

以數位莫瑞投影傅立葉頻譜演算法重建三維輪廓量測術之發展

陳亮嘉

何宣緯

卓嘉弘

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

t5618029@ntut.edu.tw

s4618011@ntut.edu.tw

摘要

本研究主要設計以數位投影條紋技術和傅立葉頻譜量測原理，發展數位投影三維輪廓掃描量測系統。而本系統使用傅立葉頻譜之演算法，三維形貌重建僅需要擷取單張影像，可快速重建量測物體輪廓相位，以重建動態中之三維形貌資訊。主要研究方法將所擷取的影像轉至頻譜域進行運算，鑑於求取最佳中通濾波範圍之困難，本研究發展一種創新式之中通濾波器與其最佳化方式，以實驗驗證其三維形貌重建上形狀與尺寸量測之精確度。經實驗結果證實，三維量測速度可有效提升到每秒 60 張，而量測誤差範圍控制在全高量測深度 5% 以內。

關鍵字： 傅立葉輪廓術、三維形貌量測技術、數位莫瑞投影、自動光學檢測(AOI)

壹、前言

隨著微機電技術的成熟，產品品質之提升，業界對於微機電元件檢測之需求不斷提高，除了高量測精度外，掃描速度之提升也成為自動光學檢測(AOI)儀器產業研發之主流。過去量測技術主要著重在於靜態量測性能之提升，但是目前重要之線上量測問題之挑戰，易受環境擾動的影響而產生量測誤差，舉凡各種製程與檢測設備，如半導體製程設備、三次元量測儀、平面顯示器等，都有可能因環境的震動而大幅降低量測的精度與成像的解析度，因此具有即時量測能力之技術，顯然成為 AOI 之重要發展趨勢。

本研究藉由整合數位微鏡晶片(Digital Micromirror Device, DMD)，其具有高亮度、高對比度及高解析度的特性，提供物體三維量測技術之光源，由電腦控制條紋輸出，能靈活控制投影大小與變化條紋，精確的將投影條紋投影在物體表面，快速的進行三維輪廓量測。

而數位投光三維量測技術主要可細分為編碼結構光、相移法與傅立葉轉換輪廓術三種。在編碼結構光中，Huang 等人利用一連串不連續的數字來設計結構光[1]，並在解碼時引用矩陣觀念可以使量測時間縮短，但此方法水平解析有其極限；因此，Hall-Holt 提出使用於邊界之編碼[2]，進行三維量測，但由於其使用多張取像，因此量測速度較為緩慢，其量測應用亦受到相當之限制。

相移法為三維輪廓量測技術發展重點之一，Srinivasan 在 1984 年利用正弦函數光柵投影至待測物表面，再搭配相移的技術以求取得待測物表面三維形貌，使得量測精度再獲進一步提高[3]。另外，為了解決因階高變化太大可能超過一個條紋扭曲週期，進而影響其還原後三維形貌之精確性；因此，Li 提出利用不同週期的投影條紋，以分辨表面斷層所造成的條紋位移問題，運用大週期可以偵測到小週期條紋位移一個週期以上的變化，利用不同週期的優勢可以分辨出大斷面的深度變化，其週期大小之設計可因應不同待測物進行適應性變化[4]。

相對於上述各方法，傅立葉轉換輪廓術(Fourier transform profilometry, FTP)為三維動態形貌量測之核心技術發展之一，1981年由Takeda首先以傅立葉轉換進行三維輪廓量測技術[5]，而於2007年，由Su等人提出運用傅立葉轉換原理，以量測喇叭薄膜之振動模態[6]，並提出一種創新式的相位封裝原理，可使量測速度大為提升。

綜觀所有文獻，可知FTP為三維動態形貌量測之核心技術發展之一，但目前所有方法並未清楚描述關鍵之中通濾波的設計方法及策略。因此本文主要設計以數位莫瑞投影條紋技術和傅立葉頻譜量測原理，發展數位投影三維輪廓掃描量測系統，其研究重點在於如何設計最佳之中通濾波器與其最佳化，並以此濾波器正確的重建物體之三維輪廓，並進行實驗之驗證與參數之最佳化。

貳、研究方法

一、傅立葉轉換之原理

以數位莫瑞方法為基礎之傅立葉頻譜輪廓術，乃藉數位投影機之 DMD 元件投出之數位莫瑞條紋到物體上，因物體高度差所造成扭曲之條紋，經過 CCD 擷取後經電腦進行快速傅立葉轉換，擷取之影像經過空間域與頻率域訊息處理後，轉換得到物體之原始高度變化訊息。

一般而言，條紋結構光投影至待測表面上，經由 CCD 所得之影像，可以描述為下式[5]：

$$g(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\cos [2\pi f_0x + \phi(x,y)] \quad (1)$$

其中， (x,y) 為影像座標， x 與 y 分別為影像座標之列數與行數；

$a(x,y)$ 為影像背景平均強度；

$b(x,y)$ 為條紋對比強度；

$\phi(x,y)$ 為待測物體之相位差；

f_0 為結構光條紋之空間頻率；

$$\text{由三角函數 } \cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b \quad (2)$$

可將(1)式改寫為：

$$g(x,y)=a(x,y)+b(x,y)[\cos 2\pi f_0x \cos \phi(x,y) - \sin 2\pi f_0x \sin \phi(x,y)] \quad (3)$$

吾人可將(3)式進一步分解便得到下式：

$$g(x,y)=a(x,y)+ (1/2)b(x,y)[\cos 2\pi f_0x + i \sin 2\pi f_0x][\cos \phi(x,y) + i \sin \phi(x,y)] + (1/2)b(x,y)[\cos 2\pi f_0x - i \sin 2\pi f_0x][\cos \phi(x,y) - i \sin \phi(x,y)] \quad (4)$$

上式中可進一步假設

$$c(x,y)=(1/2)b(x,y)\exp[i\phi(x,y)] \quad (5)$$

經由(4)式及(5)式進一步化解可得：

$$g(x,y)=a(x,y)+c(x,y)\exp(i\phi(x,y))+c^*(x,y)\exp(-i\phi(x,y)) \quad (6)$$

經由傅立葉轉換，可得下式：

$$G(x,y)=A(f,y)+C(f-f_0,y)+C^*(f+f_0,y) \quad (7)$$

經由上述轉換後得到頻譜上 $C(f-f_0,y)$ 和 $C^*(f+f_0,y)$ ，而此一資訊正是投影條紋經過待測物所發生扭曲之頻率資訊，此一部分頻率之擷取是非常重要的，因它關係到還原出來物體之三維形貌是否正確。此一方法可稱為中通濾波(bandpass filter)，圖 1 灰色部分，即為中通濾波所擷取之 $C^*(f+f_0,y)$ 。

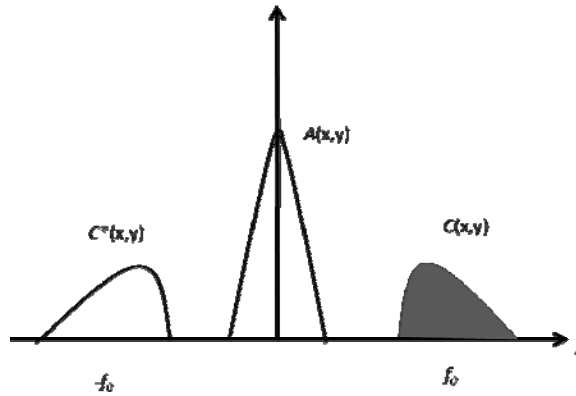


圖 1：中通濾波所擷取部分

由上述所得之濾波方法，可以得到頻譜上條紋 $C(f-f_0,y)$ 和 $C^*(f+f_0,y)$ 之資訊，此時使用反傅立葉轉換，為了將此一資訊轉成相位資訊，可由下式表示：

$$c(x,y)=(1/2)b(x,y)\exp[i\phi(x,y)]=(1/2)b(x,y)[\cos\phi(x,y)+i\sin\phi(x,y)] \quad (8)$$

因此其相位角 θ ，可表示如下：

$$\Theta=\tan^{-1}\frac{\text{Im}\phi}{\text{Re}\phi} \quad (9)$$

$$\text{其中 Re}=(1/2)b(x,y)\cos(\phi(x,y)), \text{Im}=(1/2)b(x,y)\sin\phi((x,y))$$

上述相角資訊在獲得後，可再經由相位還原之方法，即可得到連續之相位分布，轉換成高度資訊，便可重建其三維形貌。

二、 中通濾波選取技術

中通濾波一般皆使用權重式之遮罩，如漢寧遮罩(Hanning Window)或高斯遮罩(Gauss Window)方式等[7]，但一般真實頻譜之分佈未必呈此兩遮罩規律之形式分佈，因此，往往導致此類方式無法獲得最佳之相位資訊擷取。如圖 2 所示，以左邊而言，因半徑符合縱向方向之長度，使得擷取過多之資訊；以右邊而言，因半徑符合橫向方向之長度，使得資訊擷取不足。

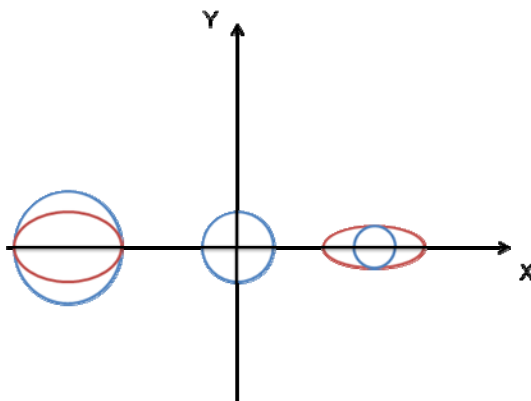


圖 2：中通濾波擷取示意圖(紅色區域為物體實際頻譜範圍，藍色區域為中通濾波截取範圍)

故本方法採用下列方法以改善上述之問題，我們利用物體本身頻譜之三維形狀來設定兩閾值 f_r 及 $h(f_p)$ ，以決定其中通濾波之範圍。其設計流程如圖 3。

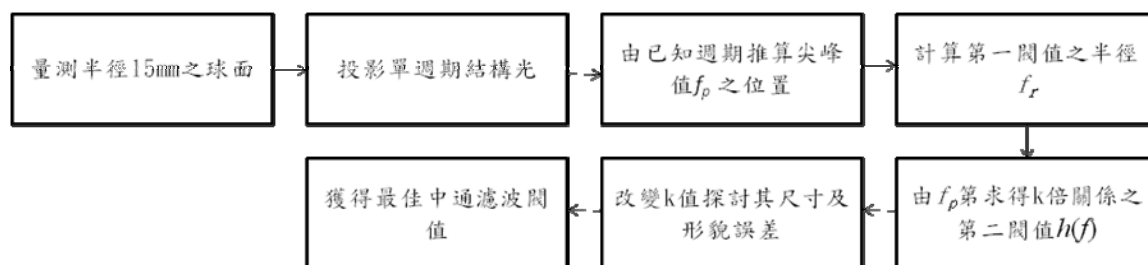


圖 3：濾波器設計之流程圖

本研究設計第一閾值之方法如下：首先由已知之投光週期計算出尖峰值之位置，並搜索其局部最大值，進一步找出頻率之真實尖峰值 $f(x, y)$ ，並由所知之尖峰值設定其範圍半徑 f_r ，圓心為真實尖峰值所在位置 f_p ，如圖 4 所示， L 為通過第一頻率尖峰值 f_o 及第二頻率尖峰值 f_p 之連線， f_q 為 L 與第一頻率之交點。

第一閾值之條件如下：

$$f_r \ni Q: f_r \leq \overline{f_x f_q} \quad (10)$$

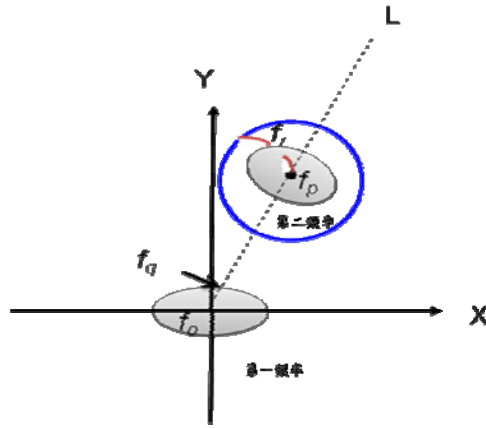


圖 4：濾波器第一閾值設定之示意圖

為了觀察其最佳擷取半徑 f_r ，本研究採用最佳化的方式，由已知尺寸之物體推算出所設定第一閾值 f_r 之最佳值，因此我們利用 CMM 之探針校正球進行量測，其真球度為 30 nm 及半徑為 15 mm，我們以尖峰值 f_p 為圓心，並使用不同之 f_r 值為半徑，分別進行誤差探討，其結果如圖 5 所示，當其平均誤差最小時所使用之閾值 f_r 即為我們所設定第一個閾值。

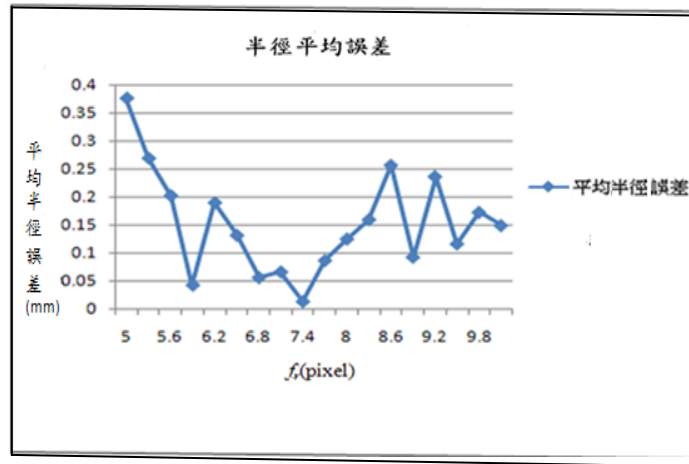


圖 5：平均誤差與 f_r 值之關係圖

接著採用另一閾值 $h(f_p)$ 來決定所需之高度，其條件如下：

$$\begin{cases} h(f_k) = kh(f_p) \\ h(f) = h(f) & \text{for } h(f) > h(f_k) \\ h(f) = 0 & \text{for } h(f) < h(f_k) \end{cases} \quad (11)$$

其中， k 為參數， $h(f)$ 為頻譜之值， $h(f_p)$ 為尖峰值之頻譜值， $h(f_k)$ 為當參數 k 時之頻譜值。其示意圖可見圖 6。

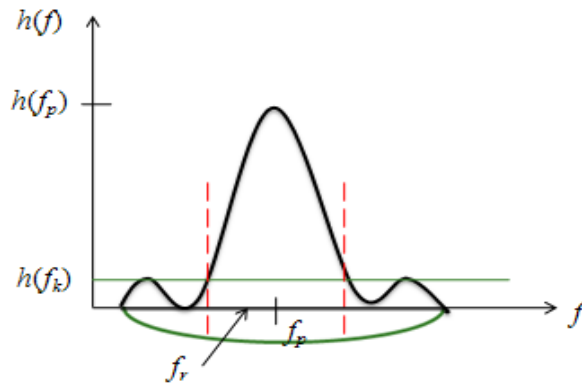


圖 6：濾波器第二閾值設定之示意圖

為了更精確表達上述之意義以圖示來加以說明，如圖 7(a)為頻譜中一尖峰值之資訊，並以灰階值作表示，當其值為 255 時，選取之 k 值為 0.75 時，其可得到 $h(f)$ 為 191.25，其所擷取之範圍如圖 7(b)所示；當選取之 k 值為 0.70 時，其可得到 $h(f)$ 為 178.5，其所擷取之範圍如圖 7(c)所示；當選取之 k 值為 0.55 時，其可得到 $h(f)$ 為 140.25，其所擷取之範圍如圖 7(d)所示，意即隨著 k 值之下降，頻譜之範圍隨之增大，所擷取之資訊亦上升。為了觀察其最佳 k 值，我們同樣利用 CMM 之探針校正球進行量測，其真球度為 30 nm 及半徑為 15 mm，以不同之 k 值分別進行探討，並觀察其真球度與尺寸誤差，實驗結果如圖 8 及圖 9 所示，當 k 值由 0.02 變化至 0.1 時，誤差量可隨之遞減；當 k 值上升至 0.12 時，其量測誤差量亦隨之遞增，此代表其擷取頻譜資訊已遭濾除所需之三維重建資訊，因此，吾人可以利用此最佳化之參數設定方式，設計出其最佳之中通濾波器。

20	50	80	110	80	50	20
60	100	150	160	150	100	60
90	170	190	200	190	170	90
180	200	230	255	230	200	180
90	170	190	200	190	170	90
60	100	150	160	150	100	60
20	50	80	110	80	50	20

(a)

20	50	80	110	80	50	20
60	100	150	160	150	100	60
90	170	190	200	190	170	90
180	200	230	255	230	200	180
90	170	190	200	190	170	90
60	100	150	160	150	100	60
20	50	80	110	80	50	20

(b)

20	50	80	110	80	50	20
60	100	150	160	150	100	60
90	170	190	200	190	170	90
180	200	230	255	230	200	180
90	170	190	200	190	170	90
60	100	150	160	150	100	60
20	50	80	110	80	50	20

(c)

20	50	80	110	80	50	20
60	100	150	160	150	100	60
90	170	190	200	190	170	90
180	200	230	255	230	200	180
90	170	190	200	190	170	90
60	100	150	160	150	100	60
20	50	80	110	80	50	20

(d)

圖 7：中通濾波選取之示意圖

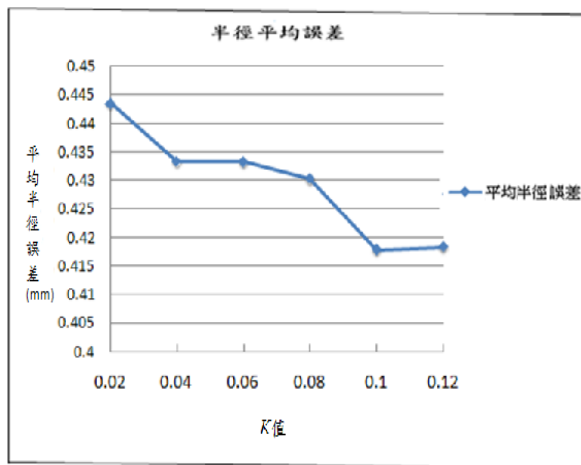


圖 8：平均誤差與 k 值之關係圖

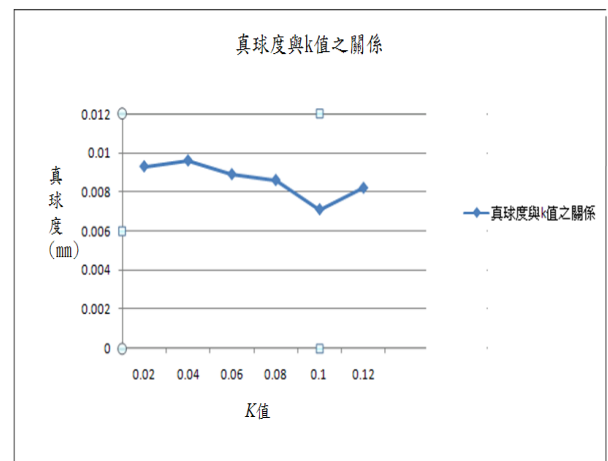


圖 9：真球度與 k 值之關係圖

三、系統架構

本實驗之數位莫瑞投影系統(系統組成)如圖 10 所示，而實際系統可見圖 11，首先由電腦控制其 DLP 產生一單頻正弦結構光，經由平凸透鏡使其擴散光束縮小，再經由兩片雙凸透鏡使其結構光縮小至所需之大小，再經由一減光片，使其光強降低，避免因為光強太強而影響成像品質，最後經由一雙凸透鏡使其結構光準直，而使待測物不受遠近而改變其清晰度；在相機方面，採用高景深之鏡頭，使物體不會因為遠近而影響其清晰度，再由相機擷取影像，並存入電腦中，進行傅立葉演算法之運算。

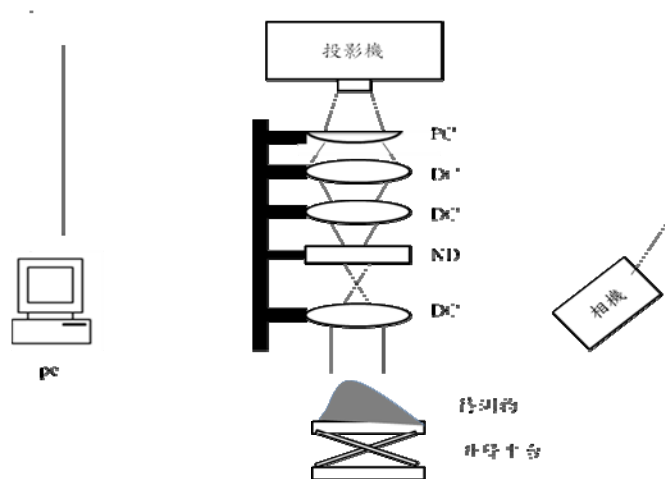


圖 10：數位莫瑞之光學量測系統架構



圖 11：實際數位莫瑞投影系統圖

參、研究成果

一、系統校正

因本量測系統經由光學模擬軟體 Zemax，得知其量測光路並不準直，因此相位及形貌高度之關係並非呈線性之關係，在量測上必須進行精密之校正，故採用標準塊規其階高各為 2mm、3mm、4mm、5mm、6mm、7mm、8mm 及 9mm 等大小，藉由真實高度及實際量測高度之間的關係，獲得一個映對方程式。其結果之一如圖 12 所示。並利用最小平方方法三次擬合的結果，得到其方程式為：

$$H=0.0032764h^3-0.069332h^2+1.3957h+0.5045$$

其中 H 為真實高度

h 為實際量測高度

可由上式得知相位與高度的關係，如圖 13 所示，其真實高度與量測高度之數據可見表 1。其量測值與擬合方程式之誤差與標準差可見表 2。

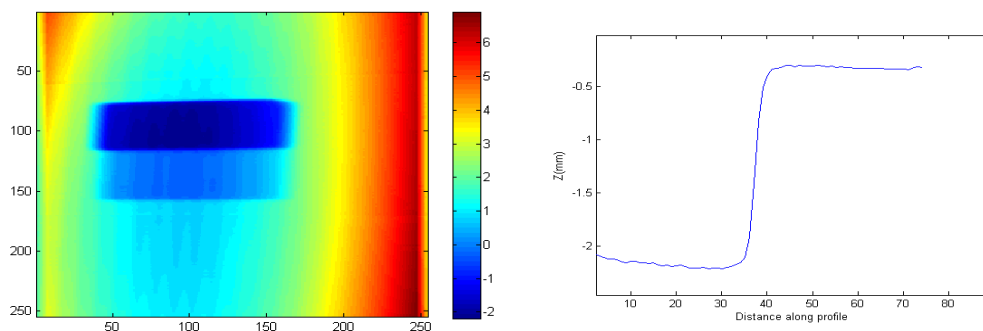


圖 12：2mm 階高量測結果

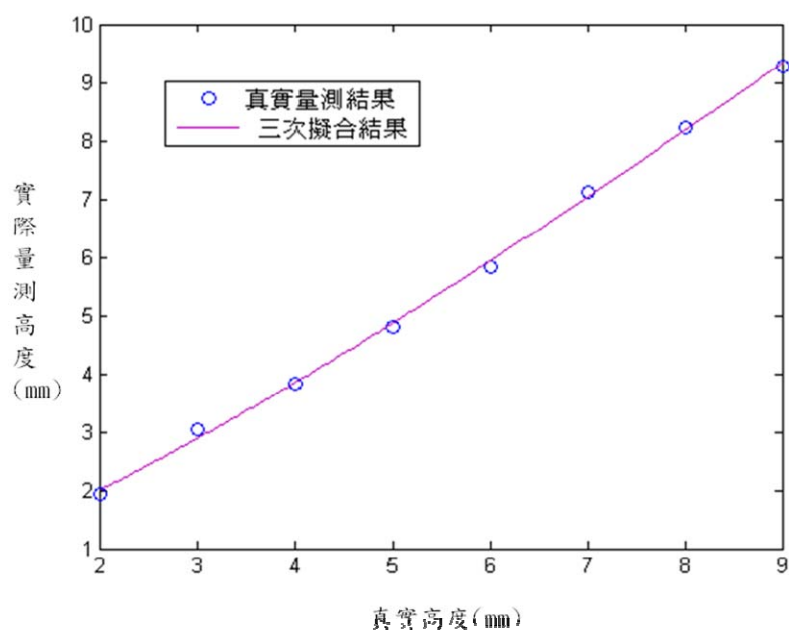


圖 13：真實高度及實際量測高度之關係圖

表 1：真實高度與量測高度之數據

真實高度 (mm)	量測高度(mm)	誤差(%)	真實高度(mm)	量測高度 (mm)	誤差(%)
2	1.924	3.8%	6	5.826	3.0%
3	3.031	1.1%	7	7.124	1.8%
4	3.825	4.3%	8	8.229	2.8%
5	4.798	4.0%	9	9.280	3.1%

表 2：量測值與擬合方程式之誤差與標準差。

真實高度 (mm)	與擬合方程式之誤 差(mm)	真實高度(mm)	與擬合方程式 之誤差(mm)	標準差
2	1.120	6	1.264	0.554(mm)
3	1.125	7	0.880	
4	2.363	8	0.681	
5	1.311	9	0.558	

二、重覆性量測誤差

為了證明所設計之濾波器之正確性，本研究以一階高為 3mm 之標準階高校正塊為待測物，其正弦結構光之條紋週期為 5 mm，利用單週期傅立葉之演算法進行系統之重覆性量測，量測之重覆性結果如圖 14 所示，其量測系統之最大量測誤差為 0.0846mm，平均量測誤差為 0.0835mm。其誤差百分比在百分之 5%以內。

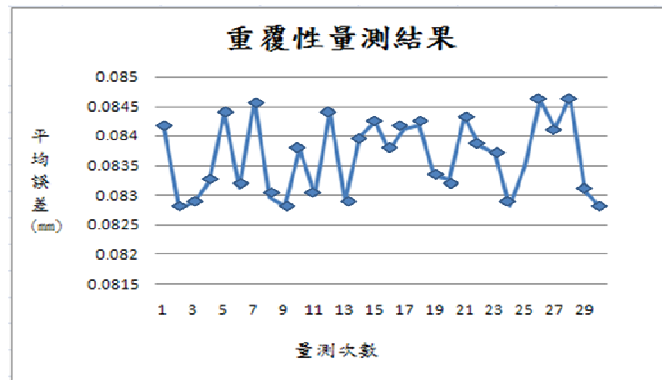


圖 14：重覆性量測結果

三、不同演算法之比較與分析

主要以量測不同標準陶瓷球，其直徑分別為 2.38mm、3mm、4mm 與 5mm，真球度皆為 G25(630 nm)，並以傳統之相移法與本論文之單頻傅立葉分析與比較。在相移方面，正弦結構光之條紋週期為 0.15mm，並擷取其四步相移之影像，單頻傅立葉方面，結構光之條紋為 20 mm，經由中通濾波計算與相位還原可獲得其三維輪廓形貌，如圖 16 所示，對 4 種尺寸各做作 30 次重覆性量測，其各平均尺寸之平均誤差百分比如表 3 所示，平均真球度如表 4 所示。可得知其隨著尺寸之增大，其量測誤差也漸漸遞增，這是由於視場已無法拍攝到整顆標準球，僅有部份資料取得，使得量測誤差隨之提升。

將以上兩種方法作一簡單的整理，在量測精度上面，相位移方法雖然優於傅立葉，但因為其必須擷取三張以上的影像，導致環境擾動會影響其量測精度，而傅立葉法因為只擷取單張影像所以優於相移法；而在所發花費之時間方面，因為傅立葉須轉換至頻率域，並作中通濾波處理，因此所花費之時間仍高於相移法。如表 5。

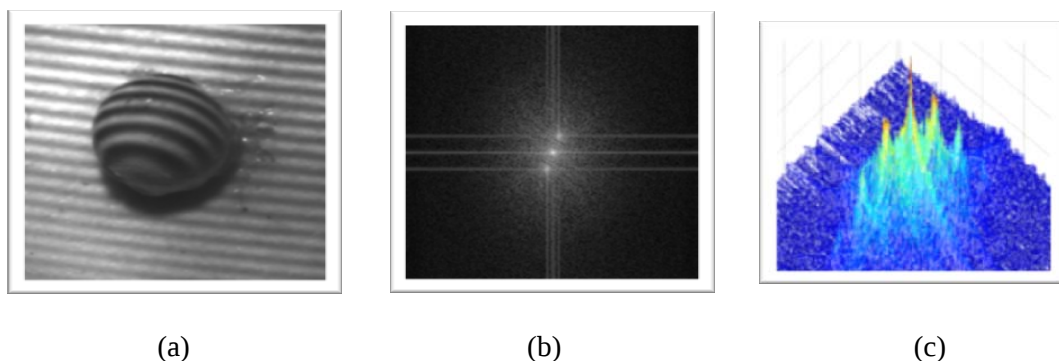


圖 15：擷取半徑 2.38mm 陶瓷球之(a)單張投影條紋影像(b)頻譜之情形(c)頻譜之側視圖

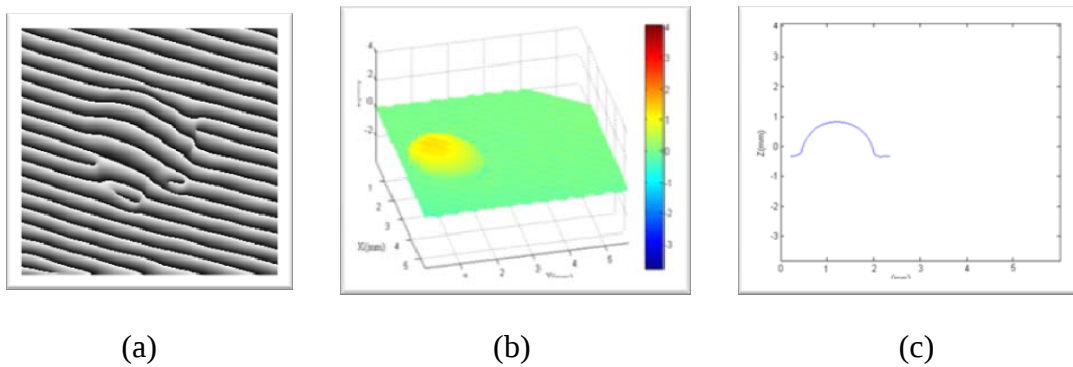


圖 16：量測 2.38mm 陶瓷球之(a)相位封裝圖(b)3d 圖(c)剖線圖

表 3：各演算法量測之半徑誤差百分比

尺寸 演算法	2.38mm	3mm	4mm	5mm
四步相移法	2.588%	2.935%	3.164%	4.171%
單頻傅立葉演算法	4.720%	4.890%	4.952%	4.963%

表 4：各演算法量測之真球度量測結果

尺寸 演算法	2.38mm	3mm	4mm	5mm
四步相移法	20.1(μm)	22.3(μm)	26.5(μm)	33.2(μm)
單頻傅立葉演算法	24.4(μm)	27.0(μm)	29.9(μm)	36.8(μm)

表 5：演算法量測之速度比較

尺寸 演算法	取像之耗時	演算法之耗時
四步相移法	1.11s	1.57s
單頻傅立葉演算法	0.03s	1.97s

肆、結論與建議

本研究採用傅立葉轉換輪廓術之量測技術，主要創新之研究成果為自動中通濾波器之設計及其最佳化方法之建立，針對不同待測物體，由於其投影條紋受形貌變化所發生之扭曲情形亦不同，在頻譜上，尖峰之位置亦將發生變化。本研究藉由量測標準陶瓷球之已知形貌與尺寸，利用實驗最佳化之方式，來評估所設計中通濾波器之正確性，進而獲得最佳化之濾波參數；以所得到之不同頻譜影像，分析其影像頻譜之特徵，以作為來設計其最佳中通濾波之參考依據，以獲得其最佳之濾波效果。目前此濾波器量測出之誤差全高範圍在 5% 以內，未來預期將此研究成果應用在量測動態之物體三維形貌上。

伍、參考文獻

- [1] P. Huang, Q. Hu, & F. Chiang (2000). Method for determining three dimensional surface coordinates. *U.S. Patent*, Patent Number US 6,813,035
- [2] H. Holt & O. Rusinkiewicz (2001). Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects. *The 8th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 359-366
- [3] V. Srinivasan, H. C. Liu, & M. Halioua (1984). „Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects". *Appl. Opt.* 23, 3105
- [4] X. S, J. Li & Z. Li (1997), Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry. *Appl. Opt.* 36, pp. 277-280
- [5] M. Takeda H. Ina, & S. Kobayashi (1981). Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*/Vol. 72, No. 1, pp156~pp160
- [6] Q. Zhang, X. Su, & L. Xiang (2007). Whole-field Vibration Analysis of a Woofer's Cone using a High-speed Camera. *Proc. of SPIE Vol. 6279 62790O-1*
- [7] 孟亮(2006)：傅立葉轉換位相測量技術的研究，碩士論文，南昌大學機械電子工程學院，江西。