



國立台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

單晶鑽石銑削雙面陣列鏡頭之研究

Study of single-crystal diamond milling for double-sided
lens array

劉佺辰

Yi-Chen Liu

指導教授：廖運炫 博士

Advisor : Yunn-Shiuan Liao, Ph.D.

中華民國 107 年 7 月

July, 2018



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

單晶鑽石銑削雙面陣列鏡頭之研究

Study of single-crystal diamond milling for double-sided
lens array

本論文係劉佺辰君 (R04522723) 在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 107 年 07 月 31 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明

口試委員：

廖運炫 (指導教授)

趙崇禮

蔡曜陽

系主任：

黃美嬌



誌謝

首先感謝指導教授廖運炫老師在這三年給予的指導與教誨，除了從他身上學習到許多專業上的理論基礎外，教授亦指導我研究以及做事的方法和態度，並提供許多跟業界合作的機會，使我增加實務上的經驗，能夠將理論與實務做連結。同時亦要感謝淡江大學趙崇禮教授以及臺灣大學蔡曜陽教授撥冗前來口試，並於研究觀念及畢業論文撰寫上給予細心的指正與建議，使論文的架構與內容更加豐富完整。

在三年的實驗室生活中，感謝實驗室的每一位成員給於我的支持與鼓勵，博班的宗仁、金喜、致揚、鶴崗等學長們分享許多寶貴的經驗與建議；碩班的庭毅、庭輔、詠迪、祉涵學長姐們以及宗昇、誠佳、華杰、皓恩、清華、蕙君、章琛、沐恩、譽升、秉臻、立威等同學們的陪伴與討論，還有助理娜娜幫忙處理實驗室的許多事務，使我能專心於做研究上。感謝奇景科技的葉時瑋、陳詠傑，工研院的鄭文泓學長，儀科的鄭源傑博士，Precitech 的游宗霖工程師，大昌華嘉的陳伯榕工程師，時常給予我許多的協助。感謝大學同學晏崇、柏佑、宇倫一路上的相挺。

最後要感謝我的家人以及女友家瑜的陪伴與支持，給我最大的動力，讓我能順利的完成論文。

摘要



近年來隨著智慧型手機的普及、通訊軟體的蓬勃發展，人們習慣於透過手機拍照來分享並紀錄至社群網路，手機的拍照功能儼然成為大眾生活中不可或缺的一部份，鏡頭鏡片的製程技術便成為一道相當重要的課題。隨著科技技術的精進，手機拍攝的照片品質要求則越來越高，然而，現今市面上的手機鏡頭多為縱向疊加多片鏡片組合而成的單顆鏡頭，雖然拍攝出來的照片擁有高解析度，但是卻會產生景深問題而導致對焦區域以外的成像模糊，因此如何克服景深問題成為一重要課題。

陣列鏡頭是藉由不同非球面排列而成，可同時記錄著多點影像景深資訊，並擷取多焦距成像之影像，經過後處理程序轉換成清晰且無景深之照片。不同於傳統式變焦透鏡，以多層鏡片疊加的硬體機構，陣列鏡頭的設計帶來了更簡單、更輕薄等特性；由於陣列鏡頭不具備調焦的功能，因此每顆鏡頭需有較好的尺寸及形狀精度，且其透鏡需有較理想的折射性和聚焦性。本實驗目的為探討 3x3 陣列鏡頭的加工製程，藉由 NanoCAM 3D 軟體建立非球面曲面，並對曲面進行分析以及路徑規劃，進而找出適當之刀具規格。此外本實驗為直接在鏡片的兩面加工陣列非球面透鏡，設計對位機制，減少雙面加工時的定位誤差，提升鏡頭的成像品質。最後使用超精密加工機搭配軟體分析之單晶鑽石球銑刀規格銑削 3x3 之陣列鏡頭，並使各個非球面之形狀精度達到 $0.8 \mu\text{m PV}$ 以下，以符合鏡頭光學設計時之要求。

關鍵字：非球面透鏡、陣列鏡頭、超精密加工、單晶鑽石銑削、形狀精度

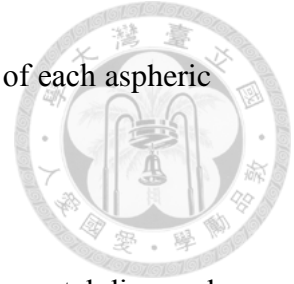
Abstract



In recently years, smart phones and social media have become more and more popular. People are now used to take photos with mobile phones and share them via social network. Mobile phone camera is now an inseparable part of people's daily life. Since the reliance of such device has increased, lens machining for mobile phones has become one of the most important issues in manufacturing technology. As smart phone technology advances day after day, photo quality requirement increases accordingly. However, most of the available phone cameras use single lens structure, which consists of multiple optical lens stacking parallelly. The design gives photo with high resolution, but limited depth of field (DOF) causes unfocused area in the image.

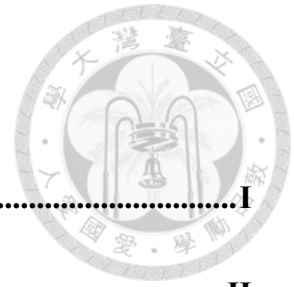
With different aspheric lens in array, the camera can record specific DOF information from different points, and capture images of multiple focuses. Post-process then turns the captured images into a single clear photo without DOF. Unlike conventional mechanical zoom lens, lens array features simplicity and lightweight. Incapability of changing focal length indicates each lens in lens array needs better refractive and focus ability, which leads to higher form accuracy requirement. The purpose of this work is to study the manufacturing process of 3x3 lens array. Asphere building surfaces using NanoCAM 3D, surfaces analysis and tool path planning are featured in this work. Proper tool specification will also be tested to optimize the process. Additionally, the experiments are performed by directly machine aspheric surface on both sides of the lens. In order to reduce location error in two-side machining and improve image quality, alignment mechanism is designed in this work. The lens array of 3x3 is machined by ultra-precision milling machine, using analyzed single-

crystal diamond tool. Measurement results shows that the form error of each aspheric lens is less than $0.8 \mu\text{m PV}$, meeting optical design requirement.



Keyword: aspheric lens, lens array, ultra-precision machining, single-crystal diamond milling, form accuracy

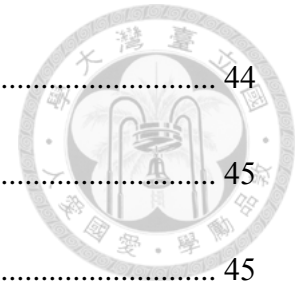
目錄



誌謝	I
摘要	II
Abstract	III
目錄	V
圖目錄	IX
表目錄	XIII
Chapter 1 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	3
1.3 文獻回顧	4
1.4 研究目的	9
1.5 本文架構	9
Chapter 2 相關理論與知識	10
2.1 切削理論	10
2.1.1 切削力學	10
2.1.2 切屑的形成	13
2.2 超精密鑽石切削加工技術	15
2.2.1 超精密加工技術	15



2.2.2	單晶鑽石切削技術	17
2.3	光學設計與性質	19
2.3.1	非球面的定義與公式	19
2.3.2	像差理論(Aberration)	22
2.4	表面組織	23
2.4.1	表面形貌定義	23
2.4.2	表面粗糙度表示方法	26
2.4.3	形狀精度表示法	27
Chapter 3	實驗設備介紹	29
3.1	實驗設備	29
3.1.1	超精密加工機	29
3.1.2	形狀量測儀	32
3.1.3	雷射共軛焦顯微鏡	33
3.1.4	數位顯微鏡	34
3.1.5	單晶鑽石球銑刀	36
3.1.6	單晶鑽石車刀	37
3.1.7	工件材料	38
3.2	實驗軟體介紹	39
Chapter 4	雙面陣列鏡頭製作流程	44



4.1	實驗規劃	44
4.2	3 x 3 陣列鏡頭設計以及非球面設計參數	45
4.2.1	3 x 3 陣列鏡頭設計	45
4.2.2	非球面設計參數	47
4.3	刀具規格分析與路徑規劃	53
4.3.1	刀具規格分析	53
4.3.2	刀具路徑規劃	56
4.4	對位設計	59
4.4.1	環狀溝槽對位機制	59
4.4.2	直線溝槽對位機制	60
4.5	加工參數	62
4.6	量測方法與分析	65
Chapter 5	實驗結果與討論	66
5.1	形狀精度	66
5.2	表面形貌	69
5.3	加工成品	73
Chapter 6	結論與未來展望	77
6.1	結論	77
6.2	未來展望	78



圖目錄



圖 1.1 加工精度年代進展圖[1]	1
圖 1.2 傳統手機鏡頭之鏡片組合示意圖	3
圖 1.3 陣列鏡頭示意圖	4
圖 1.4 傳統手機鏡頭與陣列手機鏡頭示意圖	4
圖 1.5 慢刀伺服加工 5 x5 陣列鏡頭之成品[5]	5
圖 1.6 蜂巢式非球面陣列透鏡之加工成品[6]	5
圖 1.7 曲面陣列透鏡之加工結果[7]	6
圖 1.8 大面積微非球面陣列透鏡之加工結果：(a)加工成品、	6
圖 1.9 凹球面陣列鏡頭加工前後之量測結果[9]	7
圖 1.10 凹球面陣列鏡頭加工成品[9]	7
圖 1.11 凹(左)、凸(右)球面之 4 x 5 陣列透鏡加工成品[10]	8
圖 1.12 伺服加工路徑[6].....	8
圖 2.1 正交切削示意圖	10
圖 2.2 正交切削模型之切削力分解圖	11
圖 2.3 切屑形式[12]	14
圖 2.4 單晶鑽石刀具之示意圖[2]	19
圖 2.5 球面鏡與非球面鏡成像示意圖	20
圖 2.6 鏡片深度(Sag)座標示意圖[20].....	21
圖 2.7 二次圓錐曲線[21].....	21
圖 2.8 畸變(Distortion) 示意圖[22].....	22
圖 2.9 球面與非球面像差示意圖	22
圖 2.10 具有相同不規則高度但間隔不同之表面[23]	23
圖 2.11 工件表面形貌示意圖[23].....	24
圖 2.12 粗糙度、波紋及形式三者組合效果之示意圖[23]	25



圖 2.13 R_a 與 R_q 計算之示意圖	26
圖 2.14 R_t 、 R_{max} 、 R_p 參數示意圖[23]	27
圖 2.15 形狀精度示意圖	28
圖 3.1 超精密加工機 Nanotech 650FG ^{v2}	30
圖 3.2 Nanotech 650FG ^{v2} CCD 線上量測系統之鏡頭	30
圖 3.3 形狀量測儀 Form Taylorsurf PGI 1240	32
圖 3.4 雷射共軛焦顯微鏡 VK9700	34
圖 3.5 數位顯微鏡 VHX-2000	35
圖 3.6 單晶鑽石球銑刀	36
圖 3.7 單晶鑽石球銑刀刀尖示意圖	36
圖 3.8 單晶鑽石車刀	37
圖 3.9 單晶鑽石車刀刀尖示意圖	37
圖 3.10 光學級 PMMA 壓克力	38
圖 3.11 NanoCAM 3D 操作介面	39
圖 3.12 非球面曲率參數設定圖	40
圖 3.13 刀具規格建議	40
圖 3.14 刀具資料設定	41
圖 3.15 加工參數設定	41
圖 3.16 加工路徑點資料	42
圖 3.17 螺旋路徑示意圖	42
圖 3.18 螺旋加工示意圖(加工進程為由左往右)[24]	43
圖 4.1 實驗配置圖	44
圖 4.2 雙面鏡片製作流程	45
圖 4.3 3x3 陣列鏡頭鏡片之示意圖	46
圖 4.4 3x3 陣列鏡頭 Surface 之示意圖	46



圖 4.5 陣列鏡頭尺寸圖	46
圖 4.6 3x3 陣列鏡頭鏡片單面之非球面透鏡排列示意圖	47
圖 4.7 Surface 1 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖	48
圖 4.8 Surface2 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖	50
圖 4.9 Surface 3 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖	51
圖 4.10 Surface 4 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖	53
圖 4.11 曲率變化大之非球面	54
圖 4.12 加工導入路徑示意圖	56
圖 4.13 各非球面導入路徑示意圖	58
圖 4.14 環狀溝槽示意圖	60
圖 4.15 CCD 線上量測系統觀察電子千分表校正後之偏心誤差	60
圖 4.16 水平直線溝槽示意圖	61
圖 4.17 直線溝槽水平角度偏差示意圖	61
圖 4.18 校正完水平角度之直線溝槽示意圖	62
圖 4.19 螺旋路徑點資料示意圖	64
圖 5.1 Surface 1 - FOV 30° 形狀精度示意圖	66
圖 5.2 Surface 1 - FOV 60° 形狀精度示意圖	67
圖 5.3 Surface 2 - FOV 30° 形狀精度示意圖	67
圖 5.4 Surface 2 - FOV 60° 形狀精度示意圖	67
圖 5.5 Surface 3 - FOV 30° 形狀精度示意圖	68
圖 5.6 Surface 3 - FOV 60° 形狀精度示意圖	68
圖 5.7 Surface 4 - FOV 30° 形狀精度示意圖	68
圖 5.8 Surface 4 - FOV 60° 形狀精度示意圖	69
圖 5.9 Surface 1 - FOV 30° 表面形貌示意圖	69
圖 5.10 Surface 1 - FOV 60° 表面形貌示意圖	70



圖 5.11 Surface 2 - FOV 30° 表面形貌示意圖	70
圖 5.12 Surface 2 - FOV 60° 表面形貌示意圖	71
圖 5.13 Surface 3 - FOV 30° 表面形貌示意圖	71
圖 5.14 Surface 3 - FOV 60° 表面形貌示意圖	72
圖 5.15 Surface 4 - FOV 30° 表面形貌示意圖	72
圖 5.16 Surface 4 - FOV 60° 表面形貌示意圖	73
圖 5.17 Surface1 之加工結果	73
圖 5.18 Surface2 之加工結果	74
圖 5.19 Surface3 之加工結果	74
圖 5.20 Surface4 之加工結果	75
圖 5.21 鏡片 1 加工成品	75
圖 5.22 鏡片 2 加工成品	76
圖 5.23 3 x 3 陣列鏡頭成像之結果	76

表目錄



表 2.1 正交切削模型各項符號之意義	11
表 2.2 鑽石之性質表[16].....	17
表 2.3 鑽石之性質與應用[15]	18
表 3.1 超精密加工機 Nanotech 650FG ^{v2} 規格表	31
表 3.2 形狀量測儀 Form Taylorsurf PGI 1240 規格表.....	33
表 3.3 雷射共軛焦顯微鏡 VK9700 規格表	34
表 3.4 數位顯微鏡 VHX-2000 規格表	35
表 3.5 光學級 PMMA 壓克力材料性質	38
表 4.1 Surface 1 - FOV 30° 之非球面參數	47
表 4.2 Surface 1 - FOV 60° 之非球面參數.....	48
表 4.3 Surface 2 - FOV 30° 之非球面參數	49
表 4.4 Surface 2 - FOV 60° 之非球面參數.....	49
表 4.5 Surface 3 - FOV 30° 之非球面參數	50
表 4.6 Surface 3 - FOV 60° 之非球面參數.....	51
表 4.7 Surface 4 - FOV 30° 之非球面參數	52
表 4.8 Surface 4 - FOV 60° 之非球面參數.....	52
表 4.9 Surface 1 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議.....	54
表 4.10 Surface 2 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議.....	54
表 4.11 Surface 3 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議	55
表 4.12 Surface 4 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議.....	55
表 4.13 各非球面曲面避免干涉之最大導入路徑距離	57
表 4.14 單晶鑽石球銑刀銑削非球面透鏡之加工參數	64



Chapter 1 緒論

1.1 前言

近年來隨著科技的演進，各種產業如：機械、光電、航太，甚至於生醫領域皆朝著微小化、輕薄化、精密化的趨勢發展，使得產品精密度的標準日漸提升。由於市場的需求促使工業技術進步，製造加工能力持續地革新，將工具機加工精度推向次微米與奈米等級，此時超精密加工技術(Ultra precision machining)並應運而生，成為工業界最先進的加工技術之一。

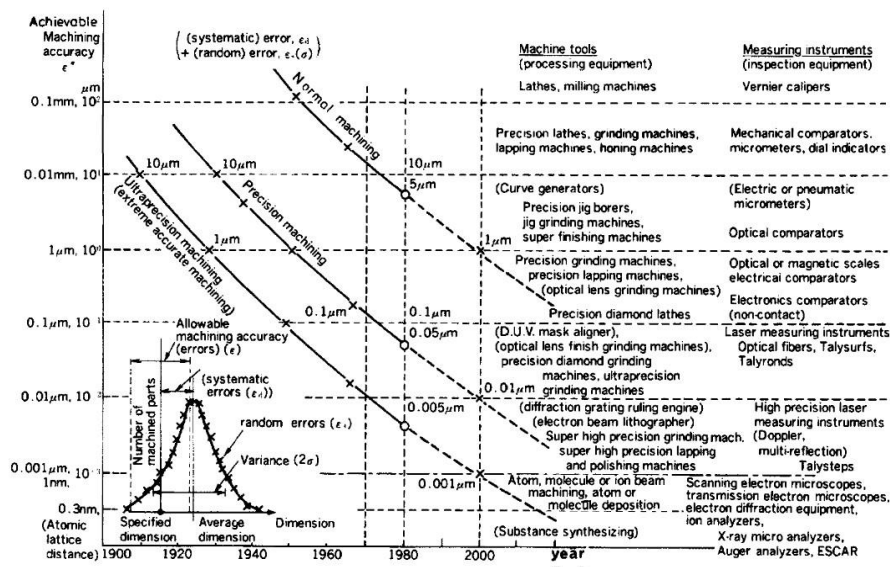
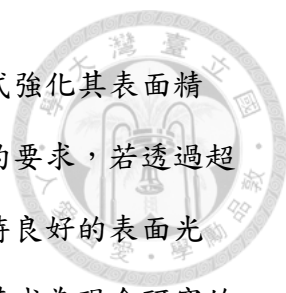


圖 1.1 加工精度年代進展圖[1]

超精密加工技術從 1960 年代開始逐步成形[2]，隨著超精密加工機的發展，各關鍵技術的應用，如鑽石刀具製造技術、多軸控制系統的成熟以及快刀、慢刀伺服加工系統的發明，促使超精密加工技術不斷提升，現今的超精密加工技術已能提供高於過去數個數量級的加工精度。超精密加工主要是以車削、銑削、刨削、研磨等方式進行，透過剛性和控制精度極高的工具機進行材料移除，使加工完之工件達到次微米等級之形狀精度(Form accuracy)以及奈米等級之表面粗糙度(Surface roughness)[3]。



過去對於需達鏡面等級的加工表面多施以研磨、拋光等方式強化其表面精度，然而傳統的製程無法同時滿足複雜曲面的形與表面粗糙度的要求，若透過超精密加工技術中的超精密切削則可在保持形狀精度的同時亦維持良好的表面光度，以單一或少數道次加工即可完成，進而提升生產效率，故其成為現今研究的重要課題。

若欲完全發揮超精密切削技術的優越性能，除了需要剛性和控制精度極高的超精密加工機外，正確的刀具選擇亦是不可或缺的。鑽石具有許多優良性質，使傳統常見的刀具材料，如高速鋼、碳化鎢以及 CBN 刀具等相形見絀；鑽石擁有自然界最高的硬度、極低的磨擦係數以及高抗腐蝕性，可大幅降低切削時刀具磨耗發生的可能性；同時，為滿足超精密加工所需的精度，單晶鑽石亦能研磨至極尖銳的切削刃邊並同時保持良好的輪廓精度，使加工工件表面有良好的表面精度；此外，鑽石的高熱傳性質強化散熱能力，讓加工區域的熱量不易累積，增進刀具壽命與工件品質。上述各項優點使單晶鑽石刀具能夠與超精密加工機搭配，並可直接加工出次微米等級之形狀精度以及奈米等級之表面粗糙度，亦可有效縮短加工時間與加工步驟。

超精密鑽石切削是非常重要的工件成型技術，但即使是擁有優良性質的鑽石刀具，其應用仍有限制。一般環境下極為穩定的鑽石，若處於高溫或有適當之催化劑，則有機會轉變為結構薄弱的石墨組織，其中鑽石對鐵系元素，如鐵、鈷、鎳等有著強烈的化學親和性，使得加工時容易產生大量的化學磨耗，進而影響工件的表面品質。目前超精密鑽石切削之對象多為塑膠、鋁合金、無氧銅、無電解鎳等，並利用單晶鑽石刀具車削軸對稱之球面、非球面透鏡，或搭配快刀、慢刀伺服加工非軸對稱之微透鏡陣列、自由曲面、繞射元件等光學元件，完成光學等級的鏡面加工。

目前超精密加工技術主要運用於精密光學元件的開發，如手機鏡頭、光學鏡片、導光板等產品[4]。由於智慧型手機的普及，手機鏡頭的需求大幅提升，其規格亦不斷地提高，鏡頭鏡片的製程技術成為一大重點，其關鍵零組件的製造技術更是值得研究的議題。

1.2 研究動機

現今手機鏡頭的規格不斷地提高，鏡頭組成越來越複雜，目前的手機鏡頭主要都是由多個非球面透鏡所組成的鏡頭，如圖 1.2 所示；然而單顆鏡頭拍照時會有景深問題，因此開發出以陣列方式排列的多顆鏡頭，如圖 1.3 所示，傳統手機鏡頭與陣列手機鏡頭示意圖如圖 1.4 所示；陣列式鏡頭中的每個鏡頭，相當於放在不同位置，不同焦距景深的相機鏡頭，可同時記錄多點影像之景深資訊，並藉由光場亮度與焦距資訊判讀場景物件前後排列順序，搭配後端影像處理技術，以克服拍照景深的問題。因此陣列鏡頭的加工製程成為現今研究的重要課題。

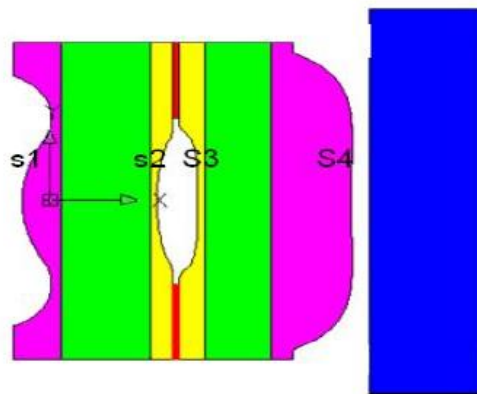


圖 1.2 傳統手機鏡頭之鏡片組合示意圖



圖 1.3 陣列鏡頭示意圖



(a) 傳統手機鏡頭

(b) 陣列手機鏡頭

圖 1.4 傳統手機鏡頭與陣列手機鏡頭示意圖

1.3 文獻回顧

單顆鏡頭之加工技術以趨於成熟，但能無法克服景深問題。近年來為克服景深問題，許多學者針對多顆鏡頭以陣列方式排列而成之陣列鏡頭進行研究，陣列鏡頭的加工製程亦是超精密加工技術之一重大課題，以下為相關的文獻研究：



2005 年 Yi 等人[5]在超精密加工機上使用慢刀伺服系統搭配螺旋路徑在 6061 鋁材上加工 5 x5 陣列透鏡，其加工完之表面粗糙度為 34.5 nm Ra，加工成品如圖 1.5 所示。

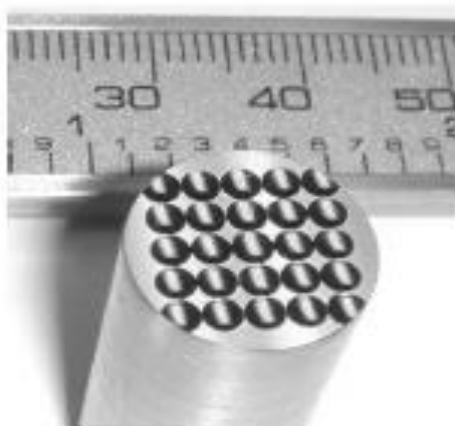


圖 1.5 慢刀伺服加工 5 x5 陣列鏡頭之成品[5]

2009 年 Chen 等人[6]開發出用於生成慢刀伺服加工路徑之 C 語言程式，能夠加工多種不同型式的非球面陣列透鏡。該研究以加工蜂巢式非球面陣列透鏡驗證 C 語言程式產生之加工路徑，結果顯示，用該程式加工蜂巢式非球面陣列透鏡能夠得到 0.15 μm PV 之形狀精度以及 2.5 nm Ra 之表面粗糙度，加工成品如圖 1.6 所示。



圖 1.6 蜂巢式非球面陣列透鏡之加工成品[6]

2011 年 Scheiding 等人[7] 使用快刀伺服系統加工 1219 顆球面陣列透鏡於曲面上，加工完經量測後表面粗糙度小於 4 nm rms、平均之形狀精度約為 0.277 μm PV；其加工結果如圖 1.7 所示。

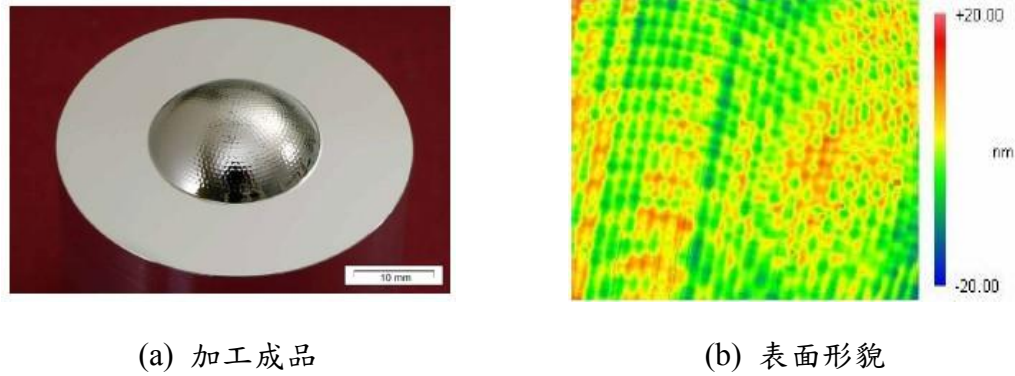


圖 1.7 曲面陣列透鏡之加工結果[7]

2015 年 Zhu[8] 等人利用飛刀伺服系統加工深度 4 μm 共 1800 顆之非球面陣列透鏡於工件上三個區域，完成大面積之微非球面陣列透鏡，如圖 1.8 (a)所示。加工後之表面粗糙度為 16 nm Sa，形狀精度為 0.2 μm PV。

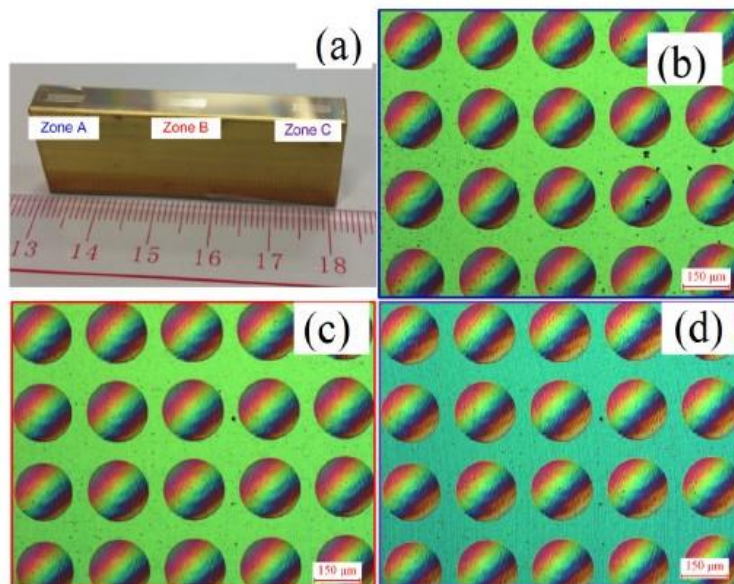
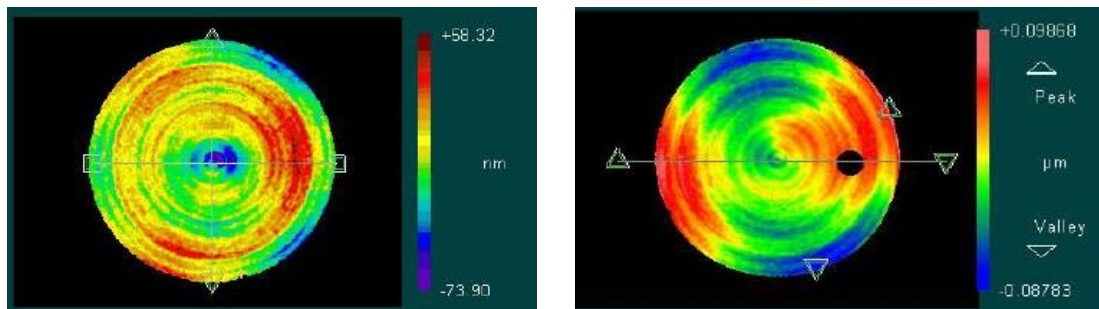


圖 1.8 大面積微非球面陣列透鏡之加工結果：(a)加工成品、(b)區域 A 之表面形貌、(c)區域 B 之表面形貌、(d)區域 C 之表面形貌[8]

2008 年 Holme 等人[9]使用超精密加工機之 X - Y - Z 三軸同動模式搭配螺旋加工路徑銑削曲面半徑為 2.0 mm、加工有效外徑為 2.75 mm 之凹球面陣列透鏡。在未進行刀具路徑補正前，加工完之形狀精度為 0.468 μm PV，經過刀具路徑補正後形狀精度為 0.132 μm PV。補正完後進行 94 顆之凹球面陣列透鏡加工於工件上，並對最後一顆加工之凹球面透鏡進行形狀精度量測，其量測結果為 0.187 μm PV，量測結果如圖 1.9 所示，加工成品如圖 1.10 所示。



(a) 加工球面陣列鏡頭前

(b) 加工球面陣列鏡頭後

圖 1.9 凹球面陣列鏡頭加工前後之量測結果[9]

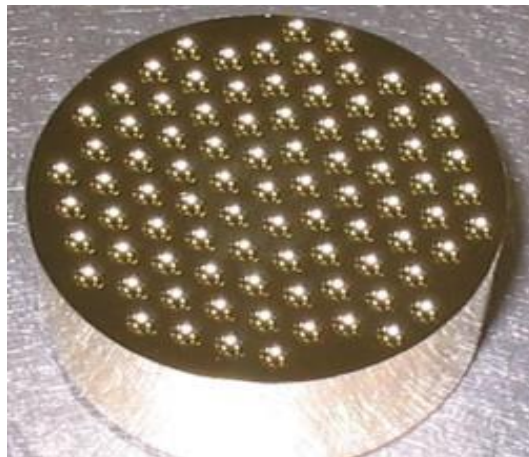


圖 1.10 凹球面陣列鏡頭加工成品[9]

2010 年 McCall 等人[10]亦使用 X - Y - Z 三軸同動模式搭配螺旋加工路徑銑削球面陣列透鏡，除了加工凹球面之 4 x 5 陣列透鏡外，亦加工了凸球面之 4 x 5 陣列透鏡，並量測每顆透鏡之加工結果。結果顯示凹球面之陣列透鏡每顆形狀精



度平均為 $0.175 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度平均為 12.8 nm Rq ；凸球面之陣列透鏡每顆形狀精度平均為 $0.179 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度平均為 15.8 nm Rq ，加工成品如圖 1.11 所示。



圖 1.11 凹(左)、凸(右)球面之 4×5 陣列透鏡加工成品[10]

歸納以上研究可以發現，陣列鏡頭的加工製程主要是以 $C-X-Z$ 三軸同動之伺服加工以及 $X-Y-Z$ 三軸同動之銑削加工；然 Huang 等人[11]的研究發現，使用伺服加工時，由於加工面為非軸對稱之曲面，因此在加工時 Z 軸需前後往復運動，故 Z 軸之移動速度一直在改變，使得加工過程中的易產生運動誤差，進而影響到加工後之表面品質；另外從圖 1.12 可以看出伺服加工之路徑只有部分用於透鏡的加工，相較於銑削只加工透鏡的部分，伺服加工的時間明顯較長，因此許多學者紛紛投入銑削陣列鏡頭之研究。

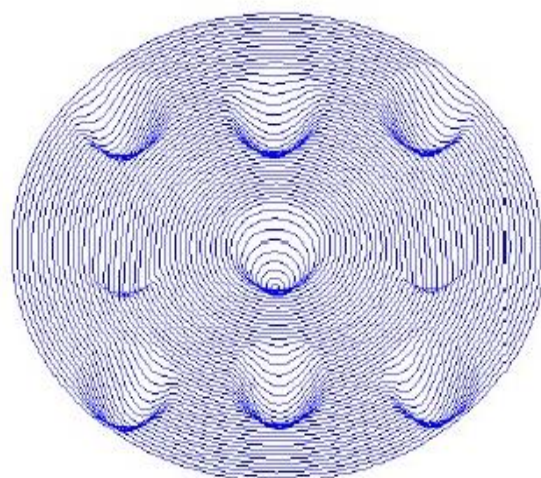


圖 1.12 伺服加工路徑[6]



1.4 研究目的

近年來為克服景深問題，許多學者針對多顆鏡頭以陣列方式排列而成之陣列鏡頭進行研究，陣列鏡頭的加工製程亦是超精密加工技術之一重大課題。過去已有許多學者研究單晶鑽石銑削加工陣列透鏡之加工製程，但都僅限於在工件單面上進行球面透鏡的陣列加工，為此，如何在工件的兩面加工非球面陣列透鏡，減少雙面加工時的定位誤差為本文之研究方向。

本文的目的為探討 3x3 陣列鏡頭的加工製程，藉由軟體分析非球面曲面以及路徑規劃，找出適當之刀具規格，並設計對位機制，以減少雙面加工時的定位誤差。最後使用超精密加工機搭配軟體分析之單晶鑽石球銑刀規格完成 3x3 陣列鏡頭之加工，並使各個非球面之形狀精度達到 0.8 μm PV 以下。

1.5 本文架構

本論文架構共分為六章節，各章節內容如下：

第一章為緒論。介紹本文研究背景、文獻回顧，並說明研究動機與目的。

第二章為相關理論的介紹。包括切削理論、超精密鑽石切削加工技術、光學性質設計與性質以及表面組織。

第三章為實驗設備。介紹本研究的使用的儀器設備以及軟體。

第四章為實驗規劃說明以及探討陣列鏡頭之加工流程。

第五章為實驗結果與討論，對加工完量測結果進行討論。

第六章為結論與未來展望，列出本研究結論，並據此提出後續的研究建議。

Chapter 2 相關理論與知識



本章將介紹超精密加工相關理論知識，2.1 節簡述切削理論；2.2 節介紹超精密鑽石切削加工技術；2.3 節介紹光學設計與性質；2.4 節說明表面粗糙度表示法。

2.1 切削理論

2.1.1 切削力學

正交切削(Orthogonal cutting)模型示意圖如圖 2.1 所示，模型之切削力合力與分力的作用情形如圖 2.2 所示；表 2.1 說明各項符號之意義。

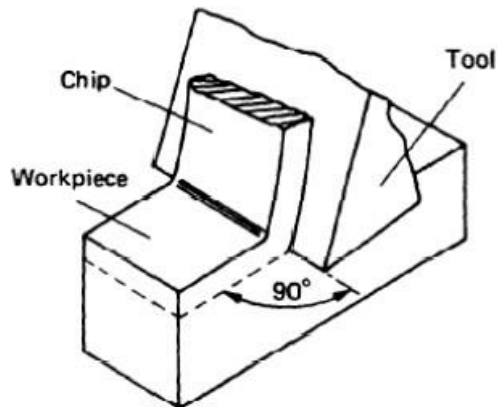


圖 2.1 正交切削示意圖

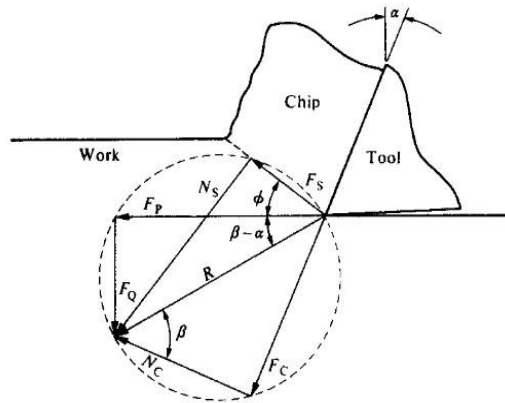


圖 2.2 正交切削模型之切削力分解圖

表 2.1 正交切削模型各項符號之意義

α	傾斜角(Rake angle)
β	磨擦角(Friction angle)
ϕ	剪切角(Shear angle)
R	切削合力
F_p	水平切削力
F_Q	垂直切削力
F_s	沿剪切面方向之分力
N_s	垂直剪切面方向之分力
F_c	沿刀面方向之分力
N_c	垂直刀面方向之分力



由圖 2.2 可知，沿剪切面與垂直剪切面方向之分力分別為 F_S 與 N_S ：

$$F_S = F_P \cos \phi - F_Q \sin \phi \quad (2.1)$$

$$N_S = F_P \sin \phi + F_Q \cos \phi = F_S \tan(\phi + \beta - \alpha) \quad (2.2)$$

同理，沿刀面與垂直刀面方向之分力分別為 F_C 與 N_C ：

$$F_C = F_P \sin \alpha + F_Q \cos \alpha \quad (2.3)$$

$$N_C = F_P \cos \alpha - F_Q \sin \alpha \quad (2.4)$$

以式(2.3)、式(2.4)可推導出刀面摩擦係數 μ_r ：

$$\mu_r = \tan \beta = \frac{F_C}{N_C} = \frac{F_P \sin \alpha + F_Q \cos \alpha}{F_P \cos \alpha - F_Q \sin \alpha} = \frac{F_P \tan \alpha + F_Q}{F_P - F_Q \tan \alpha} \quad (2.5)$$

沿剪切面方向之分力 F_S 亦可表示為：

$$F_S = \tau_s A_s = \frac{\tau_s A_0}{\sin \phi} \quad (2.6)$$

沿垂直剪切面方向之分力 N_S 亦可表示為：

$$N_S = \sigma_s A_s = \frac{\sigma_s A_0}{\sin \phi} \quad (2.7)$$

公式(2.6)、(2.7)中

τ_s ：材料剪切面上的剪應力

σ_s ：材料剪切面上的正應力

A_s ：剪切面的面積



A_0 ：未變形切屑的面積 = 未變形切屑寬度 b 乘以未變形切屑厚度 t

由公式(2.1)及(2.6)可得

$$\tau_s = \frac{(F_p \cos \phi - F_Q \sin \phi) \sin \phi}{b \cdot t} \quad (2.8)$$

$$\sigma_s = \frac{(F_p \sin \phi + F_Q \cos \phi) \sin \phi}{b \cdot t} \quad (2.9)$$

由 Merchant 導出的水平力 F_p 與垂直力 F_Q 的數學式中，若可事先得知剪切角 ϕ 的角度，則切削力便可求得；而剪切角 ϕ 可利用 1941 年 Merchant 所推導之公式求得，如公式(2.10)所示。

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} \quad (2.10)$$

2.1.2 切屑的形成

切削加工是透過刀具深入工件表面，藉由刀具與工件相對運動產生機械能，使工件產生塑性變形，以移除部分材料，此分離的部分稱為切屑(Chip)。切屑的成分與工件相同，但由於切削過程中極高的應變率以及高溫作用，使得切屑的物理性質已有極大的改變。工件的材料性質組成與不同切削條件會造成切屑形態變化與組織的改變。不同類型的切屑照片已被彙整提出[12]，主要被歸類成四種不同形式，如圖 2.3 所示，由左而右分別為：不連續切屑(Discontinuous chip)、連續切屑(Continuous chip)、刃口積屑(Built-up edge)、鋸齒狀切屑(Serrated chip)，以下以此分類敘述各切屑產生的條件與形成方式。

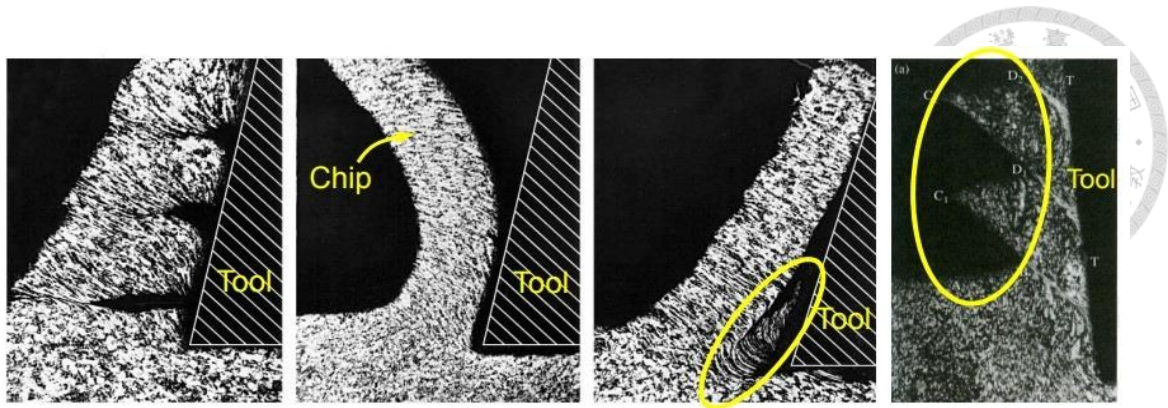


圖 2.3 切屑形式[12]

(1) 不連續切屑(Discontinuous chip)

不連續切屑通常發生於以極低切削速度或極高進給速度切削工件，亦常發生於脆性材料的切削。切屑的形成過程中，剪切角由大逐漸降低，當切削之應變達到臨界值時，切屑開始破壞斷裂，整個過程周而復始。由於剪切角不斷的改變，切削過程變得不穩定，因此產生此種切屑時，工件加工完成面會相當粗糙，且刀具磨耗亦會增加。

(2) 連續切屑(Continuous chip)

在合適加工條件下切削延性佳或塑性流動較高的工件材料，如：銅、鋁、低碳鋼等，能夠產生連續切屑、工件材料在通過剪切面後，材料內部組織發生滑動和熔接作用，使工件材料內部組織產生連續的塑性流動而平順的沿著刀面滑出切屑。由於此種切屑為連續產生，容易因為切屑過長而纏繞到工件造成加工干擾，因此刀具會設計斷屑器以避免此問題出現。

(3) 刀口積屑(Built-up edge)

使用中低切削速度加工某些特殊材料，當切屑與刀具接合面溫度達到某一程度時，切屑內部沿著大約與剪切面成垂直的面發生破壞，這些剝落的屑片並未完全由切屑帶走，在高溫高壓的情況下附著於刀口上逐漸成長，到達某一臨界尺寸



就會折斷，並留在加工完之表面上，使得加工完之工件表面粗糙不平。若適時提高切削速度，使切屑與刀具的臨界溫度上升，提高切屑的流動性，可減輕刀口積屑的現象。

(4) 鋸齒狀切屑(Serrated chip)


在切削泰合金、Inconel 超合金和硬合金鋼等熱傳導性較差的材料時，切屑會產生有別於以上幾種切屑的形式而呈鋸齒形狀，目前主要從絕熱剪切(Adiabatic shear)以及破裂與重焊(Fracture and rewelding)兩種說法解說。一般出現此種切屑的材料，都為難切削之材料。

2.2 超精密鑽石切削加工技術

2.2.1 超精密加工技術

所謂的切削加工是藉由工具機控制主軸運動，讓刀具與工件接觸，使刀具的輪廓直接轉寫到工件表面的技術。隨著加工成品的形狀精度與表面粗糙度要求越來越高，逐漸發展出超精密加工之技術。

超精密加工以不同的應用面向定義可分成三種：在製造工程的範疇下，超精密加工技術是指現今加工科技及製程可達到最精密的機械式移除材料加工技術，主要包含了單晶鑽石車削、單晶鑽石銑削、超精密磨削以及拋光等；若從研究領域或來講，超精密加工涵蓋的範圍更廣，不只傳統的接觸式加工，亦包含了非傳統的加工技術，如離子束加工、放電加工等；以上兩種定義，工件的尺寸皆屬於巨觀尺寸(macro-)，而在學術上對超精密加工技術之定義包含了微觀尺寸(micro-)，奈米尺寸(nano-)之加工模型，並探討單一加工道次所移除的材料及其行為模式。



隨著科技的演進，超精密加工的應用尺寸亦隨之改變，過去屬於超精密範疇的加工技術，可能不適用於現今的超精密加工，因此 Taniguchi[1]對於超精密加工下了一個簡單的註解：超精密加工為當代工業技術所能達到之最高尺寸精度。以現今而言超精密加工技術多落在 0.1 至 1 微米間，表面粗糙度則落在 1 之 10 奈米間。

超精密加工技術是利用剛性和運動精度極高的工具機，配合單晶鑽石刀具進行切削加工，使加工之工件可以獲得極佳的形狀精度(Form accuracy)與表面粗糙度(Surface roughness)，因此超精密加工機多具備以下幾項條件：

- (1) 基座多使用花崗岩，並搭配良好的制震地基，有效減少外來振動影響，保持機台剛性。
- (2) 滑軌使用油靜壓系統支撐，並搭配線性馬達驅動，減少背隙影響，增加機台定位精度。
- (3) 旋轉主軸使用直流無刷馬達為驅動力，並搭配氣靜壓軸承使轉動更加平穩。
- (4) 各軸使用光學尺量測定位作為回饋系統，隨時補償，降低機台定位誤差。

而超精密加工主要有三項特點：[13]

- (1) 目前多使用於加工軟質金屬如無氧銅、鋁合金等以及無電解鍍，亦可用在塑膠材料之加工，加工完之表面可得到奈米等級的表面粗糙度以及次微米等級的形狀精度，達到光學等級之表面品質。
- (2) 對於結晶類物質，在不使用切削油、水等冷卻液的情況下亦可切削加工，透過機台的高穩定度以及精確的定位精度，使脆性材料被加工時亦有延性行



為，因此即使是潮解性的某些結晶或是傳統上只能以磨削加工之材料，也能夠透過超精密加工技術得到優越之表面。

- (3) 配合極尖之刀具，以特殊形狀之刀尖作為切削刀具，可以在加工物上加工出微細的溝槽或特殊幾何形狀，完成細微結構之加工。

2.2.2 單晶鑽石切削技術

鑽石為目前已知硬度最高、散熱最快的物質，沒有任何材料具有鑽石這麼多的優越性質，如表 2.2 所示。二十世紀前，由於天然鑽石取得不易，單價昂貴，因此鑽石的工業應用相對稀少。1954 年美國奇異公司成功合成出人造鑽石[14]，1957 年開始將人造鑽石商品化，隨著工業的發展，人造鑽石的生產技術持續進步，工業上對人鑽石的需求不斷的推升，使得鑽石在工業上的應用逐漸普及化。

表 2.2 鑽石之性質表[15]

性質	數值	單位
強度	1.9×10^4	kg/mm ²
張力強度	> 1.2	GPa
抗壓強度	> 110	GPa
動摩係數	0.03	無
聲速	1.8×10^4	m/s
密度	3.52	g/cm ³
楊氏模數	1.22	GPa
縮伸比	0.2	無
熱脹係數	1.1×10^6	K ⁻¹
熱傳導率	20.0	W/cm-K
熱振參數	3.0×10^8	W/m
狄拜溫度	2200	K
折射率(波長 591mm)	2.41	無
透光區	UV-IR	無
介電常數	5.7	無
介電強度	1.0×10^7	V/cm
電子移動性	2200	cm ² /V-s
電孔移動性	1600	cm ² /V-s
飽和電子速度	2.7×10^7	cm/s
飽和電動速度	1.0×10^7	cm/s
能隙	5.45	eV
電阻率	$10^{13} \sim 10^{16}$	Ω-cm

鑽石擁有相當多的優良性質，使其適合作為切削刀具的材料，例如，鑽石的超高硬度，適合用於磨料之中；最高的導熱性，可應用於散熱薄片或塗料之中；抗壓強度是碳化鎢的 20 倍，可使用於高壓零件上；高抗腐蝕性、耐磨性使其可應於惡劣環境中；相對低的磨擦係數可應用於軸承中的鍍膜，除此之外還有各種良好特性，如表 2.3 所示，這些優良的性質使鑽石成為超精密加工刀具的不二選擇。

表 2.3 鑽石之性質與應用[14]

最高聲速——喇叭振膜	最大硬度——超級磨料	最尖利度——外科用刀
最強抗壓——高壓頂錘	最快孔速——半導體片	最明透光——雷達光罩
最速傳熱——散熱薄片	高折射率——鑽石寶物	抗輻射性——偵測材料
高電阻值——絕緣材料	高抗蝕性——化學盛具	低比熱值——散熱材料
低磨擦阻——高速軸承	低熱振性——切割工具	低熱脹率——矽晶墊片

單晶鑽石切削技術係指使用超精密加工機搭配單晶鑽石刀具對材料進行切削加工。由於單晶鑽石具有高硬度、低摩擦係數、低熱膨脹係數等特點，高硬度特性可維持其切削性，而低摩擦係數與熱膨脹係數使切削過程具有較低的發熱量與較小的熱膨脹[16]；另外單晶鑽石能夠被研磨加工出高尖銳度之刃邊(Cutting edge)[2]，如圖 1.1 所示，其中刃邊半徑(Cutting edge radius, γ_β) 能夠控制在 50 nm 以內，使得單晶鑽石刀能夠具有極佳之輪廓；加上超精密加工過程中切削量極小，故工件在加工過程中的形變量以及切削力非常小，可減少切削震動，獲得極佳的加工精度，目前單晶鑽石切削的形狀精度(Peak to valley, PV)可達到次微米以下，表面粗糙度(R_a)可達到奈米等級。

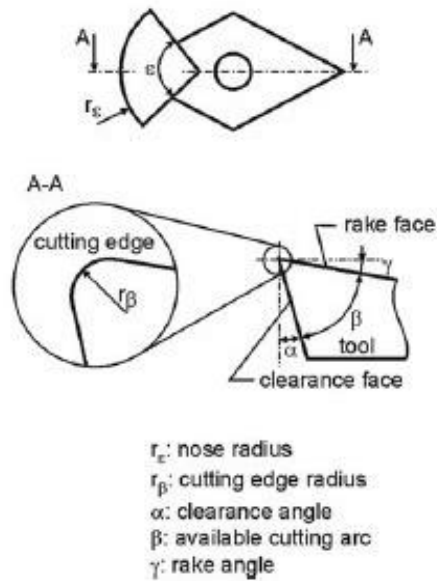


圖 2.4 單晶鑽石刀具之示意圖[2]

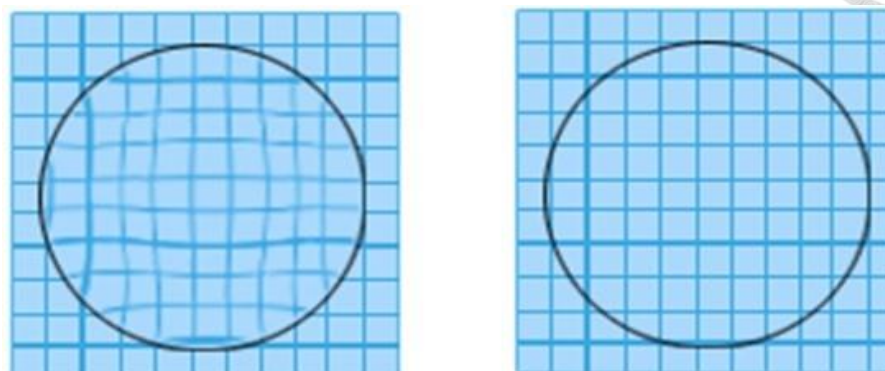
在一般環境下極為穩定的鑽石，若處於高溫或有適當之催化劑，則鑽石有機會轉變為結構薄弱的石墨組織，其中鑽石對鐵系元素，如鐵(Fe)、鈷(Co)、鎳(Ni)等有著強烈的化學親合性，透過鐵系元素作為催化劑會降低鑽石石墨化之溫度[17]，使得鑽石刀具無法保持切削性，因此無法加工傳統模具常用之鐵金屬及其合金。目前單晶鑽石切削技術所施作之工件材料多為鋁合金、無氧銅以及各種塑膠材料等，其中最特別的材料為無電解鎳(Electroless nickel)，雖然為鎳材，但其中包含 10% 以上的磷(P)，使鎳材不易與鑽石反應，為目前超精密單晶鑽石加工技術中硬度較高之工件材料，常用於光學元件之射出成形模仁。

2.3 光學設計與性質

2.3.1 非球面的定義與公式

由物理定義得知，球面(Sphere)為曲面上每一個點對圓心的曲率皆為定值，而非球面(Asphere)指的是曲率半徑會隨著曲面每個點的位置不同而有所改變，例

如雙曲面、橢圓面、拋物面等幾何曲面，廣義來說就是圓心到曲面上的各點非一定值即為非球面[18]。從過往的理論可得知，相較於球面透鏡，非球面透鏡能夠減少透鏡成像之像差，如圖 2.5 所示，亦可減少透鏡厚度，進而降低生產成本。



(a) Spherical lens

(b) Aspherical lens

圖 2.5 球面鏡與非球面鏡成像示意圖

在光學系統的設計上，鏡片曲面大多為旋轉軸對稱，因此我們可以用公式 (2.11) 之多項式來定義非球面曲面的輪廓[19]：

$$Z = \frac{CX^2}{1 + \sqrt{1 - C^2X^2(1+k)}} + A_2X^2 + A_4X^4 + A_6X^6 + \dots \quad (2.11)$$

若把非球面頂點的半徑曲率(Radius curvature)定義為 R ，偏心率(Eccentricity)定義為 e ，則

$$C = \frac{1}{R}, \quad k = 1 - e^2 \quad (2.12)$$

公式(2.11)、(2.12)中

Z ：鏡面深度(Sag)，代表鏡面頂點到最下緣的垂直距離，如圖 2.6 所示

C ：頂點曲率半徑之倒數，代表透鏡的曲率

X ：具非球面之旋轉軸的水平距離，代表鏡片的截高



k : 二次曲線常數

A_2 、 A_2 、 A_2 、……為非球面之高次項係數

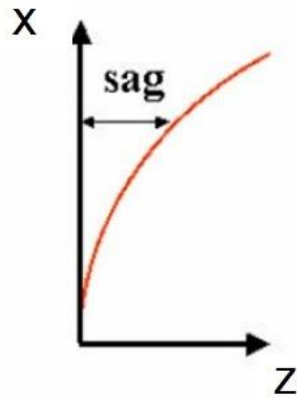


圖 2.6 鏡片深度(Sag)座標示意圖[20]

根據參數的改變，可用多項式標示各種任意的二次曲線，如圖 2.7 所示，不同的 k 值，會產生不同的曲面，定義如下：

$k < -1$ 時，曲面為雙曲面(Hyperboloid)

$k = -1$ 時，曲面為拋物面(Paraboloid)

$-1 < k < 0$ 時，曲面為橢圓(Ellipsoid)

$k = 0$ 時，曲面為球面(Sphere)

$k > 0$ 時，曲面為扁橢圓面(Oblate ellipsoid)，以短軸為旋轉軸

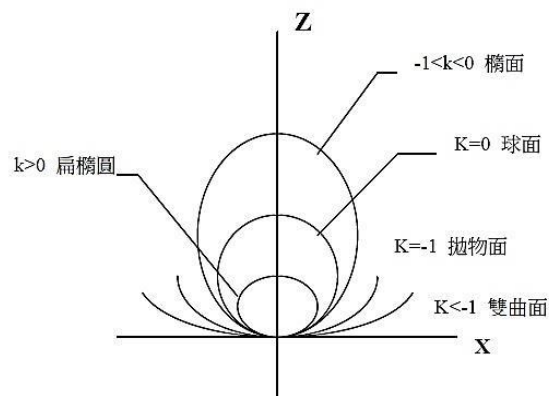


圖 2.7 二次圓錐曲線[21]



2.3.2 像差理論(Aberration)

像差是指光經過透鏡之後，實際成像與理論成像的差異，這種變化我們稱為畸變(Distortion)，像的畸變是因為鏡片受到光軸的影響，使各位置的的橫向放大率不一致，使物理成像產生變形，如圖 2.8 所示。圖 2.8 - (a)如平面鏡，因為光線不會產生像差，故成像不會產生任何變形；若為凸透鏡，離軸越遠放大率越小，則會造成如圖 2.8 - (b)的桶形畸變；反之若是凹透鏡，離軸越遠放大率越大的話，則會造成如圖 2.8 - (c)的枕形畸變[22]。

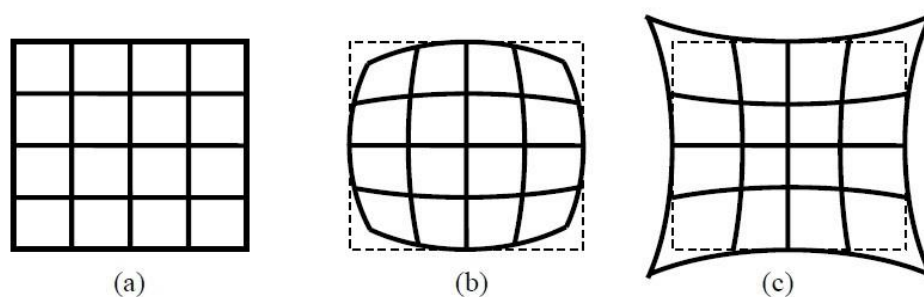


圖 2.8 畸變(Distortion) 示意圖[22]

由於球面透鏡看物體時會有扭曲的現象，因此前人設計出透鏡表面為非球形之弧度的非球面透鏡，以減少球面透鏡的像差與變形，如圖 2.9 所示。

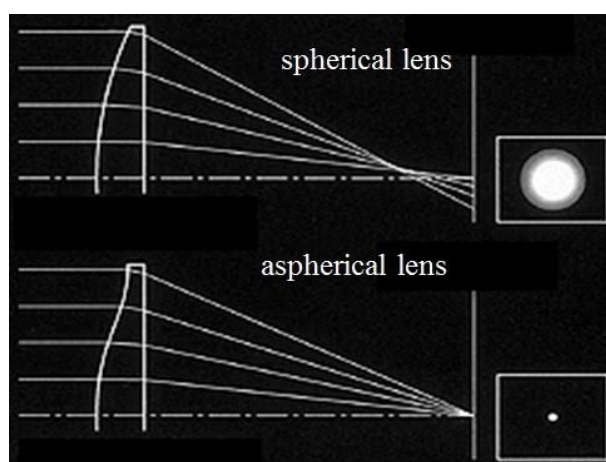


圖 2.9 球面與非球面像差示意圖



2.4 表面組織

2.4.1 表面形貌定義

如圖 2.10 所示，假設有一完美光滑的平板，表面長 150 mm(圖 2.10a)，如果在其中有 15 μ m 深的凹陷(圖 2.10b)，仍然可以說此表面是平滑的，但是稍微彎曲。如果高點的間隔減半(圖 2.10c)，此表面仍可被認為是平滑但稍微彎曲。然而當間隔更進一步減小時(圖 2.10d)，則表面看起來不再平滑，稱其為波紋狀。若更加減少其間隔時(圖 2.10e)，則波紋緊緊聚在一起，用眼睛不能分辨其個別的波峰，此表面可稱為平坦但粗糙。

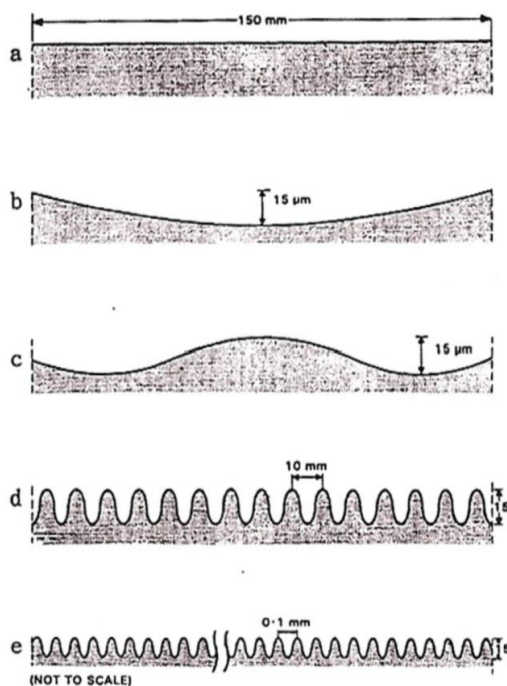


圖 2.10 具有相同不規則高度但間隔不同之表面[23]

上述屬於純幾何的分析，但在實際加工時，工具機本身有彈性變形、振動，以及加工時車刀與工件間有材質不均勻或不穩定時，進而產生細微之振動，使加工後工件表面產生凹凸不平的表面形貌。一般表面形貌可區分為四大類，包括：



粗糙度(Roughness)、波紋(Waviness)、方位(Lay)、形式(Form) ，如圖 2.11 所示，分述如下：

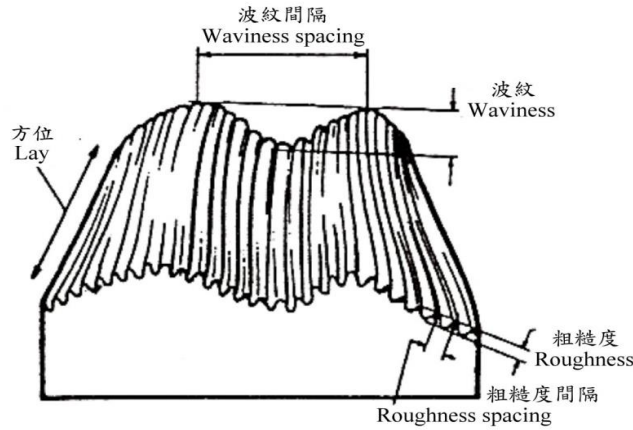


圖 2.11 工件表面形貌示意圖[23]

(1) 粗糙度(Roughness)

經過實際加工後，工件之表面粗糙度可分為兩種形式，分別為理想表面粗糙度(Ideal surface roughness)以及自然表面粗糙度(Natural surface roughness)。理想表面粗糙度係指根據刀具幾何形狀與進給，推導出工件表面之理論表面粗糙度，如公式(2.13)所示，其中 R_a 為理想中心線平均粗糙度(mm)， f 為進給(mm/rev.)， R 為刀具之刀鼻半徑(mm)；自然表面粗糙度則是指實際加工後，因切削過程中不確定因子的影響，如：工具機的振動、刀具的破壞、刀具的振動、工件的變形等因素影響，而無法達到理想表面粗糙度。目前雖有公式可推導出理想表面粗糙度，但因加工過程中有許多其他變數需考慮，因此一般均以實驗為基礎，從實驗中獲取資料，在以迴歸方式推導其經驗表面粗糙度。

$$R_a = \frac{f^2}{32R} \quad (2.13)$$



(2) 波紋(Waviness)

波紋之間的間隔大於粗糙度，是由於粗糙度重疊所引起的的組織，一般是因為機器或工件撓屈、振動、跳動、擠壓等引起的變形，造成加工表面出現小幅度的形貌變化。

(3) 方位(Lay)

在加工時，工件表面有明顯的方向特性，稱為方位，方位在表面粗糙度的量測上相當重要。以車削為例，方位即是刀具進給的方向，此時垂直於方位的方向，即可量測出工件的各種表面形貌。

(4) 形式(Form)

忽略粗糙度及波紋之表面形狀後，剩餘之表面形貌是由於工件之治具或刀具的剛性不佳，導致在加工時因受力而變形，此時稱之為形式。

表面形貌不會單獨出現，通常係由粗糙度、波紋以及形式三者共同組合而成，如圖 2.12 所示，透過粗度儀量出各種形貌的外形(profile)圖，並對外形圖進行頻譜分析，進而瞭解工具機的性能、顫振的發生、刀具的磨耗等。由此可知，表面形貌的量測在加工製造過程中是不可或缺的一環，在超精密加工領域中更是極為重要。

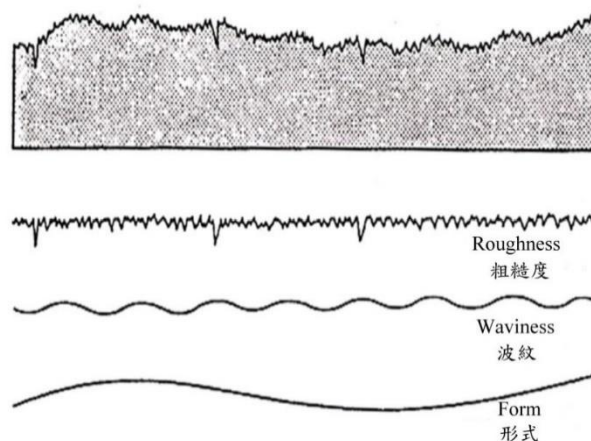


圖 2.12 粗糙度、波紋及形式三者組合效果之示意圖[23]



2.4.2 表面粗糙度表示方法

表面粗糙度(Surface roughness)有許多表示方式，其中最常使用的表示法有三種，分別為：中心線平均粗糙度(R_a)、均方根粗糙度(R_q)以及最大粗糙度高度(R_t)，以下各別說明此三種表面粗糙度參數之定義與計算方式。

(1) 中心線平均粗糙度(Roughness average, R_a)

中心線平均粗糙度(R_a)又被稱為中心線平均值(C.L.A)，在美國亦被稱為算術平均數(A.A.)，其計算方式為在粗糙度斷面曲線中央畫一橫向直線，使上方總面積與下方總面積相等，如圖 2.13 所示，計算方法如下：

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y| dx \quad (2.14)$$

其中， Y 為中心線至曲線高度的距離， L 為基準長度。

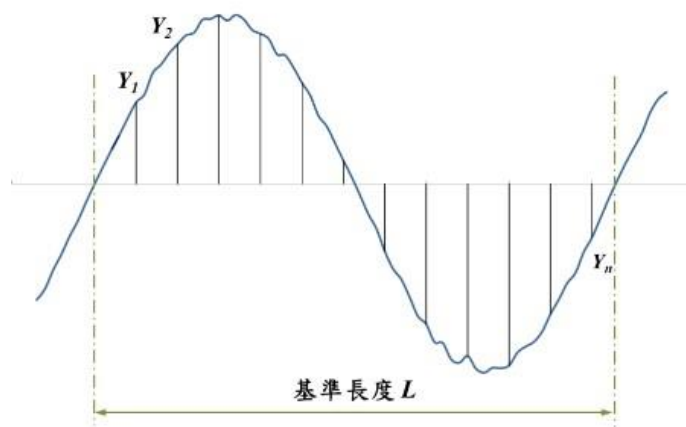


圖 2.13 R_a 與 R_q 計算之示意圖

(2) 均方根粗糙度(Root-mean-square (RMS) roughness, R_q)

均方根粗糙度又稱為粗糙度幾何平均值，相較於 R_a ，更能顯示出表面的優越性，計算之示意圖如圖 2.13 所示，其數學導出式如下：



$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Y^2 dx} \quad (2.15)$$

其中， Y 為中心線至曲線高度的距離， L 為基準長度。

(3) 最大粗糙度高度(Maximum roughness depth, R_t)

主要有 R_t 、 R_{max} 、 R_p 三種表示法，如圖 2.14 所示。 R_t 為評估長度內外形的最高點至最低點的垂直距離； R_{max} 為基準長度 L 內最大波峰至最低波谷的高度； R_p 為基準長度 L 內在中心線之上的外形的最高點高度；一般都以 R_t 表示工件的最大粗糙度高度。

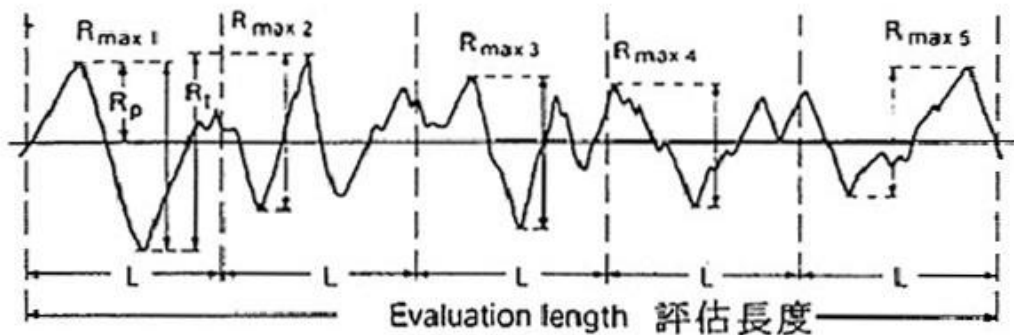


圖 2.14 R_t 、 R_{max} 、 R_p 參數示意圖[23]

2.4.3 形狀精度表示法

形狀精度(Form accuracy)又稱為形狀誤差，即是實際加工完之工件表面與預期達到之工件表面的差異。無論採用什麼製程和加工方法，所製造出來的工件均會殘留形狀誤差。形狀誤差是將實際量測出來的表面形狀與理想形貌輪廓做比較，如圖 2.15 所示，並以實際表面形貌與理想表面形貌對比後的最大波峰及最小波谷之偏差值(Peak to valley, PV)表示為表面之誤差，一般以 PV 值來表示。



超精密加工技術主要應用於光學模具的開發，為製作出光學產品的第一步，若光學模具之加工曲面與光學設計之曲面的誤差越小，後續製程的累積誤差即可降低，因此形狀精度為超精密加工技術的重要指標。

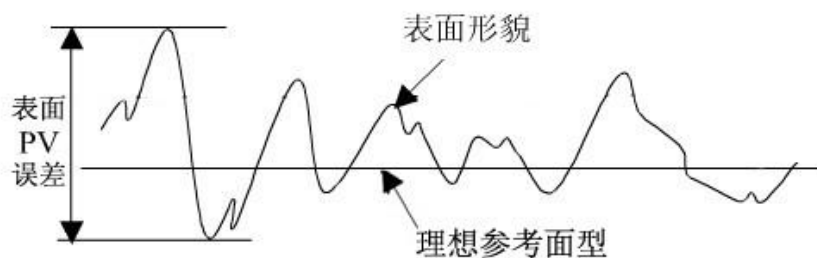


圖 2.15 形狀精度示意圖

Chapter 3 實驗設備介紹



本章 3.1 節介紹整個實驗所需之儀器以及工件材料，並概述其規格及操作條件，接著 3.2 節詳細介紹實驗使用之 CAM 分析軟體。

3.1 實驗設備

3.1.1 超精密加工機

實驗使用之超精密加工機為 Nanotech 公司所生產，機台型號為 Nanotech 650FG^{v2}，如圖 3.1 所示。此四軸超精密加工機 X、Y 以及 Z 軸由線性馬達所驅動，採用線性光學尺定位，解析度可達 8 pm，並具備超精密氣壓石墨軸承之工件主軸(C 軸)、高剛性之油靜壓導軌以及被動式氣墊隔震系統，以提供高穩定性的切削環境。本機台可用於軸對稱曲面之超精密鑽石車削，或配合慢刀伺服系統加工非軸對稱之元件，亦可搭配氣壓軸承之高速主軸進行多軸加工之超精密鑽石銑削。機台上另搭載放大倍率 100 倍之 CCD 線上量測系統，如圖 3.2 所示，能夠找出鑽石刀具之 R 值並將刀具的位置輸入至機台裡，並可用於觀察工件表面。機台詳細規格如表 3.1 所示。本實驗使用四軸超精密加工機配合單晶鑽石球銑刀、C 軸模式固定工件以及 X-Y-Z 三軸同動之螺旋路徑銑削加工 3x3 之陣列鏡頭，並使用 CCD 線上量測系統觀察對位設計，提升翻面後的定位精度。

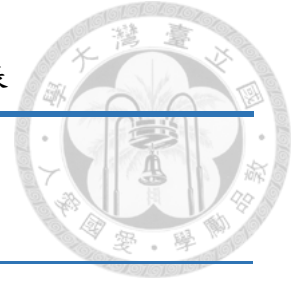


圖 3.1 超精密加工機 Nanotech 650FG^{v2}



圖 3.2 Nanotech 650FG^{v2} CCD 線上量測系統之鏡頭

表 3.1 超精密加工機 Nanotech 650FG^{v2} 規格表



廠牌	美國 Nanotech
型號	Nanotech 650FG ^{v2}
X、Y、Z 軸功能	
行程	X : 350 mm、Y : 150 mm、Z : 300 mm
解析度	8 μm
進給	max 2000 mm/min
真直度	X : 0.3 μm/350 mm、Y : 0.5 μm/150 mm、Z : 0.3 μm/300 mm
工件主軸	
旋轉速度	max 10000 rpm
荷重	max 85 kg
工件最大外徑	650 mm
C 軸功能	
行程	360°
解析度	0.01 arc seconds
旋轉速度	max 3000 rpm
氣壓軸承之高速主軸	
偏轉公差	< 25 nm
旋轉速度	max 60000 rpm



3.1.2 形狀量測儀

形狀量測儀為英國 Taylor Hobson 公司生產，機台型號為 Form Talysurf PGI 1240，如圖 3.3 所示。本儀器採用水平臂探針接觸式量測加工件之表面輪廓及表面粗糙度。可用於精密至超精密加工件的形狀精度與表面粗糙度檢測。此機台使用鼻頭半徑 $2\ \mu\text{m}$ 的鑽石探針，可進行量測範圍為水平軸(X)行程 200 mm，垂直軸(Z)行程 12.5 mm，解析度可達 0.8 nm，詳細規格參考表 3.2 所列。實驗使用形狀量測儀量測加工完之形狀精度以及表面粗糙度。

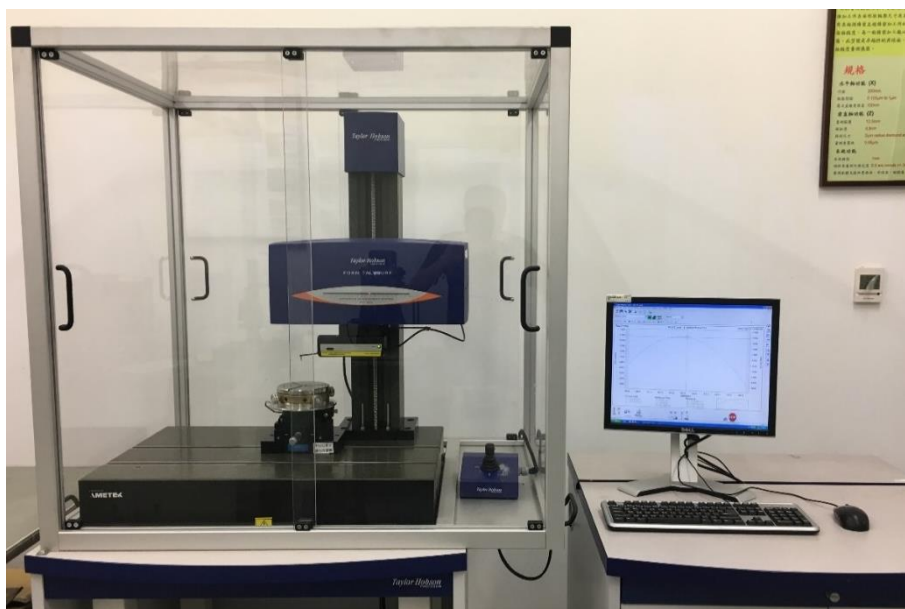


圖 3.3 形狀量測儀 Form Talysurf PGI 1240

表 3.2 形狀量測儀 Form Taylorsurf PGI 1240 規格表

廠牌	英國 Taylor Hobson
型號	Form Taylorsurf PGI 1240
水平軸功能 (X)	
行程	200 mm
取樣間距	0.125 μm ~ 1 μm
最大直線度誤差	100 nm
垂直軸功能 (Z)	
量測範圍	12.5 mm
解析度	0.8 nm
探針尺寸	2 μm radius diamond stylus
量測重複性	0.05 μm
系統功能	
系統雜訊(RMS)	1 nm
傾斜角量測不確定度	0.5 arc minute($\pm 35^\circ$)

3.1.3 雷射共軛焦顯微鏡

雷射共軛焦顯微鏡為日本 Keyence 公司生產，機台型號為 VK9700，如圖 3.4 所示。該儀器之特色除具有光學顯微鏡功能外，還可以應用紫光雷射與 X-Y-Z 掃描系統獲得量測件之立體資料影像，建構量測件表面之微結構，並以接圖方式擴展可量測視野，提高量測範圍。此顯微鏡最高放大倍率可達 3000 倍，Z 軸解析度可達 0.001 μm ，可進行高精度的檢測與分析，詳細規格參考表 3.3 所列。實驗以雷射共軛焦顯微鏡掃描並建立加工完之非球面透鏡立體結構。



圖 3.4 雷射共軛焦顯微鏡 VK9700

表 3.3 雷射共軛焦顯微鏡 VK9700 規格表

廠牌	Keyence
型號	VK9700
光源	紫光半導體雷射
雷射掃描方式	區域 (2048 x 1536 像素)
放大倍率	200x、400x、1000x、3000x
「光學變焦」功能	1x 至 6x
Z 軸線性尺規模組解析度	0.001 μm
偵測演算法	頂點演算法、PRD 演算法
重複精度(σ)	X、Y 軸 0.02 μm 、Z 軸 0.014 μm

3.1.4 數位顯微鏡

實驗利用 Keyence 公司的數位顯微鏡來拍攝加工完的工件表面，觀察其表面形貌，此機台的型號為 VHX-2000，如圖 3.5 所示。數位顯微鏡設計用於改進傳

統光學顯微鏡的缺點，包含景深淺、工作距離短、不具備可攜帶性和多功能性、樣本限制等，倍率可達 100 倍 至 1000 倍。詳細規格參考表 3.4 所列。



圖 3.5 數位顯微鏡 VHX-2000

表 3.4 數位顯微鏡 VHX-2000 規格表

廠牌	Keyence
型號	VHX-200
影像擷取元件	1/1.8 型 211 萬像素 CCD 影像感測器 總畫素：1688(H) x 1248(V) 有效畫素：1628(H) x 1236(V) 實質畫素：1600(H) x 1200(V)
掃描方式	循序掃描
畫格速率	15 F/S 、 28 F/S
影像形式	壓縮時：JPEG/HD Photo 不壓縮時：TIFF
可觀測影像尺寸	20000(H)畫素 x 20000(V)畫素 (連接時)



3.1.5 單晶鑽石球銑刀

本實驗使用的是帝固鑽石公司(DI KU Diamond)製造的單刃單晶鑽石球銑刀，用來加工非球面以及水平定位線，如圖 3.6 所示。銑刀之刀鼻半徑(Nose radius)為 0.237 mm，Waviness 小於 0.2 μm ，刃邊有效角度(Window angle) 75° ，前傾角(Rake angle) 0° ，餘隙角 15° (Clearance angle)，圖 3.7 為單晶鑽石球銑刀刀尖放大圖，可觀察出加工前刀具刀邊沒有缺陷。



圖 3.6 單晶鑽石球銑刀

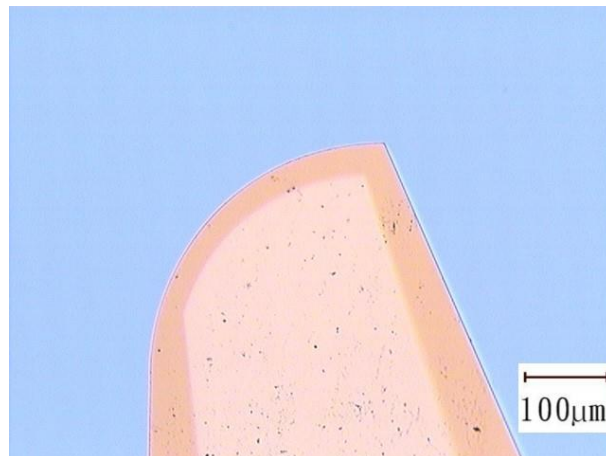


圖 3.7 單晶鑽石球銑刀刀尖示意圖



3.1.6 單晶鑽石車刀

本實驗另外使用 Contour 公司製造的單晶鑽石車刀加工工件平面、凹槽以及環狀定位溝槽，如圖 3.8 所示。車刀之刀鼻半徑(Nose radius)為 0.108 mm，Waviness 小於 0.05 μm ，刃邊有效角度(Window angle) 120° ，前傾角(Rake angle) 0° ，餘隙角 15° (Clearance angle)，圖 3.9 為單晶鑽石車刀刀尖放大圖，可觀察出加工前刀具刃邊狀況良好。



圖 3.8 單晶鑽石車刀

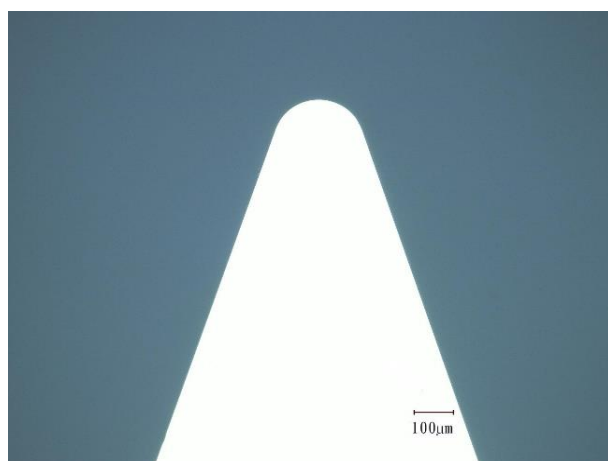


圖 3.9 單晶鑽石車刀刀尖示意圖



3.1.7 工件材料

本實驗所使用的工件材料為光學級 PMMA 壓克力(聚甲基丙烯酸甲酯)，工件外徑 60 mm，厚度 1.5 mm，如圖 3.10 所示。光學級 PMMA 壓克力具有優良的光學特性，透光度可達 92%以上，且擁有極佳的耐候性，長期使用也不會變色，適合用於光學鏡頭打樣之材料。材料性質如表 3.5 所列。



圖 3.10 光學級 PMMA 壓克力

表 3.5 光學級 PMMA 壓克力材料性質

透光率	折射率	抗拉強度	熱膨脹係數
> 92 %	1.412	73 MPa	6×10^{-5} mm/°C



3.2 實驗軟體介紹

超精密加工技術需要配合比傳統 CNC 更精細的刀具路徑程式，才能夠完成鏡面等級的工件表面加工，本實驗使用美國 Nanotech 公司開發的 NanoCAM 3D 超精密加工軟體來生成非球面透鏡加工之螺旋刀具路徑，軟體介面如圖 3.11 所示。NanoCAM 3D 是專為超精密加工機設計的刀具路徑程式軟體，可透過光學曲面的公式製作非球面、自由曲面等預加工曲面之程式，並轉出超精密加工機可以讀取的 CNC 點資料以進行加工。

本實驗總共有八種非球面設計，可將各個設計的參數輸入至 NanoCAM 3D 裡，如圖 3.12 所示。該軟體會根據設計的曲面計算出可使用之刀具規格，避免加工時產生干涉，如圖 3.13 所示，將可用之刀具規格輸入至軟體裡，如圖 3.14 所示，並設定其他加工條件，如圖 3.15 所示，以產生能夠達到光學級要求的刀具路徑之點資料，如圖 3.16 所示，螺旋路徑示意圖如圖 3.17 所示，最後搭配超精密加工機製作光學等級之非球面透鏡，螺旋加工示意圖如圖 3.18 所示[24]。

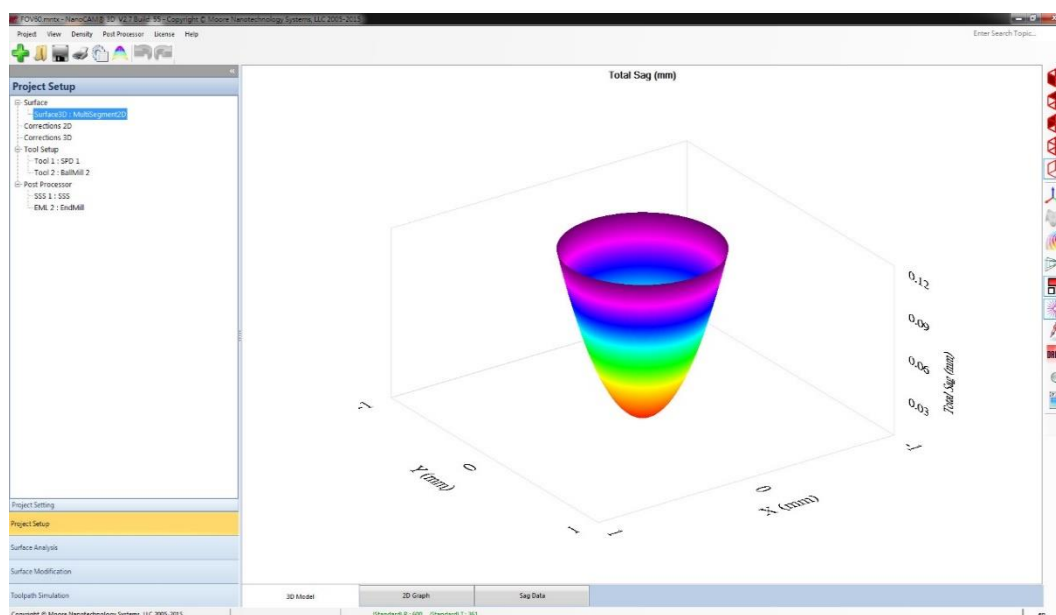


圖 3.11 NanoCAM 3D 操作介面

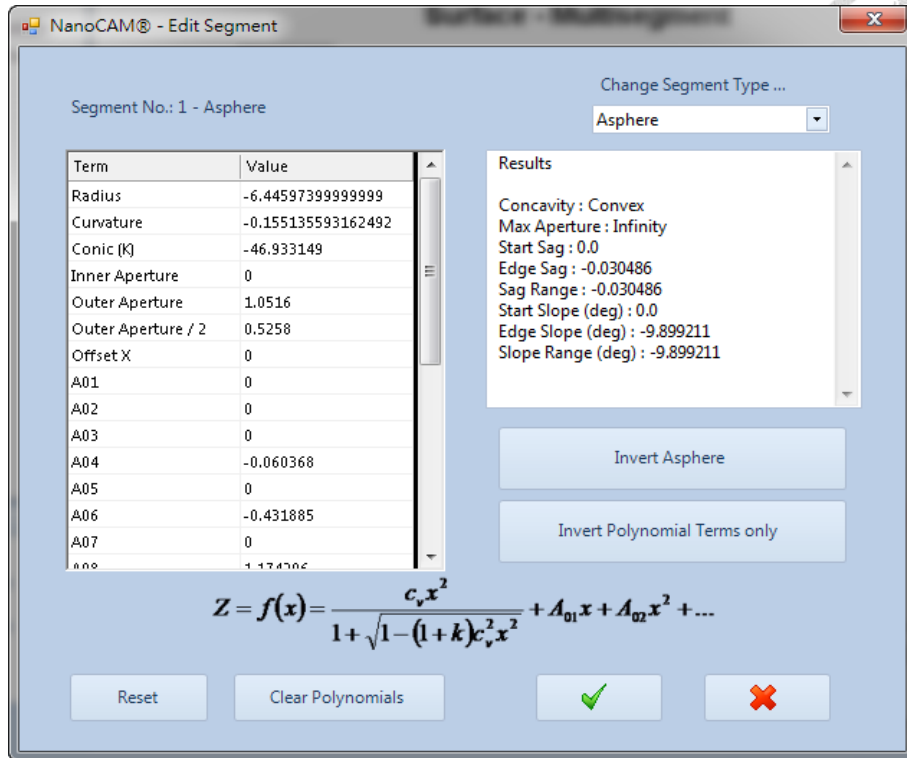


圖 3.12 非球面曲率參數設定圖

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	0.25 at R=0.477, Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	0.0
Max Part Sag (mm)	0.18
Min Part Sweep (deg)	0.0
Max Part Sweep (deg)	45.01114
Primary Clearance (dea)	0.0

圖 3.13 刀具規格建議

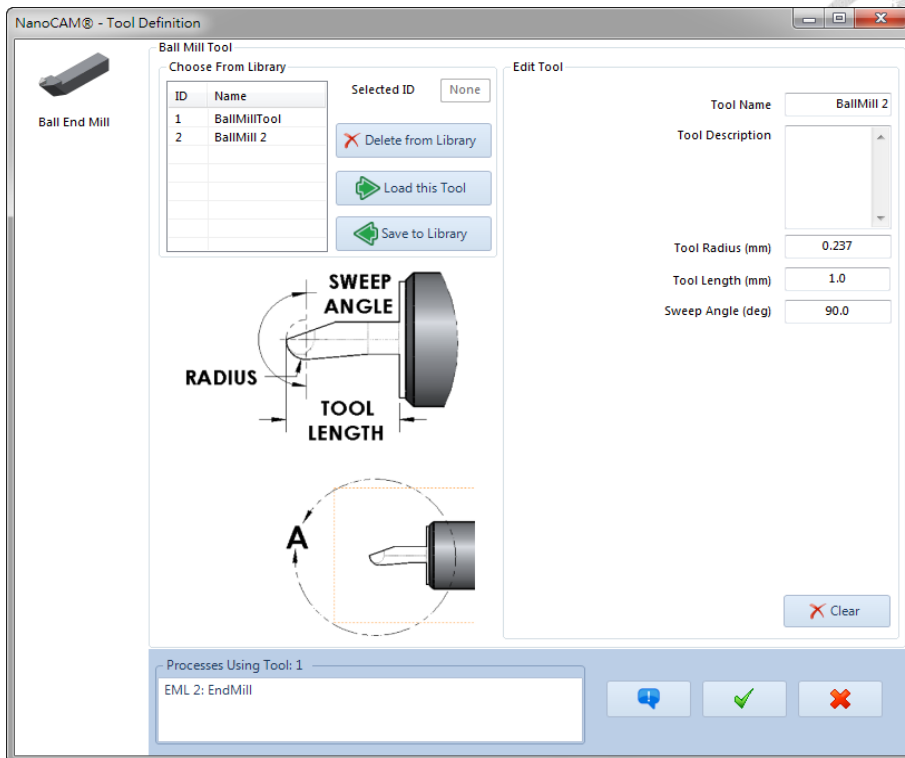


圖 3.14 刀具資料設定

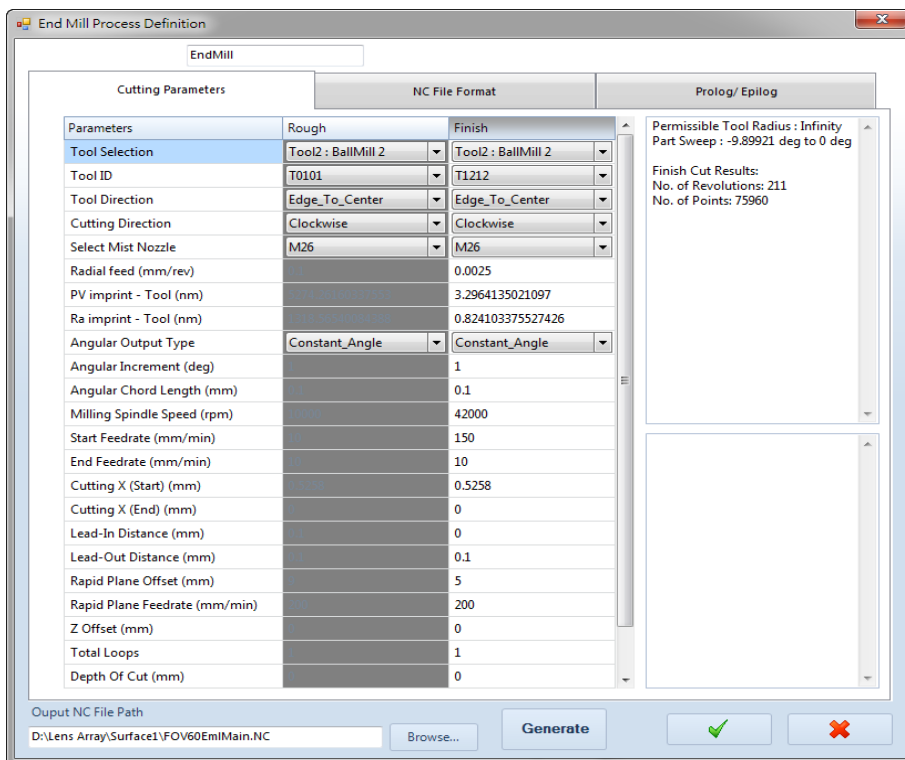


圖 3.15 加工參數設定


```

S1-FOV30.NC - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)
G01 Y0.0 X2.00000000 F200          ( PARKING POSITION - X )
Z5.00000000                        ( PARKING POSITION - Z )

( LEAD IN BLOCKS )
G01 Y-0.2 X0.63848081 Z0.2 F150

( CUTTING BLOCKS )
Z0.63848081 Y0.00000000 Z0.09799616 F150
Z0.63838193 Y0.01114300 Z0.09799266 F150
Z0.63808860 Y0.02228254 Z0.09798916 F149.999
Z0.63760090 Y0.03341525 Z0.09798566 F149.999
Z0.63691899 Y0.04453771 Z0.09798216 F149.999
Z0.63604307 Y0.05564656 Z0.09797866 F149.998
Z0.63497341 Y0.06673839 Z0.09797516 F149.998
Z0.63371033 Y0.07780984 Z0.09797166 F149.997
Z0.63225423 Y0.08885754 Z0.09796816 F149.997
Z0.63060554 Y0.09987811 Z0.09796467 F149.997
Z0.62876478 Y0.11086820 Z0.09796117 F149.996
Z0.62673250 Y0.12182446 Z0.09795767 F149.996
Z0.62450932 Y0.13274355 Z0.09795417 F149.996
Z0.62209592 Y0.14362216 Z0.09795067 F149.995
Z0.61949303 Y0.15445696 Z0.09794717 F149.995
Z0.61670146 Y0.16524466 Z0.09794367 F149.995
Z0.61372205 Y0.17598197 Z0.09794017 F149.994
Z0.61055571 Y0.18666561 Z0.09793667 F149.994
Z0.60720340 Y0.19729234 Z0.09793317 F149.994
Z0.60366615 Y0.20785892 Z0.09792967 F149.993
Z0.59994504 Y0.21836214 Z0.09792617 F149.993
Z0.59604119 Y0.22879878 Z0.09792267 F149.992
Z0.59195581 Y0.23916567 Z0.09791917 F149.992
Z0.58769014 Y0.24945966 Z0.09791568 F149.992
Z0.58324547 Y0.25967761 Z0.09791218 F149.991
Z0.57862316 Y0.26981641 Z0.09790868 F149.991
Z0.57382462 Y0.27987297 Z0.09790518 F149.991
Z0.56885131 Y0.28984422 Z0.09790168 F149.99
Z0.56370475 Y0.29972713 Z0.09789818 F149.99
Z0.55838651 Y0.30951870 Z0.09789468 F149.99
Z0.55289821 Y0.31921593 Z0.09789118 F149.989
Z0.54724151 Y0.32881587 Z0.09788768 F149.989
Z0.54141815 Y0.33831561 Z0.09788418 F149.989
Z0.53542990 Y0.34771224 Z0.09788068 F149.988

```

圖 3.16 加工路徑點資料

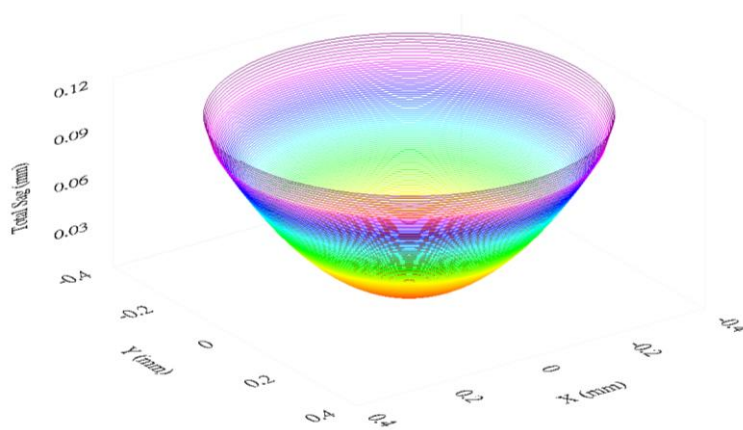


圖 3.17 螺旋路徑示意圖

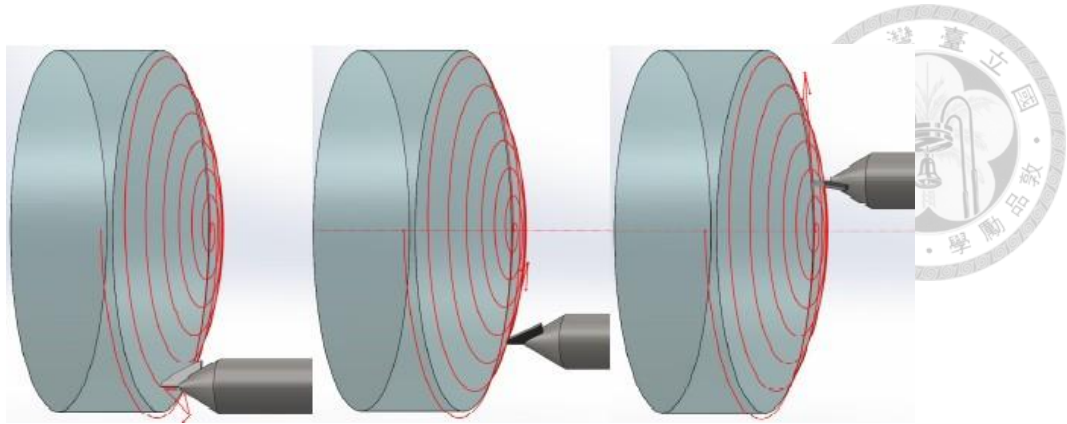


圖 3.18 螺旋加工示意圖(加工進程為由左往右)[24]

Chapter 4 雙面陣列鏡頭製作流程

本章節將介紹雙面陣列鏡頭的製作流程，並分析適合之刀具規格以及設計一對位機制，藉以完成雙面陣列鏡頭之加工，最後介紹實驗結果的量測方法。

4.1 實驗規劃

本實驗目的為探討 3x3 陣列鏡頭的加工製程，藉由 NanoCAM 3D 建立非球面曲面，並對曲面進行分析以及路徑規劃，進而找出適當之刀具規格。此外本實驗為直接在鏡片的兩面加工陣列非球面透鏡，設計對位機制，減少雙面加工時的定位誤差。最後使用超精密加工機搭配軟體分析之單晶鑽石球銑刀的規格銑削 3x3 之陣列鏡頭，並使各個非球面之形狀精度達到 $< 0.8 \mu\text{m PV}$ 以下。實驗配置如圖 4.1 所示，製作流程如圖 4.2 所示。

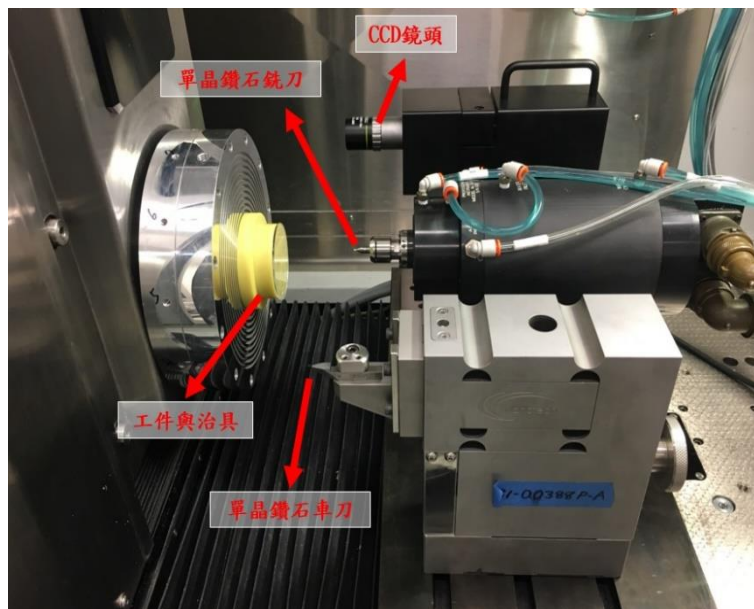


圖 4.1 實驗配置圖

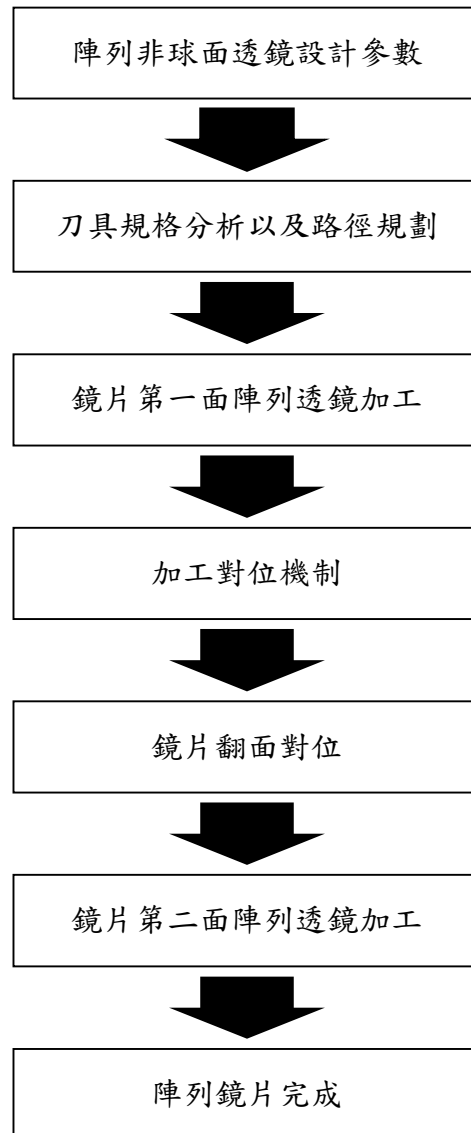


圖 4.2 雙面鏡片製作流程

4.2 3 x 3 陣列鏡頭設計以及非球面設計參數

4.2.1 3 x 3 陣列鏡頭設計

本實驗加工之 3x3 陣列鏡頭是由工研院機械所設計，此設計由兩片鏡片 (Lens)組成，如圖 4.3 所示，每一鏡片的兩面皆有非球面透鏡，如圖 4.4 所示，詳細尺寸如圖 4.5 所示，每面皆有兩種非球面設計，各面之非球面排列方式如圖 4.6 所示，其中縱向的間距為 1.4 mm，橫向間距為 1.8 mm。

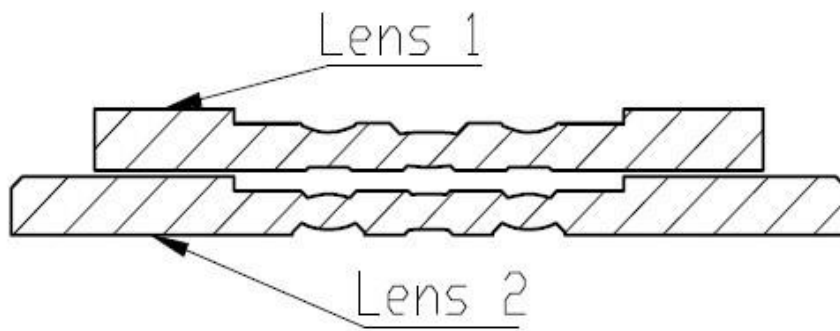


圖 4.3 3x3 陣列鏡頭鏡片之示意圖

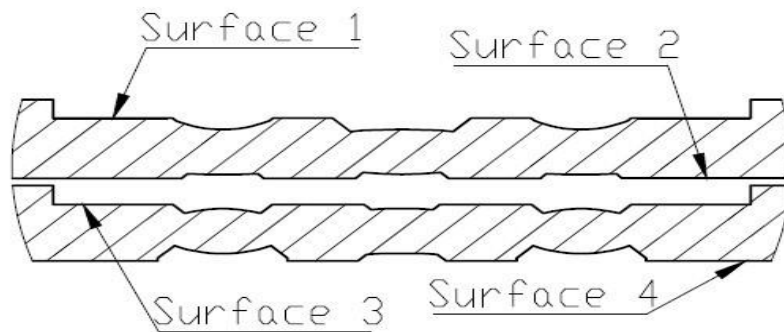


圖 4.4 3x3 陣列鏡頭 Surface 之示意圖

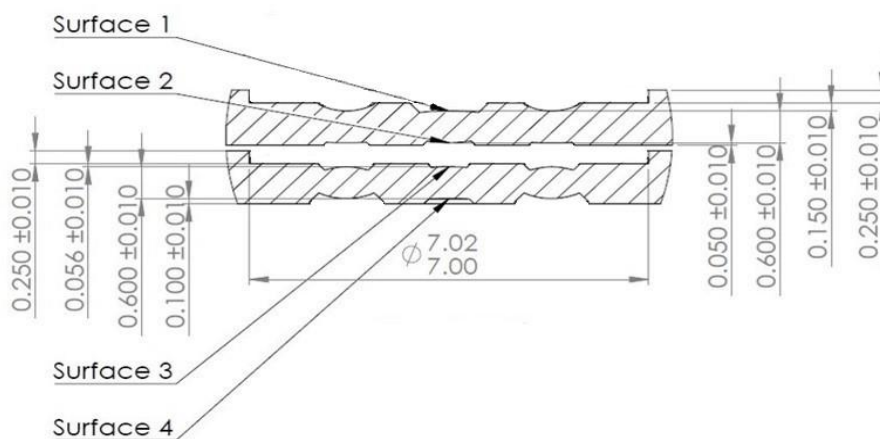


圖 4.5 陣列鏡頭尺寸圖

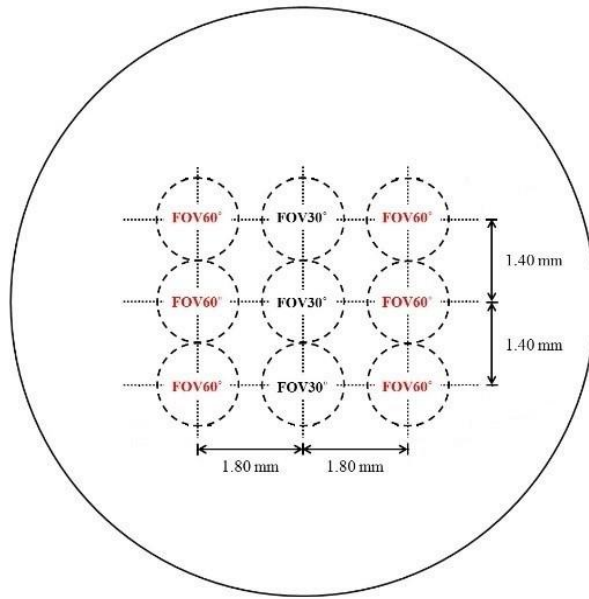


圖 4.6 3x3 陣列鏡頭鏡片單面之非球面透鏡排列示意圖

4.2.2 非球面設計參數

由 4.2.1 節可知，本實驗非球面總共有 8 種設計，各設計之參數如表 4.1 ~ 表 4.8 所示，將設計之參數帶入公式(2.11)，可得到對應之非球面形狀，如圖 4.7 ~ 圖 4.10 所示。

表 4.1 Surface 1 - FOV 30° 之非球面參數

參數	數值
有效外徑 (mm)	1.0316
Radius (mm)	6.445974
Conic Constant (K)	-46.933149
4th Order Coefficient	0.060368
6th Order Coefficient	0.431885
8th Order Coefficient	-1.174296
10th Order Coefficient	2.222253

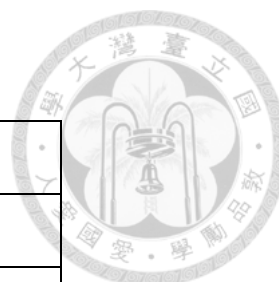
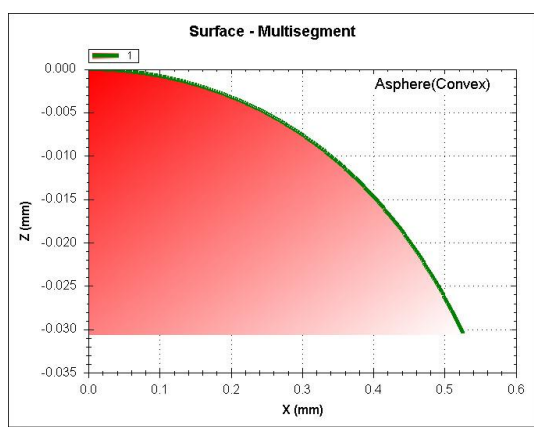
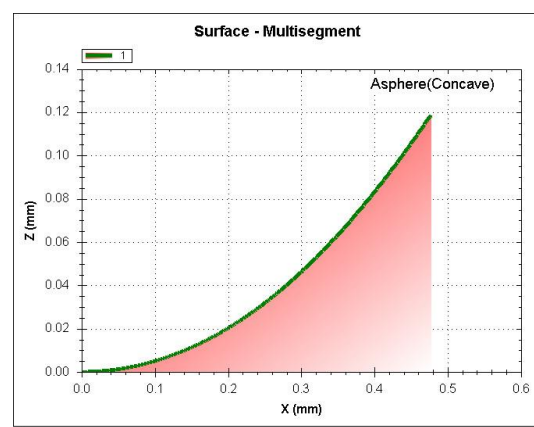


表 4.2 Surface 1 - FOV 60° 之非球面參數

參數	數值
有效外徑 (mm)	0.9334
Radius (mm)	-1.001203
Conic Constant (K)	-6.715386
4th Order Coefficient	-0.882568
6th Order Coefficient	1.759872
8th Order Coefficient	-0.552524
10th Order Coefficient	-3.339198



(a) Surface 1 - FOV 30°



(b) Surface 1 - FOV 60°

圖 4.7 Surface 1 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖

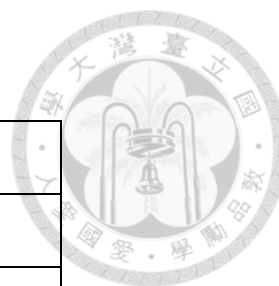
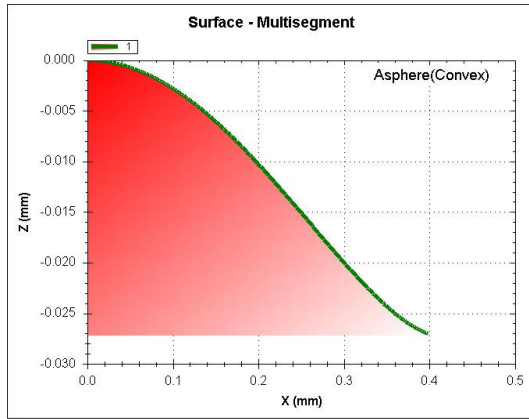


表 4.3 Surface 2 - FOV 30° 之非球面參數

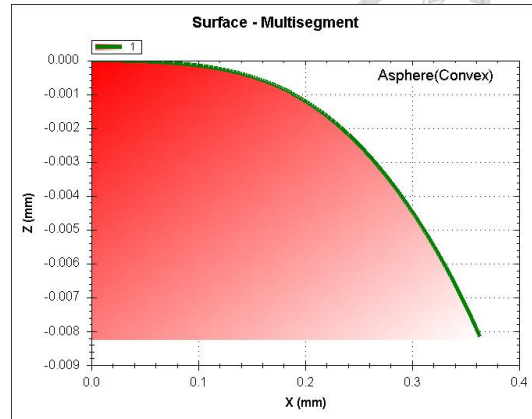
參數	數值
有效外徑 (mm)	0.7766
Radius (mm)	-1.751861
Conic Constant (K)	-38.869429
4th Order Coefficient	-0.140502
6th Order Coefficient	4.013924
8th Order Coefficient	-16.068748
10th Order Coefficient	39.440314

表 4.4 Surface 2 - FOV 60° 之非球面參數

參數	數值
有效外徑 (mm)	0.7060
Radius (mm)	-49.912177
Conic Constant (K)	-45141.671762
4th Order Coefficient	-0.538356
6th Order Coefficient	-0.567560
8th Order Coefficient	23.736333
10th Order Coefficient	-93.878381



(a) Surface 2 - FOV 30°



(b) Surface 2 - FOV 60°

圖 4.8 Surface2 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖

表 4.5 Surface 3 - FOV 30° 之非球面參數

參數	數值
有效外徑 (mm)	0.6186
Radius (mm)	15.514329
Conic Constant (K)	-26643.226438
4th Order Coefficient	1.970529
6th Order Coefficient	-12.070398
8th Order Coefficient	111.805610
10th Order Coefficient	-435.468481

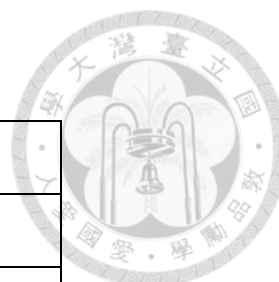
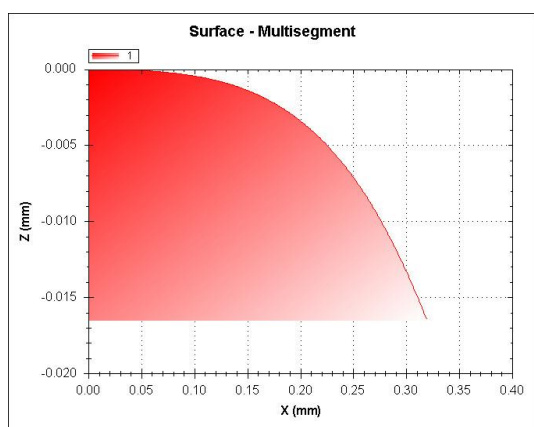
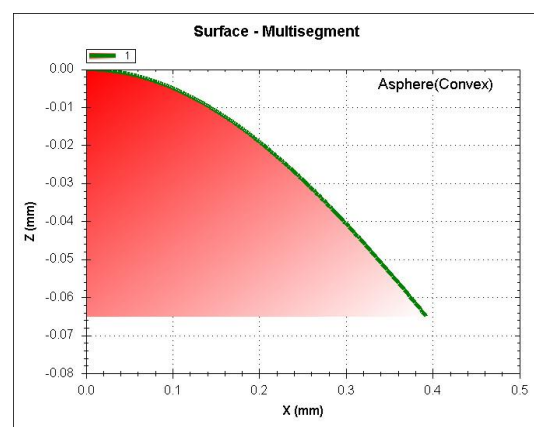


表 4.6 Surface 3 - FOV 60° 之非球面參數

參數	數值
有效外徑 (mm)	0.7560
Radius (mm)	1.000941
Conic Constant (K)	-13.571707
4th Order Coefficient	0.909895
6th Order Coefficient	-6.276257
8th Order Coefficient	22.332986
10th Order Coefficient	-34.354782



(a) Surface 3 - FOV 30°



(b) Surface 3 - FOV 60°

圖 4.9 Surface 3 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖

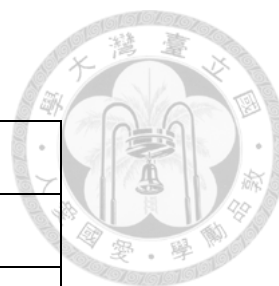
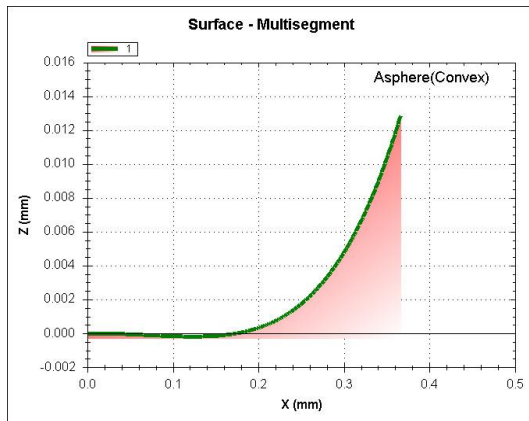


表 4.7 Surface 4 - FOV 30° 之非球面參數

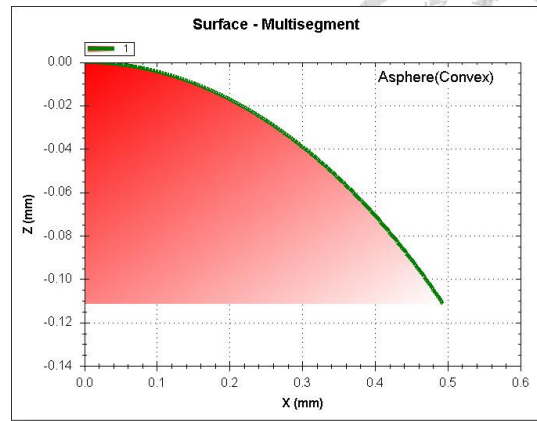
參數	數值
有效外徑 (mm)	0.7126
Radius (mm)	-20.339785
Conic Constant (K)	-23343.878420
4th Order Coefficient	0.466794
6th Order Coefficient	5.529264
8th Order Coefficient	-36.401434
10th Order Coefficient	104.859064

表 4.8 Surface 4 - FOV 60° 之非球面參數

參數	數值
有效外徑 (mm)	0.967
Radius (mm)	-1.182630
Conic Constant (K)	-2.063552
Aperture (mm)	0.4935
4th Order Coefficient	-0.182240
6th Order Coefficient	0.142362
8th Order Coefficient	-1.895999
10th Order Coefficient	3.192337



(a) Surface 4 - FOV 30°



(b) Surface 4 - FOV 60°

圖 4.10 Surface 4 - FOV 30°、FOV 60° 之非球面示意圖

4.3 刀具規格分析與路徑規劃

4.3.1 刀具規格分析

由於非球面上每個點的曲率不同，如圖 4.11 所示，因此必須找出非球面曲面上曲率最大的地方，進而反推加工非球面透鏡時，所能接受之最大刀鼻半徑，以免加工時發生干涉。將 4.2.2 節的非球面設計參數輸入至 NanoCAM 3D 裡，建立起非球面曲面之形狀後，NanoCAM 3D 能夠分析出加工非球面透鏡時，避免發生干涉之允許最大刀鼻半徑，並算出刀具刀邊之使用角度，如表 4.9~表 4.12 所示。

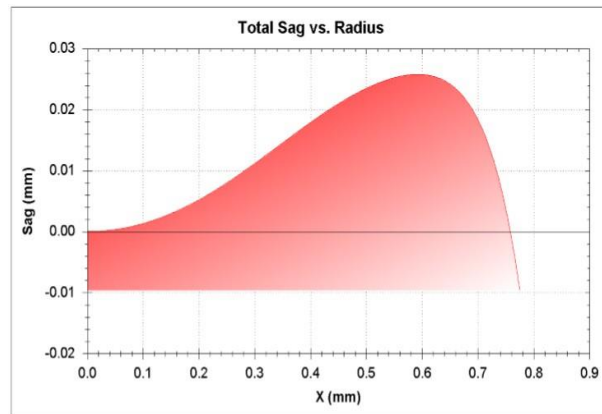


圖 4.11 曲率變化大之非球面

表 4.9 Surface 1 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議

(a) Surface 1 - FOV 30°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	Infinity at R=0.0, Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	-0.030486
Max Part Sag (mm)	0.0
Min Part Sweep (deg)	-9.89921
Max Part Sweep (deg)	0.0

(b) Surface 1 - FOV 60°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	0.98818 at R=0.183, Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	0.0
Max Part Sag (mm)	0.118662
Min Part Sweep (deg)	0.0
Max Part Sweep (deg)	26.744014

表 4.10 Surface 2 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議

(a) Surface 2 - FOV 30°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	0.760441 at R=0.3988, Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	-0.027036
Max Part Sag (mm)	0.0
Min Part Sweep (deg)	-5.655798
Max Part Sweep (deg)	0.0

(b) Surface 2 - FOV 60°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	Infinity at R=0.0, Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	-0.008149
Max Part Sag (mm)	0.0
Min Part Sweep (deg)	-4.200691
Max Part Sweep (deg)	0.0

表 4.11 Surface 3 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議

(a) Surface 3 - FOV 30°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	Infinity at R=0.0,Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	-0.016433
Max Part Sag (mm)	0.0
Min Part Sweep (deg)	-9.899892
Max Part Sweep (deg)	0.0

(b) Surface 3 - FOV 60°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	Infinity at R=0.3925,Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	-0.064984
Max Part Sag (mm)	0.0
Min Part Sweep (deg)	-15.572685
Max Part Sweep (deg)	0.0

表 4.12 Surface 4 - FOV 30°、FOV 60° 刀具規格建議

(a) Surface 4 - FOV 30°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	0.558271 at R=0.3663,Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	-0.000191
Max Part Sag (mm)	0.012842
Min Part Sweep (deg)	-0.134956
Max Part Sweep (deg)	9.715662

(b) Surface 4 - FOV 60°

Parameters	Value
Permissible Max Tool Radius (mm)	Infinity at R=0.0,Theta=0.0
Min Part Sag (mm)	-0.111283
Max Part Sag (mm)	0.0
Min Part Sweep (deg)	-26.501677
Max Part Sweep (deg)	0.0

從圖 4.7~圖 4.10 可以觀察到 Surface 1 - FOV 30°、Surface 2 - FOV 60°、Surface 3 - FOV 30°、Surface 3 - FOV 60° 以及 Surface 4 - FOV 60° 的非球面設計皆為凸型，因此刀鼻半徑不會受到限制。Surface 2 - FOV 60° 以及 Surface 4 - FOV 30° 非球面設計皆為凹型，可藉由 NanoCAM 3D 分析能夠加工曲面之最大刀鼻半徑。八種設計中較特別的為 Surface 2 - FOV 30°，雖然外型看似凸型，但因為反曲點的關係，使得外側形狀轉變為凹型，亦要注意能夠使用之最大刀鼻半徑。

為了加工出擁有良好形狀精度的工件，除了加工機的穩定性要高，刀具的形狀亦是非常重要的一環。刀具必須擁有良好之形狀輪廓，因此在購買鑽石刀具時，會要求刀具刃邊有效角度內的 Waviness，以降低加工時產生的誤差。



由表 4.9~表 4.12 中可以得知，避免加工八種非球面設計時產生干涉之最大刀鼻半徑為 0.558 mm，刀具刀邊有效角度必須大於 26.744°。

4.3.2 刀具路徑規劃

一般非球面加工路徑皆是由外而內加工，但由圖 4.5 可知，本實驗非球面透鏡皆沉於平面之下，平面至非球面中心的深度分別為：Surface 1 - 0.15 mm、Surface 2 - 0.05 mm、Surface 3 - 0.056 mm、Surface 4 - 0.1 mm，若是直接加工非球面的區域，單晶鑽石球銑刀會有插刀的危險，增加刀具磨耗，因此必須在非球面以外的地方加上導入路徑，降低刀子的負擔，如圖 4.12 所示，圖中藍色區域是以刀鼻半徑為圓弧半徑之圓弧，粉紅色區域為直線。

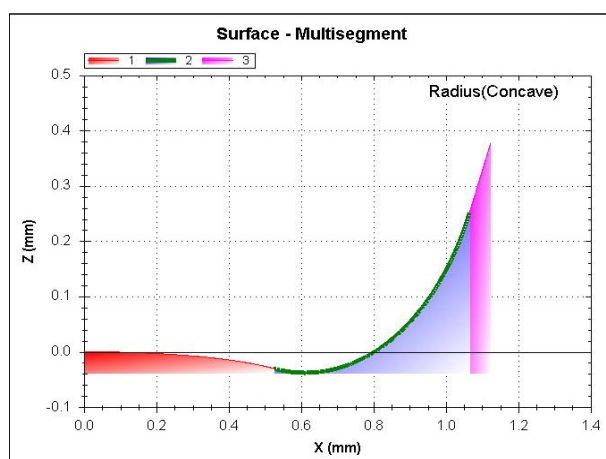


圖 4.12 加工導入路徑示意圖

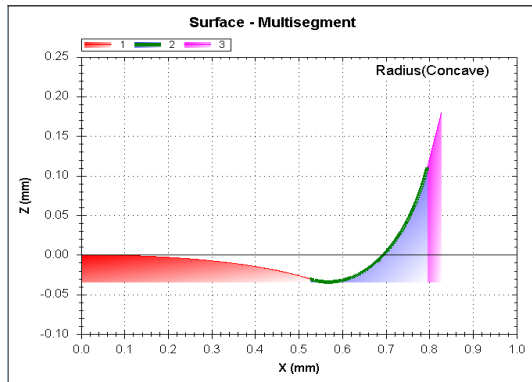
然加入導入路徑後，可能會因為加工範圍變大而影響相鄰非球面的有效徑，因此必須控制導入路徑的大小。為避免導入路徑干涉到相鄰非球面的有效徑，可藉由非球面之排列間距減去非球面有效外徑來評估導入路徑的距離，本次實驗有兩個間距：分別為 1.4 mm 以及 1.8 mm，由於較小之間距較易與相鄰非球面產生干涉，因此選用 1.4 mm 之間距進行計算，計算結果如表 4.13 所示。由表 4.13 可得知最大之導入路徑距離為 0.3684 mm，並在各非球面之有效徑外銜接以刀鼻半徑為圓弧半徑之圓弧路徑且距離必須小於 0.3684 mm。經過實驗得到：當藍色

區域之圓弧半徑為 0.25 時，能夠避免導入路徑影響相鄰非球面的有效徑，各非球面曲面加入導入路徑後之示意圖如圖 4.13 所示。

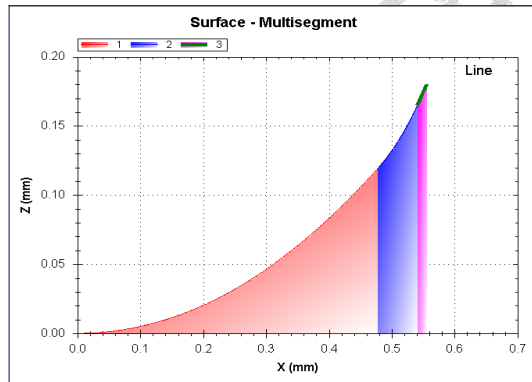


表 4.13 各非球面曲面避免干涉之最大導入路徑距離

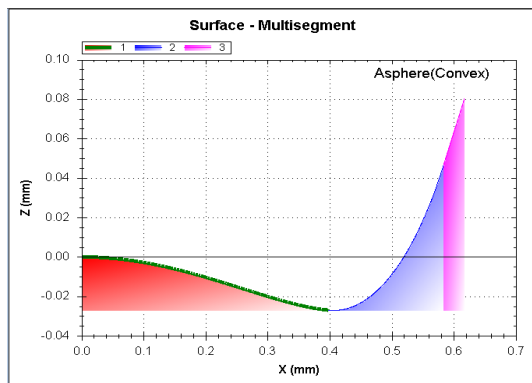
非球面曲面	最大導入路徑距離(mm)
Surface 1 - FOV 30°	0.3684
Surface 1 - FOV 60°	0.4666
Surface 2 - FOV 30°	0.6234
Surface 2 - FOV 60°	0.6940
Surface 3 - FOV 30°	0.7814
Surface 3 - FOV 60°	0.6440
Surface 4 - FOV 30°	0.6874
Surface 4 - FOV 60°	0.4330



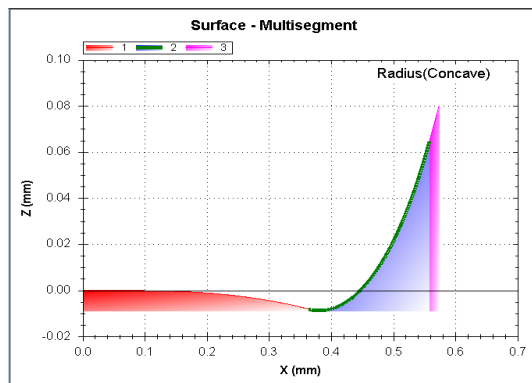
(a) Surface 1 - FOV 30°



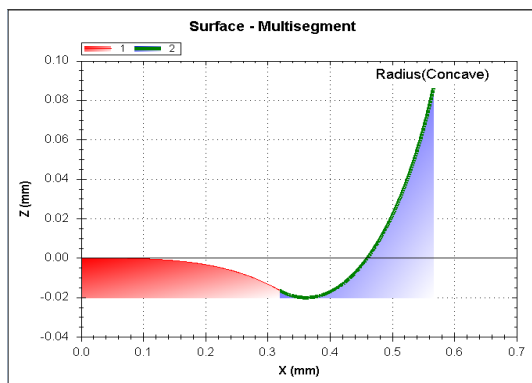
(b) Surface 1 - FOV 60°



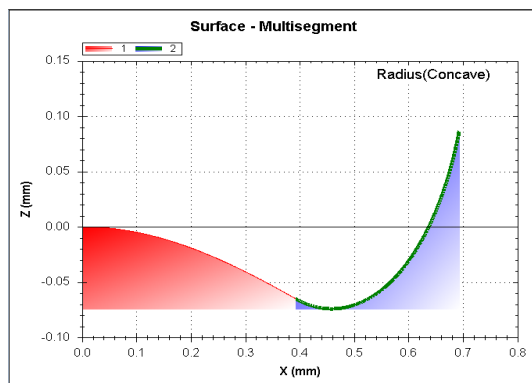
(c) Surface 2 - FOV 30°



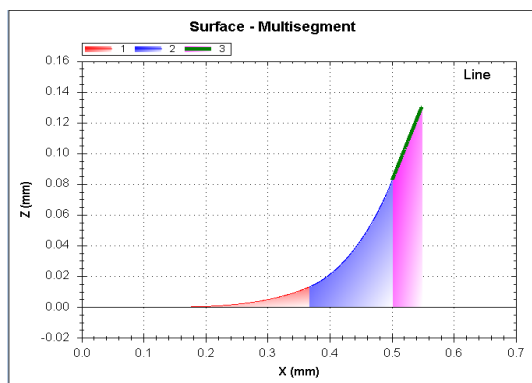
(d) Surface 2 - FOV 60°



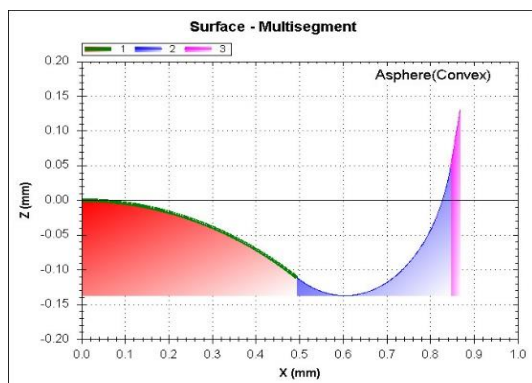
(e) Surface 3 - FOV 30°



(f) Surface 3 - FOV 60°



(g) Surface 4 - FOV 30°



(h) Surface 4 - FOV 60°

圖 4.13 各非球面導入路徑示意圖

根據 4.3.1、4.3.2 節之分析可得知刀具規格如下：最大刀鼻半徑需小於 0.25 mm，刀具刀邊有效角度必須大於 26.744°。



4.4 對位設計

本實驗為直接在鏡片的兩面加工陣列非球面透鏡，為了避免翻面後加工之位置與已完成面上非球面陣列的位置產生偏差，因此設計了環狀溝槽以及直線溝槽，並搭配機台上的 CCD 線上量測系統，提升翻面後的定位精度。

4.4.1 環狀溝槽對位機制

一般使用單晶鑽石車削非球面透鏡時，是藉由工件旋轉搭配 X-Z 兩軸同動將非球面透鏡加工完成，因此車削加工完的非球面透鏡軸心會與工件主軸軸心一致。同理，本次實驗係使用 X-Y-Z 三軸同動之螺旋路徑對非球面透鏡進行銑削加工，加工完之非球面透鏡亦有軸心，因此將排列於 3x3 陣列中間的非球面透鏡 (亦即每面 FOV 30° 設計之第二顆透鏡) 加工於工件之中心，使其軸心與工件主軸之軸心重疊，並在 3x3 陣列區域以外的地方，藉由車削在工件上做出一環狀溝槽，如圖 4.14 所示，此時該溝槽之圓心除了與工件主軸之軸心重疊外，亦與 3x3 陣列中間的非球面透鏡之軸心重疊。

工件形狀為一圓盤，藉由治具吸附於主軸上後，可以使用機器上的電子千分表以接觸的方式進行偏心的校正，然電子千分表之探頭為紅寶石，在校正的過程中會刮傷工件，增加校正偏心的難度，一般校正塑膠材料與工件主軸軸心的偏心極限約為 $\pm 2\mu\text{m}$ 。因此工件翻面後，除了利用電子千分表校正偏心，還需藉由機台上 CCD 線上量測系統觀察環狀溝槽旋轉之偏擺，如圖 4.15 所示，若有誤差則

需作更細微的調整，使偏心率小於 $1\mu\text{m}$ ，以確保加工後正反兩面之 3×3 陣列中間非球面透鏡的軸心能夠盡量重疊，減少翻面後的定位誤差。

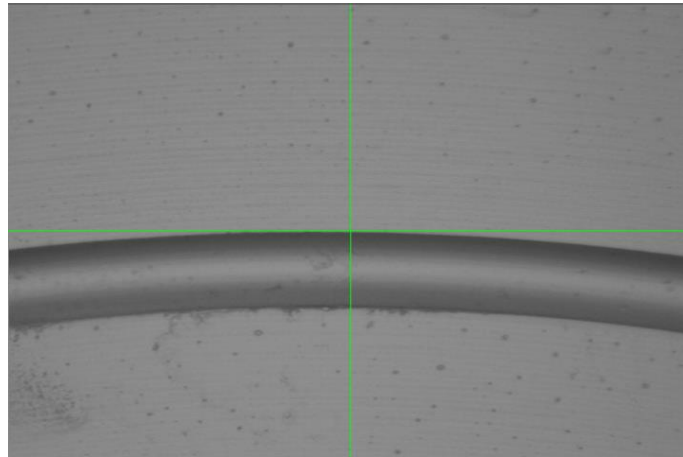


圖 4.14 環狀溝槽示意圖

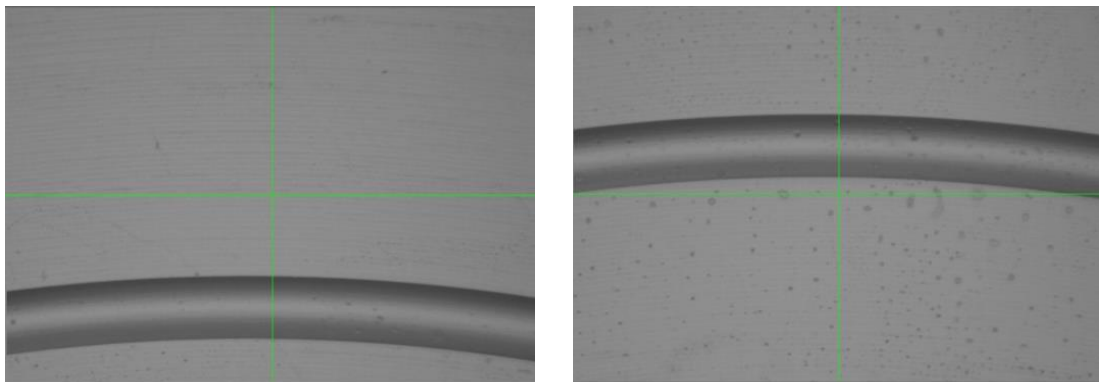


圖 4.15 CCD 線上量測系統觀察電子千分表校正後之偏心率誤差

4.4.2 直線溝槽對位機制

由於 3×3 陣列之排列為一方型，除了校正正反兩面之 3×3 陣列中間非球面透鏡軸心之偏心率外，亦要確保陣列外圍八顆之軸心沒有偏差。因此在加工完一面 3×3 陣列非球面透鏡後，利用銑刀在陣列的上方銑出一條水平的直線溝槽，如圖 4.16 所示，用於翻面後水平角度的對位。

工件翻面後藉由 4.4.1 節之環狀溝槽確保正反兩面之 3x3 陣列中間非球面透鏡的軸心能夠盡量重疊外，還利用 C 軸調整角度，將直線溝槽調整至兩邊沒有偏差，確保陣列外圍八顆之軸心沒有偏差。圖 4.17 為直線溝槽水平角度偏差之示意圖，圖 4.18 為校正完水平角度之直線溝槽示意圖。

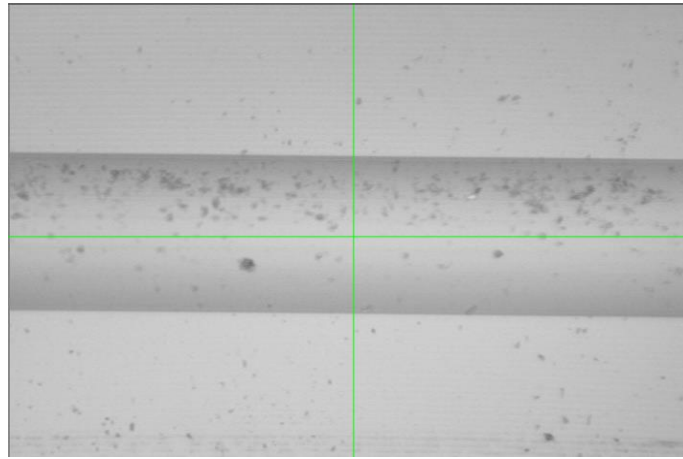


圖 4.16 水平直線溝槽示意圖

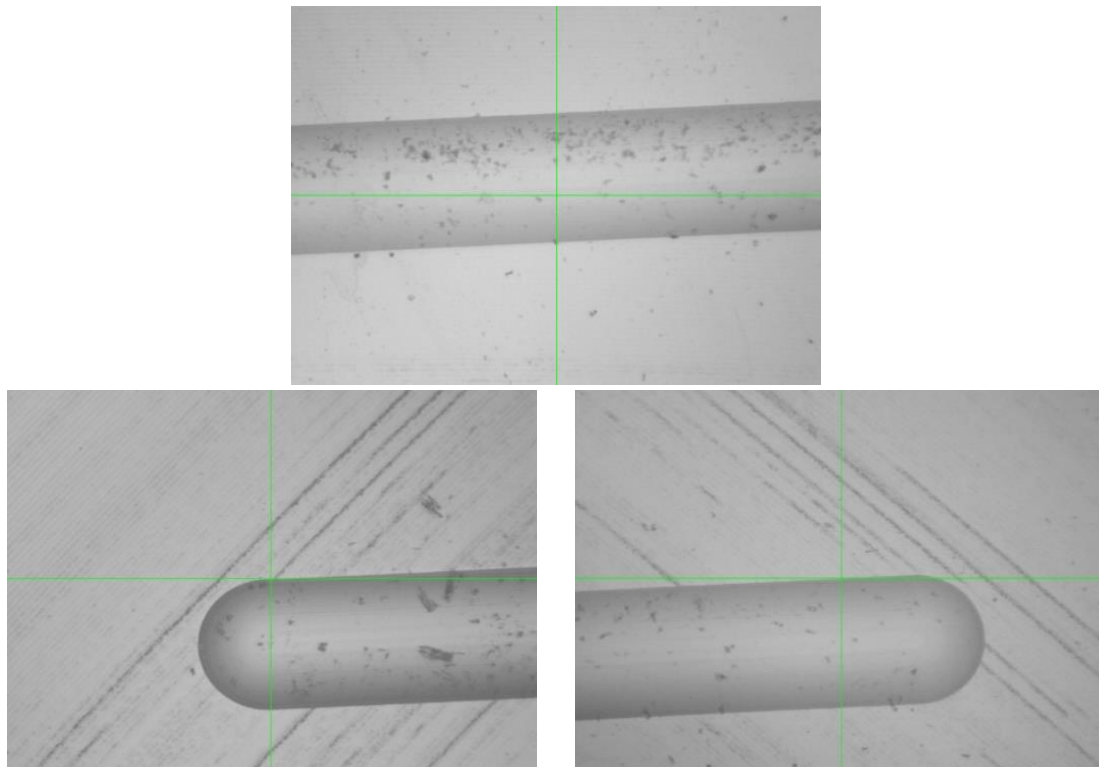


圖 4.17 直線溝槽水平角度偏差示意圖

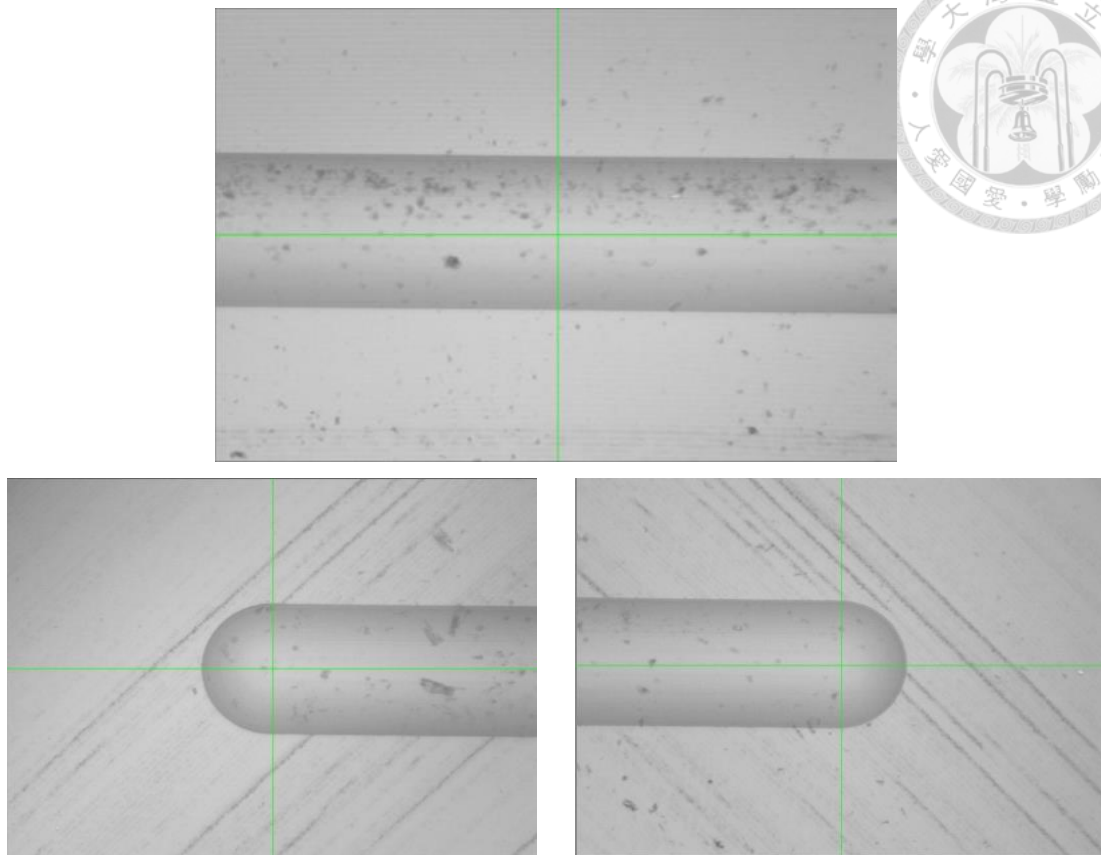
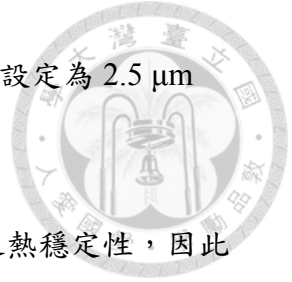


圖 4.18 校正完水平角度之直線溝槽示意圖

4.5 加工參數

3x3 陣列非球面透鏡選用之加工參數，如表 4.14 所示。以下分別說明加工參數選用之依據：

- (1) 由 4.3 節分析結果得知，最大刀鼻半徑需小於 0.25 mm，刀具刃邊有效角度必須大於 26.744° ，因此向刀具廠商訂製符合避免加工時產生干涉之刀具，其規格為刀鼻半徑為 0.237 mm，且刃邊有效角度 75° 。
- (2) 根據前人經驗知道，加工完之表面粗糙度大約為理想表面粗糙度的 5~10 倍，而一般光學鏡片的表面粗糙度規格需小於 10nm Ra，因此利用公式



- (2.13)以及刀鼻半鏡可以推算出進給(亦即螺旋路徑之間距)設定為 $2.5 \mu\text{m}$ /rev 時，可以達到光學鏡片之要求。
- (3) 650FG^{v2} 搭載之高速主軸轉速為 42000 rpm 時，擁有較好之熱穩定性，因此選定此轉速銑削非球面透鏡，並使用 SIGMA 動平衡量測系統，將高速旋轉的單晶鑽石球銑刀之偏擺誤差調整至 5 nm 以內。
 - (4) NanoCAM 3D 產生之螺旋路徑是將非球面曲面以等角度的方式分割成點資料，如圖 4.19 所示，外圍點與點之間的距離比內圈大，若以固定的進給率加工，會使得加工時間過長或者內圈加工速率太快而影響加工品質，因此設定以變進給率的方式銑削非球面透鏡。
 - (5) 加工深度係以鏡片每面設計之深度進行設定。
 - (6) 切削液使用美國艾克森美孚化學公司(Exxon Mobil Chemical)生產的異烷烴類溶劑 ISOPAR H。此切削油純度很高，且不含芳香族(Aromatics)，固其毒性及異味甚低，不會危害人體健康與污染環境，並擁有高揮發速率以及低黏度等特性，能夠避免加工時切屑附著在工件上而刮傷工件表面，因此適合用於超精密加工中。

表 4.14 單晶鑽石球銑刀銑削非球面透鏡之加工參數

單晶鑽石球銑刀刀鼻半徑 (mm)	0.237
螺旋路徑之間距 ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	2.5
銑刀轉速 (rpm)	42000
進給率 (mm/min)	150 (Start) ~ 10 (End)
加工深度 (μm)	Surface 1 - 150 Surface 2 - 50 Surface 3 - 56 Surface 4 - 100
切削液	ISOPAR H

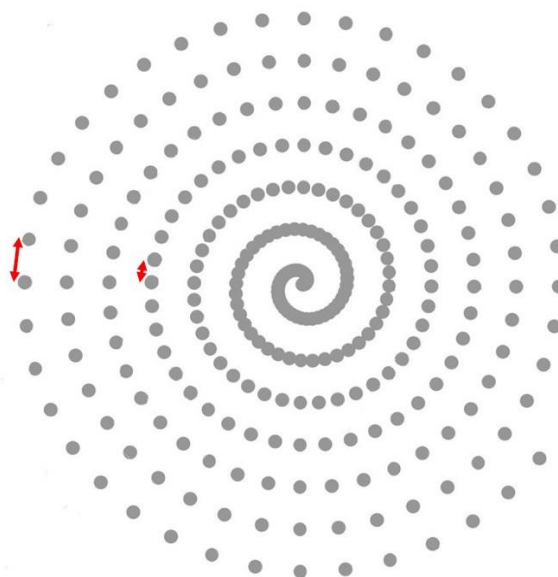


圖 4.19 螺旋路徑點資料示意圖

4.6 量測方法與分析

實驗後以形狀量測儀量測量測非球面透鏡之形狀精度(PV)；非球面透鏡之立體結構利用雷射共軛焦顯微鏡掃描影像觀察；並以數位顯微鏡觀察加工後之 3 x 3 陣列非球面透鏡排列狀況。



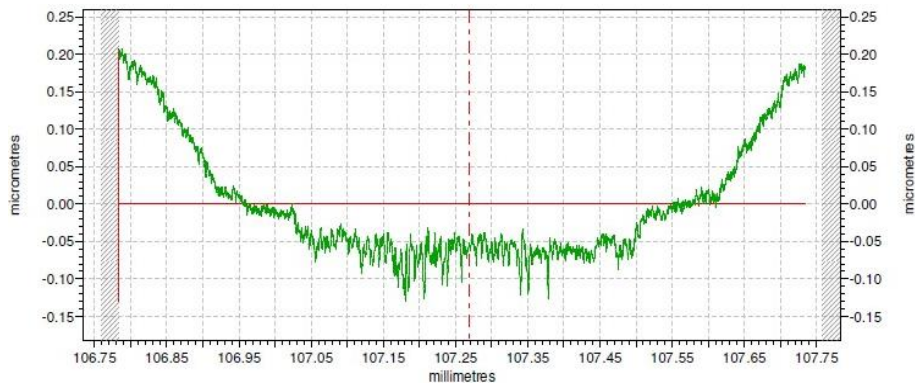
Chapter 5 實驗結果與討論



本章節將討論加工完之陣列非球面透鏡的形狀精度、表面品質以及組裝後之成像效果。

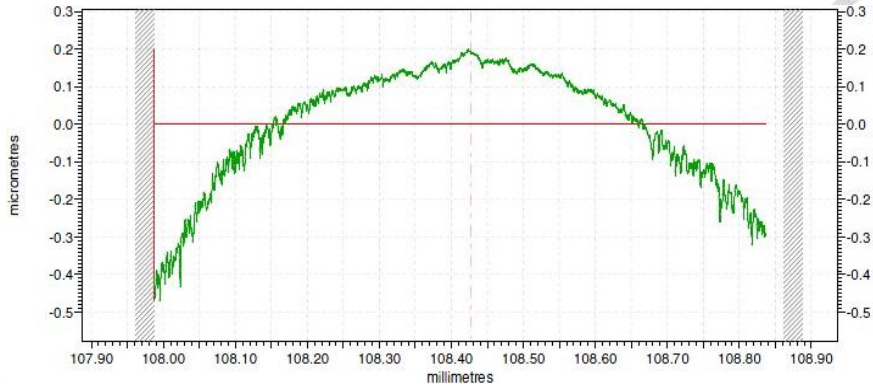
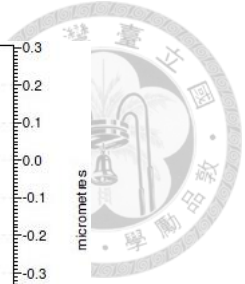
5.1 形狀精度

加工完之 3x3 陣列透鏡成品，必需達到形狀精度小於 $0.8\mu\text{m PV}$ 之形狀誤差，因此使用形狀量測儀量測加工後非球面透鏡之形狀精度；由於 Taylorsurg PGI 1240 形狀量測儀是以接觸式的方式量測加工完之表面，為了避免量測後在透鏡表面留下刮痕，額外加工 8 種非球面透鏡各一顆於光學壓克力上，並對其進行量測，量測結果如圖 5.1 ~ 圖 5.8 所示。從圖中之量測結果可以得知 8 種非球面透鏡皆達到形狀精度小於 $0.8\mu\text{m PV}$ 之要求。



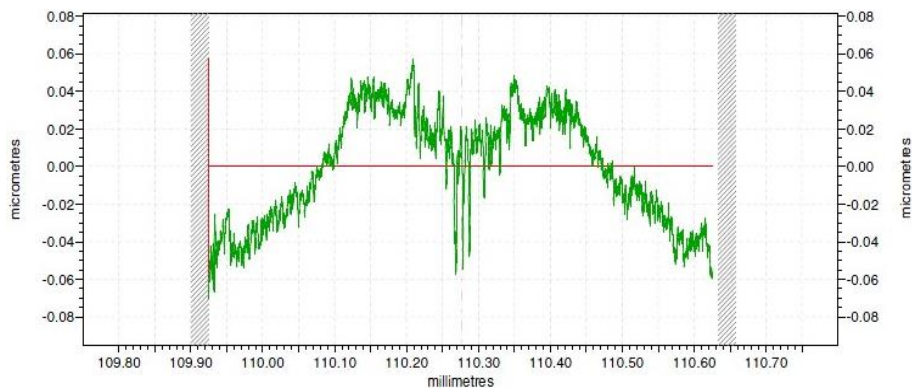
形狀精度： $0.340\mu\text{m PV}$

圖 5.1 Surface 1 - FOV 30° 形狀精度示意圖



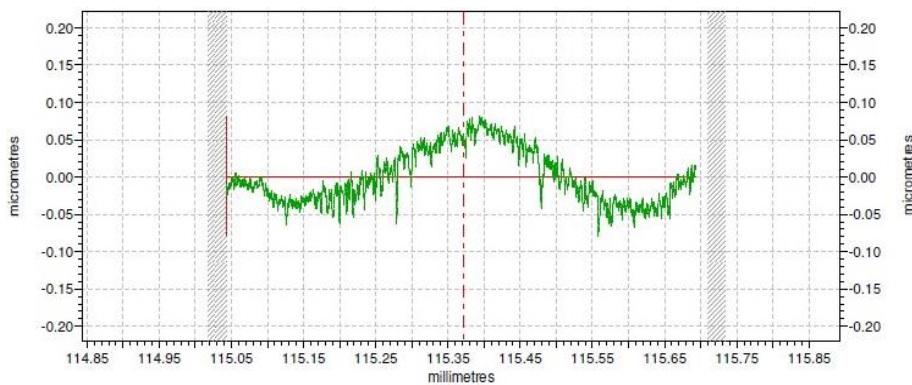
形狀精度：0.672 μm PV

圖 5.2 Surface 1 - FOV 60° 形狀精度示意圖



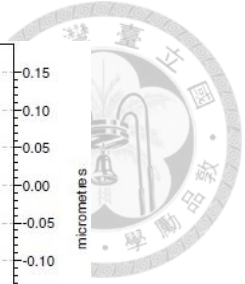
形狀精度：0.132 μm PV

圖 5.3 Surface 2 - FOV 30° 形狀精度示意圖



形狀精度：0.162 μm PV

圖 5.4 Surface 2 - FOV 60° 形狀精度示意圖



形狀精度：0.252 μm PV

圖 5.5 Surface 3 - FOV 30° 形狀精度示意圖



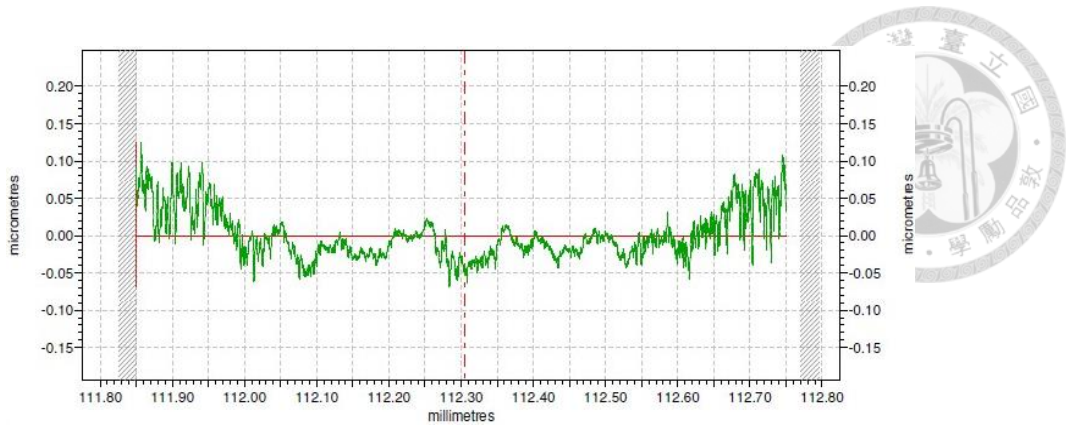
形狀精度：0.242 μm PV

圖 5.6 Surface 3 - FOV 60° 形狀精度示意圖



形狀精度：0.276 μm PV

圖 5.7 Surface 4 - FOV 30° 形狀精度示意圖



形狀精度：0.194 μm PV

圖 5.8 Surface 4 - FOV 60° 形狀精度示意圖

5.2 表面形貌

非球面透鏡之表面形貌透過雷射共軛焦顯微鏡掃描建立立體結構並觀察其表面形貌，如圖 5.10 ~ 圖 5.16 所示。圖中可以看出加工完之各透鏡表面形貌良好，沒有缺陷。

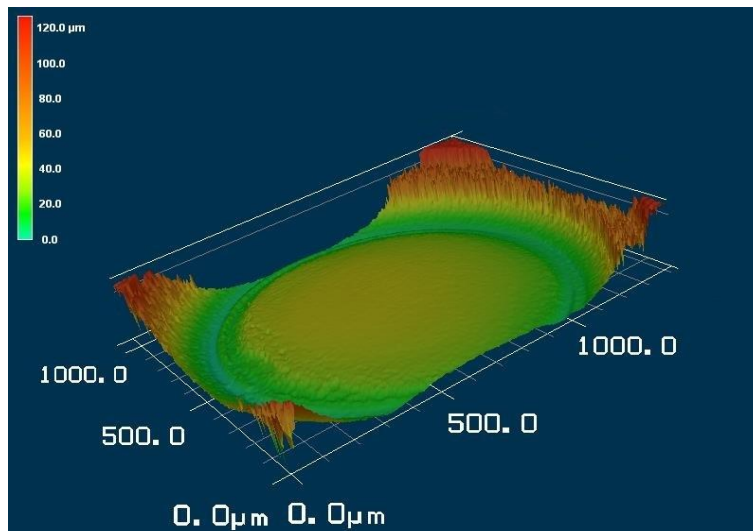


圖 5.9 Surface 1 - FOV 30° 表面形貌示意圖

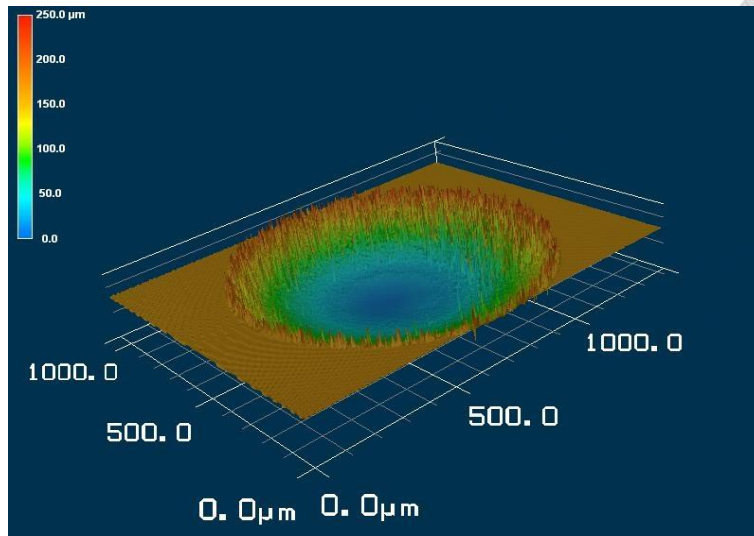


圖 5.10 Surface 1 - FOV 60° 表面形貌示意圖

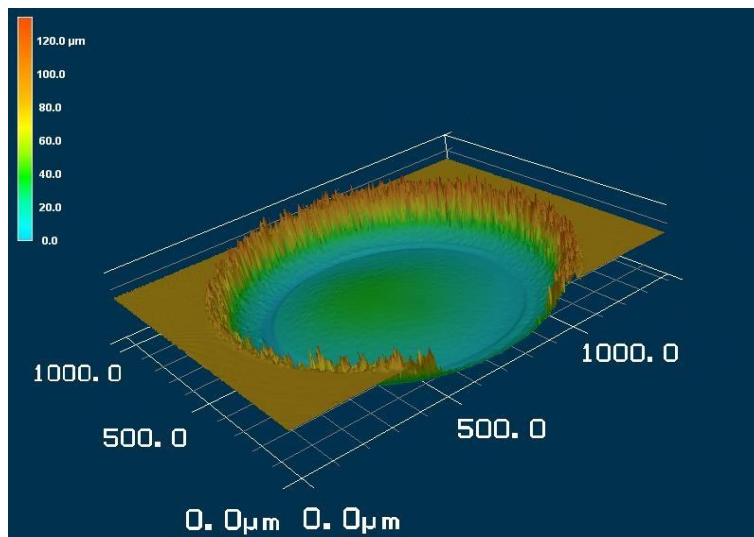


圖 5.11 Surface 2 - FOV 30° 表面形貌示意圖

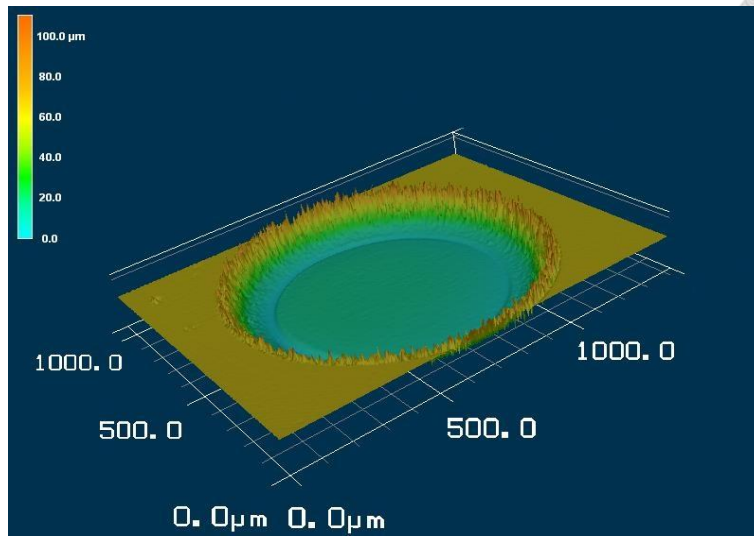


圖 5.12 Surface 2 - FOV 60° 表面形貌示意圖

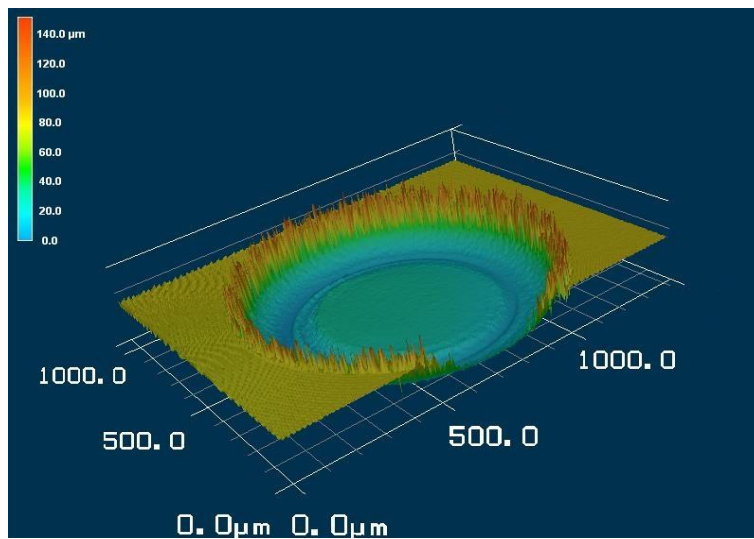


圖 5.13 Surface 3 - FOV 30° 表面形貌示意圖

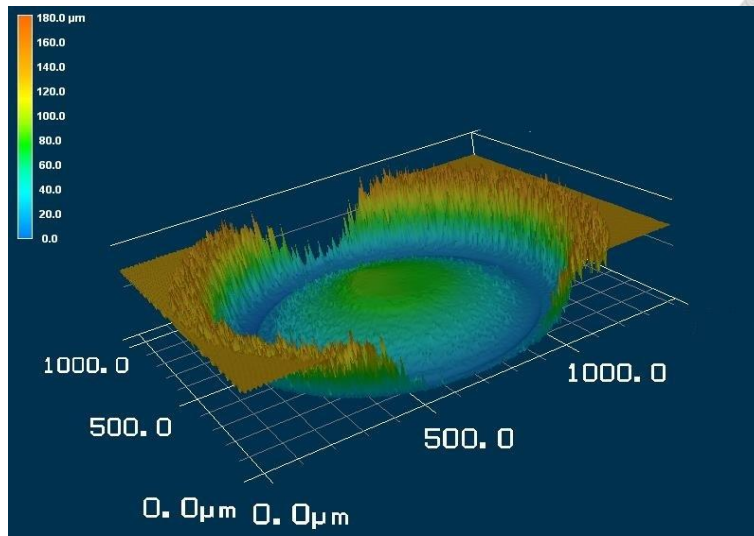


圖 5.14 Surface 3 - FOV 60° 表面形貌示意圖

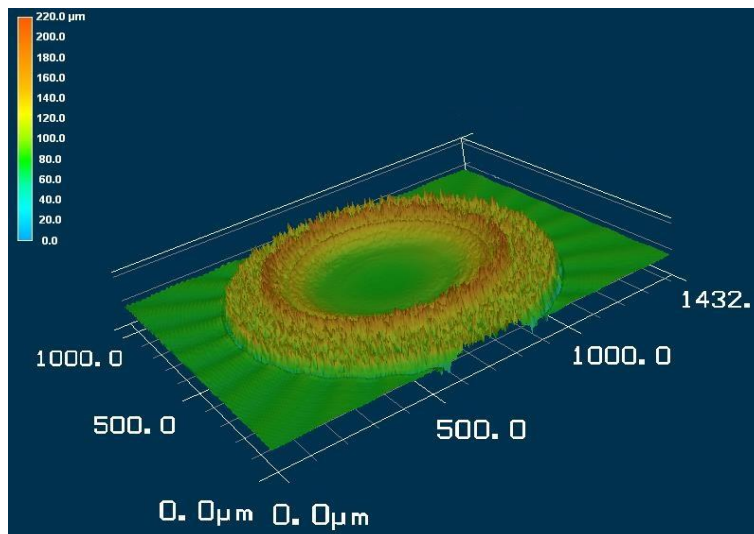


圖 5.15 Surface 4 - FOV 30° 表面形貌示意圖

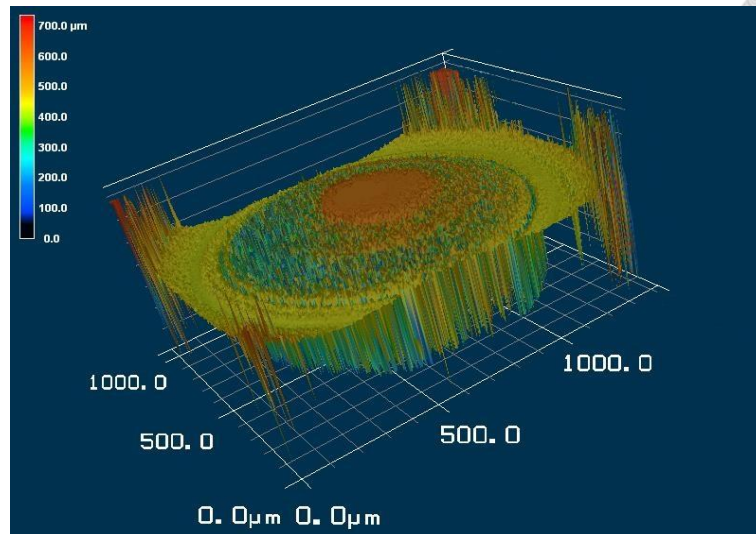


圖 5.16 Surface 4 - FOV 60° 表面形貌示意圖

5.3 加工成品

本實驗使用超精密加工機配合軟體分析之單晶鑽石球銑刀以及對位設計成功銑削出 8 種非球面透鏡設計共 36 顆透鏡於兩片光學壓克力上，完成 3 x 3 陣列鏡頭的加工，加工成品如圖 5.17 ~ 圖 5.22 所示。圖 5.23 為兩片鏡片組裝後之鏡頭成像，其中圓形以及方型的圖案若是越清晰則鏡頭的成像品質越好。



圖 5.17 Surface1 之加工結果

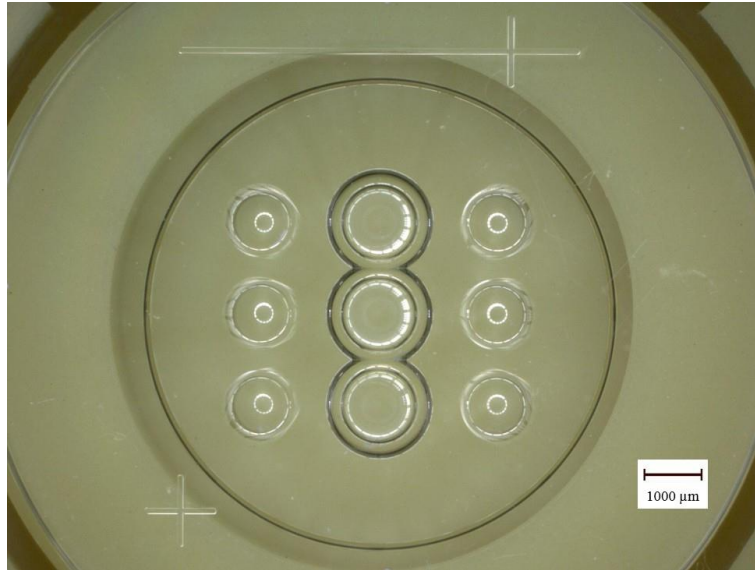


圖 5.18 Surface2 之加工結果

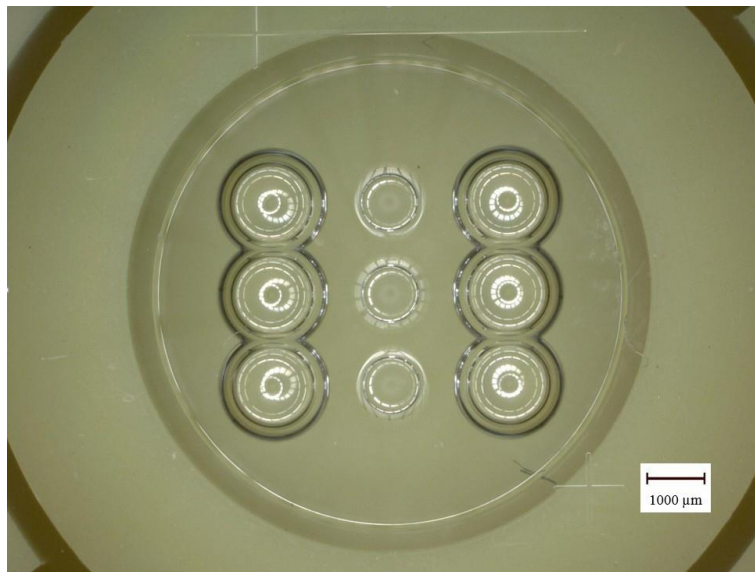


圖 5.19 Surface3 之加工結果

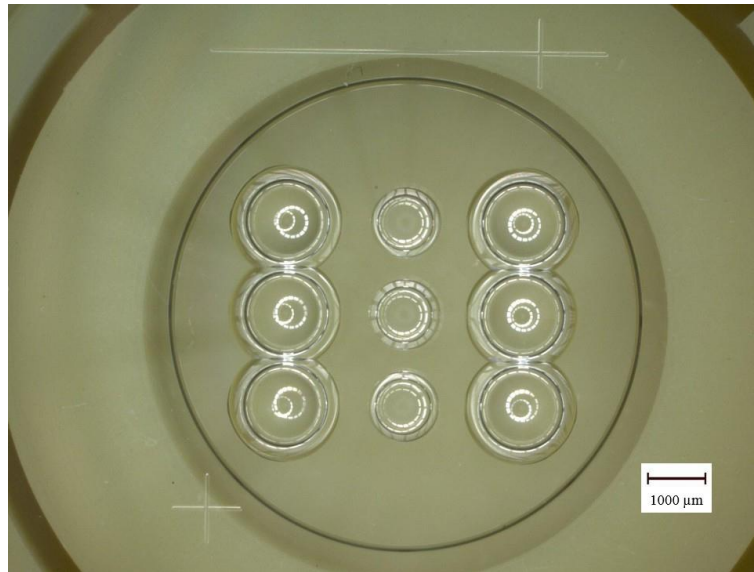


圖 5.20 Surface4 之加工結果



圖 5.21 鏡片 1 加工成品



圖 5.22 鏡片 2 加工成品

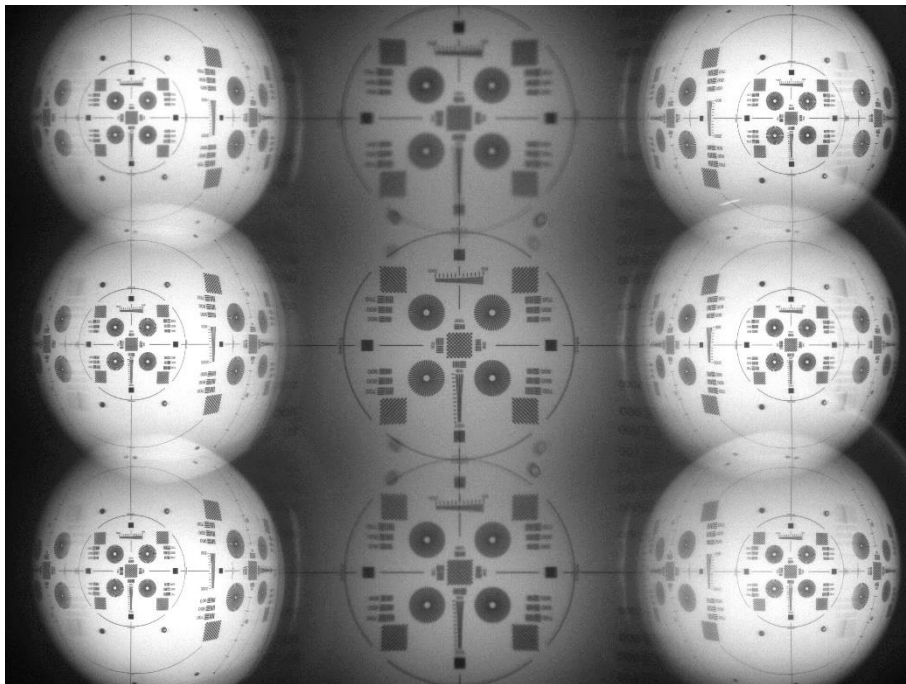


圖 5.23 3 x 3 陣列鏡頭成像之結果

Chapter 6 結論與未來展望



6.1 結論

本實驗的目的為探討 3x3 陣列鏡頭的加工製程，藉由軟體分析非球面曲面以及路徑規劃，找出適當之刀具規格，並設計對位機制，以減少雙面加工時的定位誤差，最後使用超精密加工機搭配軟體分析之單晶鑽石球銑刀規格完成 3x3 陣列鏡頭之加工，依據實驗結果可歸納出已下幾點結論：

- (1) 由 NanoCAM 3D 軟體分析各個非球面曲面以及加工路徑後，找到之刀具規格能夠完成 3 x 3 陣列鏡頭之加工，且八種非球面設計形狀精度皆小於 0.8 μm PV，達到光學設計之要求。
- (2) 本實驗設計之對位機制，提升雙面加工時的定位精度，完成 3 x 3 陣列鏡片的雙面加工，確保陣列鏡頭之成像品質。



6.2 未來展望


本研究針對陣列鏡頭之加工製程已完成初步之探討，規劃出銑削陣列非球面曲面時刀具規格分析以及路徑規劃之流程，並藉由對位設計完成 3 x 3 陣列鏡片的雙面加工，但其中能有為考慮周詳的部分，因此提出以下可供後續研究之方向。

- (1) 陣列鏡頭之間距誤差，亦會影響鏡頭的成像品質，因此陣列鏡頭之間距誤差的量測以及補正亦是可嘗試之研究方向。
- (2) 本次實驗只針對小面積之陣列鏡頭進行加工，未來對於大面積陣列鏡頭的加工以及刀具磨耗之研究亦是值得進行研究探討。
- (3) 目前許多非軸對稱之自由曲面還是使用慢刀伺服進行加工，加工過程中容易因為不連續切削使得鑽石車刀之刀具壽命下降，因此使用單晶鑽石銑削加工自由曲面亦是一重要之研究重點。

參考文獻



- [1] N. Taniguchi, "Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing," *Annals of the CIRP*, vol. 32, pp. 573-582, 1983.
- [2] L. Luc, R. Gunther, *CIRP encyclopedia of production engineering*, 2014.
- [3] 陳政雄, "超精密奈米加工技術之發展、應用與未來趨勢," *機械月刊*, vol. 27, pp. 338-352, 2001.
- [4] 劉美鈴, 台灣精密光學元件產業之競爭力研究, *國立交通大學管理學院科技管理學程碩士論文*, 2012.
- [5] A. Y. Yi, L. Li, "Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo," *Optics letters*, vol. 30, pp. 1707-1709, 2005.
- [6] C. C. Chen, C. L. Chao, W. Y. Hsu, F. C. Chen, C. W. Chao, "Fabrication of aspheric micro lens array by slow tool servo," *Advanced Materials Research*, vol. 76, pp. 479-484, 2009.
- [7] S. Scheiding *et al.*, "Freeform manufacturing of a microoptical lens array on a steep curved substrate by use of a voice coil fast tool servo," *Optics express*, vol. 19, pp. 23938-23951, 2011.
- [8] Z. Zhu, S. To, S. Zhang, "Large-scale fabrication of micro-lens array by novel end-fly-cutting-servo diamond machining," *Optics express*, vol. 23, pp. 20593-20604, 2015.
- [9] N. C. R. Holme, T. W. Berg, R. G. Dinesen, "Diamond micro-milling for array mastering," *Laser Beam Shaping IX*, vol. 7062, p. 70620J, 2008.
- [10] B. McCall, T. S. Tkaczyk, "Fabrication of plastic microlens array for array microscopy by three-dimensional diamond micromilling," *Optical Engineering*, vol. 49, p. 103401, 2010.
- [11] 黃品璵, 單晶鑽石車削雙曲率模仁表面改善之研究, *國立台灣大學機械工程研究所碩士論文*, 2013.
- [12] M. C. Shaw, *Metal cutting principles*, 2 ed., 2005.
- [13] 高道鋼, 超精密加工技術, *全華科技圖書有限公司*, 2000.
- [14] 宋健民, "工業鑽石的過去與未來," *物理雙月刊*, vol. 18, pp. 5-22, 1996.
- [15] 宋健民, 超硬材料, *全華科技圖書有限公司*, 2000.
- [16] 許巍耀, 郭慶祥, 陳峰志, "超精密加工技術," *科儀新知*, pp. 72-80, 2006.
- [17] S. Shimada, H. Tanaka, M. Higuchi, T. Yamaguchi, S. Honda, K. Obata, "Thermo-chemical wear mechanism of diamond tool in machining of ferrous metals," *CIRP Annals*, vol. 53, pp. 57-60, 2004.
- [18] H. Qin, "Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm," *Optics Communications*, vol. 285, pp. 2996-3000, 2012.

- 
- [19] Y.-T. Liu, W.-C. Chang, Y. Yamagata, "A study on optimal compensation cutting for an aspheric surface using the Taguchi method," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 3, pp. 40-48, 2010.
- [20] 林祐震, 非球面係數對三片型鏡組映像品質影響之分析, 國立中央大學光電科學研究所碩士論文, 2006.
- [21] 陳勇志, 精密曲面加工之形狀誤差分析, 國立臺灣科技大學機械工程學系碩士論文, 2006.
- [22] 陳勇志, 應用非軸對稱收縮補償法於塑膠光學鏡片精密成型之研究, 國立高雄應用科技大學模具工程研究所碩士論文, 2007.
- [23] 王廷飛, 表面組織解說, 前程出版社, 1984.
- [24] B. McCall, T. S. Tkaczyk, "Rapid fabrication of miniature lens arrays by four-axis single point diamond machining," *Optics express*, vol. 21, pp. 3557-3572, 2013.