

第四章

利用液晶空間光學調制器拍攝角度多工 之全像片

全像的多工技術是在同一個記錄介質中儲存多個不同的資訊。而多工的方式也分很多種，例如：角度多工、位移多工、旋轉多工、波長多工、相位多工…等。而本章主要就角度多工技術，架設系統並實際拍攝角度多工之全像片，此外我們會使用到液晶空間光學調制器來輸入及切換不同的影像拍攝。

4.1 液晶空間光學調制器特性分析

液晶空間光學調制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator，簡稱 LC-SLM)為光資訊處理中一重要的調制顯示工具，其優點有：二維平行處理、處理速度快、靈敏度高、分辨率高、對比度高、線性動態範圍大、擦除能力好、光學品質好...等，因此我們在此選用此元件，只需從電腦控制輸入影像並及時切換影像，取代更換光學桌上物體的不便。

實驗室中所使用的液晶空間光學調制器為 HoloEye 所產之 LC2002，其規格如圖 4-1：



Pixels : 832 x 624

Pixel Pitch : 32 μm

Panel Size : 26.6 x 20 mm

Addressing : 8 bit

圖 4-1 HoloEye LC2002

液晶空間光學調制器為複合調制之元件，也就是經由控制光波入射液晶空間光學調制器前的偏振片與出射後的偏振片之夾角，會同時調制光波之振幅與相位。但是在這裡的功用是將我們要記錄在全像片上的圖形顯示出來，因此我們選擇近似純振幅調制之 normally white 的角度，也就是前、後板偏振片角度玻璃基板的刻畫指向一致。由於液晶空間光學調制器在此的功用是顯示圖形，我們比較關心的是其顯示能力如何，所以我們量測了此液晶空間光學調制器的調制傳遞函數 (Modulation Transfer Function ， 簡稱 MTF) 。

調制傳遞函數是在分析在輸入不同空間頻率的情況，元件的調制能力。傳統的調制傳遞函數定義為[5]：

$$MTF(u) = \frac{Modulation_{output}(u)}{Modulation_{input}(u)} \quad (4-1)$$

其中 u 為空間頻率， $Modulation(u)$ 為調制深度，定義如下：

$$Modulation(u) = \frac{I_{max}(u) - I_{min}(u)}{I_{max}(u) + I_{min}(u)} \quad (4-2)$$

也就是說如果輸入一弦波，經系統後，強度會被系統調制而有變化。如圖 4-2 所示，一個完美的弦波，經過一系統調制後，最大強度的峰值會減弱，最弱的強度也會上升，這樣會使得對訊號的對比度下降。我們即是經由此強度變化計算出調制傳遞函數。

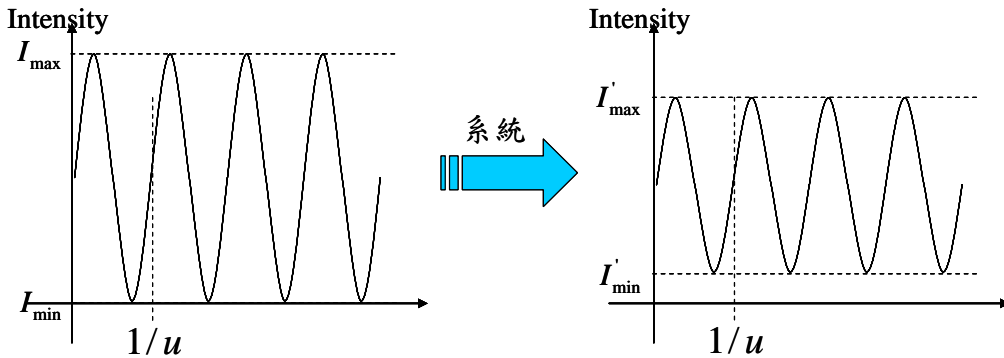


圖 4-2 弦波經系統調制而強度有變化

但是液晶空間光學調制器中的畫素是矩形的，因此我們要考慮的是方波。假設輸入為一方波光柵，且使用同調光源照射，則穿透光波的調制深度可視為對振幅作運算之振幅調制深度 m_A ，架構如圖 4-3 所示：

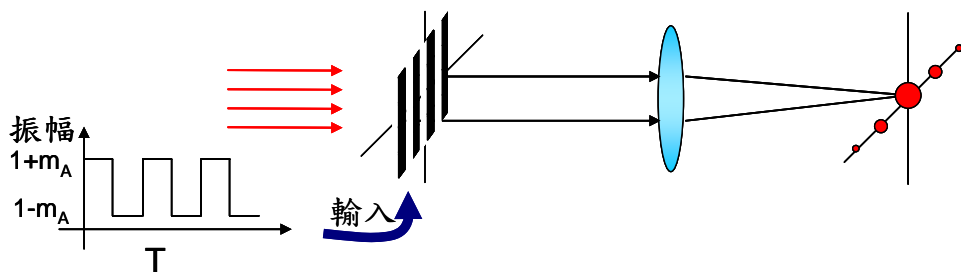


圖 4-3 輸入方波光柵

則可將方波光柵 $s(x)$ 表示成[6]：

$$s(x) = 1 + \frac{4m_A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} b_n(x) \quad (4-3)$$

其中

$$b_n(x) = \frac{1}{2n-1} (-1)^{n-1} \cos[(2n-1) \cdot 2\pi u_0 x] \quad (4-4)$$

且強度 $I(x) = |s(x)|^2$ ，將(4-3)式換算成強度，可得到第一階繞射光強比上第零階繞射光強之繞射效率為：

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} = \frac{2}{\pi} \times \frac{2m_A}{1+m_A^2} \quad (4-5)$$

將(4-5)式換算可得到：

$$m_A = \frac{2}{\pi\eta} - \left(\frac{4}{\pi^2\eta^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-6)$$

因此，在液晶空間光學調制器中輸入方波光柵，並以同調光源照射，可在後方得到繞射光強，將第一階繞射光強比上第零階繞射光強定義為我們的繞射效率，則把繞射效率代入(4-6)式，便可得到振幅調制深度 m_A 。另外我們在定義一歸一化之調制傳遞函數為：

$$MTF_A = \frac{m_A}{m_A'} \quad (4-7)$$

其中 m_A' 為空間頻率為零時之振幅調制深度。

此外，由於輸入空間光學調制器之方波光柵並不是連續的，還要考慮填充因子(fill factor)的影響，因此我們再把填充因子考慮到方波光柵內，如圖 4-4 所示：

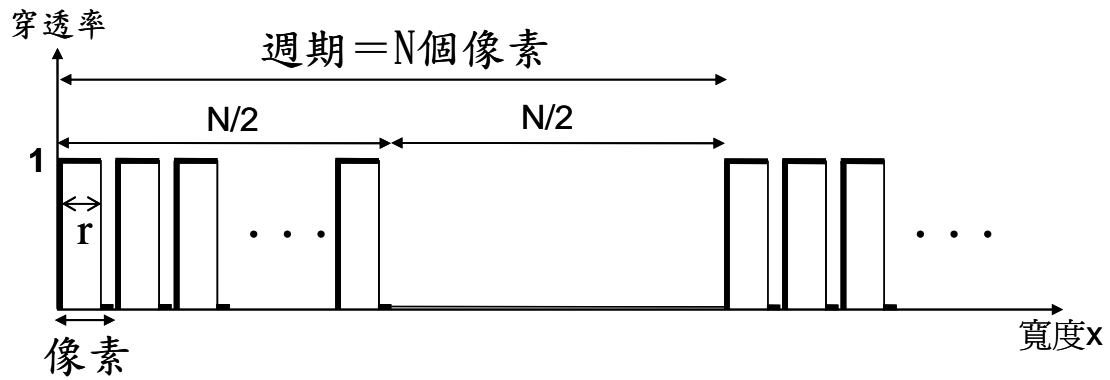


圖 4-4 考慮填充因子之方波光柵

將函數作傅立葉展開後一樣可以得到繞射光強之第一階比上第零階之繞射效率為[7]：

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} = \frac{\left| \frac{i}{2\pi} \left(e^{-i\frac{\pi r}{N/2}} - 1 \right) \sum_{k=1}^{N/2} e^{-i\frac{(k-1)\pi}{N/2}} \right|^2}{r^2/4} \quad (4-8)$$

其中 N 為光柵週期(像素)，r 為填充因子。

則我們可以利用(4-8)式計算出不同填充因子在不同週期時的繞射效率，並代入(4-7)式，得到理想的振幅調制傳遞函數，如圖 4-5 所示：

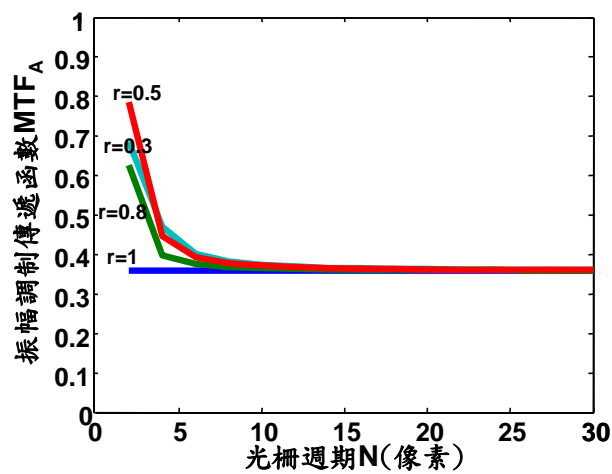


圖 4-5 不同填充因子之振幅調制傳遞函數

所以我們只要架設一光學系統，將不同週期的方波光柵輸入到液晶空間光學調制器，再以同調光源照射，量測繞射光波之繞射效率，代入(4-6)和(4-7)式，即可得到振幅調制傳遞函數。圖 4-6 為我們的量測系統：

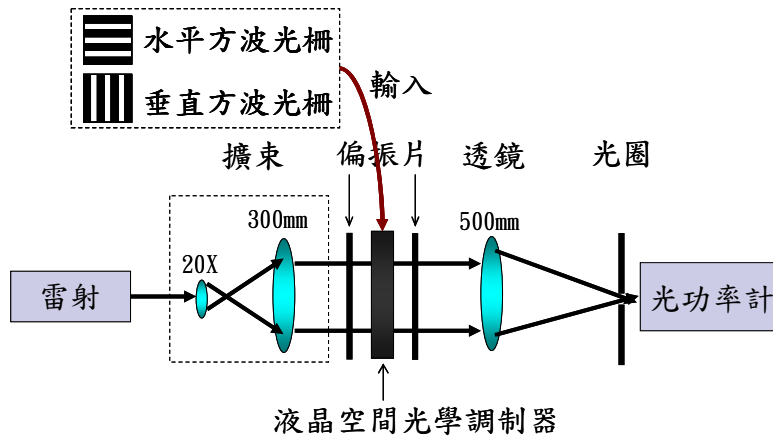


圖 4-6 繞射效率量測系統

雷射經擴束後入射到前板偏振片、液晶空間光學調制器、後板偏振片，在液晶空間光學調制器中分別輸入不同週期之水平方波光柵和垂直方波光柵，再經焦距 500mm 的透鏡執行傅立葉轉換，並在傅立葉平面上分別量測第一階與第零階之繞射光強。其中前、後板偏振片角度玻璃基板的刻畫指向一致。量測結果如圖 4-7：

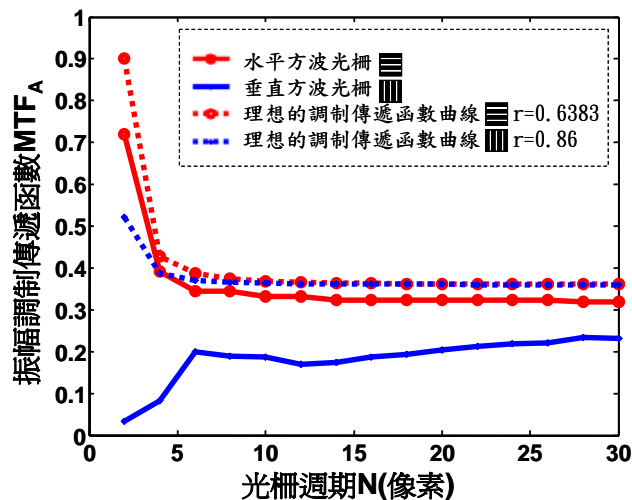
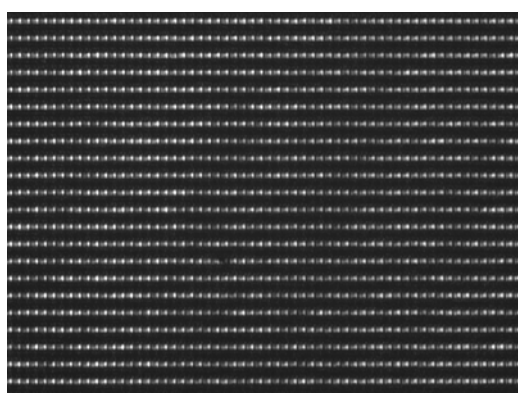


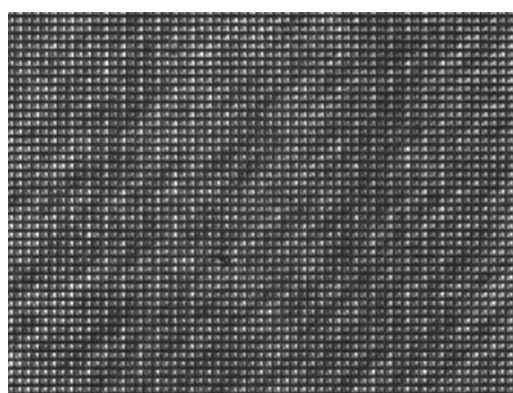
圖 4-7 LC2002 之振幅調制傳遞函數量測結果

其中虛線的部分是將 LC2002 中輸入水平方波光柵之填充因子為 0.6383，與輸入垂直方波光柵之填充因子為 0.86，代入(4-8)和(4-7)式算出來的結果，而實線的部分為實驗量測結果。

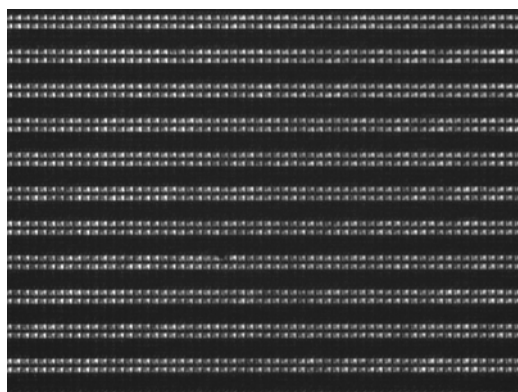
由實驗結果可看出，當輸入為水平方波光柵時之振幅調制傳遞函數比較接近理想值，而輸入垂直方波光柵時，離理想值有點差距，尤其是在高頻的部分，因此我們將液晶空間光學調制器放大成像來看，



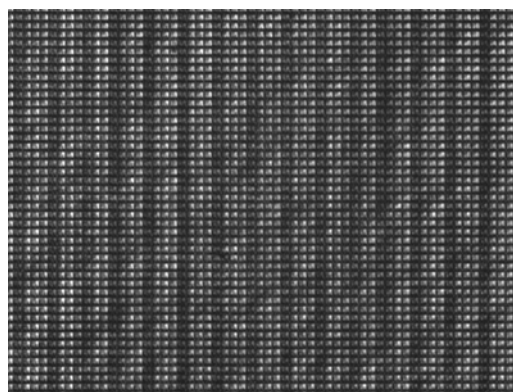
(a)



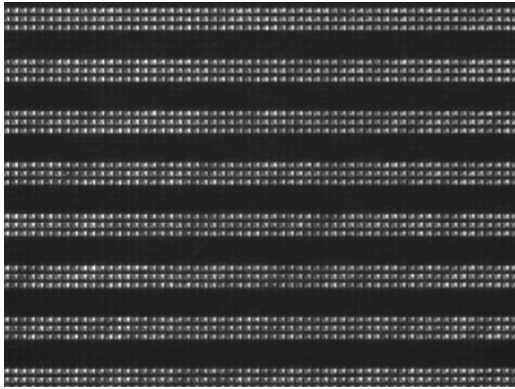
(b)



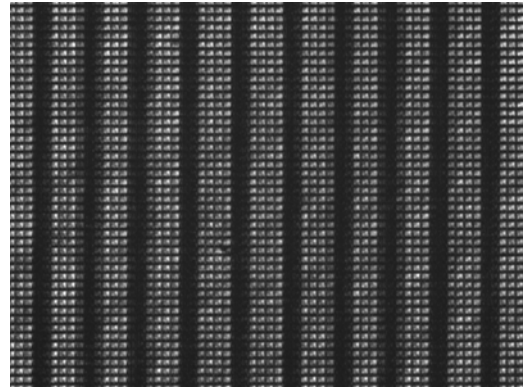
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 4-8 (a)N=2 之水平方波光柵
 (b)N=2 之垂直方波光柵
 (c)N=4 之水平方波光柵
 (d)N=4 之垂直方波光柵
 (e)N=6 之水平方波光柵
 (f)N=6 之垂直方波光柵

由圖 4-8 可看出，在高頻的範圍內，輸入為水平方波光柵時，其顯示的能力很好，但輸入垂直方波光柵時，確實顯示的不是很好。但是造成這樣差異性的結果，是因為液晶空間光學調制器的訊號是由每一列畫素的左邊傳到右邊，一系列一系列往下傳，因此在水平方向傳輸是沒有問題，但在垂直方向傳輸有可能造成定址時脈和驅動訊號不匹配，如圖 4-9 所示：

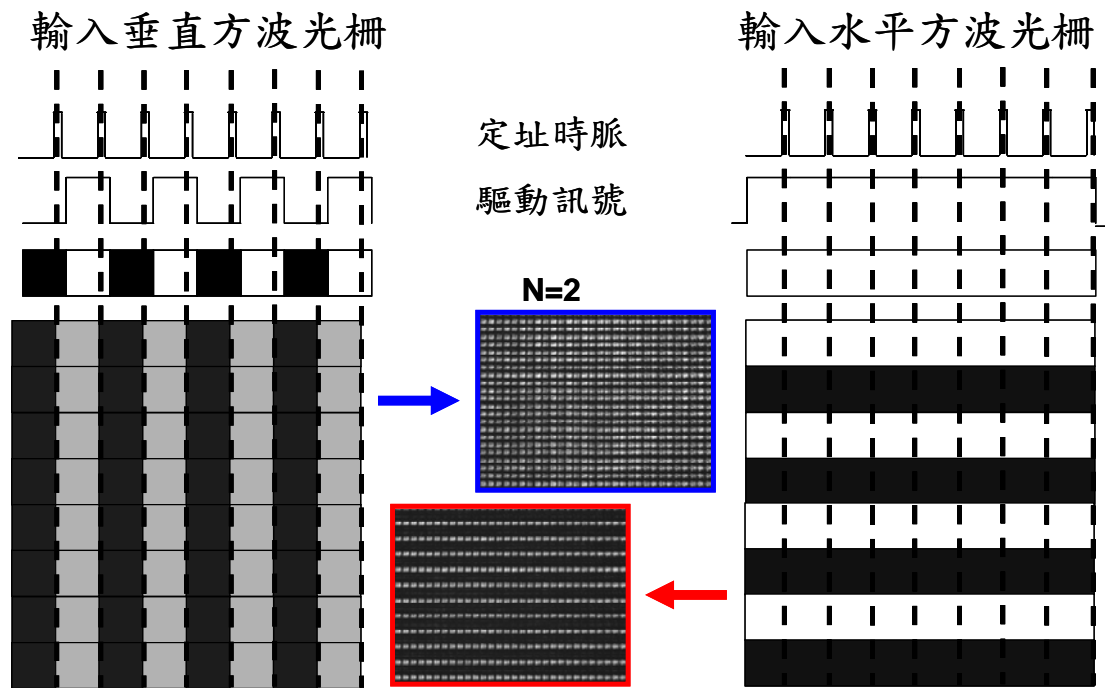


圖 4-9 定址時脈和驅動訊號不匹配

所以液晶空間光學調制器之垂直方向的顯示能力在高頻部分是比較差的，因此在拍攝全像時，要避免選擇太複雜、空間頻率太高的圖像。例如在垂直方向，當週期小於 6 個像素時，即空間頻率高過 5.2 (1/mm) 時，調制傳遞函數的值很低，其顯示能力會變差。

4.2 角度多工選擇性

角度多工技術乃是利用不同角度入射的參考光，在底片上進行多次干涉，則重建時可在不同的角度觀測到不同的影像。但是，要注意的是，每一張影像要分得夠開才不至於重疊在一起不可分辨，所以角度的考量是必要的。根據厚膜干涉時的布拉格定律，讀取光波也必須符合布拉格條件，才有辦法繞射出來。而布拉格條件在角度上的誤差量可表示成：

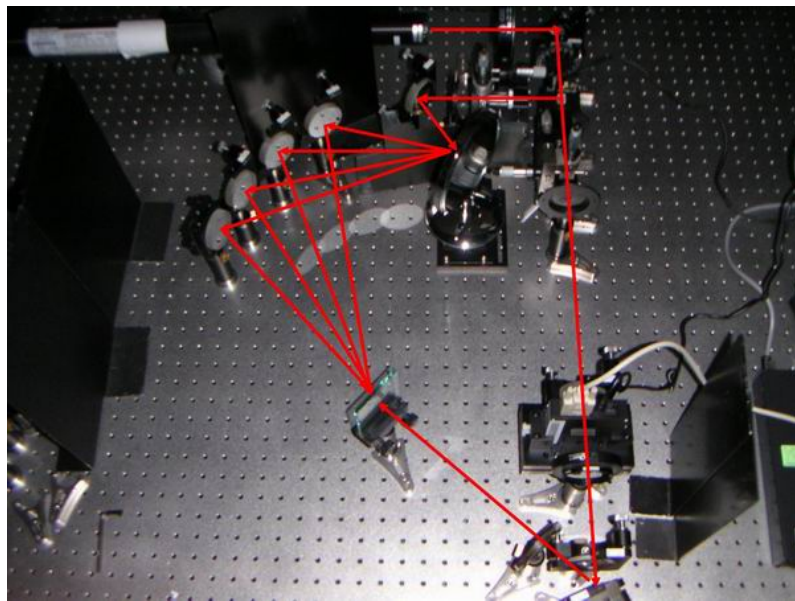
$$\Delta\theta = \frac{\lambda \cos\theta_s}{L \sin(\theta_r + \theta_s)} \quad (4-9)$$

其中 λ 為記錄光波波長， L 底片厚度， θ_s 為物體光與底片法線之夾角， θ_r 為參考光與底片法線之夾角。只要讀取光波的角度與布拉格角的差在誤差範圍內，讀取光波都可以繞射出來，但如果超過誤差範圍，就沒辦法繞射出來。

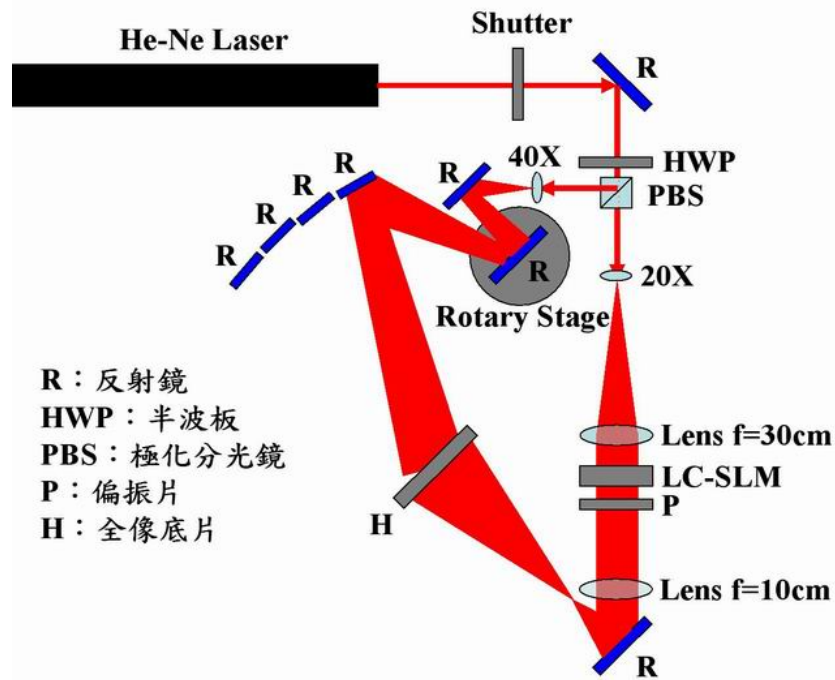
例如我們記錄的光波長為 632.8nm，底片藥膜的厚度約為 $7\mu m$ ，記錄時的物體光垂直入射底片，即 $\theta_s = 0$ ，參考光假設與底片法線夾 40 度角，則 $\Delta\theta$ 約等於 0.14 度，也就是在布拉格角正負 0.14 度的範圍內都有繞射波。

4.3 系統與拍攝結果

我們實際在光學桌上架設系統，如圖 4-10 所示：



(a)



(b)

圖 4-10 (a)角度多工之全像系統

(b)系統示意圖

波長 632.8nm 的 He-Ne 雷射經控制曝光時間的快門後，再經半波板與極化分光鏡，將光束分成兩道，穿透光經 20 倍物鏡和焦距 30cm 之透鏡擴成平行光入射到液晶空間光學調制器，再經過一片後板偏振片，之後以焦距 10cm 之透鏡將輸入液晶空間光學調制器之圖像放大三倍成像到底片位置，則此道光為物光。另一道從極化分光鏡反射之光束經由 40 倍物鏡擴成球面波，經反射鏡轉折後入射到一放置在旋轉平台上之反射鏡，此旋轉平台經由電腦程式控制，可選擇要旋轉的角度。先利用旋轉平台調整適當角度，分別在後方不同位置放置四個反射鏡，使得光束入射到底片時，與底片法線的夾角約為 40 度、30 度、20 度、10 度，此即為參考光。

則系統架設好之後，在底片位置分別量測物體光光功率為 $8\mu W$ ，參考光光功率為 $16\mu W$ ，此時是使用 PFG-01 的底片記錄，則

估算曝光時間為 2.2 秒。再來設定快門之曝光時間為 2.2 秒，延遲時間 30 秒，並將旋轉台轉動之刻度及液晶空間光學調制器之輸入圖像設定好。拍攝時先於液晶空間光學調制器輸入第一張圖像，旋轉平台轉到第一面反射鏡的角度，設定快門延遲 30 秒，曝光時間為 2.2 秒。再來快門關上延遲 30 秒，此時液晶空間光學調制器切換到第二章圖像，且旋轉平台轉至第二個反射鏡的角度，延遲時間結束後曝光 2.2 秒，依此類推，共拍攝四張，每張曝光時間皆為 2.2 秒。而顯影、定影之時間皆為 4.5 分鐘。則拍攝結果如圖 4-11 所示：



(a)



(b)

圖 4-11 (a)拍攝之四張圖像

(b)重建之四張圖像

由於系統架構是反射式的系統，所以我們可以直接使用白光光源重建。在同一張全像片上，從記錄時參考光的角度，即與底片法線夾角約為 40 度、30 度、20 度、10 度，可以看到不同的重建圖像。所以我們成功地使用液晶空間光學調制器輸入不同的圖像並利用角度多工技術將不同的圖像記錄在同一張全像片上。