

10. R2R線上自動化共焦精微量測系統與技術

陳亮嘉¹、張奕威²、陳聖涵²、郭世炫³

¹國立台北科技大學 自動化科技研究所教授

²國立台北科技大學 自動化科技研究所研究生

³工業技術研究院 量測技術發展中心 工程師

摘要

本研究發展自動化線上共焦顯微形貌量測系統與技術，可進行增光膜 (BEF) 微細元件之三維形貌量測，此項技術具備了良好的光學切片能力、空間解析度、非破壞及非接觸檢測等優點。此技術可用於Roll-to-Roll 大表面斜率3D形貌量測上。量測系統以主動式光源搭配結構光光柵片為基礎，可彈性變更結構光圖案，適應於不同表面特性之待測物。以聚焦函數評估影像點的強度值，對應待測物之實際高度位置，可精確且有效率的完成待測物表面形貌輪廓。利用結構光光柵投影技術，並搭配高數值孔徑之顯微物鏡進行量測，有效提升可量測之表面傾斜角，所發展量測系統之全域量測範圍可大於或等於640×480 pixels，測量面斜率範圍可達50度，水平取樣解析度可達0.3 μm，垂直掃描範圍50 μm以上。

關鍵字：共焦顯微術、三微形貌量測、自動化光學檢測

一、前言

在現今的工業領域中，不論是高科技業或是傳統的製造業，微奈米技術已日漸成熟，並深具未來之發展潛力，在微細製造方面獲得廣泛的應用。現今高科技產業都朝向著更精密、更輕薄短小的方向邁進，而其中近年來新興產業：TFT-LCD產業更是萬眾矚目的焦點之一。台灣身為全球液晶面板以及消費性電子產品的生產大國，然而過去十年來，扮演背光模組關鍵材料的稜鏡片及其他光學材料，多由美國、日本等廠商所壟斷。近年來，由於美商3M增光膜 (BEF) 部份專利已到期，因此，造就台灣本土光學膜廠商，有機會進入增光膜的市場而蓬勃發展，以微奈米結構成形技術結合滾筒壓印製程技術，發展而成的Roll-to-Roll 生產技術，具有低成本、大面積、低設備費用、低耗能、高產能等多項優點，已成為微結構產品最具發展潛力與競爭力的量產技術。

有鑑於此，為了克服BEF此種高傾斜面與高穿透性的待測物，系統以鹵素燈源為光源，投光至光學鏡組與棋盤格結構光光柵片，搭配立體顯微鏡，利用PZT作全域式深度掃描，由CCD取得一連續深度序列之影像，以共焦量測原理進行全域式微三維形貌之量測與重建。同時，針對量測表面光滑之物體

時，可能產生待測物表面高頻訊號不足的問題，本量測系統以外加高頻訊號的方式，將棋盤格結構光光柵片投影至待測物體上，擷取結構光圖案產生變化之高頻訊號部分進行量測，增加量測點資訊量以彌補量測空間解析不足的問題。

Nayar[1]提出以判斷影像之聚焦程度來決定三維資訊之方法，由不同聚焦程度之影像序列來求出待測物之形貌，以像素為單位，在不同聚焦平面間進行搜尋，搭配聚焦函數進行計算，以重建物體之三維輪廓，此方法成為聚焦形貌法(Shape From Focus, SFF)。此法對表面粗糙之待測物有良好效果，因為表面高頻資訊足夠，使用拉普拉斯 (Laplacian) 法之分辨率高，在影像計算上有良好效果。Noguchi[2]提出以投射主動光源來改善傳統聚焦形貌量測法，改良式聚焦形貌量測方法進而被提出，其主要是針對表面光滑之物體，在進行量測時對其表面投射結構光圖形之光源，增加其表面之高頻資訊，配合聚焦形貌量測法之原理與聚焦函數，以重建物體三維輪廓。Bitte[3]以數位微型反射鏡裝置作為主動光源投射之共焦顯微系統傳統上，數位微鏡組裝置(Digital Micromirror Device, DMD)多用於影像或影片投影上，但更進一步，DMD也可運用於光學檢測上，作為產生特定結構光圖案進行量測，DMD上每一個微小鏡組即代表著影像中每一個像素，當移動待測物通過聚焦面時，也就是DMD所代表之像素對應到物體聚焦面時，將可以獲得最大影像強度藉由評估深度曲線響應圖中之峰值，可找出物體表面高度，進而重建待測物之三維表面輪廓。Ishihara [4] 提出新型的全域式快速共焦量測系統，利用微透鏡陣列將單一光源分成多光源來進行全域式掃描，為了提高掃描的速度採用了Nipkow-disk來快速的變換掃描的深度，將得到的聚焦函數的最大值與最大值前後的值取出，並以這三個數值作高斯曲線的擬合來得到高斯曲線的最大值，由這個旋轉機構與曲線擬合的方式來做快速且精準的量測。Lobera[5]發展利用光繞射之原理解決大傾角量測問題利用白光干涉量測系統進行量測，並搭配光的繞射原理進行量測，此篇提出利用赫姆霍茲(Helmholtz)公式推導，求出CCD取得的影像資訊與物體直接反射光與繞射光訊號之關係式，當進行量測時，首先對待測物進行一連續白光干涉影像擷取，接著先將正確的資料重建出形貌，之後根據所建立之數學模型，先計算含有誤差干涉訊號之估測值，再經過校正後可

將誤差量消除，進而重建出其形貌，並與之前正常的形貌結合以獲得真實之物體形貌。

目前高傾角之待測物量測主要是以接觸式的方式進行量測，接觸式量測容易破壞待測物之形貌，且當傾斜角度太大時，接觸式測探針也無法量測其形貌。為了能夠解決高傾斜面的待測物量測問題，本研究將利用虛擬共焦量測之方式，進行量測系統之開發與研究量測之方式，利用全域式量測並搭配結構光投影量測法進行量測，以克服高傾角待測物無法量測之問題。本文架構如下：第二章介紹相關研究方法，第三章對本系統進行說明，第四章為實驗之結果，第五章為結論。

二、研究方法

共焦是顯微鏡之物鏡焦點與成像透鏡焦點位置相互對稱，也就是照明點與探測點在光學成像上共軛之關係。共焦量測法之感測器前擁有獨特的針孔 (Pinhole) 以進行空間濾波，使它具備傳統光學顯微鏡所沒有的光學切片能力。其利用之原理是光束聚焦至待測物表面非焦平面位置時，待測物之反射光大部分將無法通過光偵測器前之針孔；反之，則能產生極強之光訊號，如圖1所示。取得一連串不同聚焦深度之影像，並進行聚焦函數之計算，判斷出影像之聚焦強度值，針對影像中每像素點，比較其不同深度位置之聚焦評估值，以獲得深度反應曲線，評估深度反應曲線且獲得準確之聚焦深度位置，求得待測物之三維輪廓形貌。

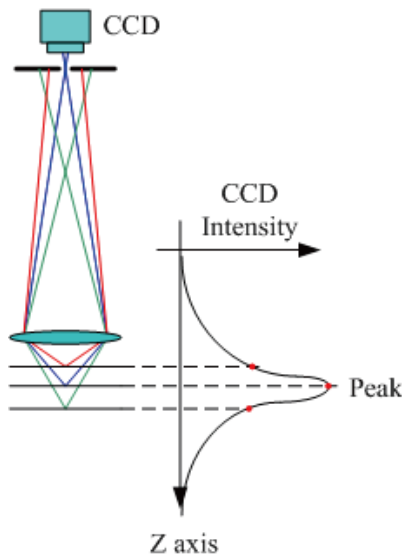


圖1 不同聚焦位置之強度示意圖

2.1 聚焦形貌量測原理

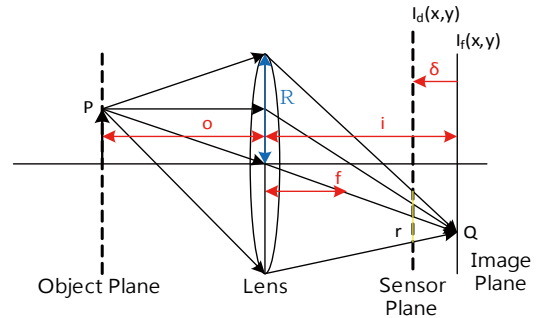


圖2 基本成像示意圖

圖2為光學基本成像之示意圖，光線從P點發散至一透鏡，經由透鏡聚焦至Q點，其中 o 為物距， i 為像距， f 為焦距，三者之關係可表示為：

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

物端之位置與像平面之位置會成為一對一之相對應關係，在此關係下當測器將會接收到最強之光強或是聚焦之影像，因此當感測器平面遠離像平面時，影像將會產生模糊之情況，造成像點會在感測器面上以圓的方式擴散，由感測器面上所接收到之光強也將有所衰減，失焦之光點半徑 r 與位移之距離 δ 可表示為：

$$r = \frac{\delta R}{i} \quad (2)$$

R 為透鏡半徑， i 為像距。當感測器面與像平面之位移量增加時，光點之圓半徑也隨之增加，意味著影像點更加模糊。失焦影像 $I_d(x, y)$ 在感測面上之成像可以聚焦影像 $I_f(x, y)$ 和高斯模糊函數 $h(x, y)$ 的褶積(convolution)來表示為：

$$I_d(x, y) = h(x, y) * I_f(x, y) \quad (3)$$

高斯模糊為一圖像模糊之濾波器，它利用高斯分布計算影像中每個像素之變化，在二維空間被定義為：

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_h(r)^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_h(r)^2}} \quad (4)$$

其中， σ_h 為高斯分布之標準偏差量，與模糊半徑 r 成一比例關係。

褶積運算 (Convolution) 在傅立葉轉換後的頻率域裡將變的容易處理，因此可將式改寫為：

$$I_D(u, v) = H(u, v) \cdot I_F(u, v) \quad (5)$$

其中 $I_D(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 與 $I_F(u, v)$ 分別為 $I_d(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 與 $I_f(x, y)$ 之傅立葉頻譜。

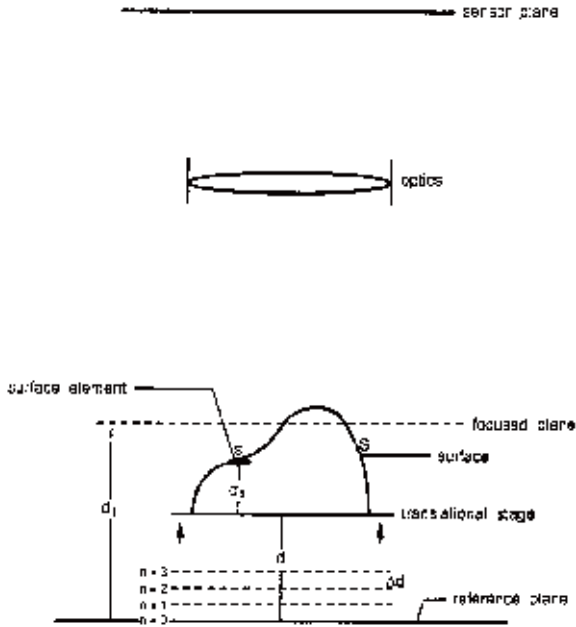


圖 3 Shape from Focus 原理示意圖

圖 3 為一粗糙表面之待測物置於一 Z 軸移動平台上，以參考平面作為平台的初始移動位置， d_f 為聚焦面與成像面的間距， d 為平台的掃描距離，考慮物體表面一點 s ，當平台逐漸朝向聚焦面移動時， s 點在影像上的高頻訊號將增強，影像聚焦程度提升，並在當其到達聚焦面時達到最佳的聚焦品質，若繼續移動，則影像聚焦程度降低，藉由紀錄 s 點的位置與平台移動距離，即可計算出 s 點在到達聚焦面時的真實高度值[6]。

2.2 聚焦函數

由於影像失焦時為一低通濾波的過程，因此當影像具備足夠的高頻資訊時，其意謂著可提供出較多的細節資訊以供量測，而一個良好的聚焦函數，則須具備良好的辨別能力，區分出高、低頻間的資訊變化，一個作為高通濾波器的方法是評估影像的二階導數，對二維影像而言，拉普拉斯 (Laplacian) 運算子可表示為[7]：

$$\nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (6)$$

其中 $I(x, y)$ 為影像點的強度值。然而在求取影像中的特徵時，拉普拉斯運算子將碰到一個問題：當拉普拉斯運算子求取二階導數時， x 與 y 兩方向的正負號不同，將產生互相抵銷的情形，因此以改良型

的拉普拉斯運算子解決此問題：

$$\nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (7)$$

通常將拉普拉斯運算子以離散的方式表示成一 3×3 的遮罩，但為了符合需求以及影像的特徵尺寸，可以調整計算範圍如：

$$ML(x, y) = |2I(x, y) - I(x - step, y) - I(x + step, y)| + |2I(x, y) - I(x, y - step) - I(x, y + step)| \quad (8)$$

因此，影像中每一點的聚焦評估值即為拉普拉斯運算子的總和：

$$F(i, j) = \sum_{x=i-N}^{i+N} \sum_{y=j-N}^{j+N} ML(x, y) \quad \text{for } ML(x, y) \geq T_1 \quad (9)$$

其中 T 為閾值，目的為過濾背景的雜訊， N 為計算範圍的大小。

2.3 聚焦深度反應曲線

在一連串不同聚焦程度的影像序列中，藉由聚焦函數的評估，求出最大的峰值位置，即影像中一點的實際高度值，圖 4 為影像從失焦→聚焦→失焦的過程，隨著深度移動，影像高頻資訊增強，當到達聚焦面時達到最強，此時若繼續移動，偏離聚焦面，就逐漸失去高頻資訊。圖 5 為一典型的聚焦深度反應曲線 (Depth Response Curve, DRC)，橫坐標代表深度掃描之不同深度位置，縱座標為正規劃後之強度值，其代表待測物上一點沿著深度掃描方向的聚焦評估值。因此，聚焦深度反應曲線的峰值即為高頻資訊最強處，也代表待測物實際高度值。在經由聚焦函數對一影像序列進行評估後，找出待測物上每一點之聚焦深度反應曲線峰值，即可重建待測物之三維表面輪廓。

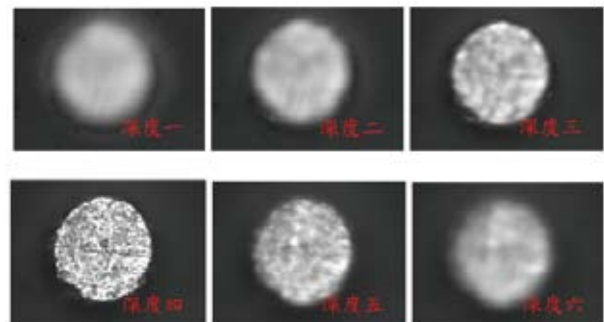


圖 4 影像失焦與聚焦過程

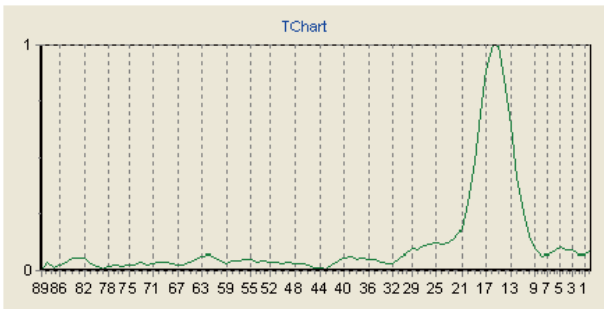


圖 5 聚焦深度反應曲線

2.4 V型槽標準塊之聚焦反應曲線分析

圖 6 為對角度 45° 標準塊，進行深度掃描所取得之一連續不同深度影像，隨著深度移動，影像高頻資訊有著不同的聚焦位置。當深度掃描接近底部時，與量測角度 30° 標準塊時所取得之影像一樣，如圖 7 所示，出現一反射結構光之訊號，如圖 6 深度六所示，但兩者相較下，角度 45° 標準塊得到之反射訊號強度較為強烈、面積也較廣泛，導致結構光不再只出現在聚焦的位置，反而出現了一全域性干擾性之結構光影像，進而影響其聚焦反應曲線之訊號判斷，嚴重影響待測物之三維表面輪廓重建。

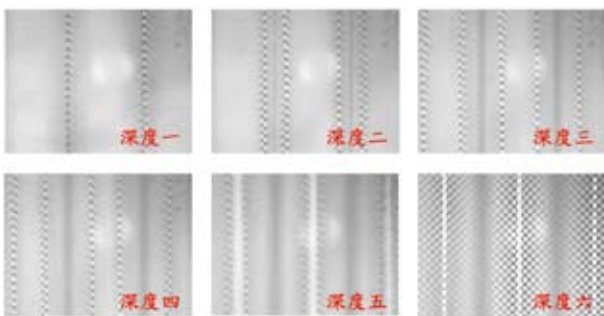


圖 6 45° 標準塊在不同深度之影像，

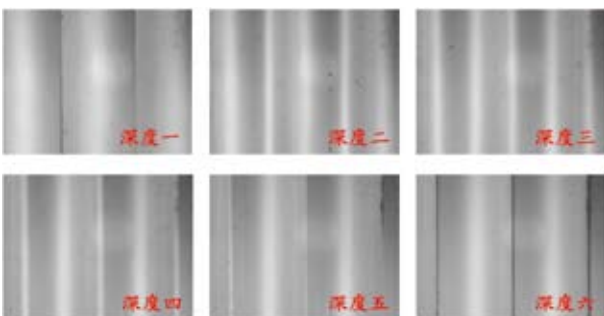


圖 7 30° 標準塊在不同深度之影像，

經由聚焦函數對一影像序列進行評估後，找出待測物上每一點之聚焦深度反應曲線峰值，即可重建待測物之三維表面輪廓。當量測角度 45° 標準塊時，聚焦反應曲線不再同 30° 標準塊，如圖 8 所示，一樣只出現一個峰值，量測角度 45° 標準塊反而出現

了一雙峰式聚焦反應曲線，如圖 9 所示。因此，以往的峰值判斷已不再適用。

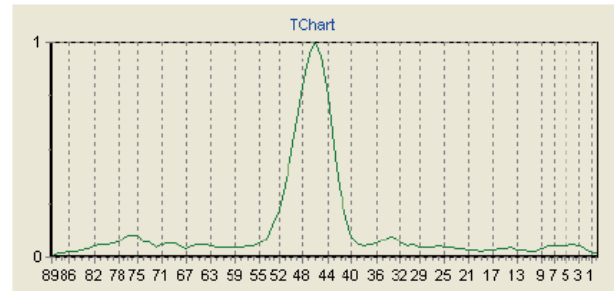


圖 8 30° 標準塊待測物上某一點之聚焦反應曲線

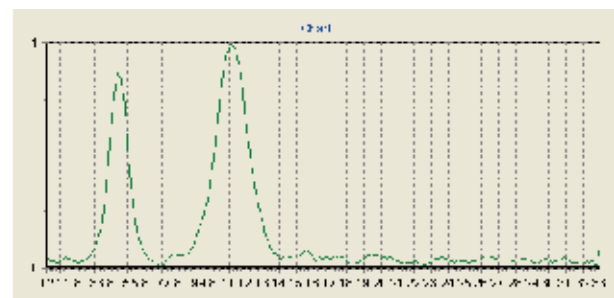
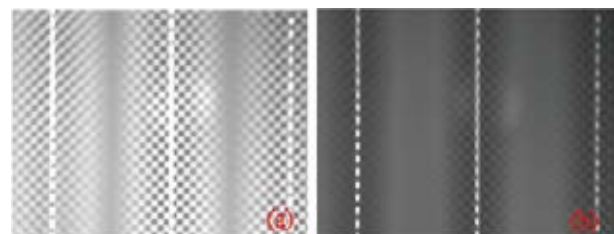


圖 9 反應曲線出現雙峰現象

發生雙峰現象是因為在垂直掃描接近底部時，干擾性結構光訊號之對比強烈，而造成聚焦反應曲線的誤判。為了解決此錯誤訊號的發生，系統中搭配兩片線性偏極片，使兩片線性偏極片相互形成一個夾角，改變光源的偏極狀態，以改變此干擾性反射訊號之偏極性，將此干擾性結構光訊號之影響降至最低。圖 10 (a) 為掃描接近底部之影像，此影像為一整面之干擾性反射結構光訊號，圖 10 (b) 為搭配線性偏極片所獲得之影像；此時可以發現搭配線性偏極片後所獲得之干擾性反射光強度顯著降低許多，以至於不影響其他掃描深度之聚焦函數值，如圖 11 所示，可以發現改變反射訊號的偏極態後，假訊號的強度被降低，不再誤判原有之峰值位置[8]。



(a)

(b)

圖 10 (a) 原始之底部影像；(b) 搭配線性偏極片所獲得之底部影像

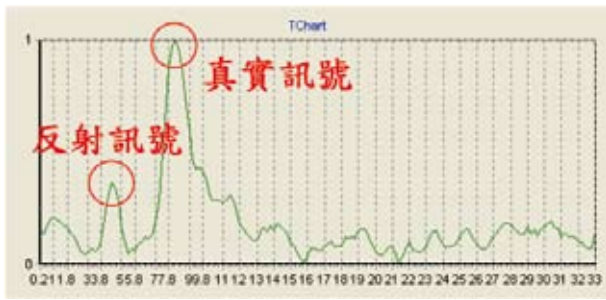


圖 11 搭配兩片線性偏極片所獲得之聚焦反應曲線

三、系統介紹

3.1 實驗系統架構

本研究發展之量測系統組成元件主要可分為三部分如下：數位光源投射部分包含鹵素燈源、光學鏡組系統、棋盤式結構光光柵片及立體顯微鏡；影像擷取部分有 CCD 相機與影像擷取卡；控制電腦部分包含位移定位裝置、三維資料計算軟體。本實驗之共焦三維輪廓量測系統 (台灣與美國發明專利申請審核中) 如圖 12 所示：

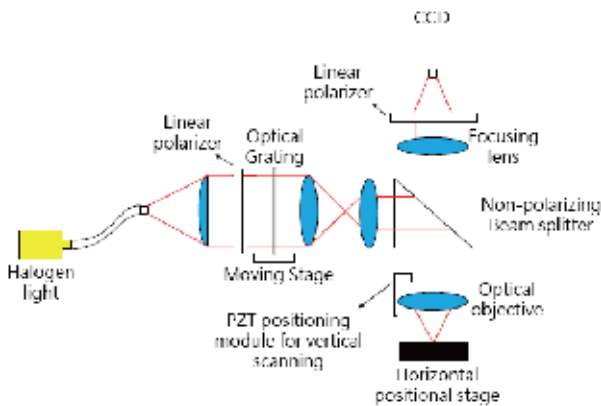


圖 12 量測系統架構圖

實驗系統進行量測時，首先鹵素燈源發出之光源經過平凸透鏡與線性偏極片，使光路準直投影至結構光光柵片，結構光光柵片之圖形，接著經由雙凸透鏡將投影圖案聚焦並縮小，再由雙凸透鏡將數位結構光準直後投射入立體顯微鏡中，並以不同倍率之物鏡改變數位結構光投影範圍，使量測系統具備可量測不同景寬的彈性，最後經由線性偏極片由 CCD 感測器接收。

3.2 投光機構部分

使用鹵素燈源作為量測之主動光源，並藉由光柵片投影數位結構光。針對不同待測物之表面特性，調整棋盤格結構光大小，提升量測之空間解析，並以全域式量測之方式提高量測效率。光學投

影鏡組的功能是將結構光進行縮影，並準直投射到立體顯微鏡的同軸光路中，對待測物表面進行結構光投影。結構光進入立體顯微鏡後，利用不同倍率之物鏡改變數位結構光投影範圍，以配合各形式之待測物體尺寸量測範圍，提供適當之量測解析度，系統使用的光源、光學鏡組與光柵片如圖 13 圖 14 所示[9]。



(a) (b)

圖 13 共焦量測系統中所使用的光源與光學鏡組架構：
(a) 鹵素燈；(b) 線性偏極片組與光學鏡組

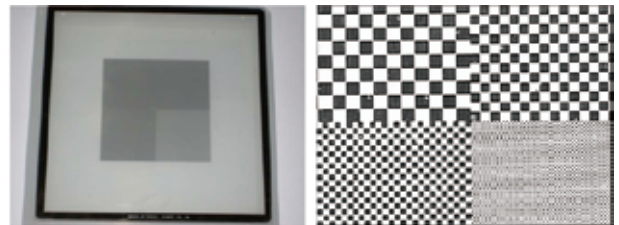
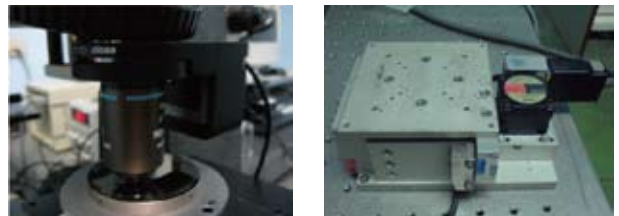


圖 14 結構光投影所使用之光柵片

3.3 量測移動機構部分

以 PZT 裝置移動顯微物鏡進行深度掃描，其移動之最小解析為 1 nm，可視實際量測需求進行調整。利用步進馬達進行結構光光柵片之漂移，當漂移次數增加，得到點資訊量相對提高，進而得到較佳之空間解析，達到結構光漂移量測的目的，系統使用的 PZT 位移裝置、Z 軸升降平台與手動式 XY 移動平台如圖 15 所示。



(a) (b)



(c)

圖 15 共焦量測系統中使用的位移機構：(a) PZT 位移裝置；(b) Z 軸升降平台；與 (c) 手動式 XY 移動平台

四、實驗結果

4.1 增光膜片量測驗證

增光膜 (BEF) 乃利用精密的顯微複製技術，所形成特殊的稜鏡結構，可以管理光的角度以達到增亮的效果。BEF 主要的功能在藉由折射與內部全反射，將自導光板發出至四面八方之散亂光線，集中至約 $\pm 35^\circ$ 的正視角方向，其結構如圖 16 所示。

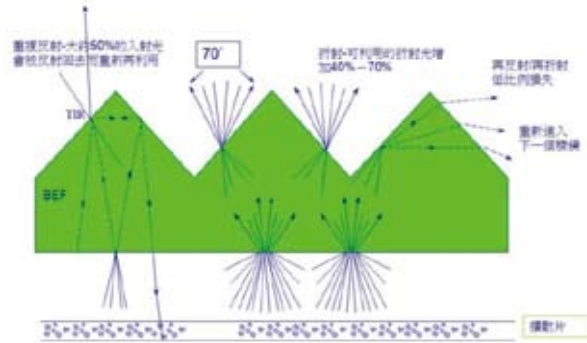
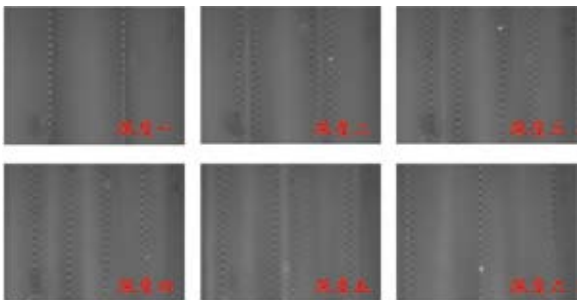


圖 16 背光模組中之 BEF 構造示意圖

BEF 是屬於透明且高傾角之待測物，對於量測而言並不容易，因此在量測中對其投影棋盤式結構光柵片，增加其表面高頻資訊，作為聚焦函數判斷之依據。在進行量測時，投影之結構光大小為 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ ，掃描條件為物鏡倍率 $\times 50$ ($\text{NA}=0.95$)，垂直掃描間距 $0.2 \mu\text{m}$ ，垂直掃描張數共 135 張，深度掃描之部分影像如



所示。

實驗結果如圖 18 與表 1 所示，由量測之結果分析可以確定 BEF 之三維輪廓形貌可以完整的重建，可推測此 BEF 之斜面傾斜角為 37° 。

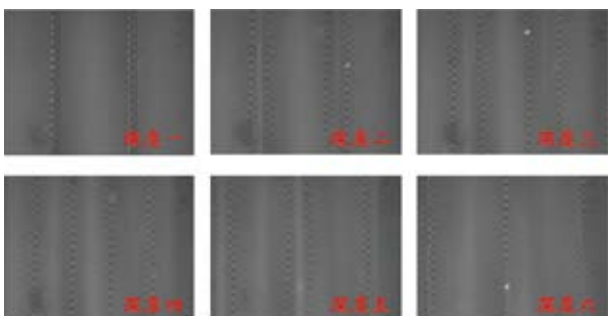
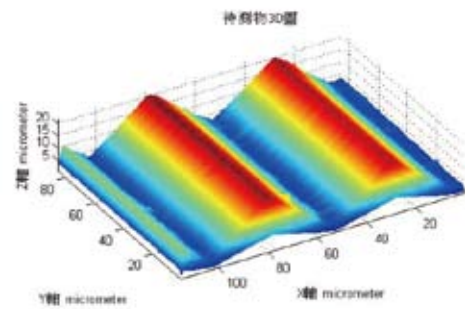
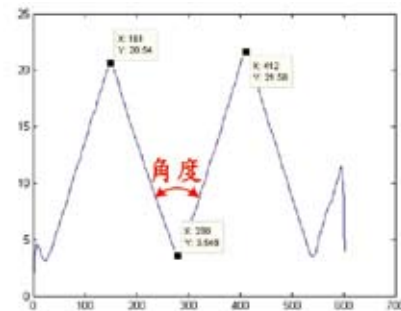


圖 17 對 BEF 進行深度掃描之部分影像



(a)



(b)

圖 18 BEF 之量測結果: (a) 3D 形貌圖與 (b) 形貌剖線圖

深度(μm)	18
角度(度)	106.24
寬度(μm)	50.11

表 1 BEF 量測之數據

4.2 表面傾斜 V 型槽標準塊之量測驗證

本研究以表面傾斜角度 V 型槽標準塊，進行量測系統的校驗工作，以工研院所研製之不銹鋼 V 型槽 30° 與 45° 角度標準塊，進行量測驗證。首先以表面傾斜角度 30° 之 V 型槽標準塊，進行量測系統的校驗工作，投影之結構光大小為 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ ，掃描條件為物鏡倍率 $\times 50$ ($\text{NA}=0.95$)，垂直掃描間距 $0.2 \mu\text{m}$ ，垂直掃描張數共 90 張，深度掃描之部分影像如圖 19 所示。

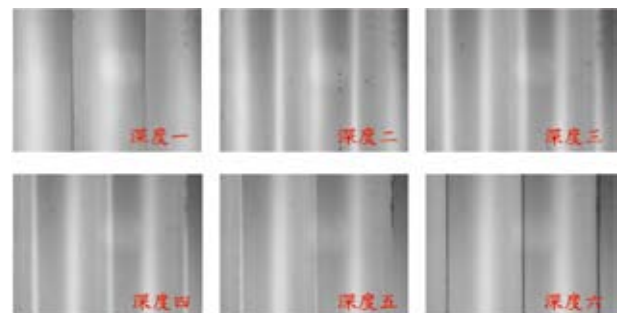
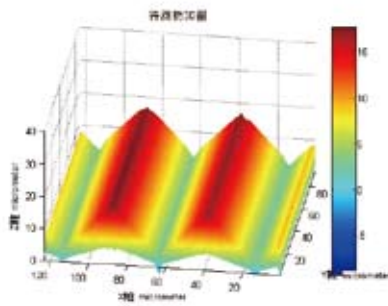


圖 19 對角度 30° 標準塊進行深度掃描之部分影像

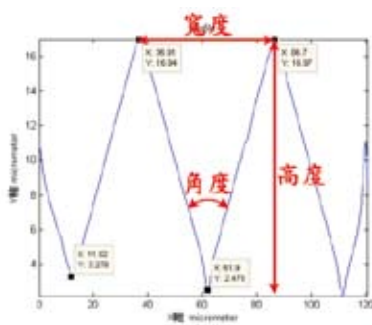
量測結果如表 2 與圖 20 所示，由量測之結果分析可以發現30°之形貌可以完整的量測與重建。雖然在V型槽底部有出現部分干擾性之結構光影像，經過聚焦函數計算後所得之資訊，並不足以影響到判斷真實峰值之位置，因此量測之結果不受影響。

表 2 30°V型槽標準塊量測之數據

參數別	共焦量測		研經量測 (白磁之白丁量測儀)	
	平均	標準差	平均	標準差
深度(μm)	14.49	0.11	14.09	0.14
角度(度)	119.7	0.45	119.4	0.2
寬度(μm)	49.79	0.29	49.32	0.48



(a)



(b)

圖 20 角度30°標準塊量測結果:(a)3-D形貌 ; (b)剖面圖

本研究以角度45°標準塊進行量測系統的校驗工作，為了將干擾性反射訊號之影響降至最低，在掃描時加入兩片線性偏極片，改變此反射訊號之偏極性，搭配線性偏極片鏡組與雙峰判斷演算法進行演算判斷，投影之結構光為60*60 μm²，掃描條件為物鏡倍率x50 (NA=0.95)，垂直掃描間距0.2 μm，掃描張數共170張，深度掃描之部分影像如所示。

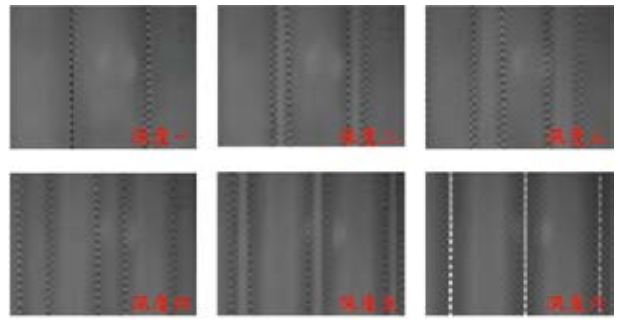
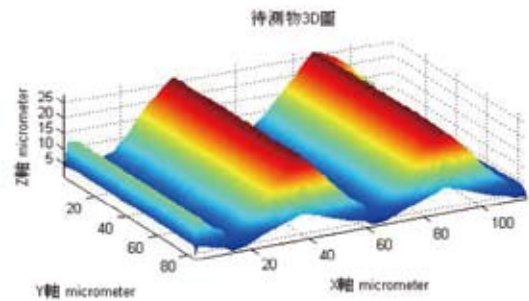


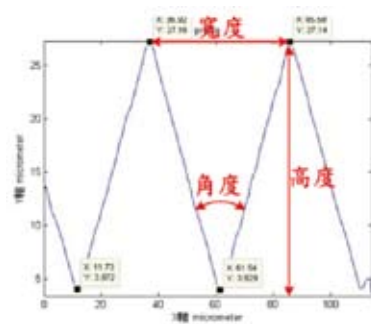
圖 21 搭配線性偏極片對角度45°標準塊進行深度掃描之部分影像 搭配線性偏極片進行三維形貌量測之結果，如圖 22 與表 3 所示，量測之結果可獲得底部之資訊。因此，將可以完整得到深度、寬度以及角度三個量測資訊重建出來。

表 3 45°V型槽標準塊量測之數據

參數別	共焦量測		
	平均	標準差	(平均)+/-(2 倍標準差)
深度(μm)	23.94	0.04	23.85-24.02
角度(度)	90.21	0.38	89.45-90.97
寬度(μm)	49.25	0.09	49.08-49.44



(a)



(b)

圖 22 V型槽45°標準塊之量測結果:(a)3D形貌圖;(b)剖線圖

五、結論

本研究已成功研發自動化共焦顯微量測術之量測方法，同時研製出一套運用結構光光柵片投射技術，並結合聚焦形貌量測原理之全域式微尺寸物體之三維表面輪廓共焦量測系統，針對微尺寸高傾斜角之待測物進行全域式量測。本研究之量測樣品為微尺寸標準元件，量測其三維表面輪廓形貌，驗證量測系統的精度與性能。量測系統之主動式光源以鹵素燈源搭配結構光光柵片為基礎，可適應於不同表面特性之待測物改變棋盤式結構光大小，利用高NA值之顯微物鏡使可接收反射光之角度加大，使由高傾斜面散射之微弱散射光強信號能由CCD精確地擷取，以達高傾斜角之量測。針對高傾斜角度量測之底部干擾性反射訊號問題，提出新式之共焦演算法與搭配線性偏極片之架構改良方法，能有效解決雙峰式聚焦反應曲線所造成之誤判，但唯有改變干擾性反射訊號之偏極性，才能完整重建其三維輪廓形貌。以聚焦函數評估影像點的強度值，對應待測物之實際高度位置，可精確且有效率的完成待測物表面輪廓重建。

參考文獻

1. S. K. Nayar and Y. Nakagawa, "Shape from focus: an effective approach for rough surfaces", Proceedings IEEE International Conference on robotics and automation, 1990, pp. 218-225.
2. M. Noguchi and S. K. Nayar, "Microscopic shape from focus using active illumination," Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition, Vol. 1, 1994, pp.147-152.
3. F. Bitte, G. Dussler and T. Pfeifer, "3D micro-inspection goes DMD", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 36, 2001, pp. 155-167.
4. Mitsuhiro Ishihara and Hiromi Sasaki, "High-speed surface measurement using a non-scanning multiple-beam confocal microscope", Proc. SPIE., Vol. 3478, 1999, pp. 1035-1040.
5. J. Lobera and J. M. Coupland, "Optical diffraction tomography in fluid velocimetry: the use of a priori information", 2008 IOP Publishing Ltd.
6. 高偉傑，白光共焦顯微三維表面輪廓量測系統之研發，碩士論文，國立臺北科技大學自動化科技研究所，台北，2005
7. L. C. Chen and S. H. Chen, "Novel White Light Confocal Microscopy using Polarized Phase-Shifting Grating Projection for 3-D Reconstruction of Microstructures having Texture-less and High-slope Surfaces", Automation 2009, the 10th International Conference on Automation Technology, 2009.
8. 廖界程，數位結構光三維顯微量測系統之研發，碩士論文，國立臺北科技大學機電整合研究所，台北，2004
9. S. K. Nayar, and Y. Nakagawa, "Shape from focus: an effective approach for rough surfaces", Proc. IEEE Int. Conf. on robotics and automation, 1990, pp. 218-225.