

第三章

利用液晶空間光學調制器 光學重建相位式電腦全像

根據前一章的電腦全像片設計方法可知，我們可以利用電腦程式來設計相位式全像片，然而如何重建此全像片呢？由於近年來光電科技產業發展迅速，尤其液晶顯示器的發展更是日新月異，因此在本章節中，我們將採用液晶光學空間調制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator；簡稱 LCOSLM)來製作，由於此液晶空間光學調制器可以隨輸入電信號即時反應，而且可以重複使用，因此已被廣泛地使用於即時光資訊系統中。首先我們將對液晶空間光學調制器進行振幅與相位光波調制特性的量測[9-10]，找到液晶面板最佳的工作條件，以供在相位式電腦全像進行光學重建時之工作參數依據。

3.1 液晶光學空間調制器之特性量測

3.1.1 基本工作原理

空間光學調制器(Spatial Light Modulator 簡稱 SLM)為調制光波特性的元件，其中液晶光學空間調制器，即是利用液晶材料所製作的光學空間調制器，主要是利用液晶分子之排列指向及光學性質之各向

異性，在電場作用之下所產生的變化來改變穿透光束之偏振態。我們這裡所採用的液晶光學空間調制器是 HOLOEYE 公司所生產製造的，型號為 LC2002，液晶面板材料屬於扭轉型線狀(twisted-nematic) 液晶。扭轉型線狀液晶之液晶畫素晶格(cell)的基本構造是在兩片玻璃基板之間灌入線狀液晶，如圖 3-1 所示，灌入液晶之前首先在玻璃基板上鍍上一層導電物質 ITO，在 ITO 上再塗一層聚合物，之後使用拋光技術在聚合物上刻劃出某一個指向的刻痕，則接觸基板的液晶分子就會沿著刻劃的指向排列，稱為配向。若將兩片基板刻劃之指向沿著不同方向，則兩邊的液晶分子之指向就會沿著這兩個不同方向排列。由於相鄰兩分子有平行排列的傾向，因此，兩基板之內的液晶分子就會從第一片基板開始，分子指向一層一層慢慢扭轉，直到扭轉至第二片基板之指向為止。

由於液晶分子之各向異性的光學性質，使得不同偏振態之光波歷經不同之折射係數，因此光波通過液晶後會產生相位延遲，若入射光的偏振方向平行於液晶分子長軸的方向，則此時的折射係數稱為非尋常光束之折射係數 n_e ，反之，若入射光的偏振方向平行於液晶分子短軸之方向，則此時的折射係數稱為尋常光束之折射係數 n_o ，一般而言，液晶分子的 $n_e > n_o$ 。由於 n_e 與 n_o 之差異而造成入射光偏振態平行與垂直於分子長軸方向的光波之光程差不同，而產生相位延遲為 βd ， $\beta d = 2\pi(n_e - n_o)d/\lambda_o$ ， d 為液晶板厚度，則相位延遲效應之 Jones 矩陣可寫成

$$L_{retard}(\beta d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-j\beta d} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

另一個會影響光波偏振態的是液晶分子的扭轉指向。液晶分子的

扭轉指向相當於光程中每個局部地方的液晶材料之光軸在旋轉。因此光波穿過液晶後其偏振態之變化可由液晶分子之各向異性的光學性質及液晶光軸之旋轉效應推導。假設液晶盒單位厚度之扭轉角度為 $\alpha(\text{rad} / \mu\text{m})$ ，當 $\beta \gg \alpha$ 時，液晶板扭轉效應之 Jones 矩陣可寫成

$$\tilde{L} \approx \tilde{L}_{Twist}(-\alpha d) = \begin{bmatrix} \cos \alpha d & -\sin \alpha d \\ \sin \alpha d & \cos \alpha d \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

分析液晶畫素對光波之作用，首先需將入射光波之 Jones 向量由實驗室座標轉換成液晶分子座標系，假設 θ 為偏振板與入射面液晶盒之分子指向夾角，則座標變換矩陣可寫為

$$L_{rotate}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

穿透液晶盒之出射光波 Jones 矩陣可由(3-1)、(3-2)及(3-3)式求得，最後再以 $L_{rotate}(-\theta)$ 矩陣將之變換回實驗室座標系即可。因此液晶盒之輸出光波 \vec{U}_{out} 為

$$\vec{U}_{out} = L_{rotate}(-\theta) L_{Twist}(-\alpha d) L_{retard}(\beta d) \cdot \vec{U}_{in} \quad (3-4)$$

一般情況下，市售作為顯示器用途的扭轉型線狀液晶面板會在玻璃基板前後各加一個偏振板，而偏振板的方向依各家廠商之設計有各種擺法，但通常會與玻璃基板的配向一致。現在我們以其中一種擺法來說明，若兩片玻璃基板的刻劃指向相差 90° ，且前後偏振板的方向與玻璃基板的刻劃指向一致，因此，光波穿透偏振板後，為與入射方

向玻璃基板的刻劃指向相同之線偏振光，入射至液晶層後，光之偏振態隨液晶分子之指向而偏轉，稱為斷熱型之偏振追隨(adiabatic following)，當光波由液晶層出射後，其偏振方向平行檢偏板之方向，因此光完全通過檢偏板，透光率為 1，如圖 3-2(a)所示。若在液晶面板兩邊加上電壓，則沿光波傳播方向有一電場，這個電場會產生一個力矩而使得液晶分子有沿著電場方向橫躺之趨勢。若電場夠大，則介於兩片基板中間的液晶分子將沿著電場方向平躺，而沒有扭轉，此時，光波看見的是一個橫截面為圓形對稱的各向同性結構之液晶層，光波沒有相位延遲，因此透過液晶面板之光波偏振態與檢偏板垂直，因而光束無法通過檢偏板，輸出光為 0，如圖 3-2(b)所示。若外加電壓介於中間，液晶分子將不會完全沿電場方向平躺，則出射光波為橢圓偏振光，部分分量將可通過檢偏板而有輸出光。因此可藉由控制所加電壓大小來調控穿透光的強度，以達成顯示明暗灰階輸出之效果。然而如何控制相位變化呢？由於液晶面板顯示明暗灰階度之效果是藉由外加電壓來改變液晶分子橫躺之趨勢，而光波經過不同橫躺趨勢的液晶分子後，其相位的改變量也會不同，如此，我們可藉由輸入不同的電壓來控制相位變化，再加上適當的選擇偏振板與檢偏板的偏振方向以得到較佳的相位調制輸出特性。

3.1.2 扭轉型線狀液晶光軸之量測

扭轉型線狀液晶之特色為液晶盒之前板與後板之分子軸相夾一扭轉角 φ ，且由於雷射光波之偏振態隨著液晶分子之扭轉而改變，這將導致液晶分子軸很難精準的量測出來。由於光波之偏振態會隨液晶分子之指向而偏轉，因此一道線偏振光入射至液晶盒後，只有在入射

光之偏振態與入射面之分子軸平行，且出射光之偏振態與出射面之分子軸垂直時，雷射光之透射光強度會最微弱[11]。

因此在本節中我們首先必須量測出液晶面板之扭轉角 φ ，而扭轉角 φ 之量測方法為，液晶面板不加電壓並固定偏振板之偏振角度，並旋轉檢偏板之角度從與偏振板平行起旋轉 180 度，圖 3-3 為光功率計所測得的光透射強度變化，其中曲線分別為固定偏振板之偏振方向與 y 軸夾角為 0° 、 30° 、 60° 角時所測得。當偏振板與檢偏板之角度平行時，光穿透率最低，當偏振板與檢偏板之角度垂直時，光穿透率最高，因此我們可知光波之偏振態被轉了 90 度，因此扭轉角 φ 為 90 度，其中我們利用波長為 532nm 之線性偏振光作為量測光源。

得知扭轉角後，我們便可量測液晶之分子軸。我們將旋轉偏振板之角度由 0° 到 180° ，而檢偏板與偏振板之夾角固定為 0° 角，我們可測得不同角度之光透射強度變化，如圖 3-4 所示，當入射光之偏振態與入射面之分子軸平行，且出射光之偏振態與出射面之分子軸垂直時，幾乎沒有光通過檢偏板，此時偏振板與檢偏板之角度組合即為入射面與出射面之液晶分子指向。我們取了 3 次實驗之數據擬合一條曲線，此曲線在偏振板與 y 軸夾角為 133° 時有最低的光透射強度，因此液晶面板入射面之分子指向為 133° ，而出射面之分子指向為 43° ，如圖所示。

3.1.3 相位調制特性之量測

由於我們所製作的電腦全像片為全相位式的，因此必須找出一個

可調制相位但振幅不被調制的工作條件。我們所購置的 LCSLM 之液晶面板並無外加偏振板，因此我們在 LCSLM 前後各加一個偏振板，藉由改變偏振板及檢偏板的角​​度，而產生不同的相位調制特性。

針對其相位調制特性，我們架設一套 MachZehnder 干涉系統，如圖 3-5 所示，用來量測 LCSLM 在不同偏振板與檢偏板的角​​度下，輸入不同灰階度所造成的相位調制量之變化情形。我們所用的光源是波長為 532 nm 的線性偏振之綠光雷射，當雷射擴束之後，雷射光束經分光鏡分為兩道光束，其中一道穿透液晶光學空間調制器，藉由改變顯示的灰階值以調制其穿透光的相位變化。此時，液晶光學空間調制器由電腦控制輸入灰階信號，其輸入圖像為 8-bit 格式，分為上下兩個區域，如圖 3-6 所示，上半部顯示灰階值為 255，下半部顯示灰階值由 0 到 255。當上下兩個區域都顯示 255，則上下兩部份的光波調制量相同，因此相位差為 0，隨著下方區域所顯示的灰階度逐漸降低，則上下兩區域的調制特性將隨之改變。最後再利用一個分光鏡將此兩道光束合在一起，若兩道雷射光束之偏振態一致且光強相等時，相互干涉所產生的干涉條紋較為明顯清楚，因此在未調制相位的光束之光路上，我們藉由轉動半波板以改變光波之偏振方向，進而使得兩道雷射光束之光強度與偏振態一樣，而使輸出平面的干涉條紋較為清楚。最後我們利用一個平凸透鏡將 LCSLM 顯示面板上的圖像成像到高解析度 CCD 上，再將干涉圖案存到電腦中並進行分析。

當顯示面板上下兩個區域顯示灰階值相同，均為 255 時，所測得的干涉條紋沒有相對的條紋偏移量，如圖 3-7 所示。當顯示面板上下兩個區域顯示不同的灰階值，穿透光的相位調制量將有所不同，因此干涉條紋將有偏移，如圖 3-8 所示，其中液晶面板上半部顯示的灰階

值為 255，而下半部顯示的灰階值為 110，我們可分別分析計算上下兩部分之干涉條紋的條紋偏移量，接著藉由條紋之週期及條紋偏移量來推算出不同灰階值所調制的相位偏移量，而相位偏移量的計算公式定義如下：

$$\text{相位偏移量} = \frac{\text{干涉條紋偏移量}}{\text{干涉條紋的週期}} \times 2\pi \quad (3-5)$$

由於不同的偏振板與檢偏版的方向將產生不同的相位调制特性。因此我們量測了在不同偏振板與檢偏板的角組合之下，相位调制特性隨輸入影像灰階度之變化情形。此外，我們分別進行雷射光由 LCSLM 正面入射及背面入射，圖 3-9 為此 LCSLM 的正面照片，圖 3-10 與圖 3-11 分別為雷射光束由 LCSLM 正面與背面入射所量測到的相位调制結果，其中我們定義偏振板的角為光沿 z 軸出射，偏振板之偏振方向與 y 軸之順時針方向夾角。由這些相位调制曲線，我們可知雷射光由正面或背面入射時，在相同的偏振板與檢偏板的角組合之下，其相位调制特性相差不多。其中雷射光束由 LCSLM 正面入射時，在偏振板為 90 度，檢偏板為 -120 度之狀態下，相位调制效果只有 0.73π ，相位调制效果不佳。但在偏振板為 0 度，檢偏板為 -120 度之狀態下，相位调制效果可達 1.76π ，有較佳的相位调制效果，而其相位變化較大的線性區段在灰階度由 110 變化到 255 之間。

3.1.4 光強度调制特性之量測

接下來，我們將進行液晶顯示器的光穿透率特性之量測，以期找出一個工作條件，能夠调制出最大的相位偏移量，而對光強度的调制

量為零，圖 3-12 即為此光學量測系統。

首先將雷射光平行擴束後，入射於液晶光學空間調制器，藉由輸入灰階值的改變將調制其穿透光的光強度，並在其輸出的成像平面上架設一光偵測器用來量測其光穿透強度隨輸入影像灰階度由 0 增加到 255 之變化情形。又，在 LCSLM 前後各放置一個偏振板，藉由改變不同的偏振方向，量測其穿透光強度之變化情形。

若雷射光正面入射 LCSLM 時，穿透光的強度受灰階度所調制之變化曲線，如圖 3-13 所示。在此實驗所使用的光源為線性偏振光，當偏振板的角度與光源的偏振方向平行時，透射的光強度還是會被吸收或反射，光穿透率約為 56%。因此實際上光穿透 LCSLM 的液晶面板最大約為 25% 左右。圖 3-13 中，我們量測了不同偏振板與檢偏板的角度的角度，其中，偏振板與 y 軸夾 0° 角而檢偏板與 y 軸夾 90° 角，偏振板與檢偏板互相垂直，即所謂的正常亮態(Normally White Mode)。而當偏振板與 y 軸夾 0° 角，檢偏板與 y 軸夾 -120° 角時，其相位調制特性較佳，但此量測結果顯示其振幅將隨灰階度變化而改變。因此接下來我們將以 LCSLM 的實際操作情況來模擬相位式電腦全像片的重建輸出圖像。

3.2 模擬利用液晶光學空間調制器重建電腦全像

由 3.1 節的 LCSLM 特性量測中，我們發現雷射光源由正面入射時，在偏振板為 0° 角，檢偏板為 -120° 角時的工作條件，其相位調制效果，達 1.76π ，因此可以用來實現我們所設計相位式電腦全像片。但在此工作條件之下，光穿透率在灰階度由 100 到 255 時變化起伏頗大，因此在本節中我們將以 LCSLM 的實際操作情況來模擬相位式電腦全像片的重建輸出圖像，分析當振幅變化與所設計的情況不符時，對於輸出圖像是否會造成很大的影響。

3.2.1 模擬 LCSLM 重建相位式電腦全像

我們首先考慮液晶晶格的開孔結構所產生的影響，由於 LCSLM 之液晶面板為一個一個的液晶晶格所排列組成的二維結構，而液晶晶格的透光區域為一個長方形開孔，開孔週期為 $36\mu\text{m}$ 乘 $38\mu\text{m}$ ，開孔之周圍被線寬極細的電線迴路所環繞。因此光波通過液晶面板後，便會因為這些細微的結構而產生光波繞射現象。圖 3-14 (a) 為液晶面板的結構示意圖，其開孔為長方形，我們模擬平面光波穿透液晶面板所產生的遠場繞射光強分佈，如圖 3-14 (b) 所示。

接下來我們分別用第二章所設計的相位式電腦全像片，模擬以液晶光學空間調制器來重建。首先，我們先利用電腦模擬實際重建的情形，假設 LCSLM 的光穿透率不隨灰階度變化，與我們所設計的全像片之振幅為均勻的空間分佈一樣，而其相位調制可由灰階值來控制，圖 3-15 為模擬以 LCSLM 重建四階相位式電腦全像片的重建結果，

其目標圖像為圓對稱圖像。由於液晶空間光學顯示器具有週期性排列的像素結構，因此其繞射圖形將有多階繞射，故可得到許多個重建圖像。圖 3-16 為模擬以 LCSLM 重建四階相位式電腦全像片的重建結果，其目標圖像為非對稱圖像。

3.2.2 考慮 LCSLM 的光穿透率隨灰階度變化之情況

根據前面量測液晶空間光學調制器的調制特性可知，光穿透率將隨灰階度而變化，當偏振板之偏極方向為 0° ，檢偏板之偏極方向為 -120° 時，如圖 3-13 所示，我們將光穿透率歸一化，則 LCSLM 之灰階值所調制的相位偏移量與光穿透率之對照表如圖 3-17 所示。因此我們模擬在光穿透率不均勻的狀態下，對重建的結果將有何影響？圖 3-18(a)、(b)、(c) 分別為模擬在光穿透率不均勻的情況下，重建 IFTA 演算法所計算之 600 乘 600 之二階、四階及八階相位式全像片之第 0 階繞射圖像，其目標圖像為圓對稱圖像，其繞射效率分別為 9.73%、7.83% 及 7.87%。由圖 3-17 的重建結果，我們知道，若是光振幅調制量不為 0 時，亦即無法得到純相位調制的情形時，對於輸出圖像的強度分佈影響不大，但其繞射效率將會有所降低，其中二階約下降 61.8%，四階約下降 73.66%，八階約下降 80.54%。

3.3 利用 LCSLM 光學重建相位式電腦全像片

3.3.1 光學重建系統

由第二章，電腦全像的基本原理推導中，我們可知道電腦全像之輸入平面及輸出平面之關係為傅立葉轉換，因此我們可將電腦全像之光學重建系統設置如圖 3-19。由於 3.1 節對於 LCSLM 進行各項特性之量測，因此我們所選用的 LCSLM 的工作條件為雷射光源由正面入射時，在偏振板為 0° 角，檢偏板為 -120° 角。首先我們先將波長為 532nm 的雷射光擴束，並入射到 LCSLM 上，而在 LCSLM 後方再架設一平凸透鏡，當電腦全像的相位分佈以不同的灰階值顯示在 LCSLM 上時，光波透過電腦全像片之相位調制，再經由透鏡做傅立葉轉換，便可在平凸透鏡之後焦平面以高解析度 CCD 擷取到全像片之光學重建圖像。

3.3.2 光學重建實驗

首先我們利用上述的光學系統重建在第二章中所計算的 2 階、4 階及 8 階的相位式電腦全像片，其中 LCSLM 顯示的灰階值所調制的相位偏移量如圖 3-20 所示，此為雷射光由正面入射且偏振板為 0° 、檢偏板為 -120° 時之相位調制曲線所對應之灰階度。根據此對照表，我們便可將相位式全像片的相位值以相對應之灰階值顯示在 LCSLM 上，再入射光波於液晶空間光學調制器上，最後在透鏡之後焦平面上即可重建出我們所設計的圖像。以液晶空間光學調制器光學重建之圖像會有多階之繞射圖像，而每一階之圖像大小 Λ ，由光波波長 λ 、液

晶畫素開孔週期 v 及透鏡焦距 f 決定，其關係式為 $\Lambda = \lambda f / v$ 。在此實驗中，雷射光源之波長 λ 為 532nm，液晶畫素開孔週期 v 為 36 μm ，透鏡焦距 f 為 10cm，因此我們估計光學重建圖像每一階之大小為 1.5 乘 1.5 mm 大小。

依照上列方法，我們可以重建電腦全像片。在第二章中我們討論了兩種演算法來設計相位式電腦全像片，因此在光學重建時亦針對這兩種演算法來討論，首先我們先重建以 IFTA 演算法設計的全像片，其中我們計算繞射效率之方法除了第二章模擬時之定義外，我們必須再考慮光波經過重建系統後之光穿透率，一般而言，在我們的重建系統中衰減光強度的主要元件為 LCSLM 及兩片偏振板，其中 LCSLM 之光穿透率隨顯示之灰階值而改變，以我們顯示之灰階值而言，光穿透率差不多在 17% 上下，加上兩片偏振板約衰減 70% 之光強度，因此估計在光學重建系統中重建圖像之繞射效率約為 5% 左右。圖 3-21 即為以 IFTA 演算法設計 600 乘 600 畫素大小之 2 階、4 階及 8 階全像片之第 0 階的光學重建圖像，大小為 1.51mm 乘上 1.51mm，其目標圖像為圓對稱圖像，而繞射效率分別為 3.93%、3.54% 及 3.72%。圖 3-22 為以 IFTA 演算法設計 600 乘 600 畫素大小之 4 階及 8 階全像片之第 0 階的光學重建圖像，大小為 1.51mm 乘上 1.51mm，其目標圖像為非對稱圖像，而繞射效率分別為 3.45% 及 3.53%。由圖 3-21 與圖 3-22 之重建圖像可看出圖像中心有非常明顯之繞射光點，與 3.2.1 節模擬的結果相同，而實際的繞射效率為扣掉圖形中心高 DC 值的結果，亦與 3.2.2 節模擬的結果吻合，二階全像片有較高的繞射效率。其中圖 3-22 之 4 階及 8 階的重建結果可看出還有微弱的雜訊圖像，代表相位還未控制得非常精準，而有相位誤差產生。圖 3-23 為以 IFTA

演算法設計不同畫素大小之 8 階全像片之光學重建圖像，大小為 1.51mm 乘上 1.51mm，其目標圖像為圓對稱圖像。圖 3-23 為以 IFTA 演算法設計不同畫素大小之 8 階全像片之光學重建圖像，大小為 1.51mm 乘上 1.51mm，其目標圖像為非對稱圖像。由圖 3-23 及圖 3-24 可看出尺寸越大之全像片，單位面積上所照射到的光強度一樣，因此尺寸大的全像片之照光面積大，且其調制光波相位的畫素越多，因而繞射效率較高。

圖 3-25 為以 IFTA 演算法設計 500*500 畫素大小之 4 階全像片隨不同相位誤差由 0 % 到 -60 % 之光學重建圖像，其目標圖像為非對稱圖像。圖 3-26 為以 IFTA 演算法設計 500*500 畫素大小之 8 階全像片隨不同相位誤差由 0 % 到 -60 % 之光學重建圖像，其目標圖像為非對稱圖像。由圖 3-25 及圖 3-26 之重建結果可看出與相位誤差之模擬結果吻合，相位誤差對於 4 階全像片之重建結果影響較大。

接下來我們討論利用 DBS 演算法所計算的全像片之光學重建結果。圖 3-27 為以 DBS 演算法設計不同畫素大小之 2 階全像片之光學重建圖像，其目標圖像為圓對稱圖像，而其繞射效率亦隨全像片之尺寸增大而變高。圖 3-28 為以 DBS 演算法設計 400 乘 400 畫素大小之 2 階相位全像片隨不同相位誤差由 80 % 到 -80 % 之光學重建圖像，其目標圖像為圓對稱圖像，由圖中可看到重建圖像之繞射效率雖有隨相位誤差增加而遞減之趨勢，但重建圖像在正與負值之相同的相位誤差情況下，其繞射效率並沒有完全相同，繞射效率隨正值之相位誤差遞減較慢，但隨負值之相位誤差遞減卻較快，這是由於相位調制曲線還未非常精準的控制，而負值之相位誤差所用的灰階值落在相位調制曲線的線性區域，可較準確的控制，而正值之相位誤差所用的灰階值落

在幾近飽和之區段，較難成功控制相位差，而導致繞射效率變化較小。

3.4 電腦全像片於製作動態影像之應用

由 3.3 節之實驗結果，我們已經可以液晶空間光學調制器實現相位式電腦全像片，基於未來想要製作具有即時動態特性之光鉗陣列，在此我們先以電腦全像片製作卡通動畫以確認其即時動態之特性。首先，我們在網路上找到一個卡通圖案的動態影像，其中包含 18 張連續動作的趴趴熊影像，我們將影像作了二位元之處理後當作全像片之目標圖像，如圖 3-29 所示，其影像大小為 400*400 畫素。由前面之實驗結果可發現以 IFTA 計算之 8 階相位式全像片的光學重建結果具有較好的邊緣清晰度，因此我們以 IFTA 演算法計算出 18 張之 8 階相位式全像片，如圖 3-30 所示為此 18 張電腦全像片之電腦重建結果。之後我們以光學重建系統重建此全像片，當我們以圖控程式 LaVIEW 以時間間隔 180ms，連續播放此 18 張全像片時，便可以高解晰度 CCD 在全像之輸出平面擷取到動態之影像，如圖 3-31 所示，為每 180ms 所擷取到的重建圖像。我們由實驗獲得驗證，因此欲以液晶空間光學調制器製作動態全像是可行的方式。

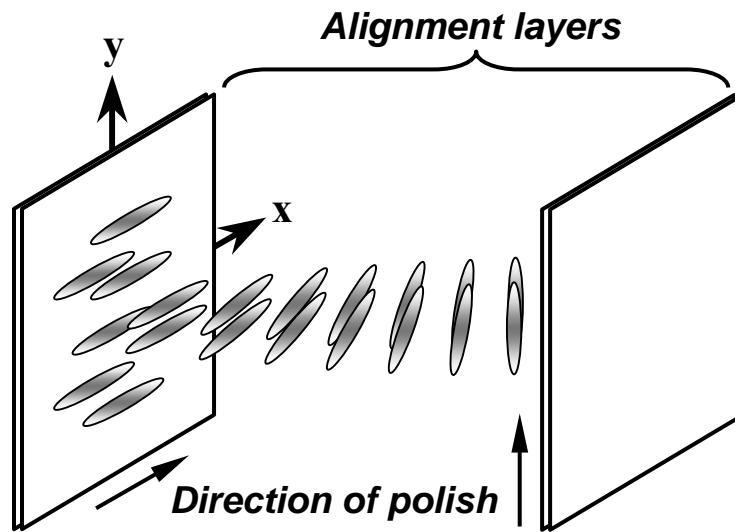


圖 3-1 扭轉型線狀液晶之結構示意圖

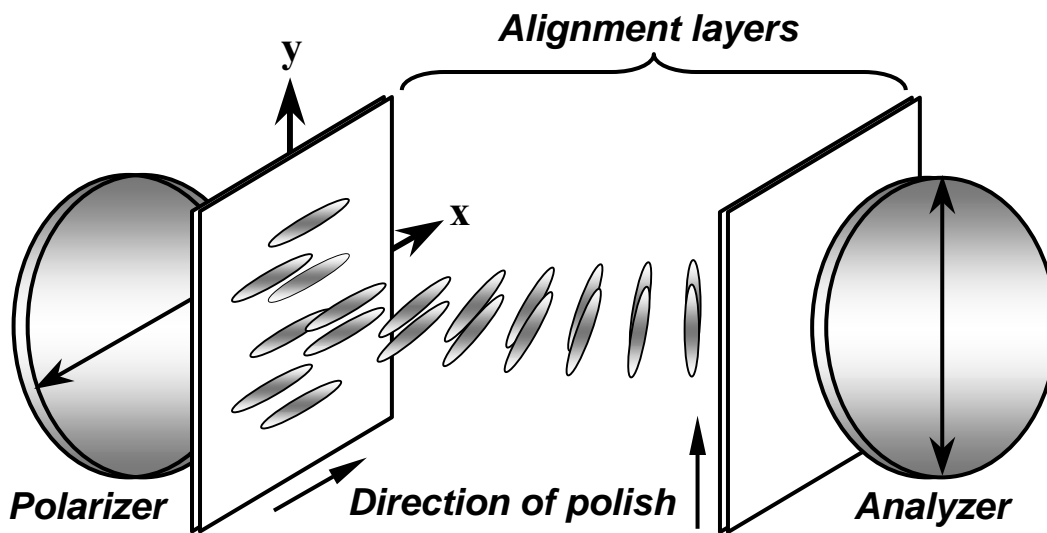


圖 3-2(a) 水平線性偏振光由左方入射至無外加電場之液晶面板後，其偏振態隨液晶層扭轉成垂直線性偏振而可完全通過檢偏板

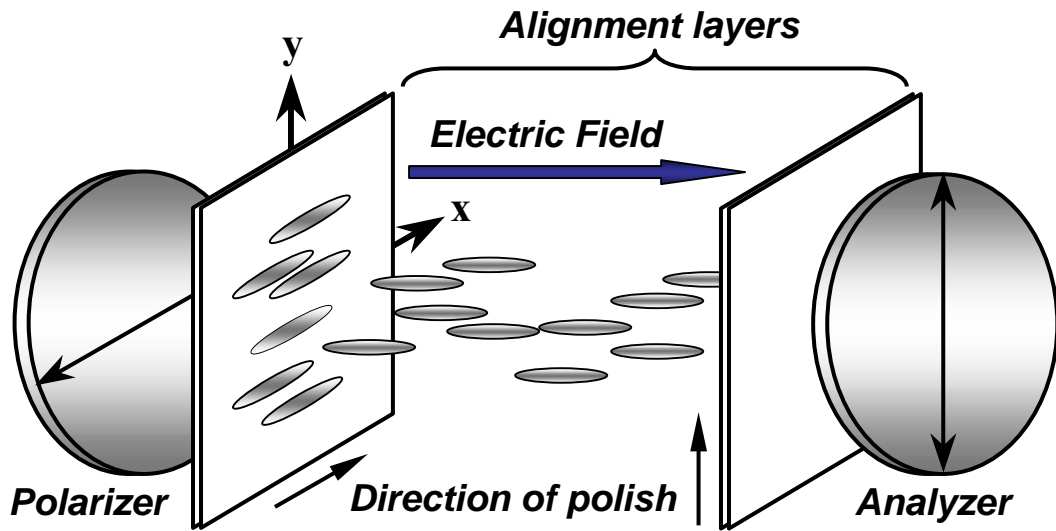


圖 3-2(b) 水平線性偏振光由左方入射至外加電場之液晶面板後，其偏振態不隨液晶層扭轉而無法完全通過檢偏板

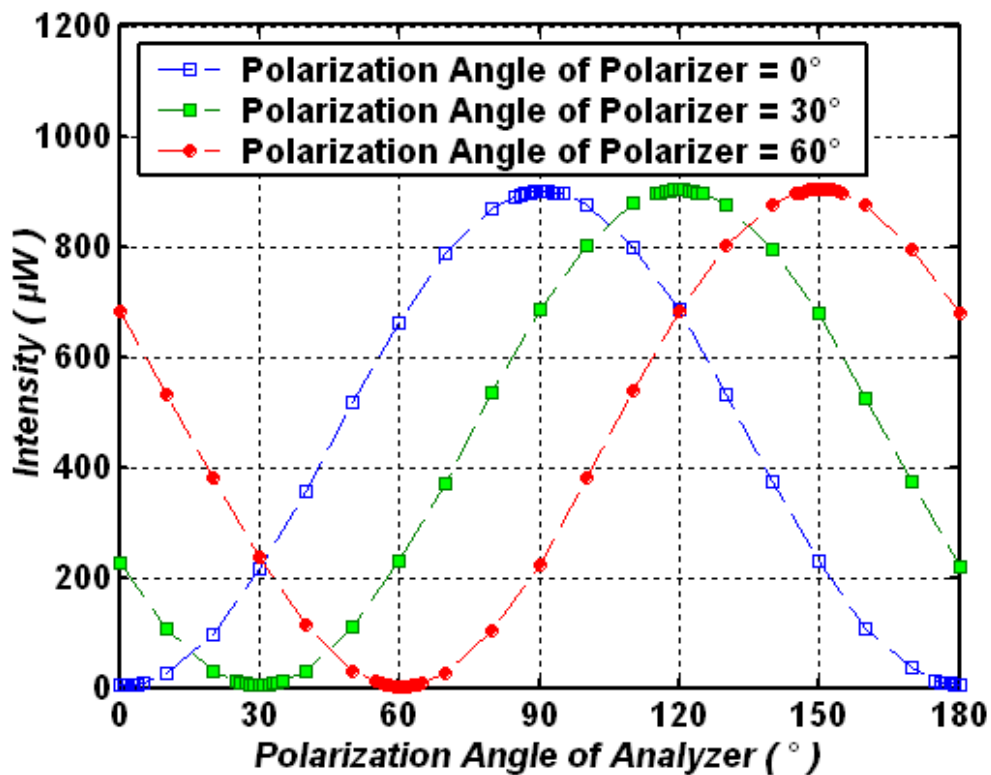


圖 3-3 光功率計所測得的光透射強度變化

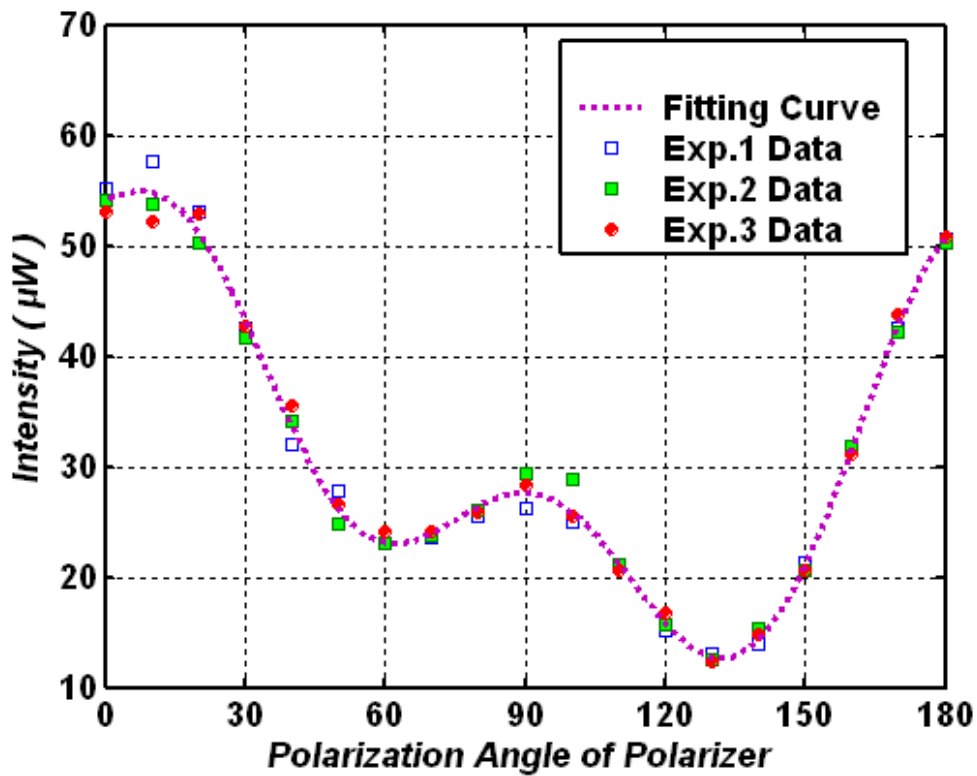


圖 3-4 旋轉偏振板之角度由 0° 到 180° 且檢偏板與偏振板之夾角固定為 0° 角所測得之光透射強度變化

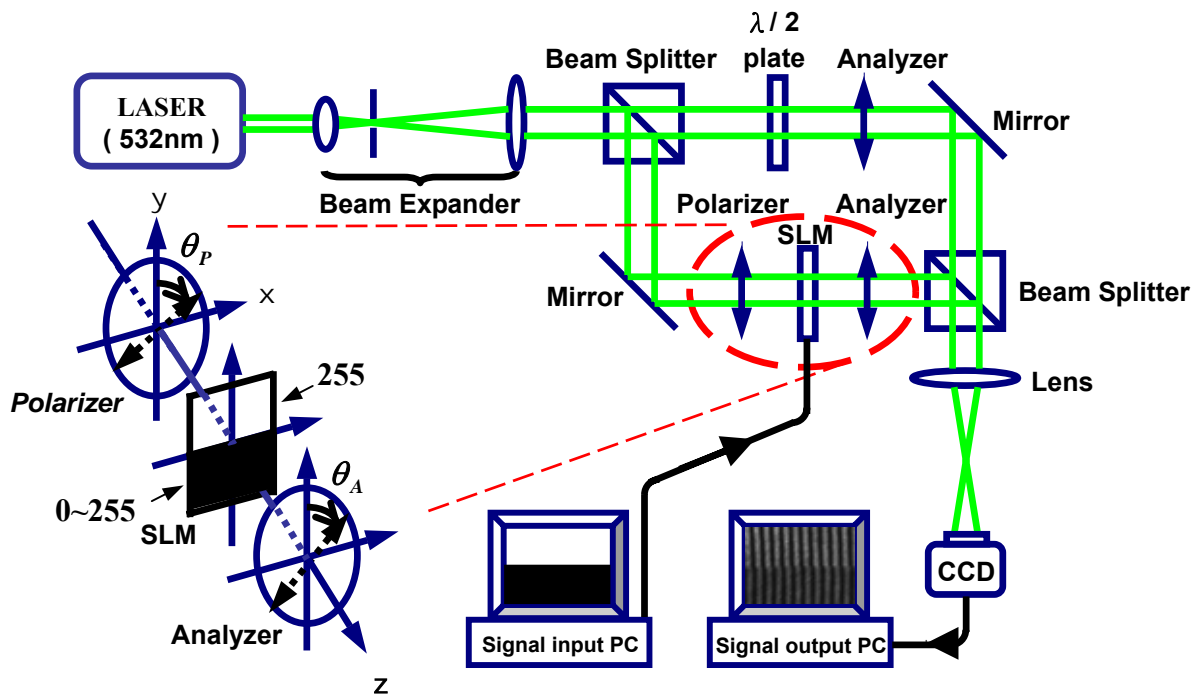


圖 3-5 MachZehnder 光波相位量測系統

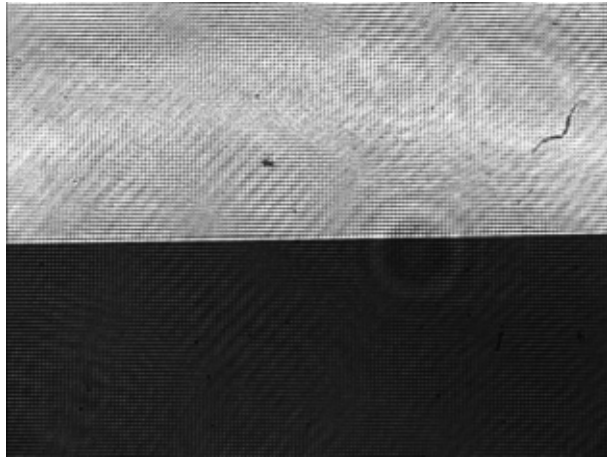


圖 3-6 量測相位調制特性時，液晶光學空間調制器顯示之圖形

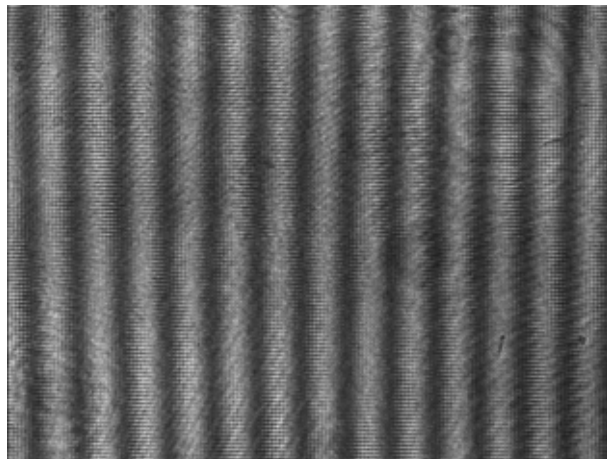


圖 3-7 高解析度 CCD 所偵測到的干涉條紋圖像

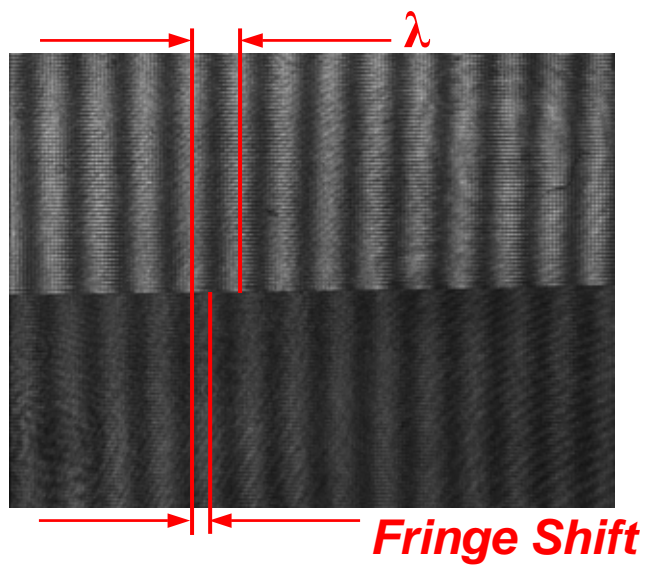


圖 3-8 高解析度 CCD 所偵測到的干涉條紋位移圖像



圖 3-9 HOLOEYE 公司產品 LC2002 的正面照片

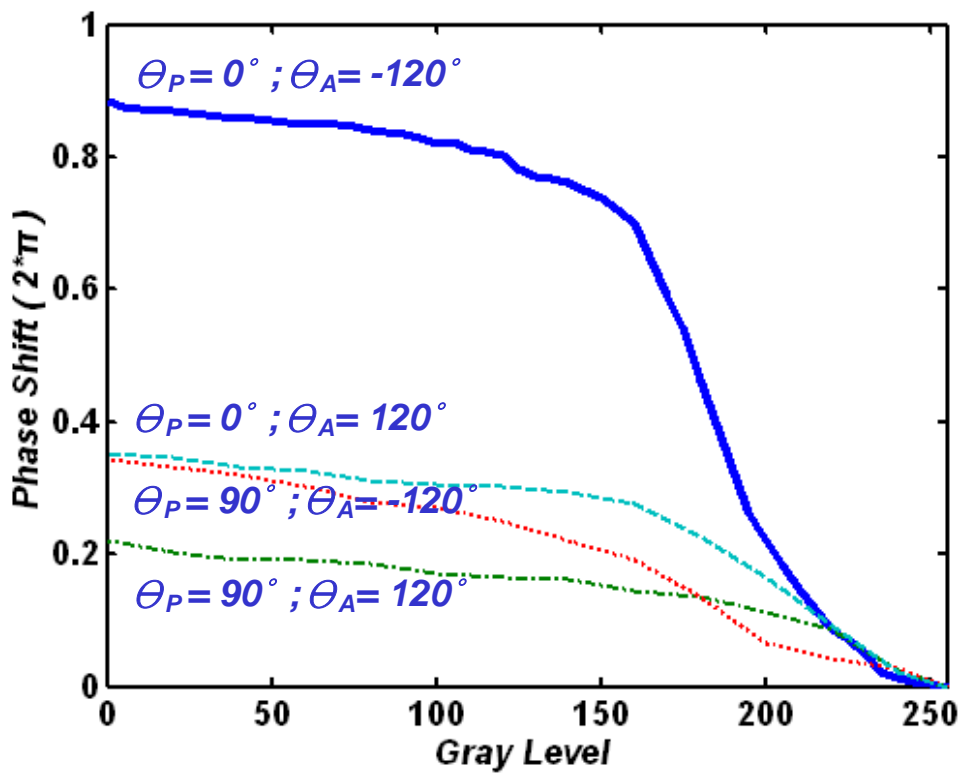


圖 3-10 雷射光束由 LCSLM 正面入射所量測到相位調制結果

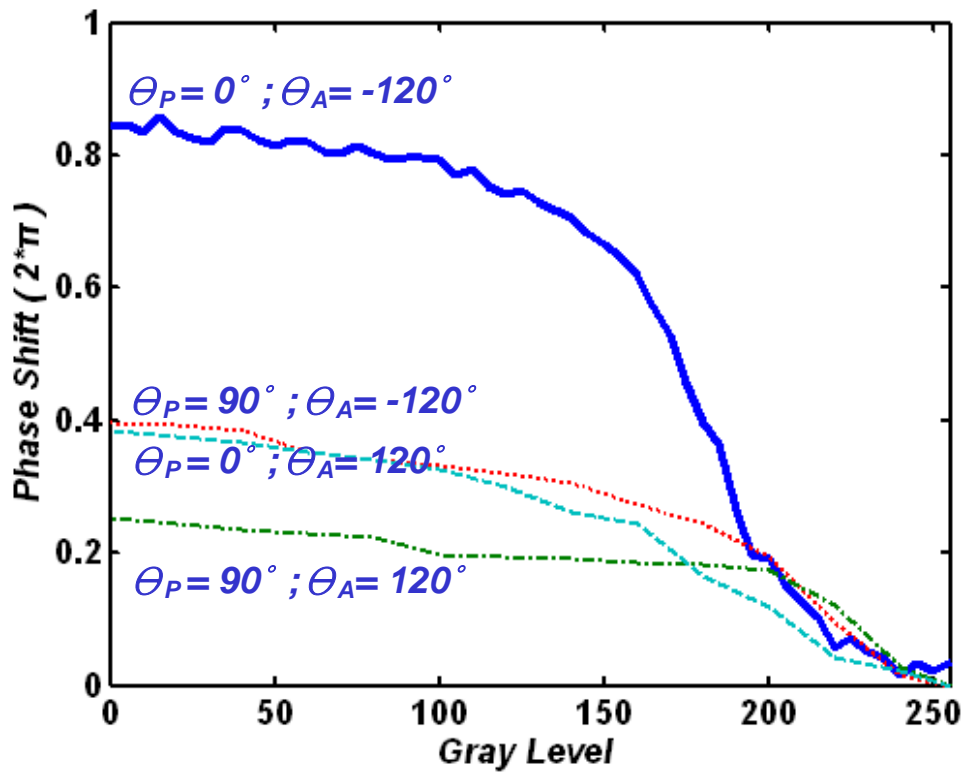


圖 3-11 雷射光束由 LCSLM 背面入射所量測到相位調制結果

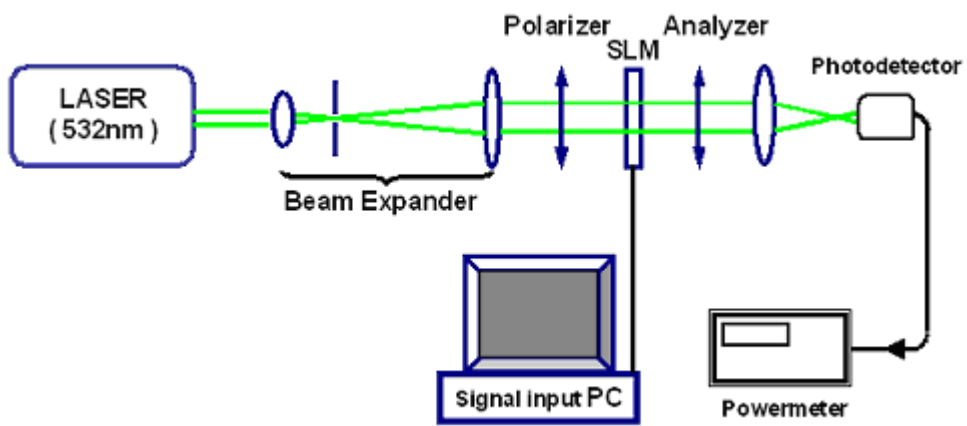


圖 3-12 液晶光學空間調制器之光穿透率量測系統

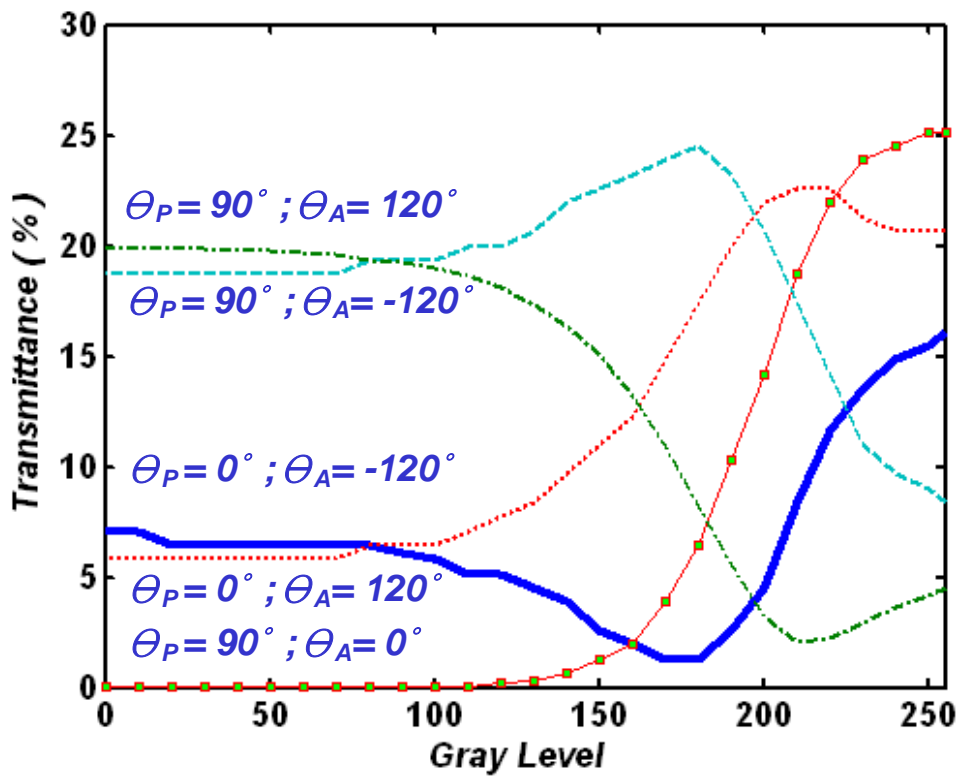


圖 3-13 穿透光的強度受灰階度所調制之變化曲線

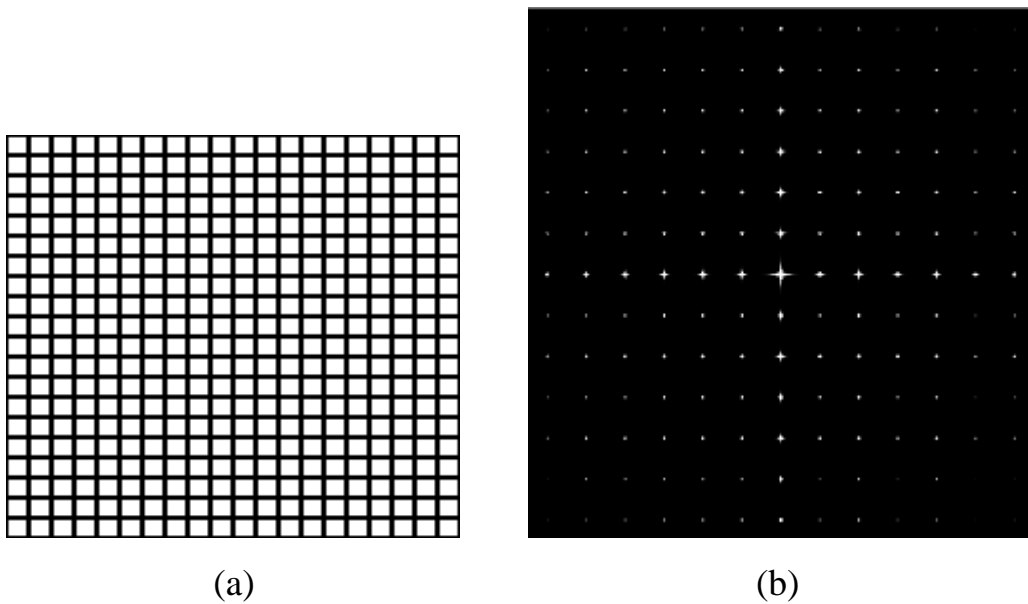


圖 3-14 (a)液晶面板的結構示意圖
(b)平面光波穿透液晶面板所產生的繞射光強分佈

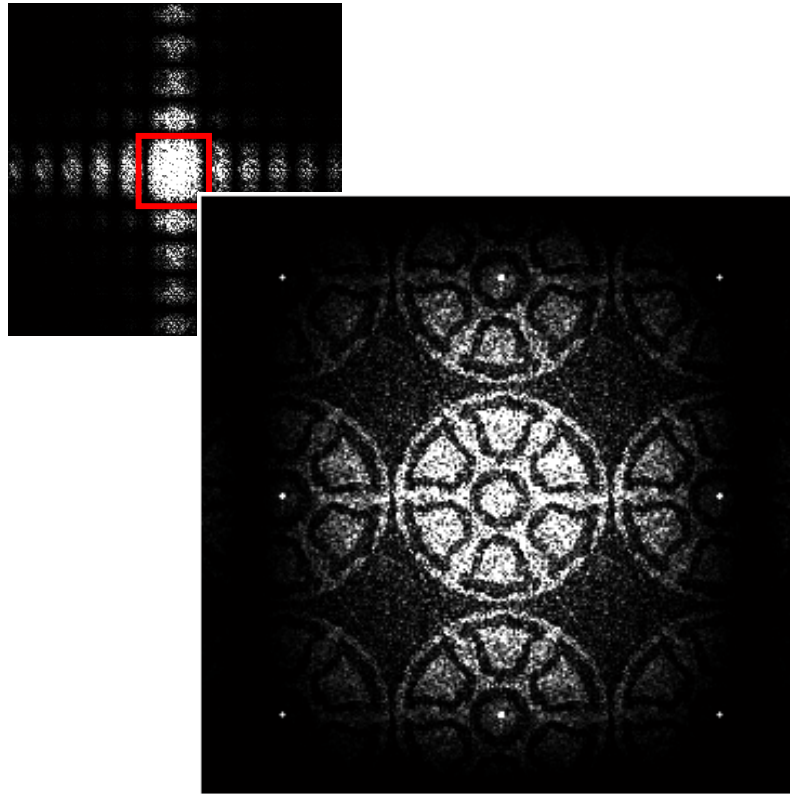


圖 3-15 LCSLM 重建圓對稱圖像之四階相位式電腦全像片

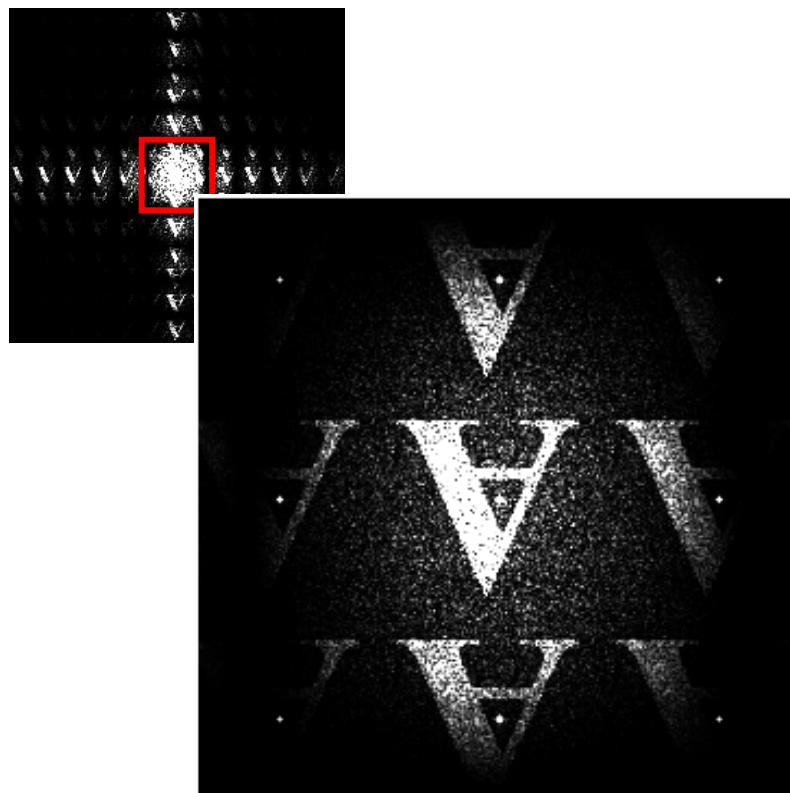


圖 3-16 LCSLM 重建非對稱圖像之四階相位式電腦全像片

<i>Phase Shift</i>	<i>Gray Level</i>	<i>Transmittance</i>
0	255	100%
0.25π	215	62%
0.5π	197	25.6%
0.75π	187	14.4%
π	178	7.6%
1.25π	167	9.2%
1.5π	145	20%
1.75π	005	45.2%

圖 3-17 LCSLM 之灰階值所調制的相位偏移量與光穿透率之對照表


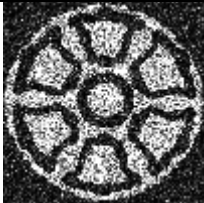
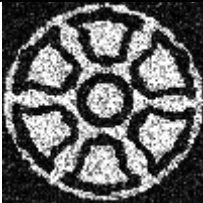
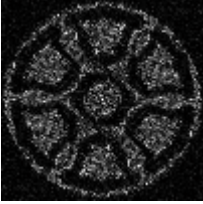
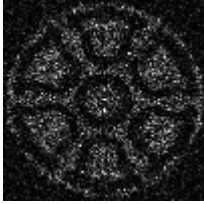
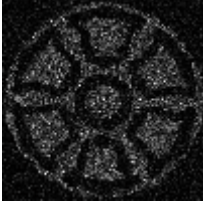
量化階數	(a) 二階	(b) 四階	(c) 八階
重建圖像 (純相位調制)	 $\eta=71.53\%$	 $\eta=81.49\%$	 $\eta=88.41\%$
重建圖像 (相位加 振幅調制)	 $\eta=9.73\%$	 $\eta=7.83\%$	 $\eta=7.87\%$

圖 3-18 考慮光穿透率不均勻的情況下，以 LCSLM 重建二階、四階及八階相位式電腦全像片的重建結果

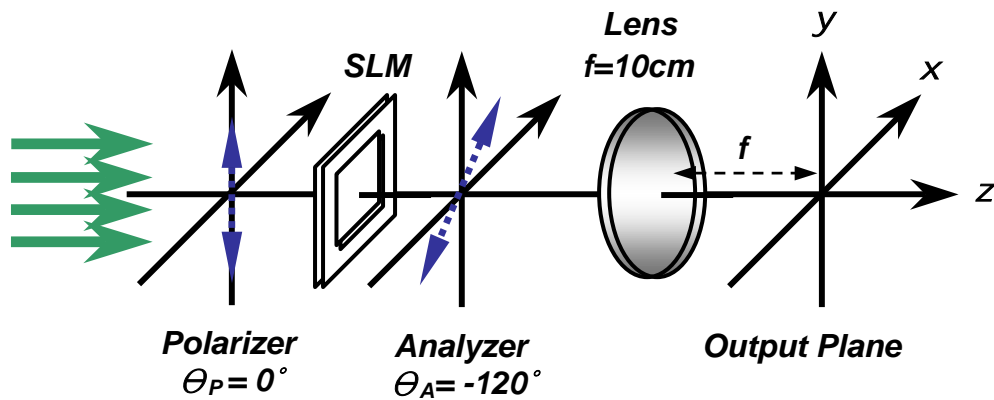


圖 3-19 光學重建系統架構

相位調制量(π)	灰階度	相位調制量(π)	灰階度
0.00	255	0.90	181
0.05	235	0.95	179
0.10	230	1.00	178
0.15	225	1.05	176
0.20	219	1.10	175
0.25	215	1.15	172
0.30	210	1.20	170
0.35	207	1.25	167
0.40	203	1.30	165
0.45	200	1.35	162
0.50	197	1.40	160
0.55	194	1.45	155
0.60	192	1.50	145
0.65	190	1.55	130
0.70	188	1.60	121
0.75	187	1.65	92
0.80	185	1.70	60
0.85	183	1.75	5

圖 3-20 相位值所對應的灰階值

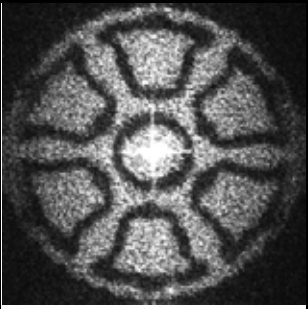
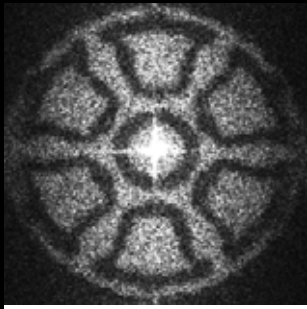
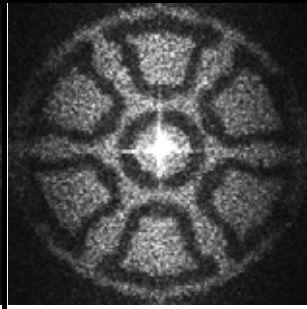
量化階數	二階	四階	八階
光學重建 圖像			
	$\eta=3.93\%$	$\eta=3.54\%$	$\eta=3.72\%$

圖 3-21 IFTA 演算法設計 600 乘 600 畫素大小之 2 階、4 階及 8 階全像片之光學重建圖像

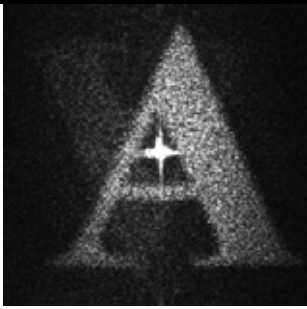
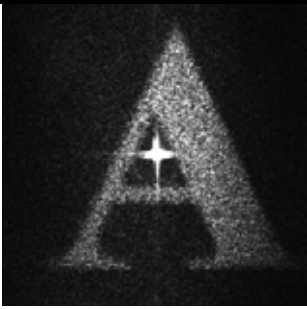
量化階數	四階	八階
光學重建圖像		
	$\eta=3.45\%$	$\eta=3.53\%$

圖 3-22 IFTA 演算法設計 600 乘 600 畫素大小之 4 階及 8 階全像片之光學重建圖像

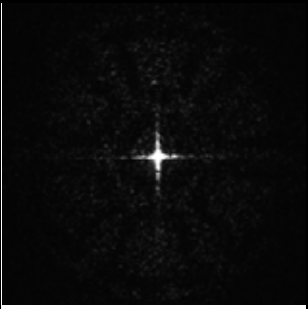
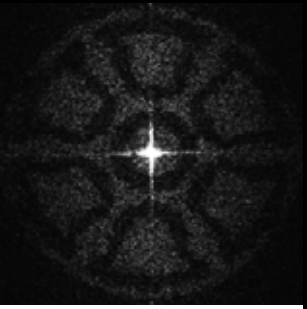
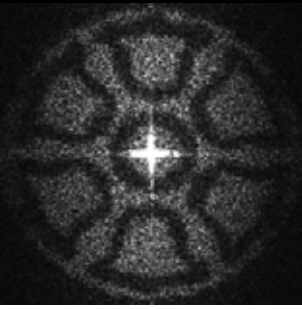
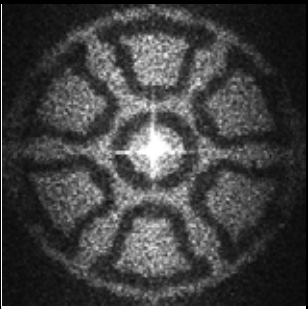
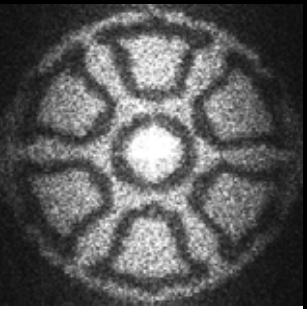
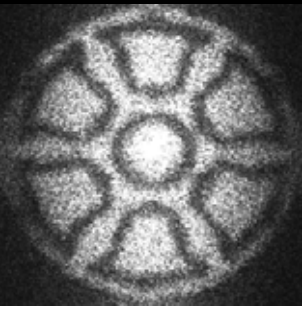
CGH 大小	100*100 pixels	200*200 pixels	300*300 pixels
光學重建 圖像			
	$\eta=2.75\%$	$\eta=2.98\%$	$\eta=3.22\%$
CGH 大小	400*400 pixels	500*500 pixels	600*600 pixels
光學重建 圖像			
	$\eta=3.39\%$	$\eta=3.53\%$	$\eta=3.72\%$

圖 3-23 IFTA 演算法設計不同畫素大小之 8 階全像片之光學重建圖像，其目標圖像為圓對稱圖像

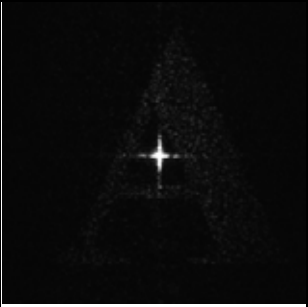
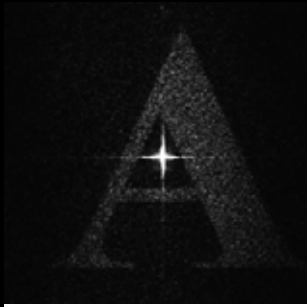
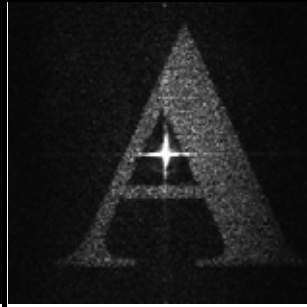
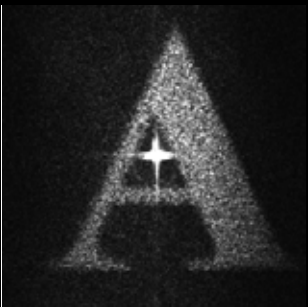

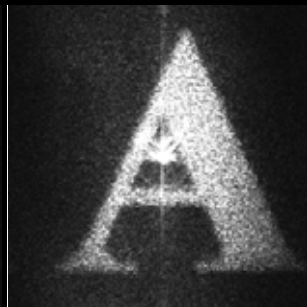
CGH 大小	100*100 pixels	200*200 pixels	300*300 pixels
光學重建 圖像			
	$\eta=2.71\%$	$\eta=2.92\%$	$\eta=3.06\%$
CGH 大小	400*400 pixels	500*500 pixels	600*600 pixels
光學重建 圖像			
	$\eta=3.28\%$	$\eta=3.42\%$	$\eta=3.53\%$

圖 3-24 IFTA 演算法設計不同畫素大小之 8 階全像片之光學重建圖像，其目標圖像為非對稱圖像

相位誤差	0%	-20%	-40%	-60%
光學重建 圖像				

圖 3-25 IFTA 演算法所設計不同畫素大小之 4 階全像片隨不同相位誤差由 0 % 到 -60 % 之光學重建圖像

相位誤差	0%	-20%	-40%	-60%
光學重建 圖像				

圖 3-26 IFTA 演算法所設計不同畫素大小之 8 階全像片隨不同相位誤差由 0 % 到 -60 % 之光學重建圖像

CGH 大小	100*100pixels	200*200pixels	300*300pixels	400*400pixels
光學重建 圖像				
	$\eta=2.91\%$	$\eta=3.41\%$	$\eta=3.93\%$	$\eta=4.65\%$

圖 3-27 DBS 演算法設計不同畫素大小之 2 階全像片之光學重建圖像

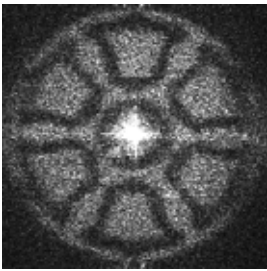
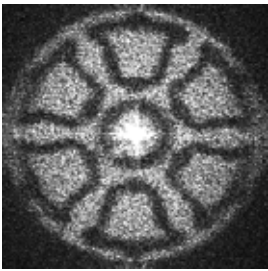
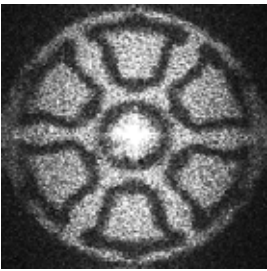
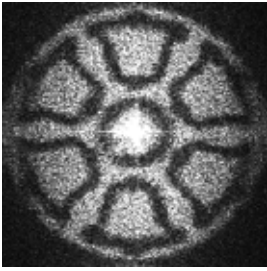
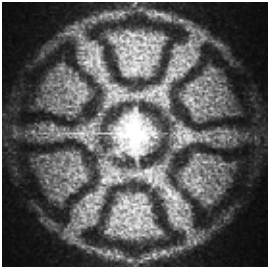
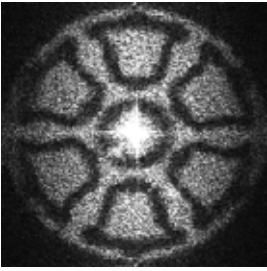
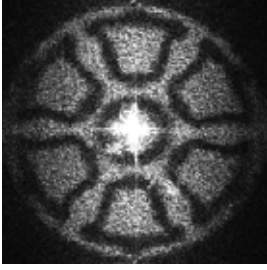
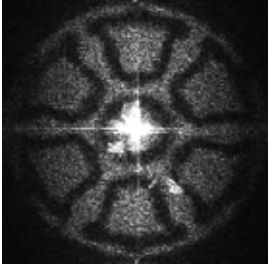
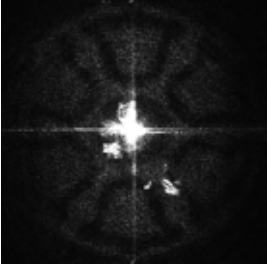
相位誤差	80%	60%	40%
光學重建 圖像			
	$\eta=3.35\%$	$\eta=3.61\%$	$\eta=3.91\%$
相位誤差	20%	0%	-20%
光學重建 圖像			
	$\eta=4.23\%$	$\eta=4.65\%$	$\eta=4.13\%$
相位誤差	-40%	-60%	-80%
光學重建 圖像			
	$\eta=3.85\%$	$\eta=3.37\%$	$\eta=2.81\%$

圖 3-28 DBS 演算法設計 400 乘 400 畫素大小之 2 階全像片隨不同相位誤差由 80 % 到 -80 % 之光學重建圖像

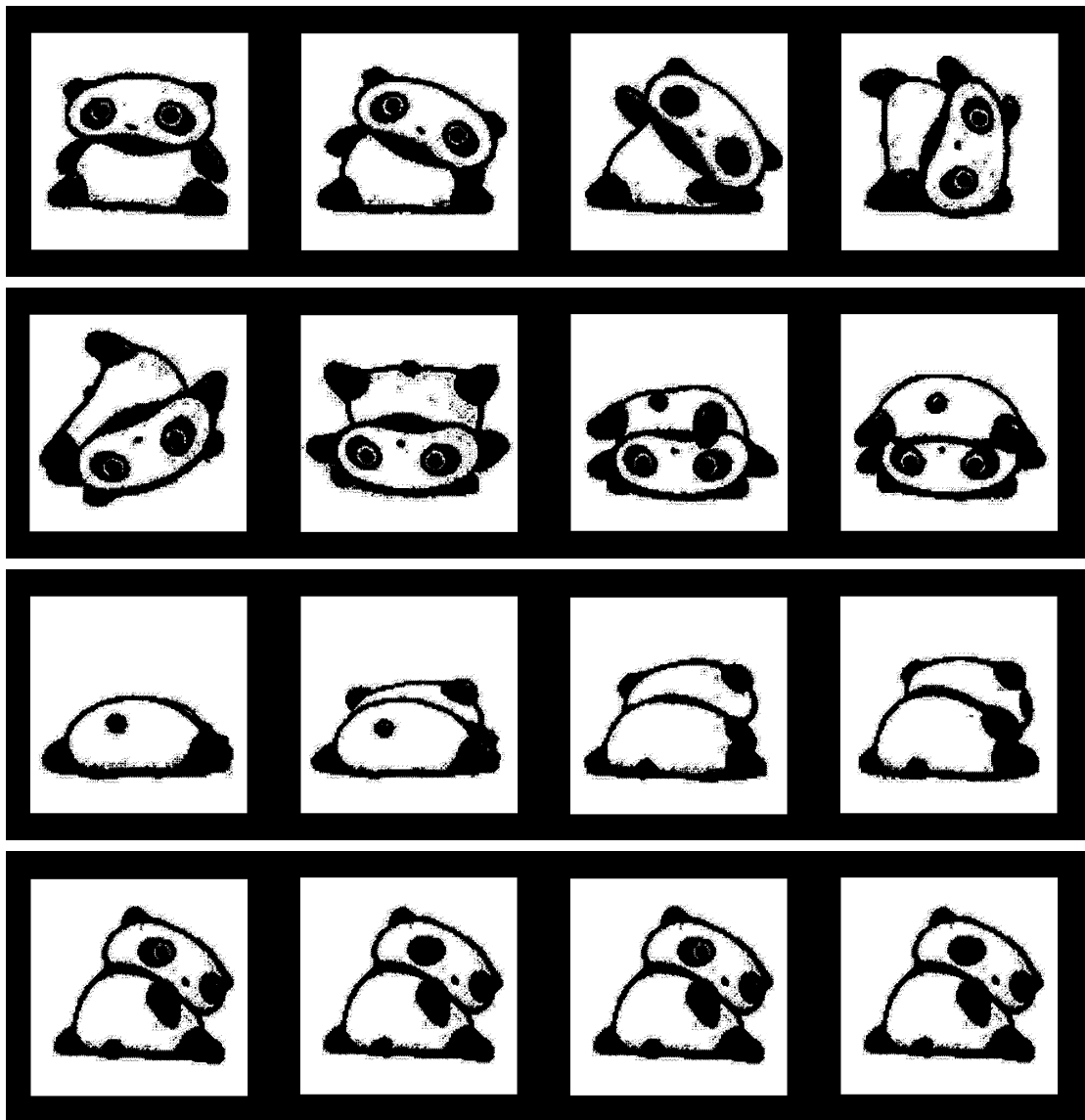


圖 3-29 目標圖像為 18 張連續動作的趴趴熊影像

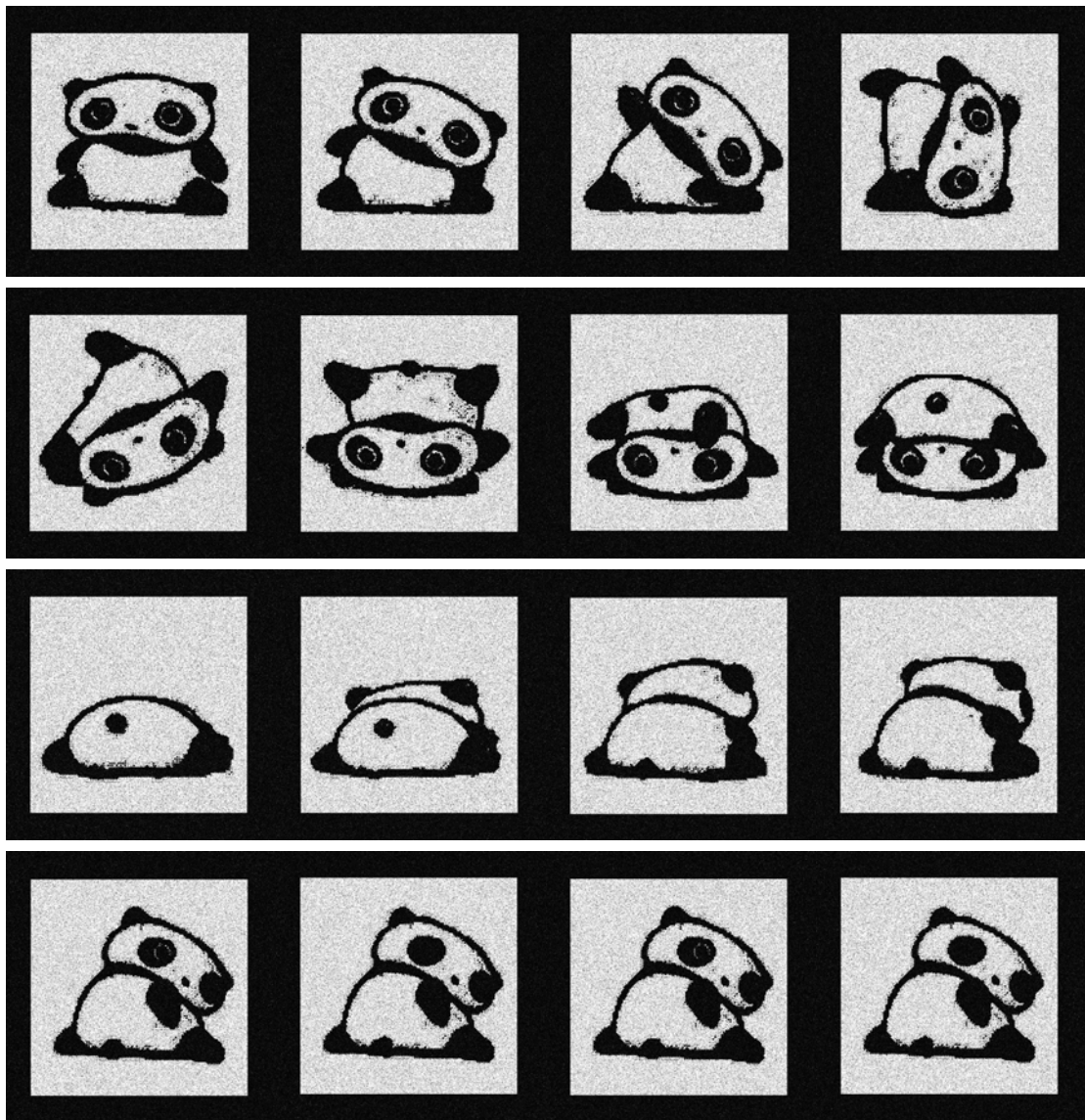


圖 3-30 連續動作之趴趴熊全像片的電腦重建圖像

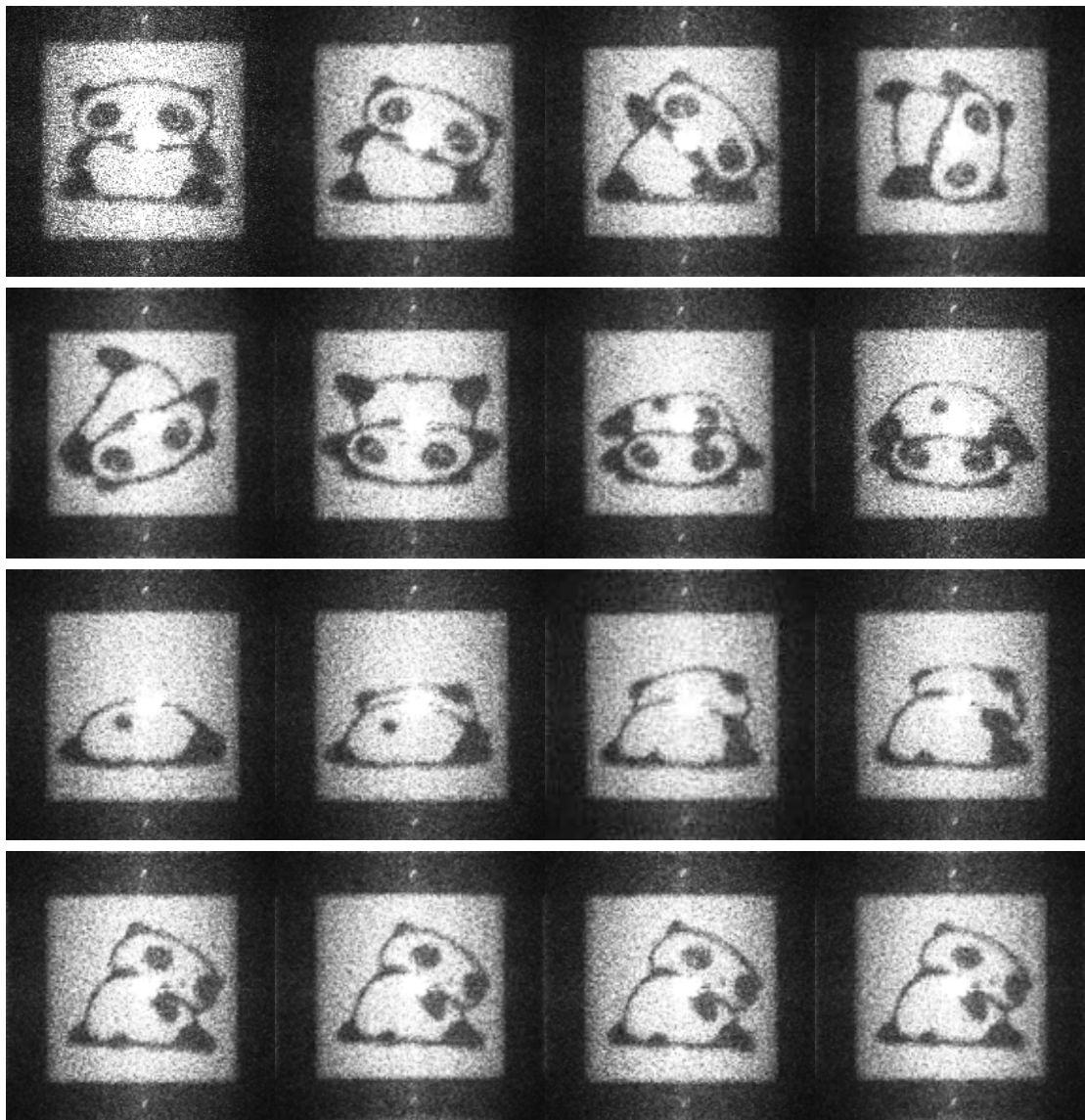


圖 3-31 連續動作之趴趴熊全像片的光學重建圖像，每張圖像之間隔相差 180ms