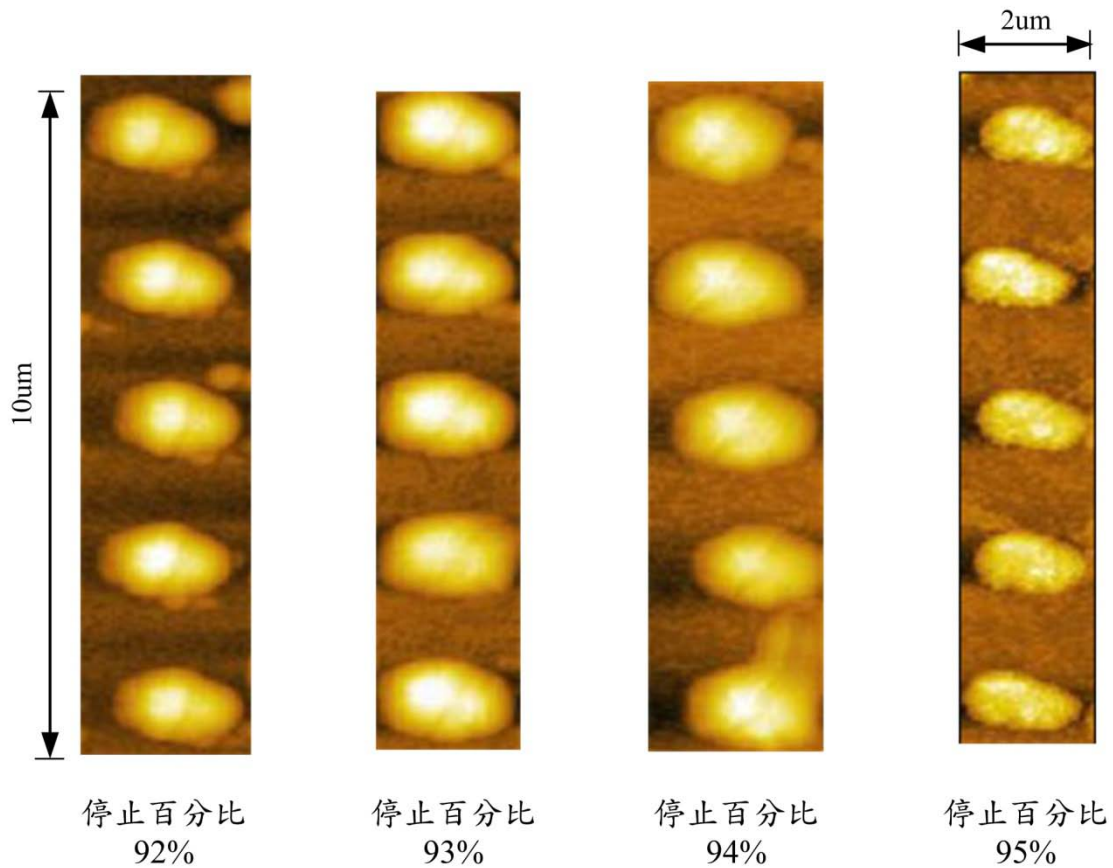


圖 4.2.13 4 種不同百分比之 AFM 掃圖截圖

從 5 張圖形與比例尺我們可以看出，各點在大小上差別不大，皆是接近長軸 $2\mu\text{m}$ ，縱軸 $1\mu\text{m}$ 之橢圓形膠點，顯示下降百分比對於點的大小並無太大影響。而圖 4.2.14 至圖 4.2.17 則為此 4 種依序調降之停止百分比圖形之截面高度分析圖。

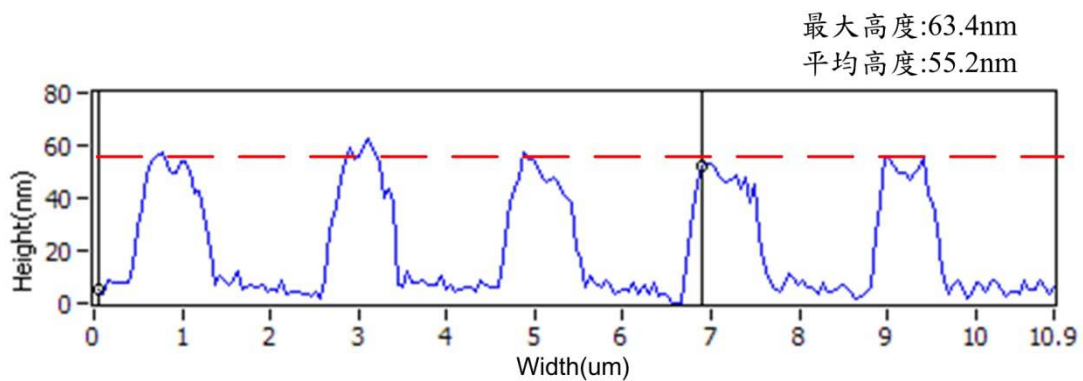


圖 4.2.14 下降百分比 95% 時之圖形截面高度圖

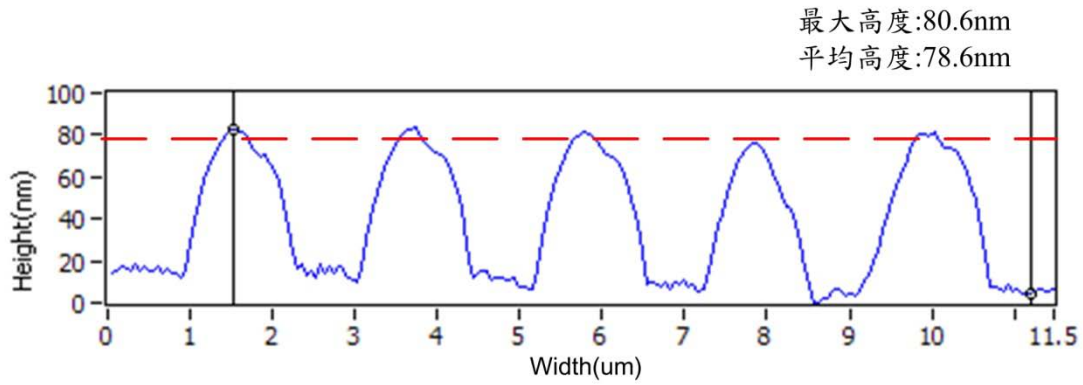


圖 4.2.15 下降百分比 94%時之圖形截面高度圖

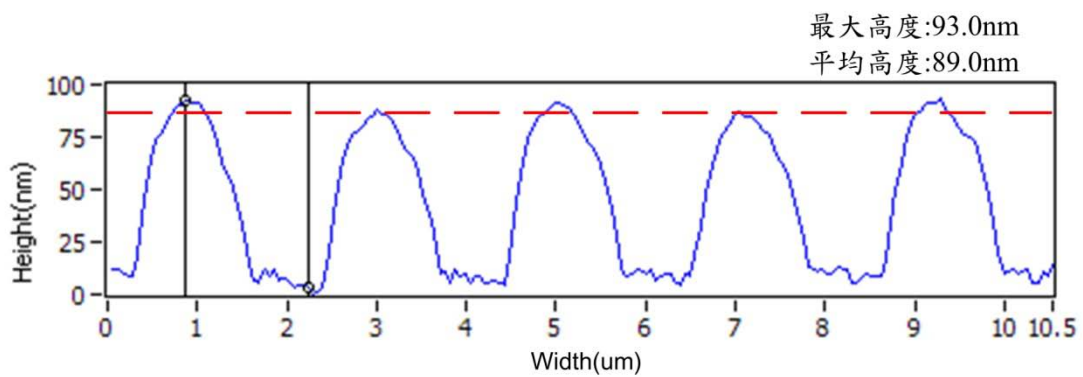


圖 4.2.16 下降百分比 93%時之圖形截面高度圖

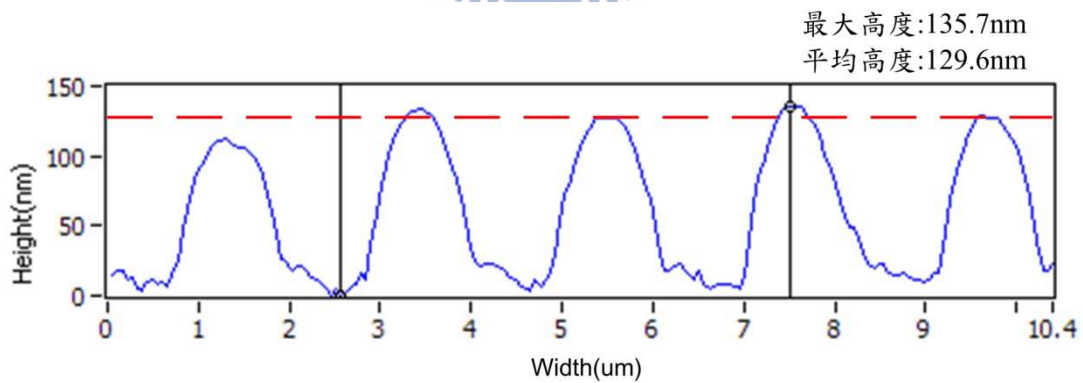


圖 4.2.17 下降百分比 92%時之圖形截面高度圖

從4張高度截面圖可以明顯看出，當停止百分比越低，膠點的平均高度越高，其原因在於，當百分比越低，探針可以下降越多，進而使沾粘至載玻片上的膠量越多，進而造成膠點的高度變高。從圖 4.2.18 來看，也能看出其變化趨勢，停止

百分比越低，則點之高度就越高；停止百分比越高，點出的點就越低。因此，我們可以利用控制停止百分比的方式調整沾點膠量，進而控制點出的膠點高度。

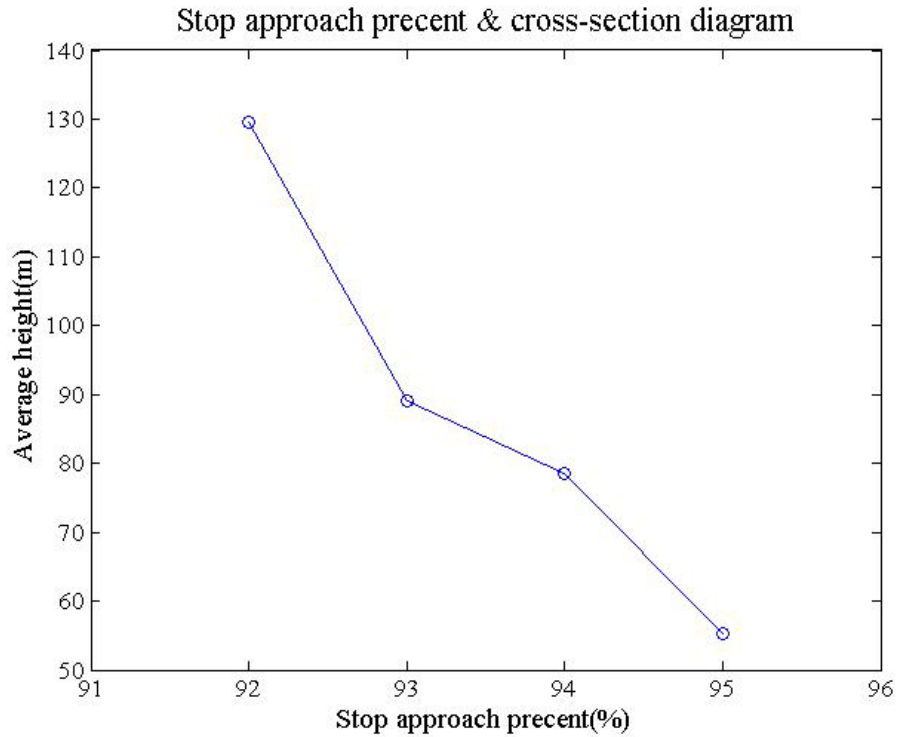


圖 4.2.18 各下降百分比平均高度比較圖

五、結論與展望

從探針掃頻實驗結果，我們可以知道自動掃頻系統確實能正確的運行，以幫助 Z-approach 漸進系統進行反覆的掃頻以確認探針目前的狀況；接著利用探針力圖分析，可以推論探針在沾點膠瞬間所造成的靈敏振幅改變可使 Z-approach 漸進系統成功運作；而 Z-approach 漸進測試則可以瞭解探針在沾膠前後的振幅與頻率衰減，也確知了 Z-approach 漸進系統成功運行；接下來我們執行 Micro-RP 系統，使其點出 5×5 點陣圖，並從中分析其沾點膠深度，從探針下降深度重複性來瞭解沾點膠的狀況是否只受深度影響；AFM 掃圖結果來看，Micro-RP 系統點出之 5×5 點陣圖形除了有些許膠點未點出外，各膠點之大小重複性高，可連續直接製作出直徑 1 μ m 之圓形膠點，而這也代表 3 個重要程式：自動掃頻系統、Z-approach 漸近系統與方形路徑程式整合後可以正確運行。另外，我們也瞭解到，可改變停止百分比，來改變膠點的高度，而膠點的 Z 軸高度可從 60nm 升高至 135nm 左右，其成長到達 2 倍，但其平面上的大小變化不大，皆為長軸 2 μ m，短軸 1~1.5 μ m 的橢圓形膠點，此高度也已超過目前所知之 DPN 圖點的高度。至此我們可以結論，本研究之 Micro-RP 系統，其速度快、重複性高、偏移誤差小，且可控制圖形膠點的高度，接近當初之研究目標。

從實驗結果，可知本研究未來應該需要進行研究的是：

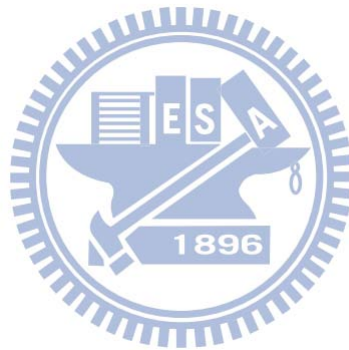
1. 點圖中還是有些許未點到之膠點，由於該處完全沒有找到類似膠液之物體，推論 Z-approach 振幅誤判的狀況還是存在，可能需要將振幅回饋控制再進行改

良，比較前幾次下降之深度來判斷是否真正到達下降停止點。

2.AFM 掃圖中有些許膠點遭破壞，有可能是照光不足所導致的硬度不足，在掃圖時遭到破壞，需要另外設計硬化之照射光路，以充分照光硬化之效果。

3.目前只完成單層之光硬化膠點陣圖繪製，在確保照光之完全後，應可進行繪製完整之圖形，進一步完成微型工件的製作測試。

4.探針於繪圖後多有膠液黏著於探針上，目前還無法完全清除，導致探針在多次使用後振幅開始慢慢衰減，或是出現不規則之頻譜圖形，需要找出化學之方法來清除上方之膠液，以免過多凝固的膠液造成繪製圖形時出現嚴重誤差。



參考文獻

- [1] P. F. Jacobs, *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*: Sme, 1992.
- [2] T. Wohlers, *Rapid Prototyping State of the Industry: 1997 Worldwide Progressive Report*. Fort Collins: Wohlers Associates, 1997.
- [3] K. Ikuta and K. Hirowatari, "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding," 1993, pp. 42-47.
- [4] C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," ed: Google Patents, 1986.
- [5] 陳仲宜. (2007, 淺談微立體光刻術之發展前景. 金屬先鋒報 21, 1-3.
- [6] D. W. Hutmacher, T. Schantz, I. Zein, K. W. Ng, S. H. Teoh, and K. C. Tan, "Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling," *Journal of biomedical materials research*, vol. 55, pp. 203-216, 2001.
- [7] M. W. M. Cunico, "Development of new rapid prototyping process," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 17, pp. 138-147, 2011.
- [8] J. P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, and L. Froyen, "Lasers and materials in selective laser sintering," *Assembly Automation*, vol. 23, pp. 357-371, 2003.
- [9] B. Mueller and D. Kochan, "Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry," *Computers in Industry*, vol. 39, pp. 47-53, 1999.
- [10] G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, "Atomic force microscope," *Physical review letters*, vol. 56, pp. 930-933, 1986.
- [11] D. Sarid, *Scanning force microscopy: with applications to electric, magnetic, and atomic forces* vol. 5: Oxford University Press, USA, 1994.
- [12] P. Hansma, J. Cleveland, M. Radmacher, D. Walters, P. Hillner, M. Bezanilla, M. Fritz, D. Vie, H. Hansma, and C. Prater, "Tapping mode atomic force microscopy in liquids," *Applied Physics Letters*, vol. 64, pp. 1738-1740, 1994.
- [13] A. Knoll, R. Magerle, and G. Krausch, "Tapping mode atomic force microscopy on polymers: Where is the true sample surface?," *Macromolecules*, vol. 34, pp. 4159-4165, 2001.
- [14] T. Akiyama, U. Staufer, N. De Rooij, P. Frederix, and A. Engel, "Symmetrically arranged quartz tuning fork with soft cantilever for intermittent contact mode atomic force microscopy," *Review of scientific instruments*, vol. 74, p. 112, 2003.
- [15] S. Hong, J. Zhu, and C. A. Mirkin, "Multiple ink nanolithography: toward a

- multiple-pen nano-plotter," *Science*, vol. 286, pp. 523-525, 1999.
- [16] R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong, and C. A. Mirkin, "" Dip-pen" nanolithography," *Science*, vol. 283, pp. 661-663, 1999.
- [17] S. Krämer, R. R. Frierer, and C. B. Gorman, "Scanning probe lithography using self-assembled monolayers," *detail*, vol. 41, p. 44, 2003.
- [18] C. Chang, "Rapid prototyping fabricated by UV resin spray nozzles," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 10, pp. 136-145, 2004.
- [19] W. Zhao, K. Xu, X. Qian, and R. Wang, "Tip Based Nanomanipulation Through Successive Directional Push," *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 132, p. 030909, 2010.
- [20] L. Zhang and J. Dong, "High-rate tunable ultrasonic force regulated nanomachining lithography with an atomic force microscope," *Nanotechnology*, vol. 23, p. 085303, 2012.
- [21] NanoCube®. PI P-611.3 XYZ Piezo Stage data sheet [Online]. Available: <http://www.physikinstrumente.com/en/index.php>

