


第一章 緒論

1.1 研究背景

由於網路的普及化，人們對使用高頻寬網路及訊號快速傳輸的需求越來越殷切，使得網路通訊傳輸技術不斷的被創新與進步。光纖網路有傳輸距離長、網路線更換頻率低、可以快速傳輸大量的資訊等優點，而使得電線、電纜的網路傳輸方式逐漸被光纖網路所取代，因此產業分析師預言光纖網路將是二十一世紀最具發展潛力的產業之一【1】。



光通訊的光學元件在光纖網路傳輸產業中佔了重要的一環，無論是運用分光或合光、折射或繞射的技術，其目的皆是希望可讓光訊號可以完整、快速、大量的傳送到用戶端。因此，如何在一條光纖上同時傳輸不同的訊號來增加頻寬及傳輸速度，一直是大家努力的方向。基於上述理由，目前多模光纖中已鮮少使用單一光芯，通常使用 1x4 或 1x8 甚至 2x12 的陣列式光芯，一條光纖上使用越多的光芯，亦代表著光纖耦合器上的透鏡數量要隨之增加。又因光芯與光芯間的相對位置需相當精準，方能將光纖訊號順利的傳送或接收，目前光芯與光芯間的位置精度要求約在 1 微米以內，才能順利的接、送光纖訊號，所以光纖連接器內的透鏡與透鏡間的相對位置亦需在 1 微米以內，避免光纖訊號在經過透鏡之後，造成光訊號的急速衰減。

目前最被廣為使用的微透鏡陣列製作方法，是類 LIGA 製程技術，但現在因環保意識的高漲，環境保護與經濟發展二者之間的衝突日益升高，且半導體製程技術目前僅能製作球面透鏡陣列、透鏡深寬比值不大、又有製程繁複等缺點，而且日後光纖網路的傳輸速度要求將達到 10GHz/s，因此微透鏡陣列的曲面形狀精度和表面粗糙度將變得相當重要。為克服以半導體技術製作微透鏡陣列的缺點，所以本論文嘗試以超精密加工機(Toshiba machine ULG-100C(H³)，解析度 10 奈米)，搭配單晶鑽石刀具以鉋削(shaping)加工方式來製作曲率半徑小於 500 微米的非球面微透鏡陣列，以期望可以得到高曲面形狀精度和低表面粗糙度、透鏡與透鏡間的相對位置誤差可小於 1 微米的非球面微透鏡陣列。



1.2 文獻介紹

1.2.1 微透鏡陣列製作方法介紹

目前已有多種的微透鏡陣列加工製造技術發表，其製造技術與特殊加工方法，大致上可區分成加熱擠壓法、光阻熱熔法、微影蝕刻法、微液滴射出法、準分子雷射微加工刻除法等技術【2-8】，但目前可進行量產微透鏡陣列的主要仍以類 LIGA 相關技術為主。以下是各種微透鏡陣列的製程技術介紹。

1) 加熱擠壓法【2-3】

加熱擠壓法是利用材料的表面張力來控制透鏡曲率的大小和透鏡高度，控制的因子有調整製程的溫度、壓力及時間。主要是以LIGA技術製作出模仁，然後在高溫、高壓下以熱壓機將塑膠薄板壓出微圓柱，在熱壓成型的加熱過程中，微圓柱的頂端會因受熱而熔融成球面微透鏡。由於是利用熱熔作用使透鏡成型，此製程技術的優點是球面微透鏡和模仁形狀不必相同，因此不需要形狀精確的模仁曲面，即可獲得近似球面的微透鏡。圖1-1是以擠壓法製作微透鏡陣列的流程圖。

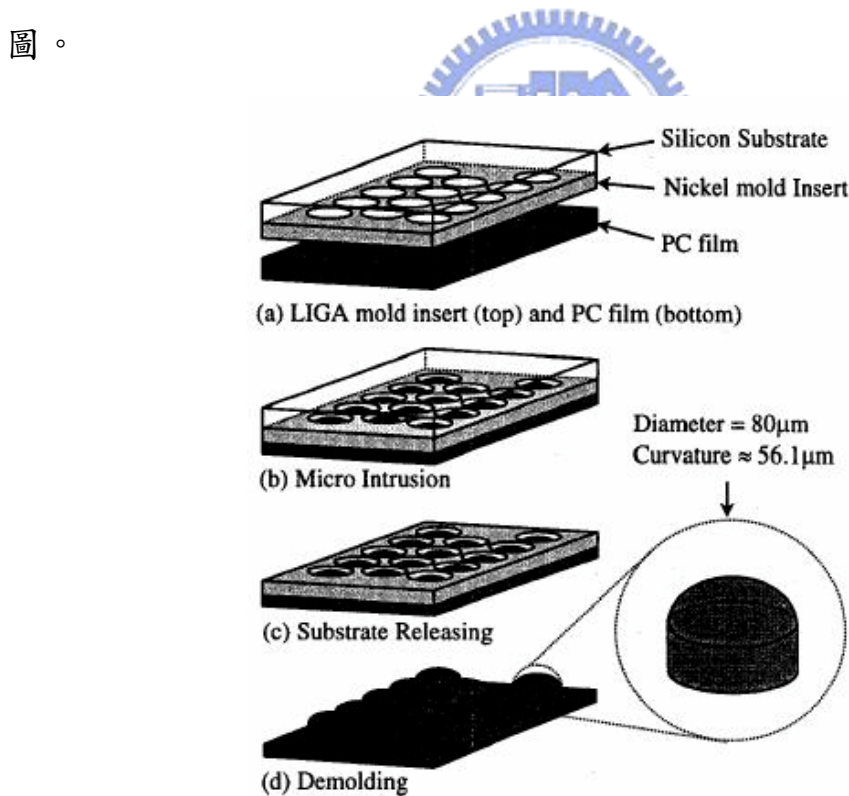


圖 1-1 以加熱擠壓法製作微透鏡陣列的示意圖

2)光阻熱熔法【3-5】

光阻熱熔法是將光阻或高分子材料作成的微小圓柱，經由加溫將其軟化而成為微透鏡。微小圓柱陣列的做法是在矽或玻璃的基板鍍上一層光阻薄膜，再利用光微影蝕刻術(photolithography)將光罩上面的圖形轉換到基板的上面來，形成一陣列的微形圓柱，再將附有圓柱孔洞的基板送到加熱爐中，加熱到適當的溫度，因為材料表面張力與分子動力的作用，微圓柱將會重新流動，成為近似球面的形狀，圖1-2是以光阻熱熔法製作微透鏡陣列的示意圖。為了使這微透鏡陣列性質更加穩定，不易受外界環境的影響，必需以乾式離子蝕刻法(Reactive Ion Etching, RIE)，將透鏡形狀轉換至材質硬、性質穩定的基板上，如矽晶片或石英玻璃，如圖1-3所示。以光阻熱熔法製作而成的球面透鏡陣列，在加熱時必須避免光阻融化後相互連接，所以透鏡間的間距必須加大，而使得透鏡填滿率亦相對降低。

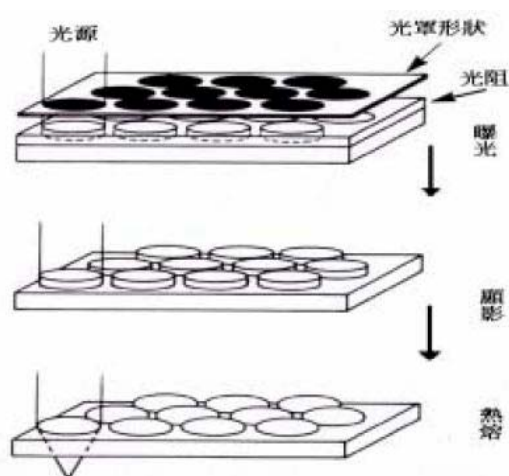


圖 1-2 以熔融光阻法製作微透鏡陣列法的流程圖



圖1-3以乾式離子蝕刻法將透鏡陣列形狀轉換至基板中

3) 微影蝕刻法【4-6】

微影蝕刻法是將微透鏡陣列的結構製作於玻璃基板上，製作的方
法是以矽基材為母模材料，經過微影蝕刻的方式得到具有微透鏡陣列
的模仁，再將塑膠基材注入模仁且同時貼附於玻璃基板上，以低溫約
60°C左右連續加熱2個小時，之後藉以塑膠基材本身的特性附著於玻
璃基板上，而後進行電漿蝕刻，最後作出微透鏡陣列。但此種方法製
作出的微透鏡結構並非真正的微透鏡，僅可說為近似透鏡的結構，如
圖1-4 所示，因此在光學的領域上運用並不大。

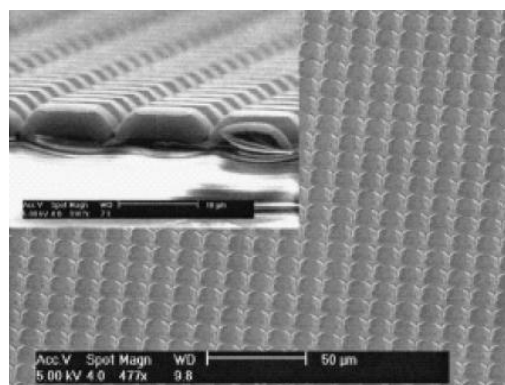


圖 1-4 lens-like 結構，使用矽基材當母模，利用微影蝕刻方式得
到模仁，灌入塑膠基材得到微透鏡陣列結構

4)微液滴射出法【5-6】

微液滴射出法的製作方式是在壓電陶瓷內部製作出微流道，且微流道末口具有一噴嘴，再利用電腦來控制脈衝的頻率，將少量的液態材料如光阻、高分子等材料滴到石英玻璃基板上，並藉由監視器來觀察微滴噴出狀況，由於液體與基板表面張力的關係，而使得液滴形成近似球面形狀的透鏡，如圖1-5所示，再經過固化的程序便可使球形透鏡附著在基板上面。在此種製程技術中，高分子聚合物的液體與基板的表面張力、高分子聚合物的液體與基板的溫度、每滴液滴的噴射量大小等，都將會影響到所製作出來的微透鏡之形狀。因其無法精確控制透鏡大小或位置，使其成形後的精度受到限制。若要改善此問題，則微透鏡陣列製作時間將會非常久，且無法像其他方法一樣可以大量生產，因此微液滴射出法並不具量產微透鏡陣列的特性。

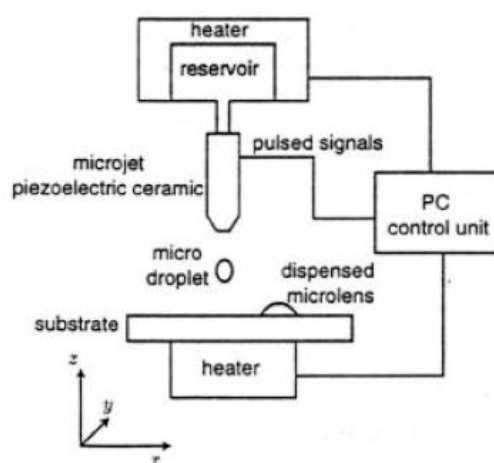


圖1-5 以液滴射出法製作微透鏡陣列的示意圖

5)光熱法【4-6】

光熱法的製作原理是利用感光玻璃材料在進行局部加熱時會產生局部膨脹的現象來進行微透鏡陣列的成形。使用紫外光來照射感光玻璃，未被紫外光照射的感光玻璃受到被照射到紫外光的玻璃壓縮而凸出來，再用加熱製程使感光玻璃凸出之材料因表面張力形成球面透鏡，如圖1-6所示。光熱法的缺點在於加熱溫度過大，一般需要約600℃以上，加熱的溫度越高則微透鏡陣列成本越高，因此不具市場競爭力。

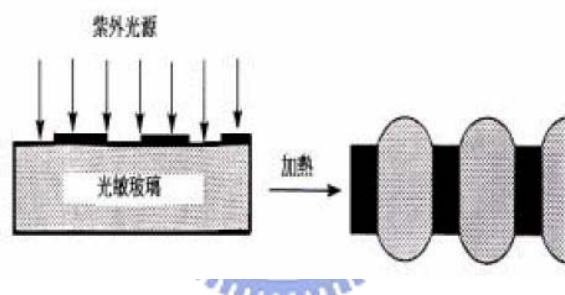


圖 1-6 以光熱法製作微透鏡陣列示意圖

6)準分子雷射微加工刻除法【7-8】

準分子雷射微加工法是透過一片含有數種圖樣之鍍鉻光罩，經由物鏡以投影方式在聚合物基材上進行微加工刻除，利用程式控制及調整適當的雷射功率，一次的脈衝雷射可以刻除完成一個完整的微透鏡陣列圖形，不同之加工深度則由控制多次脈衝來進行，而透過快速移動光罩的平台與選擇不同之光罩圖樣可完成多階之微透鏡陣列元件。

1.2.2 以超精密加工機製作非球面微透鏡陣列

1) 超精密加工技術演進

超精密工作機械的發展，始於工業革命爆發期間的 Wilkinson 的搪孔機及 H. Mosely 的鐘錶車床等。所謂「超精密」一詞並非絕對，而是配合當時的加工精度極限稱之，搪孔機及鐘錶車床加工精度雖以毫米計之，但以當時的加工能量而言，卻可稱為超精密加工技術。從工業革命以來，將過去重重的革新技術堆疊起來，演變成現今的奈米加工技術等級。圖 1-7 加工機總合加工精度的演進圖【9】。影響現在超精密加工機的基本技術，有以下二點，其一是靜壓軸承製作技術的成熟，進而使得超精密加工機主軸旋轉的偏擺度，可控制在次微米以下；其二是採用閉迴路控制系統，利用 He-Ne 雷射或面型雷射的光源，做為超精密加工機床台移動位置的感測器，並且使用數值控制方法將床台的定位精度控制在 1 奈米左右。【10】

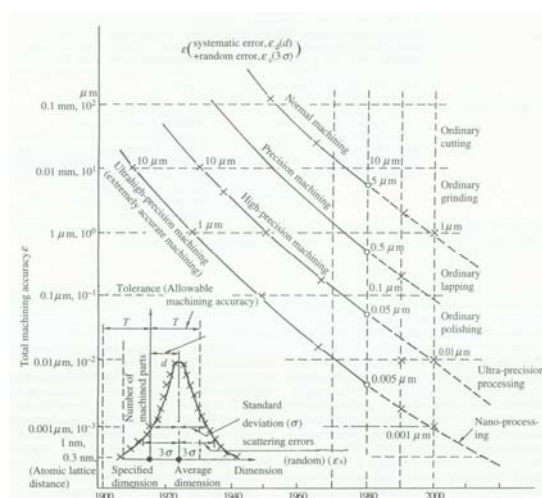


圖 1-7 加工機總合加工精度的演進【9】

(參考資料：N. Taniguchi, “Nanotechnology integrated processing system for ultra-precision and ultra-fine products”, Oxford New York Tokyo, p7, 1996.)

2) 超精密加工技術的用途

超精密加工技術是以追求低表面粗糙度、高形狀精度、高尺寸精度，並且能維持材料原先的物性為主要目的。超精密加工技術最具代表性的用途是透鏡、反射鏡等光學元件的加工，最先使用超精密加工技術製作非球面透鏡是在 1982 年時，由伊士曼·柯達公司所發展出來。此透鏡運用在數位相機，此相機鏡頭內透鏡的配置如圖 1-8，第二片透鏡的第一面是非球面，從透鏡前面到底片前面的長度約 15mm，因為此鏡頭非常薄且精緻化，所以對全世界的光學相關業界產生很大的衝擊，造成先進國家紛紛投入以超精密加工技術製作非球面鏡片的研究。表 1-1 是使用超精密加工技術製作而成的透鏡及其用途。

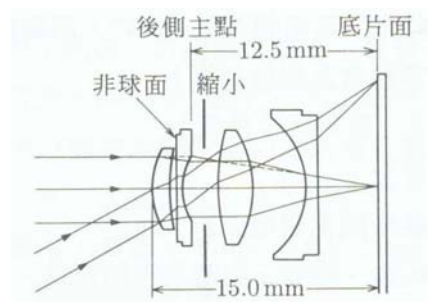


圖 1-8 柯達的第一台數位相機的鏡頭組成示意圖

表 1-1 使用超精密加工技術製作而成的透鏡及其用途

零件名稱	材 料	製作法	用 途
------	-----	-----	-----

非球面透鏡	光學級玻璃、光學級塑膠	研削、切削、拋光、模造	相機、手機、光碟機、投影機...等
非球面模仁	高硬度鋼、碳化鎢、碳化矽、陶瓷、無電解鍍	切削、研削、拋光	塑膠射出成形用模具、玻璃模造成形用模具
球面、非球面、拋物面反射鏡	鋁合金、銅合金	切削、拋光	雷射加工機、投影機
繞射透鏡/模仁	無電解鍍、光學級塑膠	切削	相機、光碟機等
F-θ透鏡、柱面透鏡用模仁、自由曲面鏡	高硬度鋼、碳化鎢、碳化矽、陶瓷、光學級玻璃、光學級塑膠	切削、研削、拋光	雷射印表機、投影機、照像手機、頭載式顯示器

3)超精密切削加工

超精密切削加工所用的刀具是使用單晶鑽石研磨而成的刀刃，因此，亦稱為鑽石切削加工。單晶鑽石是目前世界上最硬、且熱導性佳的物質。在鑽石結晶面上會因研磨方向的不同，而造成鑽石耐磨耗性及硬度的不相同，在圖 1-9 中，箭頭長的方向表示研磨容易，耐磨性低的方向，在(111)面具有平行裂開面的特性。【11】

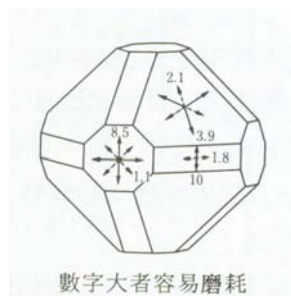
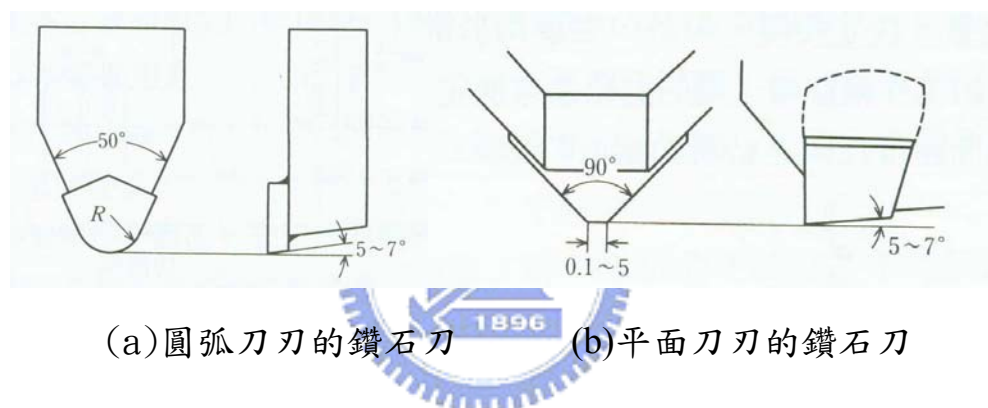


圖 1-9 鑽石結晶面不同時之耐磨特性

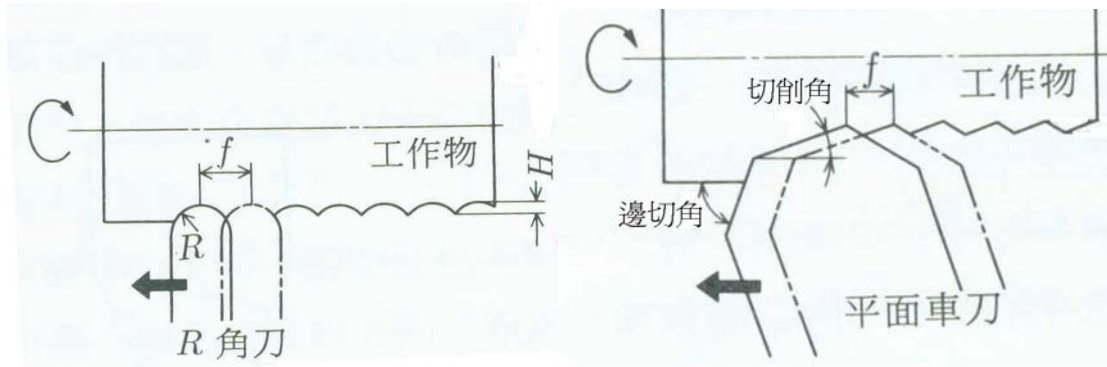
為了得到良好的表面粗糙度，必需將單晶鑽石研磨成具有銳利切削的刀刃。一般而言，在切削圓筒或平面形狀時，刀刃的形狀通常使用平面形狀，在切削曲面形狀時則使用圓弧的刀刃形狀，刀刃形狀如圖 1-10 所示。因為鑽石的耐衝擊性差，稍為使用不慎即會造成的崩角，使鏡片在切削後的形狀精度及表面粗糙度劣化，所以在使用單晶鑽石刀具之前，需先用高倍率的光學顯微鏡，檢查鑽石的切削刀刃是否有磨損或崩角。



(a)圓弧刀刃的鑽石刀 (b)平面刀刃的鑽石刀

圖 1-10 常用的鑽石工具的形狀

切削而成的鏡片表面粗糙度，基本上是刀刃的切削稜角轉寫到鏡片的表面上而來的，如圖 1-11 所示。也就是以平面車刀加工時，邊切角及切削角和鏡片旋轉一圈的進給量，來決定粗糙度；而以圓弧刀刃加工時，則由後斜角的圓弧半徑和鏡片旋轉一圈的進給量來決定鏡片表面的粗糙度。圖 1-12 是理論表面粗糙度和實際切削所得的表面粗糙度比較結果。【10】



$$H = \frac{f^2}{8R}$$

$$H = \frac{f \tan \beta \times \tan \gamma}{\tan \beta + \tan \gamma}$$

f：進給量(mm/rev)； R：圓弧刀刀半徑(mm)；

β ：邊切角； γ ：切削角

圖 1-11 理想粗糙度計算方式

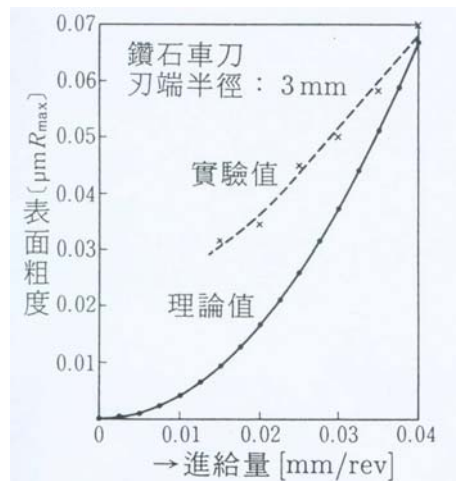


圖 1-12 理想切削表面粗度和實驗值

造成鏡片表面粗糙度理論值與實際值的差異，主要原因是切削機構和加工機械兩方面所引起，在切削機構方面有切削刀刀的微細裂紋、進給量、刀刀的幾何形狀、切削深度、切屑的排除、切削後彈性回復等因素，這些因素皆會影響到鏡片加工後的表面粗糙度【12】。

另外，在加工機械方面有加工機的震動、刀具進給的不規則、主軸動

平衡不佳等因素，亦會使造成鏡片切削後表面粗度劣化。如果以單晶鑽石刀具車削鏡片時，鏡片的基材若含有雜質或是所切削的材質是鐵系材料，皆會造成單晶鑽石刀刀的銳利度急速降低，進而使鏡片表面粗度惡化，因此必須使用特定的材料進行超精密車削加工，才有可能得到奈米等級的表面粗糙度。

總體而言，超精密加工技術並非僅是使用超精密加工機及單晶鑽石刀具，而是必須控制每一相關技術環節，才有可能得到一個高精度、低表面粗糙度的鏡片。圖 1-13 是進行超精密加工技術時，必須考量到的控制要素。【10】

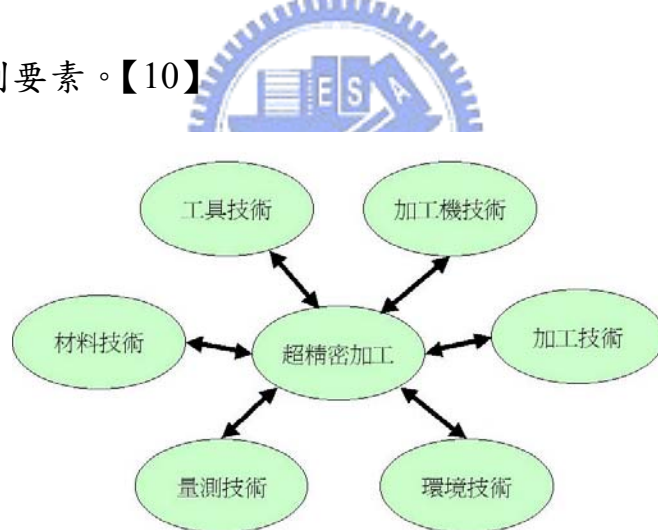


圖 1-13 進行超精密加工的考量要素

1.3 研究動機

目前超精密加工機最常用來製作有高精度要求的軸對稱非球面透鏡的模仁，再以塑膠射出成形或玻璃模造成形的方式，大量生產非球面透鏡。超精密車削/磨削技術的優點是可容易製作出高形狀精度

的非球面模仁或鏡片，且在切削後的曲面並不需再經拋光的製程，即可得到光學級的表面粗度要求。以現今的超精密車削加工技術，要製作透鏡陣列，惟有在加工機車削旋轉主軸上裝置一個可進行二軸移動的平台治具，將每一個透鏡偏移至超精密加工機的車削旋轉軸上，再分別將每一個透鏡車削成形，才能做出透鏡陣列。此加工方式的缺點有二，其一是在車削透鏡時，會因車削旋轉軸上加裝一個可進行二軸移動的平台治具，使的車削旋轉主軸的動平衡不易控制；其二是每個透鏡間的相對位置精度，亦受限於附加於超精密加工機旋轉主軸上的移動平台治具的定位精度。而應用於光纖網路上的微透鏡陣列，其透鏡與透鏡間的相對位置精度需在 1 微米內，所以採用此種加工方式將無法的達到理想的透鏡與透鏡間相對位置精度。

但是，超精密加工機如果具有三軸以上同動的功能時，就可利用鉋削的加工方式製作出微透鏡陣列，此舉將可克服以車削方式加工透鏡陣列所產生的缺點，並且可鉋削出非球面的透鏡陣列，進而提高光學設計的靈活度，改變光纖網路訊號傳輸品質；另一個優勢是使用超精密加工機製作微透鏡陣列，可在最短時間內直接製作出透鏡陣列，用以驗證透鏡陣列的光學特性，而大幅降低微透鏡陣列的研發成本及時間。

1.4 研究目的與方法

1) 研究目的

以鉋削技術加工非球面微透鏡陣列時，加工後的非球面微透鏡陣列會隨著單晶鑽石刀具與透鏡表面的切削接觸角度不同，而產生不同的曲面形狀精度與表面粗糙度變化。為使鉋削完成的非球面微透鏡陣列的曲面形狀精度和表面粗糙度能夠一致，避免影響到光纖訊號傳輸品質，本論文的目的乃是要探討單結晶鑽石鉋削刀具的後斜角 α (Back rake angle) 及前隙角 β (Front clearance angle) 對非球面微透鏡陣列的曲面形狀精度和表面粗糙度的影響。圖 1-14 為刀具鉋削角度示意圖【13】。

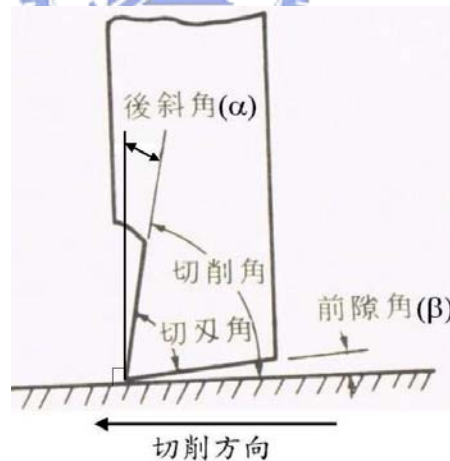


圖 1-14 刀具鉋削角度示意圖

2) 研究方法

以實際實驗製作透鏡陣列，並進行形狀及表面粗糙度量測的方式來進行探討。使用日本東芝機械股份有限公司生產的超精密

加工機，型號是 ULG-100H³(解析度 10 奈米)，配合不同後斜角(α)及前隙角(β)的單晶鑽石刀具以鉋削加工方式，製作出非球面微透鏡陣列，再利用英國 Taylor Hobson 公司生產的表面形狀精度及粗度量測儀(解析度 10 奈米)，量測以不同刀具的 α 角及 β 角所鉋削製作而成的微透鏡，以探討使用何種刀具角度可獲得最佳的曲面形狀精度和表面粗糙度。



第二章 微透鏡的切削加工

2.1 微透鏡陣列的切削加工方式

目前微透鏡陣列的切削加工方式可分為車削加工及磨削加工和鉋削加工等技術【14】。以車削加工的方法製作微透鏡陣列，僅需使用二軸向的超精密加工機，但需搭配一組具有二軸向的移動平台治具，使每一個微透鏡在車削時皆能夠移動至車削旋轉軸上的中心位置。車削加工的好處是加工時間最快，但缺點是無法獲得透鏡與透鏡間高的相對位置精度，和使用單晶鑽石為車削的刀具，所以無法加工鐵系材料。



以磨削加工的方式加工微透鏡陣列需使用四軸同動的超精密加工機，磨削加工的好處是可以加工硬脆材料及鐵系材料，和獲得透鏡與透鏡間高的相對位置精度。但缺點是鑽石砂輪有容易磨耗的問題，所以如果磨削參數使用不當，將會造成微透鏡陣列在加工後的曲面形狀精度及表面粗糙度不佳。為克服此項缺點，以磨削加工方式製作微透鏡陣列時，每次磨削深度必須相當小才能獲得較佳的表面形狀精度及粗糙度，所以磨削加工是三種切削加工的方式中最費時的一種加工方式。圖 2-1 是使用磨削加工方式製作微透鏡陣列的加工示意圖。

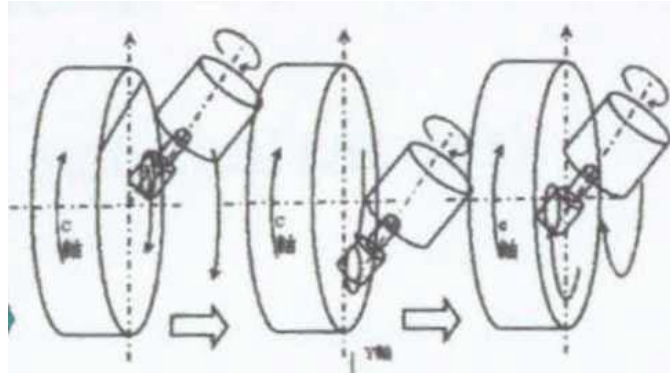


圖 2-1 以磨削加工方式製作微透鏡陣列的示意圖

以鉋削加工的方式加工微透鏡陣列則需使用三軸同動的超精密加工機，鉋削加工的好處是可以獲得透鏡與透鏡間高的相對位置精度和透鏡曲率形狀精度及低表面粗糙度，缺點是使用單晶鑽石的為鉋削的刀具，因此無法加工鐵系材料。鉋削加工所需的時間則介於車削加工和磨削加工之間。圖 2-2 是以鉋削加工方式製作微透鏡陣列的示意圖。【15】

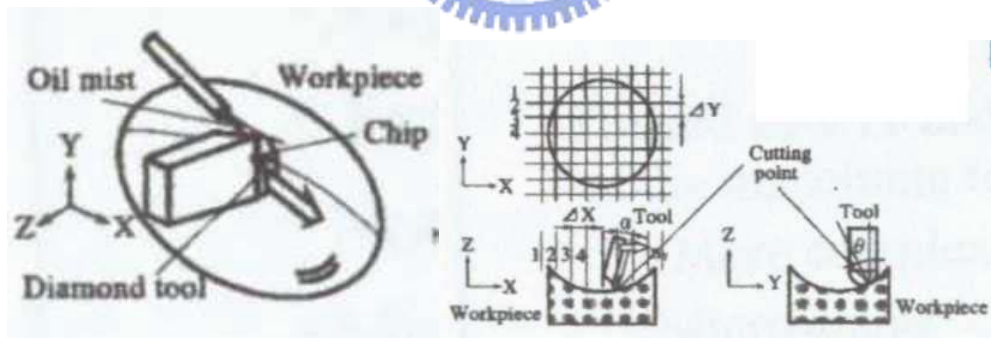


圖 2-2 以鉋削加工方式製作微透鏡陣列的示意圖

2.2 微透鏡陣列的鉋削製作

此次進行的微透鏡陣列的鉋削製作，是使用日本機東芝機械股份有限公司生產的超精密加工機，型號是 ULG-100C(H³)，解析度為 10 奈米，表 2-1 是 ULG-100C(H³)加工機主要規格表【16】，圖 2-3 是 ULG-100C(H³)外觀圖，圖 2-4 是 ULG-100C(H³)各加工軸向的說明圖。

表 2-1 Toshiba ULG-100C(H³) 加工機之主要規格

各加工軸移動量	X 軸(磨削主軸；前後移動)	300mm
	Y 軸(磨削主軸；上下移動)	75mm
	Z 軸(旋轉主軸；左右移動)	150mm
	C 軸(旋轉主軸；迴旋轉動)	無限制
主軸(C 軸)	超精密圓筒形空氣靜壓軸	80mm
	回轉速度	10~1500rpm
	真空吸盤直徑	100mm
	工件可加工最大徑直徑	120mm
研削主軸	超精密圓筒形空氣靜壓軸直徑	32mm
	回轉速度	5000~40000rpm
進給速率	加工進給速率 (單位 0.01 μm)	X, Y, Z 軸 0.1~450mm/min C 軸 1~22000 度/min
	加工進給速率 (0.001 μm)	X, Y, Z 軸 0.1~160/min
最小設定單位	X, Y, Z 軸	1nm、10nm
	C 軸	0.0001 度
NC 控制裝置・控制軸數	FANUC Series 15-MB 同時控制 軸數	4 軸(X, Y, Z, C)
機器本體重量	(含控制器)	2600kgf



圖 2-3 東芝機械 ULG-100C(H³)超精密加工機的外觀圖

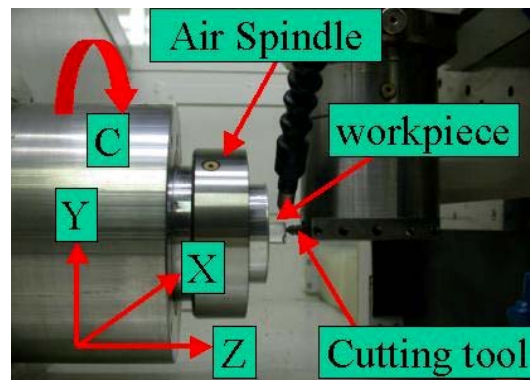


圖 2-4 東芝 ULG-100C(H³) 加工機的各加工軸向的說明圖

實驗中使用的刀具是日本大阪公司製作的單晶鑽石刀具。單晶鑽石是世界上最硬的材質，其硬度亦相當高，經過研磨之後，可得到相當銳利的切削角，因為具有這些優點，故一些適合鑽石車削加工的材料，在經過其切削後即可獲得相當不錯的鏡面效果。表 2-2 是各種刀具材質的特性比較表【17-18】。表 2-3 是此論文實驗中使用的各種刀具鉋削角度說明表，為增加刀具的剛性，刀柄的材質使用碳化鎢，刀刃的 R 值曲率 (Nose radius) 及刀具的各種角度設計圖，如圖 2-5。

表 2-2 各種刀具材質的特性比較表

切削刀具材料要求特性	鑽石		陶瓷	超硬合金	高速鋼
	單晶	燒結			
刀刃銳利性	◎	X	X	△	○
與被加工材的親合性	註	○	◎	△	△
散熱性	◎	○	X	△	△
韌性	X	△	X	△	○
硬度	◎	◎	○	△	X

註：因單晶鑽石與鐵系金屬親合性相當高，故僅能加工非鐵系材料

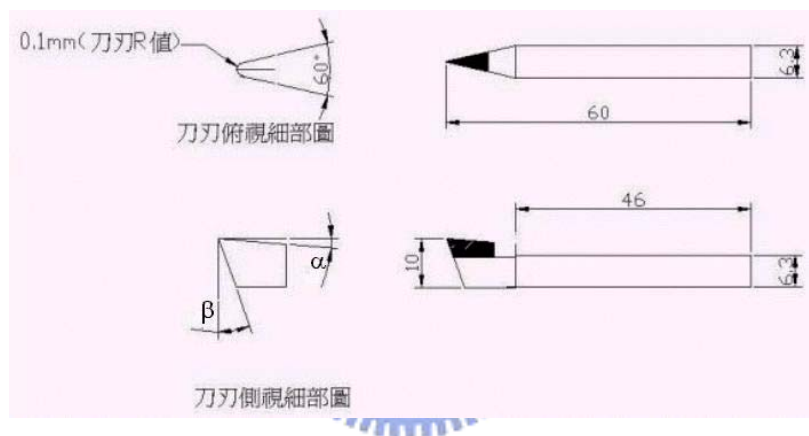


圖 2-5 鉋削透鏡的鑽石刀具角度設計圖

表 2-3 鉋削透鏡實驗中使用的刀具切削角度表

刀具角度 刀具編號	後斜角(α)	前隙角(β)	刀刃圓弧 R 值 (實測值)
PF-2X963	0 度	20 度	96.74um
PF-3Z247	0 度	10 度	95.28um
45-56	-9.3 度	20 度	105.09um
45-57	10 度	20 度	95.26m

進行鉋削微透鏡陣列所使用的材料是日本三菱化學公司生產的光學級壓克力。選用光學級壓克力的原因是因單晶鑽石刀具可以直接進行鉋削加工和對單晶鑽石刀具的磨耗相當低，且光學級的壓克力材

料組成相當均勻，鉋削完成後的非球面微透鏡陣列不必經過拋光製程，即可得到鏡面等級的表面粗糙度。



第三章 微透鏡陣列鉋削的刀具路徑創成與透鏡的形狀精度

3.1 鉋削的刀具路徑創成

微透鏡陣列的鉋削路徑如圖 3-1 所示，在鉋削微透鏡陣列時刀具會隨著透鏡的高度變化而移動，如圖 3-2 所示。鉋削微透鏡陣列的加工方式是先從工件的左邊到右邊之後再由上到下，一系列列作進行鉋削加工，直到整個透鏡陣列的曲面全部加工完成。【19、21】

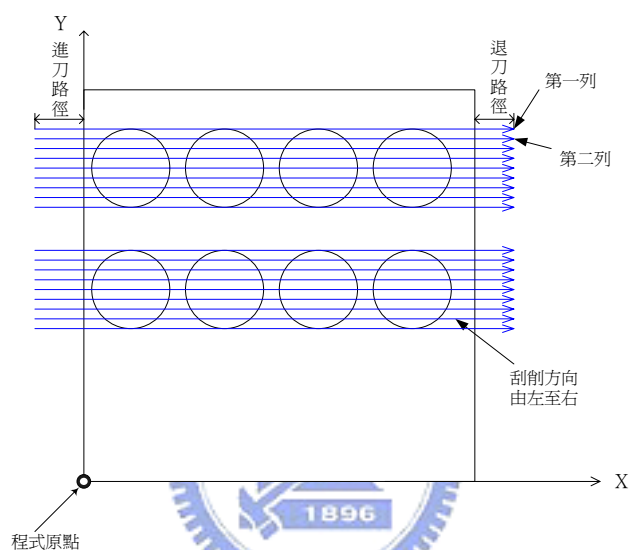


圖 3-1 鉋削微透鏡陣列加工時刀具移動方式示意圖

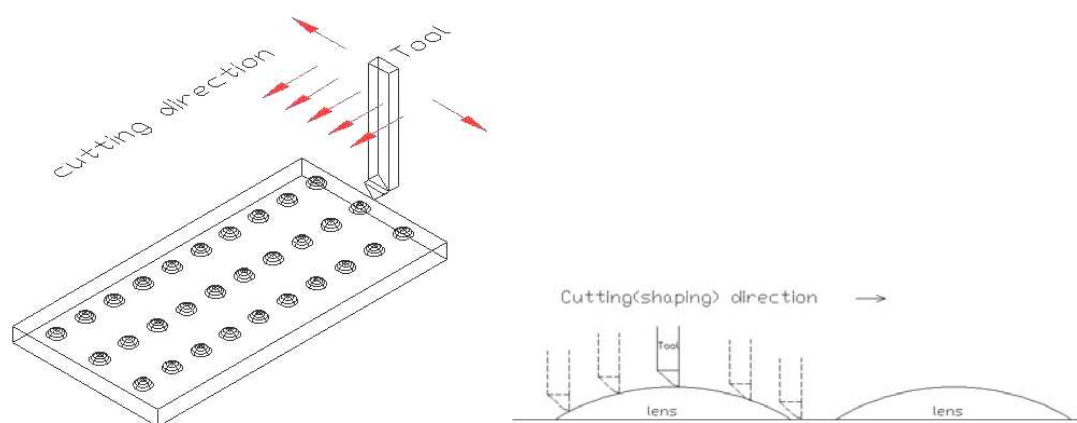


圖 3-2 鉋削時刀具的高度會隨著透鏡的曲面形狀變化而移動

3.1.1 透鏡陣列加工路徑之演算

鉋削透鏡陣列時非球面公式計算之示意圖如圖 3-3 所示

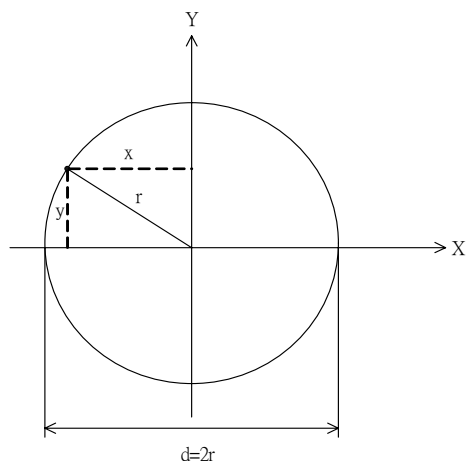


圖 3-3 非球面公式計算之示意圖

1) y 的 range : $-r \leq y \leq r$, 其中 r 為非球面鏡上之幾何半徑。

2) 算出每一個 y 值所對應到的 x 值的範圍 : $-\sqrt{r^2 - y^2} \leq x \leq \sqrt{r^2 - y^2}$

將 x 、 y 值代入非球面公式求出 z 值。下式為空間座標上之非球面公式。

$$z = \frac{x^2 + y^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 - (1+k)(x^2 + y^2)}} + A_2(x^2 + y^2)^1 + A_4(x^2 + y^2)^2 + A_6(x^2 + y^2)^3 + \dots$$

其中 R_1 為透鏡曲面的中心 R 值、 K 為圓錐常數(Conic constant) , 不同 K 值代表意義為 :

$K < 1$: 雙曲面(Hyperboloid)

$K = -1$: 拋物面 (Paraboloid)

$1 < K < 0$: 橢圓面(Ellipsoid)

$K = 0$: 球面(Sphere)

$K > 0$: 扁橢圓面(Oblate ellipsoid)

3) 算出來的 x 、 y 、 z 值是以圓心為 $(0, 0, 0)$ 作參考原點所得到的值 ,

在加工透鏡陣列時須再考慮所設的程式原點(工件原點)作計算，如圖 3-4 所示，算出來的值為絕對座標值 x_{abs} 、 y_{abs} 、 z_{abs} ，也就是最後輸入加工程式 NC 碼時的座標值，計算式為：

$$x_{abs} = x + x_o + \delta_c (N_{cn} - 1)$$

$$y_{abs} = y + y_o - \delta_r (N_{rn} - 1)$$

$$z_{abs} = z$$

其中 x_o 、 y_o ：程式原點到所設定之第一顆透鏡的圓心之距離

δ_c ：行距

$\delta_c N_{cn}$ ：第 n 行

δ_r ：列距

$\delta_r N_{rn}$ ：第 n 列

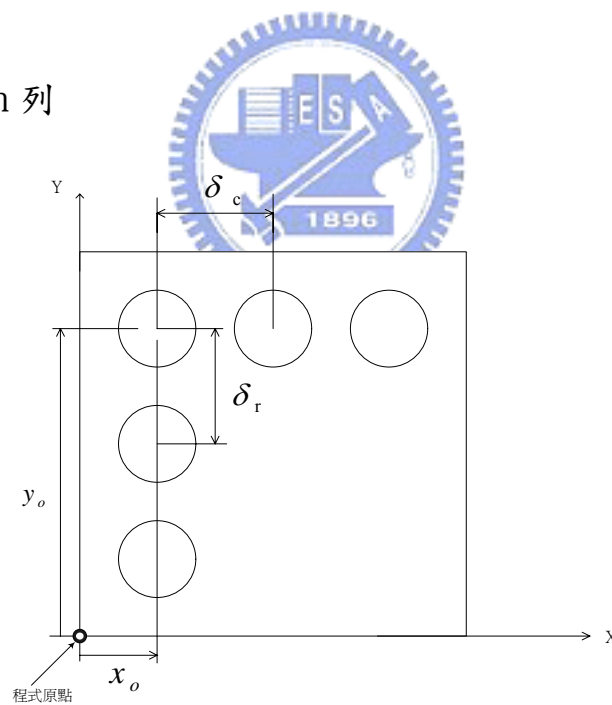


圖 3-4 透鏡陣列座標系示意圖

3.1.2 刀具補償

刀具鉋削點位置補償方式如圖 3-5 所示，非球面公式計算完之資

料點為 \vec{r}_w (CC 點) 如圖 3-6 所示，再代入刀具補正公式後所得到的 \vec{r}_p 即為最後補償後的 CL 點，如圖 3-7 所示。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta Z}{\Delta Y}$$

$$Y' = T_r \sin \theta + Y_0$$

$$Z' = T_r \cos \theta + Z_0$$

其中 ΔY ：透鏡 Y 軸之下一點切削距離

ΔZ ：透鏡 Z 軸之下一點切削距離

Y' ：加工機 Y 軸的刀具實際切削位置

Z' ：加工機 Z 軸的刀具實際切削位置

Y_0 ：加工機 Y 軸程式原點位置

Z_0 ：加工機 Z 軸程式原點位置

\vec{r}_w ：刀具與工件的接觸點(CC 點)

\vec{r}_p ：刀具的中心點(CL 點)

\vec{n} ：工件表面上的法線向量

\vec{t} ：工件表面上的切線向量

T_r ：刀刃圓弧半徑

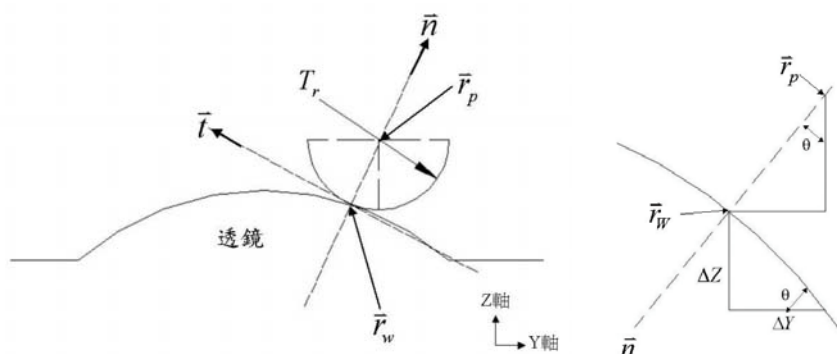


圖 3-5 刀刃圓弧鉋削點位置補償示意圖

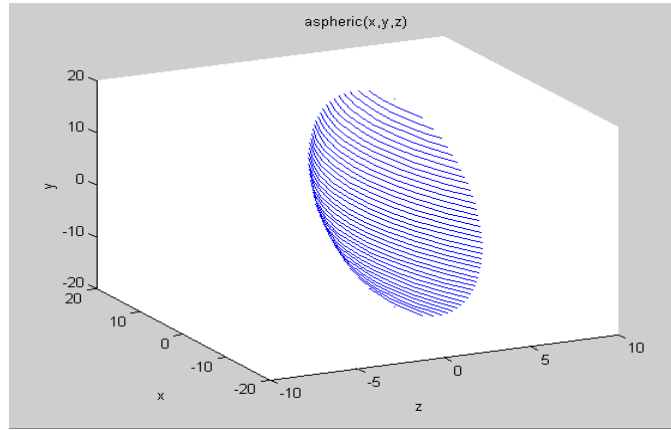


圖 3-6 刀具路徑示意圖(CC 點)

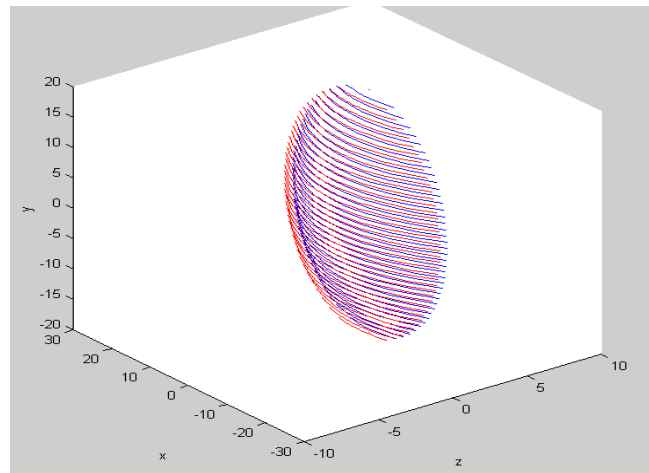


圖 3-7 刀具鉋削點補償後的路徑示意圖 (紅色為 CL 點路徑、藍色為 CC 點路徑)

3.1.3 鉋削微透鏡陣列之刀具路徑創成軟體架構流程說明

鉋削微透鏡陣列之刀具路徑創成軟體架構如圖 3-8 所示。

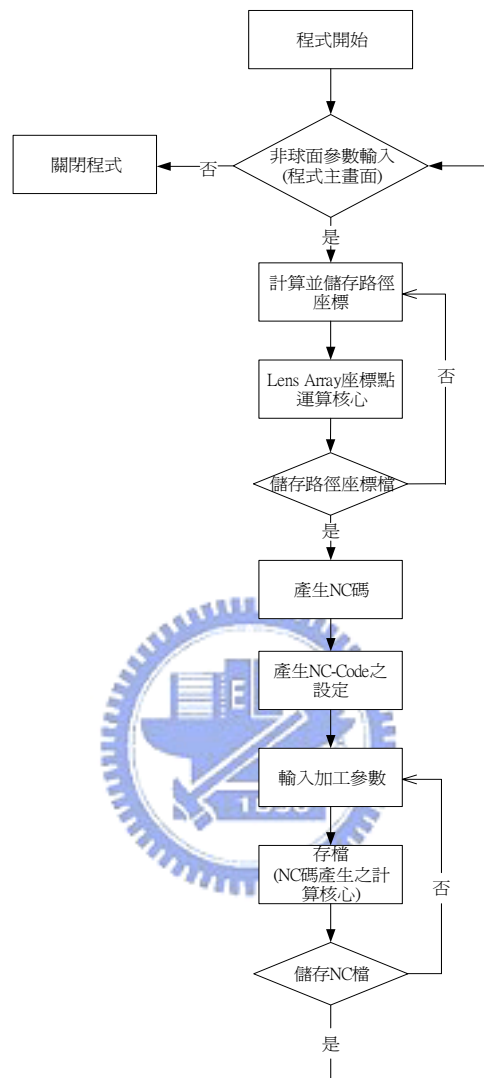


圖 3-8 鉋削微透鏡陣列之刀具路徑產生軟體主架構流程圖

3.1.4 鉋削微透鏡陣列的刀具路徑產生軟體使用說明

鉋削微透鏡陣列的刀具路徑產生軟體，係工研院光電所與台灣科技大學機械系共同開發而成，軟體的操作介面如圖 3-9 至 3-13 所示。

圖 3-9 為鉋削微透鏡陣列的刀具路徑產生軟體的的起始畫面，一開始先輸入透鏡的參數，下面為各項參數之說明：

1)幾何參數:R1 代表透鏡之非球面透鏡的中心曲率 R 值、K 代表 Conic 常數、外徑代表單一鏡片的曲率直徑值、刀鼻半徑代表所用之單晶鑽石刀刃的圓弧值。

2)陣列參數：陣列參數是用來計算微透鏡陣列所必須之參數，其中 x_0, y_0 為程式原點到所設定之第一顆透鏡的圓心之距離，其座標表示位置如圖 3.1.9 所示，行距代表每行透鏡與透鏡之間的距離、列距代表每列透鏡與透鏡之間的距離，總行數代表欲加工整體透鏡陣列的數目、總列數代表欲加工整體微透鏡陣列的數目。例如鉋削單一顆透鏡時，行距與列距皆設為 0，總行數與總列數皆設為 1。

3)非球面係數：A2 至 A20 為非球面的高次項係數。

4)Lens 外形：選擇欲加工凸面透鏡或凹面透鏡。

5)增量設定：設定加工路徑時加工機之 X 軸、Y 軸方向之增量值(Pick feed)。

6)參數設定完後，按”下一步”的欄位進入產生微透鏡陣列的刀具路徑 NC 程式碼之頁面，如圖 3-10 所示。



圖 3-9 鉋削微透鏡陣列的刀具路徑計算軟體的程式主畫面

產生微透鏡陣列的刀具路徑 NC 程式碼之頁面，各參數設定說明如下：

- 1) 程式號碼：為 NC 碼前面之程式號碼，如：輸入”556”則 NC 碼開頭為”0556”。
- 2) 冷卻方式：可以選擇空氣壓力源冷卻或切削液冷卻或不使用。
- 3) 主軸設定：可以設定主軸正轉、反轉、或停止，當選擇正、反轉時可以設定主軸轉速(RPM)，當在鉋削加工時，主軸需設定成不旋轉的狀態。
- 4) 加工距離設定：
 - a. 工件之最大寬度：是用來計算刀具 X 軸方向進退刀時所要的尺寸。
 - b. 工件之最大高度：是用來計算刀具 Y 軸方向進退刀時所要的尺寸。
 - c. 加工前 Z 軸拉高值：鉋削加工進刀前之提刀距離。
 - d. 加工後 Z 軸拉高值：鉋削加工退刀後之提刀距離。
 - e. 加工前之進刀距離：鉋削加工進刀刀尖點 X 軸方向之前置距離。
 - f. 加工後之退刀距離：鉋削加工後刀刀尖點 X 軸方向之後退距

離。

g. 每次進刀深度(μm)(Z軸方向)：控制每次進刀之鉋削深度。

5) 切削進給設定：

a. 鉋削進給速率(mm/min)：為刀具接觸鏡片時，鉋削的進給速率。

b. 進、退刀之進給速率(mm/min)：為刀具離開透鏡時提刀、退刀所用的進給速率。

c. 最後一刀之進給速率(mm/min)：為透鏡加工精加工時，所用的進給速率。

d. 鉋削平面進給速率(mm/min)：為進行透鏡平面加工時，所用的進給速率。

設定完 NC 碼的加工條件之後按”儲存 NC 加工碼”的欄位，即可進行刀具路徑的計算，在計算完成刀具路徑程式碼之後即出現，檔名儲存的畫面，如圖 3-11 所示。

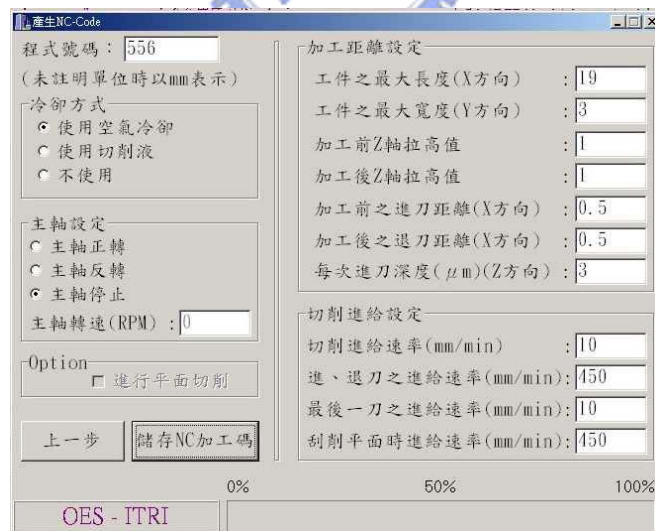


圖 3-10 產生鉋削微透鏡陣列的刀具路徑 NC 程式碼

設定完 NC 碼的參數後按”存檔”出現圖 3-11 的存檔畫面，輸入檔名後，將會在使用者所選的目錄下產生副檔名為”.NC”的 NC 檔。

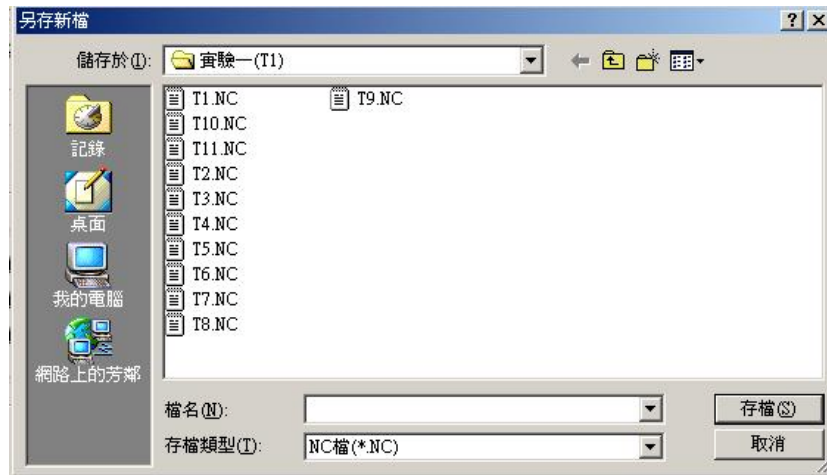


圖 3-11 儲存刀具路徑的加工 NC 程式碼檔案

以鉋削方式加工微透鏡陣列，因刀具路徑的點群資料相當龐大，一般 CNC 加工機的控制器儲存容量，並無法將微透鏡陣列全部的刀具路徑點群資料全部儲存到控制器內，所以要採用 RS232 線上資料傳輸方式(DNC 模式)，將個人電腦上的刀具路徑點群資料，傳送到加工機的控制器上，以執行微透鏡陣列的鉋削加工。

3.1.5 刀具曲率 R 值大小及原點位置設定

一個高精度的微透鏡陣列，除了要求透鏡曲面的形狀精度及表面粗糙度之外，透鏡的幾何位置亦相當重要。以鉋削加工方式加工微透鏡陣列，如果想要得到高的幾何位置精度，則刀具原點的設定方法是否正確即顯得相當重要。假如超精密自由曲面加工機的 X 軸和 Y 軸程式原點設定錯誤，則鉋削完成的透鏡陣列的曲面位置將會有誤差，而如果 Z 軸程式原點設定錯誤，亦將會造成透鏡陣列在鉋削程式結束

後，會有部分的曲面會沒有被加工，或者是在鉋削程式剛開始執行時，因鉋削深度過深而造成刀具的損壞。

3.1.6 微透鏡陣列的 X 軸及 Y 軸的程式原點設定方法

1) 將待鉋削的透鏡基材固定在治具上，治具的設計圖，如圖 3-12 所示，固定透鏡基材的治具真圓度需小於 1 微米內，讓治具經電子量規的量測後，可將治具調整成與加工機主軸(C 軸)的同心度能在 1 微米內。透鏡基材的外形真直度亦需小於 1 微米內，讓光學平板經電子量規的調整水平方向後，可使透鏡基材與加工機主軸(C 軸)的平行度控制在 1 微米內。如此一來，則光學平板在鉋削完成之後，即使從加工機主軸(C 軸)的真空吸盤取下，仍可放回加工機主軸的最初的擺放位置，以便繼續進行第二次的鉋削加工。

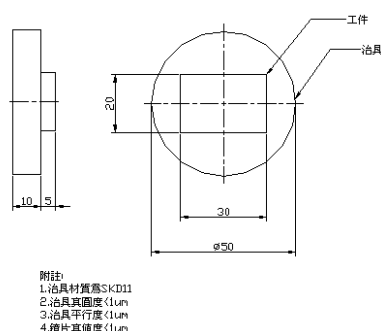


圖 3-12 透鏡鉋削加工時所用的治具設計圖

2) 將超精密加工機的操作模式改為使用手動模式，移動加工機的 X 軸、Y 軸、Z 軸，使單晶鑽石刀刃的 R 值前端移至最接近透鏡基材表

面附近（可使用長焦距顯微鏡觀察刀具移動狀況，以避免刀刃接觸到透鏡基材表面，造成刀具的損傷），並將此位置設成為 Z 軸的工作原點，之後再執行往復直線鉋削的程式，直到刀具鉋削到透鏡基材表面才停止程式的執行。往復直線鉋削的程式如下：

```
G01 G91 X0 Y0 Z3.0 F400;
```

```
G01 X-1.0 Y0 Z3.0;
```

```
G01 X-1.0 Y0.0 Z0.0;
```

```
G92 Z-0.003;
```

```
G90 Z0;
```

```
M07;
```

```
G01 X10.0;(依透鏡大小而訂)
```

```
G01 Z3.0;
```

```
G01 X-1.0;
```

```
M99;
```



鉋削時每次刀具進給切深約 1 微米，在鉋削的同時可將長焦距顯微鏡架設在超精密加工機的移動平台上，以觀察透鏡基材表面是否有被鉋削到，長焦距顯微鏡的製作公司是日本 Keyence 公司生產，型號 VH-5910，最大放倍率是 245 倍，鏡頭與物體的最大觀察距離有 49mm。

圖 3-13 是長焦距顯微鏡外觀圖，圖 3-14 是利用長焦顯微鏡觀察鉋削狀況圖。



圖 3-13 長焦距顯微鏡外觀圖



圖 3-14 使用長焦顯微鏡觀察鉋削微透鏡陣列時狀況

待透鏡基材表面產生鉋削的痕跡之後，即停止超精密加工機之鉋削動作，並將透鏡基材自真空吸盤處取下，利用無水酒精將透鏡的表面擦拭乾淨，準備量測透鏡基材被鉋削出的深度及直線圓弧 R 值尺寸。

量測透鏡基材的直線圓弧深度及曲率大小的量測設備是使用英國 Taylor Hobson 公司製作的表面形狀精度及粗度量測儀，型號是 Form

talysurf(S5)，表 3-1 是 Form talysurf(S5)主要規格表【20】，圖 3-15 為 Form talysurf(S5)外觀圖。

表3-1 Form talysurf(S5)表面輪廓儀的基本規格表

最大量測範圍	120mm
解析度	10nm(在量測深度小於 6mm 範圍)
探針移動速度	1mm/秒 or 0.5mm/秒
量測力	70mgf
測頭種類	紅寶石：球形R值=0.5mm 鑽石：尖端 R 值=2um
可分析表面形狀精度的種類	非球面、球面、平面、橢圓面、拋物面、表面粗糙度



圖 3-15 Form talysurf 表面輪廓儀的外觀圖

在量測透鏡基材之前，須先將透鏡基材與探針移動方向調整至相互垂直，以確保量測準確性。刀刃的 R 值大小及透鏡直線微溝的深度，精量測後的結果如圖 3-16 及圖 3-17 所示，圖 3-18 是利用光學顯微鏡拍攝鉋削完成的直線微溝。

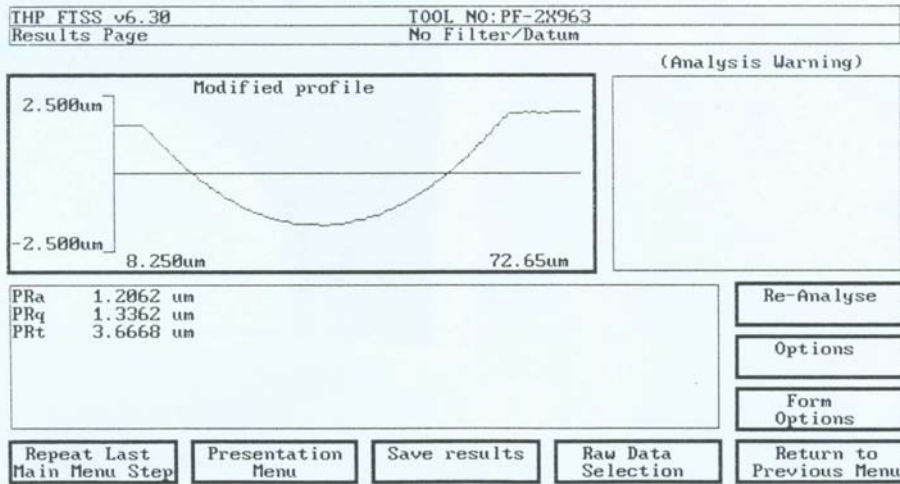


圖 3-16 量測透鏡直線圓弧深度(Prt=3.666um)

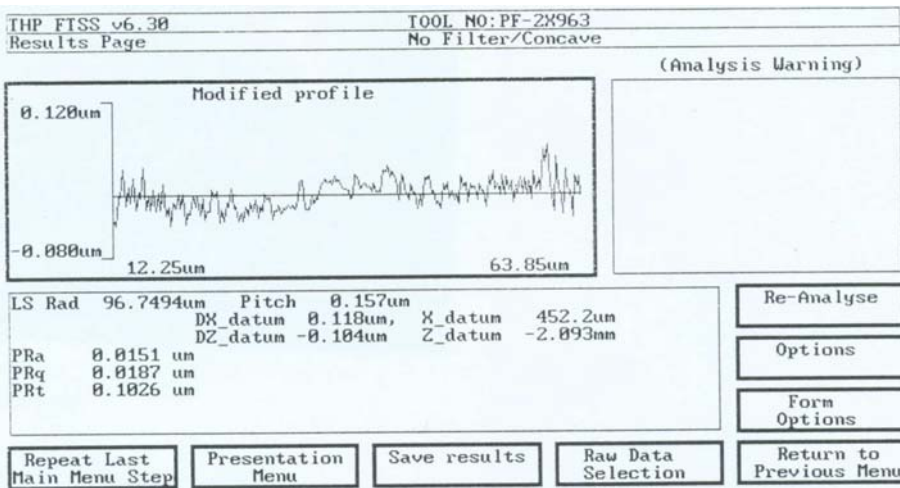


圖 3-17 量測刀刃圓弧 R 值(R=96.7494um)

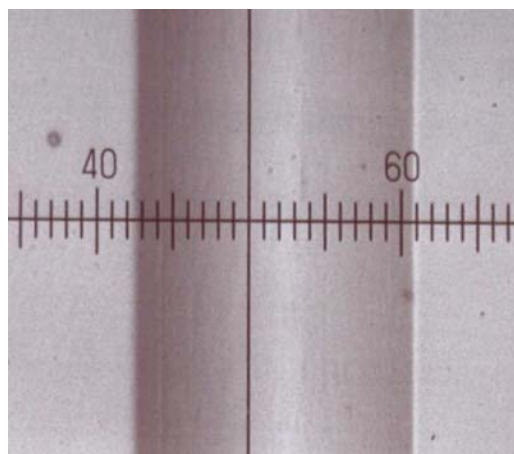


圖 3-18 鉋削完成的直線圓弧外形(每小格 2.86um)

3)在量測出刀刀的 R 值大小及透鏡基材被鉋削的深度之後，依照鉋削深度，修正超精密自由曲面加工機的 Z 軸位置，使其下次鉋削時，刀刀的切削位置可在透鏡基材的表面位置上。量測結束之後，將透鏡基材重新放回超精密加工機的主軸(C 軸)上，使用長焦顯微鏡觀察刀具與透鏡基材的相對位置，並將移動加工機的 X 軸、Y 軸，使刀具移動到透鏡的最左下角，此時的位置可暫時設定成為 X 軸及 Y 軸的工作原點。再執行一個直線鉋削程式，以求得 X 軸及 Y 軸的正確加工原點位置，執行程式如下：

```
G01 G91 X0 Y0 Z3.0 F400;
```

```
M7;
```

```
G01 X-1.0 Y0.5 Z3.0;
```

```
G01X-1.0 Y0.5 Z0;
```

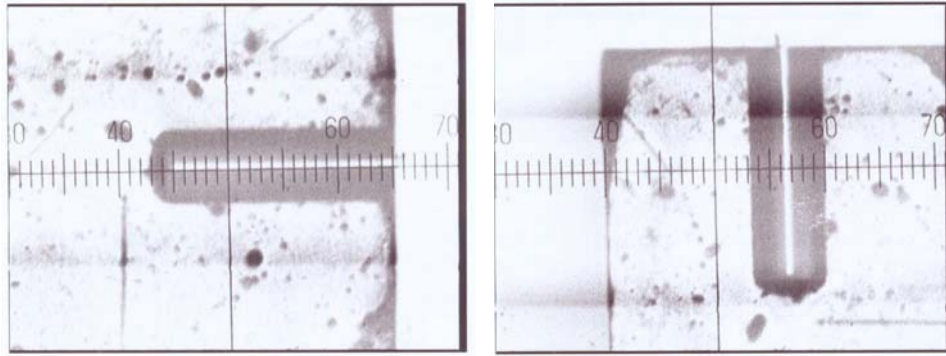
```
G01X0.5 Y0.5 Z0;
```

```
G01 Z3.0;
```

```
M02;
```



待程式執行結束之後，使用無水酒精將透鏡表面擦拭乾淨，再用光學顯微鏡計算出實際刮削的長度，如圖 3-19，再依程式上的程式數據值與實際鉋削長度差異值進行加工機 X 軸及 Y 軸的原點補正。



X axis 方向(每小格 28.57um) Y axis 方向(每小格 28.57um)

圖 3-19 用光學顯微鏡量測計算實際鉋削長度的距離

3.2 非球面微透鏡陣列鉋削

1)表 3-2 是進行鉋削微透鏡陣列時所使用的加工條件

表 3-2 初次微透鏡所使用的加工條件

刀具編號	PF-2X963
透鏡陣列數	1x6
刀刃 R 值	96.74um
後斜角(α)	0 度
前隙角(β)	20 度
被加工材料	PMMA(日本三菱化學公司生產、日本商標 432064 號)
鏡片直徑	1mm(凹面)
非球面係數	R=3、K=-5
透鏡最大斜率	9 度
X 軸移動速度	10mm/分
X 軸增量值	10um/次
Y 軸增量值	10um/次
Z 軸切深	3um/次
冷卻方式	加壓空氣

2)量測微透鏡陣列的形狀精度及表面粗糙度

使用英國 Taylor Hobson 公司生產的 Form Talysurf (S5) 表面

形狀精度與粗糙度量測儀，外觀如圖 3-15 所示。量測鉋削完成的非球面微透鏡陣列的表面形狀精度及粗糙度，使用的探針測頭圓弧 R 值 =2um，測頭的材質是鑽石。因鉋削加工屬非軸對稱加工的一種，故不能僅量測一軸向的形狀精度就代表透鏡全部曲面精度，所以量測透鏡 X 軸及 Y 軸的形狀精度，以提高透鏡表面形狀精度量測結果的可靠性。微透鏡 X 軸及 Y 軸的面形狀精度量測結果如圖 3-20、3-21 所示；表面粗糙度如圖 3-22~圖 3-26 所示。

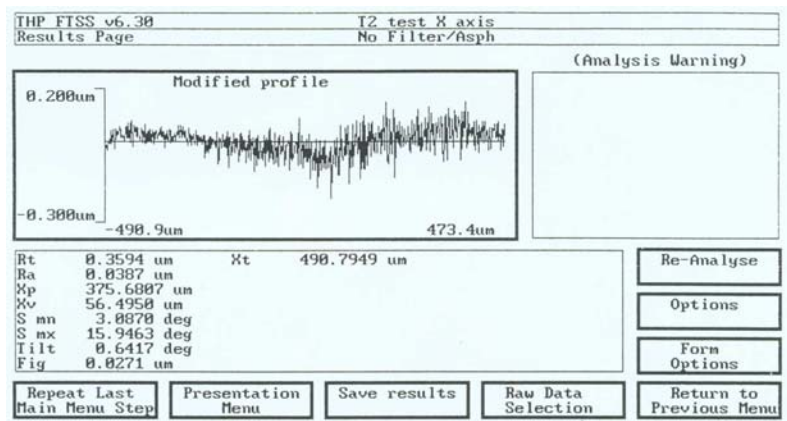


圖 3-20 微透鏡 X 軸方向的形狀精度(Rt=0.3594um)

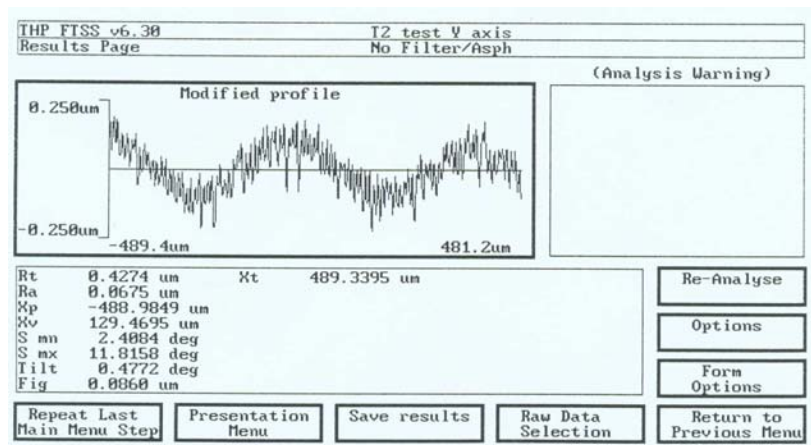


圖 3-21 微透鏡 Y 軸方向的形狀精度(Rt=0.4274um)

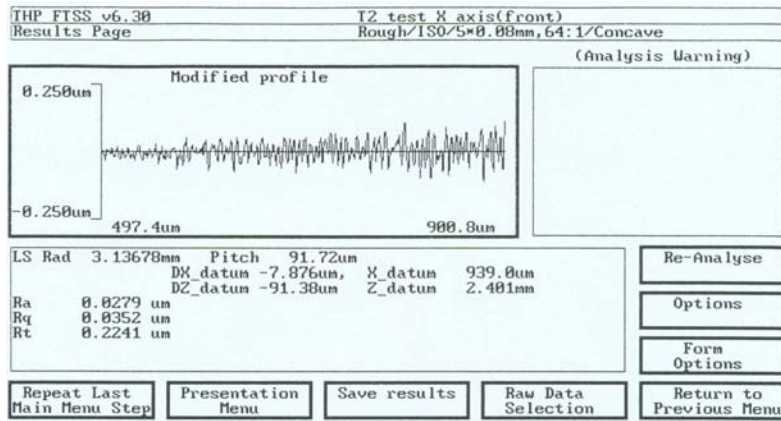


圖 3-22 微透鏡 X 軸方向前半部表面粗糙度(Ra=27.9nm)

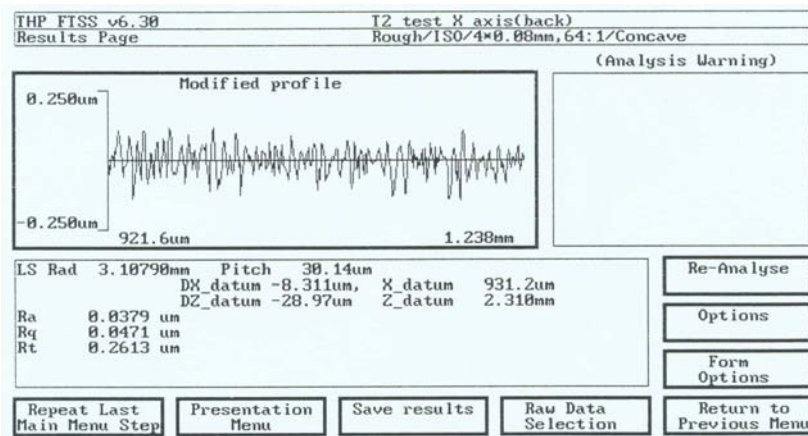


圖 3-23 微透鏡 X 軸方向後半部表面粗糙度(Ra=37.9nm)

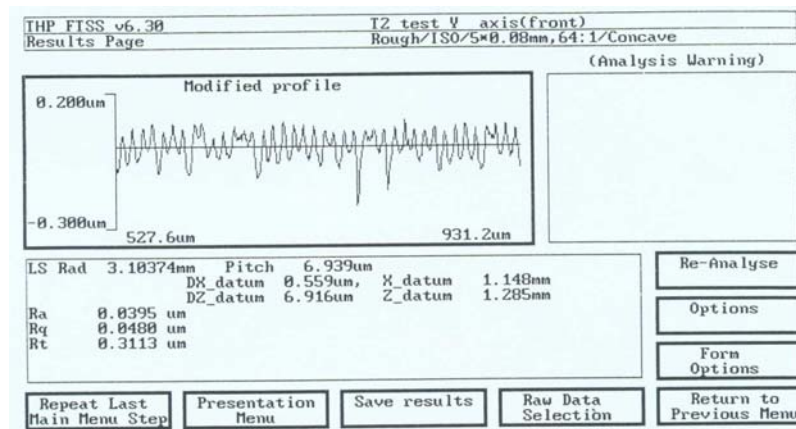


圖 3-24 微透鏡 Y 軸方向前半部表面粗糙度(Ra=39.5nm)

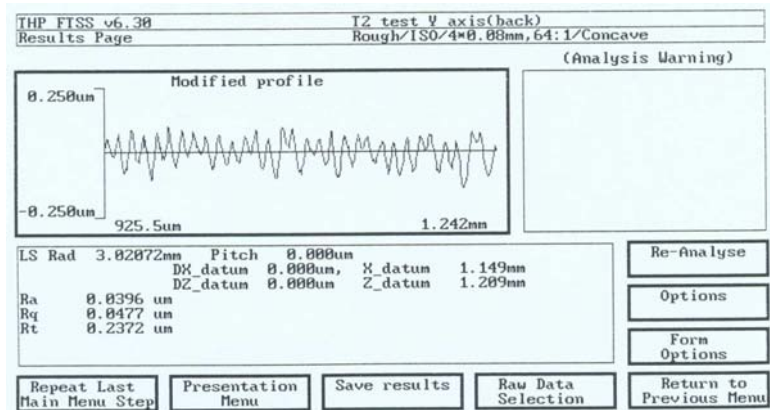


圖 3-25 微透鏡 Y 軸方向後半部表面粗糙度(Ra=39.6nm)

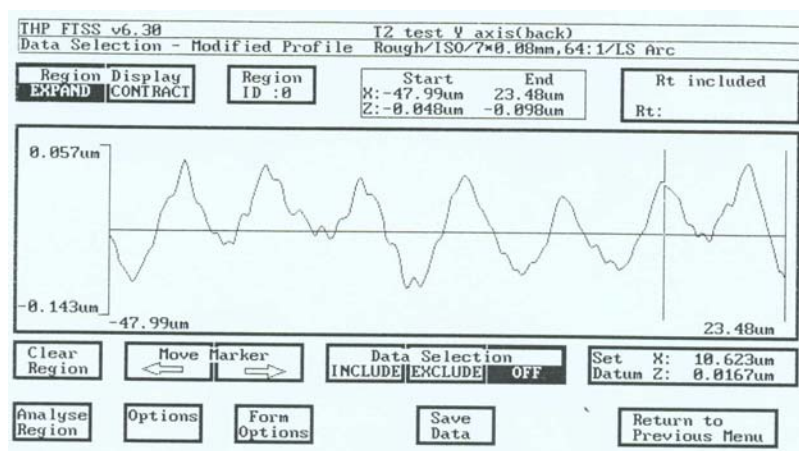


圖 3-26 微透鏡 Y 軸方向後半部的表面粗糙度微觀圖

3)以光學顯微鏡觀察微透鏡狀況，觀察結果如圖 3-27 所示，圖 3-28 是用數位相機拍攝微透鏡陣列的成品圖。

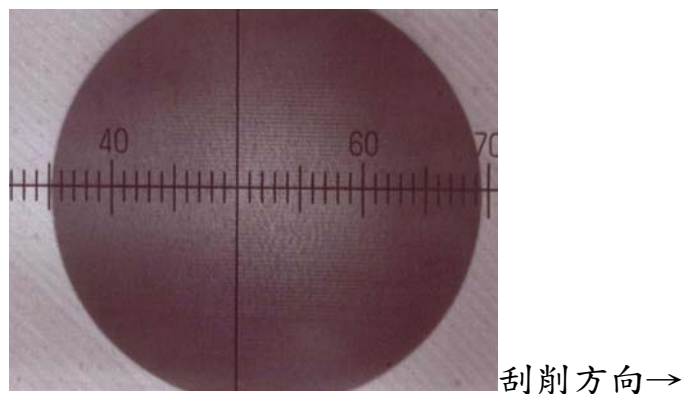


圖 3-27 非球面微透鏡陣列單一顆外觀圖(每小格 28.57um)

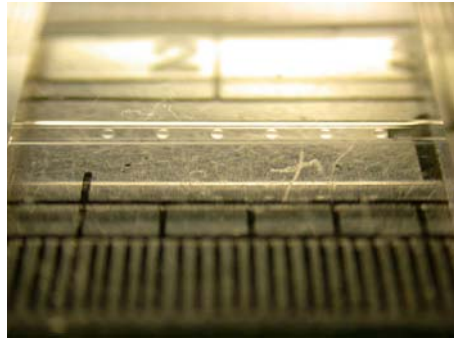


圖 3-28 鉀削完成後的非球面微透鏡陣列(1x6)的外觀圖



第四章 微透鏡陣列鉋削的表面特性

4.1 微透鏡的鉋削特性

由 Form Talysurf 表面形狀精度及粗糙度量測儀量測透鏡的曲面形狀後，發現透鏡 Y 軸方向的形狀精度曲線有週期性的高低起伏現象，如圖 3-12 所示，判斷是加工室溫度變化所引起的現象。為證明此一判斷是否正確，於是決定使用溫度感測器來量測加工室環境溫度變化，經量測之後發現加工室的溫度變化達 1.2°C ，溫度變化曲線圖如圖 4-1 所示。

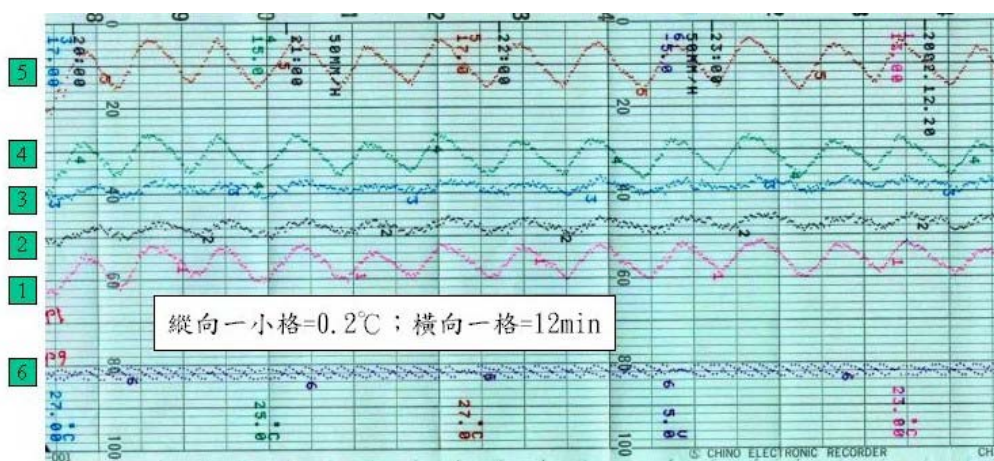


圖 4-1 加工室溫度變化量測圖

各溫度曲線的量測位置如下：

- 1：機台外部上方
- 2：燈源
- 3：刀具附近區域
- 4：內部機台下方（操作者方向）

5：外部機台下方（操作者方向）

6：氣壓源的壓力變化

由編號 5 的溫度變化曲線，亦與透鏡 Y 軸方向的形狀精度曲線相同，更可證明加工室的溫度變化，將會對超精密加工機的精度產生影響。

圖 4-2 是利用微測距儀量測加工機的 Z 軸在靜止不動時所產生的位置變化圖，由 Z 軸位置變化圖亦可清楚知道，當加工室溫度產生變化時，Z 軸的長度亦會發生變化。

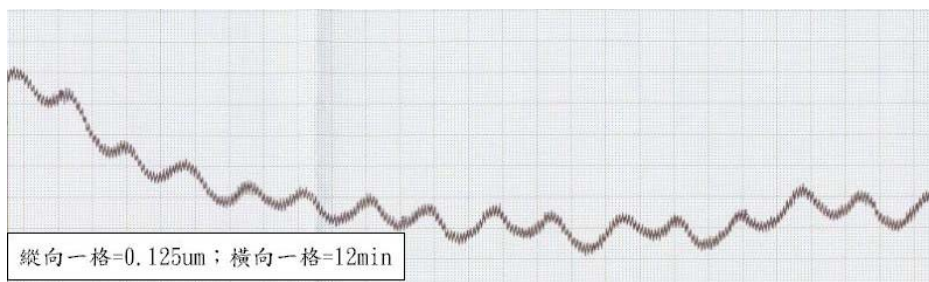


圖 4-2 加工機 Z 軸位置受加工室溫度變化之影響圖

由溫度變化所造成透鏡曲面形狀的誤差，其改善方法是從自由曲面超精密加工機周圍的溫度控制著手。以長度 100mm 的 SKD-61 料的热膨脹係數經過計算後，每 1°C 溫度變化是 1.6 微米【12】，因此加工室的溫度變化若過大，將會影響到加工機整體精度的表現。根據日本東芝機東芝機械股份有限公司的建議及相關資料得知，超精密加工機周圍的溫度變化需控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以內，方能展現出超精密加工機的加工精度【15】。

其次，量測鉋削後 X 軸方向的表面粗糙度，發現透鏡進刀處(前半部)與出刀處(後半部)的表面粗糙度不一致。在鉋削凹面透鏡時，X 軸方向的前半部粗糙度優於後半部，在鉋削凸面透鏡時，量測結果則發現 X 軸方向的後部粗糙度優於前半部。而量測 Y 軸方向的表面粗糙度，則發現其表面粗糙度分佈比較均勻，並不像 X 軸方向出現較大的表面粗糙度的變化。

此外，藉由鉋削各種曲率的透鏡所得結果，發現透鏡 X 軸方向的曲面形狀精度會隨著刀具切削點與透鏡的切線斜率的改變而產生變化，切線斜率越大，則其表面形狀精度越糟，而 Y 軸方向的形狀精度較不受曲率變化的影響，影響透鏡 Y 軸形狀精度最大的因素是 Pickfeed (ΔY) 的間距。 ΔY 過大就會造成透鏡片表面形狀精度及粗度不佳，一般而言： ΔY 的大小可依： $R_t = (\Delta Y)^2 / 8R$ 公式當作參可指標。

R_t (Peak to valley)：透鏡 Y 軸預估的表面粗度

ΔY ：透鏡 Y 軸之下一點切削距離

R：所使用的刀具的刀刃圓弧 R 值

溫度造成超精密加工機所產生的精度誤差，可藉由恆溫室來改善，但要將溫度的變化控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以下，其花費將相當昂貴。目前本實驗所使用的方法是用隔離罩將加工機與實驗室作一隔離，此實

驗室的溫度變化約在 1.2°C 以內，經加裝隔離罩之後，加工機的加工精度受環境溫度變化的影響明顯減少，溫度變化以從 1.2°C 降低至 0.5°C ，如圖 4-3 所示。圖 4-4 是自由曲面加工機在使用隔離設備之後 Z 軸受溫度的後所產生的位置變化量約 0.125 微米。圖 4-5 和 4-6 是加工機有無使用隔離罩來鉋削平面所得到的形狀精度。

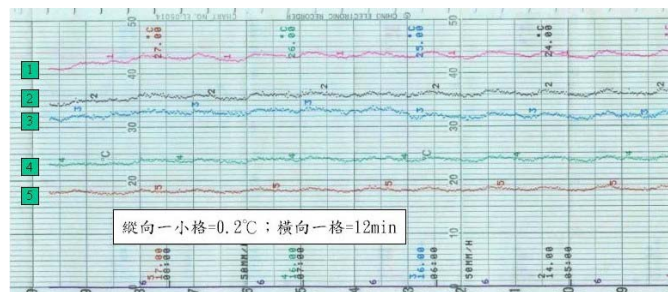


圖 4-3 超精密加工機加裝隔離罩之後加工機周圍溫度變化圖

各溫度曲線的量測位置如下：

- 1：機台外部上方
- 2：燈源
- 3：刀具附近區域
- 4：內部機台下方（操作者方向）
- 5：外部機台下方（操作者方向）

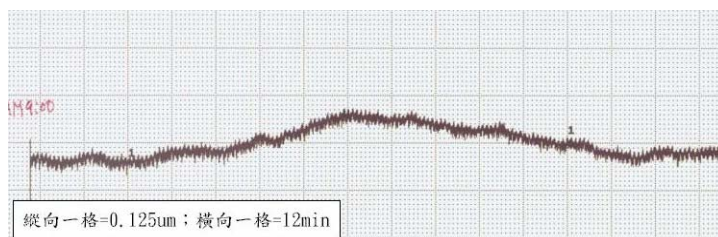


圖 4-4 使用隔離設備之後 Z 軸受溫度的後所產生的位置變化量

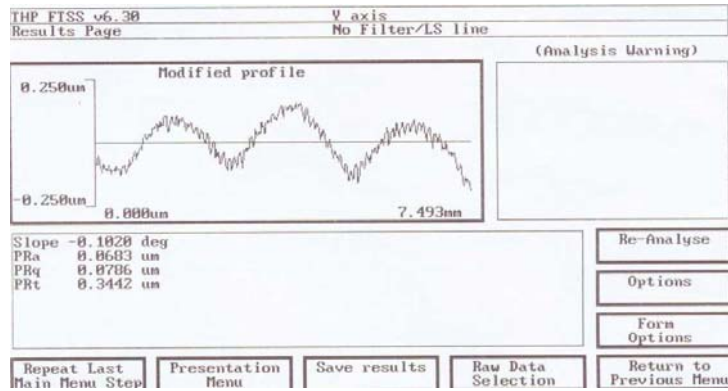


圖 4-5 加工機未使用隔離罩時鉋削平面的精度($R_t=0.3442\mu\text{m}$)

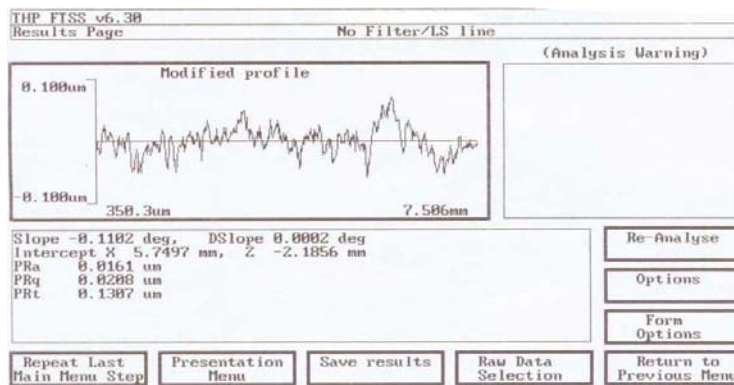


圖 4-6 加工機有使用隔離罩時鉋削平面的精度($R_t=0.1307\mu\text{m}$)

由上述時實驗，可以知道改善加工室的溫度，將可有效降低透鏡加工後的形狀精度。而透鏡曲率的變化而造成曲面形狀精度與表面粗糙度的不一致，則須做不同刀具切削角度的鉋削實驗，以便找出其相關性，並試圖找出其解決方法。

4.2 透鏡鉋削之表面特性實驗

本研究改變單晶鑽石刀具的後斜角 (α)及前隙角(β)進行微透鏡鉋削，觀察微透鏡的表面是否會因透鏡與刀具的鉋削角度不同，而產生不同的曲面形狀精度和表面粗糙度變化。鉋削一個 1×6

的微透鏡陣列(透鏡直徑 1mm)，所需加工時間約 50 小時，為節省加工時間及刀具磨耗所產生的實驗誤差，所以此篇論文中每一個不同參數的透鏡鉋削實驗，僅加工一個微透鏡，以增加鉋削非球面微透鏡實驗的可靠性。

4.2.1 透鏡鉋削之表面特性實驗

4.2.1.1 平面鉋削時之刀具角度對表面粗糙度的影響

使用不同後斜角(α)及前隙角(β)的單晶鑽石刀具鉋削平面，來分析刀具的後斜角(α)及前隙角(β)對表面粗糙度的影響。使用的刀具切削角度如前出的 2-3，鉋削平面使用的加工條件如表 4-1。



表 4-1 平面鉋削的加工條件

被加工材料	PMMA(日本三菱化學公司生產、日本商標 432064 號)
X 軸移動度速	10mm/分
Y 軸增量值	5 μ m/次
鉋削深度	3 μ m/次
冷卻方式	加壓空氣

平面鉋削完成之後，使用表面形狀精度與粗糙度量測儀，分析在使用不同的刀具後斜角(α)和前隙角(β)所產生的粗糙度變化，量測結果如圖 4-7 至圖 4-10。在鉋削微透鏡陣列或平面時，皆有移動超精密加工機的 Y 軸，以得到所需的透鏡曲面直徑或平面寬度，因此

加工機 Y 軸移動量的大小亦會影響到透鏡鉋削後的表面粗糙度。而為了表面形狀精度與粗糙度量測儀能夠量測到透鏡或平面的 X 軸真正的表面粗糙度，所以在量測透鏡的表面粗糙度前，需先將透鏡的 X 軸方向調整成和表面形狀精度與粗糙度量測儀探針的 X 軸方向一致，以得到透鏡 X 軸真正的表面粗糙度。一般而言，透鏡的 X 軸方向的表面粗糙度，多會比 Y 軸的粗糙度來的好，因此，若沒有將透鏡的 X 軸方向調整成與量測探針的 X 軸方向一致，將會影響到量測結果的真實性。調整透鏡 X 軸與量測探針的 X 軸方向一致的方法是在量測平台上放置一個可旋轉及移動的治具，並用電子量錶量測透鏡和探針移動方向的平行度，並根據所量測到的誤差，用旋轉平台將透鏡轉成與探針量測的方向一致，如圖 4-11。

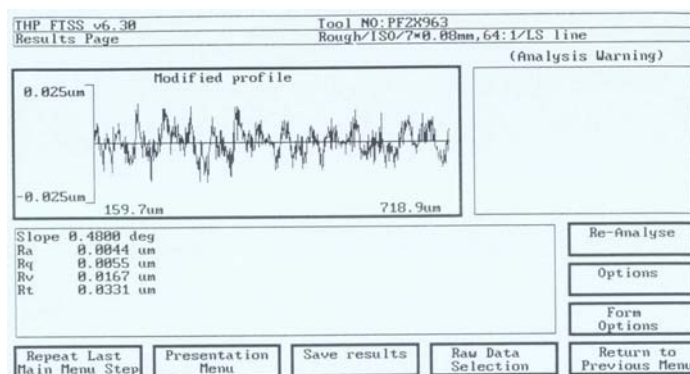


圖 4-7 平面鉋削後之表面粗糙度
(使用刀具編號 PF-2X963 的刀具，表面粗糙度 Ra=4.4nm)

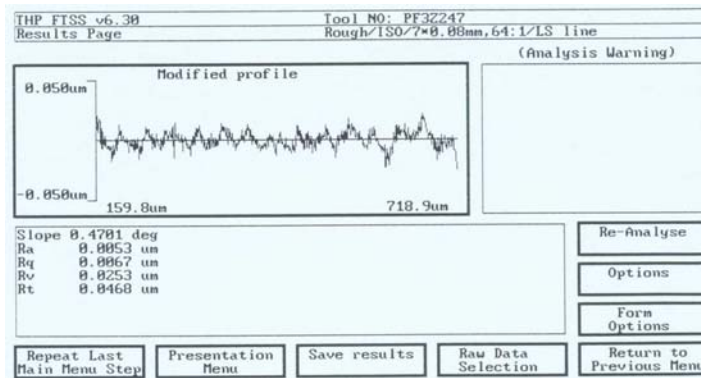


圖 4-8 平面鉋削後之表面粗糙度
(使用刀具編號 PF-3Z247 的刀具，表面粗糙度 Ra=5.3nm)

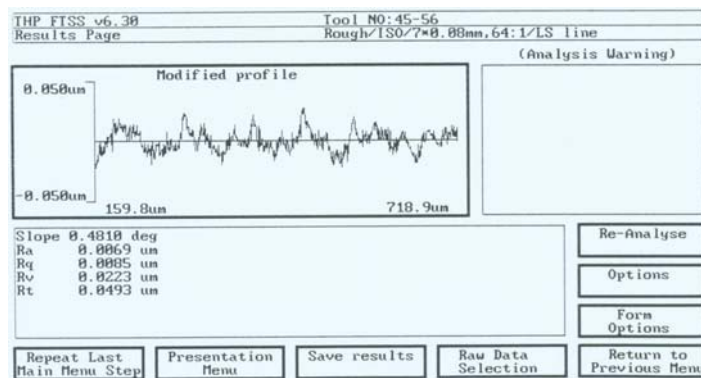


圖 4-9 平面鉋削後之表面粗糙度
(使用刀具編號 45-56 的刀具，表面粗糙度 Ra=6.9nm)

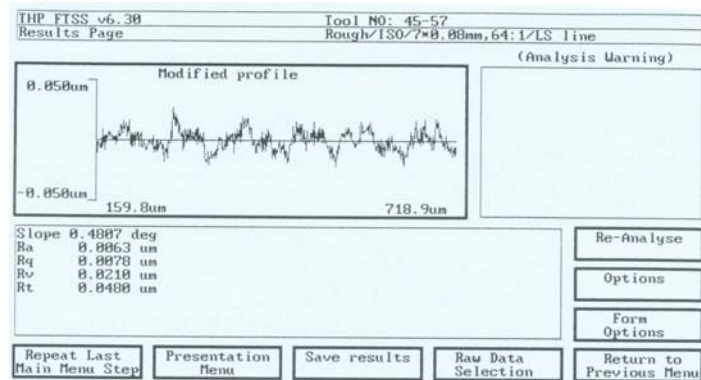


圖 4-10 平面鉋削後之表面粗糙度
(使用刀具編號 45-57 的刀具，表面粗糙度 Ra=6.3nm)



圖 4-11 使用旋轉平台調整透鏡 X 軸與探針的平行度

由上述的實驗結果得知，以單晶鑽石刀具鉋削壓克力平面時，當刀具的前隙角(β)較大時，將可以得到較佳的表面粗糙度；當刀具的後斜角為零度時，表面粗糙度最佳，當刀具的後斜角為正值時，表面粗糙度次之，而當刀具的後斜角為負值時，表面粗糙度最差。以直條圖表示鉋削平面後的表面粗糙度的變化如圖 4-12 所示。

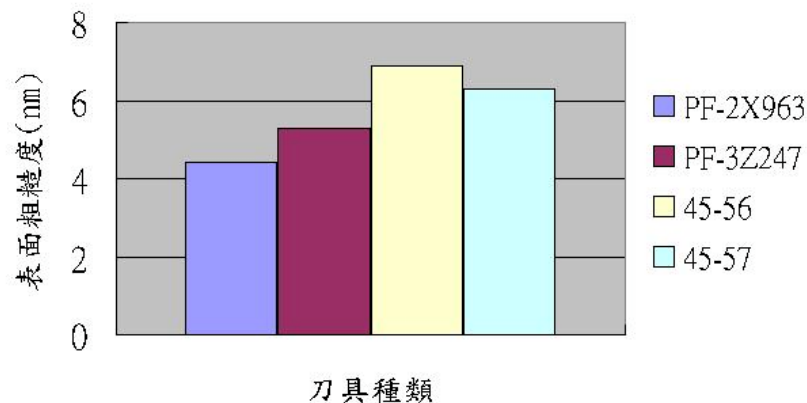


圖 4-12 使用不同的後斜角及前隙角的刀具，鉋削平面後的表面粗糙度的變化

4.2.1.2 非球面微透鏡鉋削製程實驗參數

1) 加工機設備及鉋削透鏡的加工條件

進行鉋削非球面微透鏡所用的加工機為日本東芝機械股份有限公司所生產的超精密加工機(ULG-100C(H³))，刀具路徑程式從個人電腦中計算完成後，用 RS-232C 傳輸系統將路徑點群資料採線上傳輸模式(DNC mode)傳送至加工機的控制器上。由先前鉋削實驗中發現 Y 軸的表面粗糙度偏高，如圖 3-24 和圖 3-25 所示。為降低透鏡鉋削後 Y 軸表面的粗糙度，而影響到透鏡的光學品質，所以將超精密加工機 Y 軸的進給量 (ΔY) 的間距由 10 微米改成 5 微米，此論文的鉋削透鏡的加工條件如表 4-2 所示。

表 4-2 鉋削微透鏡實驗的加工條件

實驗次數 實驗參數	第一次 鉋削實驗	第二次 鉋削實驗	第三次 鉋削實驗	第四次 鉋削實驗	第五次 鉋削實驗	第六次 鉋削實驗	第七次 鉋削實驗
刀具編號	PF-2X963	PF-3Z247	45-56	45-57	45-57	PF-2X963	45-56
刀刃 R 值	96.74um	95.28um	105.09um	95.26um	95.26um	96.74um	105.09um
後斜角(α)	0 度	0 度	-9.3 度	10 度	10 度	0 度	-9.3 度
前隙角(β)	20 度	10 度	20 度	20 度	20 度	20 度	20 度
非球面係數	R=3 K=-5	R=3 K=-5	R=3 K=-5	R=3 K=-5	R=1.5 K=-2.1	R=1.5 K=-2.1	R=1.5 K=-2.1
透鏡最大斜率	9 度	9 度	9 度	9 度	19 度	19 度	19 度
X 軸移動速度	10mm 分						
X 軸增量值	10um/次						
Y 軸增量值	5um/次						
鉋削深度	3um/次						
透鏡直徑	1mm(凹面)						
冷卻方式	加壓空氣						
被加工材料	PMMA(日本三菱化學公司生產，日本商標 432064 號)						

2) 單晶鑽石刀具幾何形狀設計

鉋削微透鏡所使用的刀具是日本大阪鑽石公司(Osaka Diamond)所製作的單晶鑽石，刀刃圓弧 R 值約 100 微米。鉋削微透鏡所使用刀刃圓弧 R 值尺寸及輪廓形狀精度，將會影響微透鏡鉋削後的加工品

質，如刀刃圓弧 R 值超過透鏡的最小曲率 R 值，則在鉋削凹面微透鏡陣列將時會產生刀具干涉現象，但如刀刃圓弧 R 值過小，則鉋削透鏡時間則會增加，且透鏡表面粗糙度亦不佳。刀刃圓弧 R 值的輪廓形狀精度，則會轉寫在微透鏡的曲面形狀精度。此篇論文在進行微透鏡鉋削實驗時，皆使用近似刀刃 R 值的單晶鑽石刀具，而僅改變刀具的前隙角和後斜角，以找出不同的鉋削角度對透鏡表面粗糙度的影響，刀具的切削角度的變化如表 4-1 所示。圖 4-13 是進行鉋削實驗時所使用的單晶鑽石刀具外觀圖，圖 4-14 是日本大阪鑽石公司在單晶鑽石刀具(刀具編號 PF-2X963 及 PF-3Z247)製作完成時，所進行的刀具形狀精度檢驗報告表，由此檢驗報告表中可知道刀具的刀刃形狀精度、刀刃輪廓的角度、刀刃切削 R 值大小和刀刃的前隙角和後斜角的角度，而刀具編號 45-56 及 45-57 為節省刀具製作成本，所以沒有要求刀具製作商控制刀刃 R 值的形狀精度，因此沒有刀具檢驗報告表。



圖 4-13 進行微透鏡鉋削實驗時所使用的刀具外觀圖

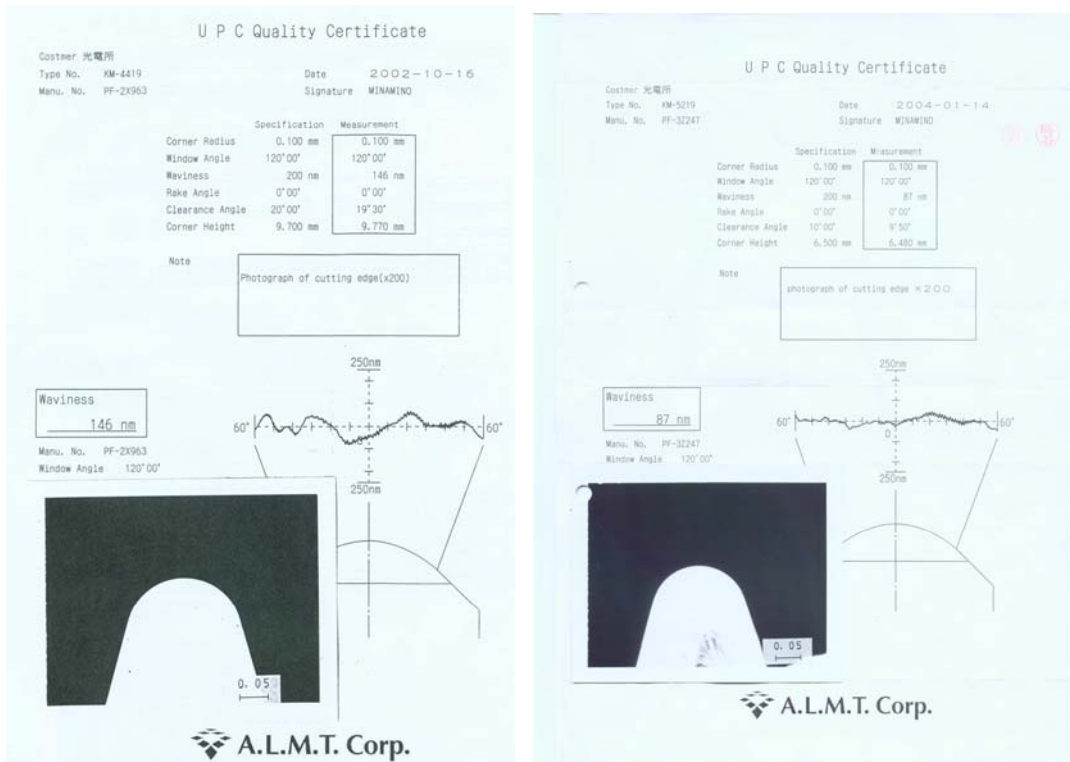


圖 4-14 刀具編號 PF-2X963 及 PF-3Z2347 的精度檢驗表

4.2.1.3 計算透鏡與刀具的鉋削接觸角度

為確實知道刀具的後斜角(α)及前隙角(β)與微透鏡的各部位切削接觸角度的變化，刀具與透鏡的切削接觸角示意圖，如圖 4-15 所示。利用 C++ 程式軟體計算出鉋削透鏡時，刀具與透鏡切削角度變化量，計算軟體主畫面如圖 4-16。使用此軟體將可計算透鏡的 X 軸方向每一個位置與刀具的後斜角 (α)及前隙角(β)間切削接觸角度，計算結果如圖附錄圖 A1 至 A14 所示。 α' ：代表鉋削微透鏡時與刀具法線向量的夾角， β' ：代表鉋削微透鏡時與刀具切線的夾角。

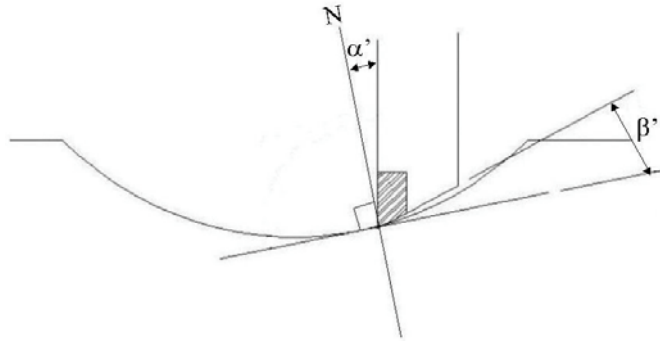


圖 4-15 刀具與透鏡的鉋削接觸角示意圖



圖 4-16 計算鉋削透鏡時，刀具與透鏡切削接觸角度變化軟體主畫面

4.3 鉋削非球面透鏡實驗的結果

在非球面微透鏡鉋削完成之後，使用英國 Taylor Hobson 公司生產的 Form Talysurf (S5) 表面形狀精度與粗糙度量測儀，進行微透鏡表面形狀精度及粗糙度的量測，使用探針的測頭 R 值為 2μm，測頭材質是鑽石。表 4-3 是量測各鉋削微透鏡實驗完成的微透鏡形狀精度的比較表，量測報告如附錄圖 B1-B56 所示。從附錄圖 B1-B56 亦可發

現，超精密自由曲面加工機的精度，仍受加工室溫度變化的影響，呈現出高低起伏的精度變化曲線，但起曲線的高低伏現象已經比加工機未加隔離罩時減緩許多，如圖 3-21 所示。

表 4-3 使用不同的加工條件鉋削完成的微透鏡形狀精度比較表

透鏡形狀精度 鉋削實驗編號	X 軸 (μm)	Y 軸 (μm)
鉋削微透鏡實驗一	0.2405	0.3183
鉋削微透鏡實驗二	0.2153	0.2665
鉋削微透鏡實驗三	0.2583	0.4357
鉋削微透鏡實驗四	0.1816	0.2536
鉋削微透鏡實驗五	0.2836	0.4202
鉋削微透鏡實驗六	0.2636	0.3863
鉋削微透鏡實驗七	0.4961	0.5514

因表面形狀精度與粗糙度量測儀在分析粗糙度時，分析的長度至少要 0.16mm，所以在量測非球面微透鏡 X 軸方向的表面粗糙度時，區分成 A、B、C、D 四區域，如圖 4-17 所示，以提高透鏡 X 軸方向粗糙度分析的解析度。而透鏡 Y 軸方向的表面粗糙度因較不受刀刀鉋削角度的影響，所以用透鏡的中心為區分，量測透鏡 Y 軸方向前半部及後半部的二個區域。透鏡 X 軸方向粗度的變化比較表，如表 4-4 所示，透鏡 Y 軸粗度的變化比較表，如表 4-5 所示。

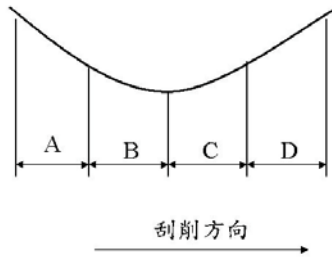


圖 4-17 微透鏡的 X 軸方向量測表面粗糙度的區分圖

表 4-4 透鏡 X 軸方向粗糙度的變化比較表

X 軸透鏡粗糙度 鉋削實驗編號	A 區域 (nm)	B 區域 (nm)	C 區域 (nm)	D 區域 (nm)
鉋削微透鏡實驗一	17.9	16.0	23.1	23.1
鉋削微透鏡實驗二	16.9	15.2	16.8	19.4
鉋削微透鏡實驗三	13.6	8.8	15.2	15.4
鉋削微透鏡實驗四	11.8	8.9	15.3	14.8
鉋削微透鏡實驗五	20.0	10.0	29.3	24.2
鉋削微透鏡實驗六	24.9	16.6	26.5	23.5
鉋削微透鏡實驗七	22.8	11.3	34.9	46.0

表 4-5 透鏡 Y 軸方向粗糙度的變化比較表

Y 軸透鏡粗糙度 鉋削實驗編號	前半部 (nm)	後半部 (nm)
鉋削微透鏡實驗一	16.4	16.4
鉋削微透鏡實驗二	17.7	17.
鉋削微透鏡實驗三	25.4	31.9
鉋削微透鏡實驗四	22.2	18.4
鉋削微透鏡實驗五	21.9	27.0
鉋削微透鏡實驗六	23.4	23.5
鉋削微透鏡實驗七	29.9	37.7

若以散佈圖來表示各實驗鉋削完成的透鏡形狀精度及粗度的變化，則

如圖 4-18 至 4-20 所示。

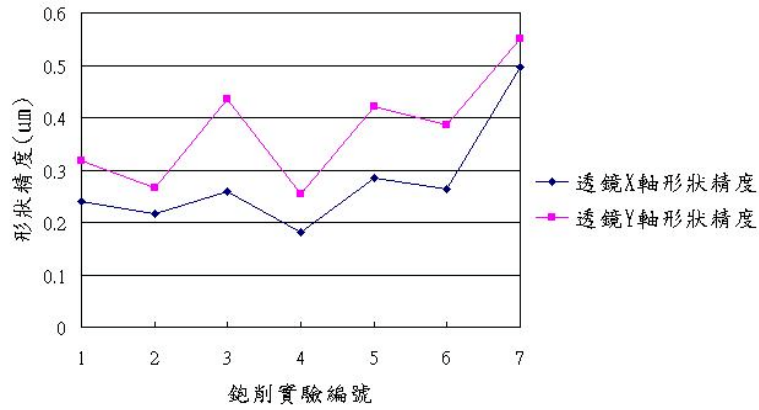


圖 4-18 各鉋削實驗的透鏡 X 軸及 Y 軸方向形狀精度比較圖

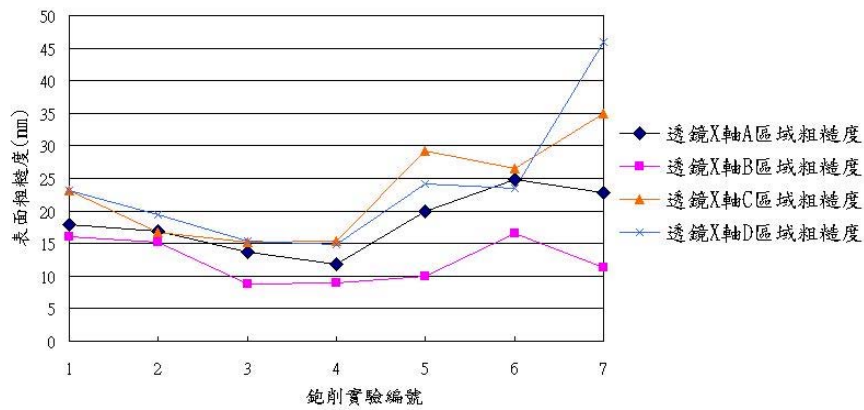


圖 4-19 各鉋削實驗的透鏡 X 軸方向表面粗糙度變化比較圖

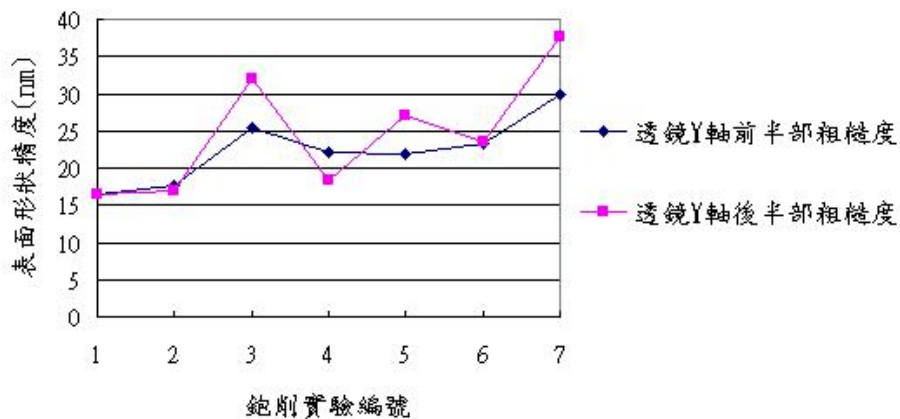


圖 4-20 各鉋削實驗的透鏡 Y 軸方向表面粗糙度變化比較圖

用光學顯微鏡觀察各實驗鉋削完成的微透鏡，可以發現使用各鉋削實驗參數鉋削而成的微透鏡真圓度相當佳，亦沒有發現透鏡有

發生干涉的現象發生，鉋削實驗一至七的光學顯微鏡拍攝圖，如圖 4-21 至 4-27 所示，透鏡上每一小格的刻度是 28.6 μm ，由光學顯微鏡上亦可得知每一個透鏡的直徑皆相當接近 1mm。

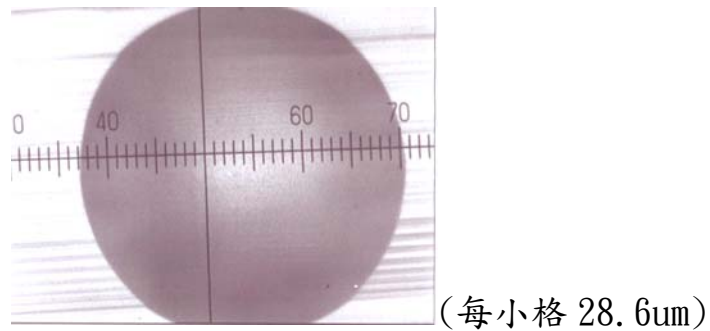


圖 4-21 以光學顯微鏡拍攝鉋削實驗一的微透鏡成品圖

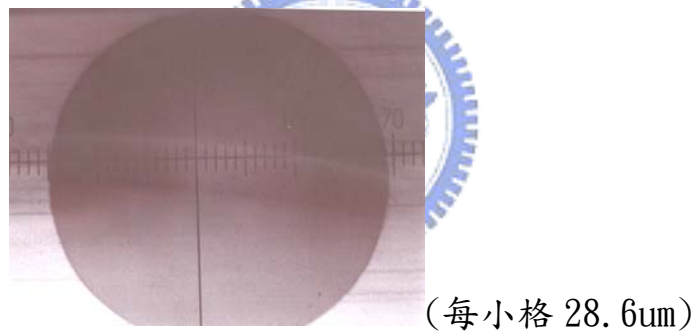


圖 4-22 以光學顯微鏡拍攝鉋削實驗二的微透鏡成品圖

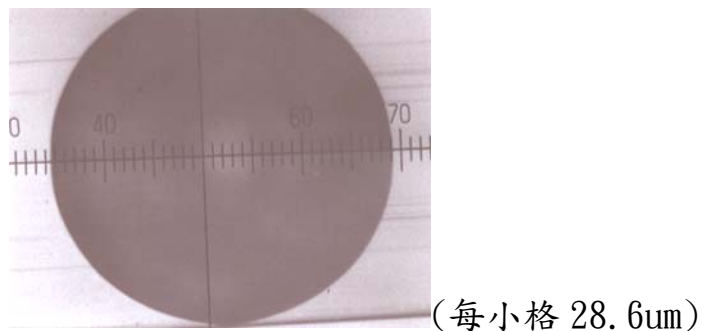
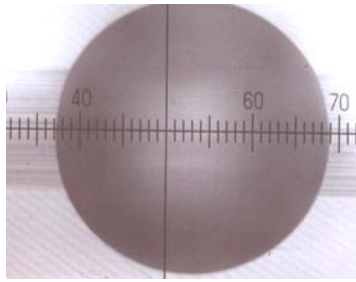
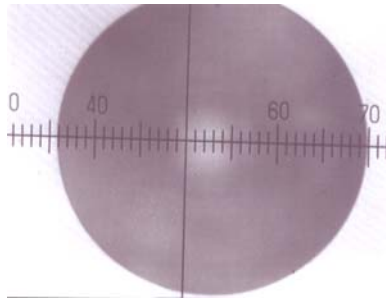


圖 4-23 以光學顯微鏡拍攝鉋削實驗三的微透鏡成品圖



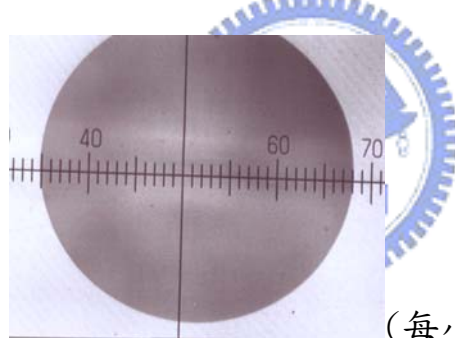
(每小格 28.6um)

圖 4-24 以光學顯微鏡拍攝鉋削實驗四的微透鏡成品圖



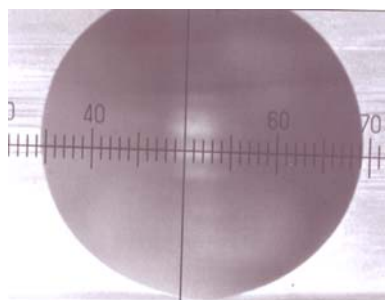
(每小格 28.6um)

圖 4-25 以光學顯微鏡拍攝鉋削實驗五的微透鏡成品圖



(每小格 28.6um)

圖 4-26 以光學顯微鏡拍攝鉋削實驗六的微透鏡成品圖



(每小格 28.6um)

圖 4-27 以光學顯微鏡拍攝鉋削實驗七的微透鏡成品圖

單晶鑽石可研磨成相當銳利的切削角，且相當耐磨耗，因此可以直接將透鏡切削成鏡面。但為排除因單晶鑽石刀具在使用中產生

崩角或磨耗，影響到的鉋削實驗的可靠性，所以在進行鉋削微透鏡實驗的前後，皆使用光學顯微鏡觀察每一支單晶鑽石刀具的狀況，以確保實驗結果的可信度，刀具使用狀況檢查圖，如圖 4-28 及圖 4-29 所示。鉋削實驗完成之後，利用光學顯微鏡觀察刀具之表面狀況，發現所有實驗刀具的表面皆沒有產生磨耗的現象。

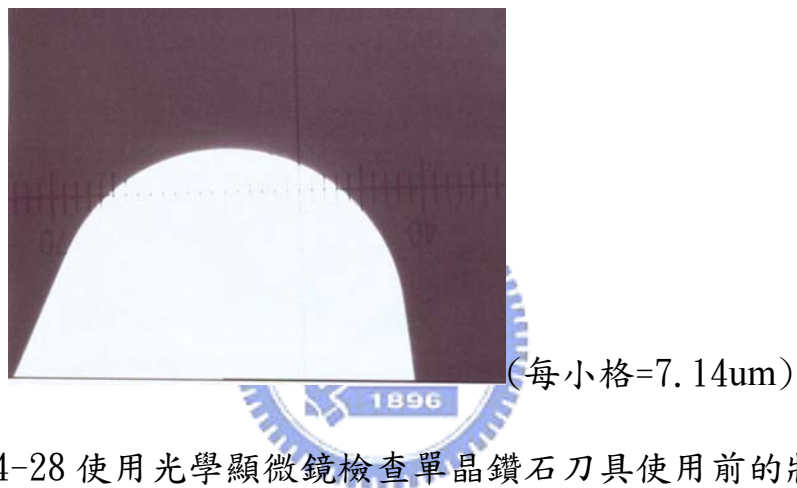


圖 4-28 使用光學顯微鏡檢查單晶鑽石刀具使用前的狀況

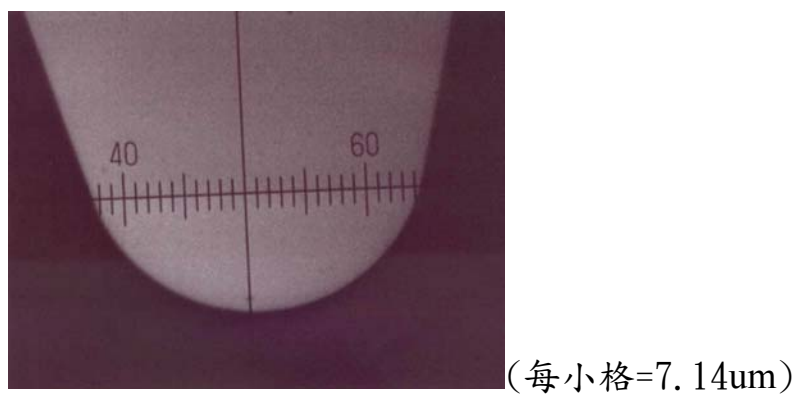


圖 4-29 使用光學顯微鏡檢查單晶鑽石刀具使用後的狀況

4.4 鉋削非球面微透鏡的實驗結果討論

從此篇論文中的各鉋削非球面微透鏡實驗，發現鉋削實驗四的非球面微透鏡曲面形狀精度最佳，鉋削實驗七的非球面微透鏡曲面形狀精度最差；鉋削實驗三與四的非球面微透鏡 X 軸方向表面粗糙度最佳，鉋削實驗七的表面粗糙度最差；鉋削實驗一的非球面微透鏡 Y 軸方向表面粗糙度最佳，鉋削實驗七的表面粗糙度最差。

由上述的實驗結果得知，影響非球面微透鏡 X 軸方向形狀精度的最主要因素是刀具的後斜角(α)，當刀具的後斜角(α)在 0 度至 10 度的範圍時，可獲得較佳的透鏡 X 軸方向形狀精度；而刀具的後斜角在 -9 度時，透鏡 X 軸方向的形狀精度最差，尤其當透鏡的切線角度越大時，負的刀具傾斜角對透鏡 X 軸方向精度的影響越大，所以在鉋削微透鏡時，最好能夠選用零度或正傾斜角的刀具。而為了能夠鉋削較大的透鏡切線角度，最好能夠選用較大的刀具前隙角。

在所有的鉋削微透鏡實驗中發現透鏡 X 方向的 B 區域是所有區域中粗糙度較佳的，A 區域次之，而以 D 區域最差。所以在鉋削透鏡時，刀具切削角與透鏡的法線向量(α')最好控制在 80.7 度至 110.4 度，切線向量(β')最好控制在 9.8 度至 20 度之間，如此一來，將可獲得鉋削完成後透鏡表面粗糙度(R_a) $<10\text{nm}$ 。而不要使用刀具切削角與透鏡的法線向量(α')是在 61.8 度至 70.5 度，切線向量(β')是在 30.1 度至

38.8 度之間，因為此角度將會造成鉋削完成後透鏡表面粗糙度 (Ra)>40nm 以上，造成非球面微透鏡的光學品質不佳。

根據鉋削平面時發現，刀具與透鏡的法線向量(α')90 度，刀具與透鏡的切線向量(β')在 20 度時最佳，所以在鉋削透鏡陣列時，為了得到最佳的透鏡 X 軸方向的表面粗糙度，可以在超精密加工機上加裝一個能夠使刀具隨著透鏡切線角度變化的旋轉平台(B 軸)，讓在鉋削非球面微透鏡陣列時，可以使刀具與透鏡的鉋削角度固定在最佳的角度，讓鉋削完成的非球面微透鏡陣列 X 軸方向表面粗糙度能夠趨於一致，而提高透鏡的光學品質。

此次鉋削實驗中亦發現，鉋削實驗一的透鏡 Y 軸方向表面粗糙度最佳，其原因是鉋削實驗一的透鏡最大切線角度僅約 9 度，且使用刀具的後斜角(α)是 0 度。但當刀具的後斜角(α)所使用的角度是負傾斜角時，透鏡 Y 軸的表面粗糙度將快速劣化，所以在鉋削透鏡時，刀具的傾斜角最好使用零度或正傾斜角的切削角度。而刀具前隙角(β)的變化，則對 Y 軸表面粗糙度影響不大。

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

目前光纖網路中大多使用陣列式光芯，使得在同一條光纖網路線上能夠傳輸更多的資訊，以符合使用者對高頻寬網路的需求。一條光纖上使用越多的光芯，就代表著光纖耦合器上的微透鏡數量要隨之增加，為了減少耦合器上的微透鏡陣列，因透鏡本身的形狀精度及粗糙度等因素，造成光纖訊號波形的不完整，影響到訊號的清晰度，或者造成聚焦點的位置誤差，而導致光纖訊號強度的衰減，使得光纖訊號傳輸品質不佳。本篇論文以超精密加工機，分別使用不同後斜角(α)和前隙角(β)的單結晶鑽石刀具，以鉋削的方式來製作曲率半徑小於500微米的非球面透鏡，探討了刀具角度對非球面透鏡品質的影響，得到的結論歸納如下。

1. 影響非球面微透鏡陣列形狀精度的最主要因素是單結晶鑽石刀具的後斜角(α)的角度大小，而影響透鏡表面粗糙度的最主要原因是透鏡與刀具的切線角度大小。
2. 當單結晶鑽石刀具的後斜角在0度與10度的範圍時，透鏡X軸方向的形狀精度(R_t)將可小於0.286 μm ，而單結晶鑽石刀具的後斜角(α)是負角度時，透鏡的形狀精度將會較刀具的後斜角(α)是正角度時劣化。

3.單結晶鑽石刀具切削角與透鏡的法線向量在 80.7 度至 110.4 度，切線向量在 9.8 度至 20 度之間時，將可使鉋削完成之非球面微透鏡陣列的表面獲得粗糙度(Ra)<10nm 的滿意結果。

以鉋削加工方式來製作微透鏡陣列有以下的優點：

1. 可以加工出非球面的曲面形狀，以減少像散，提高光學性能。
2. 可獲得透鏡與透鏡間高的相對位置精度，提高光纖的訊號傳輸效率。
3. 可得到高曲面形狀精度及低表面粗糙度，降低光訊號強度的損失。
4. 可直接製作透鏡陣列，用以驗證系統的光學特性，亦可製作成塑膠射出模仁，以便於快速生產非球面透鏡陣列，降低透鏡陣列的製作成本。
5. 使用機械加工製程方法，對環境污染的影響比 LIGA 製程低。



另外，以鉋削加工方式來製作微透鏡陣列的缺點則為：

1. 微透鏡的直徑受限於單結晶鑽石刀具的刀刃 R 值尺寸，目前僅能鉋削 100 微米以上的非球面微透鏡陣列。
2. 透鏡陣列數量若過多，則加工時間將會隨之增加，此時加工機的

周圍溫度變化若過大，將會影響到透鏡的形狀精度。

3. 可鉋削的透鏡最大斜率，受限於刀具的前隙角度。

4. 鉋削完成的非球面透鏡的 X 軸方向表面粗糙度不一致，尤其當透鏡與刀具切削點的切線角度越大時，透鏡表面的粗糙度將會越差。

5.2 未來展望

為了克服以鉋削加工製作微透鏡陣列的缺點，未來的做法將朝向改善超精密加工機的周圍環境溫度的變化，和在現有的超精密加工機上的加裝一個刀具旋轉軸(B 軸)，使刀具在鉋削非球面微透鏡陣列時，能夠讓刀具與透鏡的切線角度，固定在最佳的鉋削角度，使鉋削完成的非球面微透鏡陣列的形狀精度及粗糙度能夠趨於一致，不再隨著切削角度的變化而影響透鏡的光學品質。具體的做法是：

1. 將超精密加工機周圍的溫度控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下，此舉可有效改善因溫度變化而造成鉋削完成的非球面微透鏡陣列的形狀精度誤差。但以目前的空調技術，要在整個加工室內將溫度的變化控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以內，並不容易達到且不符合經濟效益，所以將依據超精密加工機的外觀尺寸，在加工室內再獨立安裝一個恆溫室，使超精密加工機周

圍的溫度得以控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 之內，以減少因加工室溫度的變化，造成加工精度的劣化。

2. 在現有的 4 軸(X、Y、Z、C 軸)控制的超精密加工機，在刀具軸(Y 軸)上安裝一個可隨刀具與透鏡的切線角度旋轉的軸向(B 軸)，並設計出一套可同時控制五軸(X、Y、Z、B、C 軸)的刀具路徑軟體，使刀具在鉋削非球面微透鏡陣列時，能得到最佳的鉋削角度，並擺脫目前在鉋削非球面微透鏡陣列時，透鏡的最大斜率受限於單晶鑽石刀具的所能夠製作的前隙角度限制。

