

# 飛行同步三維共焦量測系統之發展

陳亮嘉

陳昭男

張奕威

國立台北科技大學

國立台北科技大學

國立台北科技大學

自動化科技研究所

自動化科技研究所

自動化科技研究所

lcchen@ntut.edu.tw

t5618511@ntut.edu.tw

s4618014@ntut.edu.tw

## 摘要

本研究以聚焦形貌量測原理(Shape From Focus)，取代傳統之點或線掃描量測方式，可一次擷取待測物之全域影像，運用數位微鏡組裝置(DMD)之數位疊紋投射技術或傳統光柵疊紋投射技術，對待測物表面施以棋盤式結構光，彌補此法受限於空間高頻資訊之問題，並利用機械式傳動機構配合光學尺位置回授方式，以飛行量測法(Measurement on fly, MOF)擷取序列影像，加速縱向掃描時間，以發展符合線上使用之全域式微形貌之三維表面輪廓量測系統。以實際量測塊規階高為例，驗證本研發系統之量測精度與性能，量測之空間解析可達  $1\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，最大量測誤差為可控制在全高量測範圍之 5% 以下，飛行同步量測時間較停駐量測時間節省 25%。未來如欲提升檢測速度，則需使用光柵疊紋投射技術、功率強之光源及高速之攝影機，就本系統而言，理論上高速攝影機之取像與傳輸速度達 500fps 以上，取像間距  $0.3\mu\text{m}$ ，量測總行程  $30\mu\text{m}$ ，則量測時間可達 100ms。

關鍵字：自動化光學檢測(AOI)、三維精密量測、表面輪廓量測、共焦、聚焦形貌量測(SFF)

## 壹、前言

共焦顯微術在工業及生醫領域受到廣泛應用，主要是因為共焦顯微術具有光學切片之能力、高空間解析及斷差(Step Height)忍受力強之優點，但其因垂直掃描需求而影響到檢測速度，過去大部分應用於實驗室或品檢室中，但高速精確的三維表面輪廓量測，對於線上製程日漸重要，因而許多方法朝向快速面量測及快速深度量測進行發展。Bitte [4]等人提出以 DMD 裝置作為主動光源投射的共焦顯微系統，以 DMD 取代傳統共焦顯微鏡的針孔(Pinhole)裝置，並產生特定結構光圖案進行全域量測。Takeo[8]等人提出利用尼普科夫盤(Nipkow Disk)進行光源分束；當轉盤旋轉時，其系統透過微孔陣列之螺旋空間掃描配置，以提升量測之橫向掃描的速度。Ishihara[5]則採用微透鏡陣列方式，將單一光源分成多光源，來達成全域三維形貌量測。Ruprecht[2]等人提出彩色共焦快速形貌量測技術，利用白光軸向色散，將不同波長之光源聚焦在不同深度上，以達成快速深度量測。Raighne[3]等人提出利用可變焦之微透鏡(Variable-Focal-Length microlenses)，以改變電壓之方式，達成控制微透鏡之聚焦變化，以獲得快速之深度掃描目標。Seng[9]等人提出多影像路徑之光學架構，使不同 CCD 對應待測物不同之聚焦位置，並判斷不同路徑所擷取到影像特徵之聚焦程度，以達成快速深度量測。上述各法對於全域面量測，其掃描速度已獲相當之提升，但一般而言，在各式方法之深度掃描雖然快速，卻相當受限於一個較小的範圍，如此便喪失共焦量測在高深度掃描之優勢，一般若需較大深度範圍之量測，仍需要仰賴機械式之深度掃描才能夠達成。

本研究使用聚焦形貌量測原理(Shape from focus,SFF)，來達到全域式的快速面量測，在深度量測方面，捨棄其他複雜且深度範圍狹小之方法，直接使用一般機械式傳動機構，配合飛行量測法

(Measurement on fly, MOF)，使量測系統的架構簡單化，同時達到具高速且大深度量測範圍之三維表面輪廓量測能力，期能在兼顧品質與產能的前提下，將共焦三維表面輪廓量測技術應用於線上檢測。

## 貳、研究方法

### 一、以飛行量測為基礎之聚焦形貌量測原理

聚焦形貌量測方法為移動未知的待測物，獲得一系列的待測物影像，並對一系列的待測物影像進行聚焦分析[7]。圖 1 為一基本成像之示意圖，物點 P 經過透鏡後，在影像平面的 Q 點成像，其中  $o$  為物距， $i$  為像距， $f$  為焦距，三者的關係可表示為：

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

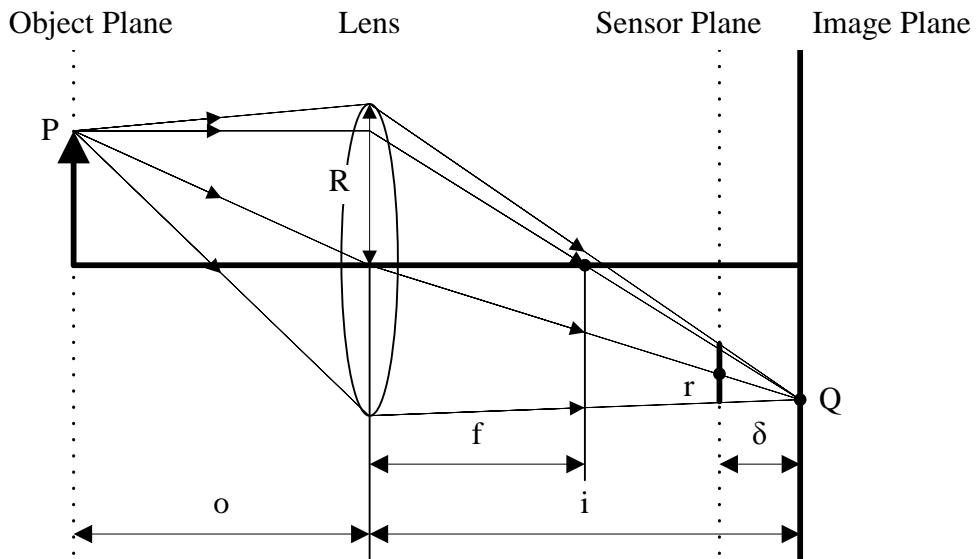


圖 1：基本成像之示意圖

理論上，物平面上的一點會和像平面上的點成一對一的對應關係，如式(1)所示，但由於感測平面與像平面並不一致之關係時，當其產生一位移距離  $\delta$ ，便會造成像點在感測面上，以圓點的方式向外擴散，形成光斑之現象。而光斑之圓點半徑  $r$  與位移距離  $\delta$  可以式(2)表示：

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

式中  $R$  為透鏡半徑， $i$  為像距。

式(2)代表著當  $\delta$  偏離聚焦面的距離越大時，光斑之圓點半徑  $r$  也隨之放大，這代表著影像點將更加模糊。因此，失焦影像  $I_d(x, y)$  在感測面上的成像可藉聚焦影像  $I_f(x, y)$  和模糊函數  $h(x, y)$  的褶積來表示如下：

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

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

其中  $\sigma_h$  為擴散參數，與光斑半徑  $r$  成比例關係。

如圖 2 所示，以參考平面作為平台之初始移動位置， $I_d(x, y)$  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，在一連串不同聚焦程度的影像序列中，影像從失焦→聚焦→失焦之過程，如圖 3 所示，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，繼續移動平台，偏離聚焦面後就逐漸失去高頻資訊，因此聚焦深度反應曲線的峰值即為高頻資訊最強處，如圖 4 所示，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後，即可重建待測物之三維表面輪廓。

傳統之聚焦形貌原理，在平台每移動一個間距  $\Delta d$ ，必須停駐取像一張，如此將耗費許多時間，且平台行進間停駐必然引發機械結構較強烈之震動與不穩定性，基於快速檢測之考量，必須將檢測時間縮短並減少震動，本研究採用搭配飛行量測法，其原理為電腦控制步進馬達驅動器送出總行程脈衝，使移動平台向上移動，此時光學尺(Encoder)送出回授之脈衝，當設定的間距  $\Delta d$  脈衝數量到達時，即啟動 CCD 取像，由於快門速度高於移動平台的速度許多，故可瞬間凍結影像，當總行程結束時，同時亦已取得多張影像，如此可使平台移動時間與取像時間重疊，達到快速深度掃描，並經實驗證實，使用此法優於位移平台間隔停駐無延遲取像之重建品質。

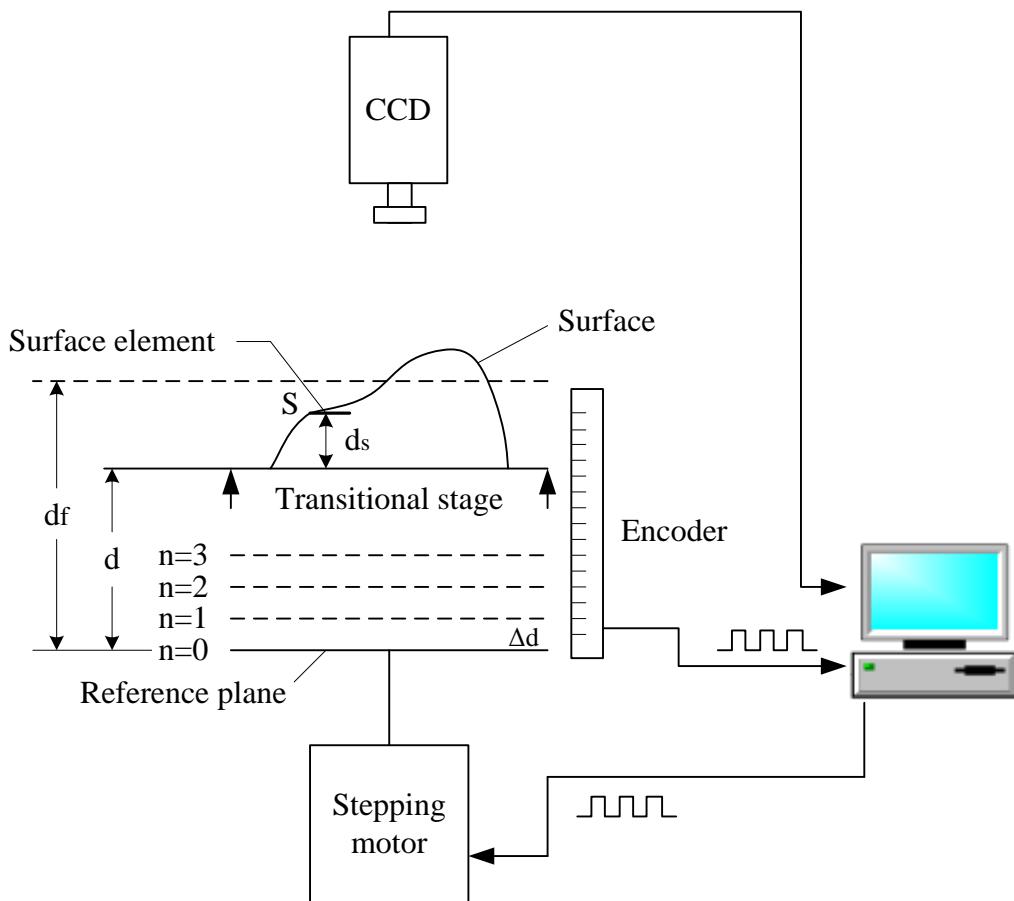


圖 2：聚焦形貌量測原理配合飛行量測法示意圖

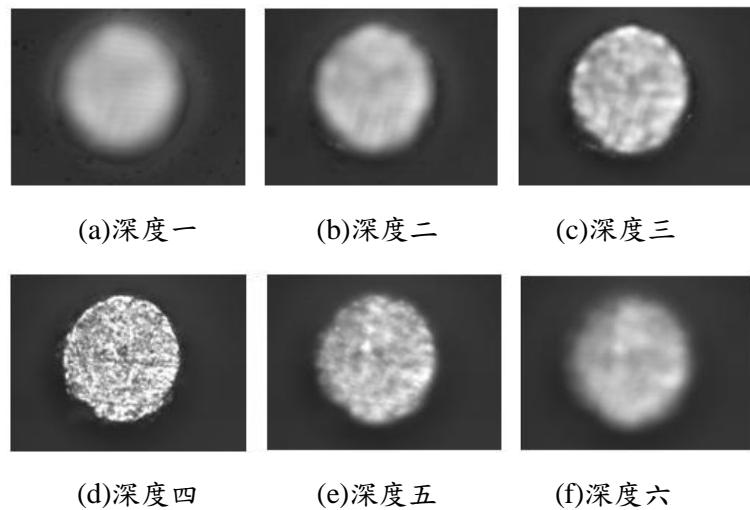


圖 3：影像失焦到聚焦的過程示意圖

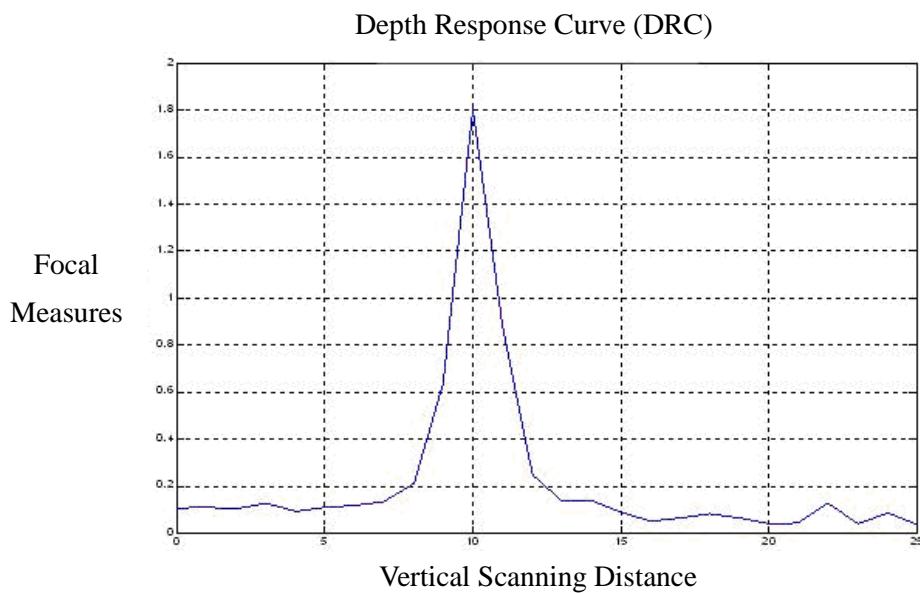


圖 4：聚焦深度之反應曲線

## 二、飛行量測之同步控制原理

本文使用之飛行同步量測技術，如圖 5 所示，由於傳動機構行進中且間距極為短暫，故光學尺回授訊號經計數器之計數而到達預設數量時，必須同步傳送觸發訊號到影像卡，影像卡會立即送出 Reset 訊號到 CCD，將快門開啟而達到瞬間影像之凍結，此時快門速度影響著影像品質，經實驗證實快門時間越短，可得到越佳之三維重建效果。

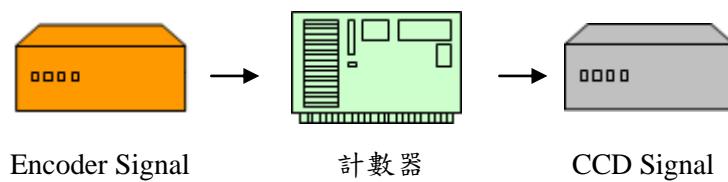


圖 5：飛行同步技術之方法

圖 6 為飛行同步量測時序圖，由光學尺(Encoder)送出回授之脈衝，其脈衝為相位差 90 度之 AB 相訊號，以避免微小震動所引發之溢數，傳送至計數器中，經由內部之除頻後傳送訊號至影像擷取卡，此時 CCD 設定為外部觸發模式(External Trigger Mode)，接收訊號後啟動快門進行曝光與取像傳輸。

飛行同步量測總花費時間為  $T_t$ ，即為機械傳動機構行進總行程之花費時間，但行進速度受到取像傳輸時間  $T_e$  所限制，因其受到影像卡、CDD、電腦等級、程式等各元件性能良莠之直接影響，研究發現最有效方法為進行程式之控制，透過電腦直接擷取單張影像所需花費時間即為  $T_e$ ，此值必須小於機械傳動機構取像間隔所需花費時間  $T_s$ ，並預留訊號傳遞所造成之延遲，同時儘可能縮短快門時間。

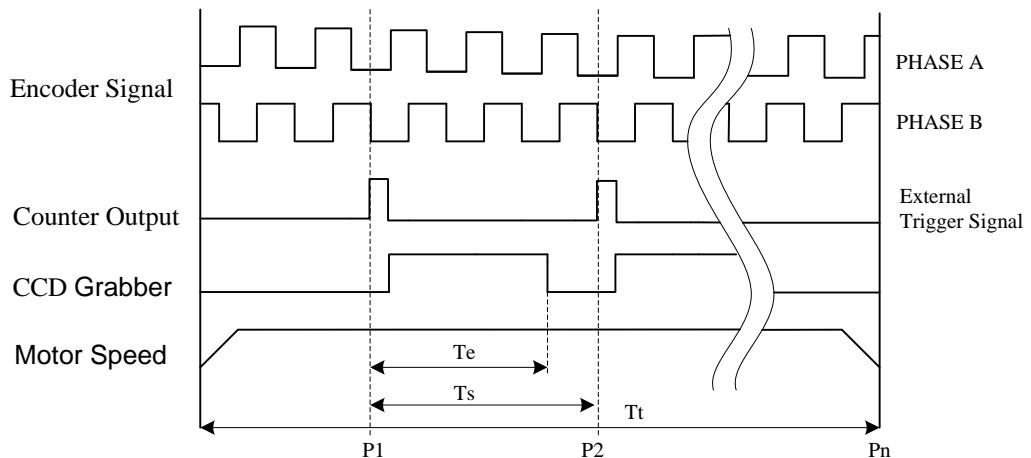


圖 6：飛行同步控制時序圖

### 三、棋盤式結構光

對一影像而言，物體邊緣或灰階度變動較劇烈的部分為高頻，平滑部分為低頻，亦即在影像焦點區域中其灰階強度變化是一個相對高頻（對模糊區域），故當待測物在焦平面上能擷取到灰階強度之變化，但若待測物結構過於平滑，導致無灰階強度變化，則無法判別待測物是在焦平面上；因此加入結構性光源，如圖 7 所示，把灰階變化之結構光圖案投射至待測物表面上，以外加高頻訊號之方式進行量測，如此就能獲得較佳之重建結果。

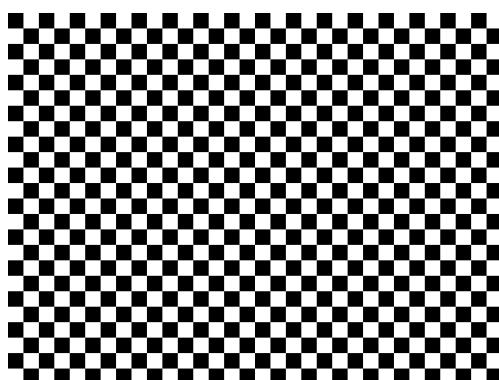


圖 7：棋盤式結構光之示意圖

#### 四、量測系統之設計與量測程序

本實驗之量測系統使用數位微鏡組(DMD)為基底之數位投影機(DLP)，投影數位結構光作為量測的主動光源，以取代一般所使用之量測光源，以全域式量測的方式提高效率。本研究所投射之圖形利用所設計之光學鏡組，將數位結構光進行縮影、空間濾波、減光並準直投射到立體顯微鏡的同軸光路中；同時，並利用不同放大倍率之物鏡，以改變數位結構光投影範圍，以調整適應配合各種被測物體尺寸，提供最佳之投影解析。量測系統所架構的示意圖，如圖 8 所示，由 DLP 投影機將數位結構光圖形投影入射至立體顯微鏡中，透過一組光學鏡組架設，並以不同放大倍率之物鏡，使量測系統具備可量測不同尺寸被測物體之應用彈性，本研究以自行發展之光學投影系統，以 DLP 產生數位結構光，投影至微尺寸被測物體上並進行三維表面量測，其架構的實體圖如圖 9 所示。

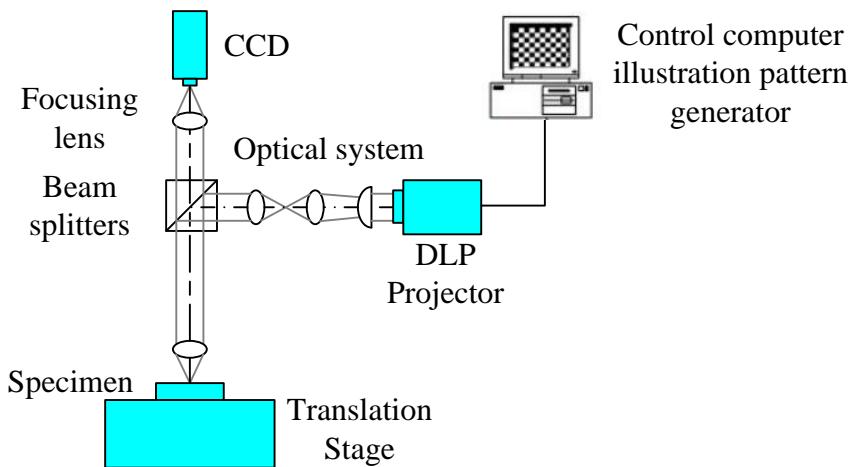


圖 8：系統架構示意圖



圖 9：系統架構實體圖

圖 10 為量測系統之整體流程圖，首先是量測系統的軟硬體配置與系統校正，在完成系統的架設後，考慮不同待測物其表面反射率差異，須對其投以適當的主動光強，以得最佳化之聚焦量測，接著針對表面平滑之微尺寸被測物體，由電腦產生並運用 DMD 投射數位結構光，經過光學鏡組系統，將結構光縮小至立體顯微鏡的同軸光路，進入立體顯微鏡中，並利用不同倍率的物鏡改變投影的視寬

(FOV)，以適應不同尺寸之被測物體，並投影至待測物上。接著以聚焦函數對影像序列進行評估，計算影像的高頻資料，高頻資訊最充足處，也就是聚焦深度反應曲線的峰值，即為待測物高度值，之後再以面量測的方式，對影像之所有像素位置點進行深度分析，即可重建出待測物的三維輪廓，完成微尺寸被測物體的三維形貌量測。

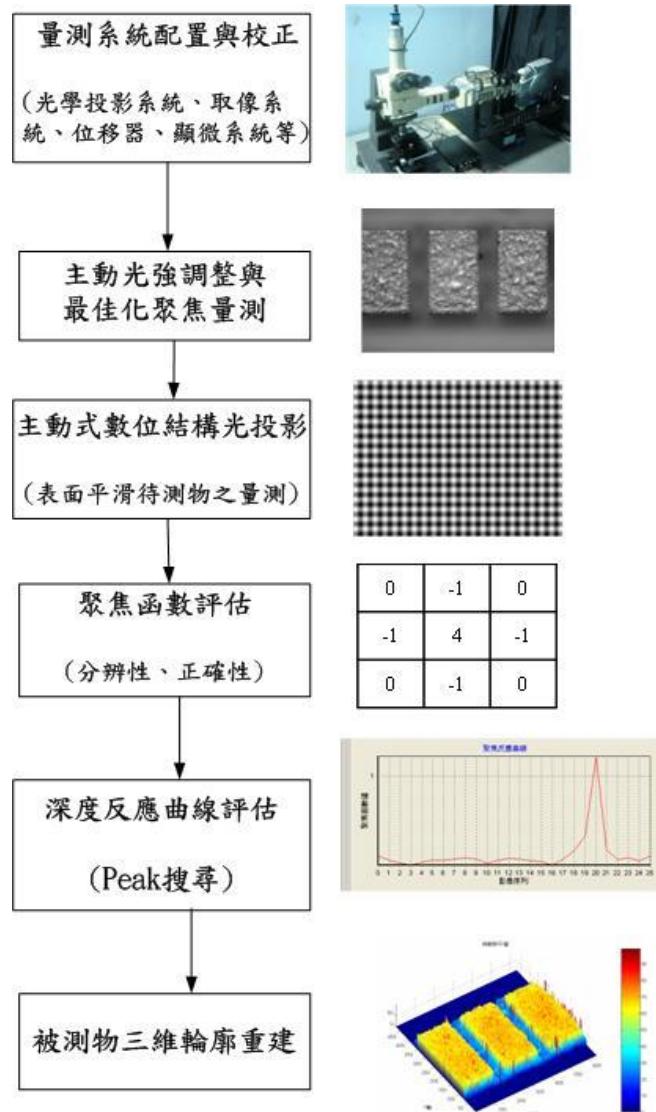
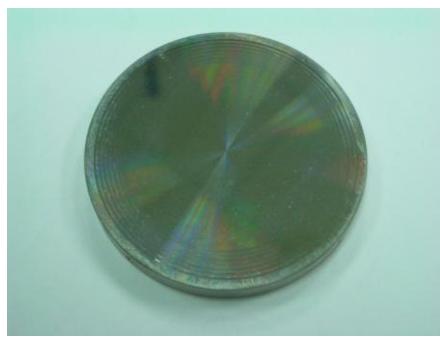


圖 10：量測系統流程圖

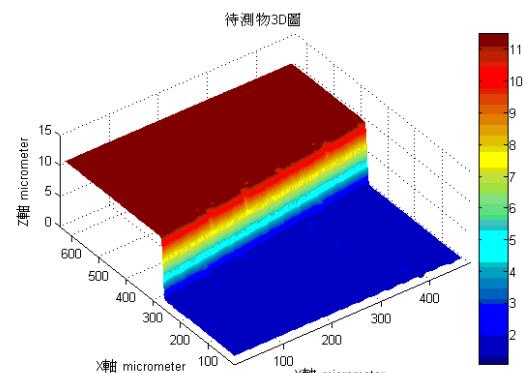
## 參、研究成果與討論

### 一、階高塊規量測結果(塊規階高 $10.10\mu\text{m}$ , 信賴區間 95%, 不確定度 $35\text{nm}$ )

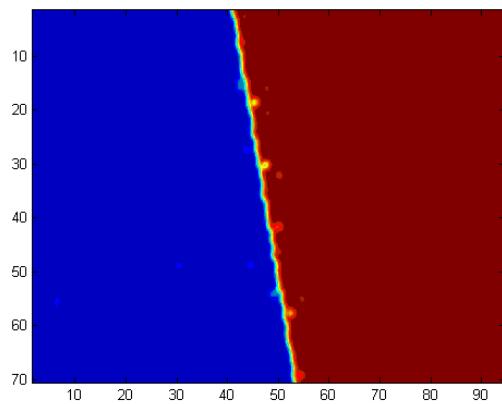
本研究以階高塊規進行量測系統的校驗工作，系統使用之 CCD 解析度為  $640(\text{H}) \times 480(\text{V})$  像素，快門速度為  $250\mu\text{s}$ ，取像與傳輸速度  $60\text{fps}$ ，掃描條件為物鏡倍率  $\times 20$ ，垂直掃描間距  $0.3\mu\text{m}$ ，垂直掃描之總行程  $30\mu\text{m}$  取 100 張影像，飛行同步量測花費時間 5s。利用本量測實例進行量測精確度之分析，得到塊規階高之全域量測誤差百分比在 5% 範圍以內，其結果如圖 11 所示。



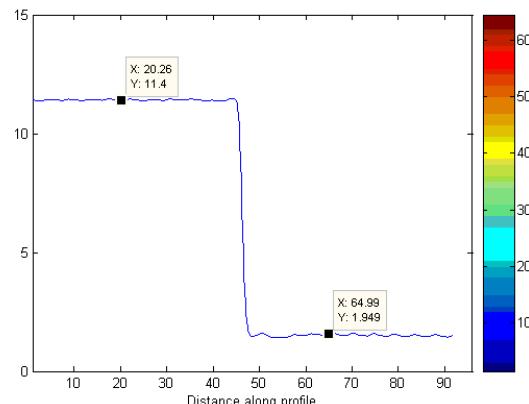
(a)階高塊規實體圖



(b)3D 影像資料



(c)3D 上視圖

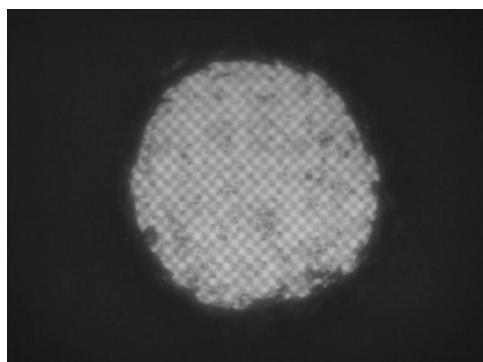


(d)剖面圖

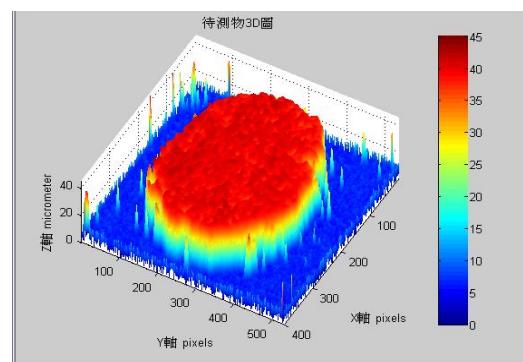
圖 11：塊規階高量測結果(a)階高塊規實體圖(b)3D 影像資料(c)3D 上視圖(d)剖面圖

## 二、Micro Bump (Flip Chip)量測結果

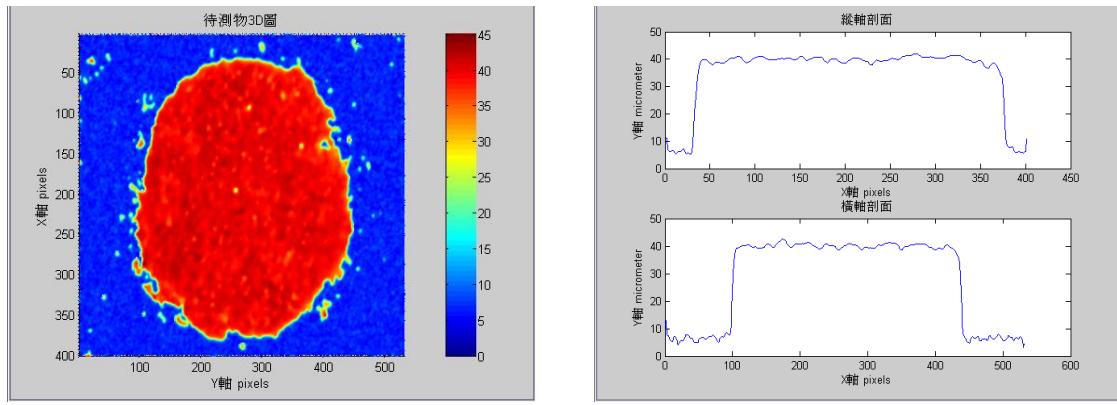
對 Micro Bump 進行深度掃瞄來獲得重建三維形貌的點資料，系統使用之 CCD 解析度為 640(H)\*480(V)像素，快門速度為  $250\mu\text{s}$ ，取像與傳輸速度 60fps，掃描條件為物鏡倍率 x20，垂直掃描間距  $1\mu\text{m}$ ，垂直掃描之總行程  $50\mu\text{m}$  取 50 張影像，飛行同步量測花費時間 4s，其平均高度為  $34\mu\text{m}$ ，其結果如圖 12 所示。



(a) Micro Bump 表面影像



(b)3D 影像資料



(c)3D 上視圖

(d)剖面圖

圖 12：Micro Bump 量測結果(a) Micro Bump 實體圖(b)3D 濾波後影像資料(c)3D 上視圖(d)剖面圖

### 三、飛行同步量測方法之限制、分析與討論

本研究之階高塊規量測雖然費時 5 秒，由前述之飛行同步控制時序圖可得知，飛行時間主要由機械結構速度所決定，一般之機械結構行進  $30\mu\text{m}$  可輕易達到 100ms 以下，而實際量測結果卻非如此快速，主要由於此方法有以下之限制，若能夠符合下述之限制將可大幅提升檢測速度。

- (一) 由於 DLP 之 DMD 控制採用脈衝寬度調變(PWM)緣故，若快門速度高於  $250\mu\text{s}$ ，便會拍攝到 DMD 明亮之現象，影響量測結果，此時必須屏除使用 DMD 之方法，改用傳統光柵式投射方式。
- (二) CCD 快門速度越快可得越佳效果，但此時光源強度及 CCD 訊噪比(SNR)便顯重要。
- (三) 飛行速度快時，電腦等級及 CCD 之擷取速度必須相對提升，而高速攝影機價格較昂貴，若可選定重點檢測區域，便可使用 CCD 之特定檢測區(ROI/AOI)功能，提升速度並降低成本。
- (四) 影像必須在到達下次取像位置前傳送完畢，避免影像擷取不及，使得三維重建時造成誤判。

### 肆、結論與建議

本研究使用 DMD 數位結構光投射，可視待測物表面情況，輕易更改投射之期盤式結構光週期，達成全域式之快速面量測，倘若 CCD 快門速度高於  $250\mu\text{s}$ ，便需要使用傳統光柵投射，但此方法須製作投影光柵，在主動式光源使用上較無彈性。垂直掃描使用飛行同步量測法加快檢測速度，若符合前述之限制條件，便可大幅提升檢測速度，並經實驗證實，使用此法將優於位移平台間隔停駐無延遲之重建品質，歸咎其原因，乃因機械結構行進間暫停反而會引起較強烈震動，影響三維重建品質。本研發系統之量測精度與性能，量測之空間解析可達  $1\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，最大量測誤差為可控制在全高量測範圍之 5% 以下，檢測時間可依 CCD 之取像速度大幅提升，可實際應用於線上微三維表面形貌量測之需求上。

## 伍、參考文獻

- [1] 高偉傑(2005)：微數位投影之三維輪廓量測系統與技術，國立臺北科技大學自動化科技研究所碩士論文。
- [2] Ruprecht,A.K.,Korner,K.,Wiesendanger,T.F.,Tiziani,H.J. & Osten,W.(2004),Chromatic confocal detection for high Speed micro topography measurements. Proceedings of SPIE. Vol. 5302
- [3] Raighne,A.M.,Wang,J.,Cabe,E.M. & Scharf,T.(2005),Variable focus microlenses: Issues for confocal imaging Proceedings of SPIE.Vol. 5827, pp. 12-22.
- [4] Bitte,F.,Dussler,G. & Pfeifer,T.(2001), 3D micro-inspection goes DMD.Optics and Lasers in Engineering. Vol. 36, pp. 155–167.
- [5] Ishihara,M. & Sasaki,H.(1991),High speed surface measurement using a nonscanning multiple-beam confocal microscope. Optical Engineering. Vol. 38,pp. 1035-1040.
- [6] Noguchi,M. & Nayar,S.K.(1994),Microscopic shape from focus using active illumination. Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Image Processing . pp. 147-152.
- [7] Nayar,S.K. & Nakagawa,Y.(1990),Shape from focus: an effective approach for rough surfaces.Proc. IEEE Int. Conf. on robotics and automation. pp. 218-225.
- [8] Takeo,T.(2002),High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks. Optical Society of America.Vol. 41, No. 22.
- [9] Seng ,T.P.(1999),Hybrid Confocal Microscopy. U.S. Patent.No.5,880,844.