

# 線型彩色共焦三維形貌顯微術

## Line-Scanning Chromatic Confocal Three-Dimensional Microscopic Surface Profilometry

陳亮嘉、林宗毅、張奕威、林世聰

Liang-Chia Chen, Tsung-yi Lin, Yi-Wei Chang, Shyh-Tsong Lin

本文主要目的在於提升共焦顯微三維形貌量測之量測精度與速度，將線型共焦量測原理結合白光軸向色散原理，發展成創新式之線型彩色共焦三維形貌量測技術。利用共焦顯微術特有之光學切片能力及光譜色散之高解析能力，建立線型彩色共焦數學模型，發展具有高速、高精度、高縱向量測範圍與具單點空間解析能力之線型彩色共焦顯微三維輪廓量測技術。線型彩色共焦架構可使白光線光源產生軸向色散，並聚焦在不同深度，獲得聚焦表面之反射光譜，經由線型光譜儀解析，並將光譜與深度進行校正比對，可快速精確還原待測物之剖面形貌，經橫向位移，即可重建待測物之三維形貌；透過反摺積演算法降低光擴散影響，使系統達到單點量測之解析。以實際使用之細微元件驗證系統精度與性能驗證，此量測解析可達到 0.1  $\mu\text{m}$  高速精確之共焦三維輪廓量測。

An on-line 3D surface profilometer for micro surface profiles with a long range and high resolution measurement was successfully developed using innovative slit-scan multi-wavelength confocal microscopy. In conventional confocal microscopy, vertical scanning of the object's surface by either mechanical depth movement or objective shifting is extremely time-consuming, thus resulting in unacceptable efficiency for on-line inspection. In this paper, a multi-wavelength confocal microscope employing a broadband light source in combination with a chromatic dispersion objective was developed to generate an accurate wavelength-to-depth conversion for microscopic 3D profile measurement. By using the point spread function (PSF) detected with its corresponding wavelength detected at its matching focal depth, the proposed deconvolution method has been proved effective theoretically and experimentally in greatly minimizing the full width half maximum (FWHM) of the depth response curve. Using the developed deconvolution algorithms, to the measurement resolution of the line-scanning chromatic confocal system can reach the same level of the single point measurement. Using pre-calibrated standard bandwidth and step height targets, the measurement accuracy of the developed method can reach up to 0.1  $\mu\text{m}$ .

### 一、前言

在現今社會中，資訊、通訊以及電子產業製程技術日新月異，不斷朝著微小化與精細化努力，在

大面積晶圓 (wafer) 中製作出更多細微的半導體元件，以獲得更高的經濟價值。為了避免元件之製作瑕疵所帶來的影響，若可提早發現元件的瑕疵與元件瑕疵發生的原因，將可即時剔除瑕疵元件，並可

節省大量的材料與製作流程。若以自動化光學量測技術來進行檢測，則可提升檢測速度，同時降低人力的成本，更可避免人為誤判的產生，以更快速且準確的檢測技術來確保產品的品質，藉以提升量測之速度與精確性。

在自動化光學檢測技術中，共焦顯微術擁有光學切片能力及無斷差 (step height) 限制之優點，且量測之垂直解析可達到奈米等級，能獲得特定深度下焦點內的資訊，通過逐點掃描，可以重建三維形貌的物體，此技術在光學三維形貌量測術中佔有相當重要的地位。共焦量測技術主要為單點型檢測之系統，若要獲得完整之三維形貌，就必須逐點縱向及橫向掃描來獲得完整的三維形貌資訊。但是，逐點量測將影響其檢測速度，難以應用於線上檢測。隨著製造技術之提升，微奈米元件之線上自動化光學檢測設備需求日增，因此許多基於共焦理論之創新方法被研究提出，亦大為改善共焦顯微術之檢測速度，但其快速縱向掃描需仰賴繁瑣之架構或各式演算法來達成，如此將造成系統複雜、價格高昂或精確度不足。

有鑒於此，本文將探討線型彩色共焦顯微三維輪廓量測技術，報導的重點將探討及分析彩色共焦

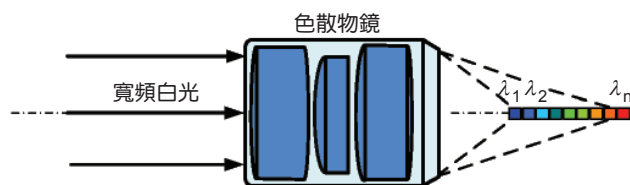


圖 1. 折射式色散物鏡示意圖。

量測系統之相關理論與技術以及近場光學中點擴散函數的變化，並提出一套結合寬頻光源、線型共焦技術、軸向色散技術、光譜色散分析技術及反摺積演算法之共焦顯微量測系統，它可以應用於高速線上顯微微結構之三維量測工程上。

## 二、線型彩色共焦顯微術

彩色共焦顯微術使用延伸聚焦點取代傳統之縱向掃描，延伸聚焦點乃利用聚焦色散元件，使寬頻光源之光譜於軸向產生不同聚焦點，如圖 1 所示<sup>(1)</sup>。彩色共焦顯微術利用軸向色散物鏡，使入射光源之光譜產生軸向色散，並聚焦於不同位置，如圖 2 所示，此時若待測物表面高度位於光譜  $\lambda_m$  之聚焦位置，則  $\lambda_m$  之光譜將穿越共軛空間濾波器，

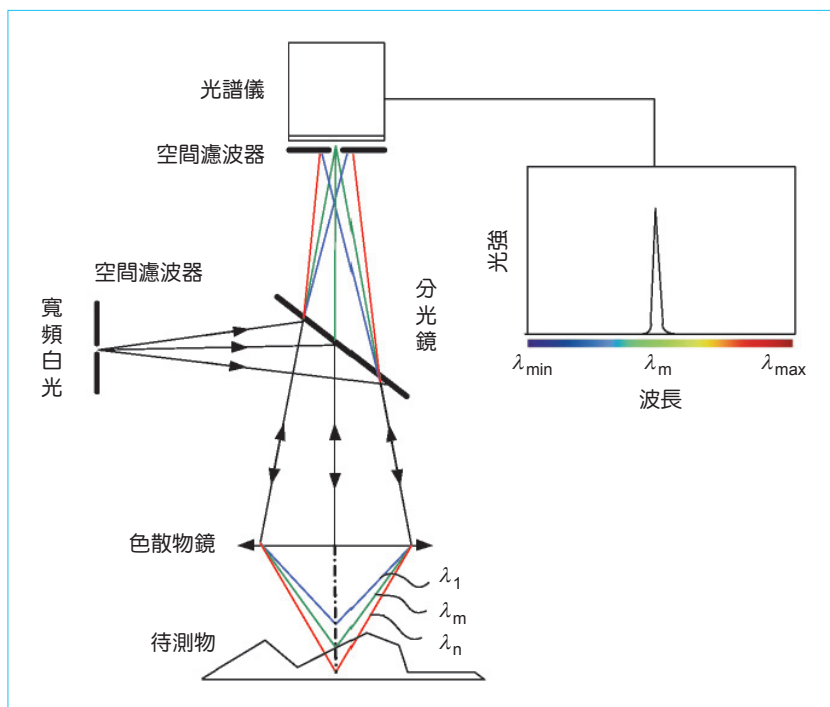


圖 2. 彩色共焦顯微術示意圖。

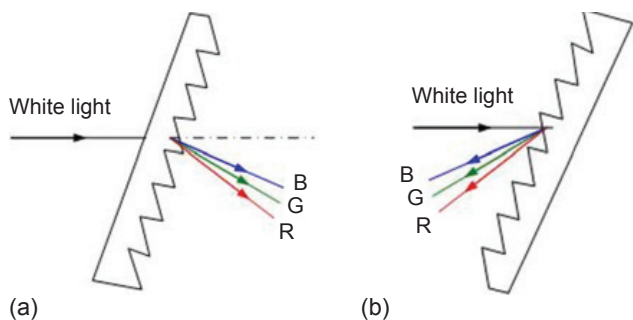


圖 3. 繞射光柵種類：(a) 穿透式光柵；(b) 反射式光柵。

由光譜儀分析入射光束之光譜成分，藉由峰值偵測，即可得知聚焦點光譜之波長。光譜儀架構是以繞射光柵 (diffraction grating) 構成，可分為穿透式光柵 (transmission grating) 及反射式光柵 (reflection grating)，如圖 3 所示，穿透式光柵乃是由許多個狹縫密接所構成，通常 1 mm 寬度即有上千條之狹縫，光柵之狹縫數量愈多，所產生之繞射條紋強度變化越大，明暗對比越明顯，光譜線也就越清楚。

單點型光譜儀經分光元件進行橫向色散，由一維之 CCD 偵測，可得到單點入射光之光譜響應曲線，如欲獲得區域之光譜影像需逐點掃描，如此將耗費大量時間。而影像式光譜儀或稱線光譜儀，其入射為線光源，藉稜鏡導引入射光角度至繞射光柵產生色散，再由稜鏡將繞射光投射於二維 CCD 偵測，可快速獲得一幅光譜影像，如圖 4 所示，光譜影像座標縱向為光譜軸，橫向為空間軸。

在光學系統中，當一點光源經透鏡聚焦後，其焦點光場強度將會形成一個二維圖形，也就是所謂的艾瑞盤 (Airy disc)，如圖 5 所示，以光場分布則稱為點擴散函數 (point spread function, PSF)，不同深度分布光點大小皆不相同，如圖 6 所示<sup>(2)</sup>，當待測物通過光學系統之成像，可視為待測物上各點

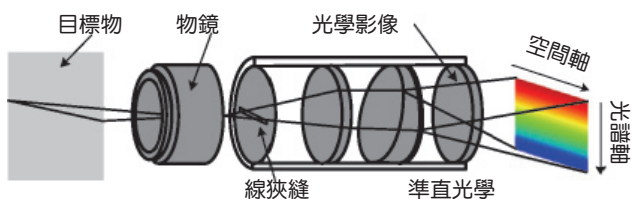


圖 4. 線光譜儀原理。

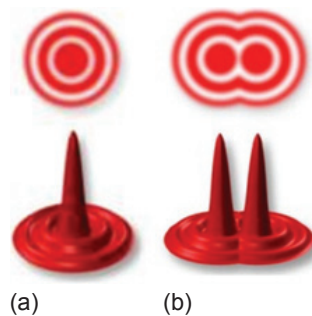


圖 5. 艾瑞盤強度示意圖：(a) 艾瑞盤；(b) 無相互干擾。

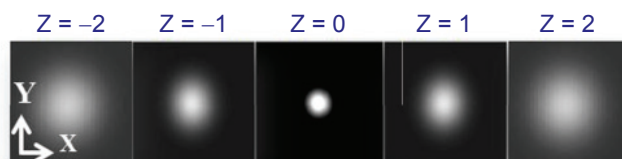


圖 6. PSF 不同深度水平方向光強分布。

所形成之艾瑞盤疊加之結果，當空間中有兩點光源投射進入透鏡，此時若艾瑞盤距離較遠時，可分辨為兩個物點，若距離過於接近時，光強疊加後將造成無法分辨，此現象稱為橫向交談 (cross-talk)，如圖 7 所示，由此可知橫向交談會造成光點之間無法分辨、解析度下降等問題。因此，單點型彩色共焦數學式光強分佈關係可整合表示<sup>(3)</sup>：

$$i_{\lambda}(v, w, u) = \{l_{\lambda}(v, w) \otimes |h_{\lambda}(v, w, u)|^2\} \{d_{\lambda}(v, w) \otimes |h_{\lambda}(v, w, u)|^2\} \quad (1)$$

其中  $i_{\lambda}(v, w, u)$  為感測器接收到之光強訊號， $l_{\lambda}(v, w)$  為點光源端， $d_{\lambda}(v, w)$  為點針孔端， $h_{\lambda}(v, w, u)$  為擴散函數， $\otimes$  代表摺積， $\lambda$  代表波長， $v$ 、 $w$  與  $u$

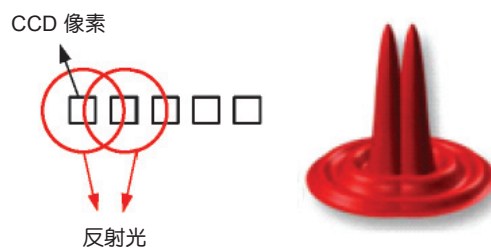


圖 7. 艾瑞盤橫向交談示意圖。

為光學極座標對應之真實半徑與軸向座標位置。

$$\begin{aligned} v &= kx \sin \alpha \\ w &= ky \sin \alpha \\ u &= kz \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\sin \alpha$  為數值孔徑， $k$  為波數  $2\pi/\lambda$ 。 $h_\lambda(v, w, u)$  點擴散函數經過實際聚焦於透鏡後可表示為<sup>(4)</sup>

$$h_\lambda(v, w, u) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p_\lambda(\xi, \eta, u) \exp[j(\xi v + \eta w)] d\xi d\eta \quad (3)$$

其中  $r$  為透鏡之半徑， $\xi$  與  $\eta$  表示第一片透鏡的座標對應之真實半徑座標位置，

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x'}{r} \\ \eta &= \frac{y'}{r} \end{aligned} \quad (4)$$

$p_\lambda(\xi, \eta, u)$  為透鏡之孔徑函數，可改寫成為

$$p_\lambda(\xi, \eta, u) = \exp\left[\left(\frac{1}{2}\right)ju(\xi^2 + \eta^2)\right] \text{circ}(\xi^2 + \eta^2)^{1/2} \quad (5)$$

縱向光學座標及深度波長聚焦位置關係可知深度和波長的關係改寫成<sup>(5)</sup>

$$z(\lambda) = \frac{1}{n(\lambda) \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right]} \quad (6)$$

由於單點型水平方向影響很小，考慮平面鏡只量測徑向座標位置訊號，而單點型感測器在原點，接收到光強訊號大小隨著物體縱向變化改變為

$$i_\lambda(u) = \int_0^1 \left| \int_0^1 \exp(ju\eta^2) d\eta \right|^2 d\xi \quad (7)$$

單點型彩色共焦系統量測精度高，但量測速度慢，無法應用於線上的量測。因此，提出線型彩色共焦量測系統，主要目的在於達到高速與高精度之量測。為了使系統可以進行高速量測，架構採用線型光譜儀進行接收反射光訊號，以波長反射光強度資訊來即時得到待測物深度位置的資訊。而系統採用分光模組加上面型 CCD 裝置來進行反射光源的接收，使用面型 CCD 接收時，由於各個反射光點在 CCD 上聚焦，並不是完全的單一聚焦點，因此各個像素點之間所接收到的光強訊號，將有相鄰像素間信號產生橫向交談光源疊加的問題。基於光學系統繞射理論，光點訊號經過光學系統成像後，將會導致模糊化，此一過程可視為擴散函數，而光學系統成像則可視為擴散函數之摺積。CCD 所擷取到的影像可用數學摺積式描述，可清楚表達此情況，如圖 8，可將  $h_\lambda(v, u)$  擴散函數化簡為一個看，為線偵測器和擴散函數經過摺積演算與雜訊干擾後所得到之資訊：

$$i_\lambda(v, u) = h_\lambda(v, u) \otimes s_\lambda(v, u) + n_\lambda(v, u) \quad (8)$$

線光源光強  $i_\lambda(v, u)$  可看成擴散函數  $h_\lambda(v, u)$  和原始反射光強  $s_\lambda(v, u)$  做摺積而形成，其線型彩色共焦光強分布數學式可表示二維摺積式<sup>(6)</sup>：

$$i_\lambda(v, u) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_\lambda(v-g, u-r) s_\lambda(g, r) dg dr + n_\lambda(v, u) \quad (9)$$

由於線型光為多點疊加而成，會有橫向交談問題，為了克服橫向交談擴散函數問題，提出以反摺積的演算方式來進行，其中快速傅立葉去模糊法 (fast Fourier transform deblurring) 是非常簡單的方法，頻域的去模糊運算可表示為真實影像的傅立葉變換和點擴散函數的傅立葉變換的乘積，提出以反摺積的演算方式來進行，將方程 (8) 轉換至頻率域

圖 8. 線型彩色共焦反射光強摺積示意圖。



中，其表示

$$I_\lambda(g, r) = H_\lambda(g, r) s_\lambda(g, r) + N_\lambda(g, r) \quad (10)$$

其  $(g, r)$  頻域參數表示，將式轉移至頻域後，再由頻域轉換為時域之反摺積運算，即可還原為真實物體反射光強度，減少擴散光源對於真實光強的影響：

$$s_\lambda(v, u) = F^{-1} \frac{I_\lambda(g, r)}{H_\lambda(g, r)} + N_\lambda(g, r) \quad (11)$$

但此方法是理想的方程式，實際上還有  $N_\lambda(g, r)$  雜訊不可能被消除，雜訊 (noise) 會被放大來看，反摺積在有雜訊時演算不適用理想方程式，所以可求出  $s_\lambda(v, u)$  的估計值。在反摺積演算法中，系統採用維納 (Wiener) 濾波反摺積演算法，維納濾波對於雜訊有抑制的功效。Wiener 去模糊法與「非遞迴式」方法有關，此方法可說明為藉著找出與原圖有最小均方誤差的圖片為重建影像，Wiener 濾波器的想法大致上用線性化方式解決了一般非線性最小化問題，對於雜訊為純高斯雜訊時，最小化問題是線性的，因此 Wiener 濾波器以均方誤差為此特例提供了最佳化解法<sup>(7-8)</sup>：

$$\hat{S}_\lambda(g, r) = \frac{H_\lambda^*(g, r) I_\lambda(g, r)}{|H_\lambda(g, r)|^2 + \frac{|N_\lambda(g, r)|^2}{|S_\lambda(g, r)|^2}} \quad (12)$$

其中  $\hat{S}_\lambda(g, r)$  為偵測器原始影像之預估值， $H_\lambda(g, r)$  為系統擴散函數， $H_\lambda^*$  表示共軛複數， $S_\lambda(g, r)$  為偵測器原始影像， $N_\lambda(g, r)$  為雜訊， $I_\lambda(g, r)$  為偵測器所得到的影像。 $N_\lambda(g, r)$  和  $S_\lambda(g, r)$  很難以估計，在此可將兩項簡化為一項雜訊因子  $\gamma_\lambda$ 。此演算法考慮雜訊項，並於每次迭代都考慮雜訊因子的影響， $n$  代表迭代 (iteration) 次數，其數學式可改寫為 (13) 所示。經由這種演算法可有效降低 PSF 大小，如圖 9 所示<sup>(9-10)</sup>。

$$S_\lambda(g, r)_n = S_\lambda(g, r)_{n-1} + \frac{H_\lambda^*(g, r) I_\lambda(g, r)}{|H_\lambda(g, r)|^2 + r_\lambda} \quad (13)$$

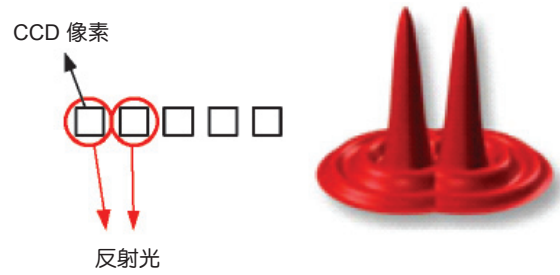


圖 9. 反摺積演算後艾瑞盤示意圖 (艾瑞盤無相互干擾)。

利用反摺積演算就能有效避免線量測上各點之間的橫向交談影響，降低系統中橫向干擾問題，並有效提升量測精度，使精度可以接近單點彩色共焦之量測精度。

### 三、建立校正曲線

對於彩色共焦顯微術而言，縱向聚焦反應曲線之峰值可決定待測物深度位置，藉以偵測待測物之表面輪廓位置，重建待測物之三維形貌。正確地判斷峰值位置，將決定系統量測之解析，故聚焦反應曲線之峰值偵測顯得重要。多波長在不同深度位置的縱向色散如圖 10 所示。

傳統之共焦顯微術縱向響應曲線是以垂直掃描的方式，建立一組縱向位置與光強之關係，以最強光強之位置找出待測物體之深度位置。而在彩色共焦顯微術中，縱向響應曲線為光譜與光強之關係，系統透過軸向色散，將各個波長聚焦至不同的深度

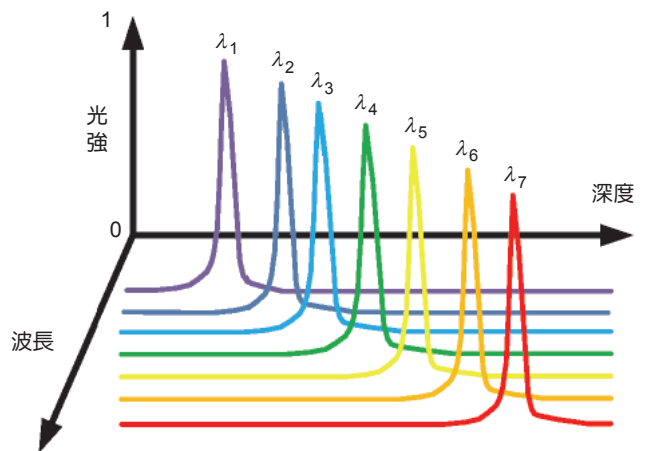


圖 10. 多波長得到之縱向色散示意圖。

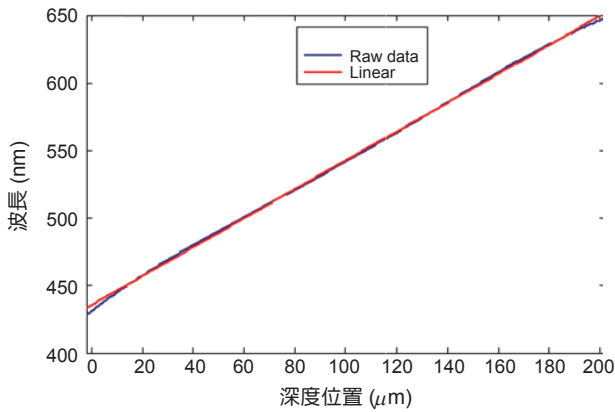


圖 11. 色散物鏡之校正曲線。

位置上，並透過光譜儀來進行接收。為了透過光譜儀的波長資訊來找出待測物體深度資訊，必須透過一校正程序來轉換，其校正程序係利用近似理想之平面反射鏡，於量測樣品前先進行縱向掃描，並逐一記錄其深度位置之聚焦波長資訊，進而得到一組波長與深度的關係曲線，再使用曲線擬合法 (curve fitting) 或查表法 (look-up table) 建立參照，量測

樣品時將待測物表面所測得之波長。透過此校正程序，即可獲得實際之縱向深度位置，如圖 11 所示。

## 四、實驗量測結果分析

針對包含重複性驗證誤差及三維形貌量測結果，使用標準線寬光柵片 (standard grating)、微凸塊 (micro bump) 以及稜鏡片 (bright enhance film) 等實際例子進行量測，將線型彩色共焦三維顯微輪廓術量測結果具體呈獻，藉此驗證此線型彩色共焦之量測系統精度。

### 1. 重複性驗證

以工業技術研究院 (以下簡稱工研院) 所製作之標準塊規 (階高為  $50.6 \mu\text{m}$ ) 重複量測 30 次，其量測結果如圖 12 所示，驗證量測系統之量測平均高度為  $50.644 \mu\text{m}$ ，重複性量測階高之標準差為  $38.5 \text{ nm}$ ，其量測之數據如圖 13 所示。

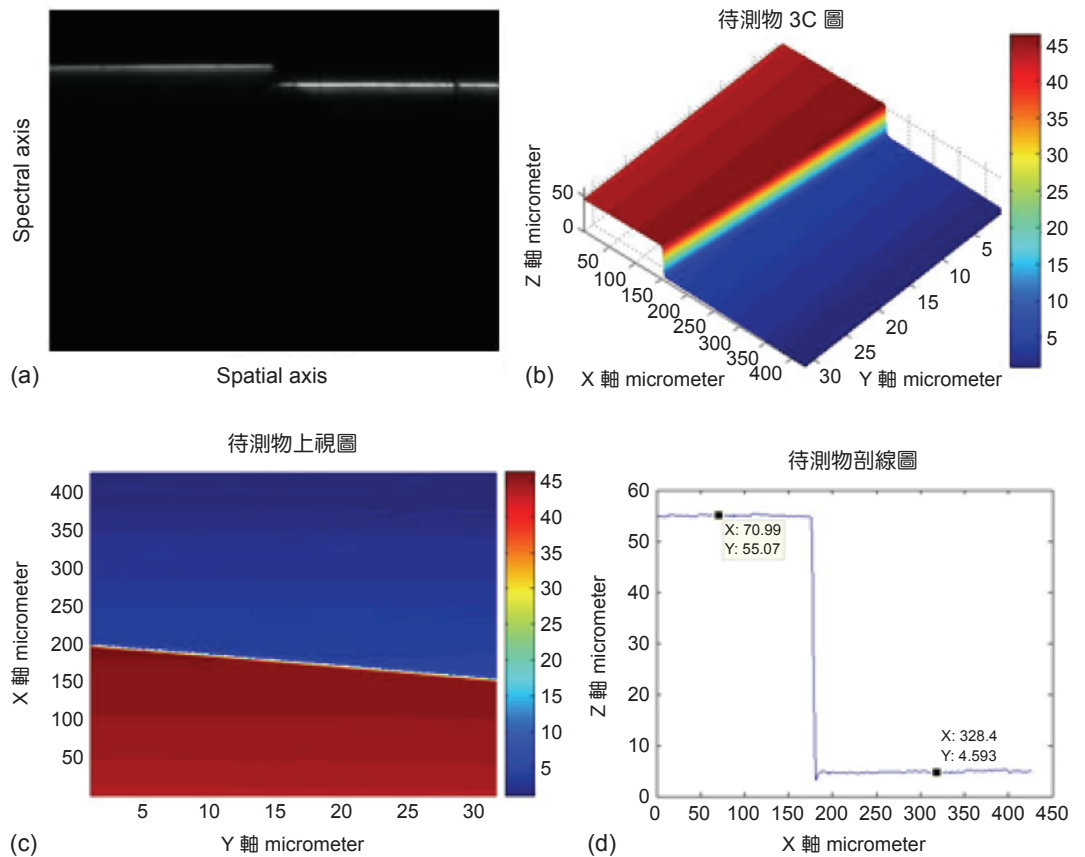


圖 12. 階高  $50.6 \mu\text{m}$  塊規量測結果：(a) 塊規光譜影像；(b) 三維形貌；(c) 上視圖；(d) 剖線資訊。

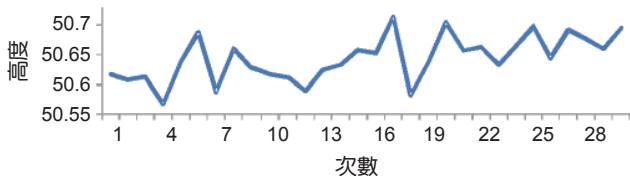


圖 13. 重複性量測結果。

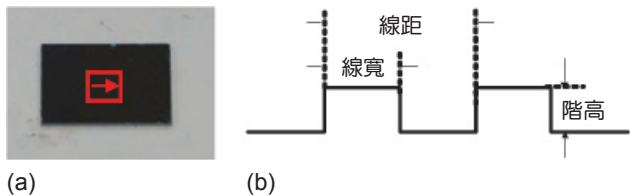


圖 14. 標準線寬光柵片：(a) 實體圖；(b) 線寬階高示意圖。

## 2. 標準線寬光柵片量測

為了對系統進行驗證與校正，本文使用工研院提供之標準線寬光柵片進行系統校驗，圖 14 為標準線寬光柵片實體圖。首先為了驗證光柵片仍是標

準以及比較用，先使用雷射單點共焦顯微鏡進行量測，建立一組參考資訊驗證本實驗之效果。由於線寬為工業界做為精度判定的依據，所以本實驗使用線寬來做比較，所得到為  $39.791 \mu\text{m}$ ，階高度為  $10.016 \mu\text{m}$ ，雷射單點共焦量測結果如圖 15 所示三維量測結果，包含三維輪廓圖、上視圖與剖線圖。

系統量測標準線寬光柵片，並使用反摺積演算法比較前後兩者之間差異，以驗證反摺積之效果。將三維形貌重建量測結果和高度邊緣資訊做具體比較，其量測範圍為  $200 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ，掃描間距為  $1 \mu\text{m}$ ，量測結果比較如圖 16 所示。

由實驗結果可知，在標準件邊緣量測時由於艾瑞盤光點遠大於相機像素點，因此物件在非連續面時上頂面光強受到下底面光強牽制，下底面亦然，導致在物件邊緣會產生橫向交談問題。但是經由本研究之演算法，可縮小艾瑞盤光點達到近似於單點型的深度解析，減少橫向交談問題。比較量測結果，將三種量測方法剖線進行比較，如圖 17 所示，即可更加正確判斷出邊緣位置，評估量測結果如表 1 所示。

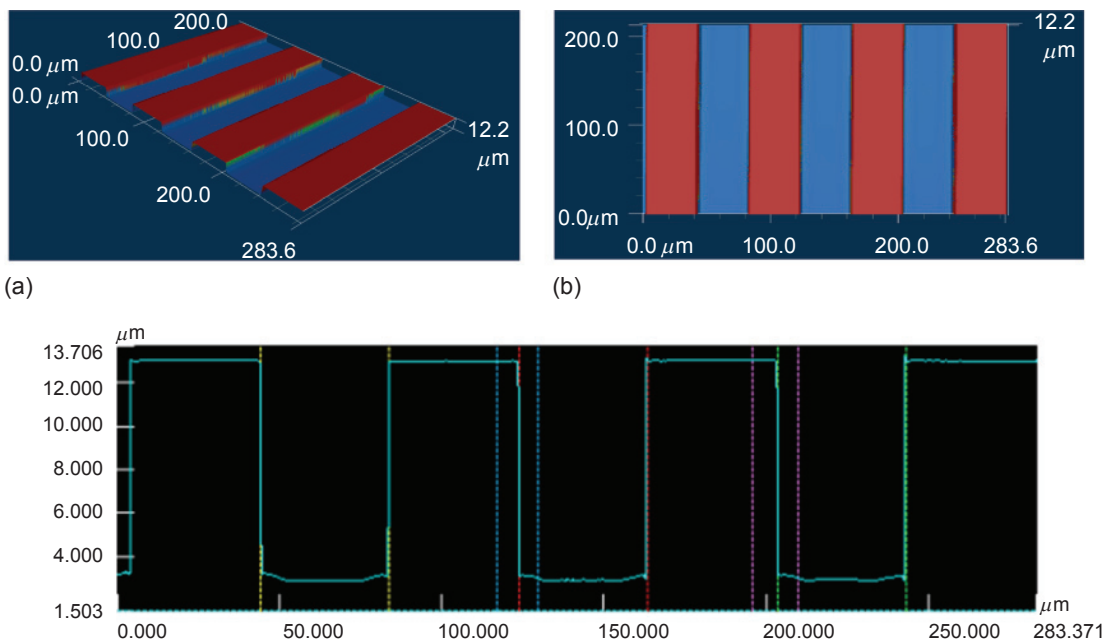


圖 15. 雷射單點共焦量測結果：(a) 三維形貌重建；(b) 上視圖；(c) 剖面圖。

Profile 1	Horz. dist.	Hght. diff.	Hght. ave.	Angle	C.S. length	C.S. area	R	Comment
All	283.371 $\mu\text{m}$	9.881 $\mu\text{m}$	8.695 $\mu\text{m}$	1.997°	351.277 $\mu\text{m}$	2039.934 $\mu\text{m}^2$		
Seg. 1	39.791 $\mu\text{m}$	0.030 $\mu\text{m}$	3.183 $\mu\text{m}$	0.043°	58.638 $\mu\text{m}$	67.483 $\mu\text{m}^2$		
Seg. 2	39.791 $\mu\text{m}$	0.439 $\mu\text{m}$	3.109 $\mu\text{m}$	0.633°	59.004 $\mu\text{m}$	64.049 $\mu\text{m}^2$		
Seg. 3	39.791 $\mu\text{m}$	0.099 $\mu\text{m}$	3.122 $\mu\text{m}$	0.142°	59.251 $\mu\text{m}$	64.580 $\mu\text{m}^2$		
Seg. 4	12.970 $\mu\text{m}$	10.010 $\mu\text{m}$	8.465 $\mu\text{m}$	37.659°	22.365 $\mu\text{m}$	92.567 $\mu\text{m}^2$		
Seg. 5	14.070 $\mu\text{m}$	10.022 $\mu\text{m}$	8.652 $\mu\text{m}$	35.462°	23.585 $\mu\text{m}$	102.977 $\mu\text{m}^2$		

(c)

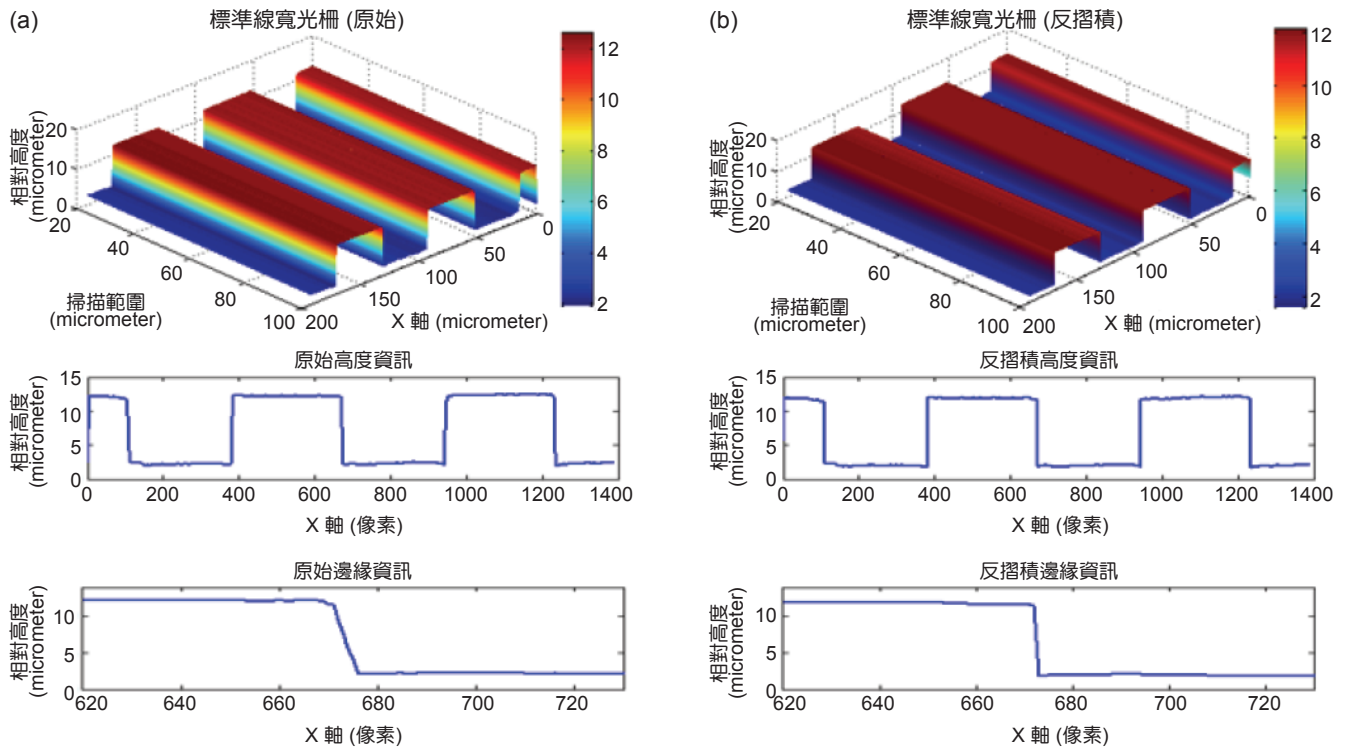


圖 16. (a) 原始三維形貌重建及邊緣剖線資訊；(b) 反摺積三維形貌重建及邊緣剖線資訊。

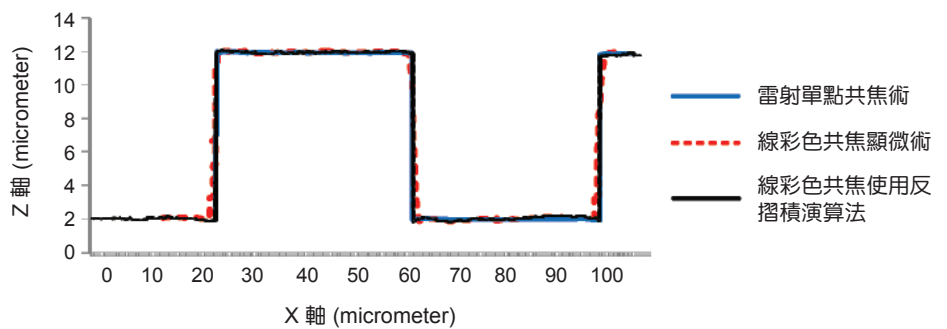


圖 17. 三種量測方法結果剖線比較。

### 3. 微凸塊量測

微凸塊為印刷電路板上 (PCB) 錫塊，圖 18 為微凸塊之實體影像及光譜儀取像圖，圖 19 包含三維輪廓圖、上視圖與剖線圖。由於線掃描式彩色共焦系統使用狹縫進行空間濾波，因狹縫並不如針孔於各方向皆可濾波，由原理可知狹縫於垂直方向擁有與針孔相同功能，平行於狹縫方向，則完全沒有空間濾波之能力，因而容易造成光譜橫向交談之情形，可利用影像回復方式，來減少橫向交談問題。量測評估微凸塊大小為  $90 \mu\text{m}$ ，平均高度為  $23 \mu\text{m}$ 。

### 4. 稜鏡片量測

稜鏡片為液晶顯示器中提升光源利用率之重要元件，此稜鏡片之外形與一般三角錐形不同，其為柱形稜鏡片，如圖 20(a) 所示。量測時以稜鏡片垂直方向掃描，圖 21 為三維輪廓重建圖、量測上視

表 1. 標準線寬光柵片量測結果比較。

	標準線寬 ( $\mu\text{m}$ )	標準階高 ( $\mu\text{m}$ )
雷射單點實際量測	39.791	10.016
線型彩色共焦量測	39.054	10.099
線型彩色共焦使用反摺積	39.723	10.029

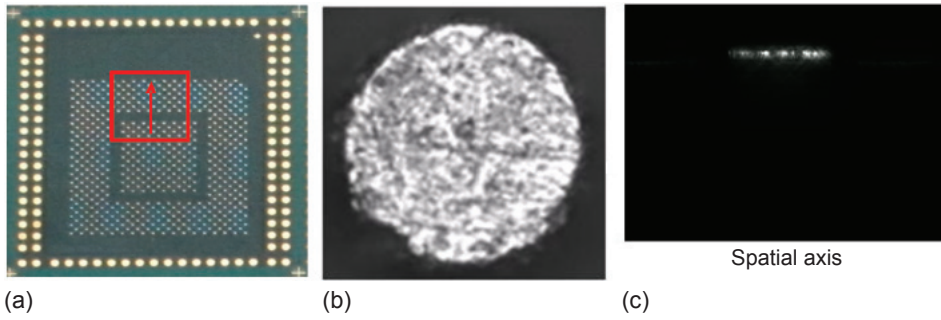


圖 18. Micro bump : (a) 實體影像；(b) 二維影像；(c) 光譜影像。

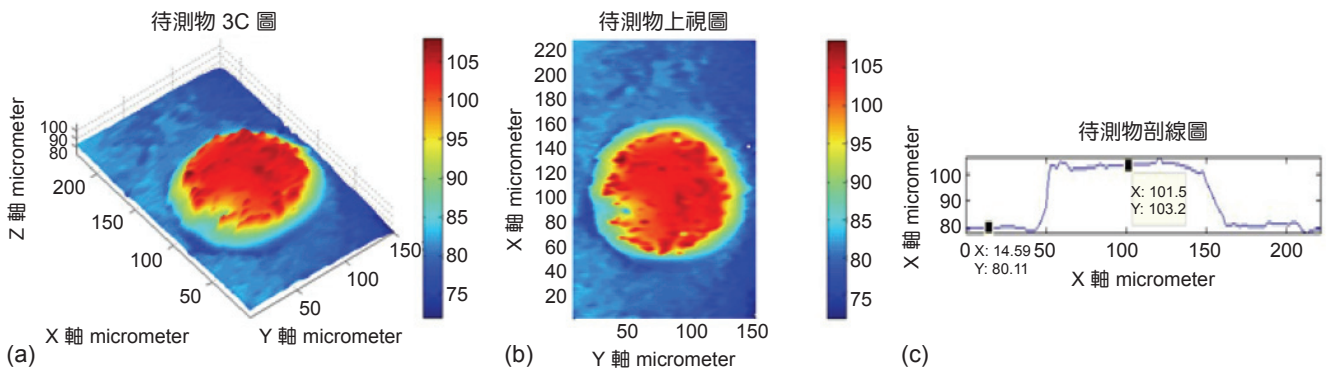


圖 19. 微凸塊三維形貌重建：(a) 三維形貌；(b) 上視圖；(c) 剖線資訊。

圖與剖線圖。此樣品為圓柱狀，故於交接處表面曲率較大，過大曲率之表面，受限於色散物鏡之數值孔径限制，造成光線無法反射，故於交接處之量測資料為無效區域，經由周邊資料插補，而獲得其谷底資訊，如此便容易使得評估高度及寬度精準度受到影響，產生量測上之誤差。經實際量測後，評估每個稜鏡之大小為  $1350 \mu\text{m}$ ，平均高度為  $100 \mu\text{m}$ 。

## 五、結論

本文提出之線型彩色共焦顯微技術，其最大的優點就是量測過程中不再需要進行深度掃描，量測

時僅以單張光譜影像就能獲得待測物之高度資訊，並且透過使用反摺積演算法解決線型量測系統的橫向交談問題，有效提升量測精度，使系統達到高速且高精度之即時三維形貌量測系統。未來，我們期望能將系統更強化與精緻化，並加強系統的解析度，能完成更精密檢測，並擷取三維空間資訊。另外，也期望能對精密元件之三維輪廓量測技術有更多的應用與貢獻。

## 參考文獻

1. 陳昭男, 碩士論文, 初版, 台北 (2009).
2. 朱士維, 台大物理系系刊, **31**, 76 (2008).
3. W. Joshua, Shaevitz, and A. Daniel, Fletcher, *JOSA A*, **24** (9), 2622 (2007).
4. K. Carlsson and N. Aslund, *Applied Optics*, **26** (16), 3232 (1987).
5. H. J. Tiziani, R. Achi, R. N. Kramer, and L. Wieggers, *Applied Optics*, **35**, 120 (1996).
6. T. Wilson, S. J. Hewlett, and C. J. R. Sheppard, *Applied Optics*, **29** (31), 4705 (1990).
7. C. J. R. Sheppard and X. Q. Mao, *Journal of Modern Optics*, **35** (7), 1169 (1988).
8. 繆紹剛, 培生教育出版, 249 (2008).

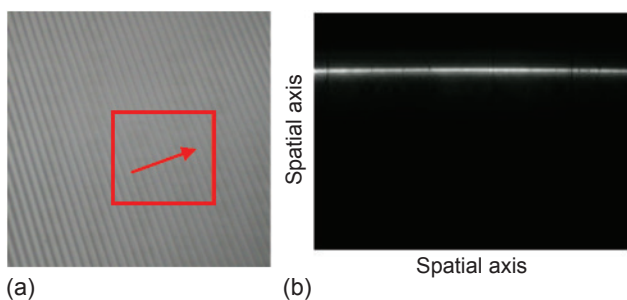


圖 20. 稜鏡片：(a) 實體圖；(b) 光譜儀影像。

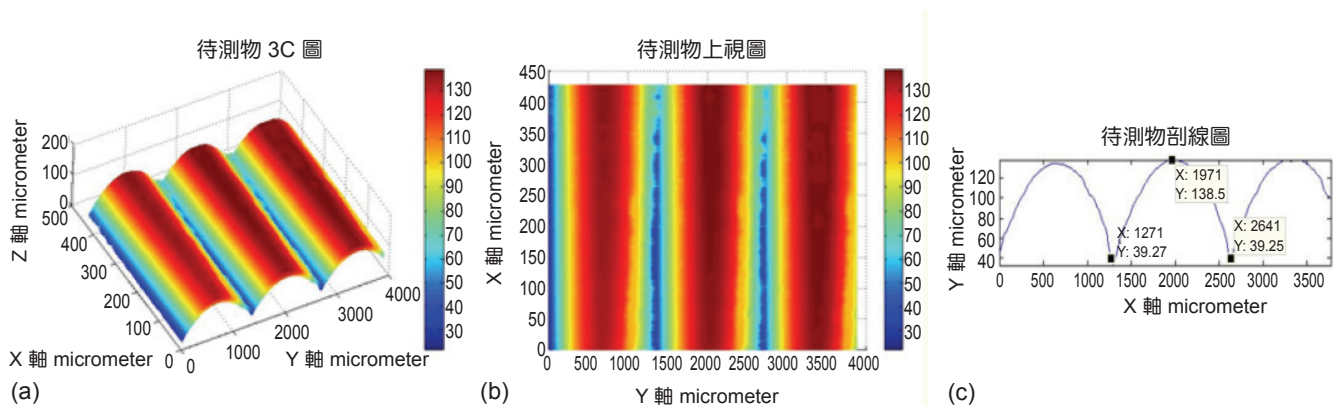


圖 21. 稜鏡片三維形貌重建：(a) 三維形貌；(b) 上視圖；(c) 剖線資訊。

9. E. Dusch, T. Dorval, N. Vincent, and M. Wachsmuth, *Journal of Microscopy*, **228**, 132 (2007).
10. R. Wolleschensky, B. Zimmermann and M. Kempe, *Journal of Biomedical Optics*, **11**, 064011 (2006).
11. X. Huang, N. Liu, and J. Cui, *Proceedings of SPIE*, **7133**, 277 (2009).
12. G. R. Ayers, and J. C. Dainty, *Optics Letters*, **13** (7), 547 (1988).
13. D. Hillery and T. Chin, *Signal Processing IEEE Transactions*, **39**, 1892 (1991).



陳亮嘉先生為澳洲南澳大利亞大學先進製造與機械工程博士，現任國立臺灣大學機械工程學系製造組教授。

Liang-Chia Chen received his Ph.D. in advanced manufacturing and mechanical engineering from the University of South Australia, Australia. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering in National Taiwan University.



林宗毅先生現為國立台北科技大學自動化科技研究所碩士班學生。

Tsung-yi Lin is currently a M.S. student in the Institute of Automation Technology at National Taipei

University of Technology.



張奕威先生現為國立台北科技大學機械學院博士班學生。

Yi-Wei Chang is currently a Ph.D. student in the College of Mechanical & Electrical Engineering at National

Taipei University of Technology.



林世聰先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國立台北科技大學光電工程系教授。

Shyh-Tsong Lin received his Ph.D. in mechanical engineering from National

Taiwan University. He is currently a professor in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Taipei University of Technology.