

國立台北科技大學

光電工程系(所)

專題研究報告

以 LCoS 空間光調變器實現三維影像投影之研究

編寫人：謝博凱

指導老師：徐巍峰教授

民國 103 年 6 月 9 日

1. Introduction

1.1 研究起源

夕陽西下的紅色雲彩、雨後有如天國階梯一般的雲隙光，光在大自然所產生的各種現象令人驚嘆，沙漠中真假難分的海市蜃樓，有如觸手可及的呈現在眼中，雖然只是很簡單的光學原理所產生的事物，但是在眼中卻如此動人，科學在很多領域都借鏡大自然的事物而演化，再仔細觀察之後，學習如何模仿出相同的結果，最後創造出更令人驚奇的事物。而自然現象中，人類的眼睛所擷取外在世界的三維影像，提供人類對環境的安全判斷、對撿拾物品的精準判斷，可說是人類發展的基本必要條件，眼睛常常被譽為是靈魂之窗，如果人類沒有眼睛，那就不會有今日的世界。

人眼之所以能夠擷取三維影像，是因為能夠判斷真實物體的深度訊息，但在傳統的影像儲存、顯示技術中，物體或景象是被二維的平面介質(如照片、平面顯示器等)所顯示，二維影像中並不含有深度的資訊，也就無法重建三維的影像。多年來，這樣的三維影像重建技術一直是諸多學者努力的目標，例如全像術，然而，近年的光電電子技術進步神速，新的改良技術和方法不斷被提出來，或許在不久的未來，我們人類就能開發出方便、又真正能重建三維影像的技術和光電系統。

1.2 研究動機

藉由光學元件(OE)組合而出的光學系統，我們可以模擬出各種於自然之中常見的現象，而其中包含很常見的簡單光學現象(折射、反射)，小飛碟(反射式光學全像系統)利用二次反射重建出的影像雖然有很多限制，但是看到懸浮於半空之中的立體影像，令人深深感受到課堂投影片所無法給予的震撼。就是因為立體影像給人如此的視覺享受，就連電影都利用”立體感”給人更強烈的真實感，然而，其中的原理也不過是利用兩眼的視差所造成，這種利用大腦的錯覺所達到的效果，確實可以給人比起一般電影更多的視覺體驗，可是這種方法容易造成人眼睛相當的疲憊感。如果能夠利用投影創造一個三維影像，不但不用擔心眼睛所受到的負擔，想必也能夠給人帶來更大的衝擊力，也能讓人有不同以往的感受。

1.3 研究目標

本專題利用 LCoS 空間光調變器將雷射光投射出立體影像，藉由輸入二維的相位影像產生出三維的影像，再配合連續的影像輸入，更可讓人眼感受到動態的視覺效果，如:立體輪廓的重建、走路的小綠人、月亮的盈缺、...等影像於自由曲面上。除了完成三維影像的投影外，未來還能深入探討投影光的解析度以及繞射圖形的背景對比度。

2.Method

2.1 實踐方法

我們使用 LCoS 來進行光的相位調變以達到繞射成像，給予系統一個規劃完成的繞射圖檔(可以單張、多張連續播放)，此圖檔為 0~255 階的光振幅分布對應相位調變的多寡，LCoS 會根據圖片調整對應的電壓來形成相位調變，圖片可利用 lenslet array 的方式來繪製，如果圖片以多個相同形狀，卻微微改變焦平面距離，使投影成像出一個”有厚度”的物件，就有如立體影像一般，最為重點的圖片形狀則是利用傅氏光學的相位調變規畫所需要之繞射圖形，再從 Matlab 描繪並產生繞射圖形，最後藉由在個人電腦的 LCoS 操作介面中設定參數，如此便可以讓繞射圖形在成像面投射出三維影像。

2.2 Experimental theory

2.2.1 Fourier Optics

我們有興趣的地方在於光波傳播到某處的分布狀態，經常在平面與平面之間逐一分析，如圖 1 所示，藉由計算光場(光的電場振幅)在空間的分布來估算像平面的狀態。

首先，我們由 Rayleigh-Sommerfeld (RS) diffraction formula 開始，其公式為：

$$u_{(P_0)} = \frac{1}{j\lambda} \iint_A u_{(P_1)} \frac{e^{jk r_{01}}}{r_{01}} \cos(n, r_{01}) dA$$

參考圖 1 所示，Sommerfeld 方程式有著觀念容易使人接受的優點，將 A 平面視為由非常多點光源所構成，點光源各自所發出的球面波抵達某平面的光場疊加。

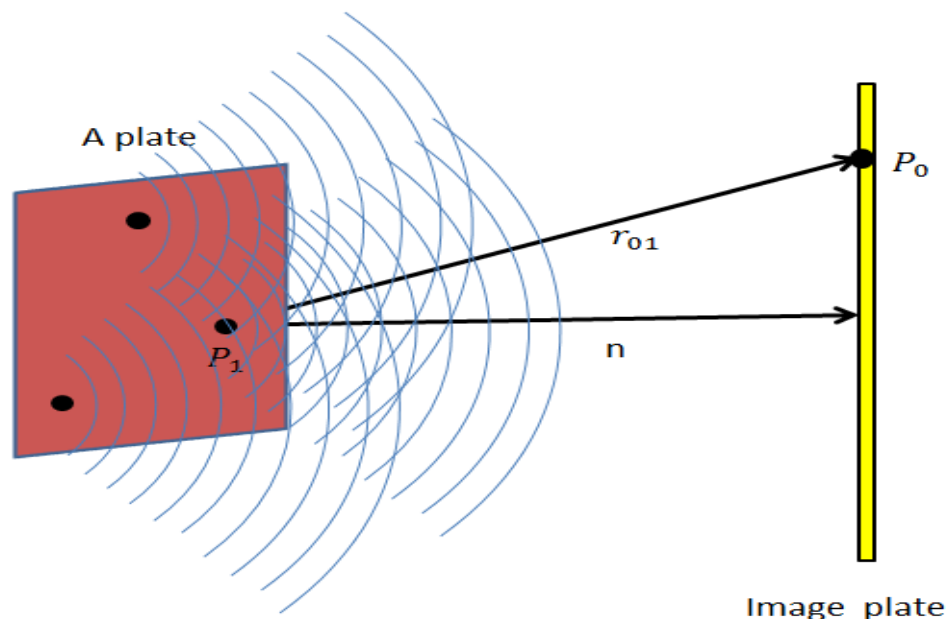


圖 1. Sommerfeld 方程式示意圖

RS 公式的整體概念就有如 Huygens principle，但是也因為如此，導致了 Sommerfeld 在繞射成像的分析上顯得相當緩慢，且有分析上的限制

(a)無法分析距離 A 平面太近的繞射光場分布

(b)在一個波長的距離內有過大的光場變化

由於 RS 方程式分析(or 計算)過於緩慢，所以簡化成兩個較常用的方程式 Fresnel diffraction formula 和適用於遠場的 Fraunhofer diffraction formula。

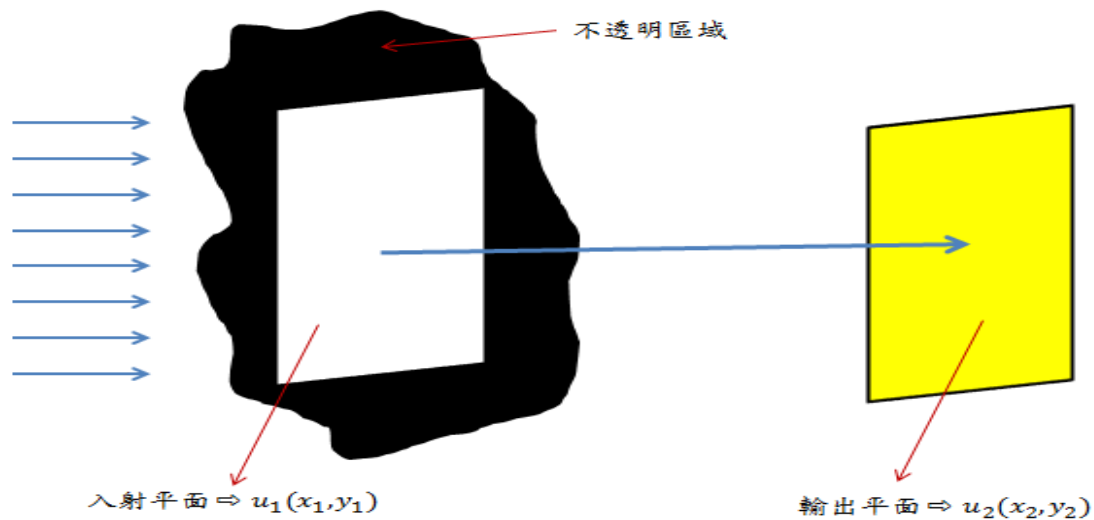


圖 2.平面波繞射成像示意圖

在 x_1 - y_1 平面上，一個帶有初始振幅變化的波前 u_1 ，在經過一段距離 z 的移動之後，在 x_2 - y_2 輸出平面的光場分布表示為 u_2 ，如圖 2 所示，考慮近似值(去除雙重積分中的過小值)之後可得出 Fresnel diffraction formula 為

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint_A u_1(x_1, y_1) e^{j\frac{k}{2z}[(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2]} dx_1 dy_1$$

基於是由近似值所得出的方程式所以必須滿足：

$$\frac{\pi z}{4\lambda} \left[\left(\frac{x_2 - x_1}{z} \right)^2 + \left(\frac{y_2 - y_1}{z} \right)^2 \right]_{\max} \ll 1$$

假設 $f_x = x_2 \frac{1}{\lambda z}$ 、 $f_y = y_2 \frac{1}{\lambda z}$ 、 $f = z$ ，則傅立葉轉換為

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{1}{j\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} u_1(x_1, y_1) e^{[-j2\pi(x_1 f_x + y_1 f_y)]} dx_1 dy_1$$

如果繞射平面距離觀察平面非常的遠，當條件 $\frac{k}{2z}(x_1^2 + y_1^2)_{max} \ll 1$ 成立時，

就可能進一步得出 Fraunhofer 繞射公式：

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{[j\frac{k}{2z}(x_2^2 + y_2^2)]} \iint_{-\infty}^{\infty} u_1(x_1, y_1) e^{[-j2\pi(x_1 \frac{x_2}{\lambda z} + y_1 \frac{y_2}{\lambda z})]} dx_1 dy_1$$

在一般實驗室或光學裝置上是不可能達成 Fraunhofer 繞射公式的限制條件，可是藉由在平面之間加上一個凸透鏡，就能將非常遠的像平面拉到透鏡的後焦面。

考慮波前振幅的穿越一個光學元件所產生的相位調變，如圖 3 所示。

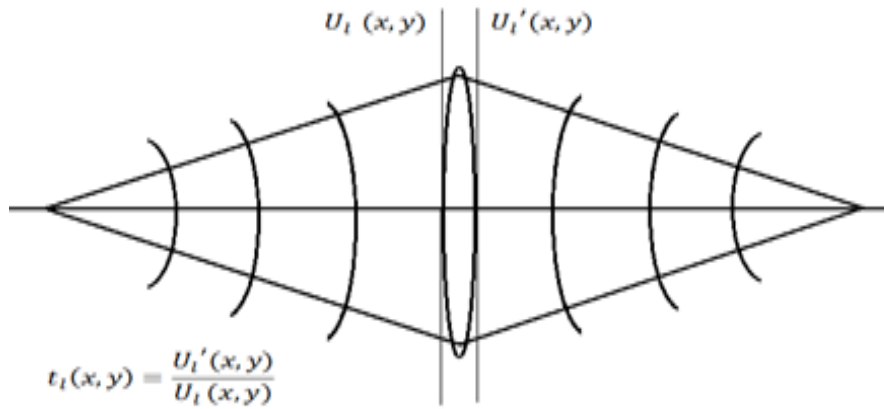


圖 3. 波前振幅穿越凸透鏡所產生的相位調變

假設凸透鏡的複數振幅穿透函數為

$$t_l(x, y) = e^{j(kL(x, y))} = e^{jk\Delta_0} e^{jk[(n-1)\Delta(x, y)]}$$

其中， n 為凸透鏡的折射率， $\Delta(x, y)$ 為凸透鏡的厚度函數， k 為波數。又因為 $h^2 = x^2 + y^2$ 、 $\Delta_0 \equiv 0$ ，故凸透鏡複數振幅穿透函數可以寫為

$$t_l(x, y) = e^{jk[n\Delta_0 - \frac{h^2}{2f}]} = e^{-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)}$$

由於 LCoS 的繞射孔徑大概只有 $9\mu\text{m}$ ，而我們的系統光路有數十公分甚至到數公尺，於是這個繞射成像相當於一個遠場繞射，如圖 4 所示，於是使用 Fraunhofer 繞射公式，如下圖所示：

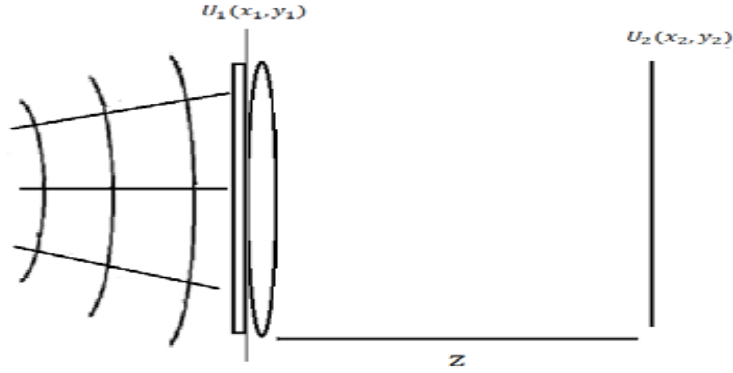


圖 4. 遠場繞射示意圖

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{[j\frac{k}{2z}(x_2^2 + y_2^2)]} \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) e^{[-j2\pi(x_1\frac{x_2}{\lambda z} + y_1\frac{y_2}{\lambda z})]} dx_1 dy_1$$

2.2.2 Frsenel lenslet array

利用上述的公式 $e^{-j\frac{k}{2f}(x^2+y^2)}$ 作為光學元件的相位調變量計算，實驗中為了讓光線聚焦成像而使用凸透鏡，當一個平面光波前通過一個凸透鏡，若將相位延遲量較大的地方假設顯示為白色，反之則顯示黑色，以 255 灰階表示的波前相位延遲，則則可得到如圖 5 的連續相位表示圖。

如果利用 Frsenel lens 的設計方式，則可以設計出每固定 2π 相位重複一次的波前相位調變，這時候就會變成一個多焦點聚焦的相位調變元件，如圖 6。

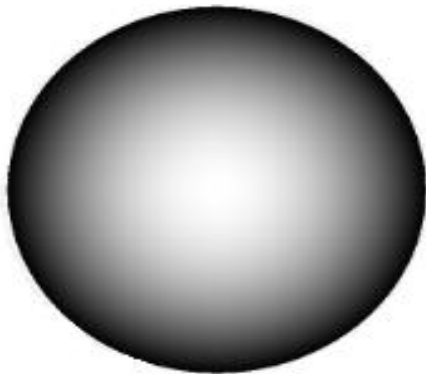


圖 5.凸透鏡

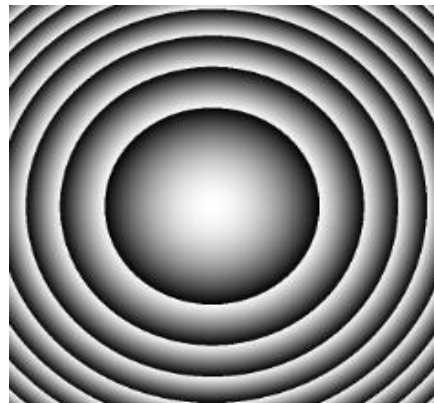


圖 6. Frsenel lens

藉由擷取 Fresnel lens 的部分來組成我們所需要的 Fresnel lenslet array，經由圖片的設計來控制焦點聚焦的距離以及位置，就能以”光點”形成一張點陣圖，如圖 7 所示，至於點陣圖的解析度是往後可以探究的課題。

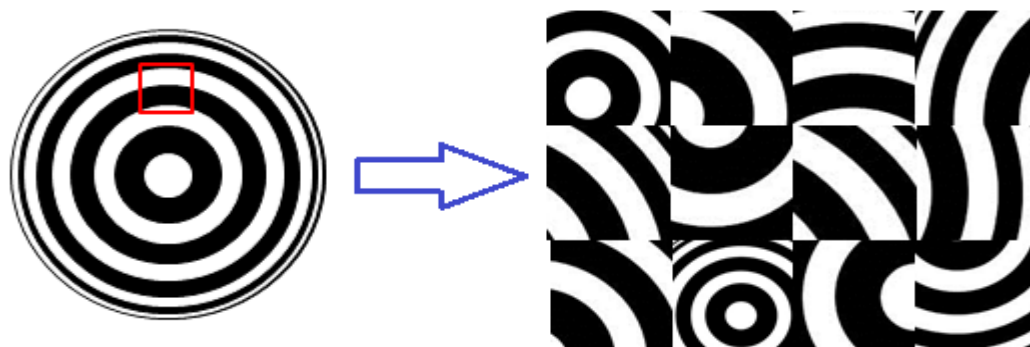


圖 7. 由 Fresnel zone lens 構成透鏡陣列示意圖

2.3 Liquid Crystal on Silicon (LCoS)空間光調變器 (Spatial Light Modulator, SLM)

空間光波調製器(SLM)的定義是能夠對入射的光波振幅、相位進行調變的光學元件。SLM 調變的方式大概可分成下列三種:

- (a) 相位型：當入射光波經過相位型SLM後，光波振幅不變，而相位會被調變。
- (b) 振幅型：當入射光波經過振幅型SLM後，光波相位不變，而振幅會被調變。
- (c) 理想型：當入射光波經過理想型SLM後，振幅及相位均會被調變，也就可以對入射光波進行完全的調變。

在我們的實驗室之中有兩台SLM，分別為LC-R2500以及PLUTO，而其中根據液晶配向的方式，如圖8所示:

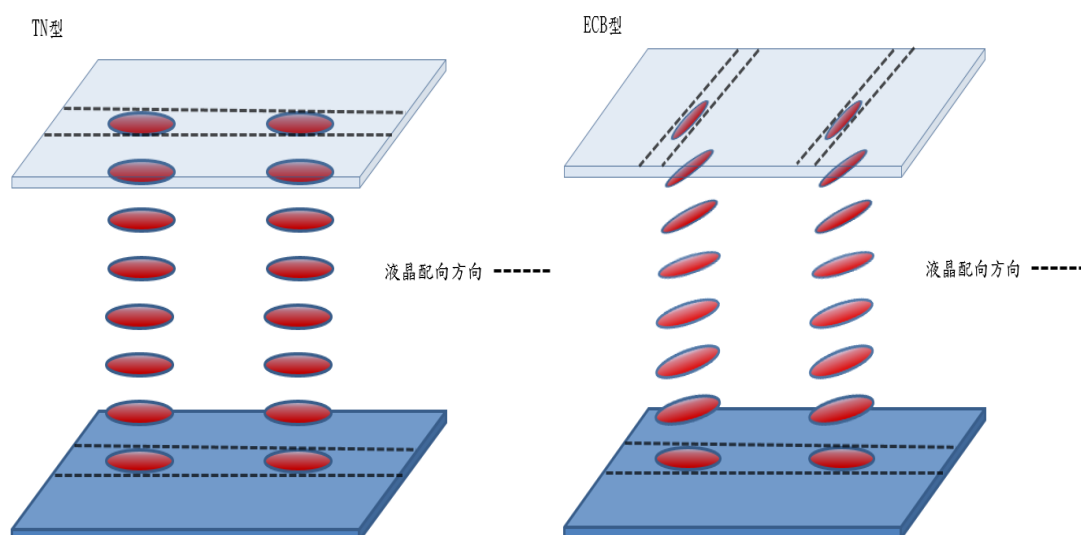


圖8. LCoS SLM液晶配向的示意圖

LC-R2500為扭曲向外型(TN型)，PLUTO為電場控制雙折射型(ECB型)，因此可以發現這兩台的初始配向設定就相差了90度(慢軸相差90度)。

LCoS 有分成兩種:透射式與反射式，前者的好處是光路系統架構好處理，後者是相位調變較方便，LCoS 是藉由外加電壓控制液晶分子的傾角，此時入射光不再與液晶的慢軸平行，於是根據傾角的不同使得 o-ray 和 e-ray 的行進速度改變，也就造成雙折射現象的產生，因此可以達到相位延遲之目的，如圖 9 所示。

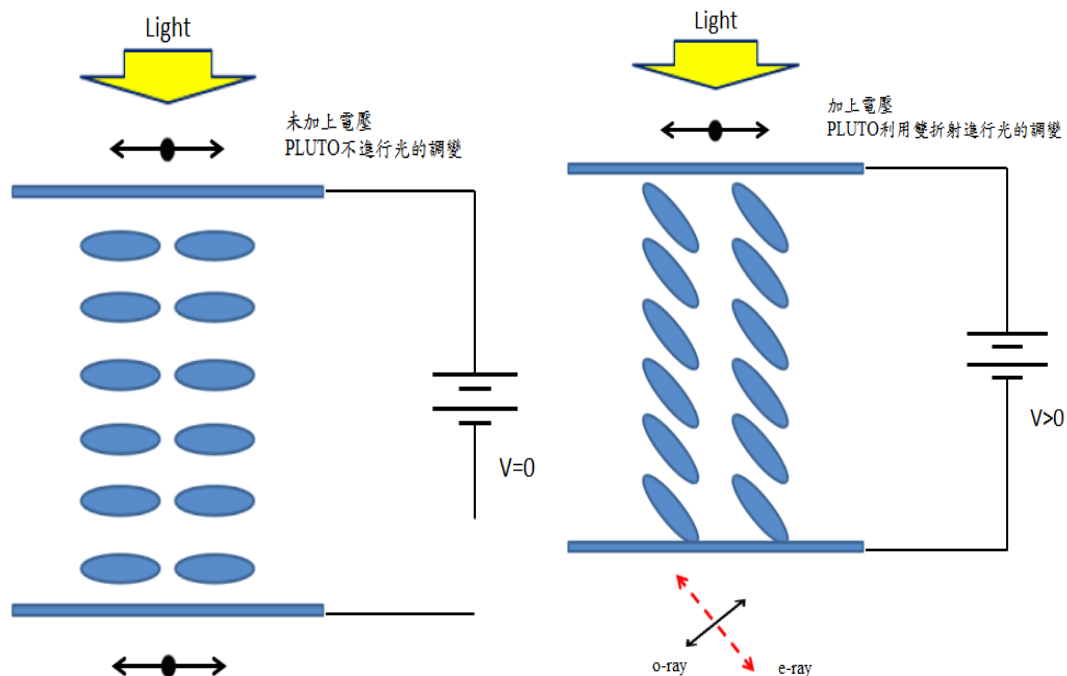


圖 9. LCoS SLM 外加電壓調變相位示意

Pluto 是一台反射式的 LCoS，其調變量根據前幾年實驗室的量測，大約有 3π 的調變量，調變量與電壓的對應變化速度根據液晶傾角的不同會有所不同，此處與圖片可調整的最大解析度有關，Pluto 在 HoloEye 操作介面的初始設定白色程度與調變量成正比變化，這與我們在 Frsenel lens 的設定相同。

LCoS 在其他方面也有相當的運用，其最初的發展用途在於 LED 面板，如圖 10 所示，讓面板具有大螢幕、高清晰度、高品質圖像質量、成本較低等優點，後來 Sony 的矽晶反射顯示(Silicon X-tal Reflective Display)和 JVC 的數位式直接驅動圖像放大器讓 LCoS 步入商業化，其中 JVC 將其運用在汽車的儀表板前立體顯示，僅靠一片玻璃板就可顯示。

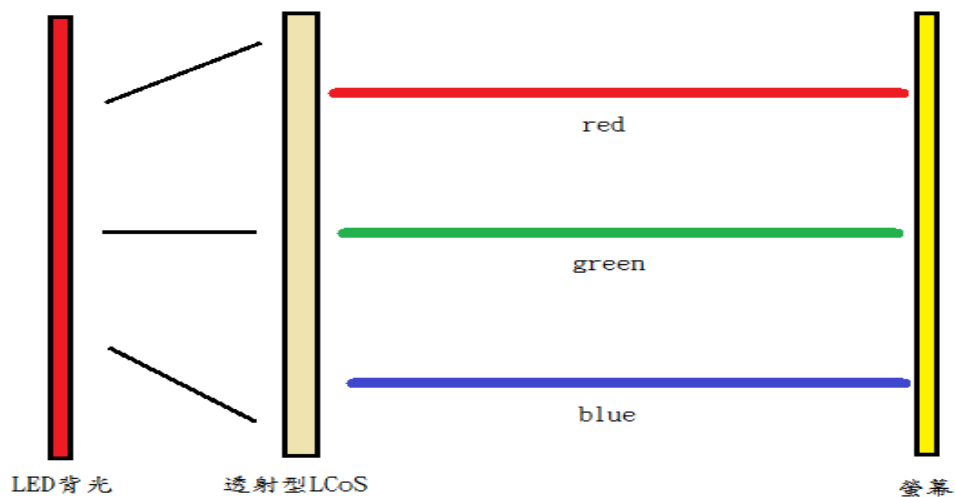


圖 10.LCoS 改良式面板示意圖

在醫療上，自從光學技術應用越來越廣泛，使得醫療上的選擇更多元也更進步，其中利用光源引發毒性消滅病毒的光動力療法，在傅立葉空間分布的運算下，藉由 LCoS 控制光源的區域，更能提高治療上的精準度，如圖 11 所示。

因為 LCoS 的微小尺寸以及低功率損耗，使其也運用在微型裝置上方，google 眼鏡也是採用了 LCoS 運用的設計。

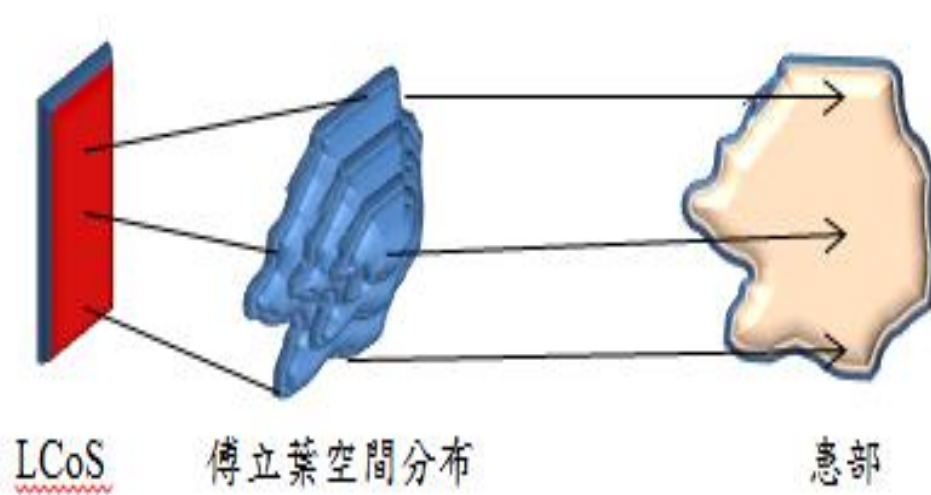


圖 11. LCoS SLM 在醫療上之應用

3. Pattern design

3.1 Fresnel lenslet array design by

利用繪圖軟體 Matlab 來繪製所需的圖像，Matlab 的語法和 C 語言非常相似，而且在某些地方比起 C 語言還更接近自然語言的程度，繪圖是藉由方程式的運算數值儲存到矩陣之中，再將矩陣的數值讀取出來描繪。

於是我們可利用 2.1 之中的公式 $-\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)$ 來繪製 Fresnel lens，然後再將數個 Fresnel lens 的部分矩陣數值放置在更大的矩陣之中，其大小根據像素而定，以 Pluto 來說是 1920*1080，將拼湊好的矩陣數值描繪出來就可得出目標圖形，再來就是輸出圖片檔需要利用語法來重新將數值規劃成 0~255 階層，然後用 uint8 去做圖片的格式處理，避免造成漸層變化的區域產生錯誤，如圖 12。

至於拼湊出想要的繞射影像的方法，首先考慮 SLM 的可調變區域大小，如圖 13 所示。也就是我們所能規畫出的影像大小為 20×30mm，因此我們考慮將像素 1080×1920mm 和實際影像的相對位置作 Fresnel lenslet array 的規劃

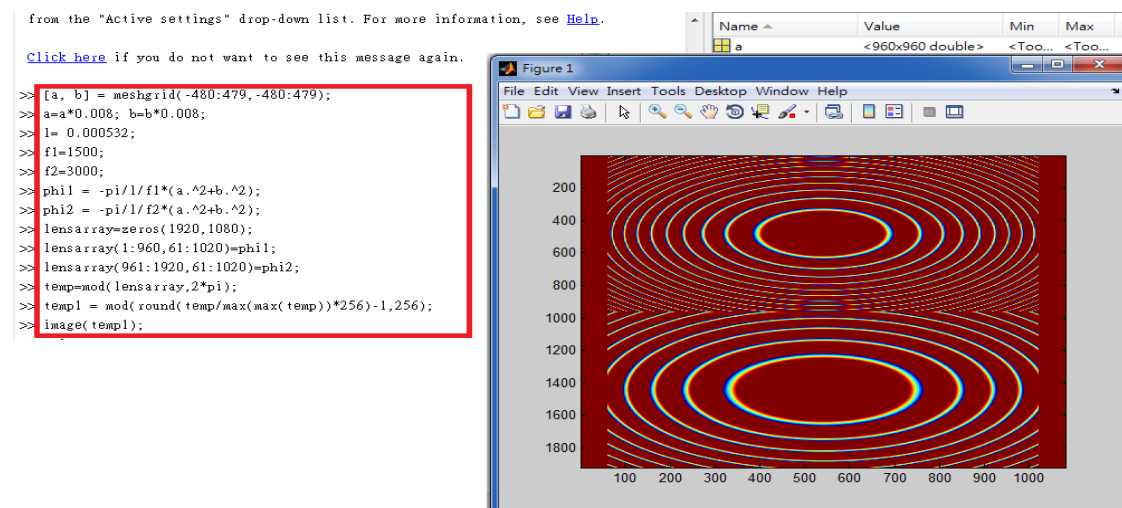


圖 12.MATLAB 軟體模擬圖

Range of SLM screen

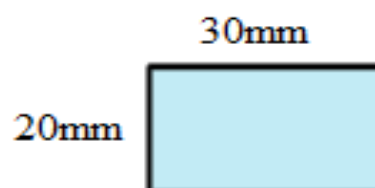


圖 13.SLM 的調變區域示意圖

為了在 20×30mm 的範圍內顯示出足以組合出小綠人的光點，光點分布的位置以座標作規劃，而座標軸定義以 Matlab 的程式內部定義為準，所以我們得知左上角為最小值，若直接以 SLM 屏幕來看，可知其中一點的中心座標如圖 14 之 a. 所示，因為我們是將像素 1080×1920mm 的影像作為輸入影像，故我們將其座標作等比例放大，如圖 14 之 b. 所示。

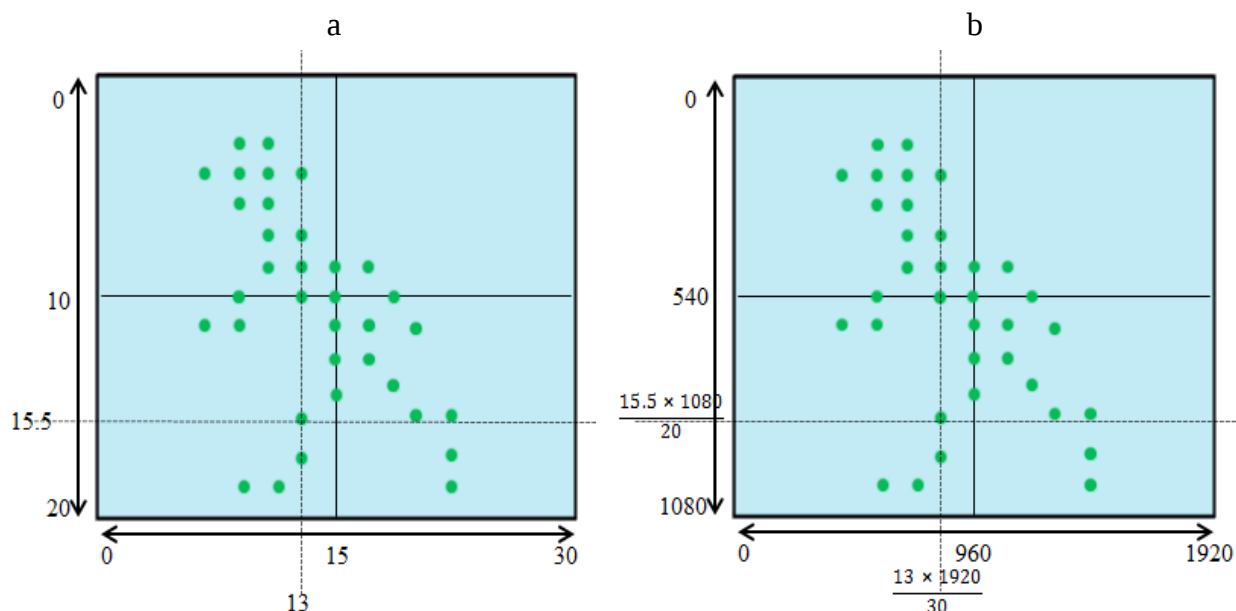


圖 14.規劃光點分布於 SLM 調變區域示意圖

現在我們得知任一光點的中心座標，接下來需要將聚焦在此位置的繞射影像切割放置，而且小綠人一共由 35 個光點組成，於是我們將像素範圍作 36 份的最大公倍數切割，且考慮到目前實驗所採用之 Fresnel lens 為正方形(x、y 軸曲率相同)，因此我們使用 12×6 的分割方式，每個矩陣大小(像素大小)為 160×160mm，其中縱軸範圍 61~1080、橫軸範圍 1~1920，如圖 15 所示。

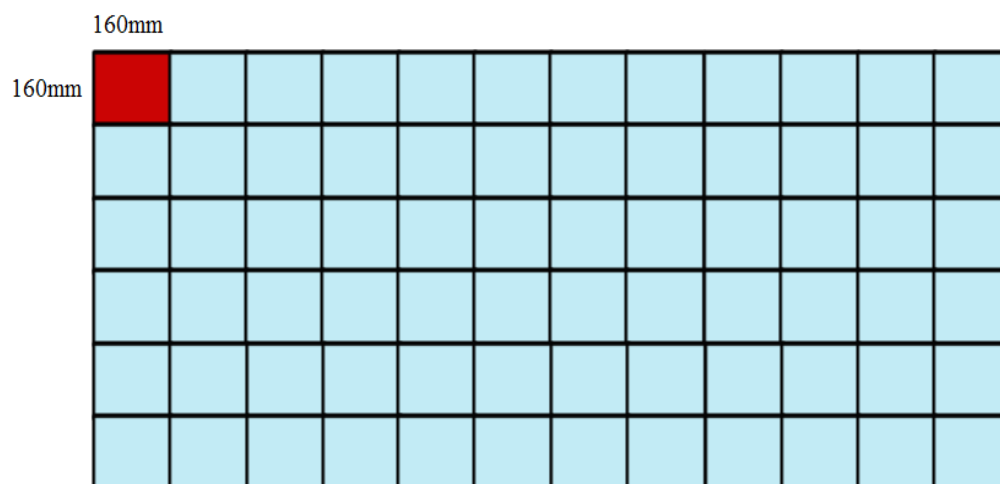


圖 15.劃分 Fresnel lens 區域大小示意圖

然後假設將 Fresnel lens 的中心(也就是光點聚焦處)與目標聚焦處重疊，如圖 16 所示。

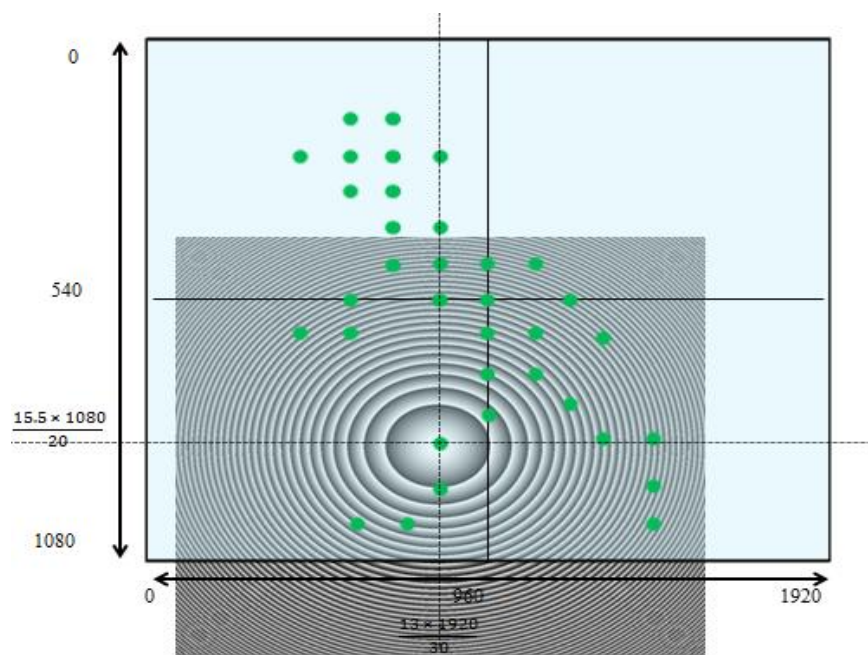


圖 16.尋找光點對應之座標中心示意圖

然後將相同的光點圖換成位置完全對應 12×6 的分割圖，如圖 17，於是便可以找出其中一塊能夠聚焦到目標光點的繞射影像(如紅框圈取範圍)，如此重複找出 35 個光點，便可以組合出所需要的小綠人輸入用繞射影像。

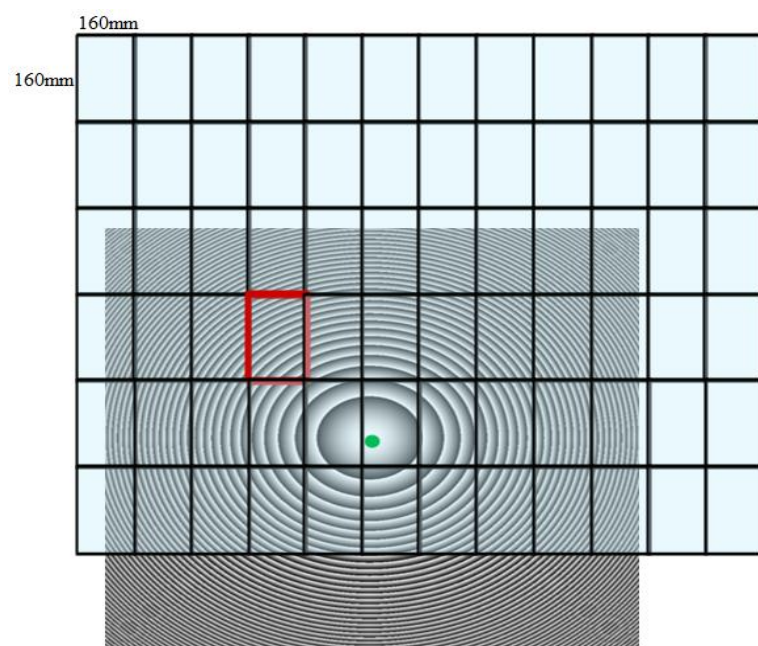


圖 17.選擇所需要的 Fresnel lens 部分示意圖

4.Experiment

4.1 Experimental Setup

實驗架構如圖 18:

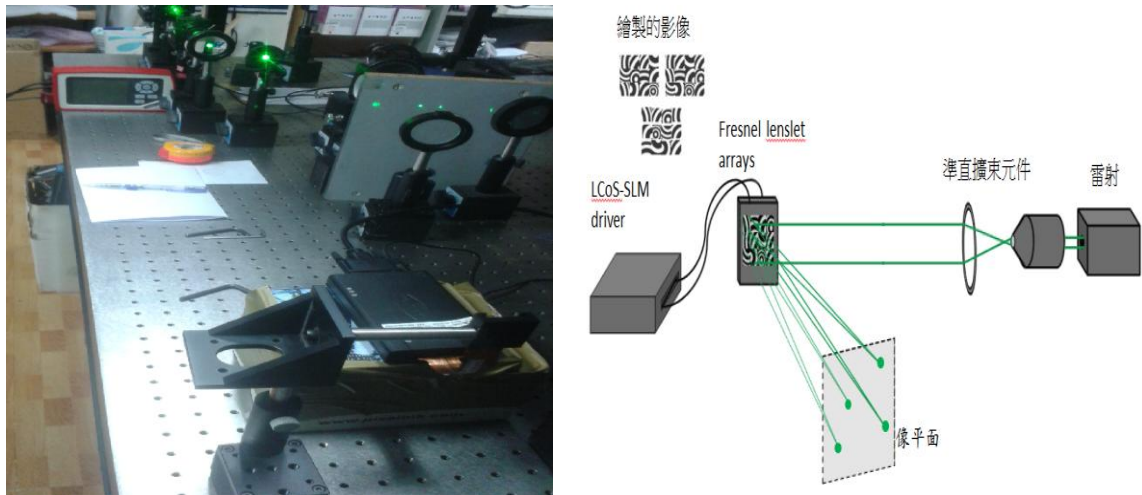


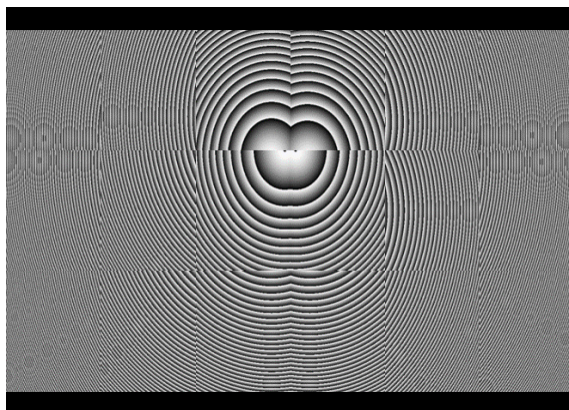
圖 18.實驗裝置之配置示意圖

由於半導體雷射為橢圓偏振光，所以實際實驗架構多了一組偏振片和四分之一波板來形成圓偏振(理想光源)，從 SLM 反射回來的反射角也不能太大，否則導致像平面不平行於光學系統。

4.2 Experimental Results

以 Frsenel lenslet array 的圖片來投影出所規劃的圖形，如圖 19 所示。

擷取 24 個部分繞射影像所組成的影像



經由 SLM 調變產生於屏幕上的影像



圖 19.

以不同焦平面來凸顯光點具有立體分布的特性，如圖 20。以三種不同焦距的 Frsenel lens 所組成的繞射影像

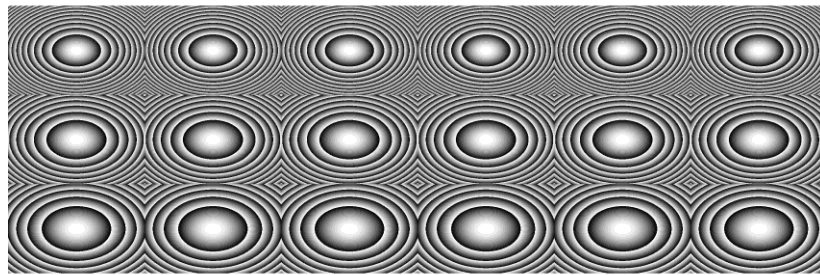


圖 20. 三種不同焦距的 Frsenel lens 陣列排

經由 SLM 調變產生於屏幕上的影像，如圖 21 所示。



圖 21.圖 20 之 SLM 調變結果

由上圖可看出光點陣列在不同焦距長聚焦，也就是讓影像擁有”厚度”，這就是本實驗的三維投影之目的。

5.Conclusion

從實驗中驗證理論公式描繪出的圖片可以確實的在成像面顯示，不過實驗的過程中需要相當多的演算來模擬，包含 Fresnel lens 的焦距以及光點應當如何分布在圖片中才能正確投影出來，這些都是在實驗之前需要計算以及規畫完畢的事項，從結果可以得知投影的效果取決於圖片繪製的準確度，最重要的三維部分也可以些微的看出光點是有縱向分布的情形，但是很顯然需要更高的銳利度才能避免光點連成一條線，在”如何觀測結果”的方面也是需要另外探討的問題。