

影像光纖立體顯微術研製

范光照

宋欣明

葉光明

國立台灣大學機械系教授 國立台灣大學精密量測實驗室 金屬工業研究發展中心

fan@ntu.edu.tw

r91522703@ntu.edu.tw

yehkm@mail.mirdc.org.tw

摘要

隨著電子產業的微小化，光學量測技術紛紛朝向微小尺寸表面量測發展。本論文在介紹一種基於結構光(Structured light)及相位移法(Phase shifting)的微機械元件三維輪廓尺寸量測系統—立體顯微術 (Stereo Microscopy)，在現有基礎上提出了一種微三維逆向工程測試理論及系統設計方法。

系統主要架構以數位條紋投影技術(Digital Fringe Projection, DFP)搭配相位移量測原理(Phase-Shifting Principle)，發展三維光學量測系統。在理論上以多條紋投射法(面結構光)可節省單條紋掃描所耗費的時間，並以相位移法提高條紋量測精度；在技術上將整合數位微鏡晶片(Digital Micro-mirror Device, DMD)提供物體三維量測的結構光源，由程式來控制輸出所需的條紋週期和條紋數，並應用了影像光纖傳像束具有可變方向性及長光路特點來代替一般的光路系統傳遞結構光，使得系統量測的彈性得以提升。

對系統加以模組化及縮小化，使得系統可以輕易的用手動操作也可保持高重複性高精度。

壹、簡介

立體顯微術非常廣泛使用在科學、工業及機械的二維視覺量測上，然而，隨著工業及科技的多元化，二維量測已經無法符合現代應用上的需求了，隨著時代的演進，科技不斷進步，現在對於物件的三維形貌量測已經越來越重要了。

近年來，許多以投射結構光及三角法為理論發展的許多種三維形貌立體顯微術理論已被付諸實行，Windecker 等人[1]和 Wu 等人[2]使用光柵及相位移機制投射條紋結構光於物體表面，並使用 CCD 照相機擷取其變形條紋。Zhang 等人[3]使用電腦產生條紋並使用 DLP 投影機投射條紋結構光，直接使用電腦軟體來做相位移。以上的量測結果都相當良好，但他們都是從過往的立體顯微術上修改來的，這一類的系統有一些不可避免的缺點：(1)待測物需要經由加工處理之後固定在量測台上，(2)在這類的立體顯微術中，其對於投射主軸及取像主軸有角度的限制，其夾角需介於 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，(3)視場(FOV)大小必須受限於顯微鏡的物鏡。Song[4]發展出一種獨立式立體顯微術系統，系統中包含了一台電腦來產生條紋結構光及分析投射於待測物上的變形條紋、一台 DLP 來將電腦所產生之條紋結構光投射出、一套經由精密設計的光學系統來引導光源、固定支架固定鏡片組、放置量測物的 XY 平台、使用可調焦距的 CCD 照相機來擷取影像，其系統圖如下

圖 1。因此系統應用了可調整角度的 CCD 和可選擇更改的光學系統，所以上述的(2)、(3)兩項缺點得以克服。然而如果投射頭(或稱為探頭)可任意移動，此系統可更彈性的去配合待測物體定位，更可量測一大型物件的局部範圍。

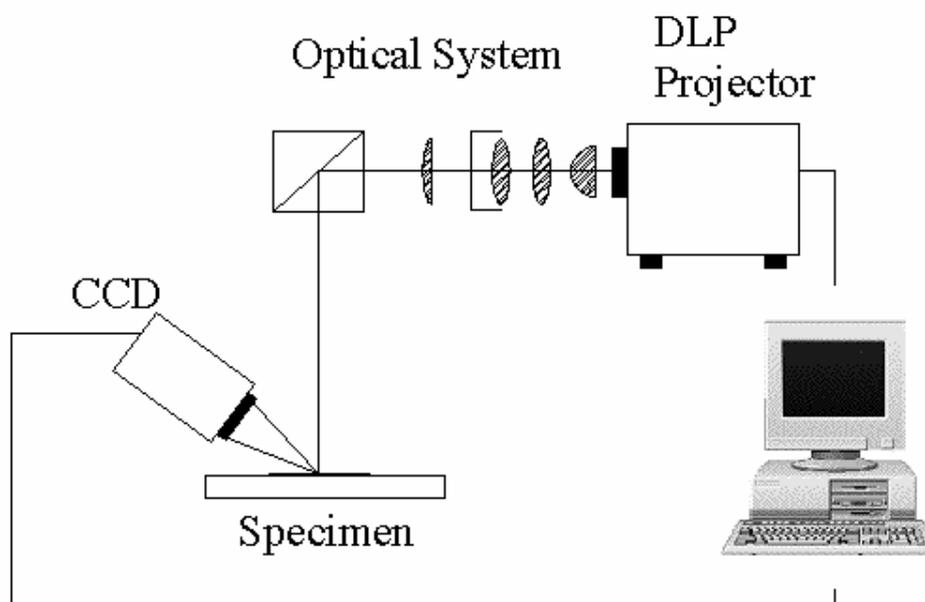


圖 1、數位結構光立體顯微術示意圖

在這篇論文中，我們所呈現的是一種利用一微小化探頭經由影像光纖傳像束導引條紋結構光的創新立體顯微術技術。這創新系統是基於一個概念“讓量測儀器去配合待測物件，而不是讓待測物件來配合量測儀器”，這樣的創新概念不但使得量測上的應用更為廣泛，而且使得量測應用上更具有彈性。我們將在第二部分介紹此系統的架設；有兩個重要的子系統會在此處介紹。包括介紹遠心鏡組(telecentric lens)的細節及原理。第三部份將分析影像光纖傳像束的細節。第四部分包含了我們的量測實驗結果，並於第五部分討論此系統。

貳、條紋結構光立體顯微術

一、系統架構

三維形貌量測中，有一種方式是利用投射經由特別設計的條紋結構光於待測物的表面上，此條紋包含了許多種類，有光點陣列(light-dot-array)、正弦波條紋(periodical sine waves)、同心圓(concentric circle)以及二維編碼(2D codes)等等，在進行量測時，因待測物件形貌的起伏變化，導致條紋結構光會因表面的起伏而產生扭曲，再由 CCD 照相機攫取變形條紋的影像，經由三角法及相位移定理來得到三維形貌的資料。以上的程序也可稱為“逆向工程”。若我們要進行微小物件的三維形貌量測，我們必須經由光學鏡組縮

小我們條紋結構光的投射範圍，同樣的，此投射於物件上的影像也須經由 CCD 配合變焦鏡頭來攫取至電腦中處理。圖一中就是此種立體顯微術的示意圖[4]，但此系統的缺點就是必須讓待測物件去配合我們的量測儀器。

我們發展出一種新型的立體顯微術，系統中我們利用了影像光纖傳像束來導引我們的光源，並由縝密設計的光路系統及縮小化探頭投射出條紋結構光，此系統可以任何我們所需要的角度來對待測件進行量測。此系統的示意圖如下圖 2。使用電腦產生黑白條紋正弦結構光，經由一組遠心鏡組將 DLP 投射出之條紋結構光縮小投射至影像光纖傳像束，此單模影像光纖傳像束能傳遞條紋影像至輸出端，並經由第二組遠心鏡組將條紋結構光投射至待測物上。正弦條紋光的節距及光強度可經由軟體調整來適應各種待測物的表面特性。此條紋因應各種形貌而扭曲，利用 CCD 照相機攫取影像並利用像位移法理論得到高解析度的形貌資料。

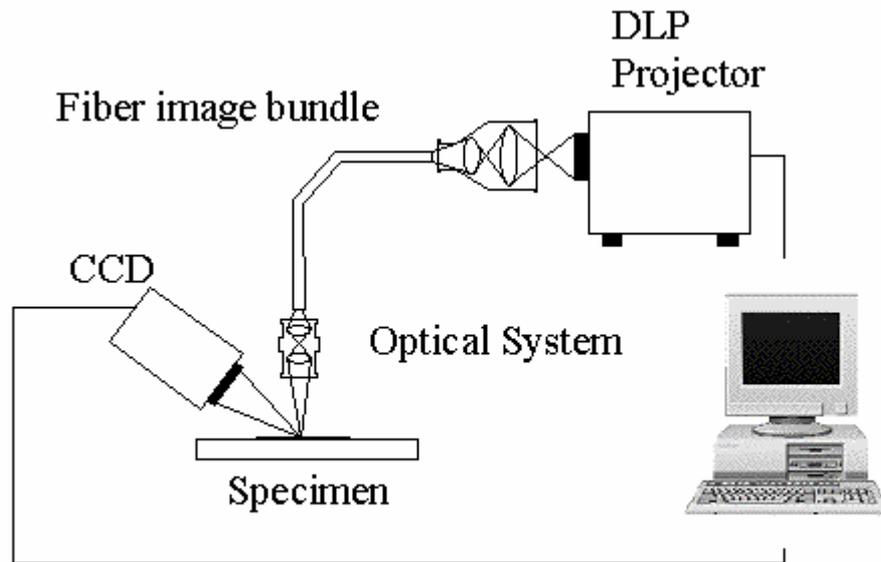


圖 2、影像光纖立體顯微術示意圖

我們系統中使用的 DLP 是市場上一般使用的產品，這也意味著我們使用的系統將大幅的降低成本，發展出的新型立體顯微術系統可以很輕易的產生高亮度、高對比度、高空間精度以達到高精度及高解析度的三維量測。雖然 DLP 使用了很很複雜的 DMD 技術，但它的操作方式可在許多的文獻中可以找到[5,6]，此篇論文將主要著墨在相位移法、光學系統設計以及影像光纖傳像束的技術。

二、相位移法

在逆向工程及干涉量測的三維輪廓重建中，相位移法已經是一個常見且發展成熟的技術，本文中將會簡潔的敘述相位移技術。

三角法只能解出條紋中間的表面高度，為了增加量測解析度，在任何相鄰接的點位

置上，我們需要得到其相對應的相位值，並將之轉換成相對高度，所以我們使用了正弦條紋結構光來符合這個需求。這邊採用了四相位移法。

我們可以用以下公式來表示每個像素的影像光強度：

$$I(x, y) = I_0(x, y) \cdot \{1 + \gamma(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y)]\} \quad (1)$$

(x, y) 表示像素的座標位置， $I(x, y)$ 表示此像素位置的影像光強度， $I_0(x, y)$ 表示背景光強， $\gamma(x, y)$ 表示像素點上正弦結構光的振幅， $\phi(x, y)$ 則是此像素點的像位值。在此式子中包含了三個未知參數 $I_0(x, y)$ 、 $\gamma(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ 。所以我們至少需要三條方程式來解出此三個未知數。在此四次相位移影像中，我們可用以下式子來表達此像素的影像光強

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_0(x, y) \cdot \{1 + \gamma(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y)]\} \\ I_2(x, y) &= I_0(x, y) \cdot \{1 + \gamma(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \pi/2]\} \\ I_3(x, y) &= I_0(x, y) \cdot \{1 + \gamma(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \pi]\} \\ I_4(x, y) &= I_0(x, y) \cdot \{1 + \gamma(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2]\} \end{aligned} \quad (2 \text{ to } 5)$$

解出此方程式可得到各點的相位值。

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (6)$$

方程式(6)表示的是每個像素點的主相位值，但用四步相移法得到的相位圖(wrapped phase map)是不連續的，只有將此不連續的相位值轉換為連續的相位值才能進行三維重建[9,10]，此轉換過程即為相位重建技術(phase unwrapping)。

三、三角法

如下圖 3，三角幾何關係是建構在結構光投射點 P，CCD 照相機鏡頭中心 I 以及在待測物體上的投射點 D 三點，此三點形成一三角形，當沒有待測物的情況之下，DMD 中心將會投射至參考面上，此點為圖中的 A 點。因為待測物體有一高度 BD，所以在參考面上的 A 點將會移動至 C 點。A 點與 C 點在參考面上的相位差由 $\phi_{AC} = \phi_C - \phi_A$ 表示。我們於設定系統時可知道 l 和 d ，而由三角形相似原理可以得到下式，而 K 為一個常數，此常數可由塊規校正中換算得到。

$$\overline{DB} = \frac{l}{d} \overline{AC} = K \phi_{AC} = K(\phi_C - \phi_A) \quad (7)$$

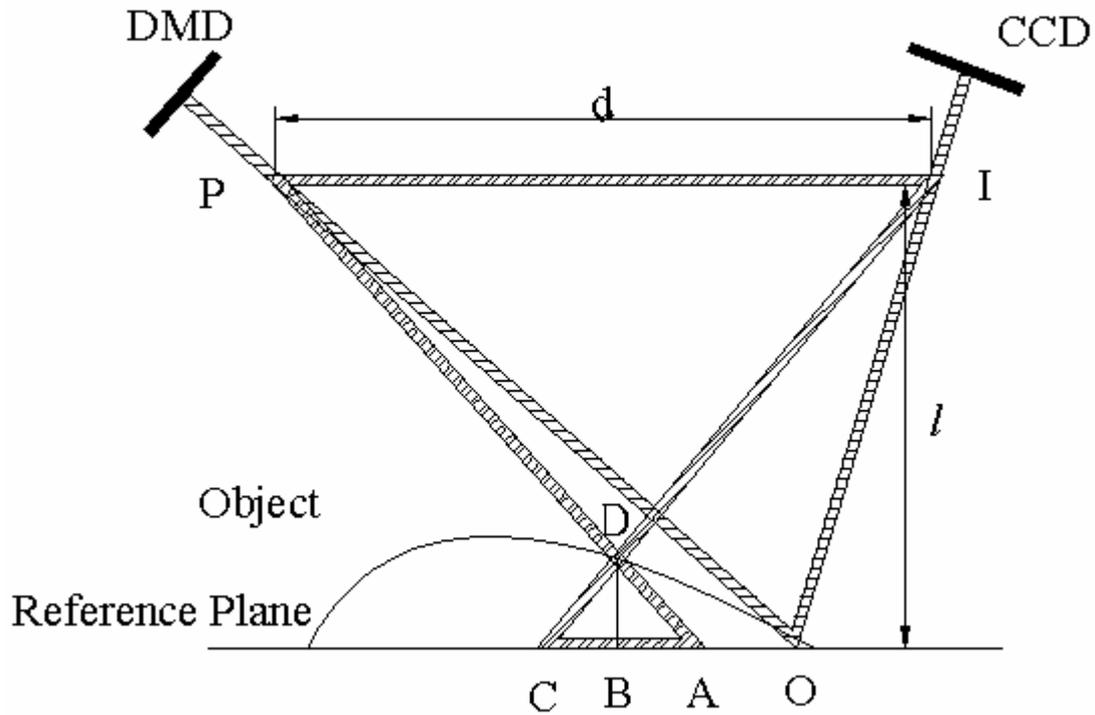


圖 3、三角法原理

四、光學系統設計

在這個系統當中，我們使用了三個光學模組；其中兩個使用在影像光纖傳像束的兩端，用來將影像縮小並傳入及導出光纖傳像束中，第三個光學模組裝配在 CCD 照相機上當做鏡頭，為了增加量測精確度，本系統全部光學模組都使用遠心鏡組[11]。

遠心成像原理是一個特別的原理，在此種光學系統中，物體或影像上各點的主軸光都被準直化，並且平行光軸。遠心鏡組可在工作距離中提供量測上所需要的恒定放大率，降低因遠近造成的誤差，並且利用遠心鏡組可以提供非常均勻的影像照度，這意味著，影像中待測物體的大小將不會因待測物體的移動而改變。在系統中，若使物體向前或向後移動，使用物方遠心鏡組將不會導致影像變大或變小，也降低了因物體沿著光軸上深度的影響。若不是使用遠心鏡組，工作距離的改變會導致每次量測上會得到不同的結果，在此系統中，我們所有的光學系統都使用遠心鏡組，我們在此提出遠心鏡組的三個好處：

(1) 在物面或像面處於不垂直主光軸和離焦兩種情況之下，仍然能夠保持衡定的放大率，光學系統和光纖傳像束端面之間的距離將不用非常精確，在組裝此系統時將會方便許多，並且更加有效率。

(2) 量測物體深度會沿著光軸改變，因此遠心鏡組將很輕易的投射及攫取清晰的影像，而不會受深度變化影響，遠心鏡組也提供了比一般鏡組更大的景深以供量測。

(3) 清晰及均勻的影像可以使得影像處理、邊緣量測、三維重建等等的工作更加精確，因遠心鏡組具有主軸光平行光軸的特性。

我們將連接於 DLP 輸出端及光纖傳像束輸入端稱為光學系統 1；在光纖傳像素輸出端及物體之間稱為光學系統 2、在物體及 CCD 輸入端之間當作光學系統 3，以下將敘述其設計概念。

我們將光學系統分成兩個部分討論，第一個部分是尺寸設計，包含像面尺寸的、聚焦距離、鏡組直徑及數值孔徑(NA)。第二部分是像差設計，包含了透鏡型式及透鏡材料等等，此部分可用光學設計軟體如 ZEMAX 來協助設計。

圖 4 表示遠心鏡組的光路配置， f_1 及 f_2 分別為物方焦距及像方焦距， y_1 及 y_2 分別為物體及影像的尺寸， x_1 為物體至物鏡焦點的距離， x_2 為影像至物鏡焦點距離，針孔直徑為 d ，針孔兩邊的傾斜角分別為 u_1 及 u_2 ，物方的物鏡直徑為 D_1 ，而位於影像方的物鏡直徑為 D_2 ， Δ_1 及 Δ_2 則為物鏡在物方及像方的景深。

由牛頓定理：

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{y_1}{y_2} \quad (8)$$

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{f_2^2}{f_1^2} \quad (9)$$

因為 y_1 及 y_2 為已知，而 f_1 、 f_2 、 x_1 、 x_2 可由方程式(8)及(9)得到

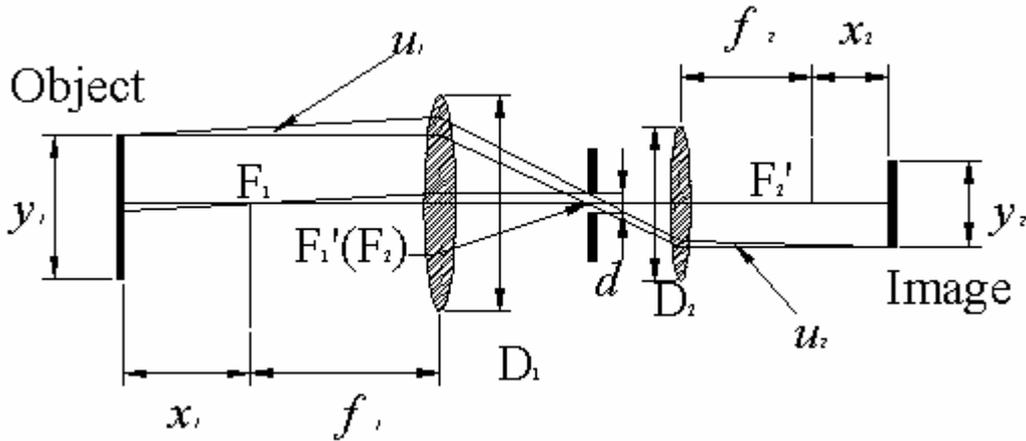


圖 4、光路系統示意圖

物方一點在像平面上所呈現的彌散斑半徑 R 主要是由艾力斑半徑(Airy disc) R_1 、由於偏離理想像面而形成的彌散斑半徑 R_2 以及由系統像差所引起的彌散斑半徑 R_3 三部分所組成， R 的大小為 R_1 、 R_2 、 R_3 的迴旋積分。其中

$$R_1 = \frac{0.61 \cdot \lambda}{n_2 \cdot \sin u_2} \quad R_2 = \frac{\Delta_2}{2} \cdot \tan u_2$$

設 CCD 能分辨的最小尺寸，即兩相鄰像素的中心距離為 c 。為了使光學系統的解析度能與 CCD 的解析度很好的搭配，我們設 $R_1 + R_2 = c$ 即

$$\frac{0.61 \cdot \lambda}{n_2 \cdot \sin u_2} + \frac{\Delta_2}{2} \cdot \tan u_2 = c \quad (10)$$

考慮到 u_2 相當小，故可視為 $\sin u_2 \approx \tan u_2$ ，由此可解出 $\sin u_2$ ，並可求出像方數值孔徑 $NA' = n_2 \cdot \sin u_2$ 。

根據拉赫不變量公式(Lach invariant formula) $y_1 \cdot f_1 \cdot \tan u_1 = -y_2 \cdot f_2 \cdot \tan u_2$ 可求出物方數值孔徑 $NA = n_1 \cdot \sin u_1 \approx n_1 \cdot \tan u_1$

所以孔徑光欄直徑為： $d = 2f_1 \cdot \tan u_1 = 2f_2 \cdot \tan u_2$

物方鏡組口徑為： $D_1 = y_1 + 2f_1 \cdot \tan u_1$

像方鏡組口徑為： $D_2 = y_2 + 2f_2 \cdot \tan u_2$

確定了 $f_1, f_2, x_1, x_2, d, D_1, D_2, NA$ 及 NA' 等參數後就可以根據所選鏡組類型在 ZEMAX 中進行優化設計。光路 1 至光路 3 的相關參數如下表 1 至表 3，圖 5 為光路 2 的光路圖，圖 6 為光路 2 的像差畸變曲線。各光路的最大相對畸變值都小於 0.5%，視場邊緣誤點的彌散斑直徑均小於 $10 \mu m$

表1、光路1的有關參數（單位：mm）

焦距 (物/像)	數值孔徑 (物/像)	解析度(LP/mm) (物/像)	物面尺 寸 FOV	像面尺 寸	x_1 +	x_2 +
					f_1	f_2
54.4/13.2	0.015/0.06	120	$\phi 25$	$\phi 6$	75	18

表2、光路2的有關參數（單位：mm）

焦距 (物/像)	數值孔徑 (物/像)	解析度(LP/mm) (物/像)	物面尺 寸	像面尺 寸	x_1 +	x_2 +
					f_1	f_2
36.9/12.8	0.06/0.04	120	$\phi 6$	$\phi 8$	18	25

表3、光路3的有關參數（單位：mm）

焦距 (物/像)	數值孔徑 (物/像)	解析度(LP/mm) (物/像)	物面尺 寸	像面尺 寸	x_1 +	x_2 +
					f_1	f_2
17.6/13.2	0.04/0.06	120	$\phi 8$	$\phi 6$	56	17

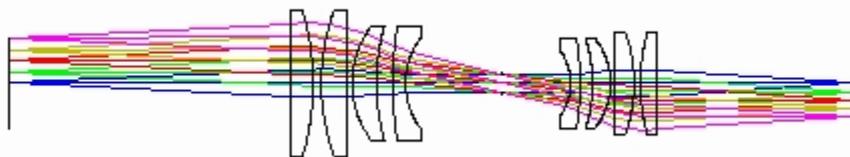


圖 5、光路 2 的光路示意圖

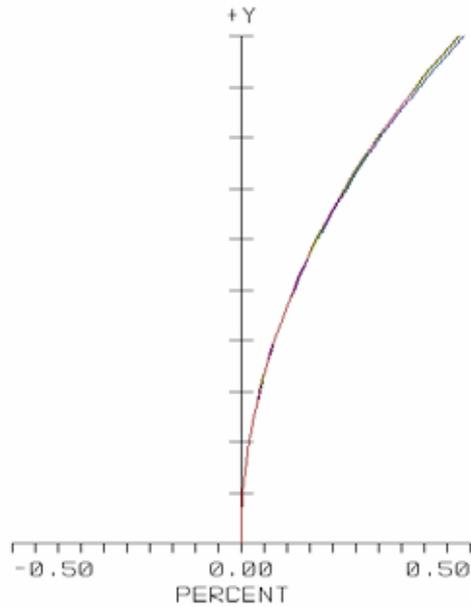


圖 6、光路 2 的像差畸變曲線

參、影像光纖技術

一、影像光纖特性及原理

單根光纖包含了較高折射率的纖芯及較低折射率的外包圍所組成，當光束入射角大於光纖臨界角時，光纖可以傳遞訊號。

影像光纖傳像束是由非常多單一光纖依照六角形或正方形排列所組成，其於入射端及出射端光纖對應位置的要求非常嚴格，因此，光纖傳像束可以將圖片從入射端完整的傳遞至出射端，每個單一光纖就如同 CCD 照相機中的一個像素，如下圖 7

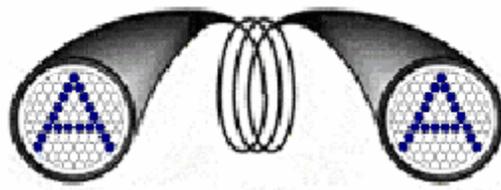


圖 7、光纖傳像束

與一般光纖系統比較起來，光纖傳像束在傳遞影像時有許多優點，如(1)它能在彎曲的情況下傳遞影像；(2)工作距離較長；(3)體積小重量輕；(4)可以避免外界雜訊干擾；(5)結構簡單等等。因影像光纖傳像束所具有的眾多優點，現在廣泛的被利用在各種領域，如醫療[12]、軍事、工業等等。

影響光纖傳像束的使用性能的因素有很多，其中最主要的指標[13]為數值孔徑、穿透率及解析度：

(1)數值孔徑表示光纖傳像束收集光的能力，在相同的條件之下，光纖傳像束的數值孔徑越大，光纖傳像束對光的接收角度就越大，所以可進入光纖傳像束的光能也就越多，圖 8 中的角 A 即為光纖傳像束的接收角。

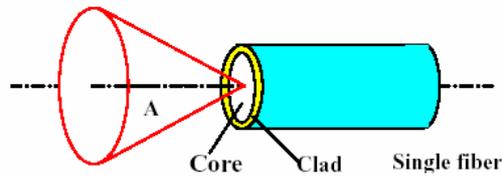


圖 8、光纖的數值孔徑

分別設 n_1 、 n_2 為光纖核心和包覆層的折射率，則光纖的數值孔徑為：

$$NA = n_0 \cdot \sin(A_{\max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (11)$$

可以看出光纖傳像束的數值孔徑大小直接與其單一光纖的核心材料和包覆材料的折射率有關。單一光纖核心材料與包覆材料的折射率差越大，光纖傳像束的集光能力就越強，傳輸後的圖像就越明亮，同時也有助於解析度的提高。

(2)穿透率是用來描述光在單位長度光纖傳像束中的衰減程度，其大小為：

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{out}}{I_{in}} \right) \quad (12)$$

期中， I_{in} 和 I_{out} 分別為光纖傳像束的輸入和輸出光強。

(3)解析度是用來衡量被傳輸後影像的清晰度，解析度越大，圖像越清楚。習慣上用相鄰兩根單一光纖的中心間距來表示光纖傳像束的解析度大小。光纖傳像束解析度大小是由單一光纖直徑、單一光纖數量、單一光纖的排列方式等因素決定的。單一光纖直徑越細，解析度就越大；相同面積對應的光纖數量越多，解析度越高。

本系統使用的光纖為多組份玻璃傳像束，其柔軟性較同樣尺寸的石英光纖傳像束好，解析度及穿透率等指標特性要優於塑料傳像束，光譜傳輸範圍為 380 至 1300nm，解析度為 36LP/mm，穿透率則大於-3。

二、影像處理

因光無法穿透單一光纖的包覆層，所以許多六角形的格子會在影像中一起被攫取出來，如下圖 9(此傳遞影像的光纖傳像束包含了 13000 根光纖)。這些格點對於影像的後處理、相位重建及三維座標量測等等影響很大。因此，解決格點的影響對此系統來說是很重要的。一般來說，有兩個方法來降低此狀況的影響，第一個是使用同樣截面積但具有更多單一光纖的傳像束，另外一個則是使用影像處理的技巧來克服。我們在此使用了後者當來降低格點的影響，我們於此系統中使用了低通濾波法[14]，這格點可以有效的被克服，如圖 10。

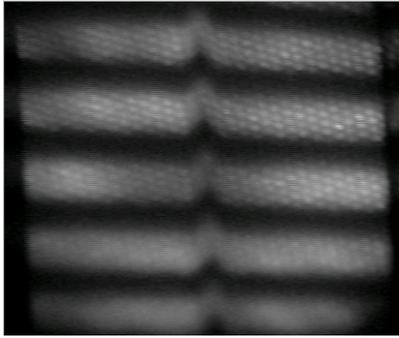


圖 9、原始影像



圖 10、濾波影像

肆、實驗結果

在實驗中，我們使用了 600×800 解析度的 DLP 來投射正弦條紋結構光。此結構光的灰階和條紋數量可用電腦來控制，並利用八萬畫素的玻璃光纖傳像束來傳遞並投射影像，使用的光纖傳像束的單一光纖直徑為 $15\mu\text{m}$ ，數值孔徑為 0.55，光譜吸收範圍為 380 至 1300nm 。所有光路系統都使用遠心鏡組。量測範圍為 $4.5\text{mm}(\text{L}) \times 3.6\text{mm}(\text{W}) \times 1\text{mm}(\text{H})$ 。光學解析度為 $120\text{LP}/\text{mm}$ 。並設計一個縮小話探頭來將光路 2、光路 3 及 CCD 做模組化，如下圖 11，反射角為 45° 。探頭的端面尺寸為 $24\text{mm} \times 55\text{mm}$ ，圖 12 表示此實驗設置。

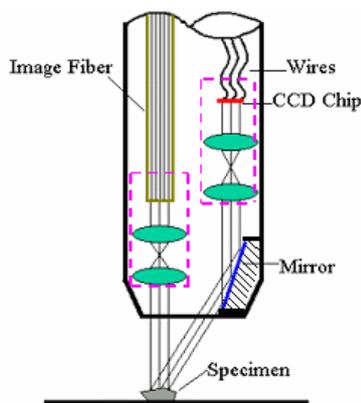


圖 11、縮小化探頭

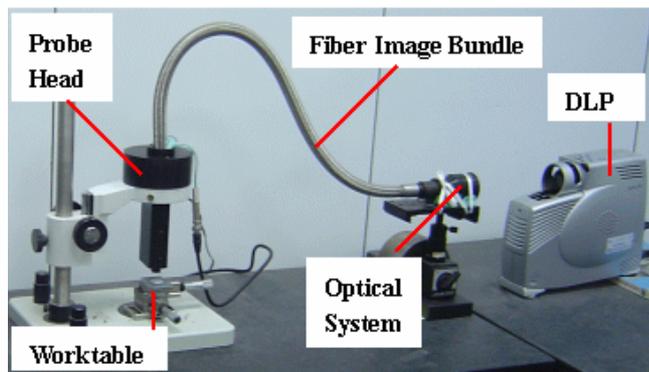
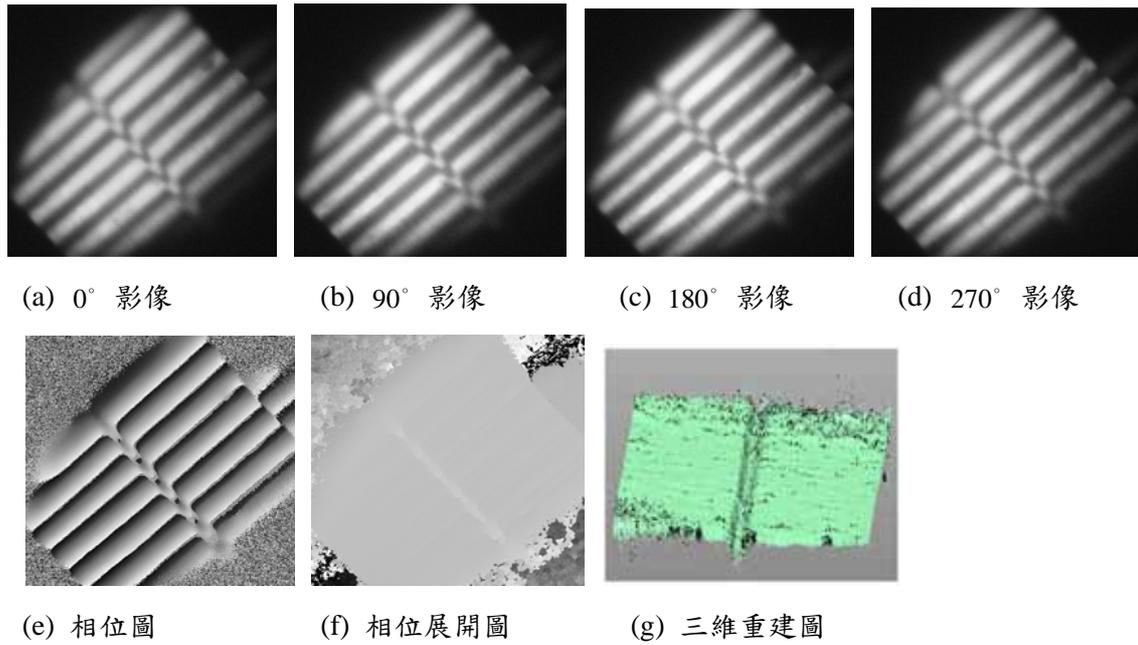


圖 12、系統設置

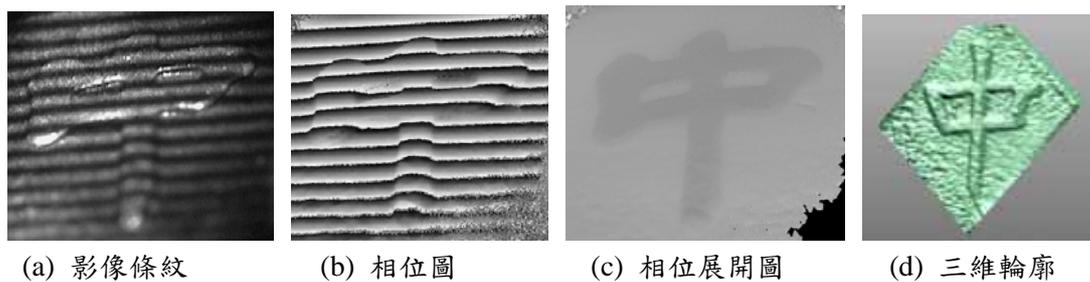
此系統由 $1200\mu\text{m}$ 塊規階高來校正並找出定值 K ，於七次的數據可知，平均值為 $1210\mu\text{m}$ ，標準差為 $4.50\mu\text{m}$ 。

我們對 $2.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的 V 型槽量測來進行量測並驗證系統，圖 13(a)至(d)為 0° 、 90° 、 180° 、及 270° 四個相位的條紋扭曲影像，並使用四步相移法來重建三維輪廓，圖 13(e)中描繪出此三維重建輪廓。



圖十三、V 型槽的量測

第二個例子是對於硬幣國字的量測，其量測的特徵尺寸為 $4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ，高度為 0.3 mm 。



圖十四、硬幣中文字的量測情況

伍、結論

此篇主要是一個基於光纖傳像束技術的立體顯微術，此系統克服了傳統立體顯微術的各種缺點，並成功的實現了“儀器來配合待測物”的觀念，對許多固定無法移動的大型待測物件可以很輕易利用縮小化可移動式探頭達到量測的目的，並在此篇論文中呈現出此系統的可行性。

參考文獻

- [1] Windecker, R., Fleischer, M., and Tiziani, H.J., “Three-dimensional topometry with stereomicroscopes,” *Opt. Eng.* 36(12) 3372-3377, 1997.
- [2] Wu, S. D. and Lu, G. W., “Optical Phase Shift Triangulation Technique (PST) for Noncontact Surface Profiling,” US Patent No. 6040910, 2000.
- [3] Zhang, C. P., Huang, P. S., and Chiang, F. P., “High-Speed Phase Shifting Profilometry,” *Proc.*

- SPIE Vol. 4189, 122-128, 2001.
- [4] Song, H. M., "Development of a stereomicroscope," Master Thesis, National Taiwan University, 2004.
- [5] Bitte, F. and Dussler, G., "3D micro-inspection goes DMD," Optics and Lasers in Engineering Vol. 36, 155-167, 2001.
- [6] Younse, J. M., "Mirrors on a chip," IEEE Spectrum, 27-31, Nov.1993.
- [7] Creath, K., "Phase-measurement interferometry techniques," J. of Progress in Optics, 1988, 16: 351-393.
- [8] Macy, W. W., "Two-dimensional fringe-pattern analysis," J. of Applied Optics, 1983, 22: 3898 to 3901.
- [9] Huntley, J. M., "Noise-immune phase unwrapping algorithm," J. of Applied Optics, 1989, 28: 3268-3270.
- [10] Goldstein, R. M., Zebker, H. A., and Werner, C. L., "Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping," J. of Radio Science, 1988, 23: 713-720.
- [11] <http://www.edmundoptics.com/techsupport/>
- [12] Rohr, S. and Kucera, J., "Optical Recording System Based on a Fiber Optic Image Conduit: Assessment of Microscopic Activation Patterns in Cardiac Tissue," Biophysics Journal, 1998, 75: 1062-1075.
- [13] <http://floti.bell.ac.uk/MathsPhysics/fibre.htm>
- [14] Gonzalez, R. C. and Wintz, P., "Digital Image Processing," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1977