

第五章 分析與討論

本章會先描述實驗過程中所發現系統上的問題，然後針對輸出端和輸入端消色差相移進行討論和比較其量測結果。最後討論誤差的來源並且分析對量測結果的影響。

5.1 輸出端成像飄移問題

輸出端波片組在量測時主要是靠旋轉線偏極片來進行相位調制產生相移，我們知道一般光學元件會因加工精度而有誤差，同時線偏極片為了避免多重反射會特別設計兩表面不平行，因此在旋轉線偏極片時會產生干涉條紋在 CCD 接收面上有偏移的現象，即所謂成像飄移，如圖(5.1)，因此影響了量測的精度。

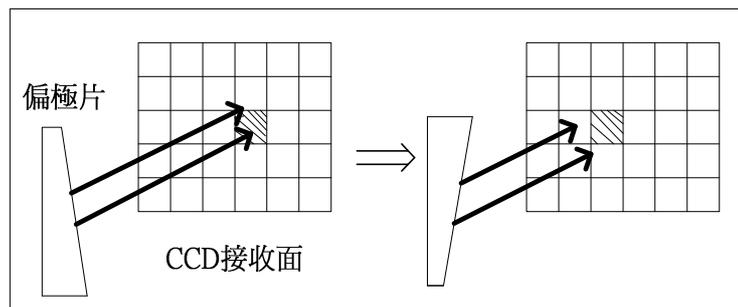


圖 5.1 成像飄移示意圖

為了改善此問題，我們先量測線偏極片兩面間的傾斜角(wedge)，使用 TRIOPTICS 公司生產的 OptiAngle 如圖(5.2)，量測方法是利用自準直儀(Autocollimator)進行量測，測其原本十字矢與反射回來十



圖 5.2 OptiAngle 儀器外觀

字矢之間的偏差來計算出角度誤差，測得線偏極片的傾斜角度為 33.17(秒)。可將線偏極片視為角度很小的薄稜鏡，利用公式[28][29]計算光通過線偏極片後的偏轉角。

$$D = (n-1)A \quad (5.1)$$

D 為最小偏轉角，A 為稜鏡頂角，n 為稜鏡折射率，在此 $n=1.5251$ ，因此 $D=17.42$ (秒)，考慮線偏極片旋轉一周對同一個畫素最大偏差張角為 $2D$ ，而所用 CCD 像素大小為 $7.3\mu\text{m}$ 。假設線偏極片與 CCD 接收面距離 l ，則 $2Dl \leq 7.3\mu\text{m}$ 才可確保線偏極片轉動時，成像仍落在同一個像素上。計算得 $l \leq 0.754\text{mm}$ 。這在實際架設系統時是無法達成的，因此無論如何輸出端的架構會存在成像飄移的問題。但根據實際實驗結果，線偏極片和 CCD 接收面距離短會有比較好的實驗結果。

5.2 波片組組裝誤差

在架設波片組將波片放入鏡座(mount)中時，往往會有誤差產生，而輸出端波片組要求半波片夾方位角 15 度，四分之一波片夾方位角 75 度，若未精確調到所要求角度，在進行相移過程中將影響對比度，如圖(5.3)就是波片組角度有誤差，可以明顯看出 I2、I4 的對比度受到影響。

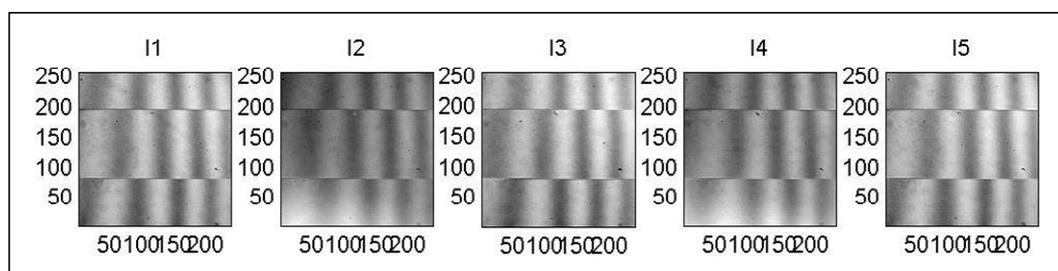


圖 5.3 輸出端波片組有誤差的五幅干涉圖

因此我們使用定出光軸的波片組校正法，方法請參照附錄 A，如此可以精確校正每一片波片誤差在 0.5 度以內。實驗中我們也發現到只要波片組誤差超過 2 度以上，就會發生如同圖(5.3)的結果。由理論上也可知波片組的角度是經過嚴謹計算，才能得到最佳調制效果。因此在實際上進行量測之前，必須先把波片組進行校準，以得最佳實驗結果。

5.3 輸出端與輸入端消色差相移的比較

在上一章中我們分別對三個微元件做輸出端與輸入端消色差相移的量測，現在將分別從精確度、對比度、重複性等進行比較。

5.3.1 精確度比較

對白光未濾波所量測三個元件的量測結果進行精確度比較，如表(5.1)。從對準鍵量測來看，輸入端有比輸出端精確的量測結果。而八階元件量測有相同的結果，但在進行量測我們發現，輸入端的重複性比輸出端好，因此也可說明輸入端的精確性較佳。

表 5.1 輸出端與輸入端精確度比較

元件	輸出端	輸入端	Zygo
對準鍵	178.7234nm	181.9149nm	181.424nm
八階繞射元件	479.7297nm	479.7297nm	480.314nm
八階濾波元件	500nm	500nm	499.612nm

5.3.2 對比度比較

從上一章所列出的五幅干涉圖形中可以來進行比較，但以肉眼觀察發現，輸出端和輸入端所得干涉圖形在對比度上看不出差異。然而我們知道對比度會反應在三維表面輪廓圖上，因此我們將重建所得三維圖形加上灰階(gray)來表示，圖(5.4)是輸出端所得三維輪廓的灰階

圖，圖(5.5)是輸入端所得三維輪廓的灰階圖。

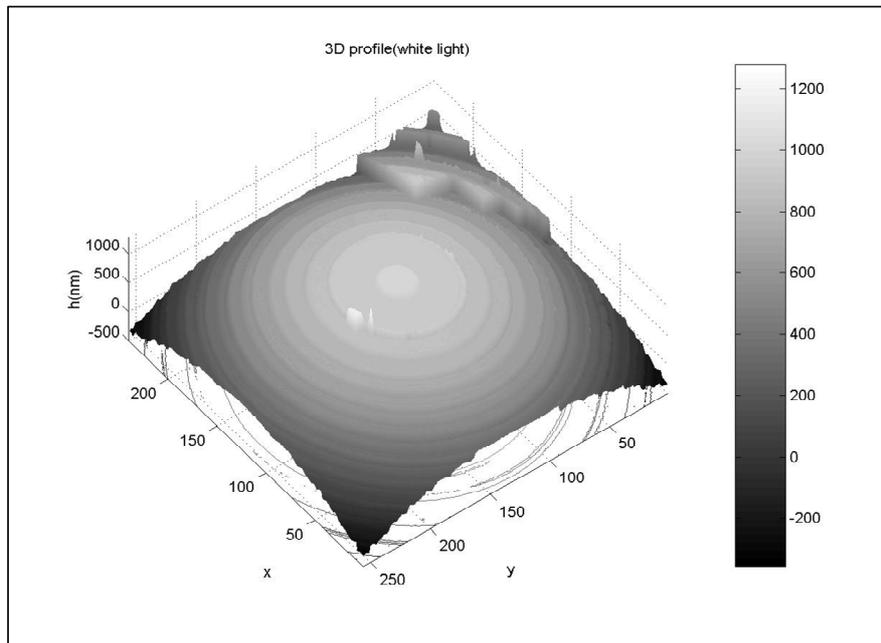


圖 5.4 輸出端所測三維輪廓的灰階圖

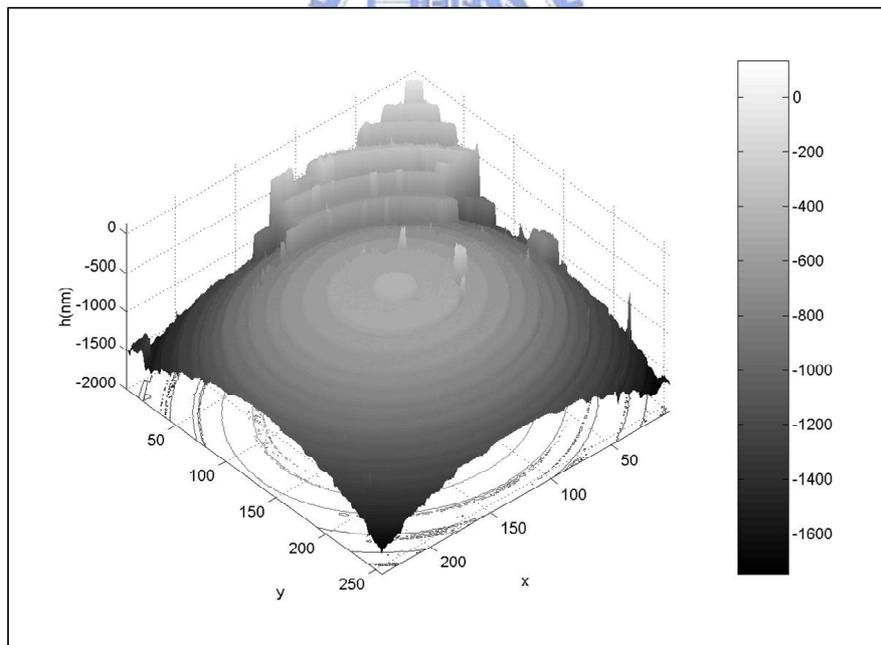


圖 5.5 輸入端所測三維輪廓的灰階圖

可以看出輸出端灰階從-200~1200；輸入端灰階從-1600~0。可知輸入端灰階比輸出端大，因此輸入端對比度比輸出端好。

5.3.3 重複性比較

參照 4.5 節中的實驗結果，可知輸入端重複性較佳。

5.3.4 架構比較

輸出端波片組是 triplet 架構；輸入端波片組是 two-waveplate 架構。從 5.2 節可知當架構越複雜，用的波片數越多，則校正所花的時間會越久。從誤差分析上的觀點來看，波片數越多的越容易引入誤差。因此輸出端波片組會有著比輸入端要大的誤差量，這也是輸入端量測較準確、重複性較高的原因。此外，輸出端是旋轉線偏 45 度進行調制，而輸入端是旋轉半波片 22.5 度進行調制，在同樣擷取五幅圖的情況下，輸入端只要花輸出端一半時間即可完成，因此所引入的空氣擾動、振動也會比較小。

在進行輸出端波片組實驗時，也必須注意到在系統光源處要加入線偏 45 度，將光調制成 45 度線偏振，以配合 PBS 使得參考光和物體光強相同，才有最佳對比度。而輸入端波片組不需要在光源處放線偏，因它本身在未進入 PBS 之前已先經過波片組調制，但仍會加入一水平線偏以符合 Jones 矩陣推導。

5.3.5 相移的準確度比較

利用所擷取的干涉圖形來反推 CCD 上每一個畫素的相移量分佈，圖(5.6)至(5.8)為輸出端計算得到的相移圖；圖(5.9)至(5.11)為輸入端計算得到的相移圖，其中橫軸是相移的角度，縱軸是畫素的數目。

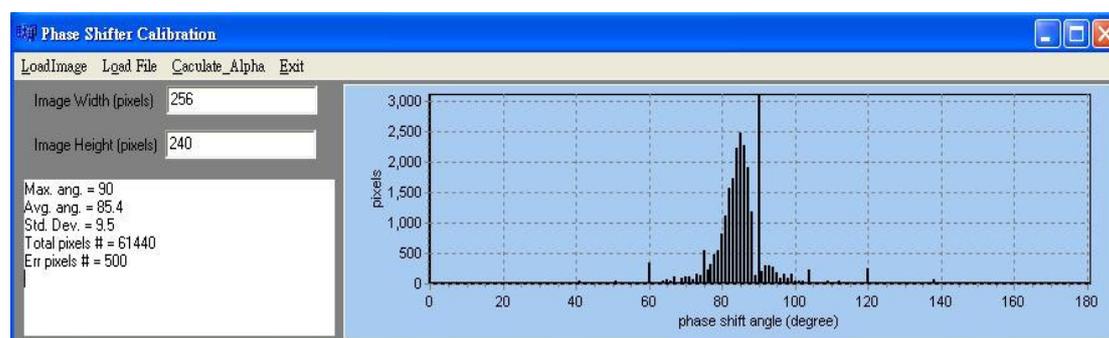


圖 5.6 輸出端未加濾波片對所有畫素點相移角度的分佈

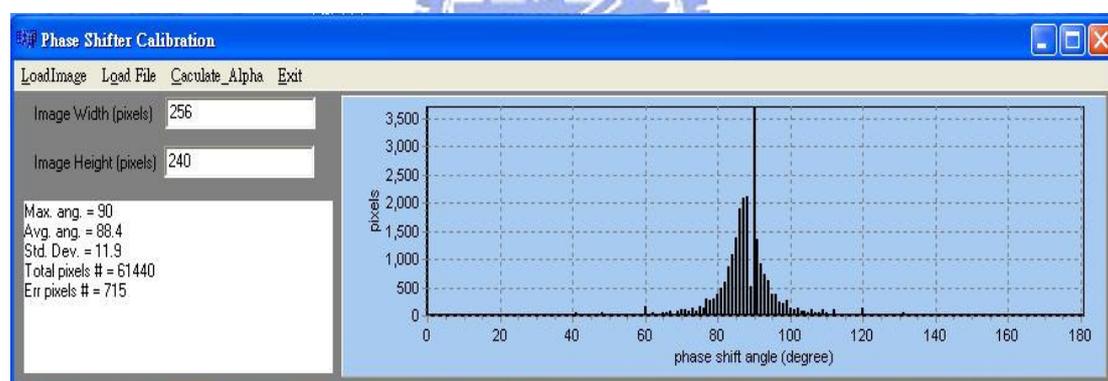


圖 5.7 輸出端加 589.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈

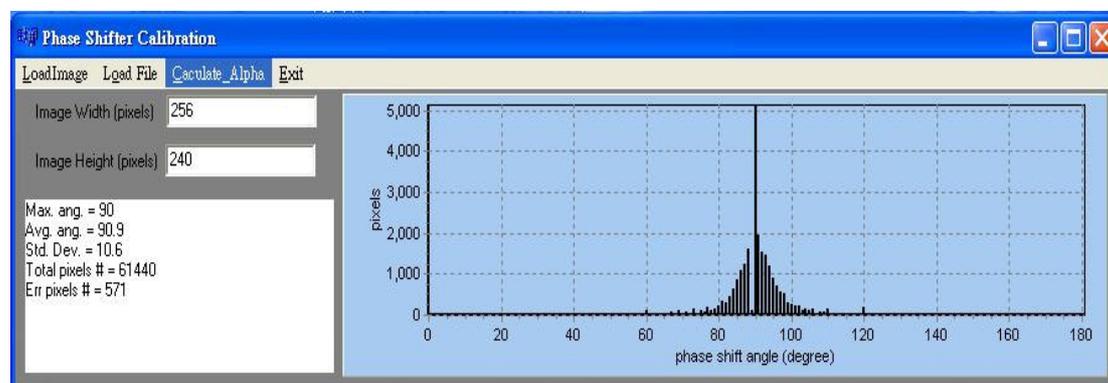


圖 5.8 輸出端加 629.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈

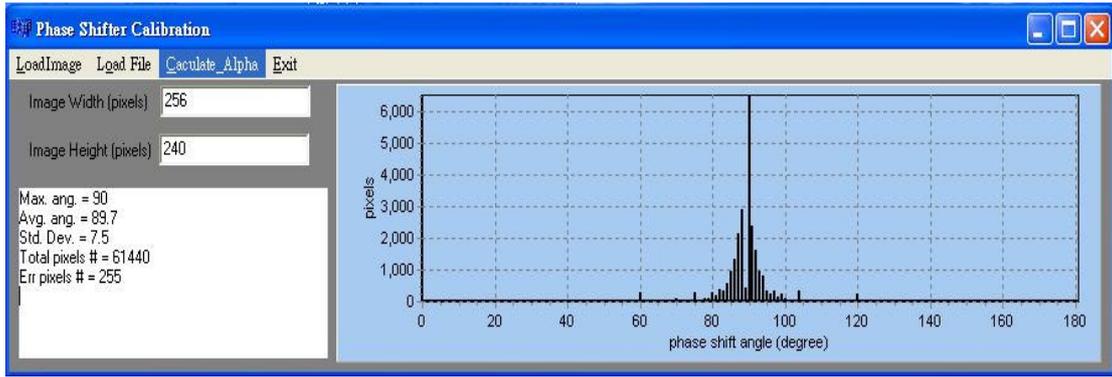


圖 5.9 輸入端未加濾波片對所有畫素點相移角度的分佈

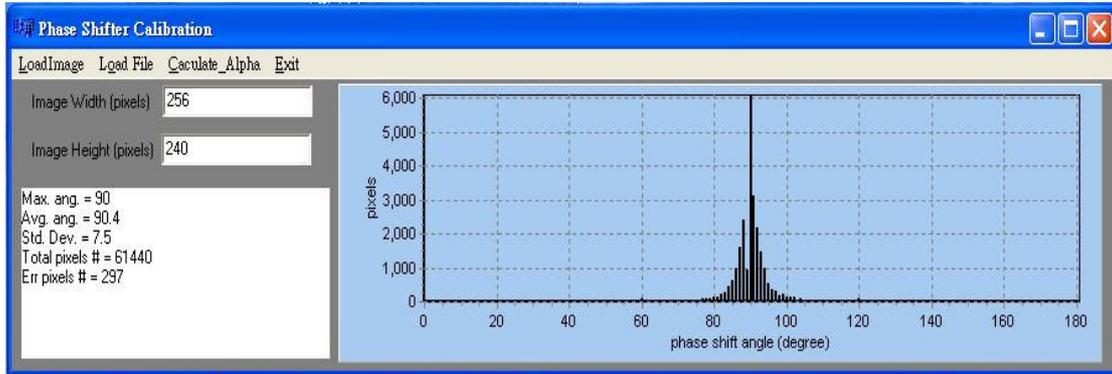


圖 5.10 輸入端加 589.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈

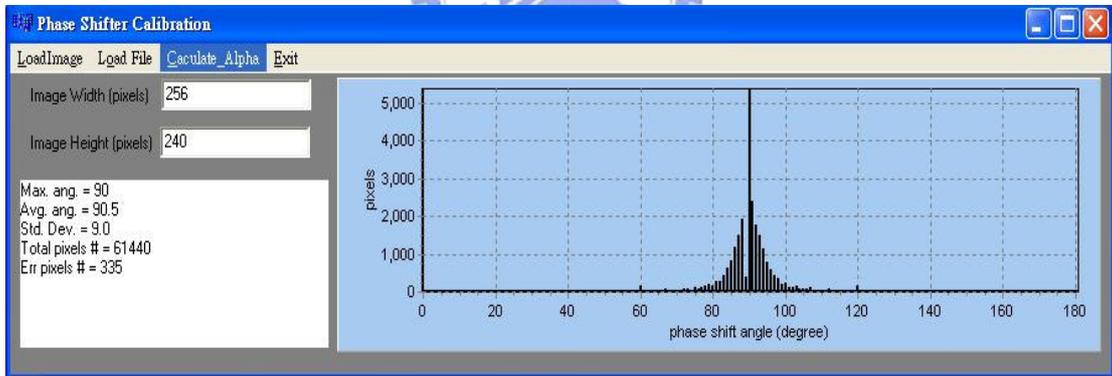


圖 5.11 輸入端加 629.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈

從圖(5.6)至(5.11)計算結果比較可知，輸入端在平均相移量及畫素錯誤率上也比輸出端好。進一步計算相移誤差造成的高度誤差，根據誤差量對五步相移演算法推算出來的相位影響為

$$\Delta\phi \cong \left(\frac{\varepsilon^2}{4} \right) \sin [2\phi(x, y)] \quad (5.2)$$

其中 ε 為相移誤差量， $\Delta\phi$ 為相位誤差。如果只考慮相移量造成的誤差。以輸出端而言，未加濾波片平均角度是 85.4 度、加入 589.5nm 濾波片平均角度是 88.4 度、加入 629.5nm 濾波片平均角度是 90.9 度；接著考慮輸入端，未加濾波片平均角度是 89.7 度、加入 589.5nm 濾波片平均角度是 90.4 度、加入 629.5nm 濾波片平均角度是 90.5 度，(5.2) 式中當 $\phi = \frac{\pi}{4}$ 時誤差最大，因此可計算高度誤差 Δh

$$\Delta h = \frac{\bar{\lambda}}{4\pi} \Delta\phi \quad (5.3)$$

表 5.2 輸出端相移量偏差對深度誤差的影響

中心波長 $\bar{\lambda}$ (nm)	相位誤差 $\Delta\phi$ (radians)	深度誤差 Δh (nm)
白光沒濾波 580	1.611×10^{-3}	0.0743
窄帶通濾波 589.5	1.9495×10^{-4}	0.0091
窄帶通濾波 629.5	6.1685×10^{-5}	0.0031

表 5.3 輸入端相移量偏差對深度誤差的影響

中心波長 $\bar{\lambda}$ (nm)	相位誤差 $\Delta\phi$ (radians)	深度誤差 Δh (nm)
白光沒濾波 580	6.8539×10^{-6}	0.0003
窄帶通濾波 589.5	1.2185×10^{-5}	0.0006
窄帶通濾波 629.5	1.9038×10^{-5}	0.00095

表(5.2)和表(5.3)也同樣表示了輸入端比輸出端有較好的效果。

5.4 三維表面輪廓誤判

在進行相移的過程中，干涉條紋會隨著 PZT 移動或波片轉動產生變化，深度量測也就是藉由干涉條紋相移來進行相位重建的結果。因此條紋移動的方向會影響三維表面輪廓重建的結果，我們以實驗所用消色差相移法為例，當波片順時針旋轉與逆時針旋轉，就會得到完全相反的三維輪廓。圖(5.12)是波片順時針旋轉相移的五幅干涉圖和所重建八階繞射元件的三維表面輪廓；圖(5.13)是波片逆時針旋轉相移的五幅干涉圖和所重建八階繞射元件的三維表面輪廓。

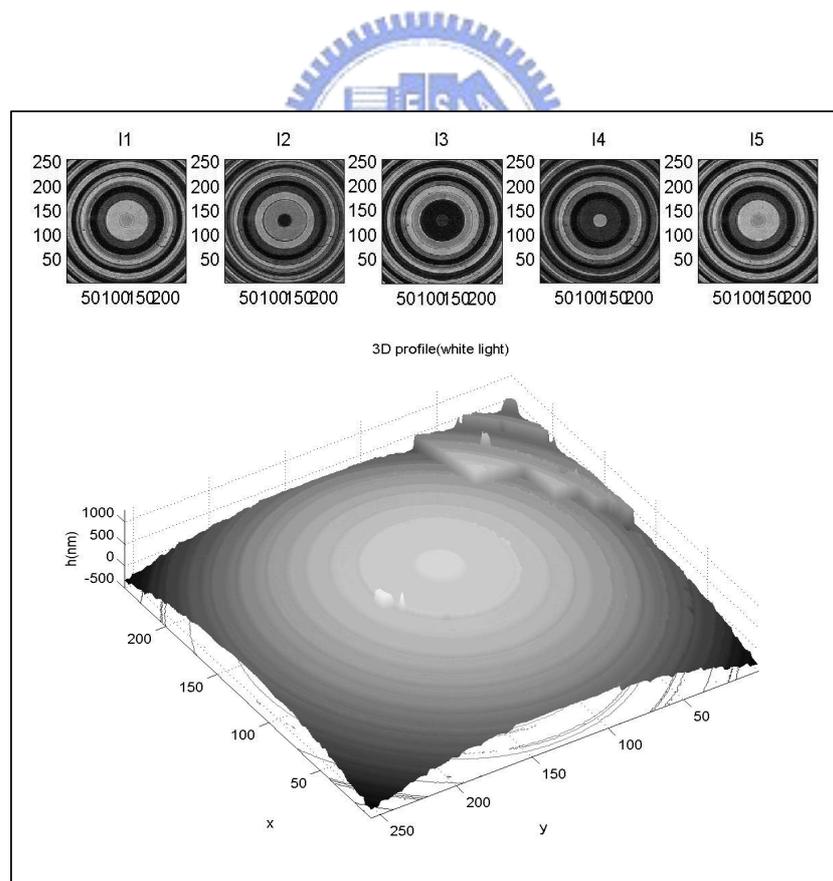


圖 5.12 波片順時針旋轉所得結果

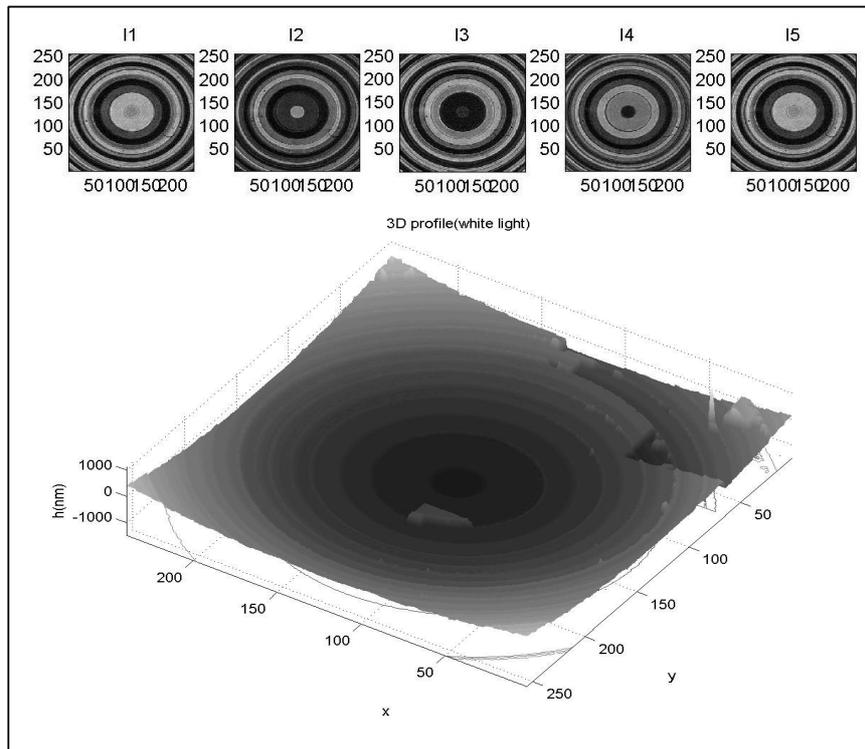


圖 5.13 波片逆時針旋轉所得結果

從干涉條紋我們只能得到深度的資訊，必須再藉由條紋移動方向才能判斷出正確三維輪廓的情形，這是一般利用相移法會產生的問題。

5.5 系統討論與誤差分析

5.5.1 振動及空氣擾動

對於干涉式光學量測，振動和空氣擾動所引起的誤差是最常見的問題，當這些因素存在的時候，干涉條紋會隨之振動或亮度會產生變化及晃動，在影像記錄這一端所看到的是擷取強度平均之後的結果，因此會造成條紋較為模糊或對比度下降。所以一般應該要在光路所經

之處加上防護罩並遠離空氣流動源以隔離空氣擾動；整套量測系統架設在光學桌上，避免音響、馬達或風扇等振動源，可大幅減少振動的影響。

振動會對相位量測產生正弦變化的誤差，這個正弦變化的頻率是干涉條紋空間頻率的兩倍。如果在系統經過校準程序後，仍然發現兩倍頻率的相位誤差，最有可能就是振動產生的。根據研究指出，當振動的頻率遠高於影像記錄的頻率時，影像因振動產生的光強度微擾會被平均稀釋，利用相移干涉術可達到減少振動誤差的影響。因為振動產生的相位標準差 σ_ϕ 和光強度的標準差 σ_I 存在下列關係[30]：

$$\sigma_\phi = \frac{\sqrt{k}\sigma_I}{V'} \quad (5.4)$$

其中 V 是條紋對比度。 k 是和相移演算法相關的常數，通常跟採用的步進數目成反比關係：

$$k \cong \frac{2}{N} \quad (5.5)$$

即使每幅影像因為振動或光源本身的緣故發生強度微擾，相位誤差總是在相移演算後變得更小，當採用的相移數目越多誤差會越小。另外(5.4)式也可用來評估偵測器射雜訊及熱雜訊造成的相位量測誤差。

然而光學元件設備的也是一大因素。包含光學元件對溫度壓力所產生的形變，以及固定光學元件的設備，如基座等，每個位置都有利

用螺絲固定，然而螺絲本身不一定固定不動，這些小位移的結果，便會造成干涉條紋的飄移，使擷取相位發生錯誤，特別是在相位重建時，錯誤的相位容易導致錯誤的相位還原。所以除了系統加上防護罩外，也要從量測習慣著手改進。

5.5.2 訊號量化的誤差

擷取干涉條紋強度分佈時，通常是經由類比數位轉換器 (analogue-to-digital converter, ADC) 將類比影像訊號轉換成數位訊號，因此原本的連續強度訊號被編譯成 256 階數位訊號，代表描述強度細節的能力變得比較弱。

C. P. Brophy[30]的研究指出相位標準差和相移步進量具有某種程度的關聯，以每次相移量 $\frac{\pi}{2}$ 為例：

$$\sigma_{\phi} \cong \frac{1}{\sqrt{3VQ}} \quad (5.6)$$

對於更多步進數目 N 的相移演算法，其關係式為：

$$\sigma_{\phi_N} \cong \frac{2}{\sqrt{3NVQ}} \quad (5.7)$$

Q 是指記錄影像的灰階數，以本系統為例， $N=7$ 類比數位轉換器是八位元 (8 bits) 的，則 $Q=2^8=256$ 。在上式中 σ_{ϕ_N} 和 V 成反比是因為 VQ 表示光強度為 CCD 所記錄的動態範圍， V 越小代表所跨越的灰階範圍越小，量化後的強度解析度越粗糙，所以在量測前都會先調整光強

度到適當的動態範圍。如果條紋對比度 $V=1$ ，對應其量測波長具有相位標準差：

$$\Delta h_{Q_\lambda} = \frac{\sigma_\phi \lambda}{4\pi} \quad (5.8)$$

表 5.4 光強度數據量化對深度誤差的影響

中心波長 $\bar{\lambda}$ (nm)	深度誤差 Δh_{Q_λ} (nm)
580	0.078
589.5	0.079
629.5	0.085

所以使用八位元 CCD 其實精確度已經相當足夠了，若要達到 0.01 nm 以下的精確度，轉換器至少要十二位元的才行，不過如此將大幅降低數據擷取與傳輸速度。