

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

使用移相術精密量測壓電相位移動器之研究
The Research on Measuring the Move of Piezoelectric
Transducer Precisely by Using Phase Shifting Interferometry

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-97 光電-01

執行期間：97年1月1日至97年9月30日

計畫主持人：江政忠

共同主持人：

計畫參與人員：謝易霖、黃兆男、蔡方銘

處理方式：公開於校網頁

執行單位：光電系統工程系

中華民國九十七年十月二十日

中文摘要

本計劃已成功地使用相移式 Twyman-Green 干涉儀，量測 PZT 的位移量對施加電壓的正確關係，且使用 Hariharan 演算法計算不同的相位移量，除了相位移量在 0 、 π 、 2π 附近，因為 Hariharan 演算法無法判斷的關係，改採用判斷干涉圖形的方式取得。且本計劃成功地透過電腦控制電源供應器施予 PZT 的供給電壓，獲得推動相位以引入量測參數，再成功地將產生的干涉圖形透過 CCD 擷取影像至電腦。本計劃透過數值模擬方式來比較 Hariharan 五步相位演算法與 Carré 四步相位演算法，在干涉圖形的光強度具有相同誤差的情況下，證明 Hariharan 五步相位演算法所計算獲得的相位移量 α 與原本引入的相位移量 α 之間的誤差較小，故採用 Hariharan 五步相位演算法計算相位移量。在目前的產業中，由於產品精密度及成本要求越來越嚴格，所以對產品的檢測就顯的更加重要，而其中光學式的檢測方法則因具有非接觸性，測量時間短及全域測量等優點，所以較符合工業用途。在光學干涉儀所組成的量測系統中，大多使用具有壓電特性的 PZT 來引入相位差，因此 PZT 的精準度對測量結果的準確性影響重大，且 PZT 在干涉領域中的應用非常廣泛，因此本研究的研究成果證實和採用最能降低硬體雜訊的演算法，與使用相移式 Twyman-Green 干涉儀準確地量測 PZT 的位移量對施加電壓的關係，有助於提升使用 PZT 的量測精準度，也有助於提升業界對於壓電相位移動器的認知與幫助，也有助於壓電相位移動器的學術探討與研究。

關鍵詞：Twyman-Green 干涉儀、相位移動器、PZT、Hariharan 演算法、Carré 演算法、光學檢測、量測精準度。

英文摘要

This project accurately measured the relationship between applied voltage and the displacement of a piezoelectric transducer (PZT) device both by analyses using phase shifting interferometry algorithms and using a Twyman-Green interferometer. Simulations performed to calculate unknown phase shifts, especially around $\pi/2$ and $3\pi/2$, indicated that the Hariharan algorithm was indeed an effective PSI algorithm. A phase shifting Twyman-Green interferometer, combining the Hariharan phase reduction algorithm, was prepared to measure the displacement on the PZT. The interference pattern can be seen on the video monitor through the CCD camera. A programmable power supply controlled by a computer provided the PZT voltages. The image processing software for phase-shifting fringe analysis was developed by using computer languages. The function of the software involved grabbing five interferograms and digitizing each frame, and calculating the phase reduction. A PC-based apparatus was prepared to investigate the behaviors of the displacement on PZT precisely when the PZT was applied by the various electric voltages. The research is helpful to the accurate measurement of industry in Taiwan. And the research is also prompt to the level of studying phase shifting interferometry in Taiwan.

Keywords : displacement, piezoelectric transducer, PZT, phase shifting interferometry, Twyman-Green interferometer, Hariharan algorithm.

目錄

一. 前言	1
二. 研究目的	3
三. 研究方法	3
四. 實驗部份	5
五. 結果與討論	6
六. 結論	10
七. 參考文獻	10
計畫成果自評	11

表目錄

表一 陶瓷類壓電材料優缺點。-----	2
---------------------	---

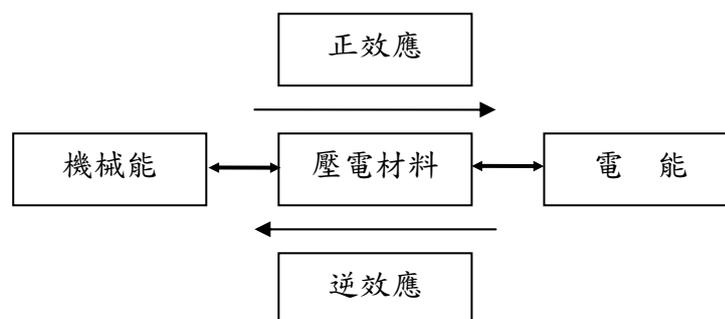
圖目錄

圖一 壓電效應示意圖。-----	1
圖二 PZT 位移量量測系統。-----	5
圖三 Hariharan 演算法誤差分析。-----	6
圖四 Carré 演算法誤差分析。-----	7
圖五 引入相位移量 α 值為 $\frac{\pi}{3}$ 的 5 張干涉圖形。-----	8
圖六 干涉圖形計算相位移量值為 $\frac{\pi}{3}$ 。-----	8
圖七 PZT 元件的施加電壓與推動相位關係圖。-----	9
圖八 PZT 元件的施加電壓與推動距離關係圖。-----	9

一. 前言：

現今在業界中高精密度的製造業要求更加準確、精確和迅速的量測方法，而光學量測是一種以光波為介質，應用光學原理所進行的檢測。光學中的干涉原理是由電磁波理論發展而來，光為電磁波波的一種，因此當同時有兩道波在空間中前進交集時，交集區域內各點的震動為該位置兩波的波前相加，這就是干涉的疊加原理(superposition)[1]，而因為光干涉會涉及同調長度，故一般來說光學式量測其精準度可達奈米等級，可利用光干涉技術對物體表面進行巨觀的觀察與微觀的起伏變化、形變、特性等量測[2,3]，因為光學量測為非接觸式量測，故不會破壞測量物體，並且由此基礎發展成光學式的相位移干涉術，相位移干涉術(Phase Shifting Interferometry)正是目前許多工業所倚重的一種量測方法。相位移干涉術有多種演算法，在研究分析上較常遇到的有三步法[4,5]、Wyant提出的四步法[6]、Carre提出的Carre演算法[7]和由 Hariharanc、Oreb、Eiju提出的五步相移演算法[8]，其中由相位移動器(PZT)所引入的相位移精準度對於相位移干涉量測的結果，是最可代表測量的可靠度。故對利用光學式的相位移干涉術來量測樣品的干涉儀而言，不準確的相位移會在計算物體表面的相位上產生誤差，如此便無法準確的得到物體的表面資訊。

在 1880 年 Pierre Curie 和 Jacques Curie 兄弟先發現對電氣石(tourmaline)施加一外來機械應力時，可以在表面上得到電荷並定義為壓電性(piezoelectrics)後，1881 年居里兄弟又利用熱力學理論證實了壓電性逆效應之存在，即外加電場可以導致晶體產生機械效應，從而建立了壓電性與晶格的關係，如圖一所示，壓電現象是一種能量互換的現象，正壓電效應是當壓電材料受到機械應力作用時，壓電材料表面將產生電荷，使兩端產生電壓，並且電壓與應力大小成比例，且拉伸應力與壓縮應力對應電壓極性，逆壓電效應則是當一直流電場流通壓電材料之兩端時，壓電材料將產生相對應的變形量。



圖一 壓電效應示意圖。

Woldemar Voigt 在 1894 年進一步結合電性張量(electric tensor)、向量的對稱元素(symmetry element)、晶體上的對稱元素…等解釋了壓電材料的晶體結構為一鈣鈦礦晶型(Perovskite)，為一種鐵電多晶體材料。從壓電現象的發現，可以歸納出自然界許多種材料都具有壓電性質，但因為材料本身性質的限制，無法廣泛的應用，因此開始有人工合成製作的壓電材料出現，在眾多材料中因為陶瓷類的壓電材料具有鐵電特性(Ferroelectricity)，且經過適當處理後將如單晶材料般具有方向性，又具有耐酸鹼、溫度係數大、偶合係數高、壓電活性良好可以用較低的極化電場極化，因此常被用來製作相位移動器。常見的材料有鈦酸鋇($BaTiO_3$)、鈦酸鉛鋅(PZT)，而其優缺點列於表一中，其中遲滯現象(Hysteresis)為壓電材料影響最大的一種特性。以材料來說，沒有特別處理的結晶，其各電域之極化方向為隨機排列方式，整體的極化量為零，當外加電場時，所有電域中的極化方向會隨電場方向方向排列，而有一淨極化值，此時若移去電場，因為分子間的磨擦關係造成極化值無法回到零，如果要使極化值回歸於零，需加上一反向的矯正電場，而這種上升曲線和下降曲線不一致情況即為遲滯現象。

表一 陶瓷類壓電材料優缺點。

優點	高解析度	PZT 最小位移量可以達到次奈米等級(Sub-nanometer)，微小的電壓量即可使 PZT 產生極小位移量。
	響應時間快	PZT 響應時間非常快，通常頻寬可高達數 KHZ。
	不受磁場影響	PZT 是由電場驅動，本身不會產生磁場，因此也不會受到磁場影響，可用於磁場干擾大的地方。
	無磨擦損耗	PZT 本身沒有齒輪或軸承這些配件，位移是藉由本身固體狀態變化而來，所以沒有磨損問題。
缺點	位移量小	PZT 的位移量約為本身壓電材料長度的千分之一。
	具有遲滯現象	遲滯現象造成的誤差最多可達到其運動路徑的 15%。
	具有潛變現象	為殘存的極化現象所產生。

由於陶瓷材料製作的 PZT 具有如表一所述優點，因此廣泛應用在精密量測的定位控制上，且 PZT 的精準度對測量結果準確性影響重大，必須先測量出 PZT 的位移量對電壓的正確關係，所以本研究採用由相位移干涉術引進相位差來準確計算 PZT 位移量。

二. 研究目的：

在目前的產業中，由於產品精密度及成本要求越來越嚴格，所以對產品的檢測就顯的更加重要，而其中光學式的檢測方法則因具有非接觸性，測量時間短及全域測量...等優點，所以較為符合工業用途。而光學量測大多基於光的同調原理，以參考端與待測端的光程差來測量元件的表面平整度，所以測量端的參考元件及引進量測參數的精準度就更加的重要了。在干涉儀所組成的測量系統中，大多使用具有壓電特性的 PZT 來引入相位差，因此 PZT 的精準度對測量結果的準確性影響重大，進而對於 PZT 的移動矯正及補償因壓電特性非線性所造成的誤差，這兩個課題就顯的非常重要。所以本研究計畫透過 Twyman-Green 干涉儀的架構配合 CCD 及電腦控制來獲得 PZT 的電壓-推動相位曲線圖，並且採用不同的演算法來比較出最能降低硬體雜訊的演算法，PZT 在干涉領域中的應用非常廣泛，透過研究可以有效的提高測量的準確性並且降低應用上的誤差。

三. 研究方法：

本計畫的研究方法首先架設一 Twyman-Green 干涉儀，以光干涉技術作為量測方法，並且透過電腦控制電源供應器施予 PZT 的供給電壓，獲得推動相位以引入量測參數，再將產生的干涉圖形透過 CCD 擷取影像至電腦，經過運算法演算，求出供給電壓對 PZT 推動距離的準確關係。在相移干涉術中具有許多種的演算法，其中以 1966 年 Carré 提出的 Carré 演算法與 1987 年 Hariharan 等人提出五步相位演算法較具代表性。Carré 演算法為擷取四張干涉圖影像，但與原始的四步相移法不同的是引入的相位移量沒有限定，因此可以用來測試引入的相位移量，假設引入的相位移量為一線性比例，其中四張干涉影像分別表示為：

$$I_1(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) - 3\alpha]$$

$$I_2(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) - \alpha]$$

$$I_3(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) + \alpha]$$

$$I_4(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) + 3\alpha]$$

由上述的方程式可以推算出物體表面相位 $\phi(x, y)$ 與引入的相位移量 α 為：

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\{[3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)][(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)]\}^{\frac{1}{2}}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right\} \quad (1)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)}{(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)}} \right] \quad (2)$$

此方法的優點在於資料量較少，運算快速，但因為由 PZT 所引入的為一非線性位移量，因此將產生些許誤差。五步相位移演算法基本上與 Carré 演算法一致，但擷取的干涉圖影像增加為五張，由於一樣假設為等相位差引入，每次引入的相移量為 α ，而五步法在相位移量為 $\frac{\pi}{2}$ 附近時，容許的相位誤差變大，且最後所引入的總相位移量為 2π ，因此第一張與第五張的干涉影像將會非常接近，也可做為一個簡單的比對，而五張影像分別表示為：

$$I_1(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) - 2\alpha]$$

$$I_2(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) - \alpha]$$

$$I_3(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y)]$$

$$I_4(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) + \alpha]$$

$$I_5(x, y) = 2I + 2I \cos[\phi(x, y) + 2\alpha]$$

其中物體表面相位 $\phi(x, y)$ 與引入的相位移量 α 為：

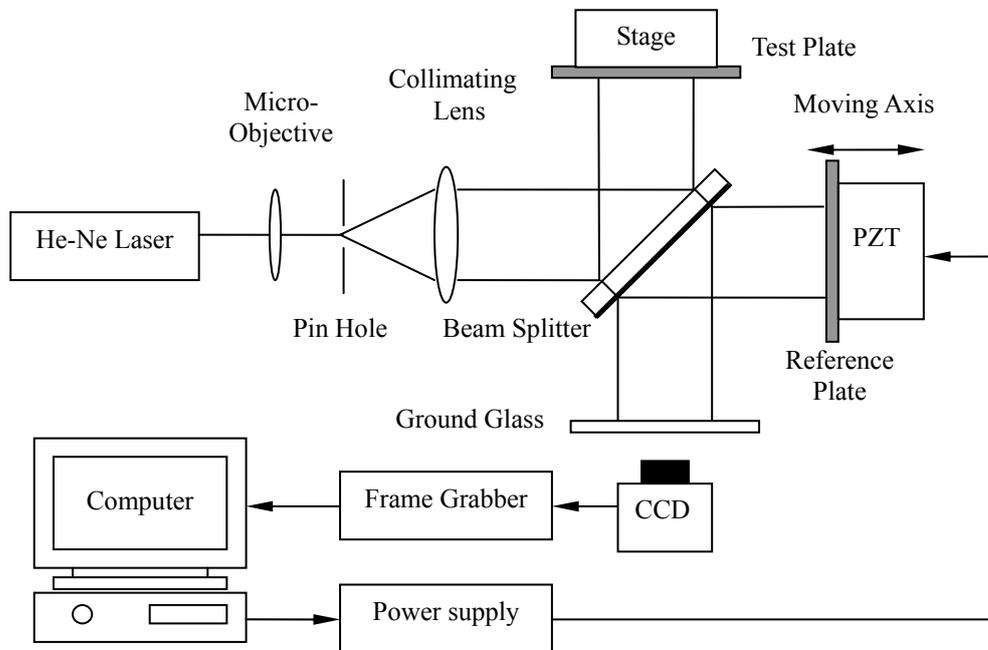
$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (3)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{I_5 - I_1}{I_4 - I_2} \right) \right] \quad (4)$$

利用上述(2)式與(4)式，可以計算出引入的相位移量 α ，進而得到電壓-移動量的對應曲線圖。

四. 實驗部份：

首先架設一 Twyman-Green 干涉儀，系統架設如圖二所示，採用一穩頻的紅光氦氖雷射光源，波長為 632.8 nm ，經過一顯微物鏡與針孔所構成的空間濾波器後成為一個點光源，再經過準直透鏡後，可得一平行波前，藉由一個 50% 的分光鏡(Beam Splitter)將平行波前振幅分割為反射波前和透射波前，在參考端裝置 PZT 元件，然後反射光束和透射光束經參考平面鏡與待測面鏡反射後，兩反射光再經分光鏡重新合併成單一光束，即干涉圖形成像於屏幕上，最後使用電腦控制電源供應器，供給電壓驅動 PZT 元件產生形變量，引入相位移量 α 參數，並使用影像擷取卡為介面，透過 CCD 固態攝影機擷取依序產生的干涉圖形至電腦，再依據演算法推算出供給電壓與 PZT 元件移動量的相對關係。



圖二 PZT 位移量量測系統。

實驗步驟如下：

步驟一：分別開啟雷射光源、CCD 固態攝影機、電源供應器。

步驟二：待雷射光源穩定後校正干涉儀光路。

步驟三：調整 CCD 固態攝影機檢測範圍，使光強度變化於 256 灰階內。

步驟四：調整干涉圖形為同心圓圖形，並將圓心調整至擷取影像正中央。

步驟五：執行 PZT 移動量分析程式，控制電源供應器驅動 PZT 產生位移量，並透過影

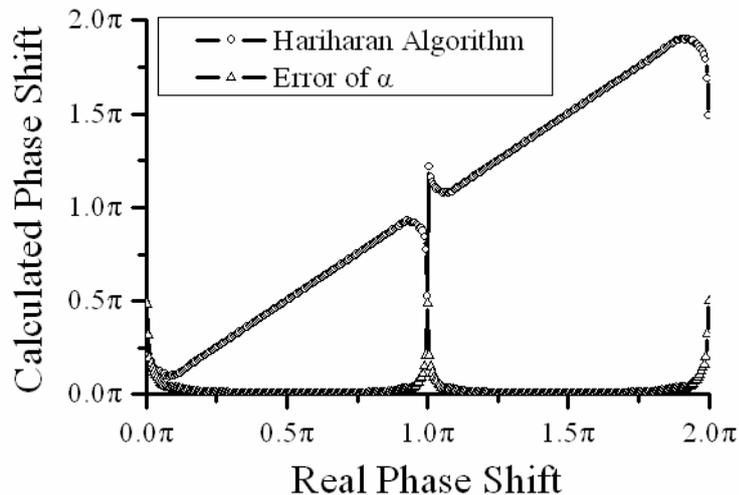
像擷取卡操作 CCD 固態攝影機擷取五張干涉圖影像。

步驟六：設定干涉影像分析區域，計算其條紋明晰度與推動相位，如條紋明晰度低於 0.8 則重新執行步驟五。

步驟七：紀錄驅動電壓與推動相位，並重複執行步驟五與步驟六直到量測結束。

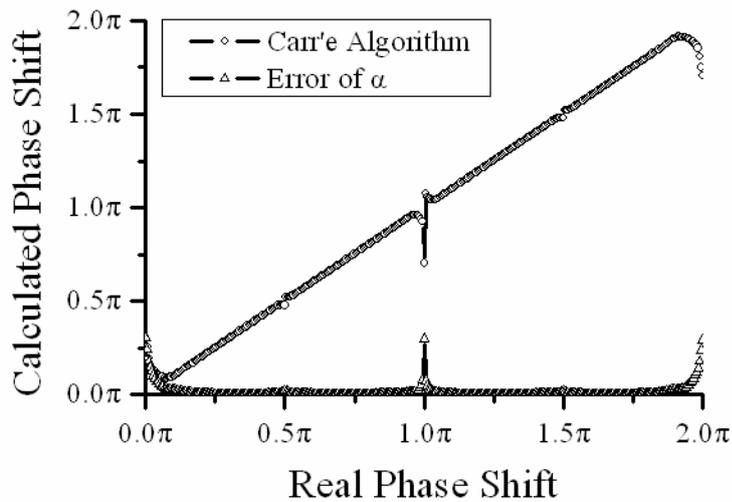
五. 結果與討論：

由於在相位移干涉術中有許多種演算法，其中較有代表性的為 Carré 四步相位演算法與 Hariharan 五步相位演算法，因此將先由兩者中選擇一較佳的相位移干涉術演算法。選擇方法是透過模擬方式來比較兩個演算法在干涉圖形的光強度具有相同誤差的情況下，所計算獲得的相位移量 α 與原本引入的相位移量 α 之間的誤差。其中模擬設定為：引入相位移量 α 範圍為一個週期，即 0 至 2π ，而干涉圖影像的光強度誤差為百分之一。模擬結果顯示 Hariharan 五步相位演算法在相位移量 $\alpha = 0$ 、 π 、 2π 的附近區域內時具有誤差，如圖三所示。



圖三 Hariharan 演算法誤差分析。

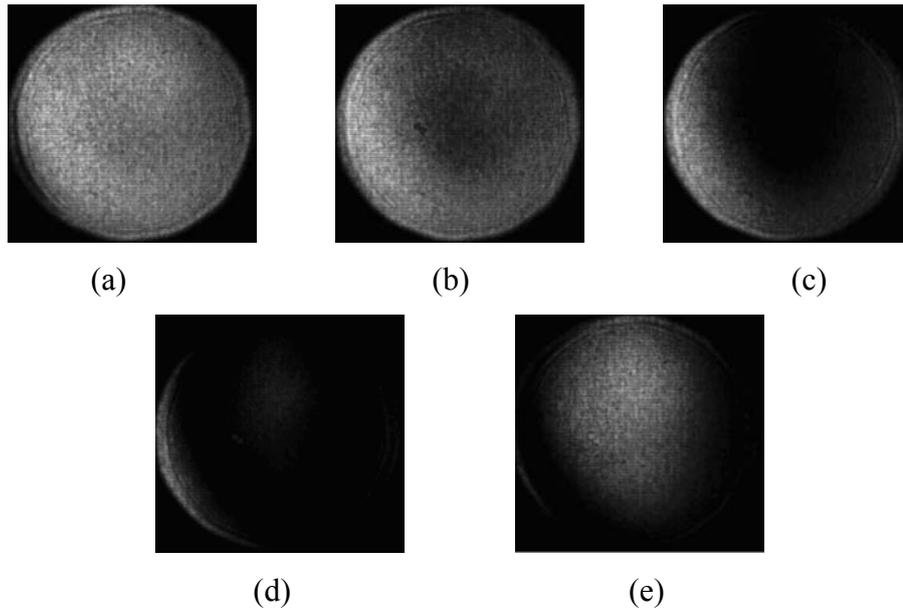
而 Carré 四步相位演算法則是在相位移量 $\alpha = 0$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 、 π 、 $\frac{3\pi}{2}$ 、 2π 的附近區域內時具有誤差，如圖四所示。



圖四 Carré 演算法誤差分析。

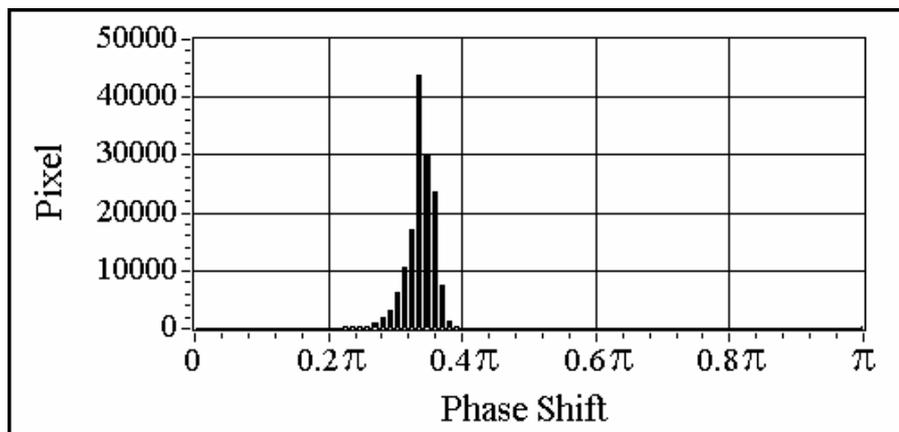
透過比較後發現，Hariharan 五步相位演算法在相位移量 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{3\pi}{2}$ 時並沒有產生誤差，因此採用 Hariharan 五步相位演算法來計算 PZT 所引入的相位移動量 α ，且 Hariharan 五步相位演算法為五步相位移，因此當 $\alpha = 0$ 、 π 、 2π 附近，誤差較大的區域時，可以透過干涉圖形，每 2π 一個循環週期的特性，經由比較干涉圖形的光強度分佈來降低測量結果的誤差。

依照第四節實驗部分中的 PZT 位移量量測系統實驗操作流程，實際操作一組具有固定差距的線性電壓值，施加於 PZT 元件上，產生的五張干涉圖形影像如圖五所示。從圖五(a)與圖五(d)的干涉光強度分佈，顯示幾乎為反相的情況，可以判斷得知，兩圖之間的相位差約為 π ，且兩圖之間的相位差有三次相位移量，因此得知引入的相位移量 α 應該在 $\frac{\pi}{3}$ 左右。



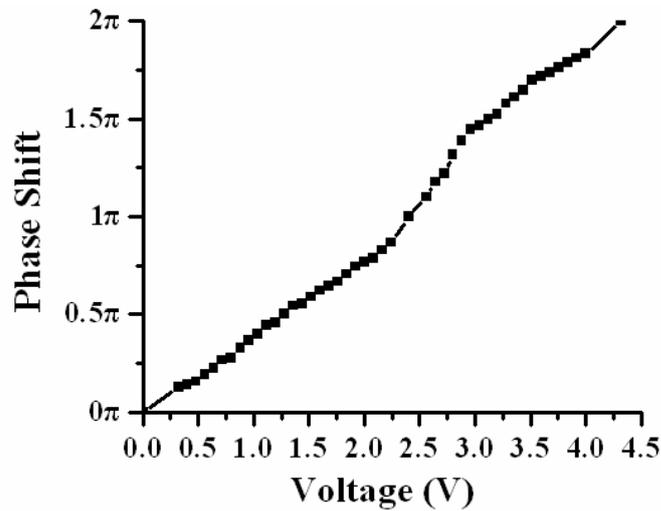
圖五 引入相位移量 α 值為 $\frac{\pi}{3}$ 的 5 張干涉圖形。

而使用 Hariharan 演算法所推算出來的相位移量公式，即(4)式，從擷取的五張干涉圖形中，在影像相同的範圍內分別取 25 萬個 pixel 點的光強度分佈資料做分析，計算後獲得相位移量 α 的分布如圖六所示。從圖中可知相位移量 α 值確實為 $\frac{\pi}{3}$ ，與干涉圖形物理判斷的結果相符合，證實此方法能夠用於測試 PZT 元件的移動量。



圖六 干涉圖形計算相位移量值為 $\frac{\pi}{3}$ 。

在一個週期內，即相位移量 α 從 0 至 π ，連續操作此實驗方法獲得 PZT 元件的施加電壓與推動相位關係圖如圖七所示。其中相位移量 α 在 0、 π 、 2π 附近，因為演算法無法判斷的關係，改採用判斷干涉圖形的方式取得。

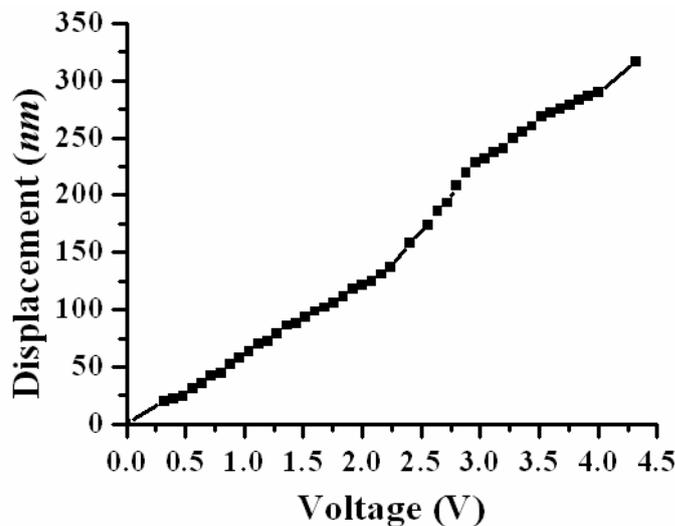


圖七 PZT 元件的施加電壓與推動相位關係圖。

(5)式為光程相位差和相對高度的關係，以垂直入射光而言，關係為：

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y) \quad (5)$$

$h(x, y)$ 代表待測物表面相對於參考面的高度分布， λ 為光源波長， $\phi(x, y)$ 為光程相位差。將圖七經過(5)式，把推動相位換算為實際移動量後，即可得到 PZT 元件在一個週期內的施加電壓與推動距離關係圖，如圖八所示。



圖八 PZT 元件的施加電壓與推動距離關係圖。

六. 結論：

本計劃已成功地使用相移式 Twyman-Green 干涉儀，量測 PZT 的位移量對施加電壓的正確關係，且使用 Hariharan 演算法計算不同的相位移量，除了相位移量在 0 、 π 、 2π 附近，因為 Hariharan 演算法無法判斷的關係，改採用判斷干涉圖形的方式取得。且本計劃成功地透過電腦控制電源供應器施予 PZT 的供給電壓，獲得推動相位以引入量測參數，再成功地將產生的干涉圖形透過 CCD 擷取影像至電腦。本計劃透過數值模擬方式來比較 Hariharan 五步相位演算法與 Carré 四步相位演算法，在干涉圖形的光強度具有相同誤差的情況下，證明 Hariharan 五步相位演算法所計算獲得的相位移量 α 與原本引入的相位移量 α 之間的誤差較小，故採用 Hariharan 五步相位演算法計算相位移量。在目前的產業中，由於產品精密度及成本要求越來越嚴格，所以對產品的檢測就顯的更加重要，而其中光學式的檢測方法則因具有非接觸性，測量時間短及全域測量等優點，所以較符合工業用途。在光學干涉儀所組成的量測系統中，大多使用具有壓電特性的 PZT 來引入相位差，因此 PZT 的精準度對測量結果的準確性影響重大，且 PZT 在干涉領域中的應用非常廣泛，因此本研究的研究成果證實和採用最能降低硬體雜訊的演算法，與使用相移式 Twyman-Green 干涉儀準確地量測 PZT 的位移量對施加電壓的關係，有助於提升使用 PZT 的量測精準度，也有助於提升業界對於壓電相位移動器的認知與幫助，也有助於壓電相位移動器的學術探討與研究。

七. 參考文獻:

1. MALACARA, "Optical Shop Testing" JOHN WILEY, (1992).
2. 盧立瑋, "相位移動器校正之研究", 國立中央大學光電科學研究所, (2006).
3. 賴政忠, "奈米級干涉式材料表面形貌及薄膜量測系統", 中原大學應用物理研究所, (2006).
4. Gallagher, J. E. and D. R. Herriott, "Wavefront Measurement" U. S. Patent 3,694,088 (1972/1972).
5. Creath, K., "Phase-Measurement Interferometry Technique," in Progress in Optics. Vol. XXVI, E. Wolf, Ed., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 349-393 (1988).
6. J. C. Wyant, "Interferometry optical metrology: basic principles and new systems," Laser Focus, 65-71 (1982).
7. Carré, P. "Installation et Utilisation du Comparateur Photoelectrique et Interferentiel du Bureau International des Poids de Mesures," Metrologia 2, 13 (1966).
8. P. Hariharan, B. F. Oreb, and T. Eiju, "Digital Phase-Shifting Interferometry: a Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm," Appl. Opt. 13, 2504 (1987).

成
果
自
評

計畫預期目標：透過 Twyman-Green 干涉儀的架構配合 CCD 及電腦控制來獲得 PZT 的電壓-位移量曲線圖，並且採用不同的演算法來比較出最能降低硬體雜訊的演算法，PZT 在干涉領域中的應用非常廣泛，透過研究可以有效的提高測量的準確性並且降低應用上的誤差。

計畫執行結果：本計畫已成功地使用相移式 Twyman-Green 干涉儀，量測 PZT 的位移量對施加電壓的正確關係。且本計畫成功地透過電腦控制電源供應器施予 PZT 的供給電壓，獲得推動相位以引入量測參數，再成功地將產生的干涉圖形透過 CCD 擷取影像至電腦。本計畫透過數值模擬方式來比較 Hariharan 五步相位演算法與 Carré 四步相位演算法，在干涉圖形的光強度具有相同誤差的情況下，證明 Hariharan 五步相位演算法所計算獲得的相位移量 α 與原本引入的相位移量 α 之間的誤差較小，故採用 Hariharan 五步相位演算法計算相位移量。在目前的產業中，由於產品精密度及成本要求越來越嚴格，所以對產品的檢測就顯的更加重要，而其中光學式的檢測方法則因具有非接觸性，測量時間短及全域測量等優點，所以較符合工業用途。在光學干涉儀所組成的量測系統中，大多使用具有壓電特性的 PZT 來引入相位差，因此 PZT 的精準度對測量結果的準確性影響重大，且 PZT 在干涉領域中的應用非常廣泛，因此本研究的研究成果證實和採用最能降低硬體雜訊的演算法，與使用相移式 Twyman-Green 干涉儀準確地量測 PZT 的位移量對施加電壓的關係，有助於提升使用 PZT 的量測精準度，也有助於提升業界對於壓電相位移動器的認知與幫助，也有助於壓電相位移動器的學術探討與研究。

預期目標達成率：100 %

(若不敷使用請另加附頁繕寫)

其它具體成效：

- (1) 使用 Hariharan 演算法計算不同的相位移量，相位移量在 0 、 π 、 2π 附近，因為 Hariharan 演算法無法判斷的關係，改採用判斷干涉圖形的方式取得。
- (2) 讓學生瞭解光學檢測、波動光學及精密移動量測相關之先進技術，提升學生研究干涉光學移相術的專業能力。

(若不敷使用請另加附頁繕寫)