

私立輔仁大學物理學系碩士班

論文口試委員會審定書

李 策先生之論文

利用全像透鏡的多平面成像顯微鏡
Multiple-image-plane microscopy
with holographic lens

經本委員會議合格，特此證明。

論文口試委員

職稱	姓名	
助理教授	陳慧琪	<u>陳慧琪</u>
教授	鄭益祥	<u>鄭益祥</u>
教授	鄭超仁	<u>鄭超仁</u>
	系主任	

中華民國 104 年 07 月 28 日

中文摘要

本論文將電腦全像術與一般光學顯微鏡結合，製作出可同時觀察不同深度的三維影像系統。

論文中我們先以三種方法編寫合成同時具有多種不同焦距的多焦電腦全像透鏡，再將編寫好的電腦全像透鏡輸入液晶空間光學調制器，並利用光學系統驗證所編寫的多焦全像透鏡聚焦情況。光學實驗結果顯示以直接相加法合成多焦電腦全像透鏡有較好的聚焦品質。另外，系統中我們利用旋轉的毛玻璃消去雷射光斑並比較不同轉速下的影像成像品質，並找出較佳的旋轉速度。最後將電腦全像透鏡與顯微系統結合，實現三維多平面成像顯微系統。由於限於現有 CCD 像素數目，我們設計可以同時六個深度面成像的多焦電腦全像透鏡，同時觀測樣品內的六個切面上的影像。

Abstract

In this thesis, we combined the computer generated holography and optical microscopy to setup the 3D image detection for 3D sample object.

Firstly, we discuss how to image the different object plane in the same plane by holographic lens. Then, we applied three methods to compose a holographic lens with multiple focuses and carried out by optical experiment. Moreover, we used the rotating diffuser to decrease the laser speckle. The image performances by different rotation speed were shown. Finally, the 3D image detection was implemented by multiple-focuses holographic lens. Because the limitation of the CCD pixels number, we image the six planes in the different depth within the sample on CCD.

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	ix
第一章 導論.....	1
第二章 多平面成像原理及簡介.....	2
2.1 利用液晶式空間光學調制器之多平面成像原理.....	2
2.2 利用液晶顯示器製作多焦電腦全像透鏡.....	5
2.2.1 相位直接相加法.....	6
2.2.2 像素法.....	7
2.2.3 大區域分區法.....	7
第三章 液晶式空間光波調制器原理與相位特性量測.....	9
3.1 液晶式空間光學調制器工作原理.....	10
3.1.1 TN-LCD 工作原理.....	11
3.1.2 ECB-LCD 工作原理.....	13
3.2 實驗儀器介紹.....	14

3.3LC-SLM 相位特性量測.....	17
3.3.1 LC2002 相位特性量測.....	17
3.3.2 PLUTO 相位特性量測.....	19
第四章 使用穿透式液晶顯示器製作多焦電腦全像透鏡之實驗.....	21
4.1 三種多焦電腦全像透鏡製作方法聚焦效果之比較.....	21
4.2 實驗系統架設.....	43
4.3 毛玻璃轉速對影像品質之影響.....	44
4.4 改變單焦電腦全像透鏡焦距觀測樣品 不同深度平面之實驗結果.....	45
第五章 使用反射式液晶顯示器的多平面影像實驗.....	47
5.1 實驗系統架設.....	47
5.2 使用反射式液晶顯示器的多平面影像實驗結果.....	48
5.2.1 使用 10X 物鏡即反射式液晶顯示器的 多平面影像實驗結果.....	48
5.2.2 使用 60X 物鏡即反射式液晶顯示器的 多平面影像實驗.....	50
第六章 結論.....	52
參考文獻.....	53

圖目錄

圖 2.1 利用反射式液晶顯示器的多平面成像系統.....	2
圖 2.2 單一透鏡成像示意圖.....	3
圖 2.3 雙透鏡成像示意圖.....	3
圖 2.4 多焦電腦全像透鏡相位直接相加法(以四透鏡為例)示意圖...7	
圖 2.5 多焦電腦全像透鏡像素法(以六透鏡為例)示意圖.....	7
圖 2.6 多焦電腦全像透鏡大區域分區法(以六透鏡為例)示意圖.....	8
圖 3.1 液晶盒結構示意圖.....	11
圖 3.2 TN-LCD 液晶分子扭轉示意圖.....	12
圖 3.3 LC-2002 實物圖.....	15
圖 3.4 PLUTO 實物圖.....	16
圖 3.5 以 Mach-Zehnder 干涉儀量測 LC-2002 「相位-灰階」曲線架構圖.....	17
圖 3.6 偏振片角度為+150 度和檢偏片角度為 0 度時 LC-2002 的相位調制曲線.....	18
圖 3.7 量測 PLUTO 「相位-灰階」曲線架構圖.....	19
圖 3.8 PLUTO 的相位調制曲線.....	20

圖 4.1 二離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)	
及聚焦點相對位置示意圖(b).....	22
圖 4.2 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	24
圖 4.3 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	24
圖 4.4 四離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)	
及聚焦點相對位置示意圖(b).....	25
圖 4.5 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	26
圖 4.6 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	26
圖 4.7 P3 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	27
圖 4.8 P4 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	27
圖 4.9 六離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)及	
聚焦點相對位置示意圖(b).....	29
圖 4.10 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	31
圖 4.11 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	32
圖 4.12 P3 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	32
圖 4.13 P4 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	33
圖 4.14 P5 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	33
圖 4.15 P6 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	34

圖 4.16 八離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)	
及聚焦點相對位置示意圖(b).....	35
圖 4.17 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	37
圖 4.18 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	37
圖 4.19 P3 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	38
圖 4.20 P4 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	38
圖 4.21 P5 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	39
圖 4.22 P6 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	39
圖 4.23 P7 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	40
圖 4.24 P8 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈.....	40
圖 4.25 十二離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)	
及聚焦點相對位置示意圖(b).....	41
圖 4.26 LC2002 實驗系統架設圖.....	44
圖 5.1 PLUTO 實驗系統架設.....	48
圖 5.2 10X 物鏡下兩離軸全像透鏡的兩平面成像實驗結果.....	49
圖 5.3 10X 物鏡下四離軸全像透鏡的四平面成像實驗結果.....	49
圖 5.4 一般光學顯微鏡下 $5\mu m$ PS 球沉積後的影像.....	50
圖 5.5 60X 物鏡下兩離軸全像透鏡的兩平面成像實驗結果.....	51

圖 5.7 60X 物鏡下六離軸全像透鏡的六平面成像實驗結果.....51

圖 5.6 60X 物鏡下四離軸全像透鏡的四平面成像實驗結果.....51

表目錄

表 3.1 LC-2002 規格資料.....	14
表 3.2 PLUTO 規格資料.....	15
表 4.1 二離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像....	23
表 4.2 四離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像....	25
表 4.3 六離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像.....	30
表 4.4 八離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像....	35
表 4.5 十二離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像..	41
表 4.6 不同轉速之毛玻璃對消去影像雷射光斑實驗結果.....	45
表 4.7 使用 LC2002 實驗系統測試電腦腦全像透鏡 景深改變實驗果.....	46

第一章 導論

1966 年由 B.R.Brown 及 A.W.Lohmann 所提出的軌跡相位法 (Detour Phase)[1]為電腦全像術的起源。電腦全像術並非架設光學系統來記錄資訊，而是用電腦計算模擬全像片上的資訊分佈後，再利用繞射光學元件來記錄及重建。由於現代繞射光學元件的技術越來越成熟，電腦全像術開始被應用到像是光資訊處理[2]、數位投影[3]、影像辨識[2]、光子晶體[2]以及全像光鉗[4,5,6]等等各種領域之中。本論文將電腦全像術與一般光學顯微鏡結合[7]，製作出可同時觀察樣品不同深度的影像系統。

本論文中我們首先編寫同時具有多種不同焦距與焦點位置的電腦全像透鏡，並將其輸入液晶空間光學調制器，再利用光學系統驗證聚焦情況。之後與顯微鏡系統結合，以同時觀察樣品多個切面。

第二章我們先討論利用液晶式顯示器改變景深的多平面成像原理，以及利用不同方式編寫多焦電腦全像透鏡。論文實驗進行中，由於反射式液晶顯示器故障，等待維修時，我們先以穿透式液晶顯示器進行實驗。因此第三章分別介紹實驗中所用到的兩台液晶顯示器，並量測其「相位-灰階」的曲線。第四章是使用穿透式液晶顯示器的多焦全像透鏡聚焦情況的實驗結果。第五章則是使用多焦電腦全像透鏡的多景深實驗結果，最後第六章為結論。

第二章

多平面成像原理及簡介

2.1 利用液晶式空間光學調制器之多平面成像原理

圖 2.1 為利用利用反射式液晶顯示器的多平面成像系統圖，使用物鏡 Obj.2 以及 SLM 組成一個雙透鏡系統以觀察樣品在不同深度之影像。下面我們將從單一薄透鏡的影像系統開始推導，計算當全像透鏡的焦距改變時，可以成像的樣品位置景深變化。接著討論如何將多個電腦全像透鏡合成為一個可同時多焦的電腦全像片。

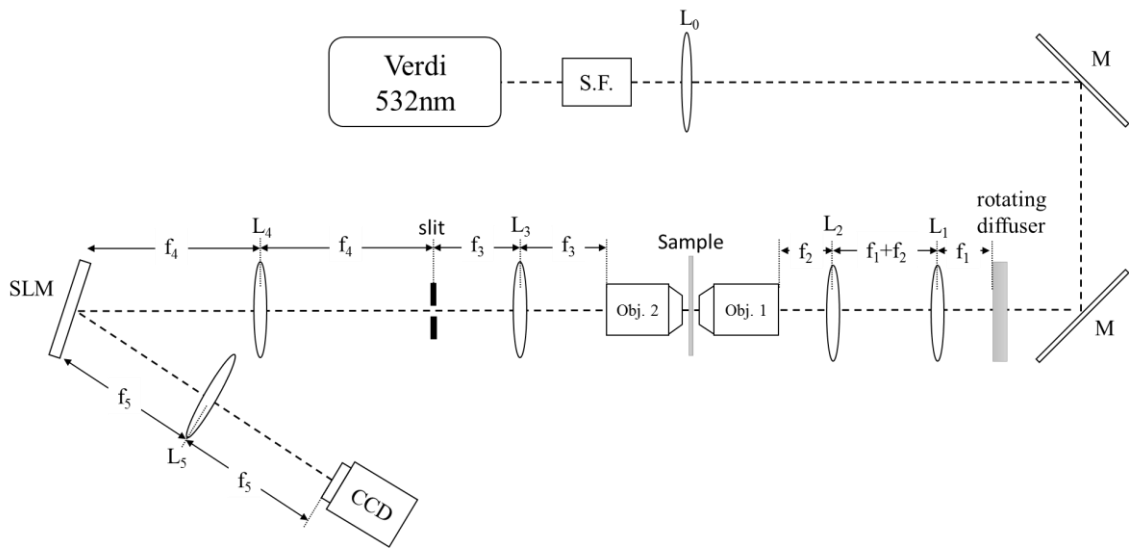


圖 2.1 利用反射式液晶顯示器的多平面成像系統

單一薄透鏡的影像系統如圖 2.2 所示， p 、 q 、 f_1 分別為物距、像距以及透鏡焦距。則由透鏡的物像公式可以得到三者的關係為

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_1}, \quad (2-1)$$

且此系統的放大率

$$m = -\frac{q}{p} = -\frac{q-f_1}{f_1} \quad (2-2)$$

在透鏡與 CCD 中間放入由液晶顯示器產生的透鏡(如圖 2.3)變成一組雙透鏡組。此雙透鏡組的有效焦距 F_c 為

$$F_c = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d} \quad (2-3)$$

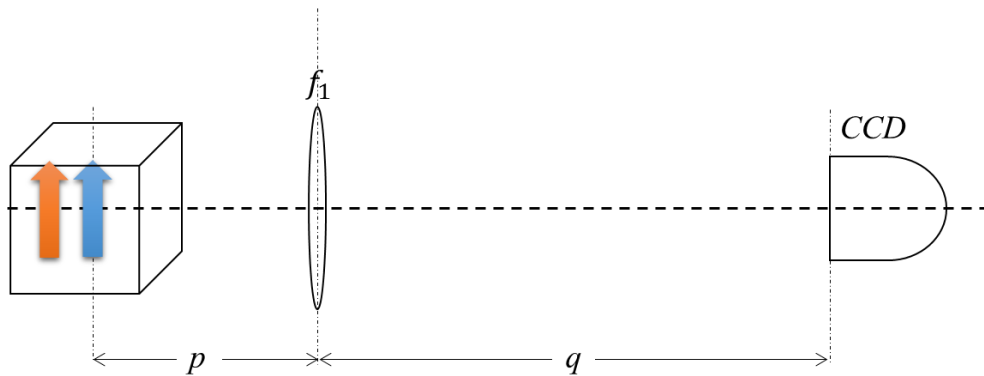


圖 2.2 單一透鏡成像示意圖

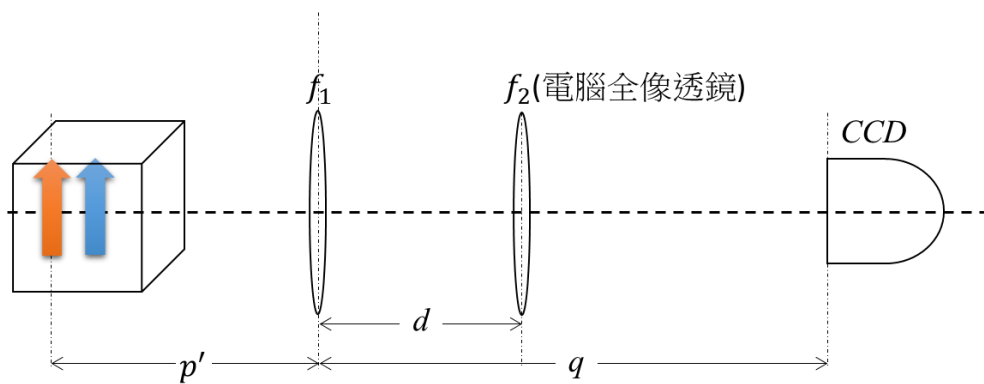


圖 2.3 雙透鏡成像示意圖

而此透鏡組的第一主平面和第二主平面對於透鏡一的距離分別為

$$P_1 = \frac{d f_1}{f_1 + f_2 - d}, \quad (2-4)$$

$$P_2 = \frac{d(f_1 - d)}{f_1 + f_2 - d} \quad (2-5)$$

由於這時候為一透鏡組而非單一薄透鏡，所以將(2-1)的式子修改為

$$\frac{1}{F_c} = \frac{1}{p'+P_1} + \frac{1}{q-P_2}, \quad (2-6)$$

而系統放大率則為

$$m = -\frac{q-P_2}{p'+P_1}。 \quad (2-7)$$

將 F_c 及 P_2 代入(2-7)式中，可以得到

$$m = -\frac{(f_1-d)(q-d)}{f_1 f_2} - \frac{q-f_1}{f_1}。 \quad (2-8)$$

將 $d=f_1$ 分別代入(2-3),(2-4),及(2-5)三式中，可以得到

$$F_c = f_1, \quad (2-9)$$

$$P_1 = \frac{f_1^2}{f_2}, \quad (2-10)$$

$$P_2 = 0。 \quad (2-11)$$

再代入(2-6)式以及(2-8)式之中，分別得到新的物距位置

$$p' = \frac{qf_1}{q-f_1} - \frac{f_1^2}{f_2}, \quad (2-12)$$

以及系統放大率為

$$m = -\frac{q-f_1}{f_1}, \quad (2-13)$$

此結果與單透鏡放大倍率(2-2)式相同。

也就說在不改變透鏡一的焦距及 CCD 的位置，只改變電腦全像透鏡焦距的情況下，可以得到不同物距(p')但放大倍率相同的影像，物距與透鏡焦距的關係式如下[7][8]

$$p - p' = -\frac{f_1^2}{f_2}, \quad (2-14)$$

之後在製作電腦全像透鏡時，以此式子計算不同影像深度所需的透鏡焦距。

2.2 利用液晶顯示器製作多焦電腦全像透鏡

本論文中先利用透鏡公式

$$L(x, y) = e^{i\phi}, \quad (2-16)$$

$$\phi(x, y) = \frac{\pi r^2}{\lambda f}, \quad (2-17)$$

來編寫單一焦距的電腦全像透鏡，其中 ϕ 為透鏡像為， λ 為光波波長， f 為透鏡焦距， r 則為透鏡的半徑。我們的液晶顯示器為純相位式，所以實際上在製作時是把相位 ϕ 取出後製作。

之後再利用(2-18)式設計全相透鏡離軸距離和影像離軸位置的相互關係

$$\Delta\vec{r} = \left(\frac{1}{g_x} \vec{e}_x + \frac{1}{g_y} \vec{e}_y \right) \times f \times \lambda, \quad (2-18)$$

式中 $\Delta\vec{r}$ 為影像在 CCD 中移動的位置， g_x 及 g_y 為透鏡離軸的距離，而 \vec{e}_x 以及 \vec{e}_y 為 x 方向和 y 方向的單位向量。

由於液晶顯示器的像素並非連續而是一個一個的像素，其像素大小限制液晶顯示器對透鏡最小焦距的分辨率，所以考慮最大的相位梯度變化需小於液晶顯示器對於相位變化的分辨率

$$\nabla \left(\frac{\pi r^2}{\lambda f_{min}} \right) < \frac{2\pi}{2p}, \quad (2-19)$$

其中 p 為液鏡顯示器的像素大小。將式(2-19)展開後得到

$$\frac{2\pi r}{\lambda f_{min}} < \frac{\pi}{p}, \quad (2-20)$$

再將式(2-20)整理後得到

$$f_{min} > \frac{2rp}{\lambda}, \quad (2-21)$$

由於是將電腦全像透鏡放入液晶顯示器上，所以透鏡半徑(r)會等於液晶顯示器短軸的一半。而所製作的電腦全像透鏡焦距須大於 (2-21) 式所計算出的 f_{min} 。在波長 532nm 下，若是以像素大小為 $32 \mu\text{m}$ 尺寸的 LC2002 產生全像透鏡，則最小焦距為 1.2m；若是以像素大小為 $8 \mu\text{m}$ 尺寸的 Pluto 產生全像透鏡，則最小焦距為 0.12 m；

接著使用三種不同的方法編寫多焦電腦全像透鏡，分別是相位直接相加法、像素法以及大區域分區法。

2.2.1 相位直接相加法

我們先分別設計多個電腦全像透鏡，將透鏡的相位依照下式疊加：

$$\begin{aligned} \phi(n_x, n_y) = & \phi_1(n_x, n_y) + \phi_2(n_x, n_y) + \phi_3(n_x, n_y) + \phi_4(n_x, n_y) + \\ & \phi_5(n_x, n_y) + \phi_6(n_x, n_y) + \dots = \sum \phi_i(n_x, n_y). \end{aligned} \quad (2-16)$$

式中， n_x 及 n_y 為像素矩陣位置，圖 2.4 為以四透鏡疊加的示意圖。之後再利用所量測的液晶「相位-灰階」曲線，將相位分佈以分階量化 (Quantify) 編碼於液晶空間光學調制器上。

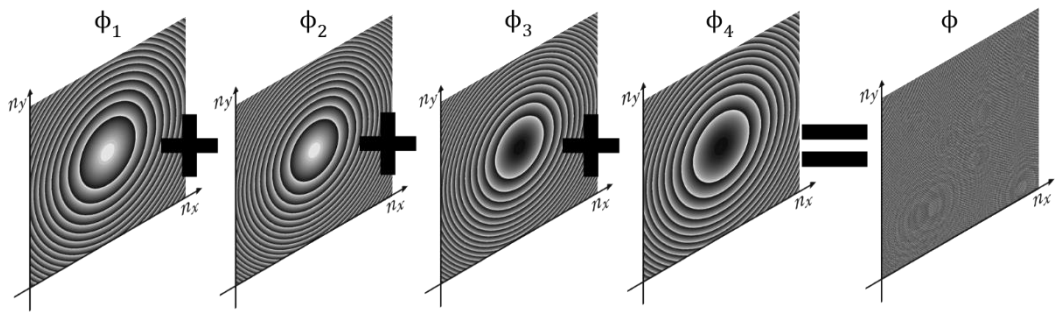


圖 2.4 多焦電腦全像透鏡相位直接相加法(以四透鏡為例)示意圖

2.2.2 像素法

將個別的電腦全像透鏡，依像素位置取出後並合成為一個單一電腦全像透鏡。如圖 2.5 所示，以六透鏡為例，將全像透鏡區域以 3×2 個像素為一單位，此單位內的像素相位值則依序等於自原始個別全像透鏡同一像素。之後一樣利用所量測的「相位-灰階」曲線，將相位分佈編碼於空間光學調制器上。

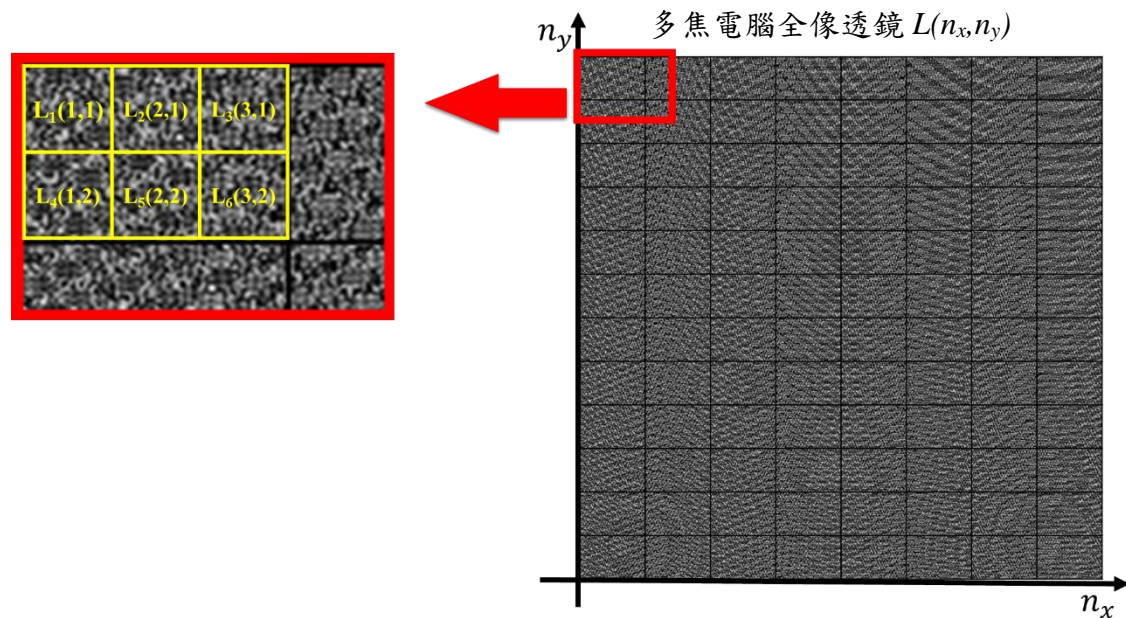


圖 2.5 多焦電腦全像透鏡像素法(以六透鏡為例)示意圖

2.2.3 大區域分區法

如圖 2.6 所示，以六透鏡為例，將合成全像透鏡的範圍切割為 N 個區域，每個區域則依序將 N 個個別電腦全像透鏡同樣區域位置的相位填入。之後一樣利用所量測的「相位-灰階」曲線，將相位分佈編碼於空間光學調制器上。

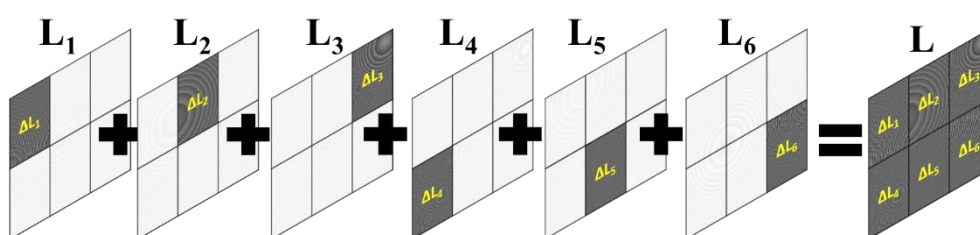


圖 2.6 多焦電腦全像透鏡大區域分區法(以六透鏡為例)示意圖

在以上述三種方法分別製作多焦電腦全像透鏡後，再放到光學系統中進行測試，並比較其聚焦效果。

第三章

液晶式空間光波調制器

原理與相位特性量測

空間光波調製器(Spatial Light Modulator, SLM)的定義是能夠對入射光的光波振幅、相位進行調制的光學元件。而其調制的方法大致上可分為「振幅型」、「相位型」與「理想型」三種[9]：

- (1) 振幅型：當入射光波經過空間光波調制器後，光波相位並不會改變，而振幅會被調制成目標值。
- (2) 相位型：當入射光波經過相位型空間光波調制器後，光波振幅並不會改變，而相位會被調制成目標值。
- (3) 理想型：當入射的光波經過空間光波調制器後，振幅及相位均會被調制成目標值，也就是說空間光波調制器可以對入射光波完全調制。

由於相位型空間光波調制器只會調制光波相位，振幅不會改變，在使用光波的能量上效率較高，故在此選擇使用相位型空間光波調制器。

由於液晶式空間光波調制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)能夠隨輸入電壓即時反應，且可以重複使用，所以在此選擇使用液晶式空間光學調製器作為寫入相位式電腦全像透鏡的繞射光學元件。

3.1 液晶式空間光學調製器工作原理

液晶顯示器的組成是由玻璃基板、透明導電膜、配向膜、液晶分子等所組成。

液晶顯示器製作方式如下[10]：

- (1) 洗淨玻璃基板後在整片玻璃基板上鍍上透明導電膜，再經過製程形成電極。
- (2) 在基板表面上塗上聚亞醯胺並透過摩擦或拋光等方式對聚亞醯胺做出一條條的溝槽作為配向膜，目的是在灌入液晶分子的步驟中，可以使灌入的液晶分子可依所配向的溝槽的方向排列，而不是各自亂散。
- (3) 接下來則在兩片處理好的玻璃基板間加入間隙物，製成間距固定的液晶盒。
- (4) 對液晶盒抽真空，並利用氣壓差灌入液晶分子。到這邊製作完成的成品可稱其為「液晶盒」。
- (5) 將此「液晶盒」與「偏振片」及「檢偏片」組合起來後，便是液晶顯示器(LCD)了

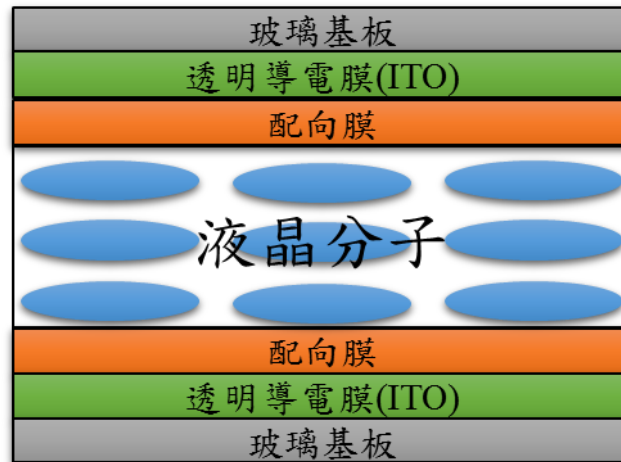


圖 3.1 液晶盒結構示意圖

若兩片配向膜上的配向方向相差 α 度，則液晶盒中的液晶分子長軸會分別沿著兩片配向膜做不同方向的配向排列。此時由於兩片配向膜的配向方向不同，使液晶分子從第一片配向膜開始，液晶分子會一層一層的發生扭轉，一直到第二片配向膜。因此， α 稱之為扭轉角。此時最後一層液晶分子的長軸方向會與第二片配向膜的配向方向相同。且因為扭轉的效應，使液晶盒中的液晶分子呈現螺旋狀的排列。

LCD 又可細分為許多不同種類，而本論文實驗中使用到的 LC-SLM 為 HOLOEYE 的 LC-2002 及 PLUTO。其中 LC2002 為扭曲向列型 (Twisted Nematic, TN)，PLUTO 則為電場控制雙折射型 (Electrically Controlled Birefringence, ECB)。

3.1.1 TN-LCD 工作原理

TN-LCD 最主要的特點就是其扭轉角 α 為 90 度[10]，造成液晶分

子從第一層基板到第二層基板如圖所示一層層產生扭轉。TN-LCD 利用液晶分子的旋光性，使線偏振光經過液晶分子後其偏振方向會發生旋轉。本論文利用 TN-LCD 此性質，並在兩端外加電壓使液晶直立排列，使光波經 TN-LCD 後產生不同的光程來達到相位控制。

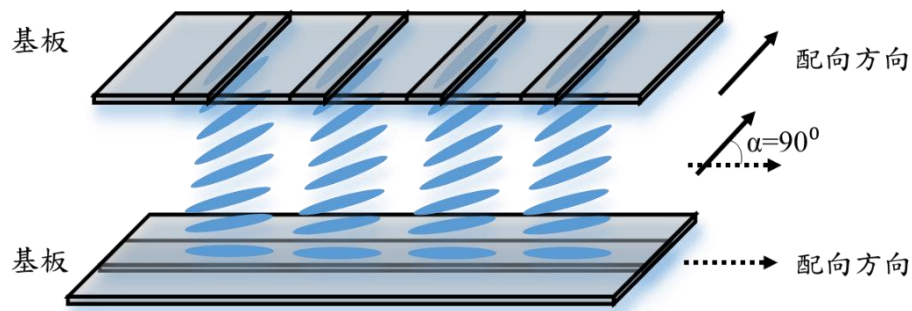


圖 3.2 TN-LCD 液晶分子扭轉示意圖

當入射液晶盒的光波為線偏振，且液晶盒兩端無外加電壓時，光波由於液晶分子的旋光性使其偏振方向旋轉 90 度；而當有外加電壓時，液晶盒兩端會產生電場。此電場會對液晶分子產生力矩使液晶分子的長軸方向慢慢往電場方向傾倒。電壓越大對液晶分子產生的力矩越大，當電壓增大到一定的值後，液晶分子的長軸會完全與電場平行。

若我們在光入射液晶盒前放置一偏振片，液晶盒後放置一檢偏片。偏振片之偏振方向與第一片基板上之液晶分子排列方向平行，檢偏片的偏振方向與第二片基板上液晶分子排列方向平行。

則未加電壓時，入射光經偏振片後入射液晶盒之極化方向與第一片基板上之液晶分子平行。而入射光極化方向隨液晶盒內液晶分子之

排列一起旋轉，當到達第二片基板上時會與第二片基板上之液晶分子排列方向平行，且極化方向會與檢偏板之偏振方向相同，這樣光會完全穿透檢偏板，將穿透率視為 1。將兩端加上電壓且此電壓足以讓液晶分子之長軸全倒向電場方向，光經液晶盒後其偏振方向會維持與偏振片相同，由於偏振片與檢偏片之方向剛好相差 90 度，所以此時光會完全無法穿透檢偏片，將穿透率視為 0。而當外加電壓不會使液晶分子完全倒向電場方向時(即壓介於上述兩者間)，入射光經液晶盒後其偏振方向不會與檢偏片之偏振方向平行或是垂直，亦即穿透率介於 0~1 之間。因此可以藉由此種方法控制穿透光的強度。而我們也可藉由此種方式控制光波經過液晶盒後的相位。

3.1.2 ECB-LCD 工作原理

ECB-LCD 與前面提到的 TN-LCD 之不同處為是其扭轉角為 0 度 [10]。因此當未施加電壓時，液晶盒內之液晶分子會在兩片基板中間呈平行排列。而當外加電壓時，會使液晶分子產生一定角度的傾斜，並利用液晶分子的雙折射效應使光波經過液晶盒後的偏振狀態產生改變。

一樣在液晶盒前後放置偏振片與檢偏片。偏振片之偏振方向與第一片基板上之液晶分子排列方向平行，而檢偏片之偏振方向與偏振片相差 90 度。則當未施加電壓時，由於液晶分子為平行排列，因此偏振方向不會產生改變，則當光波經液晶盒後其偏振方向會與偏振片相

同，即與檢偏片之偏振方向相差 90 度，此時出射光完全無法穿透，則穿透率視為 0。當施加電壓後，會使液晶分子長軸產生傾斜。由於液晶分子為單軸晶體，若入射光之偏振方向與液晶分子光軸有一個角度時，對入射光 O-Ray 以及 E-Ray 而言，折射率不同，也就是在通過液晶盒後 O-Ray 及 E-Ray 間會有相位差，偏振方向會變成橢圓偏振。此時會有部份與檢偏片方向相同的光通過檢偏片，穿透率不為 0。

3.2 LC-SLM 儀器介紹

這裡介紹本論文所使用的液晶式空間光波調制器德國 HOLOEYE 公司所生產的 LC2002 及 PLUTO，以下是這兩台儀器的規格。

(1). 型號：LC2002[11]

表 3.1 LC-2002 規格資料

Description		Units
Active area dimensions	26.6 x 20.0 (1,3" diagonal)	mm
Screen aspect ratio	4 (H) : 3 (V)	
Display resolution	800 (H) x 600 (V)	pixels
Pixel pitch	32 x 32	μm
Pixel configuration	Orthogonal	
Gray Levels	256 (8 bit)	
Optical efficiency: transmittance	> 20	%
Aperture ratio	> 55	%
Optical Mode	Transmissive, Monochrome	
Liquid crystal type	90° twisted nematic	
Polarizer Mode	Normally white	
Max. refresh frame rate	60	Hz
Illumination (max)	< 2	W/cm ²
Response time (typ.)	42	ms

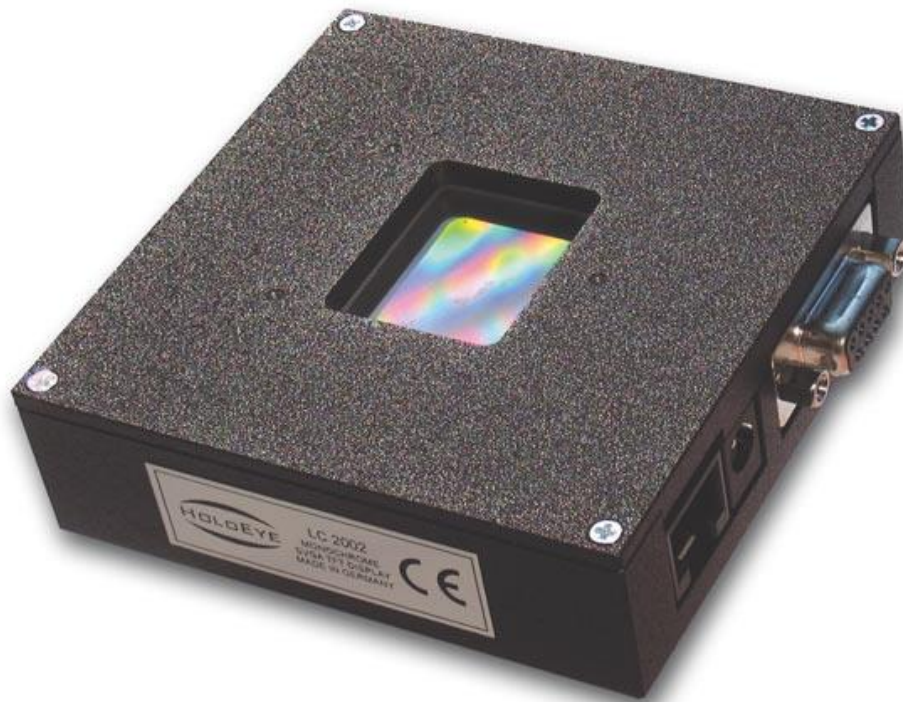


圖 3.3 LC-2002 實物圖

(2). 型號：PLUTO[12]

表 3.2 PLUTO 規格資料

Description		Units
Active area dimensions	15.36 x 8.64	mm
Screen aspect ratio	16 (H) : 9 (V)	
Display resolution	1920 (H) x 1080 (V)	pixels
Pixel pitch	8 x 8	μm
Pixel configuration	Orthogonal	
Gray Levels	256 (8 bit)	
Aperture ratio	> 87	%
Optical Mode	Reflective, Monochrome	
Liquid crystal type	ECB	
Polarizer Mode	Normal Black	
Max. refresh frame rate	60	Hz
Illumination (max)	< 2	W/cm ²



圖 3.4 PLUTO 實物圖

3.3 LC-SLM 相位特性量測

3.3.1 LC-2002 相位特性量測

所用的液晶式空間光波调制器使用上由電腦影像卡控制灰階，而我們所編寫的電腦全像片卻為純相位式的。所以在使用時，須先量測 LC-SLM 的「相位-灰階」曲線，並利用此曲線對電腦全像片進行量化。

LC2002 利用 Mach-Zehnder 干涉儀來量測其「相位-灰階」曲線。雷射光源經過分光鏡後分為兩道光。兩道光路皆有一片偏振片及檢偏片，且其中一道在偏振片與檢偏片中間放置 LC2002(如圖所示)。

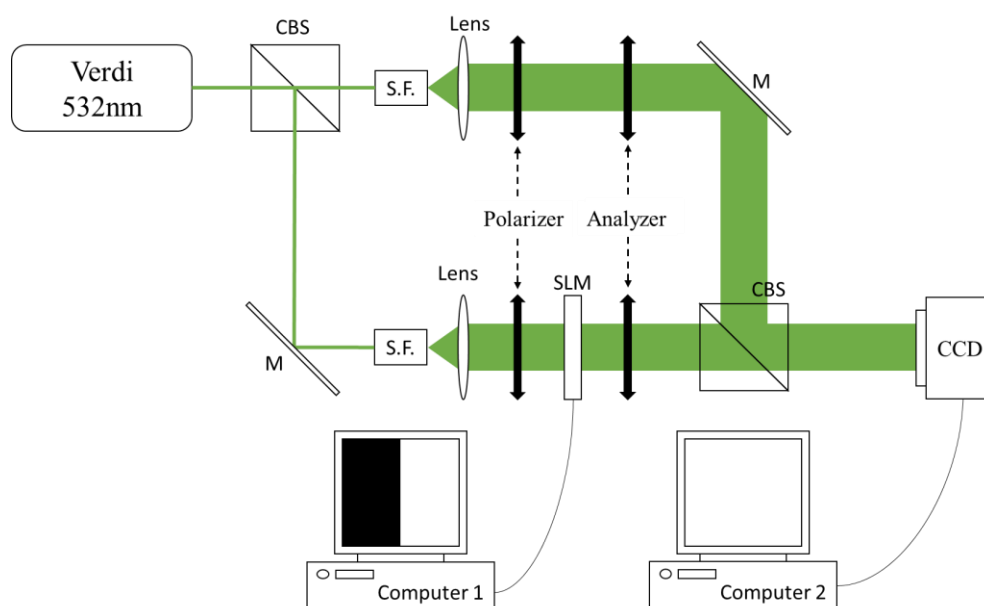


圖 3.5 以 Mach-Zehnder 干涉儀量測 LC-2002 「相位-灰階」曲線架構圖

由於 LC2002 可顯示 256 個灰階值，在這裡定義灰階值 0 到 255 時為全黑到全白。

而由於 LC2002 本身的偏振模式正常為白色，因此定義灰階為 255 時，LC2002 對光束不會產生相位差。所以在量測「相位-灰階」曲線時，將 LC2002 分成左右兩邊。一邊固定在灰階值為 255，一邊則從

255 開始依固定間隔依序下降到灰階值 0，使通過 LC2002 兩邊的光束依序有不同的相位差。

而量測的結果可由式 3-1 算出不同灰階時的相位偏移量。

$$\Delta\phi = \frac{\Delta T}{T} \times 2\pi, \quad (3-1)$$

其中 T 為干涉條紋週期。當 LC-2002 螢幕左右開始顯示不同的灰階值時，CCD 上偵測到的干涉條紋左右兩邊的偏移量。

另外由於使用不同角度的偏振片及檢偏片時會得到不同的「相位-灰階」曲線。所以在這裡定義光行進方向為+Z 方向，當面對光源時逆時針旋轉為正，反之為負。而量測的結果為偏振片方向為+150 度，檢偏片方向為 0 度時，其「相位-灰階」曲線有範圍較廣的線性區段及較大的相位偏移量。之後將以此數據編寫相位式電腦全像片[6]。

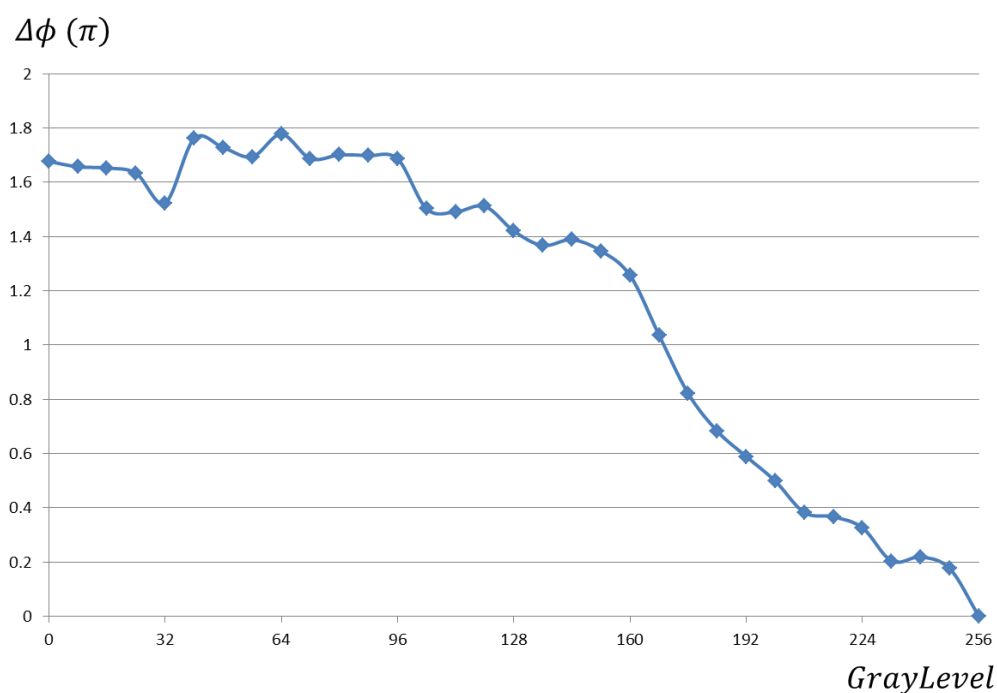


圖 3.6 偏振片角度為+150 度和檢偏片角度為 0 度時 LC-2002 的相位調制曲線

3.3.2 PLUTO 相位特性量測

PLUTO 屬於反射式 LC-SLM，在量測「反射式」LC-SLM 的「相位-灰階」曲線時，將反射式 LC-SLM 分割成三個區域(如圖 3.7)，分別顯示各自的灰階度，再使 LC-SLM 與入射光夾角小於 5 度，入射光經過 LC-SLM 後可視為有三塊不同的相位區域(A,B,C)，再利用一片透鏡使 A 區域分別與 B 區域及 C 區域疊在一起產生干涉[13]。

量測系統如圖所示。LC-SLM 前面加入半波板以用來調整入射光進入 LC-SLM 時的偏振方向，偏振方向垂直於桌面，此時 LC-SLM 的螢幕上顯示不同的灰階度，並在 LC-SLM 上加一遮罩，使入射光的光束分成 A、B、C 三個區域(如圖 3.7)，並令其中 B 區域依固定間隔依序改變灰階，這樣便可以藉由改變該區域的灰階度，觀察並推算出相位偏移量。而在經過遮罩及 LC-SLM 反射後，三個區域經由凸透鏡聚焦的方式在透鏡的聚焦點前後發生干涉，再利用物鏡將此干涉條紋放大記錄[14]。

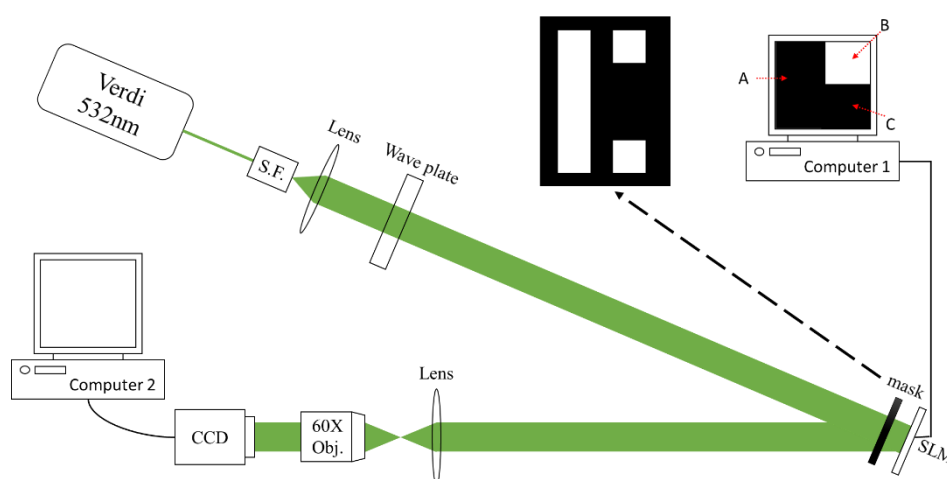


圖 3.7 量測 PLUTO 「相位-灰階」曲線架構圖

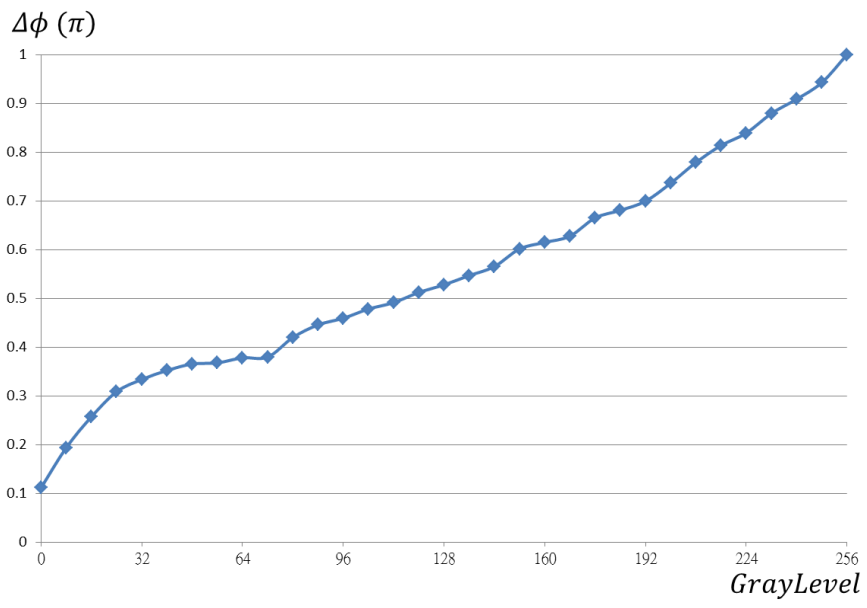


圖 3.8 PLUTO 的相位調制曲線

第四章

使用穿透式液晶顯示器 製作焦電腦全像透鏡之實驗

在本章使用 LC2002 作為實驗中使用的穿透式液晶顯示器，我們將編寫好的多焦電腦全像透鏡輸入 LC2002 並比較「相位直接相加法」、「像素法」與「大區域分區法」三種方法所編寫之多焦電腦全像透鏡在實際光學系統中的聚焦情況。另外，我們也測試毛玻璃在不同轉速下消去雷射光斑之效果。同時在 LC2002 上放置單一焦距的電腦全像透鏡以進行改變系統景深的實驗。

4.1 三種多焦全像透鏡製作方法聚焦效果之比較

這裡我們分別設計了二、四、六、八與十二個不同數量的多焦電腦全像透鏡。並以「相位直接相加法」、「像素法」與「大區域分區法」等三種方式所編寫，之後將所編寫的電腦全像透鏡放入 LC2002，由於設計的電腦全像透鏡焦距是以 LC2002 的參數進行設計，受限於 LC2002 像素大小為 $32\mu\text{m}$ ，最短的焦距為 1.2m(2.19 式)，此焦距太長無法在光學桌上進行觀察，所以在後面放一個焦距為 30cm 的實體透鏡，讓實體透鏡與全像透鏡組合，使其有效焦距縮短為在光學桌上可以觀察之距離。之後使用 CCD 觀察多焦全像透鏡在我們設計之焦距位置的聚焦情形。

二離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試：

在距離實體透鏡焦平面前後 $\Delta Z=5\text{mm}$ (如圖 4.1 所示)，離光軸 Δx 及 $\Delta y=1.5\text{mm}$ 的位置設計離軸電腦全像透鏡的聚焦點。全像透鏡的焦距利用組合透鏡的有效焦距公式(2-3)來計算。全像透鏡的焦距為 1.77m 及 -9.15m 。

光學實驗結果在各平面的聚焦影像如表一，紅色圈出了設計的目標聚焦點。結果影像圖中也顯示非目標聚焦的位置也出現在另外一個平面上所設計的聚焦點，但較模糊。由實驗結果(表 4.1)跟光強度分佈圖(圖 4.2、4.3)可以看出像素法及大區域分區法所製作的電腦全像透鏡的聚焦光點較漂亮但是強度較低，而相位直接相加法所製作的電腦全像透鏡聚焦光點較不漂亮但是聚焦光點強度較另外兩者高。

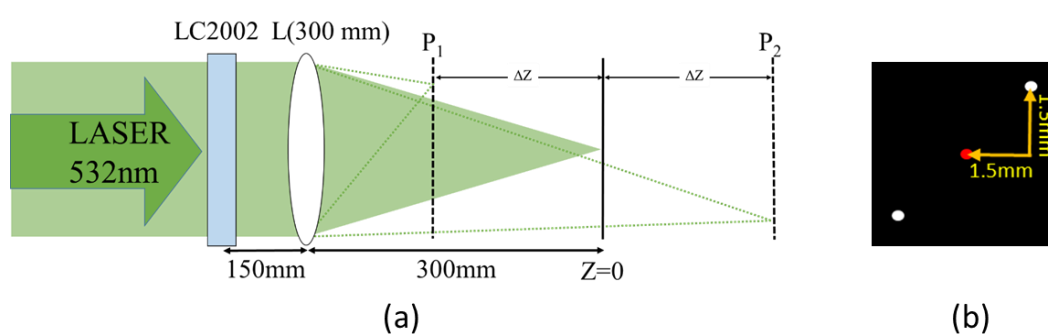
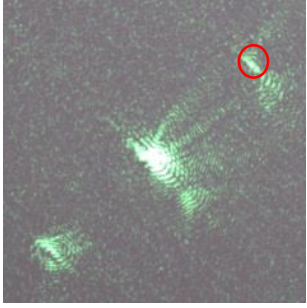
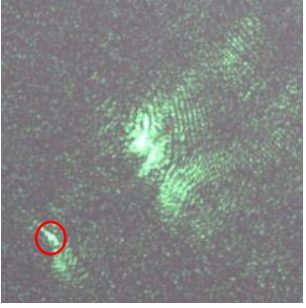

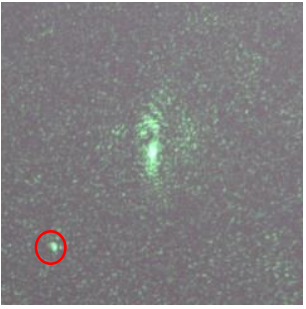
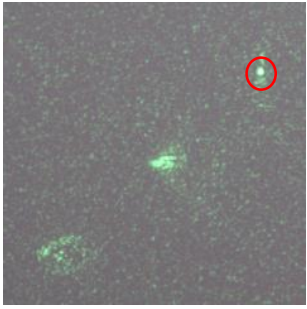
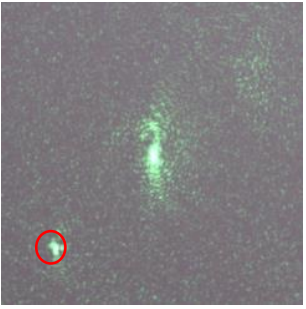


圖 4.1 二離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)及聚焦點相對位置示意圖(b)

表 4.1 二離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像

	P1	P2
相位直接相加		
像素法		
大區域分區法		

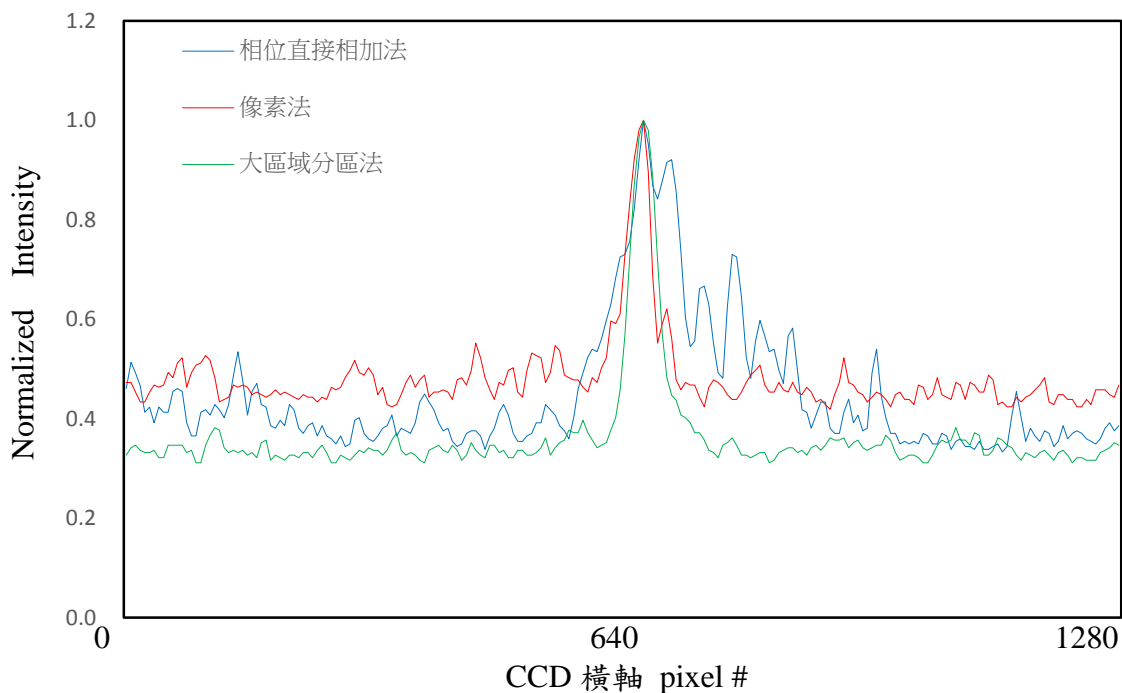


圖 4.2 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

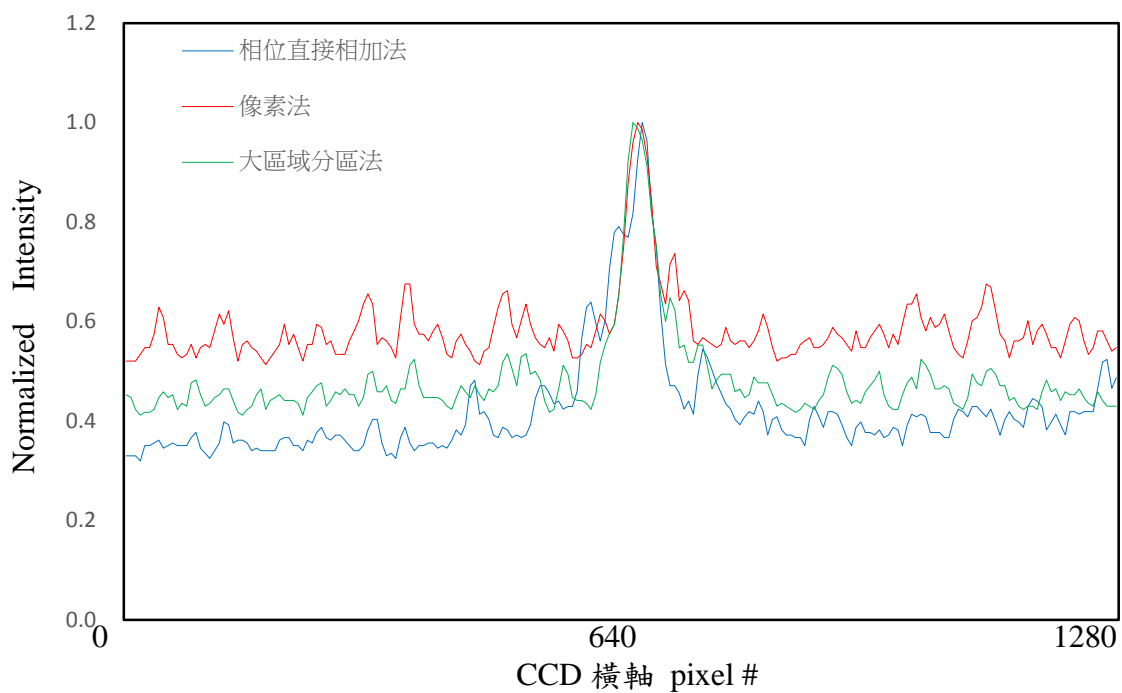


圖 4.3 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

四離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試：

在實體透鏡焦平面前後每隔 5mm 設計離軸電腦全像透鏡的聚焦點，總共設計四個(如圖 4.4 所示)。離光軸 Δx 及 $\Delta y=1.5\text{mm}$ 的位置

設計離軸電腦全像透鏡的聚焦點。全像透鏡的焦距利用組合透鏡的有效焦距公式(2-3)計算。全像透鏡的焦距為 4.35m、1.77m、-9.15m、-4.65。

由實驗結果跟強度圖可以看出像素法及大區域分區法所製作之電腦全像透鏡的聚焦光點一樣較漂亮但是強度較低，而相位直接相加法所製作的電腦全像透鏡聚焦光點雖然較不漂亮但是強度較高。

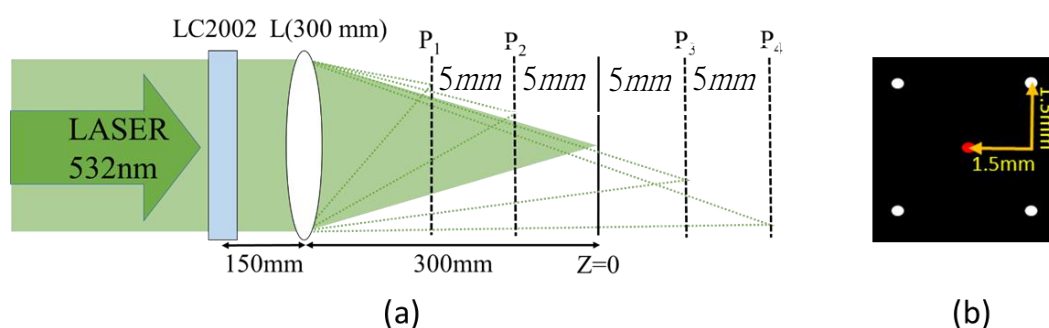
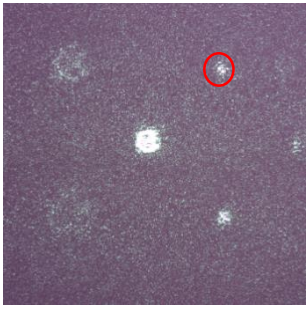
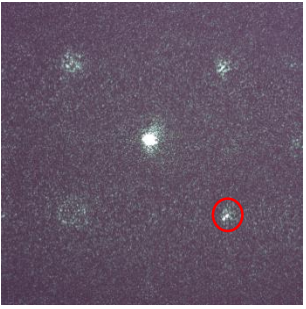
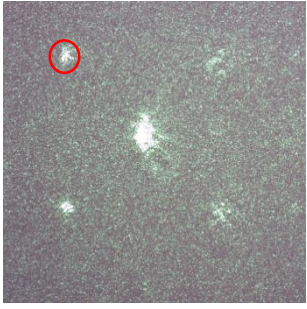
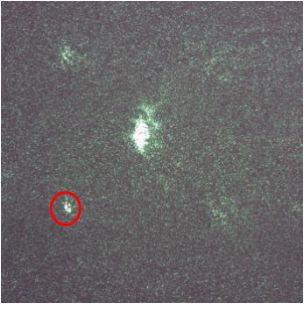
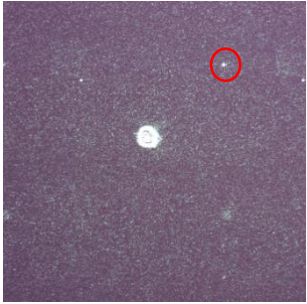
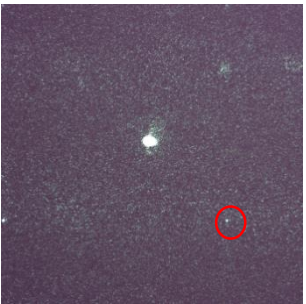

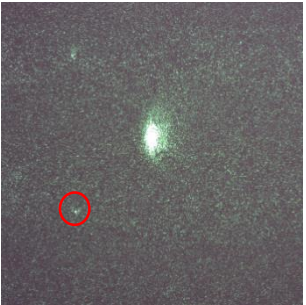

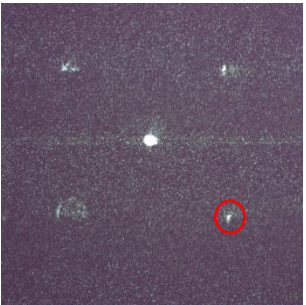

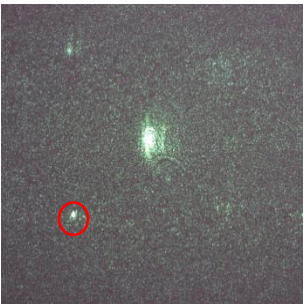


圖 4.4 四離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)及聚焦點相對位置示意圖(b)

相位直接相加法		
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像
		
	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像

像素法		
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像
		
	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像
大區域分區法		
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像
		
	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像

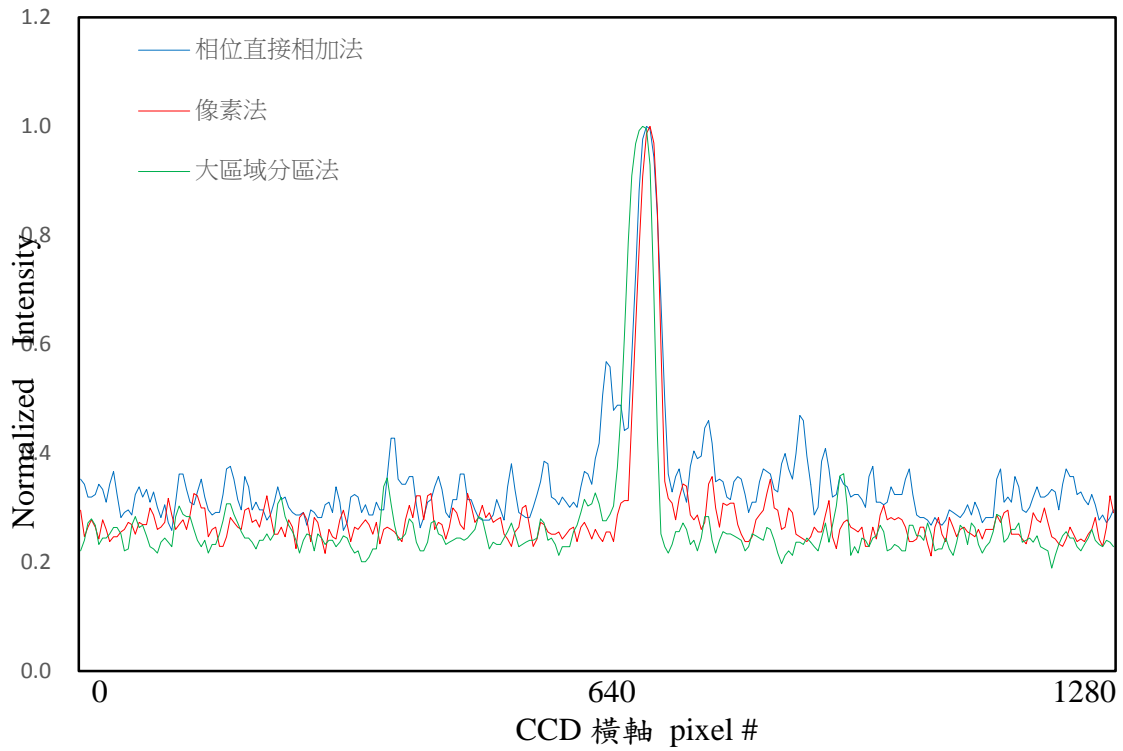


圖 4.5 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

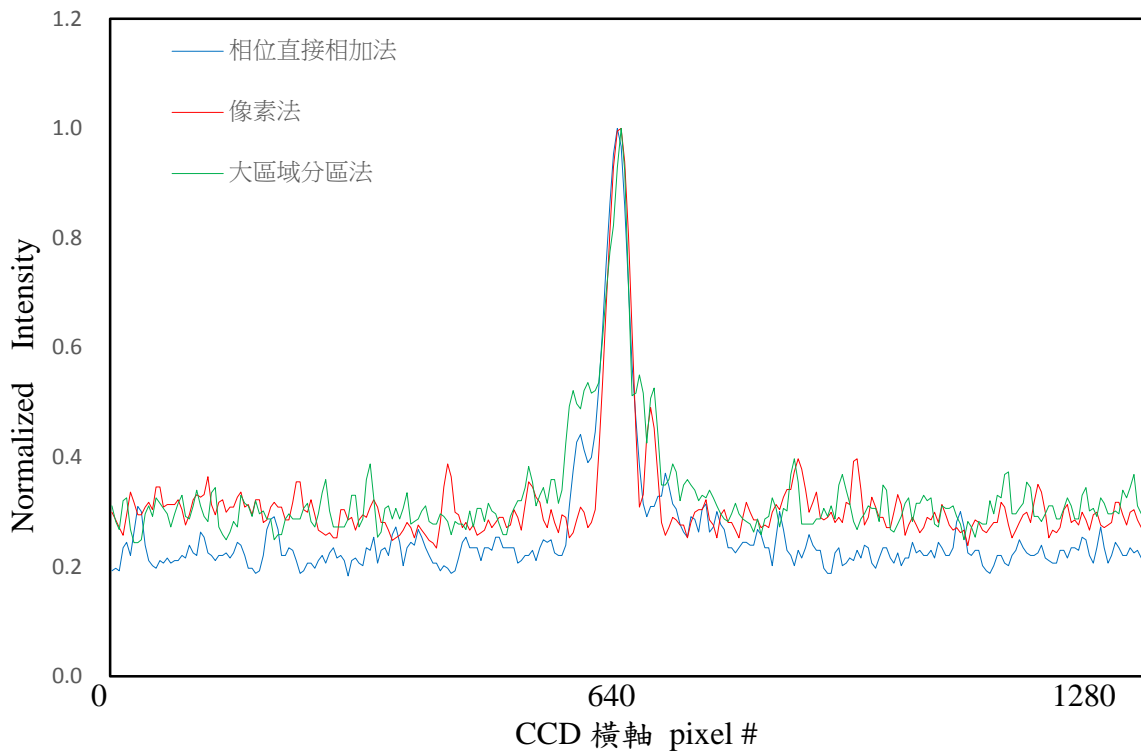


圖 4.6 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

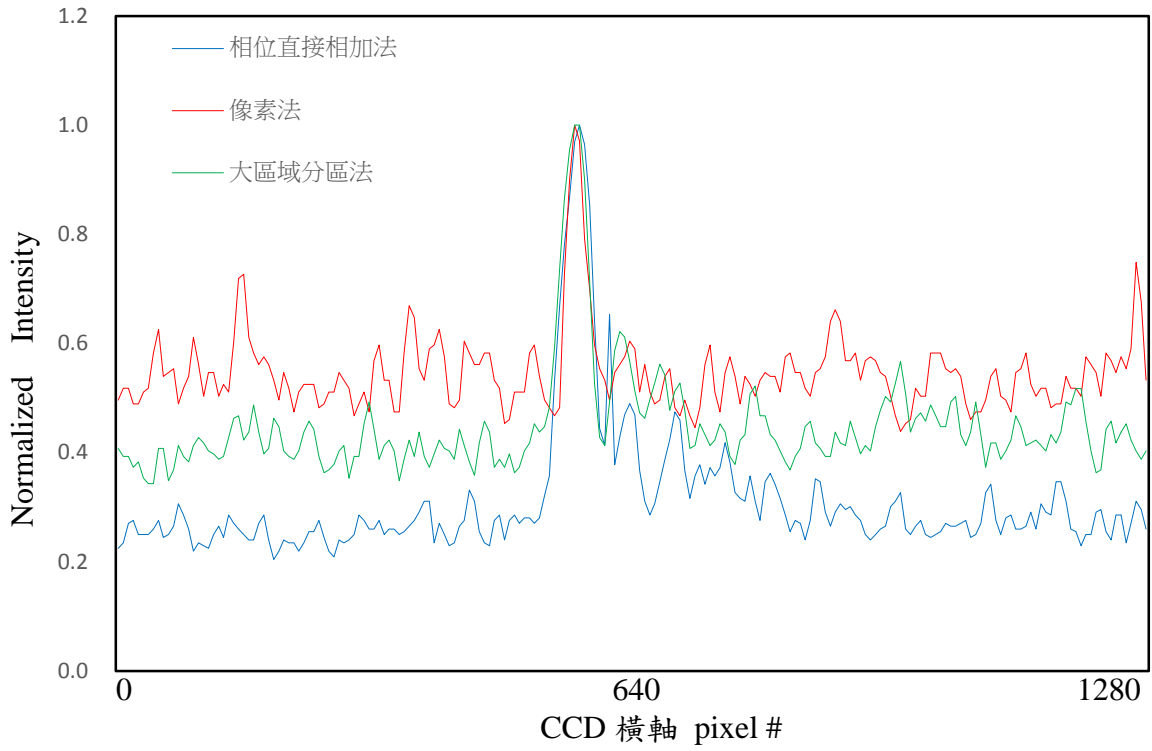


圖 4.7 P3 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

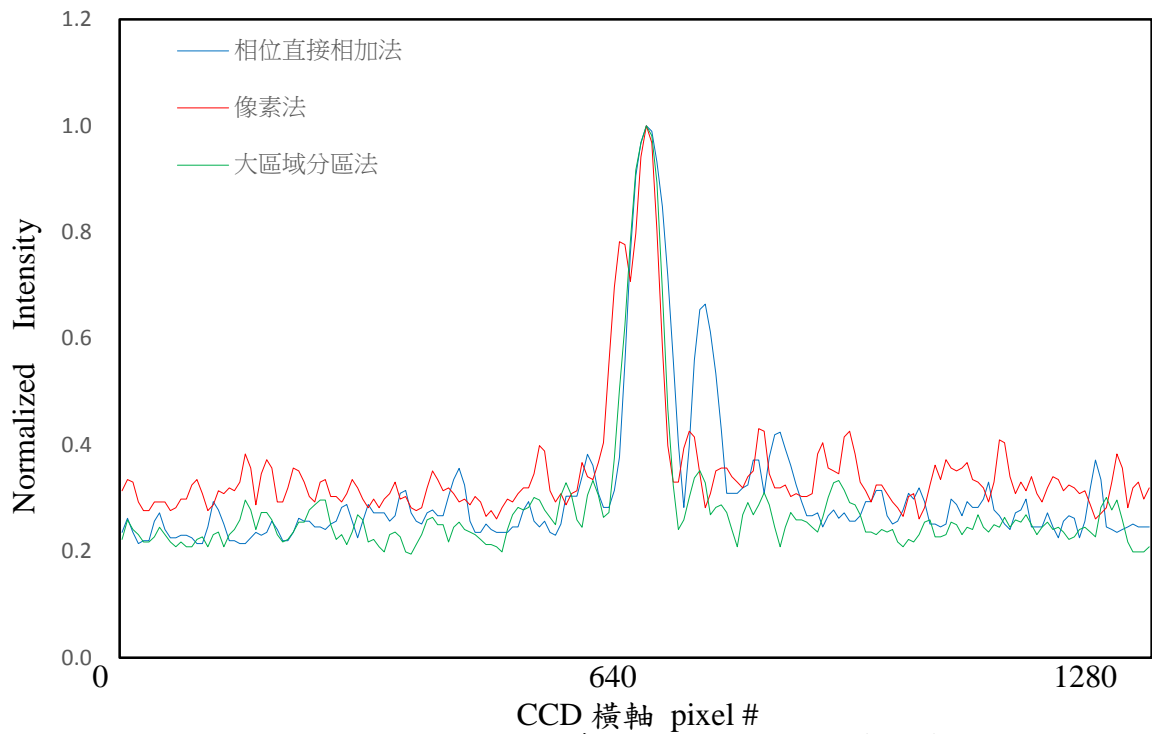


圖 4.8 P4 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

六離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試：

在實體透鏡焦平面前後每隔 5mm 設計一個離軸電腦全像透鏡的聚焦點，總共設計六個(如圖 4.4 所示)。由實驗結果(表 4.3)跟光強度分佈圖(圖 4.10~4.15)，相位直接相加法所得的焦點峰值強度跟非焦點區域的強度比大約為 1:0.2，而像素法為 1:0.4~0.6，大區域分區法則為 1:0.1~0.6。顯然相位直接相加法有較好的焦點強度。所聚焦的焦點的半強度寬度則差不多。因此相位直接相加法所製作的電腦全像透鏡在各平面的聚焦效果與強度比都不錯且較另外兩者穩定。像素法的聚焦光點在離實體透鏡焦平面較遠的平面其強度比較好，而在靠近實體透鏡焦面的光強比則較差。大區域分區法的聚焦光點對非聚焦處的光強比很高，但是會產生多餘的聚焦光點。

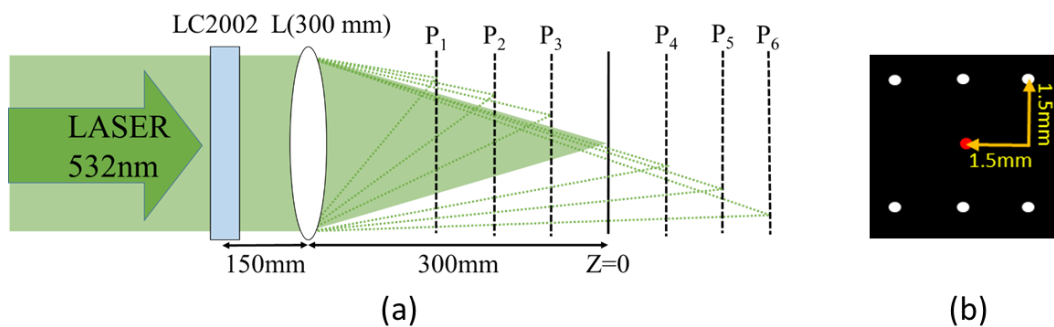
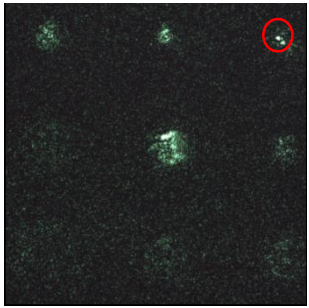
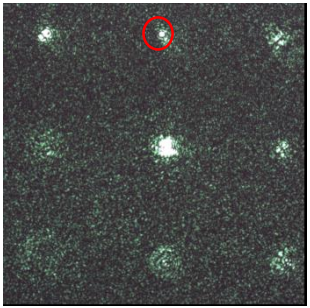
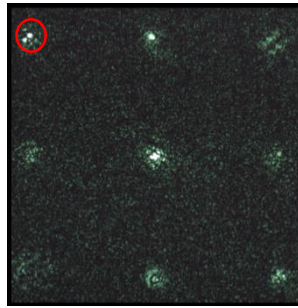
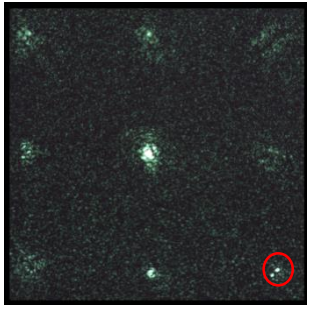
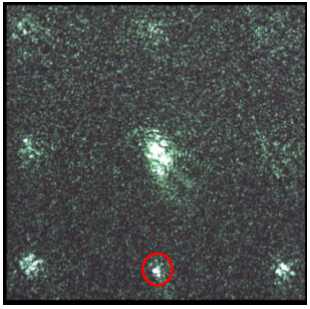
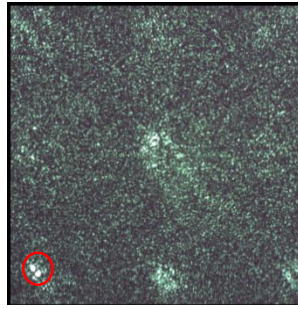
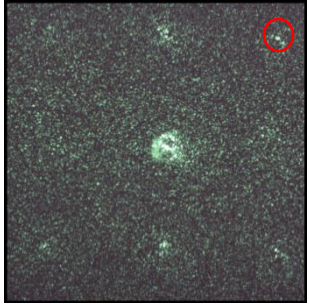
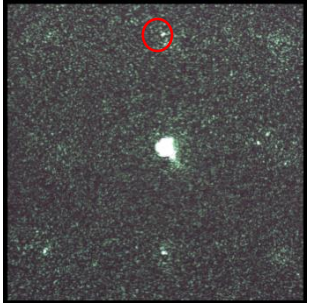
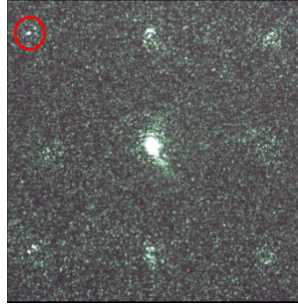
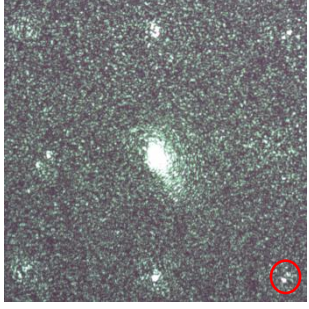
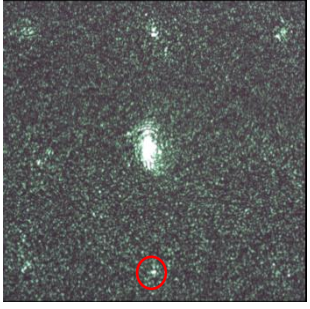
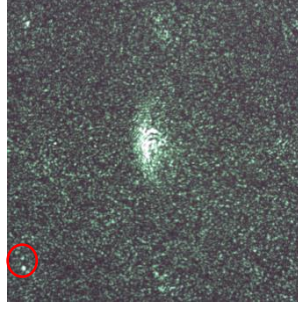


圖 4.9 六離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)及聚焦點相對位置示意圖(b)

表 4.3 六離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像

相位直接相加法				
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像	
				
	P4 平面光學影像	P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	
	像素法			
		P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像
				
P4 平面光學影像		P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	

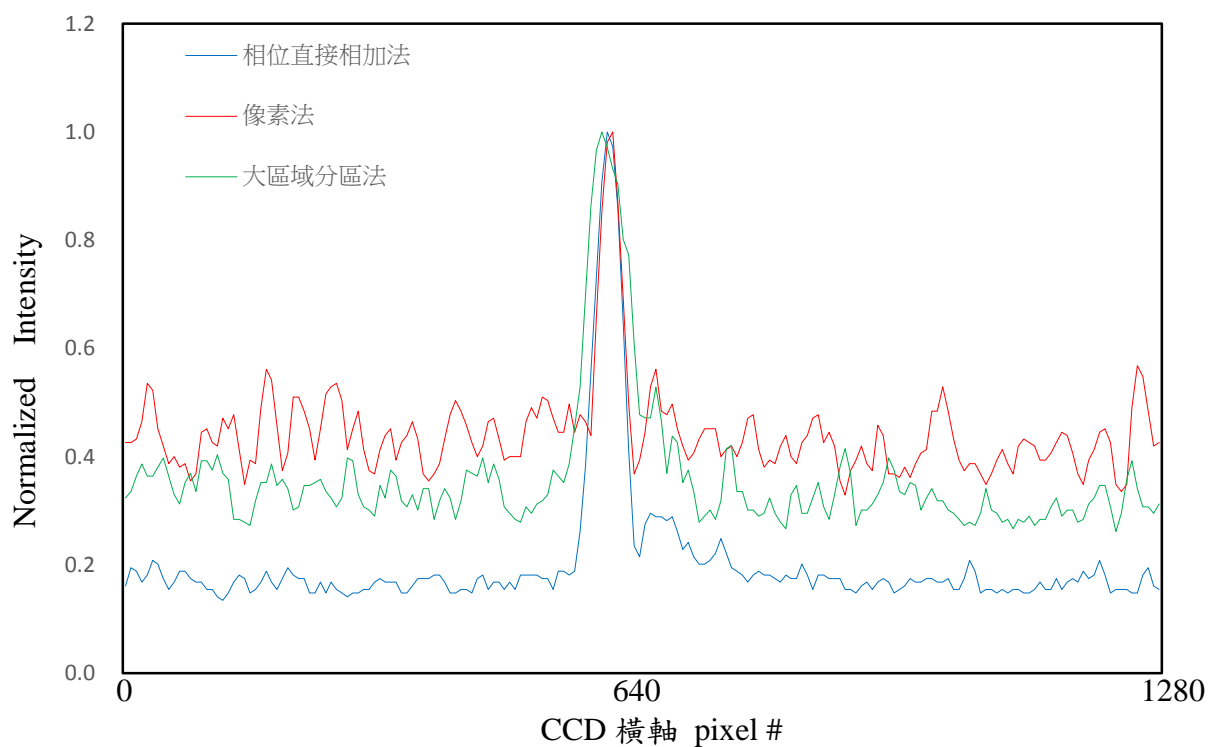
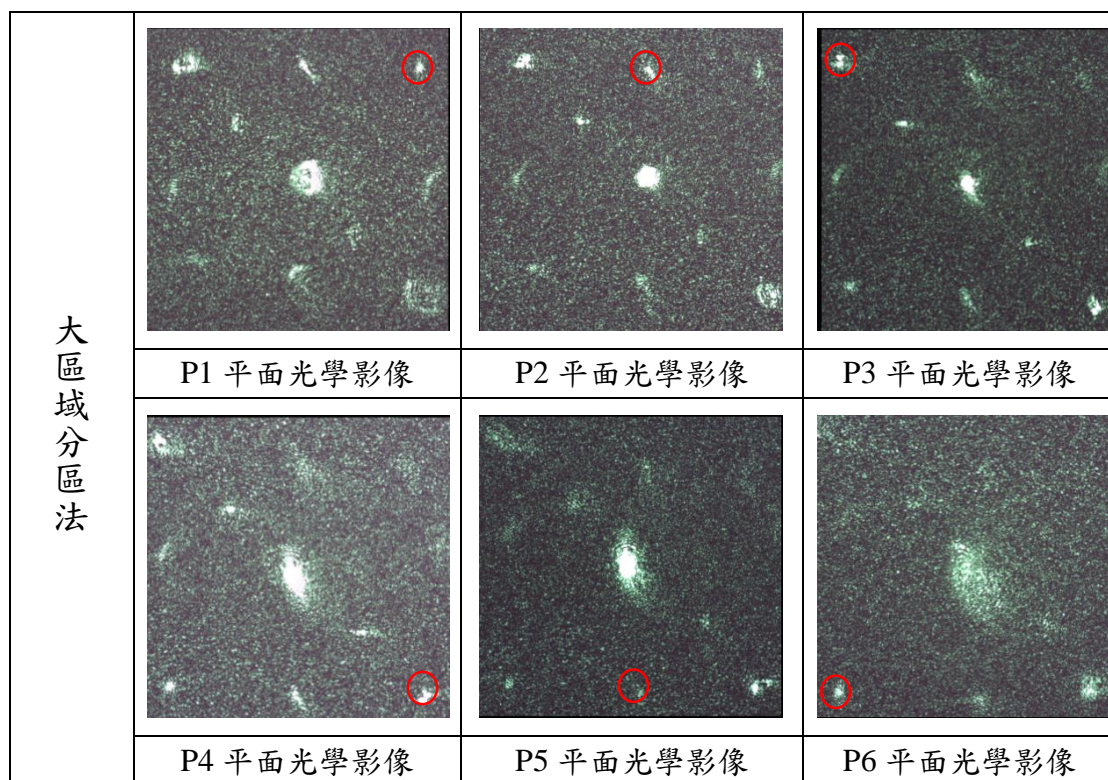


圖 4.10 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

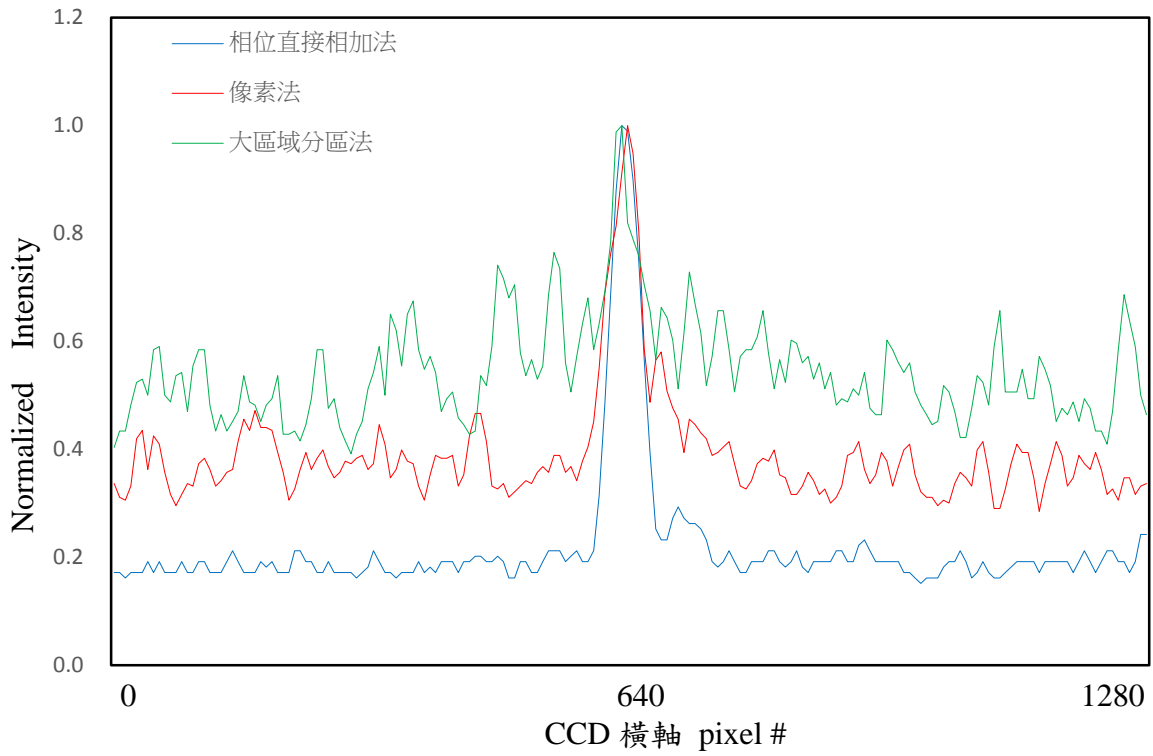


圖 4.11 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

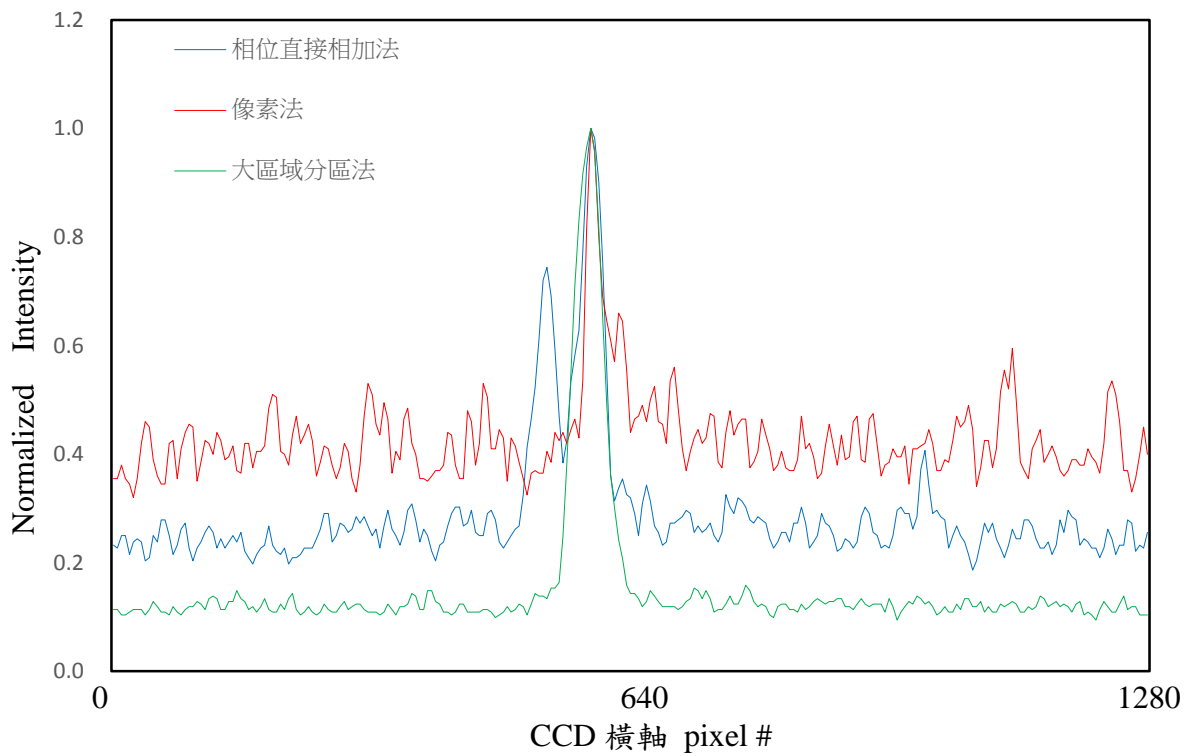


圖 4.12 P3 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

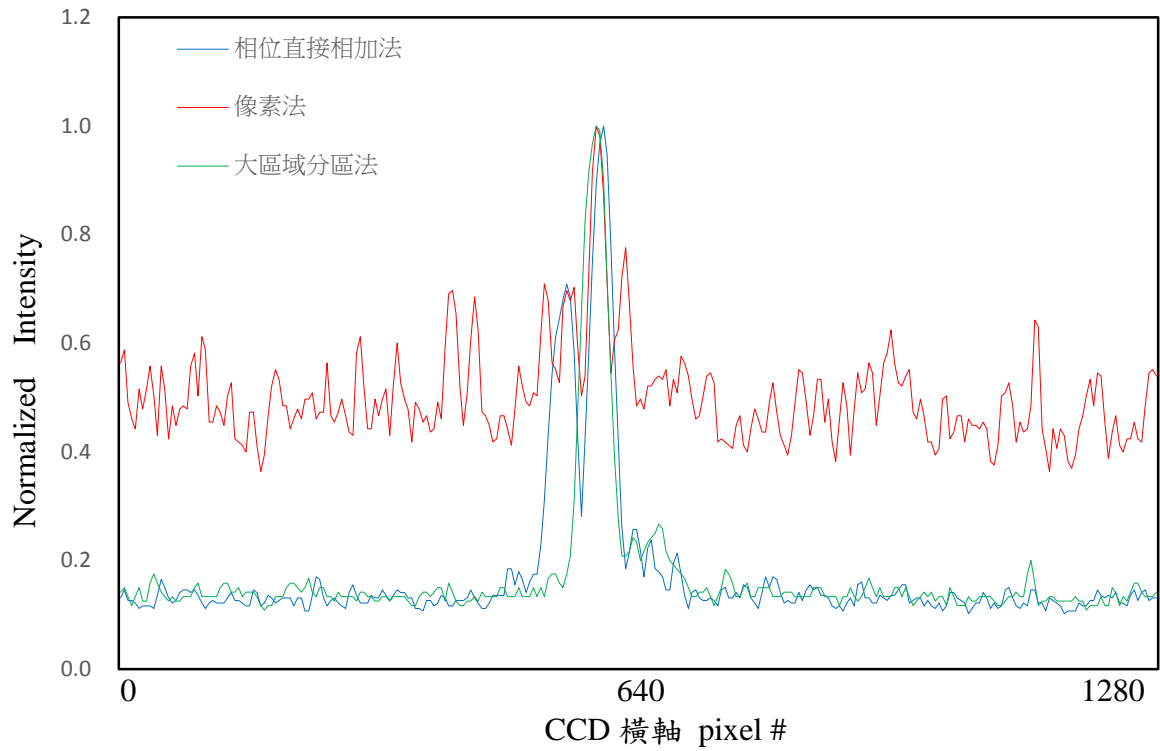


圖 4.13 P4 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

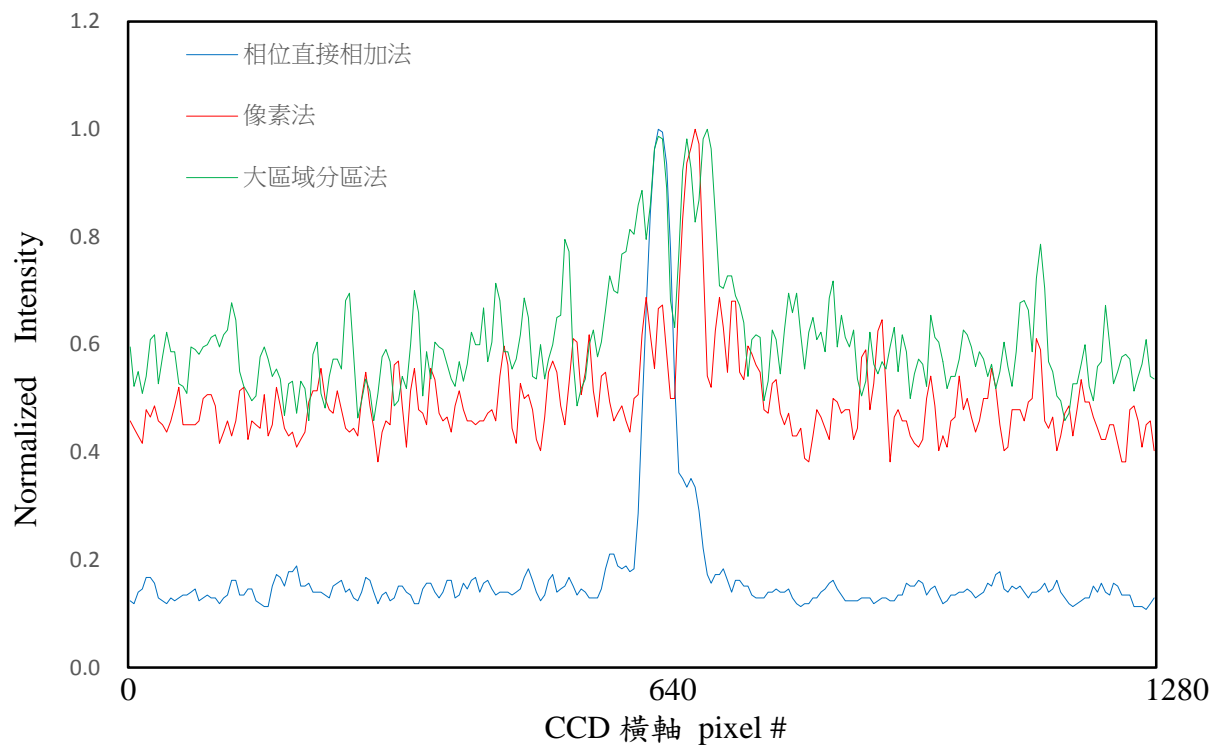


圖 4.14 P5 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

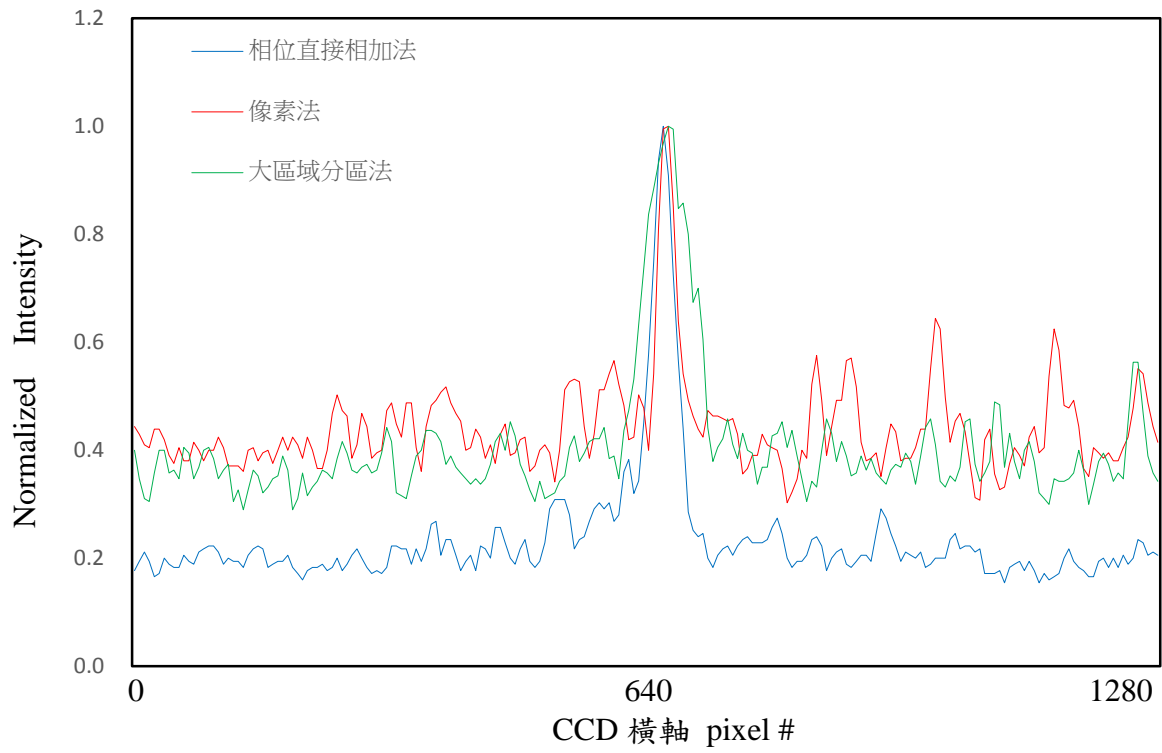


圖 4.15 P6 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

八離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試：

在實體透鏡焦平面前後每隔 5mm 設計一個離軸電腦全像透鏡的聚焦點，總共設計八個(如圖 4.16 所示)。由實驗結果(表 4.4)跟光強度分佈圖可以看到相位直接相加法所製作的電腦全像透鏡在各平面的聚焦效果與強度比較另外兩者穩定。像素法的聚焦效果雖然跟相位直接相加法一樣穩定但強度比較差。大區域分區法則無法在正確的位置產生聚焦。

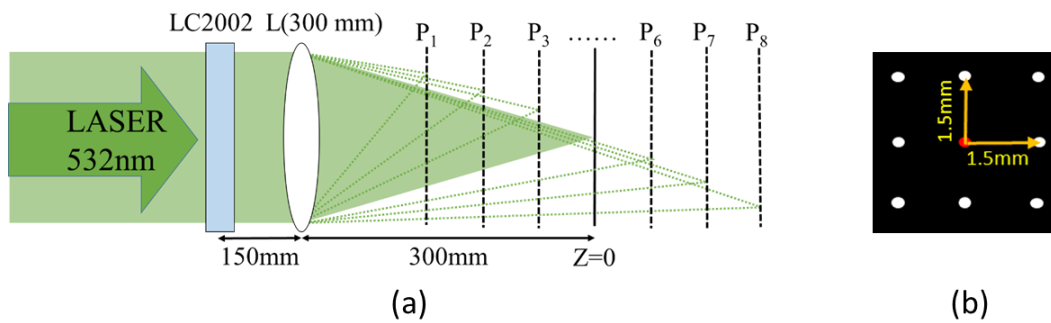
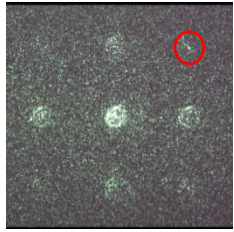
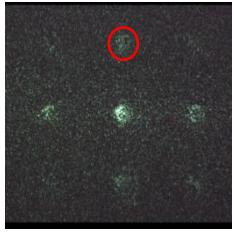
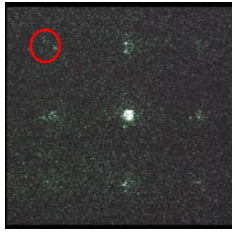




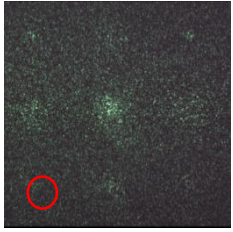







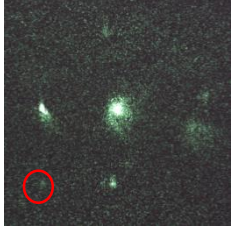


圖 4.16 八離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)及聚焦點相對位置示意圖(b)

表 4.4 八離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像				
相位直接相加法				
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像
	P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	P7 平面光學影像	P8 平面光學影像

像素法				
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像
				
	P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	P7 平面光學影像	P8 平面光學影像
大區域分區法				
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像
				
	P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	P7 平面光學影像	P8 平面光學影像

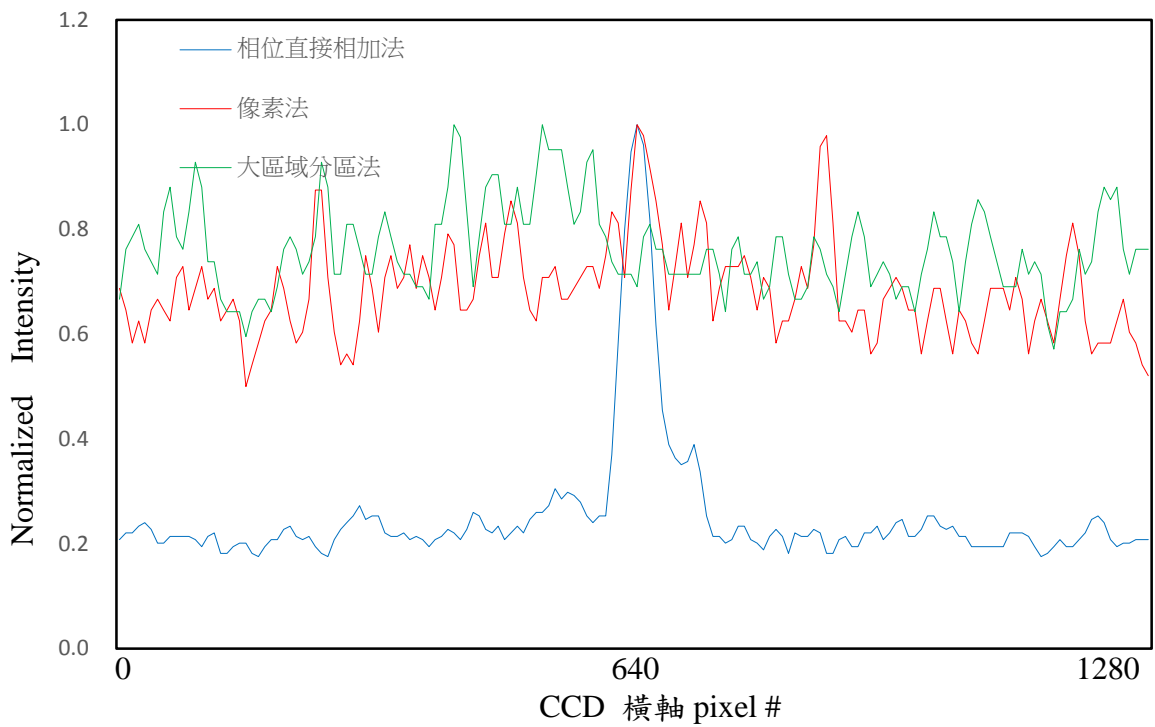


圖 4.17 P1 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

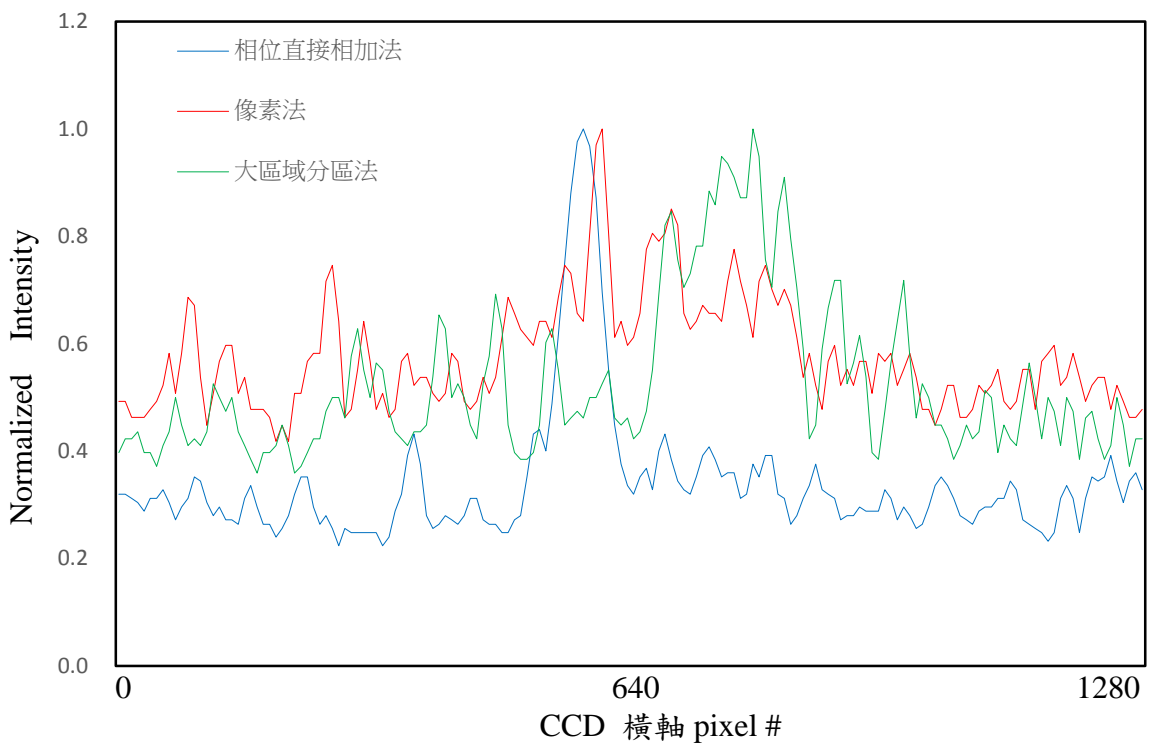


圖 4.18 P2 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

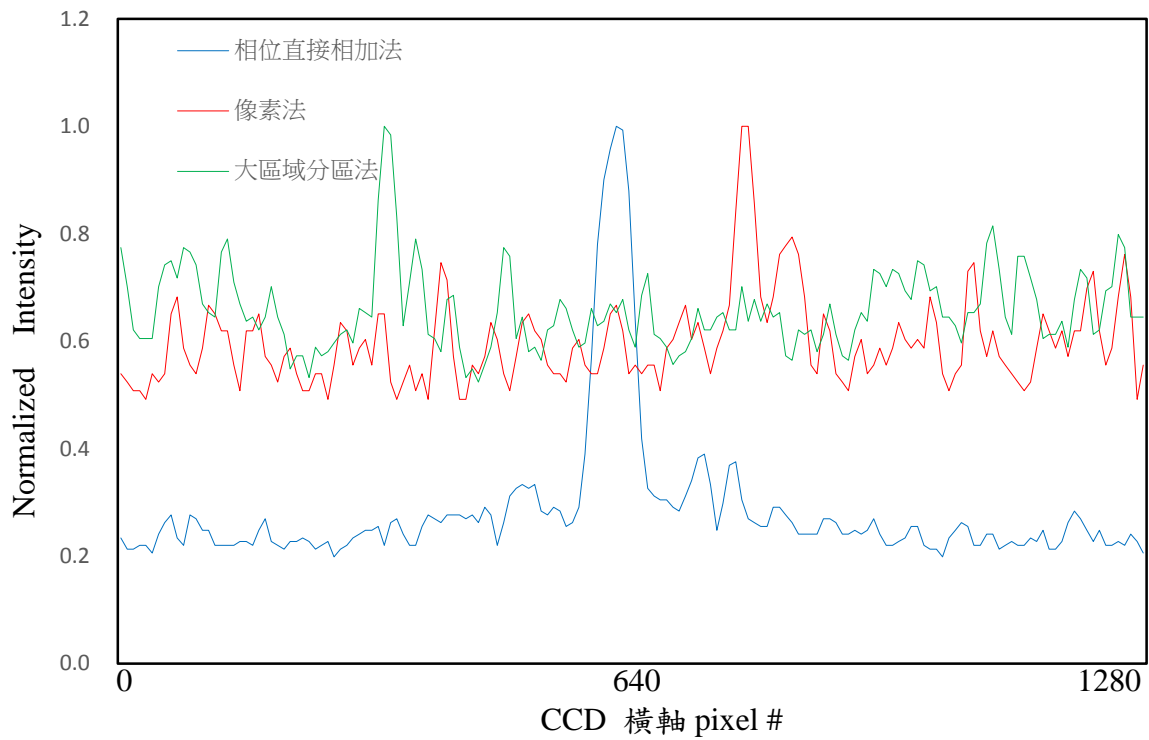


圖 4.19 P3 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

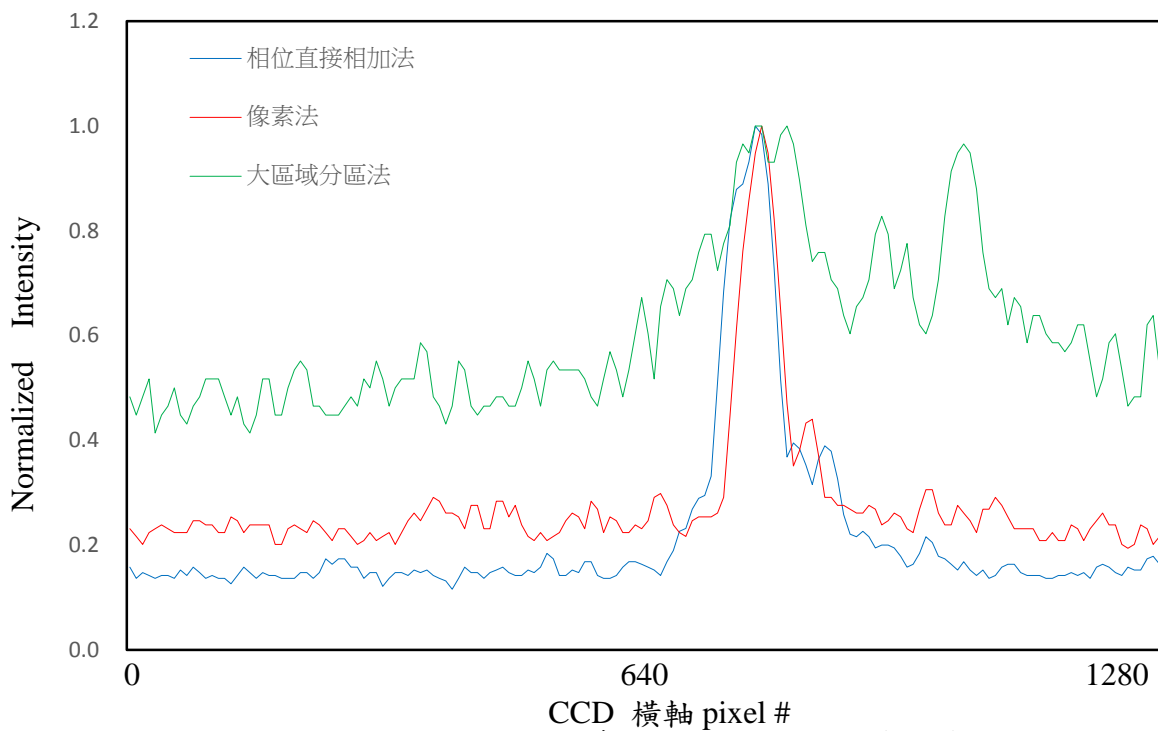


圖 4.20 P4 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

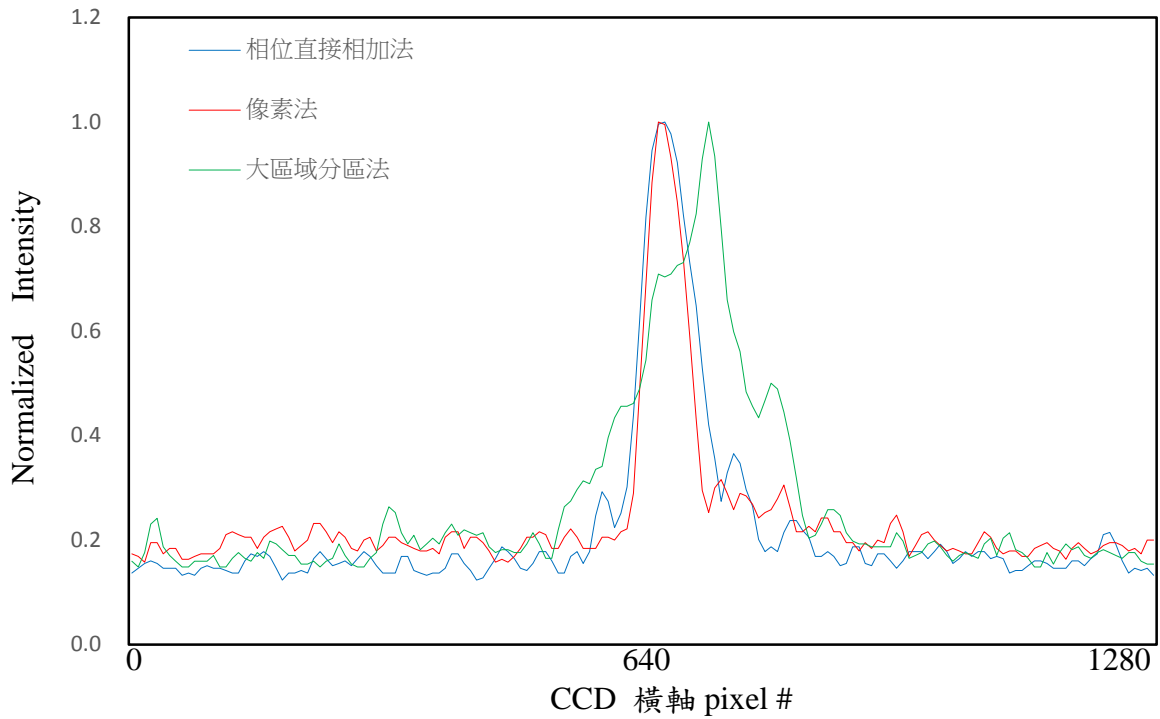


圖 4.21 P5 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

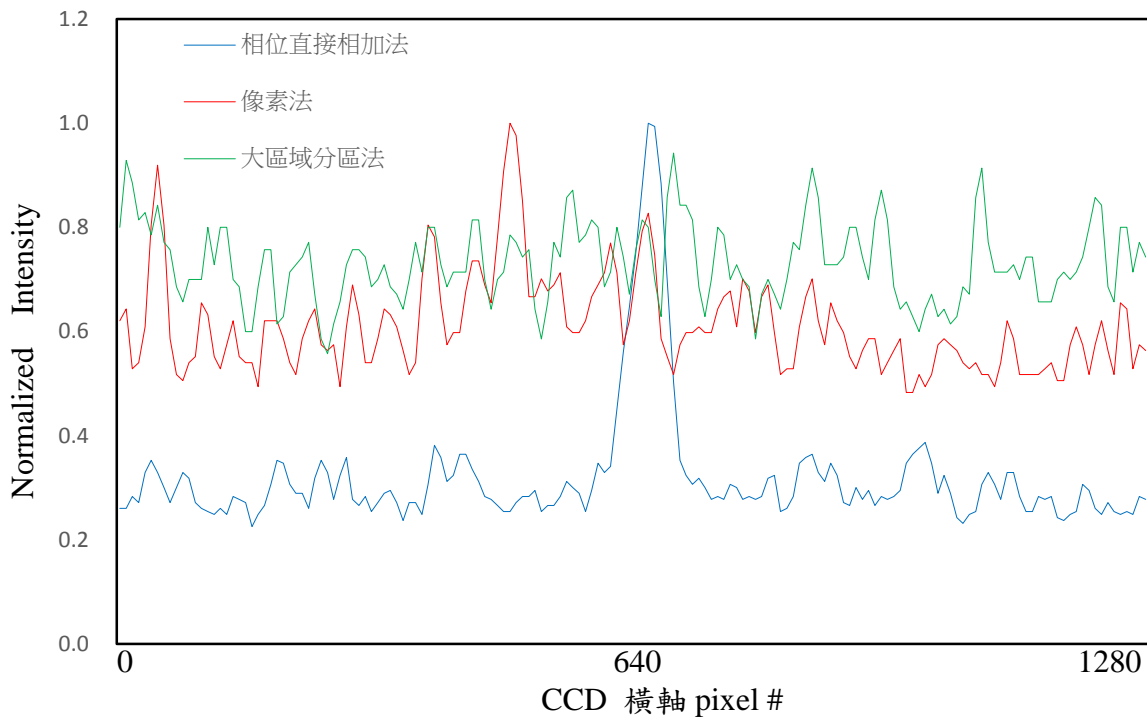


圖 4.22 P6 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

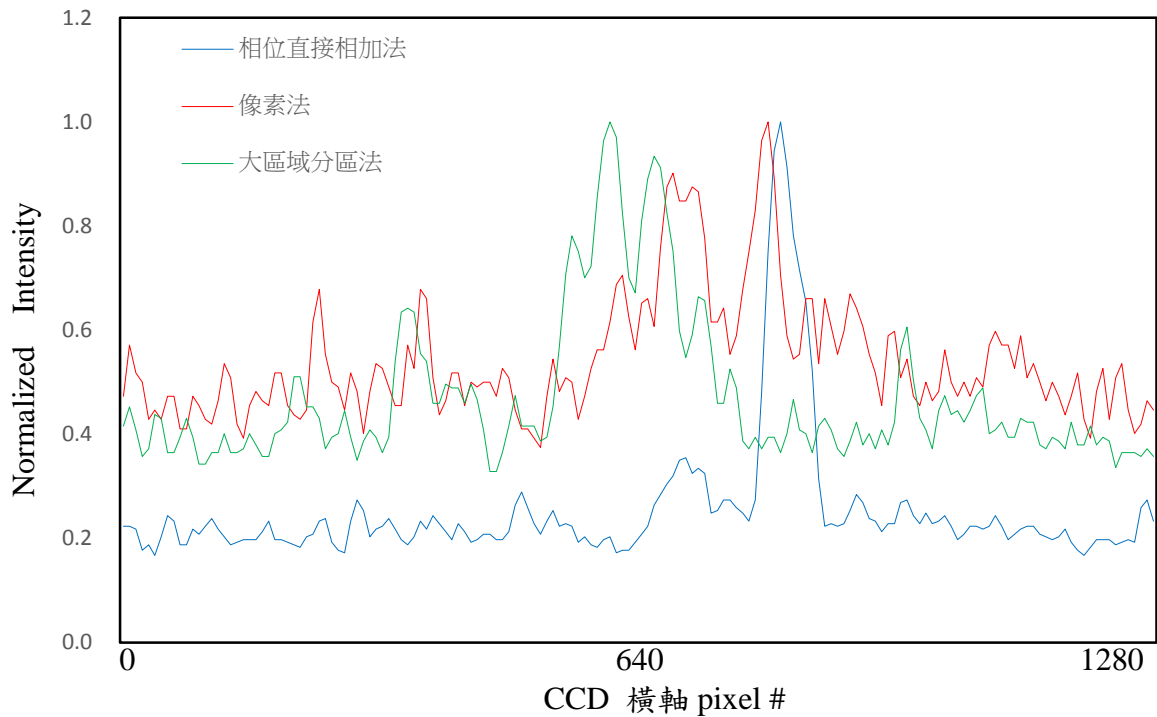


圖 4.23 P7 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

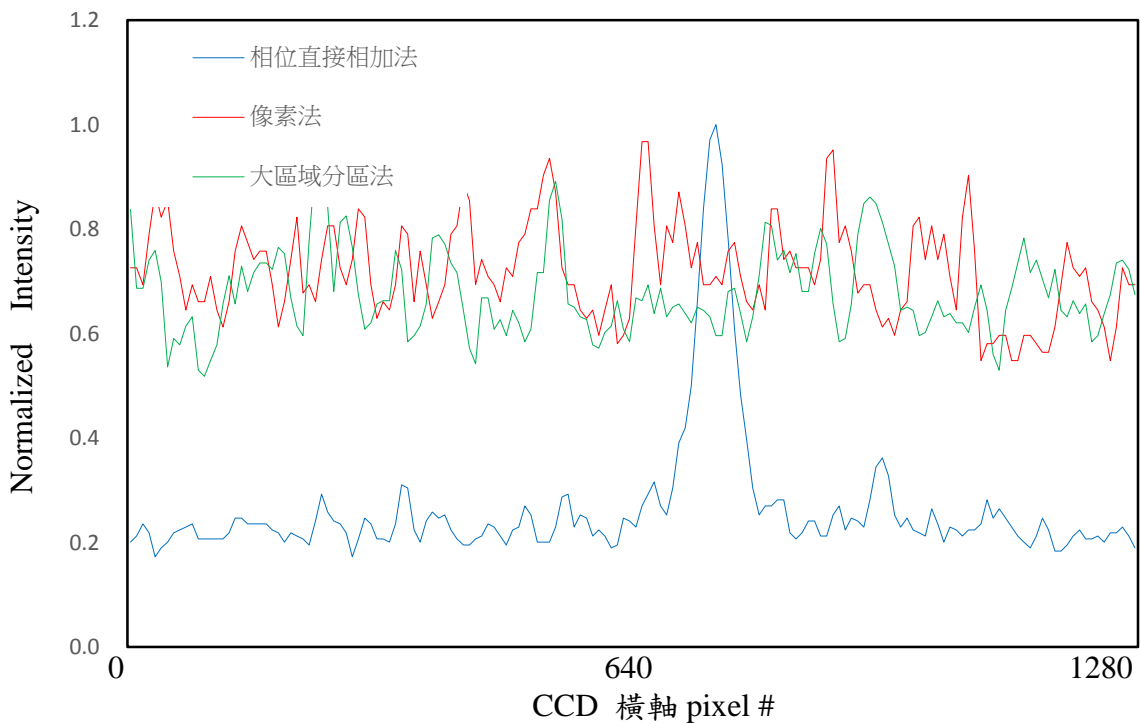


圖 4.24 P8 平面上沿著所設計焦點的光強度分佈

十二離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試：

在實體透鏡焦平面前後每隔 5mm 設計一個離軸電腦全像透鏡的聚焦點，總共設計十二個(如圖 4.25 所示)。由實驗結果跟光強度分佈

圖可以看到相位直接相加法所製作的電腦全像透鏡在各平面的聚焦效果與強度比一樣較另外兩者穩定。像素法聚焦點的光強比很低已經無法分辨。大區域分區法則沒有聚焦的情形

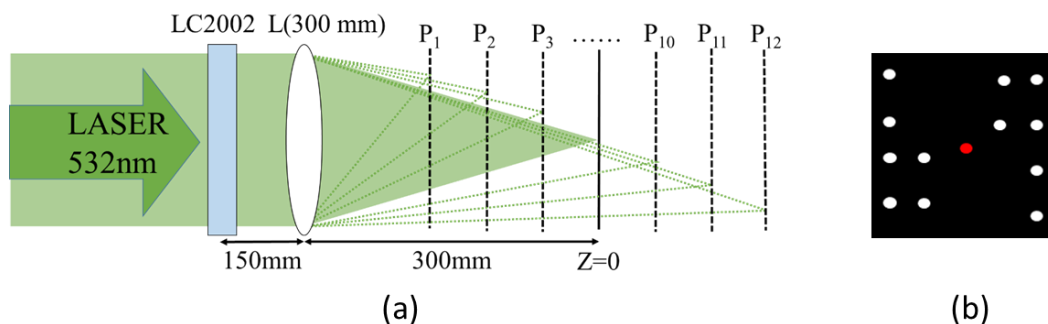


圖 4.25 十二離軸焦點電腦全像透鏡聚焦測試示意圖(a)及聚焦點相對位置示意圖(b)

表 4.5 十二離軸焦點電腦全像透鏡設計焦點面上的光學實驗影像				
相位直接相加法				
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像
	P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	P7 平面光學影像	P8 平面光學影像
P9 平面光學影像	P10 平面光學影像	P11 平面光學影像	P12 平面光學影像	

像素法				
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像
	P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	P7 平面光學影像	P8 平面光學影像
P9 平面光學影像	P10 平面光學影像	P11 平面光學影像	P12 平面光學影像	
大區域分區法				
	P1 平面光學影像	P2 平面光學影像	P3 平面光學影像	P4 平面光學影像
	P5 平面光學影像	P6 平面光學影像	P7 平面光學影像	P8 平面光學影像
P9 平面光學影像	P10 平面光學影像	P11 平面光學影像	P12 平面光學影像	

由以上我們發現在由兩個及四個焦距所組成的多焦電腦全像透鏡下。相位直接相加法的聚焦效果跟大區域分區法差不多。像素法的聚焦效果則較另外兩個略差，但強度比和聚焦光點較另外二者好。

在由六個及六個以上的焦距所組成的多焦電腦全像透鏡下。大區域分區法所製成的電腦全像透鏡其聚焦情形已經失真。而小區域分區法的聚焦效果非常差，已無法分辨聚焦光點與背景訊號。由於我們希望之後用在影像系統上時，可以觀察到較多個平面，所以最後選擇在多個透鏡下聚焦效果及情況較好的相位直接相加法來編寫之後實驗所需的多焦電腦全像透鏡。

4.2 利用 LC20022 的成像實驗系統架設

實驗系統如圖 4.26 所示。光源為波長 532nm 的 Nd:YAG 雷射，經由空間濾波器(S.F.)及透鏡 L_0 後擴束，使雷射光能夠完全的照射整個擴散介質(diffuser)。穿過 diffuser 後經過透鏡 L_1 ($f_1=250$ mm)及透鏡 L_2 ($f_2=75$ mm)後進入物鏡 Obj.1 (60X 物鏡, $f=2.9$ mm)，使得光源能夠聚集照亮樣品。物鏡 Obj.2 (60X 物鏡, $f=2.9$ mm)則為顯微鏡系統中觀察樣品之物鏡，透鏡 L_3 ($f_3=100$ mm)以及 L_4 ($f_4=200$ mm)為 4F 系統，將 LC2002 投影至物鏡 Obj.2 的 Fourier 平面，之後經過透鏡 L_5 ($f_5=400$ mm)成像在 CCD 上面。

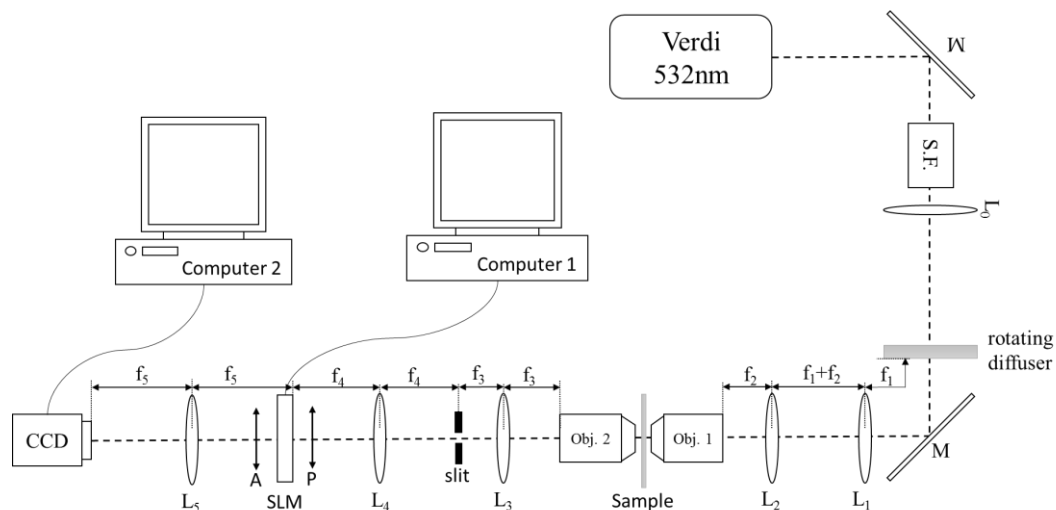


圖 4.26 LC2002 實驗系統架設圖

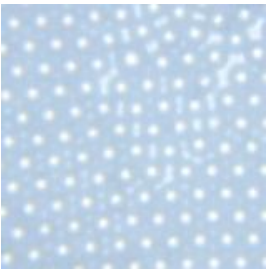
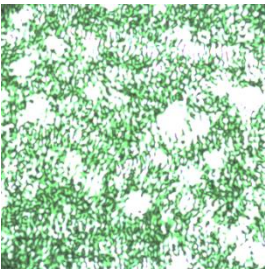
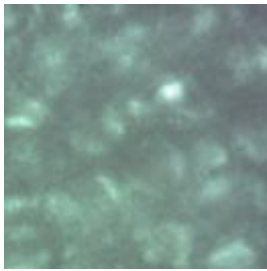
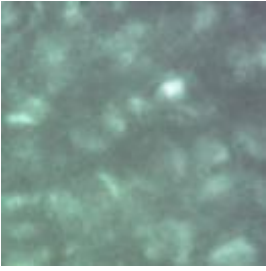
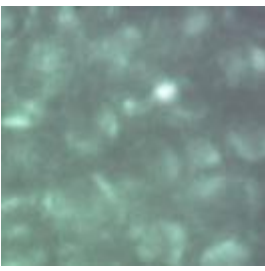
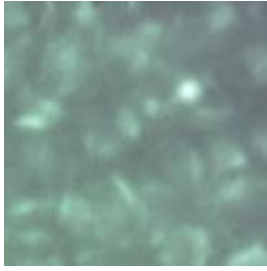
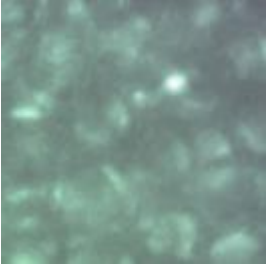
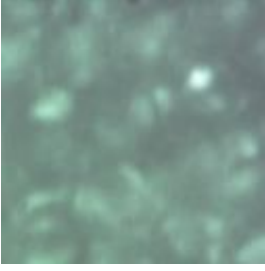
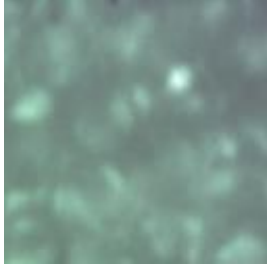
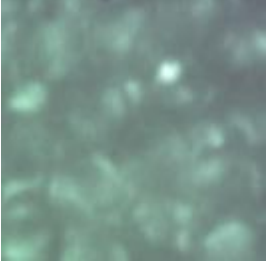
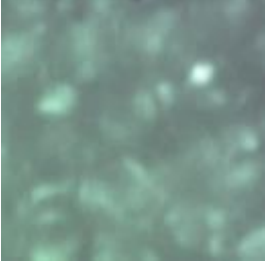
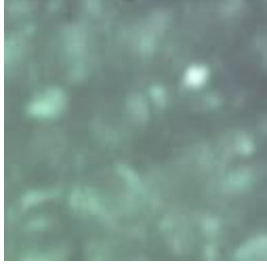
4.3 毛玻璃轉速對影像品質之影響

雷射散斑的存在嚴重影響了成像品質，使的圖像的對比度和解析度下降。這裡我們利用旋轉毛玻璃降低雷射散斑對於影像解析度的影響。並比較毛玻璃在不同轉速下，對影像品質之影響。

這裡用LC2002的成像實驗系統進行實驗測試(圖4.26)，在測試毛玻璃轉速對影像品質影響時，我們在LC2002上面放一張全白的電腦全像片，使影像直接經過LC2002以減少實驗變因。

實驗結果如表4.6，從影片中我們看到當轉速小於3000RPM時影像還是會有細小的顆粒，而當轉速超過3000RPM時影像品質的相差不大。所以之後實驗時毛玻璃轉速都設為3000RPM，以取得良好的影像圖片。

表 4.6 不同轉速之毛玻璃對消去影像雷射光斑實驗結果

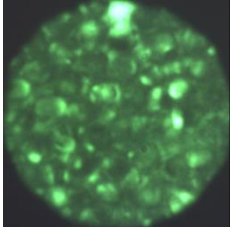
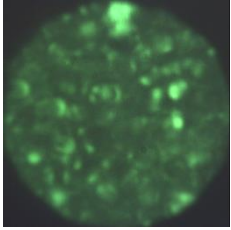
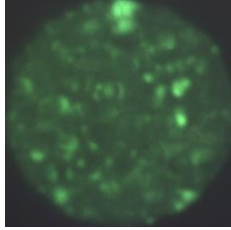
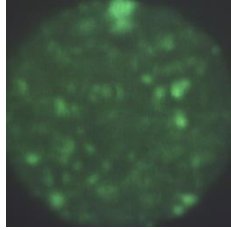
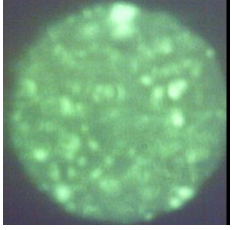
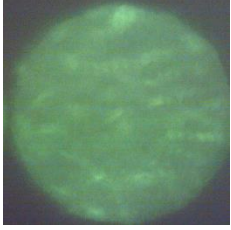
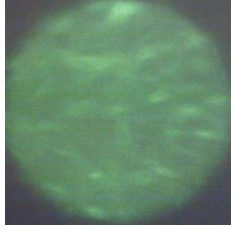
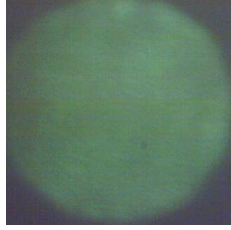
		
一般光學顯微鏡	without Diffuser	diffuser 500 RPM
		
diffuser 1000 RPM	diffuser 1500 RPM	diffuser 2000 RPM
		
diffuser 2500 RPM	diffuser 3000 RPM	diffuser 3500 RPM
		
diffuser 4000 RPM	diffuser 4500 RPM	diffuser 5000 RPM

4.4 使用電腦全像透鏡單一平面景深改變實驗結果

前面我們已經利用旋轉毛玻璃得到清晰的影像，所以在這邊使用電腦全像透鏡改變所觀察之影像深度。首先使用單一焦距的電腦全

像透鏡來確認影像深度改變。我們使用的樣品為 $5\mu\text{m}$ 的 PS 球，將其滴到波片上後將其晾乾沉積後以方便觀察。實驗結果如表 4.7。

之後雖然想繼續測試多焦電腦全像透鏡的成像結果，但 LC2002 繞射效率太低，無法觀察實驗影像。

表 4.7 使用 LC2002 實驗系統測試電腦全像透鏡景深改變實驗結果			
			
$\Delta Z = -1\mu\text{m}$	$\Delta Z = -2\mu\text{m}$	$\Delta Z = -3\mu\text{m}$	$\Delta Z = -4\mu\text{m}$
			
$\Delta Z = 1\mu\text{m}$	$\Delta Z = 2\mu\text{m}$	$\Delta Z = 3\mu\text{m}$	$\Delta Z = 4\mu\text{m}$

第五章

使用反射式液晶顯示器的 多平面影像實驗

在本章中使用 PLUTO 作為實驗中使用的反射式液晶顯示器，並利用第三章所量測之「相位-灰階」曲線來編寫第二章中所述之多焦電腦全像透鏡。最後將編寫好的多焦電腦全像透鏡輸入 PLUTO 中，並觀察樣品在不同深度時的影像。

5.1 實驗系統架設

實驗系統如圖 5-1 所示。光源為波長 532nm 的 Nd:YAG 雷射，經由空間濾波器(S.F.)及透鏡 L_0 後擴束，使雷射光能夠完全的照亮整個擴散介質(diffuser)。穿過 diffuser 後經過透鏡 L_1 ($f_1=100$ mm)及透鏡 L_2 ($f_2=100$ mm)後進入物鏡 Obj.1，使得光源能夠聚集照亮樣品。物鏡 Obj.2 為顯微鏡系統中觀察樣品之物鏡。在我們的實驗系統中，物鏡 Obj.1 及 Obj.2 使用同樣的倍率焦距。透鏡 L_3 ($f_3=250$ mm)以及 L_4 ($f_4=500$ mm)為 4F 系統，將 PLUTO 投影至物鏡 Obj.2 的 Fourier 平面，之後經過透鏡 L_5 ($f_5=400$ mm)成像在 CCD 上面。

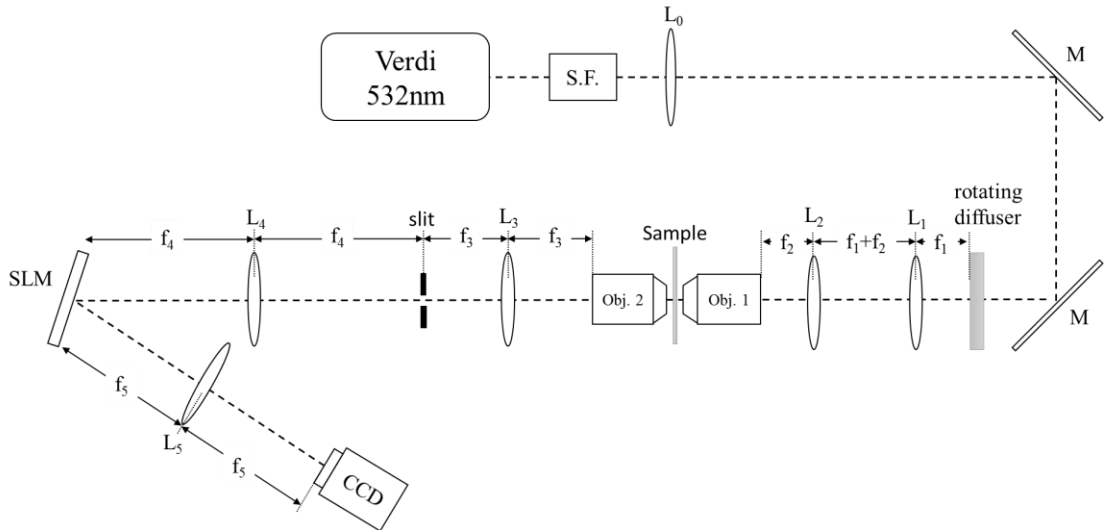


圖 5.1 PLUTO 實驗系統架設

5.2 使用反射式液晶顯示器的多平面影像實驗結果

這裡我們分別以 10X 物鏡及 60X 物鏡做為實驗中所用之物鏡 obj.1 及 2。在使用 10X 物鏡時，系統放大率為 12.5 倍。使用 60X 物鏡時的系統放大率則為 70 倍。樣品為厚度 1mm 的玻片及沉積的 5 μ mPS 球。

5.2.1 使用 10X 物鏡及反射式液晶顯示器的多平面影像實驗結果

使用 10X 物鏡的光學系統系統的放大倍率約為 12.5 倍，樣品為厚度約 1mm 的玻片，並在玻片兩側畫上不同方向的線條來分辨不同深度的平面。我們分別在 PLUTO 上放兩離軸電腦全像透鏡及四離軸電腦全像透鏡所製作成的電腦全像片，觀察樣品兩個不同深度的切面以及四個不同深度的切面的影像。

圖 5.2 為兩離軸電腦全像透鏡的實驗結果，兩個平面的影像深度

相對於原本物鏡焦面的樣品區影像分別為+0.5mm 以及-0.5mm。兩個影像平面的深度相差 1mm，與樣品的厚度差不多。我們可以看到兩平面上的線條方向不同。

圖 5.3 為四離軸電腦全像透鏡的實驗結果，四個平面相對於原本物鏡焦面的影像深度分別為 $\pm 0.5\text{mm}$ ， $\pm 0.25\text{mm}$ 。在 $\pm 0.5\text{mm}$ 的平面一樣可以分別看到兩個方向不同的直線，而在 $\pm 0.25\text{mm}$ 的兩個平面則可以看到相對於 $\pm 0.5\text{mm}$ 兩平面的影像較為模糊不清。

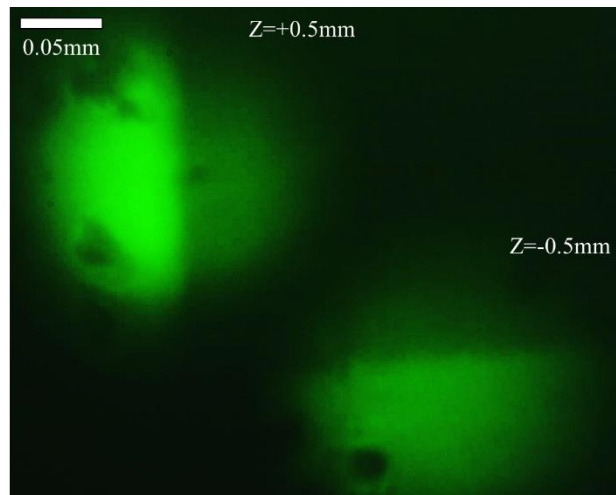


圖 5.2 10X 物鏡下兩離軸全像透鏡的兩平面成像實驗結果

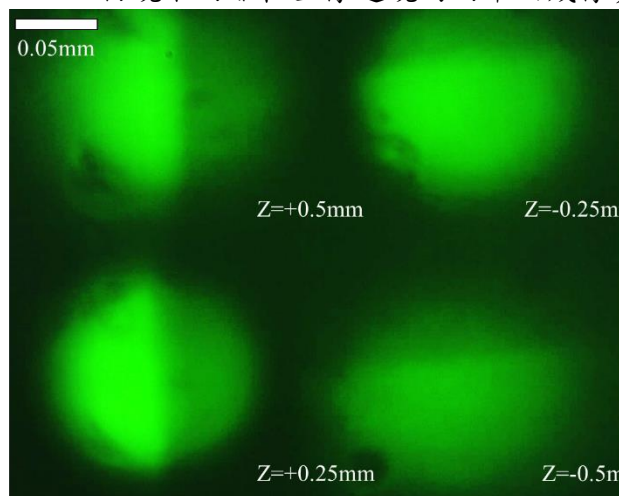


圖 5.3 10X 物鏡下四離軸全像透鏡的四平面成像實驗結果

5.2.2 使用 60X 物鏡及反射式液晶顯示器的多平面影像實驗結果

使用 60X 物鏡的光學系統系統的放大倍率約為 70 倍，樣品是將直徑 $5\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯球溶液滴在玻片上晾乾沉積後再放到多平面顯微鏡系統內觀察。之後再將兩離軸電腦全像透鏡、四離軸電腦全像透鏡以及六離軸電腦全像透鏡放到 PLUTO 上，觀察樣品切面影像。

在使用多平面成像顯微鏡系統進行實驗之前，我們先使用一般光學顯微鏡觀察 $5\mu\text{m}$ PS 球沉積後不同深度的影像(如圖 5.4 所示)，我們將圖 5.4(c)定為 $Z=0$ 時的影像，則圖 5.4(a)(b)為相對於(c)的深度為 $+2\mu\text{m}$ 以及 $+1\mu\text{m}$ ，(d)(e)則為 $-2\mu\text{m}$ 以及 $-1\mu\text{m}$ 的影像。我們再以此影像為基礎確認在多平面成像顯微鏡下所觀察的影像深度。

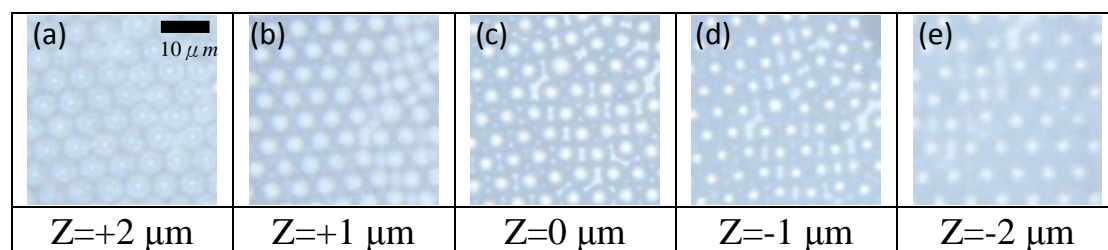


圖 5.4 一般光學顯微鏡下 $5\mu\text{m}$ PS 球沉積後的影像

圖 5.5 為兩離軸電腦全像透鏡的實驗結果，兩個平面的影像深度相對於原本物鏡焦面的影像分別為 $+2.5\mu\text{m}$ 以及 $-2.5\mu\text{m}$ 。圖 5.6 為四離軸電腦全像透鏡的實驗結果，四個平面的影像深度相對於原本物鏡焦面的影像分別為 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 以及 $\pm 1.25\mu\text{m}$ 。圖 5.7 為六離軸電腦全像透鏡的實驗結果，六個平面的影像深度相對於原本物鏡焦面的影像分別為 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 、 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 以及 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 。當透鏡的數量增加的時候，影像的亮度會漸漸的降低。

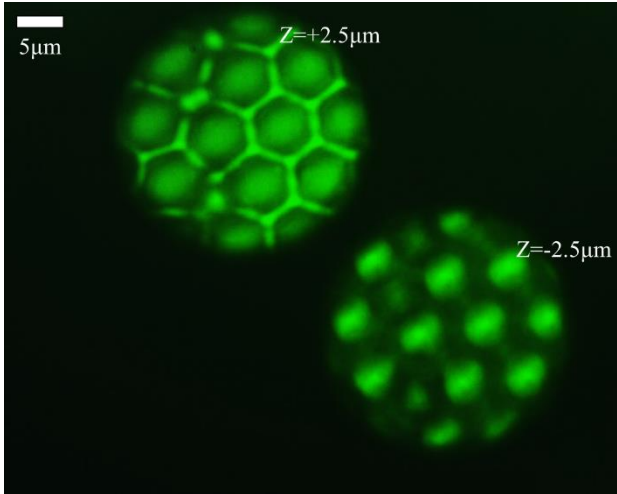


圖 5.5 60X 物鏡下兩離軸全像透鏡的
兩平面成像實驗結果

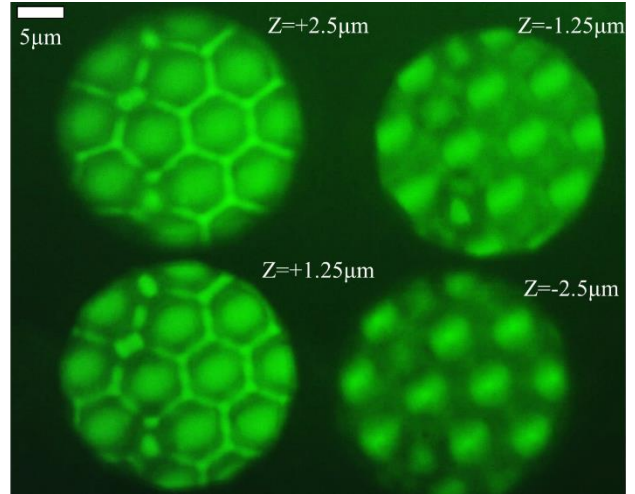


圖 5.7 60X 物鏡下六離軸全像透鏡的
六平面成像實驗結果

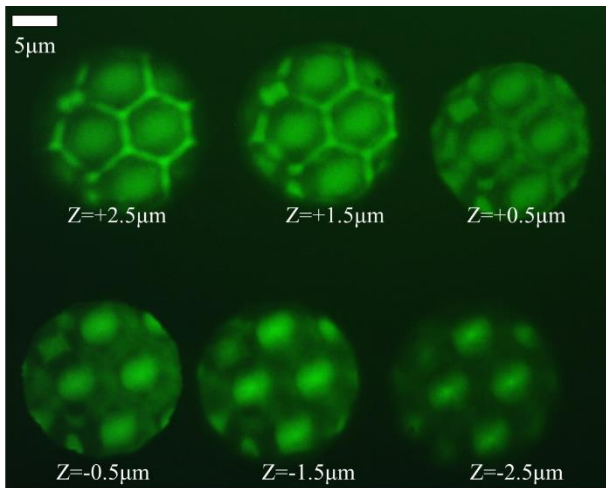


圖 5.6 60X 物鏡下四離軸全像透鏡的
四平面成像實驗結果

第六章

結論

在本論文中，我們利用合成電腦全像透鏡及一實體透鏡組成多焦透鏡組，以改變觀察到的樣品景深位置。我們以推導出的景深改變公式為基礎，用三種方法分別去製作我們所需要的多焦電腦全像透鏡。並利用 LC2002 去比較三種方法所得到的多焦電腦全像透鏡的聚焦效果。經過測試後，相位直接相加法在不同數量的全像透鏡下所都有不錯的聚焦效果，所以我們最後決定選用相位直接相加法來製做多平面成像系統所需要的多焦電腦全像透鏡。

穿透式液晶顯示器 LC2002 在相位調制上，需要搭配偏振片與檢偏片，才能有較佳的相位調制，在光強度的利用以及繞射效率上皆低於反射式液晶顯示器 PLUTO。所以，之後的多景深平面影像實驗則是使用 PLUTO 來進行。

另外我們也測試了在不同轉速下毛玻璃消去影像雷射光斑的效果，發現當毛玻璃轉速超過 3000 以上時，影像的品質相差不大。

最後我們分別設計了三組多焦電腦全像透鏡，並以 PLUTO 設計樣品，以觀察樣品在兩個、四個以及六個不同景深之平面的影像。實驗結果顯示，所成像的平面越多，繞射效率越下降，導致影像看不清楚。未來可以用不同的合成計算方式，或是優化法來提高繞射效率，以使此系統在觀測樣品時，在深度方向可以有較高的解析度。

參考資料

- [1]. B. R. Brown, A. W. Lohmann, “Computer-generated Binary Holograms,” IBM J. RES. DEVELOP, pp. 160 (1969).
- [2]. 林政宏,“相位式電腦全像片之研究”,國立臺灣師範大學,光電科技研究所(2003).
- [3]. M. Makowski, M. Sypek, I. Ducin, A. Fajst, A. Siemion, J. Suszek, A. Kolodziejczyk, “Experimental evaluation of a full-color compact lensless holographic display,” Opt. Express.17, 20840–20846 (2009).
- [4]. 黃鈞正, 吳崇安, 邱爾德, “光學嵌住之技術簡介,” 物理雙月刊, 22 卷 5 期, pp. 477-484 (2000).
- [5]. 龔昱翰,“大腸桿菌在光鉗作用力下運動的分析”,私立輔仁大學,物理研究所 (2007).
- [6]. 陳日康,“純相位式電腦全像術及全像光鉗再桿狀粒子旋轉控制之研究”,國立中央大學,光電科學與工程學系/研究所(2012).
- [7]. C. Maurer, S. Khan, S. Fass, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, “Depth of field multiplexing in microscopy,” Opt. Express, 18, 3023-3034,(2010).
- [8]. S. Djidel, J. K. Gansel, H. I. Campbell, and A. H. Greenaway, “High-speed, 3-dimensional, telecentric imaging,” Opt. Express 14, 8269–8277 (2006).
- [9]. 張耿維,“純相位繞射光學元件的設計並以液晶空間光調制器實現之”, 國立中央大學, 光電科學研究所(2005).
- [10]. 田民波, “TFT 液晶顯示原理與技術”,五南出版社,(2008).
- [11]. HOLOEYE, LC 2002 Spatial Light Modulator – Microdisplay Features,
URL http://www.holoeye.com/spatial_light_modulator_lc_2002.html
- [12]. HOLOEYE, Pluto Spatial Light Modulator – Microdisplay Features,
URL http://www.holoeye.com/spatial_light_modulators_pluto.html
- [13]. HOLOEYE, Pluto Spatial Light Modulator – Microdisplay Features,
URL http://www.holoeye.com/spatial_light_modulators_pluto.html
- [14]. 劉軒宇,“漩渦光旋轉奈米鐵粒子簇之研究”,私立輔仁大學,物理研究所(2012).