



國立中山大學材料科學研究所

碩士論文

條紋投影輪廓儀之三維形貌影像融合分析

Data fusion of 3D profiles measured by projected fringe
profilometry

研究生：徐一麟 撰

指導教授：蘇威宏 博士

中華民國九十四年六月

摘要

本論文提出一種新穎的三維形貌條紋投影輪廓儀之影像融合技術。由於投影至待測物表面的條紋，在不同的量測位置下，都有相同的相位值(φ)。因此，影像配準(Image Registration)之過程，可由比對相位值的方式來達成，進一步找到各局部形貌間的關聯性，而達到融合成一完整三維形貌的目的。即使在具有幾何失真或光源的改變下，仍然可以簡單地達成畫素與畫素之辨別，成功地融合影像圖形。此三維形貌融合技術較其他方法優越之處在於其具有：

- (1)較高的融合精確值
- (2)更健全的系統
- (3)較低的計算時間成本
- (4)在每個畫素位置間補償光學系統失真的能力
- (5)適用於影像間任意地旋轉、縮放
- (6)適用於任意的條紋投影量測方法

本論文同時提出一種二維光柵設計圖形。其優點為可更輕易地得到影像之相位值(φ)，達到快速而簡單地配準目的。系統僅需沿著X軸與Y軸方向各作一次相位移即可得到整張影像二維之相位值，免除傳統使用一維光柵設計圖形必須手動旋轉90°之不便，並可真正達到量測系統全自動化之目的。

實驗結果顯示，此配準技術的解析度可達影像畫素大小的5.96%。此結果已符合目前產業界大多數的解析度要求(0.5 μ m-1mm)，特別是要要求更高解析度之特寫影像，或待測物體大於量測的景寬大小時，勢必需要應用此影像融合技術。

ABSTRACT

This paper presents a novel integration technique for segmented 3D profiles measured by projected fringe profilometry. Fringe patterns are projected to the inspected surface. The projected patterns fix their positions relative to the tested object during two segmented measurements. Thus, finding two matched surface points becomes a problem of searching for two identical phases in the fused data sets. This novel integration technique can match images successfully and achieve pixel-to-pixel registration easily even in the presence of geometric deformation, illumination changes, and severe occlusions. It is superior to the other methods because of its:

- (1) High matching accuracy;
- (2) Improved robustness;
- (3) Reduced computational time;
- (4) Capability of compensating distortions of the optical system at every pixel location;
- (5) Suitable for images rotating or scaling; and
- (6) Suitable for any other projected fringe measurement method.

We also propose a method to design and fabricate a 2-D fringe pattern which can be applied to the integration technique for segmented 3D profiles. Compared with using 1-D fringe patterns for image registration, using a 2-D fringe pattern saves the measurement time and further proves more tolerance to handle the shadow and noise problems. Tests of the system performance have been carried out that the accuracy of the registration scheme is 5.96% of image pixel size. Therefore, this technique can be extensively used in modern high technology industry. Especially when it requires higher resolution close-up images or overcomes the issue of not every inspected object can be fully expressed just by a single full-field measurement, it is necessary to use this integration technique.

致謝

本論文的完成，需要感謝的人很多。最主要特別感激於碩士班二年生涯裡，對我而言如兄長般和藹的指導教授蘇威宏博士，其細心指導並對待學生視如己出。此外，更要向所上曾百亨老師、杭大任老師以及周明奇老師表達學生感謝之意，感謝其於碩士論文口試及平時多邊Meeting時給予的訓練與寶貴的意見。同時從蘇老師身上學到了很多，不僅是光學原理上的知識及光電實驗技巧，更包括了做事情的基本態度以及帶領學生的哲學。由於蘇老師的充分授權與信任，使我在碩士班期間就有機會訓練到在一般大型實驗室裡可能無法輕易得到的做事經驗。

此外，更要感謝我的爸媽以及家人，沒有他們的支持也就沒有現在的我。還要感謝遠在美國Penn state電機系的余坤章博士於程式設計上地指導與幫忙。當然，一個人的力量始終無法勝過團隊的合作，因此要感謝實驗室的夥伴宏名與哲佑以及學弟弘杰、佳正、煒仁，由於他們的幫忙使我省了不少力氣而更能專注於研究上。



徐一麟 謹誌
中華民國九十四年六月
於 中山大學材料所
光學量測實驗室

目錄

摘要	II
英文摘要	III
致謝	IV
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	IX
第一章 導論	
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	5
1-3 研究動機	7
第二章 相位移條紋投影輪廓儀之量測原理與校正系統	
2-1 相位移條紋投影輪廓儀(PSPFP)簡介	10
2-2 PSPFP之量測原理	11
2-2-1 相位展開與相位展開演算法	16
2-3 PSPFP之校正系統	22
2-3-1 「相位-縱深」的校正	23
2-3-2 「側向」的校正	25
2-3-3 三維形貌物體的量測	28
第三章 相位移條紋投影輪廓儀之三維形貌影像融合	
3-1 圖形配準簡介	29
3-1-1 Rigid transformation	30
3-1-2 Affine transformation	30
3-1-3 Projective transformation	31

3-1-4 Curved transformation	32
3-2 結合點之同相位關係	33
3-3 局部量測系統的裝置原理以及圖形配準技術	36
3-4 以相位為依據的圖形配準座標轉換關係式	42
第四章 實驗裝置與實驗步驟流程	
4-1 實驗裝置	45
4-2 實驗步驟流程	50
4-2-1 程式流程	50
4-2-2 校正系統實驗步驟	51
4-2-3 圖形配準系統實驗步驟	52
4-2-4 影像融合系統實驗步驟	53
第五章 實驗結果	
5-1 三維形貌量測實驗誤之誤差值分析	54
5-2 三維形貌量測實驗結果(1)	65
5-3 三維形貌量測實驗結果(2)	71
5-4 圖形配準與影像融合實驗結果	77
第六章 結論與未來研究工作	
6-1 結論	87
6-2 未來研究工作	88
附錄	89
參考文獻	92

圖目錄

圖2.1 相位移條紋投影輪廓儀量測系統的實驗裝置原理	11
圖2.2 幾何光學上條紋分析的基本原理	14
圖2.3 纏繞相位圖形以及其展開相位圖形	16
圖2.4 小區域的纏繞相位值	18
圖2.5 (a)由CCD影像上看到的圖形，無法分辨其為小丘或低窪 (b)由相位移條紋投影輪廓法(PSPFP)重建之影像即可明顯分辨 其為小丘或低窪	21
圖2.6 「相位-縱深」的校正示意圖	23
圖2.7 畫素位置(500,500)處的相位值與深度關係圖	24
圖2.8 「縱深-側向」的校正示意圖	25
圖2.9 畫素位置(500,500)處的水平方向位置與深度位置關係圖	27
圖2.10 畫素位置(500,500)處的垂直方向位置與深度位置關係圖	27
圖2.11 實際量測待測物體示意圖	28
圖3.1 不同形式座標轉換示意圖	30
圖3.2 Projective transformation示意圖	31
圖3.3 二側圖形互相重疊的區域	36
圖3.4 圖形配準實驗示意圖	37
圖3.5 圖形配準系統搭配PSPFP校正系統裝置圖	38
圖3.6 不同的CCD視野偵測位置所擷取之待測物體不同的表面圖形	39
圖3.7 不同的CCD視野所擷取之待測物體二側表面二維條紋圖形	39
圖3.8 沿著圖3.7橫軸方向作相位移之二維條紋相位圖形	40
圖3.9 沿著圖3.7縱軸方向作相位移之二維條紋相位圖形	41
圖4.1 二維圖案光柵投影	48
圖4.2 二維圖案傅立葉展開頻譜	49
圖4.3 傳統圖形配準用之一維圖案光柵投影	49
圖4.4 實驗流程圖	50
圖5.1 平均50pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像	55
圖5.2 以圖5.1當作待測物體之三維形貌圖形	55
圖5.3 平均27pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像	57

圖5.4 以圖5.3當作待測物體之三維形貌圖形	57
圖5.5 平均22pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像	59
圖5.6 以圖5.5當作待測物體之三維形貌圖形	59
圖5.7 平均20pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像	61
圖5.8 以圖5.7當作待測物體之三維形貌圖形	61
圖5.9 平均15pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像	62
圖5.10 以圖5.9當作待測物體之三維形貌圖形	62
圖5.11 平均10pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像	63
圖5.12 以圖5.11當作待測物體之三維形貌圖形	63
圖5.13 校正影像CCD pixels數與不正常外加輪廓起伏誤差之關係圖	64
圖5.14 三維形貌量測實驗架構示意圖	66
圖5.15 非原始條紋形貌輪廓起伏誤差值	66
圖5.16 CCD在左側位置(S-Bowl-L)的深度圖形	67
圖5.17 CCD在左側位置(S-Bowl-L)的Render surface三維形貌圖形	68
圖5.18 CCD在右側位置(S-Bowl-R)的深度圖形	69
圖5.19 CCD在右側位置(S-Bowl-R)的Render surface三維形貌圖形	70
圖5.20 三維形貌量測實驗架構示意圖	72
圖5.21 非原始條紋形貌輪廓起伏誤差值	72
圖5.22 CCD在左側位置(B-Fan-L)的深度圖形	73
圖5.23 CCD在左側位置(B-Fan-L)的Render surface三維形貌圖形	74
圖5.24 CCD在右側位置(B-Fan-R)的深度圖形	75
圖5.25 CCD在右側位置(B-Fan-R)的Render surface三維形貌圖形	76
圖5.26 圓碗左側(S-bowl-L)與右側(S-Bowl-R)之圖形配準	79
圖5.27 圓碗左側(S-bowl-L)與右側(S-Bowl-R)之融合深度誤差	80
圖5.28 圓碗左側(S-bowl-L)與右側(S-Bowl-R)之影像融合	81
圖5.29 圓碗不同角度的影像融合圖形	82
圖5.30 風扇左側(B-Fan-L)與右側(B-Fan-R)之圖形配準	83
圖5.31 風扇左側(B-Fan-L)與右側(B-Fan-R)之融合深度誤差	84
圖5.32 風扇左側(B-Fan-L)與右側(B-Fan-R)之影像融合	85
圖5.33 風扇不同角度的影像融合圖形	86

表目錄

表1-1 三維形貌量測的用途簡介·····	1
表1-2 三維形貌量測的原理分類·····	2
表1-3 各種量測技術與適用性質簡介·····	4
表4-1 德國PCO. Image公司PixelFly HiRes CCD Camera規格表(右)·····	89
表4-2 美國Mad City Lab's Nano-LR200 PZT規格表·····	89
表4-3 日本SIGMA-KOKI公司Motorized Stages SGSP26-50(X)規格表·····	90
表4-4 日本SIGMA-KOKI公司Motorized Stages SGSP20-20(XY)規格表·····	90
表4-5 美國Computar公司廣角透鏡M1614-MP規格表·····	91
表4-6 日本Fujinon公司CF50HA TV LENS規格表·····	91

第一章 導論

1-1 前言

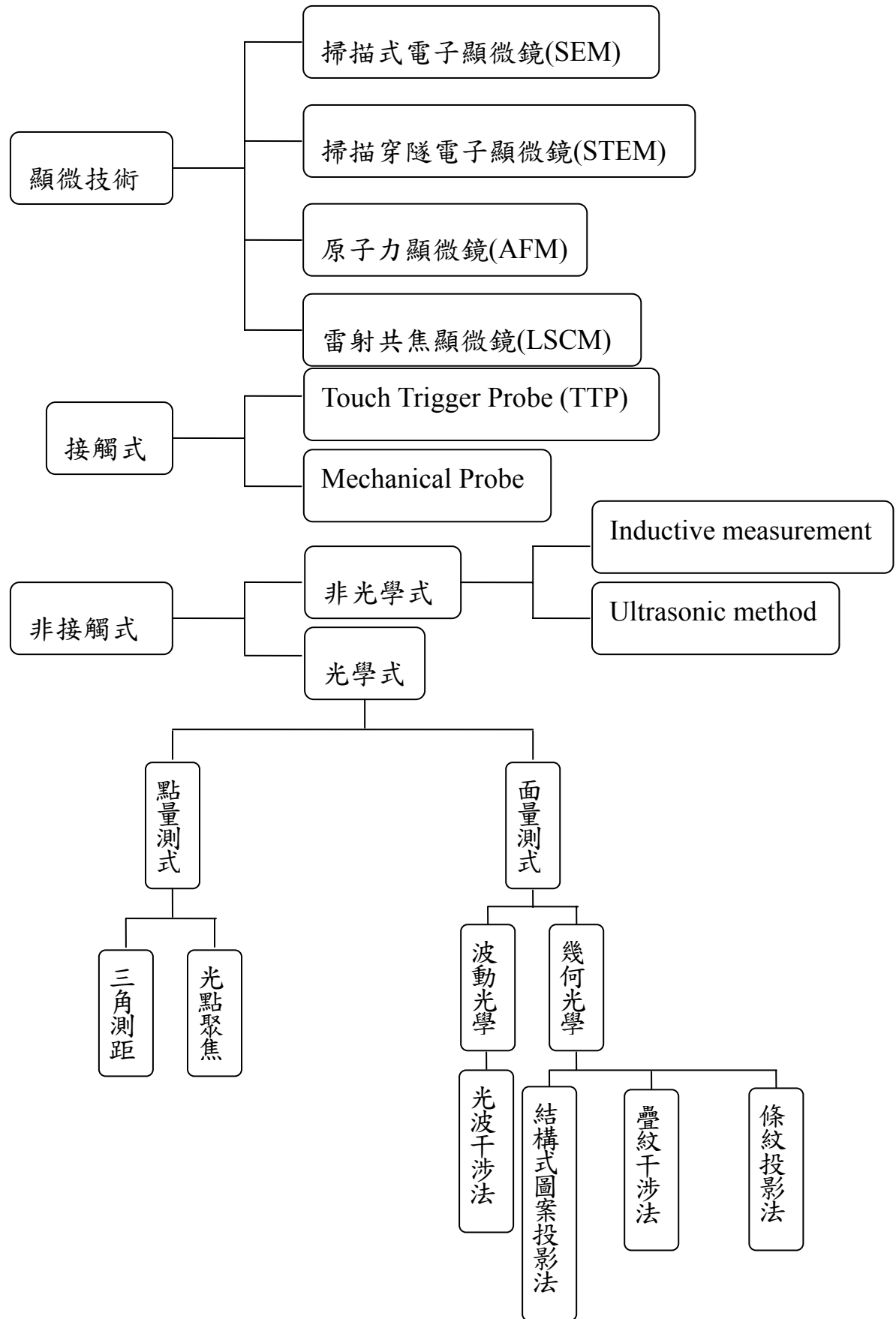
三維形貌量測技術在各個產業上的需求與日俱增，在國防工業如飛彈、魚雷、機翼與螺旋槳等形貌之鑑定，醫學工程如生物細胞，電子產業如PC板面，機械製造如齒輪形狀探測等，皆需要對待測物之三維形貌作精密的檢定。下表1-1是三維形貌量測的用途簡介

三維形貌量測的原理可概分為三大領域：『顯微技術』、『接觸式』以及『非接觸式』。如表1-2所示：

表1-1 三維形貌量測的用途簡介

產業	用途
半導體產業	量測晶圓或封裝元件之表面輪廓以及電路板的盲孔深度
光學產業	鏡面的形狀、表面粗糙度、曲率及刮傷的檢測
光通訊、微機電	量測光纖的形狀、端面、陣列、微機電裝置...等微小物件的缺陷檢測及其特性
醫學工程	檢測生物細胞的外觀輪廓
航太工業	飛彈、魚雷、機翼與螺旋槳等形貌之鑑定與品質檢定

表1-2 三維形貌量測的原理分類



各種量測技術的量測範圍、工作距離、解析度、測量時間與適用性質均不一，請詳見表1-3。

其中，PSPFP具有非接觸式(Non-contact)與非破壞性(Non-destructive)的優點，對待測物體不會造成任何不必要之損壞，此點可用於檢測生物細胞個體或易碎物體的三維形貌，可達到短時間內完成所有採樣點資料的收集，具有高精確度、高形貌樣本密度以及較低的環境干擾因素...等優點，故成為十分醒目的一種量測工具。

然而PSPFP應用於大尺寸待測物體量測時，尚有不足之處：當待測物體的尺寸遠大於量測系統的景寬範圍，或是待測物體的表面由於光源投射的角度所造成之陰影，導致訊息短缺時，勢必無法一次完整量測到物體的三維形貌。因此，將局部形貌的量測圖形融合成完整三維形貌的技術亦相當重要。

本論文提出一套三維形貌融合技術，可以精確地融合待測物各局部形貌而成一完整的外觀。

表1-3 各種量測技術與適用性質簡介

Method	Measurement type	WD	Field of View	Light source	Image Acquiring Time	Data Processing Time	Longitudinal resolution	Transversal resolution	Usage	Advantage
Inductive Measurement	2D Scanning	0~1cm		NA			1um	~3mm	Inductive surfaces	
Pulse-laser profilometry	2D Scanning	0~50feet		Laser			~1mm	~4mm	Most surfaces	Not critical surface quality
Contour Projector	2D Scanning	<1m		Laser			1um	Depends on detector	Smooth surfaces	
X-ray radiation detection	Non Scanning	<1m		X-ray	Within seconds	~1min	~20um	Depends on sensor	Most surfaces	High-speed measurement
Dual Aperture	1D Scanning	0.5~1.1m	50deg	White light, halogen	<1sec(not include scanning time)	~1min	2mm	Sub-mm	Diffusive surfaces	
Optical Spot	Non Scanning	<0.2m	85deg	Laser	0.2~0.5sec		0.002mm		Smooth surfaces	Wide field of view; deep hole measurement
Triangular Measurement	2D Scanning	~1m		Laser		~3000 point/sec	50um	~1mm	Diffusive surfaces	
Stripe triangulation	1D Scanning	~0.5m	10deg	Laser	~1sec	~1line/sec	0.00004" (1 um)	0.0003"	Diffusive surfaces	Wide field of view; but 1D
Stereovision method	Non Scanning	>1m	20~30deg	Halogen	0.5sec	Several min	50um		Most surfaces	Easy operation; high speed measurement
Structured light encoded	Non Scanning	>1m	20~30deg	Halogen	Several sec	Several min	50um	10um	Diffusive surfaces	Wide-field, high speed
Fourier transform based Moiré Method	Non Scanning	0.5m	12.5mm or 100cm square	Halogen or Laser	0.1sec	8sec for 290,000 points	10um for small area; 50um for large area		Diffusive surfaces	Wide field, high speed measurement
PSPFP	Non Scanning	>1m	30deg	Laser	~5sec(With phase-shifting)	Several min	10um		Diffusive surfaces	Wide field, high speed measurement

1-2 文獻回顧

本論文所採用的局部量測技術是PSPFP，其量測原理可追溯至西元1967年，Rowe和Welford利用Projected interference fringes [7-8]的方式來決定物體的形貌。Crane和Burning等人，於西元1967年首度將Phase-shifting techniques運用在光學檢測上[9-10]。於是，利用Phase-shifting techniques擷取投影在物體上條紋的相位，由條紋扭曲的程度來決定物體的縱深等相關研究，亦如雨後春筍般地提出，並於1980年代中期初具規模 [12-13]。此後更隨著2D phase-unwrapping、電腦視覺及數位訊號處理的普遍及發展，使PSPFP檢測技術的研究更趨進步，並且達到系統全自動化的要求[14]。

目前，PSPFP仍有許多急需改進之處。例如：為了擴大量測的範圍，往往需要搭配廣角鏡頭或Non-telecentric lens，此舉將造成透視的失真與鏡頭像差而無法有效的在側向座標上作校正，間接影響了「相位—縱深」關係式的準確度。Dr. Su與美國賓州州立大學ARL (Applied Research Laboratory) 同仁從事PSPFP光學檢測技術的研究已有多年經驗 [15-20]，針對傳統的PSPFP檢測技術加以改良，將光學系統的像差與透視的失真融入於「相位—縱深」關係式，於西元2003年發展出一套Calibration-based PSPFP [19]，精確值可超過景寬大小的萬分之一，並且能在數秒內完成整個全域(Full-field)即時快速的量測工作。

如果量測物體的範圍約 1m^3 ，則其精確值可超過景寬(Field of view)大小的萬分之一(相當於 $10\mu\text{m}$)。而應用在小尺寸範圍(約 1-inch^3)，如齒輪的形貌測量上，其精確值為 $2\mu\text{m}$ 。

為了解決當待測物體的尺寸遠大於量測系統的景寬範圍，或是待測物體的表面由於光源投射角度所造成之陰影...等等問題。Dr. Su於西元2003年發展出一套3D image integration技術[20]，其利用一維光柵圖形將條紋投影至待測物體上，精確地合併待測物體各個局部形貌而整合成完整的三維立體形貌，合併精確值為影像畫素大小的1%。不過使用一維光柵圖案做圖形配準時，無法解決必須手動旋轉光柵 90° 方能達成求得X軸與Y軸方向相位的問題。造成該配準技術，具有容易因為手動調整而造成誤差及實驗耗時...等等缺點。

相較於各種傳統的圖形配準技術traditional correlation and differencing methods[40]，其精確度限制於影像畫素大小的5~20%，Dr. Su於西元2003年提出之依據相位值而配準的3D image integration技術[20]，可達到精確度為影像畫素大小的1%。

1-3 研究動機

當待測物體的尺寸遠大過於量測系統的景寬範圍，或是待測物體的表面因為陰影而產生訊息短缺時，勢必無法一次完整量測到物體的三維形貌。同時，應用於高倍率顯微鏡上，要求提高影像的量測範圍時則同樣將遇到上述問題。因此，對待測物體採取局部或重複量測以增加形貌量測準確度之應用，則是不可避免的。

目前已有許多演算法已發展出來運用在各種不同的圖形配準方法上，例如：「Viewpoint registration」[35]、「Temporal registration」[33]、以及「Template registration」[31]。然而這些技術無法直接應用於較精密的三維形貌量測上，原因在於：

- (1)大部份的演算法只處理二維的圖形配準問題
- (2)目前的演算法皆遠小於三維形貌量測所需要的高精確度
- (3)校正技術及其座標轉換演算法無法解決光學系統本身的失真
- (4)影像光強度的演算法對於輻射狀失真與影像干擾非常地敏感
- (5)總體非線性最佳化之演算法非常複雜且需非常好的初始值假設

為了解決上述諸多問題，Dr. Su於西元2003年首創一套3D image integration技術[20]，可以精確地拼湊待測物體的局部形貌整合成完整的三維形貌，融合的精確值為影像畫素大小的百分之一，對於三維形貌的精密量測有莫大助益。國內外雖有不少學者從事此方面的研究

[31-35]，然而卻多是著重於資料處理與數學演算法的研發，並非以精密量測為目的，配準的精確值也很難達到sub-micron的要求。因此本論文提出二維光柵圖形配準模式，並可應用於各種條紋投影形貌量測技術上，非僅侷限於相位移式條紋投影輪廓儀。此新穎相位移條紋投影輪廓儀之影像融合技術的優點在於，具有高準確度以及可有效降低程式運算上的時間成本。再搭配Dr. Su研發之Calibration-based PSPFP[19]，可有效地補償在每個畫素位置光學系統的失真，此影像融合技術較其他方法優越之處在於其具有：

- (1)較高的融合精確值
- (2)更健全的系統
- (3)較低的計算時間成本
- (4)在每個畫素位置間補償光學系統失真的能力
- (5)適用於影像間任意地旋轉、縮放
- (6)適用於任意的條紋投影量測方法

本研究除了完整融合待測物體局部區域的三維形貌，亦解決了Dr. Su從前使用一維光柵圖案之圖形配準技術[20]時，需要麻煩地旋轉光柵 90° 作二次條紋互相垂直的相位移之問題。本研究採用二維光柵圖案投影，因而可達到快速、簡單且精準的圖形配準目的，僅需要沿著X軸與Y軸各執行一次相位移，完全不用調整光柵位置即求得每

張圖形的二維相位值(ϕ)，可真正達到量測系統全自動化之目的。

最後，以Least square method找出二側圖形重疊區域，相對應座標點之間的座標轉換關係式，將二側圖形的座標位置轉換成共同的座標系統，並依三維座標點將整個待測物體的完整三維形貌描繪出來。此配準技術亦可應用於針對待測物體作局部區域高解析度及量測範圍的縮放或特寫之影像融合。預期將達到快速、即時且方便於自動化三維形貌量測影像融合之目的。本論文架構如下：

第二章詳細介紹PSPFP的光學量測原理與校正技術。第三章詳述各種不同的Image registration原理及推導本研究中，不同影像圖形系統中的座標轉換關係式。第四章則講解本研究之實驗儀器裝置與實驗步驟。最後，於第五章闡述本研究實驗結果。第六章提出結論與未來研究工作。本文採取圖文並列的模式以便於讀者立即掌握文章動向、易於了解。

第二章 相位移條紋投影輪廓儀量測原理與校正技術

2-1 相位移條紋投影輪廓儀(PSPFP)簡介

相位移條紋投影輪廓儀(PSPFP)是種根據影像、非接觸式以及全域的形貌量測技術。其中，全域的Full-field methods 可一次(或數次內)擷取所需之資訊，故能在數秒之內完成整個量測程序。未來次微米等級的三維形貌量測儀器，講求量產檢測速度者，勢必較偏好Full-field methods。

相較於其他方式之量測技術(1-1節)，PSPFP具有高精確度、高形貌採樣密度以及較不受環境因素(溫度、濕度)干擾…等等優點，故成為十分醒目的一種非接觸式光學量測工具。其最顯著特徵即是利用多重光柵圖案投影條紋的位移來取得相位資訊，即使有過多的影像干擾，精確值仍然可以達到超過景寬(Field of view)大小的萬分之一。本章節中，將詳述相位移條紋投影輪廓儀的量測原理與校正技術，並且針對其應用於某些形貌量測上的關鍵問題提出適當的建議。

2-2 PSPFP之量測原理

本研究之相位移條紋投影輪廓儀係由二個子系統組合而成，分別為(1)光學三角量測法，以及(2)相位移偵測技術。光學三角量測法為轉換縱向深度變化至投影條紋的側向變形，而相位移正弦條紋的扭曲變形量可由相位移偵測技術高精確度的偵測。

圖2.1簡述相位移條紋投影輪廓儀量測系統的實驗裝置原理。如圖2.1所示，正弦條紋圖案投影至待測物體表面或參考平面上，由參考平面上可輕易看出投影的條紋仍然比直且平行，然而待測物體表面的條紋則具有明顯的位移，並有被纏繞而扭曲的現象發生，探究其原因則可知，係因為待測物體的表面並不是非常平整，而是形貌有所起伏所導致投影條紋扭曲變形的現象。

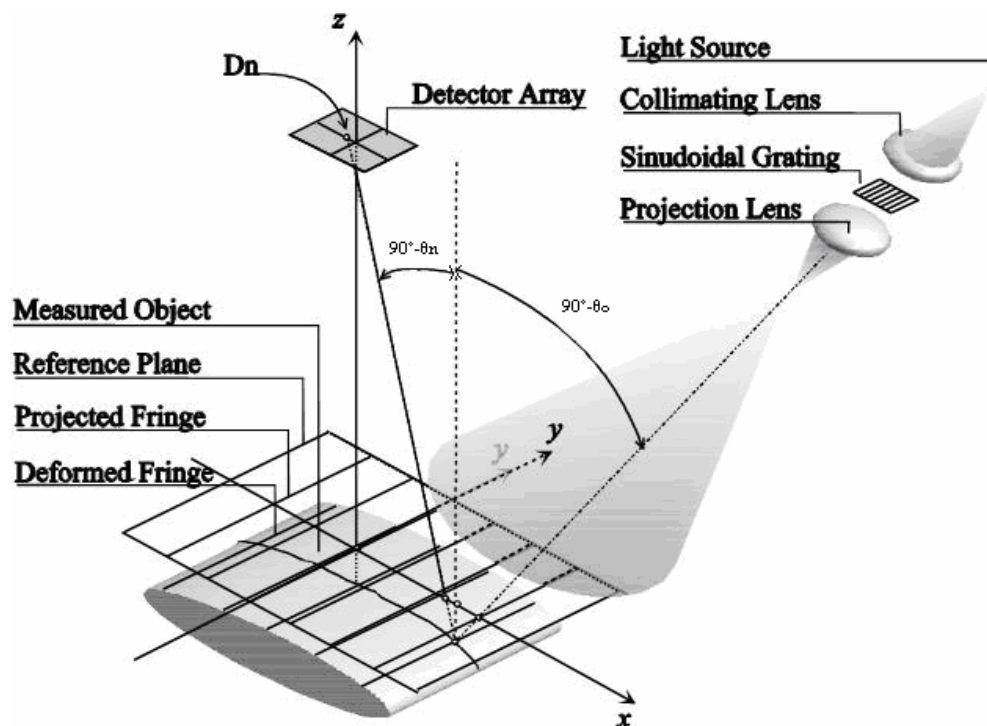


圖2.1 相位移條紋投影輪廓儀量測系統的實驗裝置原理

對於固定的系統組合而言，條紋的扭曲變形與理想參考平面上的表面形貌誤差，有一對一的相對應關係，依據此特性，則可將三維的形貌量測問題簡化成二維的量測問題。數學上，條紋的扭曲變形量可以正弦條紋的相位移量來表示。

光學三角量測法的使用可被解釋為解調變的過程。在解調變調頻訊號時，深度或高度的變化所導致之相位移量必須先計算出來，將其轉換至相對應的深度或高度值。如前所述，為了增進相位計算的精確度，可應用相位移偵測技術於偵測參考平面或是待測物體表面的條紋圖形。

舉例來說，使用二維光柵圖案投影、五步驟法的待測物體表面條紋圖形解調變，首先必須沿著X軸與Y軸各移動條紋四次，每次皆移動 $2\pi/5$ 。因此總共將有十張影像圖形，顯示如下：

$$I_{x0}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos(\varphi_x(c, r)) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r)) \quad (2.1)$$

$$I_{x1}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos\left(\varphi_x(c, r) + \frac{2\pi}{5}\right) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r)) \quad (2.2)$$

$$I_{x2}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos\left(\varphi_x(c, r) + \frac{4\pi}{5}\right) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r)) \quad (2.3)$$

$$I_{x3}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos\left(\varphi_x(c, r) + \frac{6\pi}{5}\right) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r)) \quad (2.4)$$

$$I_{x4}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos\left(\varphi_x(c, r) + \frac{8\pi}{5}\right) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r)) \quad (2.5)$$

$$I_{y0}(c, r) = I_{x0}(c, r) \quad (2.6)$$

$$I_{y1}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos(\varphi_x(c, r)) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r) + 2\pi/5) \quad (2.7)$$

$$I_{y2}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos(\varphi_x(c, r)) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r) + 4\pi/5) \quad (2.8)$$

$$I_{y3}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos(\varphi_x(c, r)) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r) + 6\pi/5) \quad (2.9)$$

$$I_{y4}(c, r) = A(c, r) + B(c, r) \cos(\varphi_x(c, r)) + C(c, r) \cos(\varphi_y(c, r) + 8\pi/5) \quad (2.10)$$

此處 $A(c, r)$ 為強度因子， $B(c, r)$ 以及 $C(c, r)$ 為CCD偵測平面位置於 (c, r) 處的條紋調變，而相位 $\varphi_x(c, r)$ 以及 $\varphi_y(c, r)$ 表示沿著待測物體表面起伏變化所導致的條紋變形量。在此，下標 x 及下標 y 表示條紋圖形的二維座標。

將上述(2.1)~(2.10)式子的相位移量簡單地表示為：

$$\varphi_x(c, r) = \arctan \left(\frac{\sum_{n=0}^4 I_{xn}(x, y) \sin\left(\frac{2n\pi}{5}\right)}{\sum_{n=0}^4 I_{xn}(x, y) \cos\left(\frac{2n\pi}{5}\right)} \right) \quad (2.11)$$

$$\varphi_y(c, r) = \arctan \left(\frac{\sum_{n=0}^4 I_{yn}(x, y) \sin\left(\frac{2n\pi}{5}\right)}{\sum_{n=0}^4 I_{yn}(x, y) \cos\left(\frac{2n\pi}{5}\right)} \right) \quad (2.12)$$

上述二個式子(2.11)、(2.12)展開後可明顯的看出，計算相位值時強度因子 $A(c, r)$ 以及條紋調變 $B(c, r)$ 、 $C(c, r)$ 彼此會互相消掉。

一旦相位移量 $\varphi_x(c, r)$ 及 $\varphi_y(c, r)$ 已知，便可應用光學三角量測法，轉換深度或高度變化值至投影條紋之側向變形量。以圖2.2系統光路示意圖為例，闡述幾何光學上條紋分析的基本原理。

由圖2.2可知，待測物體上 D 點與參考平面上 C 點，實際上在CCD畫素平面上為同一點。

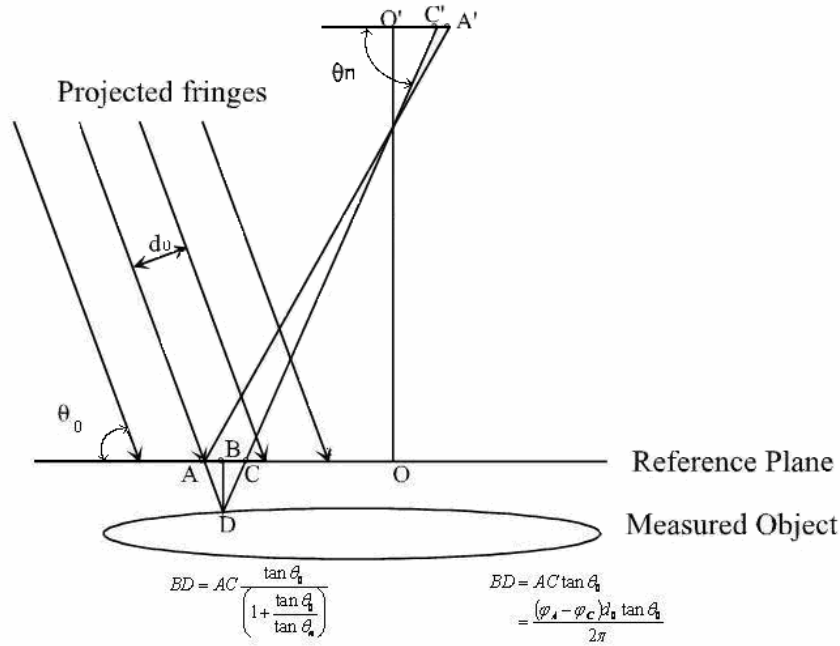


圖2.2 幾何光學上條紋分析的基本原理

假設在 D 點量測到的相位值為 φ_D ，則在參考面上條紋投影點 A 的相位值 φ_A 滿足下列式子：

$$\varphi_A = \varphi_D \quad (2.13)$$

A 點與 C 點之距離可表示為下列式子：

$$\overline{AC} = \left| \frac{(\varphi_D - \varphi_C) d_0}{2\pi} \right| \quad (2.14)$$

而距離 AC 與表面深度 BD 的關係可以下列式子表示：

$$\overline{BD} = \overline{AC} \frac{\tan \theta_0}{(1 + \frac{\tan \theta_0}{\tan \theta_n})} \quad (2.15)$$

其中， θ_0 為入射光與參考平面的夾角、 θ_n 為CCD光軸與參考平面的夾角， d_0 為光柵條紋的週期。對於較大的縮小倍率因子影像系統而言， θ_n 接近 $\pi/2$ ，此時eq. 2.15可簡化為：

$$\overline{BD} = \overline{AC} \tan \theta_0 = \frac{(\varphi_C - \varphi_A)d_0 \tan \theta_0}{2\pi} \quad (2.16)$$

因此，參考平面與待測物體表面的深度差可由相位差 $(\varphi_C - \varphi_A)$ 來決定，如(eq. 2.16)所示。

尚有下列注意事項應被提及：

- (1)上述「相位-縱深」關係式，僅限制於應用在影像系統的景寬張角十分地小的情況下。因此，只有試片表面點的深度位置可被精確的計算出來，而非其側向位置。
- (2)由相位移演算法取得的纏繞相位在後續處理過程前，必須先被展開成展開相位。雖然只是將一些斷掉的線段作連續延伸的簡單工具，但是相位展開在許多應用上頗具價值，在下節中將會真實地敘述完整相位圖形之相位展開方法。

2-2-1 相位展開與相位展開演算法

由eq. 2.11及eq. 2.12的相位移演算法可知，條紋波動為自然週期的三角函數，藉由程式的反正切函數 \arctan 數學運算所獲得之相位值被侷限於 $-\pi$ 到 π ，因此有不連續的纏繞相位產生，如圖2.3為纏繞相位圖形及其展開相位圖形。

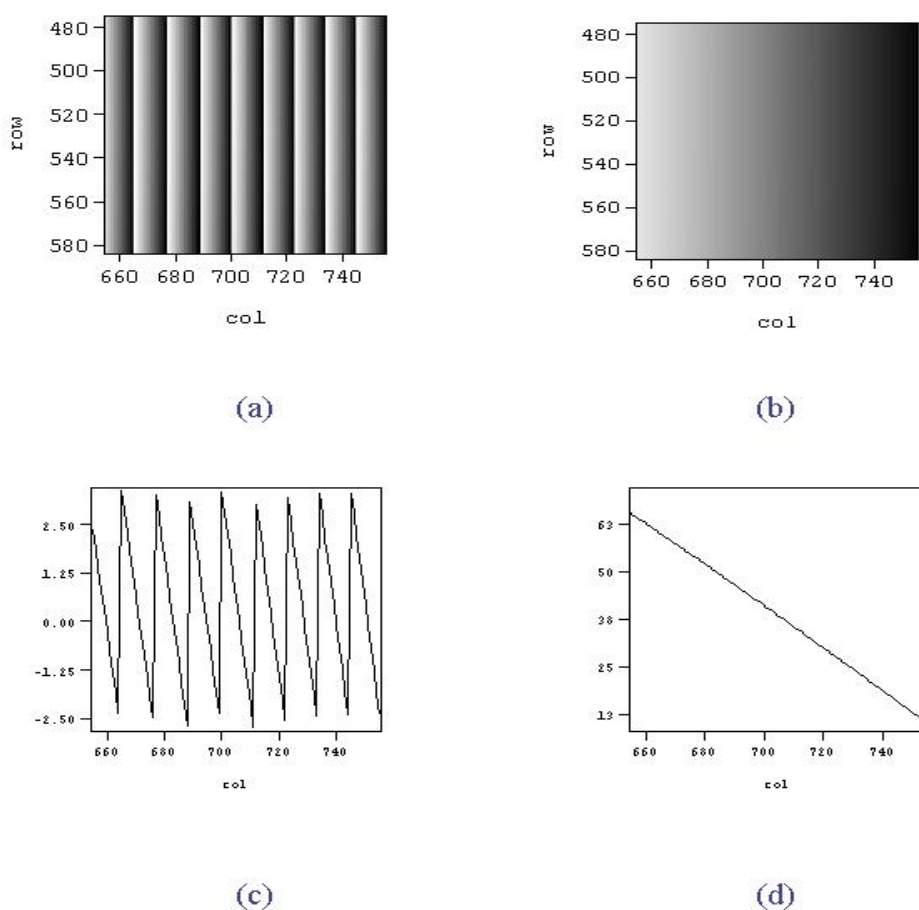


圖2.3 纏繞相位圖形以及其展開相位圖形

當相鄰畫素位置的纏繞相位差超過 π 時，為了恢復原始圖形的展開相位，乘以 2π 的整數倍並加(減)上纏繞相位 φ ，使其接合上不連續的相位，這個過程稱作相位展開，可以eq. 2.17表示之，係為了成功地與其鄰近畫素位置之相位值互相比較而產生，展開後的相位 φ_u 才是原始圖形的相位，重複此步驟則在不同畫素位置上的纏繞相位皆可被連續地展開。

$$\varphi_u(x, y) = \varphi(x, y) + 2k\pi \quad (2.17)$$

其中，展開相位為 φ_u ，纏繞相位 φ ， k 為整數。比較鄰近像素位置最簡單的方法，即為直接選擇行以及列的畫素位置作比較。然而，相位干擾、表面不規則、不足的樣本頻率將輕易地破壞我們所選擇的比較畫素方法。因此，演算法將會愚昧地累加 2π 的整數倍至相位值，使得誤差將擴展至更大區域而導致毀壞許多畫素的相位值。

一個好的相位展開演算法應該具備可以偵測獨立路徑相位點的能力，並且採用適合的改變路徑來防止上述問題的產生。

最早提出系統化處理獨立路徑相位展開方法的人為Goldstein[21]，此為輪廓積分的估算於數學上之具體化。那些因為相位干擾、表面不規則或是不足的樣本頻率所產生之有問題的相位點稱之為誤差點，類似複數分析的奇異點。圖2.4為偵測誤差點的程序圖形。

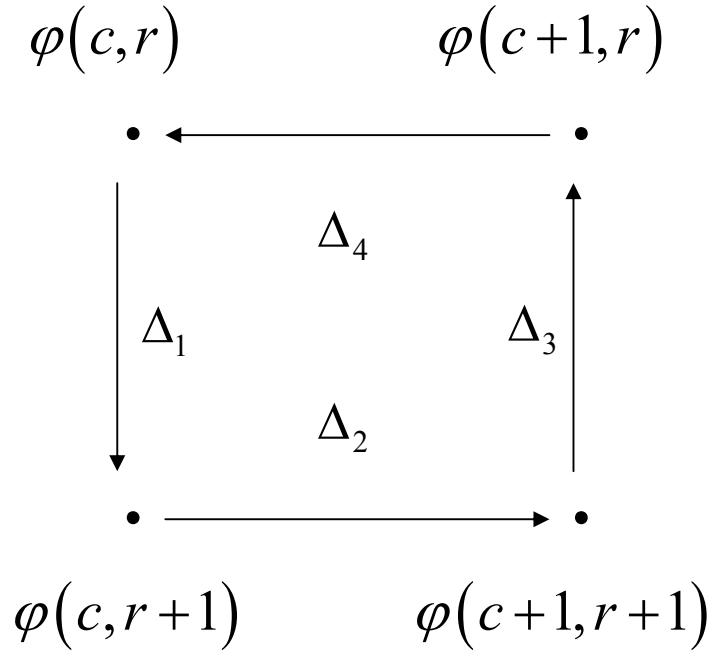


圖2.4 小區域的纏繞相位值

由圖2.4可知，相位圖上相位 $\varphi(c, r)$ 小區域的相位差以及其周圍的相位值可定義為：

$$\Delta_1 = \left[\frac{\varphi(c, r+1) - \varphi(c, r)}{2\pi} \right]$$

$$\Delta_2 = \left[\frac{\varphi(c+1, r+1) - \varphi(c, r+1)}{2\pi} \right]$$

$$\Delta_3 = \left[\frac{\varphi(c+1, r) - \varphi(c+1, r+1)}{2\pi} \right]$$

$$\Delta_4 = \left[\frac{\varphi(c, r) - \varphi(c+1, r)}{2\pi} \right] \quad (2.18)$$

其中方括弧[]表示最接近的整數值。而畫素位置 (c, r) 的相位誤差可以下列方程式來計算：

$$r_p(c, r) = \sum_{n=1}^4 \Delta_n \quad (2.19)$$

針對適當的樣本相位圖，誤差點 $r_p(c, r)$ 僅可為下列三個數值：1, 0, -1。 $r_p(c, r)$ 在數值為0的點稱為連續點，而在1或-1的點稱為不連續點，統稱為正極或負極，通常會成對分佈，代表某不連續的起點與終點。一般由四點找到不連續點時，以四點左上那一點 (c, r) 標示為不連續點(residue)，也就是說在點 (c, r) 的位置有一不連續點，是由四點 (c, r) 、 $(c+1, r)$ 、 $(c+1, r+1)$ 和 $(c, r+1)$ 所構成的一個不連續點。

目前已有許多方法被提出，以求得適當且連續的相位展開圖形[21-30]。最常見的方法就是直接找其具有最小總距離的樹枝狀切點，此法假設相位誤差僅侷限於一些被隔離的區域。但是，當量測而得的相位圖形包含不連續邊界時，此演算法隨即失效。為了解決此問題，所以有Quality-map-based algorithm的產生，其試著避免相位圖形上雜訊的產生，但無法明確地偵測剩餘點。影像品質圖(Quality-map)就是一個陣列，可顯示相位圖上訊號品質分佈好壞的情形，這些訊息可有助於改善相位重建時的處理過程。根據此方法，演算法可由良好的資

料中分辨出壞的資料。Binary mask係根據相位圖形不同部份的品質而產生，其可由相位展開圖形得到，就如相位計算時係利用光強度圖形而得到。

PSPFP量測系統之所以具有優勢，與其具有對雜訊較高的免疫力以及較高的空間樣本密度有關，同時全域量測的能力使其大量節省量測時間，亦大大地降低受環境變因(溫度、濕度)的干擾因素，因此較其它點偵測式的量測技術更具競爭力。

此相位移量測系統亦具有感測區域相位變化的能力，PSPFP可解決傳統在CCD二維影像上，看不出其為小山丘或低窪處的問題，如圖2.5所示。

傳統上無法由條紋圖形看出其為凹或是凸，此問題可由相位移演算法自動地解決，隨著電腦處理運算速度的快速進步，使得相位移技術可應用於許多形貌量測上。

為了得到高解析度的量測，下列項目值得被注意：

- (1)待測物體上的正弦條紋可由同調性(Laser)或非同調性的光源(鹵素燈)投影來產生。
- (2)上述介紹過的「相位-縱深」座標轉換關係式僅可應用於某些景寬角度非常小的影像系統中。
- (3)高精確度的PSPFP量測系統需要輪廓鮮明的高訊雜比條紋影像。

沿著觀察方向上，深度的改變率侷限於單一條紋所包含的畫素數目。單一條紋所包含的畫素數目太少時，表面反射的局部變化將導致非常大的量測誤差。因此，針對具有較高曲率的表面量測時，僅有待測物體較適當的小曲率表面部份可被量測。

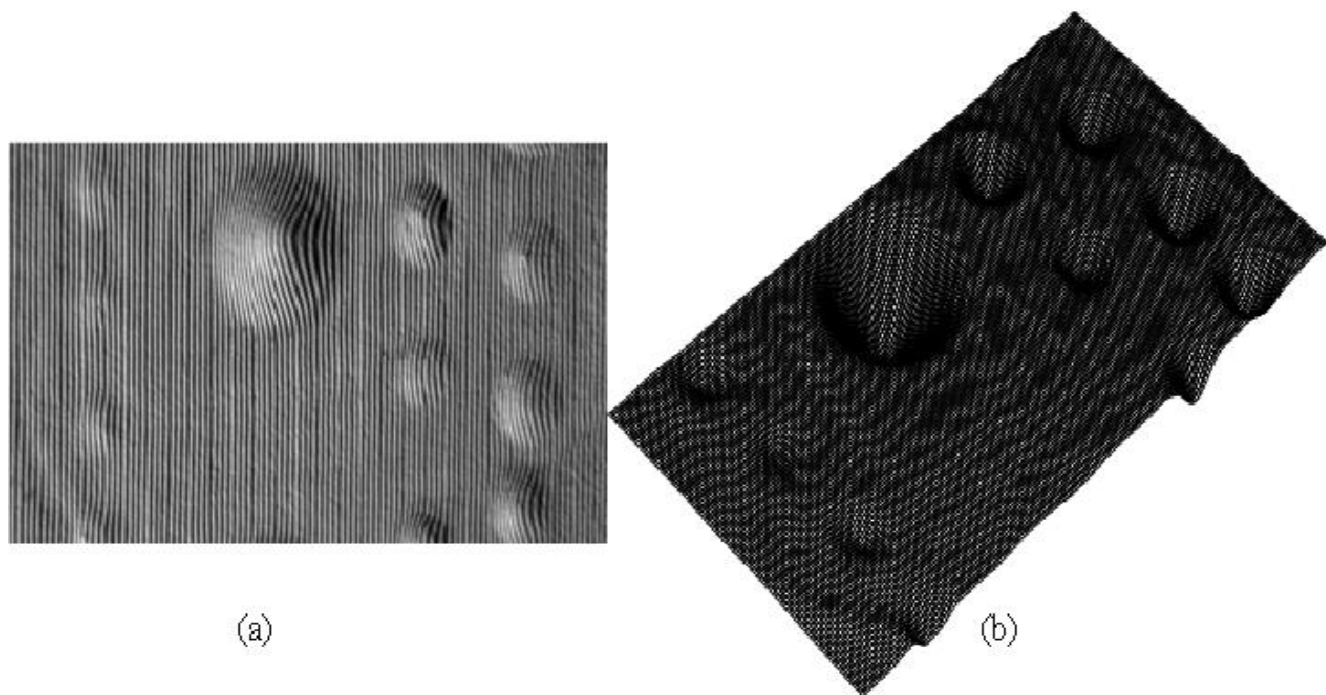


圖2.5 (a)由CCD影像上看到的圖形，無法分辨其為小丘或低窪

(b)由相位移條紋投影輪廓法(PSPFP)重建之影像即可明顯分辨
其為小丘或低窪

2-3 PSPFP之校正系統

相位移條紋投影輪廓儀之校正系統[19]，使用一般常見的單一黑白CCD照相機以及單一光源投影裝置系統。鹵素燈光源射入聚光透鏡產生平行光後，穿透正弦光柵而投影條紋圖案到待測物體上，由CCD影像擷取系統獲得正弦條紋之條紋扭曲變形的精確相位偵測影像數值。完成校正後，影像圖形的相位資訊可解調變為三維形貌的座標資訊，因此待測物體的形貌能在數秒內精確的予以座標化。

校正系統可分為二大部份(1)深度的校正(2)側向的校正。深度的校正步驟中，偵測的相位與待測物體深度的關係可被推導出，稱之「相位-縱深」座標轉換關係式。而側向的校正步驟中，同樣的可推導出「縱深-側向」座標轉換關係式。

Calibration-based PSPFP具備下列許多優點：

- (1)系統主要由一個CCD影像擷取系統與一個Fringe projector所構成，方便攜帶，因此極具商業價值
- (2)量測時間短，故不易受外界環境因素(如溫度、濕度)的影響
- (3)可依造光柵的設計調整其投影條紋之週期，或是可以利用 dual-frequency、multi-frequency原理，進而加大縱深量測範圍
- (4)搭配影像融合技術時，可對待測物體作局部或重複量測，大大增加其量測準確度(例如局部「特寫」放大)

2-3-1 「相位-縱深」的校正

在「相位-縱深」的校正實驗中，本實驗室預先製作了一塊非常平整的標準鋼板，用於「相位-縱深」校正的光學系統上當作校正板。同樣將鹵素燈光源射出，經過聚光透鏡打入光柵，再經由廣角透鏡投影條紋至非常平整的校正鋼板表面上，如圖2.6所示。

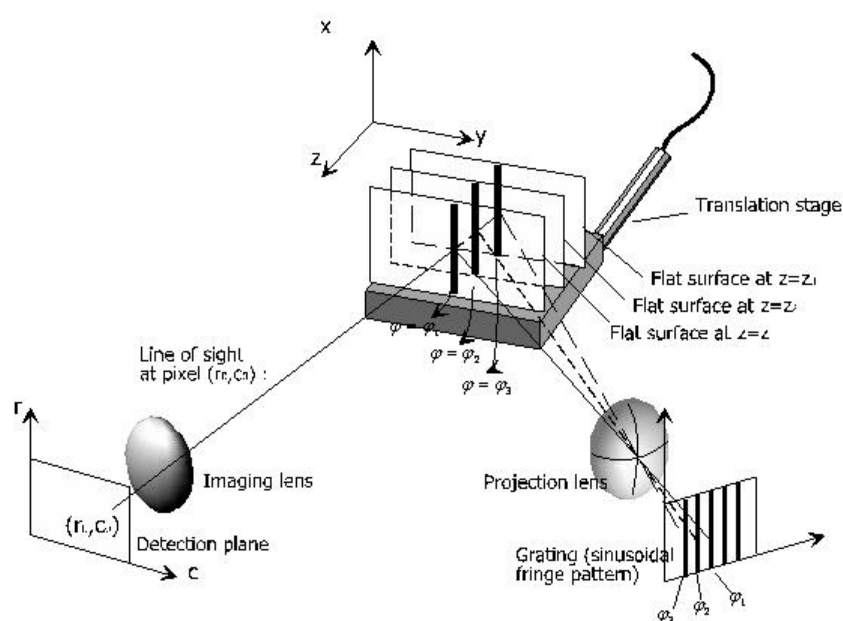


圖2.6 「相位-縱深」的校正示意圖

其中，分佈於平整鋼板表面的相位可藉由相位移演算法得到。纏繞相位的擷取即重覆此步驟至不同的深度位置 $Z=Z_i$ ，而後先沿著橫軸方向作相位展開，接著依不同深度位置恢復原始相位的連續性。此步驟後，一連串的絕對相位值及其在每個畫素位置上相關聯的深度值，作成隨後的曲線關係式。如圖2.7所顯示，畫素位置(500,500)處

的相位值與深度關係圖，由圖中可明顯地看出其大致上呈現一個線性的變化曲線。可以多項式展開的數學式子表示：

$$Z(\varphi) \approx \sum_{n=0}^N c_n \varphi^n \quad (2.20)$$

此處 Z 以及 φ 為深度與展開後的相位值， C_n 為多項式的係數，可由一連串相位值及其對應的深度值求得。一般來說，演算法的精確度隨著 n 值升高而提高，但是此舉將增加程式計算上的複雜，一般在四階項之後的更高階多項式係數已非常接近於零。在每個畫素位置的「相位-縱深」關係式決定出來後，接下來將繼續完成「側向的校正」。

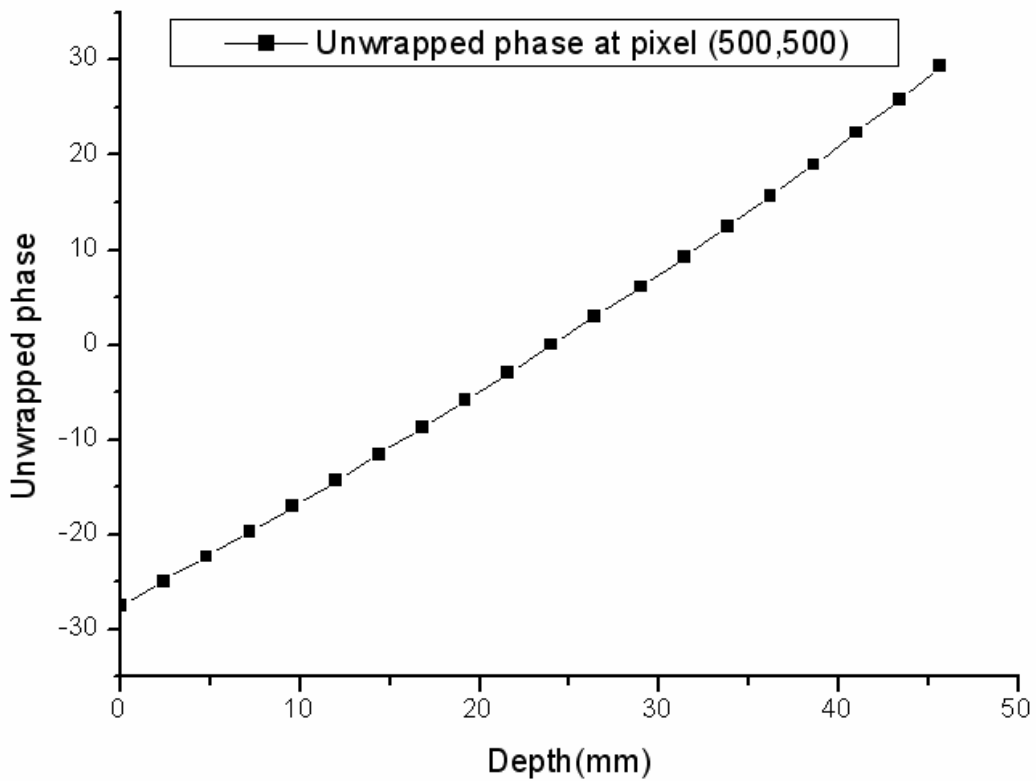


圖2.7 畫素位置(500,500)處的相位值與深度關係圖

2-3-2 「側向」的校正

側向的校正中，使用二組條紋互相垂直的明暗條紋鋼板，其中一組條紋平行於X軸方向(橫)，另一組條紋平行於Y軸方向(縱)，分別置放於距離影像系統前方深度 $Z=Z_i$ 處以形成空間上虛擬的格子圖案。集合此不同時間但空間上互相重疊的光柵條紋圖案形成虛擬的格子圖案，以此當作側向校正的公制標準，裝置圖如圖2.8，但是此處只顯示一組平行於X軸方向的正弦條紋圖形。

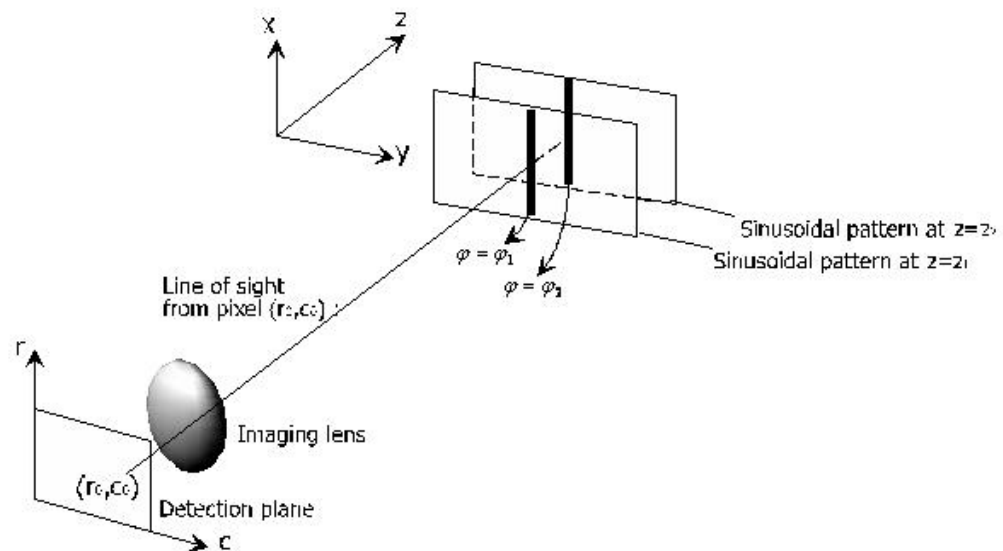


圖2.8 「縱深-側向」的校正示意圖

當一連串的虛擬格子成功地產生，以及不同深度位置的影像資訊皆量測出來後，不同畫素的視線方程式皆可被描繪出來。

在相對應的條紋圖形上標誌二條條紋，條紋在虛擬格子上的交點可表示為XY平面的原點。如圖2.9及圖2.10分別表示，畫素位置(500,500)處的水平方向位置與深度位置關係圖，以及垂直方向位置與深度位置關係圖，可明顯看出大致呈現線性的變化曲線。考慮任意畫素中心在條紋深度位置Z量測到的展開相位 φ_x 以及 φ_y ，表面的側向座標點可以下列式子表示：

$$\begin{cases} x = \frac{\varphi_x}{K_x} \\ y = \frac{\varphi_y}{K_y} \end{cases} \quad (2.21)$$

此處 K_x 以及 K_y 表示相對應光柵條紋的波數。一旦量測虛擬格子超過二個深度位置之後，任意畫素位置的視線方程式皆可估算出來，呈直線分佈(係由於光的直線傳播)。

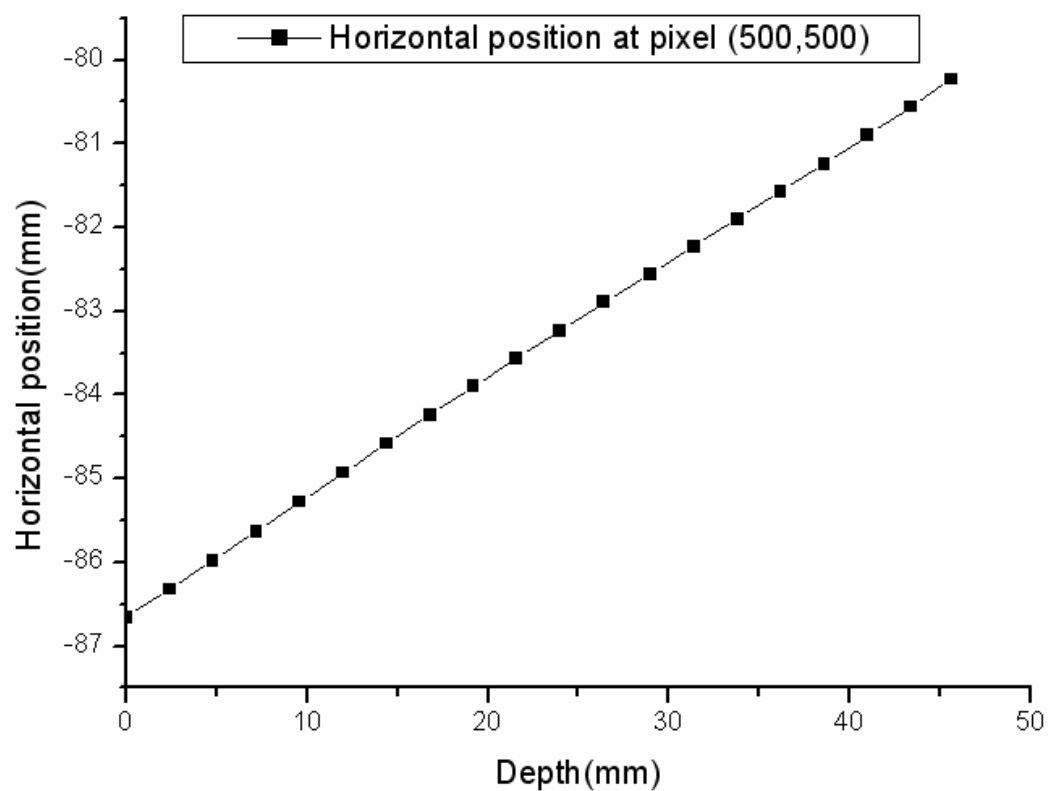


圖2.9 畫素位置(500,500)處的水平方向位置與深度位置關係圖

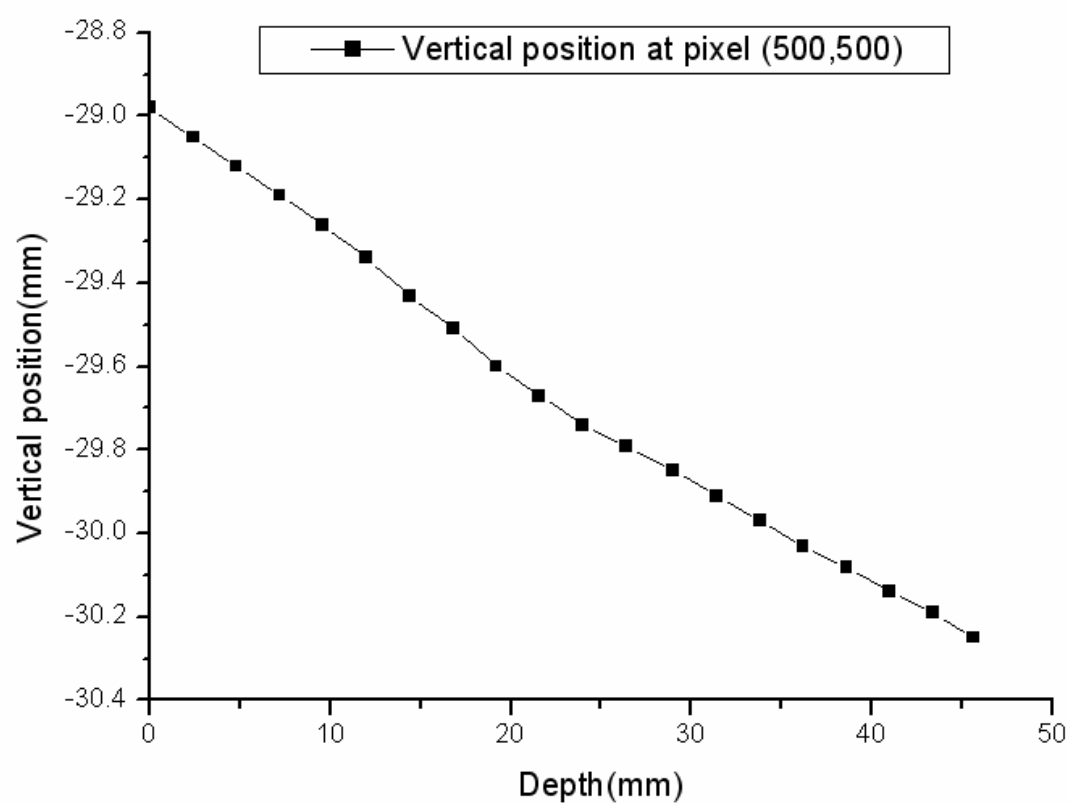


圖2.10 畫素位置(500,500)處的垂直方向位置與深度位置關係圖

2-3-3 三維形貌物體的量測

完成前二步驟的校正後，可將待測物體的三維形貌於數秒內精確的予以座標化，因此可隨時開始作實際待測物體的量測，如圖2.11所示。

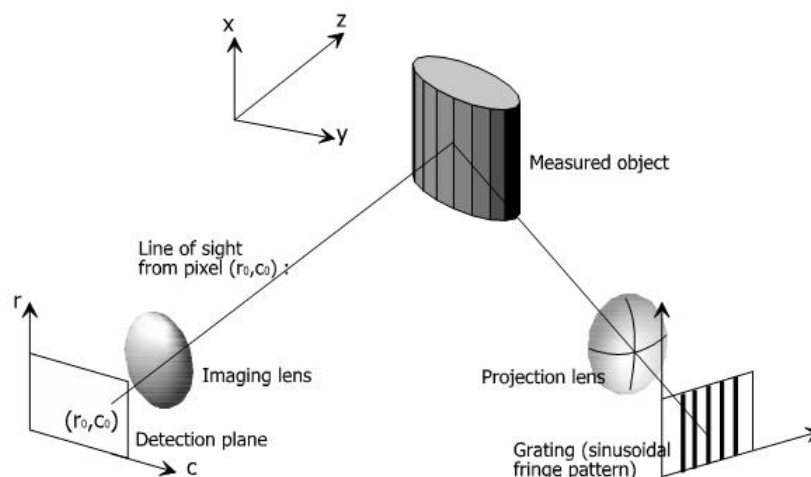


圖2.11 實際量測待測物體示意圖

鹵素燈射出光源，經過聚光透鏡打入光柵，再透過廣角透鏡投影正弦條紋圖案至實際的待測物體上，CCD影像擷取系統偵測待測物體表面條紋的扭曲變形，運用相位移技術偵測投影至實際待測物體條紋的相位值。利用「相位-縱深」座標轉換關係式，將任意畫素位置的展開相位值轉換至深度資訊。同樣地，以「縱深-側向」座標轉換關係式，將任意畫素位置的深度資訊轉換至側向資訊。藉此一連串實驗步驟，待測物體的三維座標資訊隨即建構完成。

第三章 相位移條紋投影輪廓儀之三維形貌影像融合

3-1 圖形配準簡介

當待測物體的尺寸遠大於PSPFP量測系統的景寬大小時，對大尺寸待測物體作局部地量測是無法避免的，景寬的大小主要取決於CCD的解析度以及所需要的精確值。待測物體的局部表面具有陰影或視角被遮蔽時，局部形貌的量測亦是需要的。對於大尺寸或是具有幾何形狀的物體而言，從CCD不同視角擷取的局部形貌拼湊物體的完整三維形貌，此即為實質上的影像融合問題。配準相關聯特徵點的任務即稱做「圖形配準」，係為影像融合最具挑戰性的核心部份。

一般配準的步驟為：首先，選定不同影像間彼此相對應的特徵點作為比對依據(例如：特徵點與特徵點之間的相位值、相對距離、角度、面積、周長...等等)。其次，依據不同的影像資訊選擇不同的座標轉換模式(Rigid、Affine、Projective、Curved)，如圖3.1所示。最後，以各種similarity metric，找出不同影像圖形間特徵點相對應的座標位置，將座標轉換關係式之旋轉、平移、縮放參數求出後，轉換成共同地參考座標系統。以下將針對一般座標轉換模式的數學模式作基本的介紹。

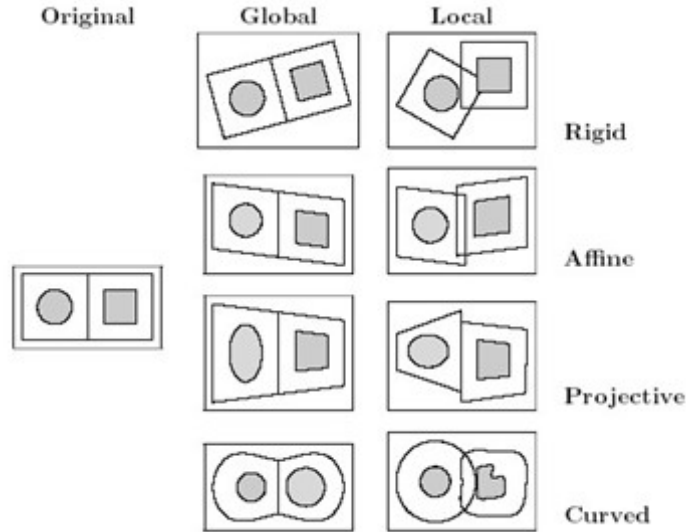


圖3.1 不同形式座標轉換示意圖

3-1-1 Rigid transformation

當影像間任意二特徵點的距離於轉換後仍保持不變，也就是幾何上的關係不改變，稱之Rigid transformation。僅具有旋轉、平移的特性，可以下列2D矩陣方程式表示之：

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

其中， $\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 為旋轉矩陣， $\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$ 為平移矩陣。

3-1-2 Affine transformation

與Rigid transformation type有些許的差異，Affine transformation type除了具有旋轉、平移的特性，更包含了縮放及剪移的性質。以下列2D矩陣方程式表示之：

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$shear_x = \begin{bmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad shear_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ b & 1 \end{bmatrix} \quad scale = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix}$$

其中， $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$ 為旋轉、剪移或縮放矩陣， $\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$ 為平移矩陣。

3-1-3 Projective transformation

Projective transformation的內涵為影像中的直線於轉換後，雖然仍為直線，但並不保留直線間仍為平行之特性。類似由3D投影至2D CCD感光板的原理，如圖3.2所示，包含了旋轉、平移、縮放及投影的特性。可以下列矩陣方程式表示之：

$$x_i = \left[\frac{a_{11}x_0 + a_{12}y_0 + a_{13}}{a_{31}x_0 + a_{32}y_0 + a_{33}} \right] \quad y_i = \left[\frac{a_{21}x_0 + a_{22}y_0 + a_{23}}{a_{31}x_0 + a_{32}y_0 + a_{33}} \right] \quad (3.3)$$

其中， a 為座標轉換關係式的係數， (x_0, y_0) 為參考平面上的畫素位置， (x_i, y_i) 為CCD感光板上的畫素位置， f 為透鏡的焦距， Z_0 為參考平面與CCD感光板的距離。

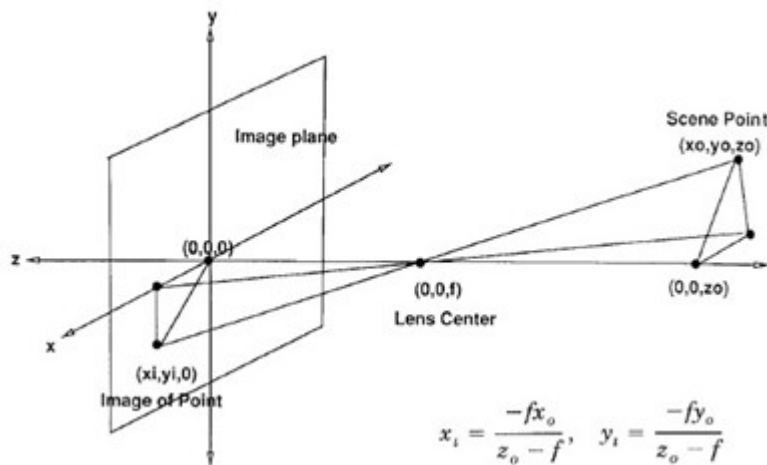


圖3.2 Projective transformation示意圖

3-1-4 Curved transformation

Curved transformation的內涵為影像中的直線於轉換後，變成彎曲的曲線，包含了旋轉、平移、縮放、投影及彎曲的特性。可以下列矩陣方程式表示之：

$$\begin{aligned}x_2 &= a_{00} + a_{10}x_1 + a_{01}y_1 + a_{20}x_1^2 + a_{11}x_1y_1 + a_{02}y_1^2 + k \\y_2 &= b_{00} + b_{10}x_1 + b_{01}y_1 + b_{20}y_1^2 + b_{11}x_1y_1 + b_{02}y_1^2 + k\end{aligned}\quad (3.4)$$

其中， a 、 b 為座標轉換關係式的係數， k 為平移係數。

如1-2節所述，許多原因造成上述圖形配準技術，無法直接應用於較精密的次微米三維形貌量測。本章節中提出較新穎的相位移條紋投影輪廓儀圖形配準技術，具有高精確度、降低程式計算時間以及減少實驗的時間成本...等等優點，再搭配PSPFP的校正系統，整套量測技術可有效地補償在每個畫素位置光學系統的失真。二側圖形重疊區域的畫素位置點，可以精確度為影像畫素大小的1%座落於局部形貌的融合圖形上。

在下節3-2中，將證明正弦條紋上的單一座標點與其影像上的座標點，係根據相同的展開相位值作結合，此關係式將會是新穎相位移條紋投影輪廓儀圖形配準技術的理論基礎。

3-2 結合點之同相位關係

本節中，將證明正弦條紋與影像上個別的座標點，係依據相同的相位值作結合，此關係式將會是新穎相位移條紋投影輪廓儀圖形配準技術的理論基礎。要特別注意的是，上述相位值是指展開相位值，本研究所提出之新穎圖形配準技術，適用於任何條紋投影形貌量測系統，非僅指相位移式條紋投影輪廓儀。

一般非同調性光源影像系統常包含像差及聚焦缺陷，嚴格地說，因為像差的緣故，影像系統在空間上會變化。然而，某些小區域中影像系統接近空間上的不變。換句話說，所有像差都近似常數。根據此原理，影像的光強度可以下式表示：

$$g_s(x', y') = f_r(x', y') \otimes h_r(x', y') \quad (3.5)$$

此處 $h_r(x', y')$ 表示具有像差影像的點擴展函數， $f_r(x', y')$ 表示物體光強度重新按比例分佈排列，此符號 \otimes 表示迴旋運算(convolution)。在數學表示上 $f_r(x', y')$ 可表示為：

$$f_r(x', y') = f \left[\frac{x' - \Delta_{x'}(x', y')}{M}, \frac{y' - \Delta_{y'}(x', y')}{M} \right] \quad (3.6)$$

此處 $\Delta_x(x', y')$ 以及 $\Delta_y(x', y')$ 表示CCD照相機失真所造成影像點的側向位移， M 為影像系統的放大倍率。影像點 (x', y') 對應於待測物體上點 (x, y) 可以下列式子表示：

$$\begin{cases} x' - \Delta_x(x', y') = Mx \\ y' - \Delta_y(x', y') = My \end{cases} \quad (3.7)$$

此正弦波光強度函數中，物體光強度分佈 $f(x, y)$ 可以下列式子表示：

$$f(x, y) = a \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{d} (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \right\} \quad (3.8)$$

此處 a 為常數， d 為光柵條紋週期， θ 為光柵的旋轉角度。

將eq. 3.8帶入eq. 3.6式子中， $f_r(x', y')$ 變成：

$$f_r(x', y') = a \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{Md} (x' \cos \theta + y' \sin \theta) - \Delta\phi(x', y') \right] \right\} \quad (3.9)$$

其中

$$\Delta\phi(x', y') = \frac{2\pi}{Md} [\Delta_x(x', y') \cos \theta + \Delta_y(x', y') \sin \theta] \quad (3.10)$$

函數 $\Delta_x(x', y')$ 以及 $\Delta_y(x', y')$ 在影像平面上的變化非常緩慢，如同 $f_r(x', y')$ 一樣。因此， $f_r(x', y')$ 的傅立葉頻譜範圍被限制在狹窄的區帶內。以下將證明此狹窄區帶的系統轉換函數接近於常數，以及系統的点擴展函數是相對稱的：

$$g_s(x', y') = a \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\frac{2\pi}{Md} (x' \cos \theta + y' \sin \theta) - \Delta\phi(x', y') \right] \right\} \quad (3.11)$$

將eq. 3.7以及eq. 3.10帶入eq. 3.11的相位項，因此產生：

$$\phi(x', y') = \phi(x, y) = \frac{2\pi}{d} (x \cos \theta + y \sin \theta) \quad (3.12)$$

於實際的應用上，上述證明同相位關係的錯誤，導因於非對稱的点擴展函數。彗星像差是造成非對稱点擴展函數的主要原因，因此光學系統必須小心地修正彗星像差。目前已有一些解決此光學系統問題的方法被發表於重要期刊上[36][37]。

3-3 局部形貌量測系統的裝置原理以及圖形配準技術

如同前面所述，二側圖形互相重疊的區域，提供分析系統方向的改變，或估算待測物體的位置非常有用的資訊，如圖3.3所示。只要互相重疊區域座標點間相對應的關係式已知，即使在不同視野或不同偵測位置的局部量測，皆可轉換成共同的參考座標系統，使待測物體不同表面的局部量測影像皆可精準地融合，並且移動光學系統或是移動待測物體後，局部形貌量測系統仍可順利運作。

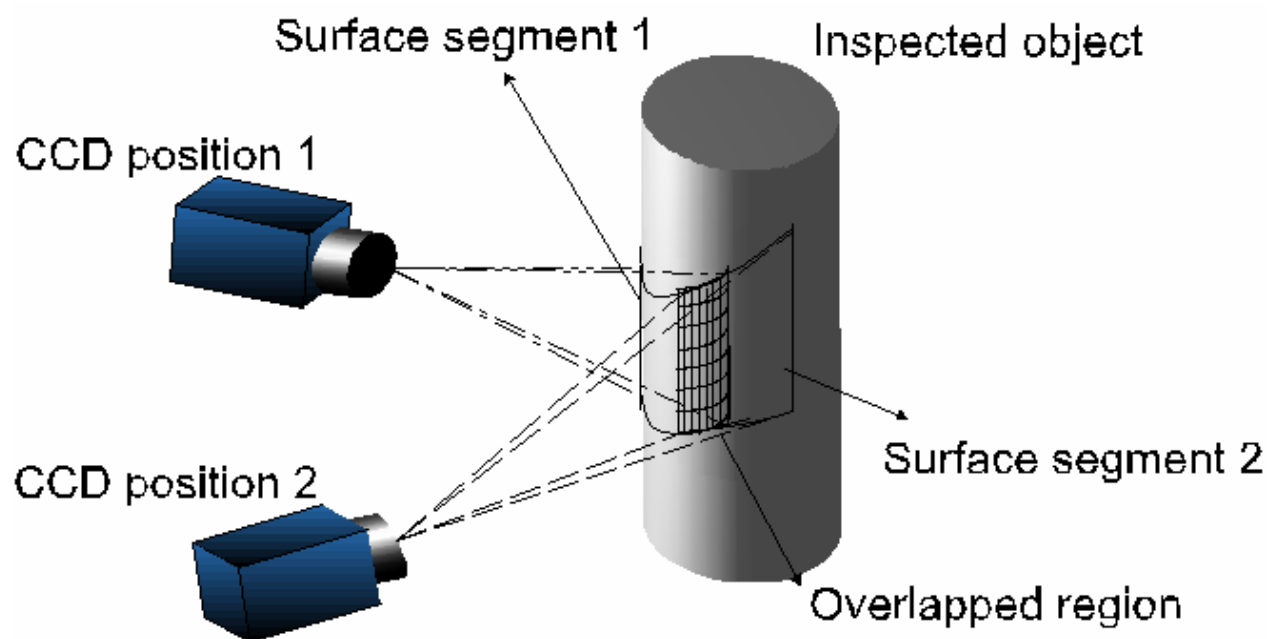


圖3.3 二側圖形互相重疊的區域

接下來，將描述此依據相位值作辨認的新穎圖形配準技術。首先，鹵素燈射出光源，透過聚光透鏡打入光柵，再由廣角透鏡投影二維條紋至互相重疊的區域，如圖3.4所示。投影的二維條紋相對於待測物體而言，在量測二側不同局部形貌時，其光柵條紋為固定位置。如上節3-2所述，在局部表面相位量測後，二側圖形互相重疊區域的畫素位置點，可被顯示成一對絕對相位值，而為了證明結合點之同相位關係，如何配準二側圖形互相重疊區域的畫素位置點即是主要關鍵。

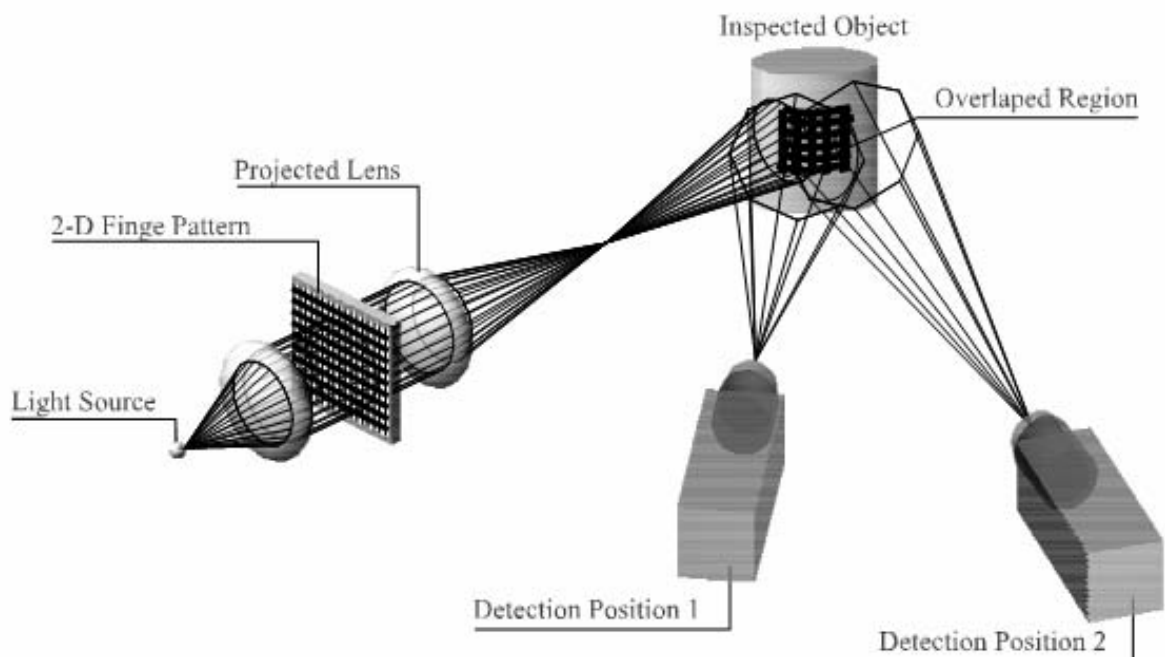


圖3.4 圖形配準實驗示意圖

緊接著，將此新穎圖形配準技術納入PSPFP的校正系統中，如圖3.5所示。

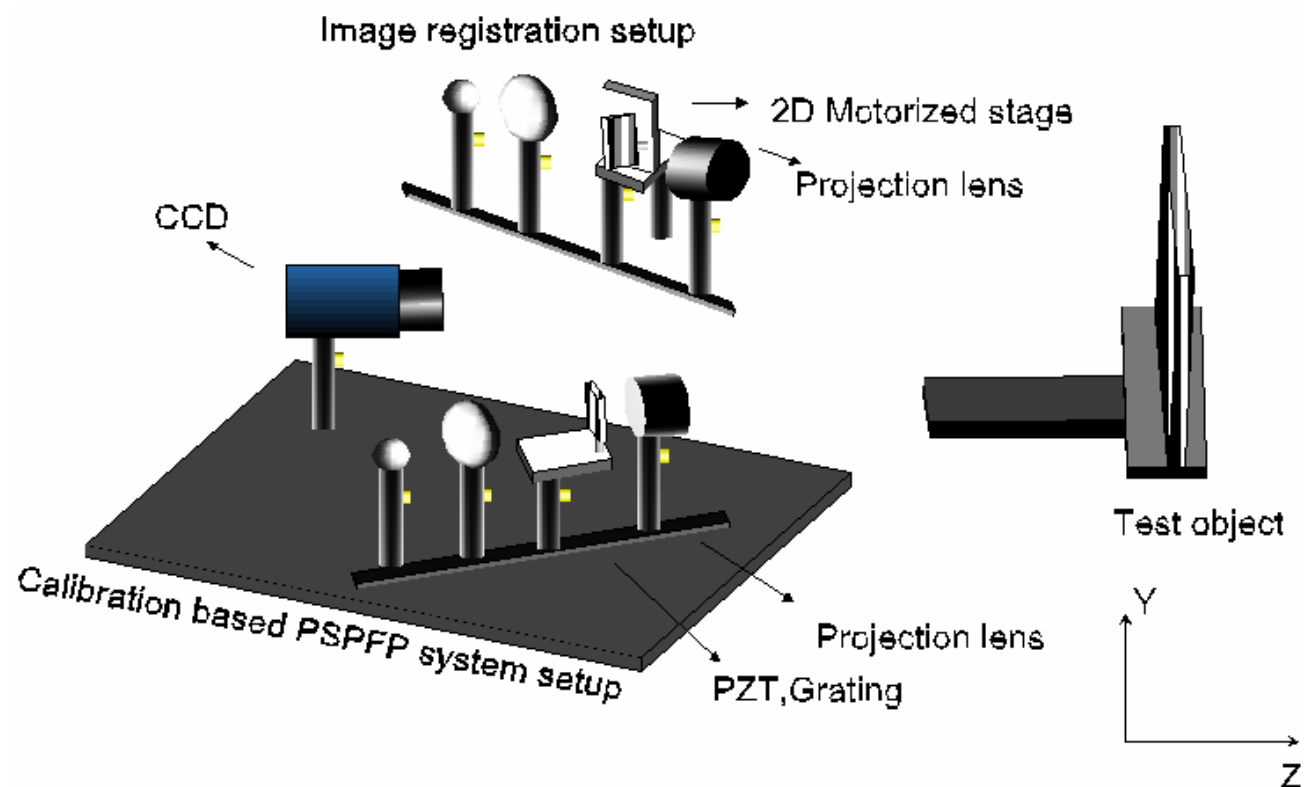


圖3.5 圖形配準系統搭配PSPFP校正系統裝置圖

在圖形配準的實驗中，另一組鹵素燈光源系統用於圖形配準的相位量測。鹵素燈射出光源，透過聚光透鏡打入二維正弦光柵，再由M1614廣角透鏡投影條紋圖案至待測物體表面，並且移動影像偵測系統的視野，完成待測物體二側局部表面的相位量測，如圖3.6~圖3.7表示不同CCD影像視野偵測位置，所擷取之待測物體二側局部表面圖形。將二維相位移相位圖形顯示於圖3.8~圖3.9中。

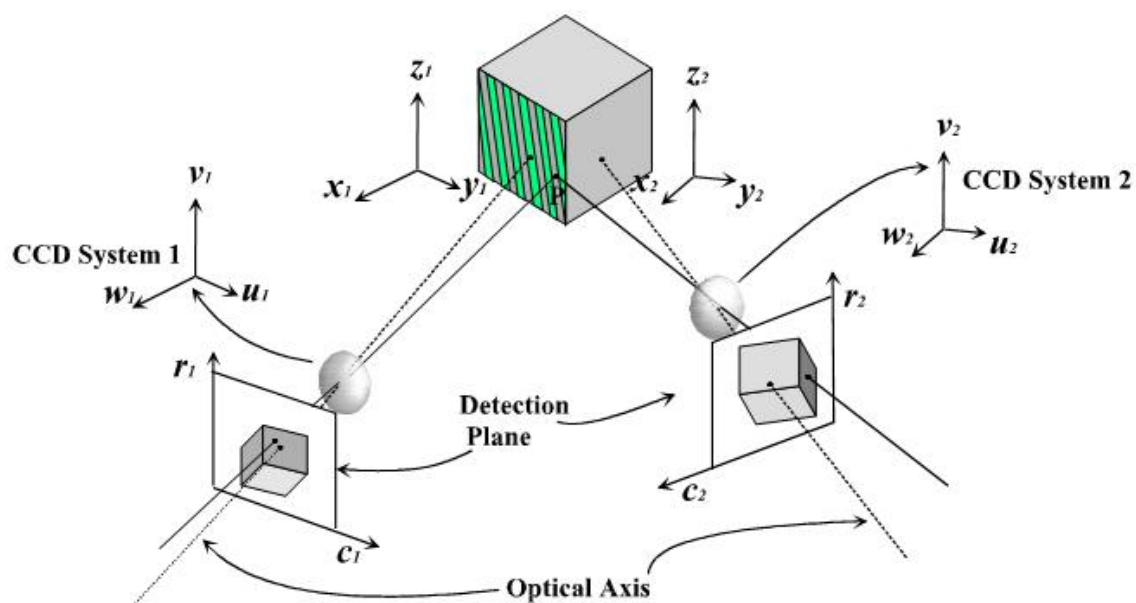


圖3.6 不同的CCD視野偵測位置所擷取之待測物體不同的表面圖形

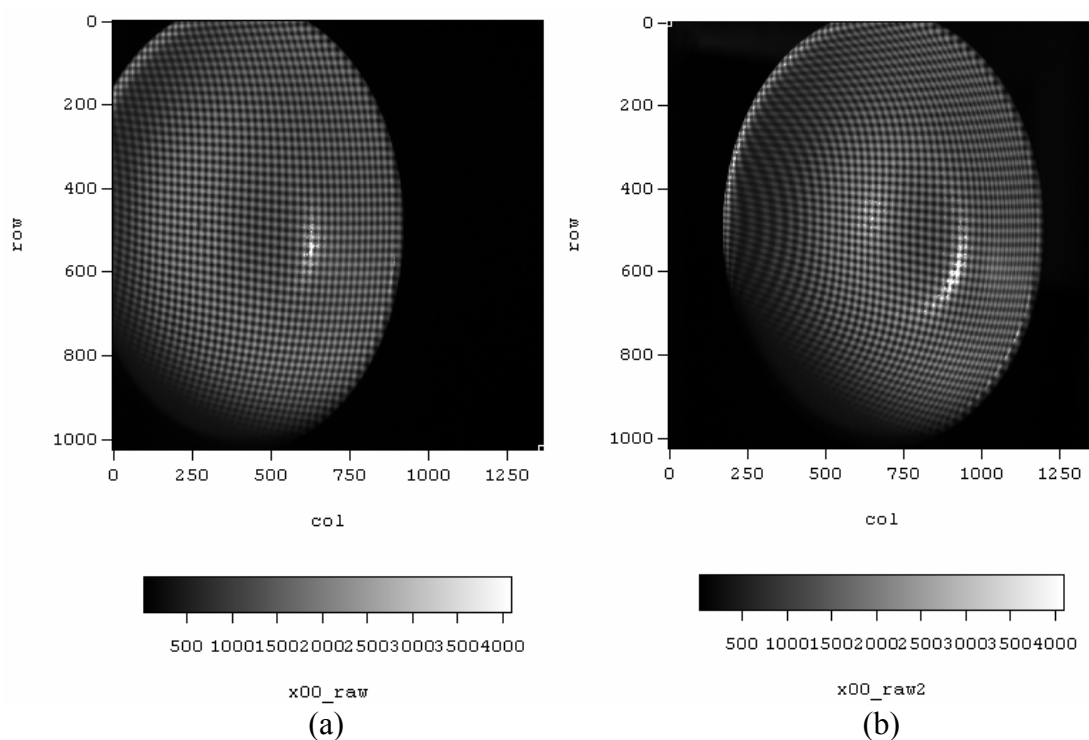


圖3.7 不同的CCD視野所擷取之待測物體二側表面二維條紋圖形

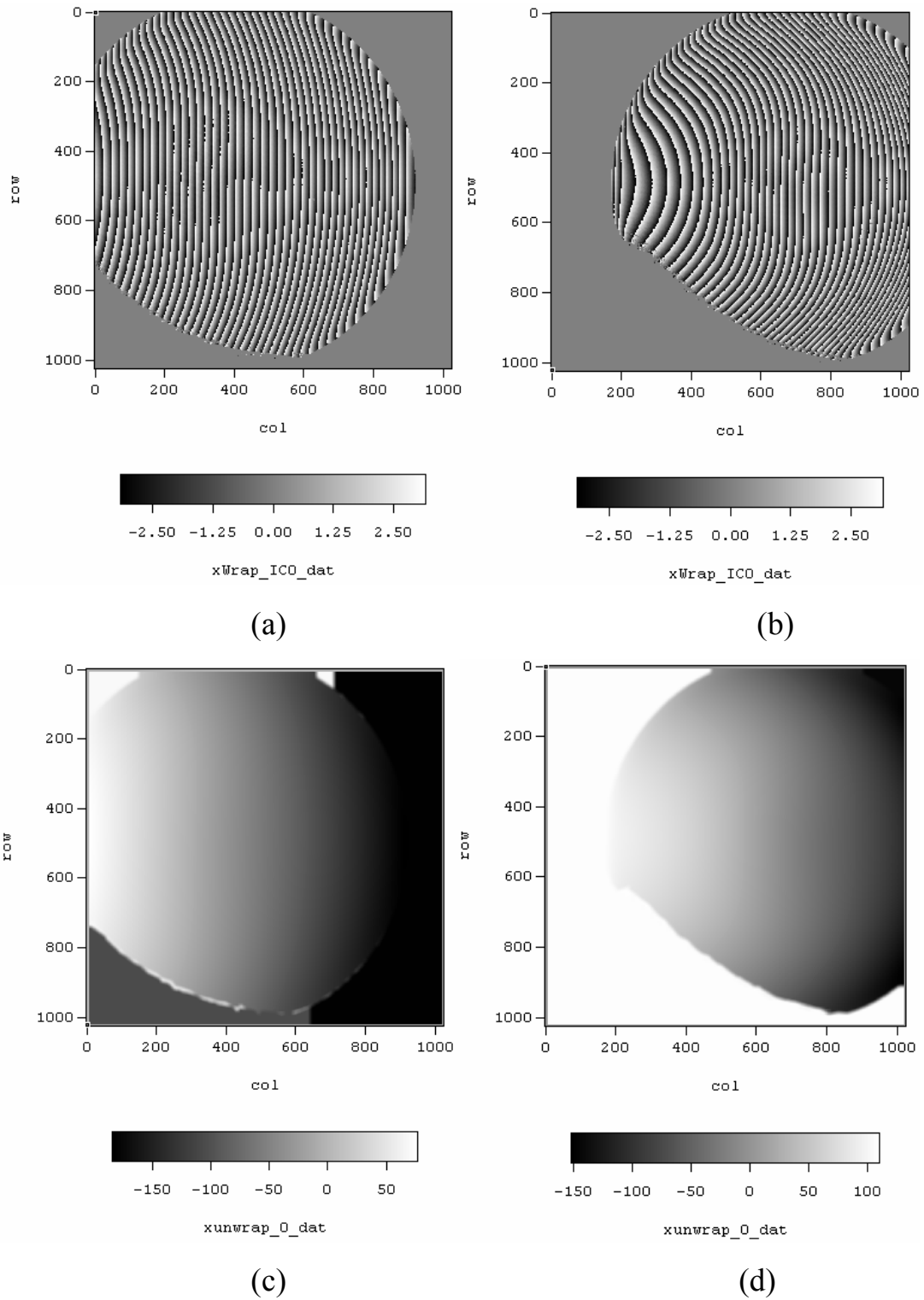


圖3.8 沿著圖3.7橫軸方向作相位移之二維條紋相位圖形

(a)右側橫軸方向纏繞相位圖形 (b)左側橫軸方向纏繞相位圖形

(c)右側橫軸方向展開相位圖形 (d)左側橫軸方向展開相位圖形

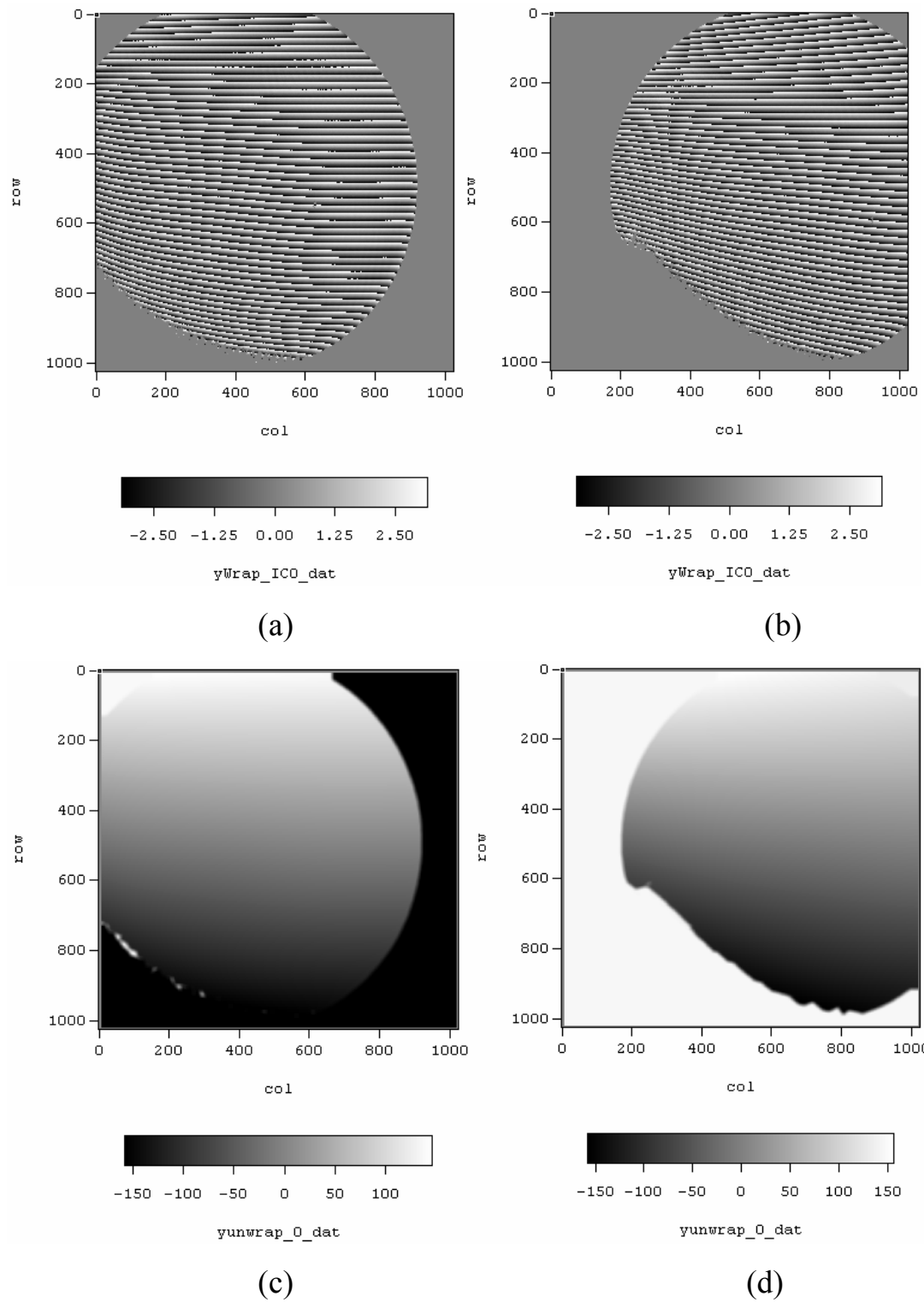


圖3.9 沿著圖3.7縱軸方向作相位移之二維條紋相位圖形

(a)右側縱軸方向纏繞相位圖形 (b)左側縱軸方向纏繞相位圖形

(c)右側縱軸方向展開相位圖形 (d)左側縱軸方向展開相位圖形

3-4 以相位為依據的圖形配準座標轉換關係式

完成第二章所論述的校正系統後，可得知每側圖形的相位值與其所對應三維座標資訊的關係。一旦待測物體的尺寸遠大於量測景寬的大小，此時對大尺寸待測物體作局部地量測，勢必無法避免。在此圖形配準系統中，世界座標系統(W)與移動世界座標系統(M)之間的關係，可以下列關係式表示之：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^{mw} & r_{12}^{mw} & r_{13}^{mw} \\ r_{21}^{mw} & r_{22}^{mw} & r_{23}^{mw} \\ r_{31}^{mw} & r_{32}^{mw} & r_{33}^{mw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x^{mw} \\ t_y^{mw} \\ t_z^{mw} \end{bmatrix} = R^{MW} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + T^{MW} \quad (3.13)$$

上標符號 M 以及 W 分別代表移動的世界座標系統與世界座標系統。將二側圖形相互重疊處的眾多三維座標點位置代入eq. 3.13，則旋轉、縮放矩陣 $[r_{i,j}^{mw}]$ 以及平移矩陣 $[t^{mw}]$ 皆可求得，可將位於移動的世界座標表面座標點轉換到固定的世界座標表面座標點。最終可將二側原本不同的座標系統轉換為共同的參考座標系統，截取不同座標系統的局部表面而融合成完整的待測物體三維形貌圖形。

以一個 3×1 的矩陣向量 $Q_i (i=1,2,...n)$ 表示固定世界座標系統的表面座標點，並且以 3×1 的矩陣向量 $P_i (i=1,2,...n)$ 表示移動座標系統的表面座標點，則eq. 3.13可改寫成：

$$[Q_1 Q_2 \dots Q_n] = R^{MW} [P_1 P_2 \dots P_n] + T^{MW} E \quad (3.14)$$

此處 n 為二側圖形重疊區域所選出的重合表面座標點(通常有成千上萬個座標點)，而列向量 E 定義為：

$$E = \underbrace{[1, 1, 1, \dots]}_n \quad (3.15)$$

圖形配準量測系統與待測物體之間，相對應位置改變的計算可以表示成：給定一組重合座標點 P_i 以及 Q_i ，以最小平方誤差法(Least square error method)求得旋轉、縮放矩陣 R^{MW} 以及平移矩陣 T^{MW} ，其中 x 、 x_{mi} 、 y 、 y_{mi} 為已知：

$$e_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(r_{11}^{mw} x_{mi} + r_{12}^{mw} y_{mi} + r_{13}^{mw} z_{mi} + t_x^{mw} - x \right)^2 \quad (3.16)$$

$$e_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(r_{21}^{mw} x_{mi} + r_{22}^{mw} y_{mi} + r_{23}^{mw} z_{mi} + t_y^{mw} - y \right)^2 \quad (3.17)$$

$$e_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(r_{31}^{mw} x_{mi} + r_{32}^{mw} y_{mi} + r_{33}^{mw} z_{mi} + t_z^{mw} - z \right)^2 \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial e_x}{\partial r_{11}^{mw}} = \frac{\partial e_x}{\partial r_{12}^{mw}} = \frac{\partial e_x}{\partial r_{13}^{mw}} = \frac{\partial e_x}{\partial t_x^{mw}} = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial e_y}{\partial r_{21}^{mw}} = \frac{\partial e_y}{\partial r_{22}^{mw}} = \frac{\partial e_y}{\partial r_{23}^{mw}} = \frac{\partial e_y}{\partial t_y^{mw}} = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial e_z}{\partial r_{31}^{mw}} = \frac{\partial e_z}{\partial r_{32}^{mw}} = \frac{\partial e_z}{\partial r_{33}^{mw}} = \frac{\partial e_z}{\partial t_z^{mw}} = 0 \quad (3.21)$$

上述繁雜的數學式子展開，則可得到一系列簡單的矩陣方程式：

$$\begin{bmatrix} \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11}^{mw} \\ r_{12}^{mw} \\ r_{13}^{mw} \\ t_x^{mw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i x_{mi} \\ \sum_{i=1}^n x_i y_{mi} \\ \sum_{i=1}^n x_i z_{mi} \\ \sum_{i=1}^n x_i \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{21}^{mw} \\ r_{22}^{mw} \\ r_{23}^{mw} \\ t_y^{mw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i x_{mi} \\ \sum_{i=1}^n y_i y_{mi} \\ \sum_{i=1}^n y_i z_{mi} \\ \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}z_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right)^2 & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n y_{mi}\right) & \left(\sum_{i=1}^n z_{mi}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{31}^{mw} \\ r_{32}^{mw} \\ r_{33}^{mw} \\ t_z^{mw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i x_{mi} \\ \sum_{i=1}^n z_i y_{mi} \\ \sum_{i=1}^n z_i z_{mi} \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

第四章 實驗裝置與實驗步驟流程

4-1 實驗裝置

- (1)德國PCO. Image公司所製造之PixelFly HiRes CCD Camera
- (2)美國Mad City Lab's Nano-LR200 Piezoelectric Translation (PZT)
- (3)日本SIGMA-KOKI公司所製造之移動平移台Motorized Stages
SGSP26-50(X)以及SGSP20-20(XY)
- (4)美國Computar公司所製造之廣角透鏡Wide-angle lens (M1614-MP)
以及Fujinon公司製造之TV LENS (CF50HA)
- (5)本實驗室自行設計之1-D、2-D正弦圖案光柵(條紋週期192um)
- (6)台灣巨晰光纖公司所製造的鹵素燈白光光源箱
- (7)表面非常平整的校正鋼板
- (8)條紋間距為3mm的校正條紋鋼板

本實驗的CCD影像擷取系統，採用德國PCO. Image公司製造的PixelFly HiRes CCD Camera，規格如附錄中表4-1，為單色1360(H) x 1024(V) pixels，具有12bits(4096色)灰階分布，畫素大小為4.65um x 4.65um，掃描速率為16 MHz，掃描區域大小為6.3 mm x 4.7mm。影像擷取系統的用途在於擷取即時的條紋扭曲影像資訊，本實驗中，以LabVIEW圖控式程式語言控制CCD作影像擷取的動作，將影像存檔至電腦硬碟。機器視覺為自動化光學檢測之靈魂所在。

推動光柵執行相位移動作的儀器是採用美國Mad City Lab's Nano-LR200 PZT，規格如附錄表4-2，其為高解析度之壓電平移台，分別為單軸(X軸與Y軸)，X軸的移動範圍由0到204.535um，Y軸的移動範圍由0到205.225um，解析度高達1.2nm，可依實驗需要而執行非常精準地線性位移。最大水平荷重0.5kg、最大垂直荷重0.2kg，輸出電壓值範圍由0.0V到150V，輸出的電流值為150mA，藉由類比介面調整輸入電壓值的範圍(由0.0V到10.0V)操控PZT，使其推動光柵而執行Phase-shifting之目的。

日本SIGMA-KOKI公司所製造之移動平移台Motorized Stages SGSP26-50(X)，規格如附錄表4-3，用於移動待測物體的深度位置。在圖形配準實驗步驟時，則是以Motorized Stages SGSP20-20(XY)，規格如附錄表4-4，替代PZT來達成二維光柵圖案的相位移。其中SGSP26-50(X)的最大移動量為50mm，移動平移台的尺寸大小為80mm x 80mm，最大負重12kg，最大的移動速度為30mm/sec。SGSP20-20(XY)的最大移動量為20mm，尺寸大小為60 mm x 60mm，最大負載重4kg，最大的移動速度為15mm/sec。此二種Motorized Stages的共同缺點，都是源自於機械設計上於相反方向做運動時誤差值太大，誤差值大約在4um左右，因此猜測可能是導致後續實驗上，出現非原始條紋輪廓起伏誤差情形發生的部分原因。

本研究所採用的光源投射系統為台灣巨晰光纖公司所製造的鹵素燈白光光源箱LSH100，此為本三維形貌量測系統成本低廉之最主要原因。鹵素燈白光光源燈泡的壽命為1500小時(亮度調至最大)，其可提供穩定且經濟的照明系統。

射出的光源透過聚光透鏡聚成平行光打在光柵上後，再由美國Computar公司所製造之廣角透鏡M1614-MP，規格如附錄表4-5，將條紋圖案發散至待測物體上。此廣角透鏡之焦距為16mm，工作距離至少需要30 cm，最大的孔徑比(Max. Aperture Ratio)為1比1.4，水平方向視野角度為30.8°、垂直方向視野角度為23.4°。

本研究之另一個投影鏡頭為Fujinon公司生產的焦距50mm、1inch直徑之CF50HA TV LENS。規格如附錄表4-6所示，CF50HA投影透鏡可解決M1614投影鏡頭放大倍率過大，導致單一週期投影條紋pixels數過大的問題，同時具有增加量測視野範圍的功效。

圖形配準實驗中，採用本實驗室同仁自行精密設計的二維圖案光柵投影，如圖4.1，其為光強度波動函數 $I = 1/2 + 1/4 \cos \phi_x + 1/4 \cos \phi_y$ 所組成之正弦條紋圖案，圖4.2顯示其二維的傅立葉展開頻譜。相較於以往圖形配準實驗使用的一維圖案光柵，如圖4.3，其多了Y軸方向的正弦函數波動，因此可提供更多有用的資訊，使得圖形配準時不需要麻煩地旋轉光柵90°，僅需沿著X軸與Y軸各作一次相位移，即可得

到整張圖形之二維相位值，使得整套量測系統全自動化的目標得以達成，大大地節省實驗量測時間。

校正系統的實驗步驟中，使用表面非常平整的校正鋼板以及間距3mm的校正條紋鋼板。如2-3節所述，藉由上述校正工具而可求得「相位－縱深」以及「縱深－側向」之關係式。

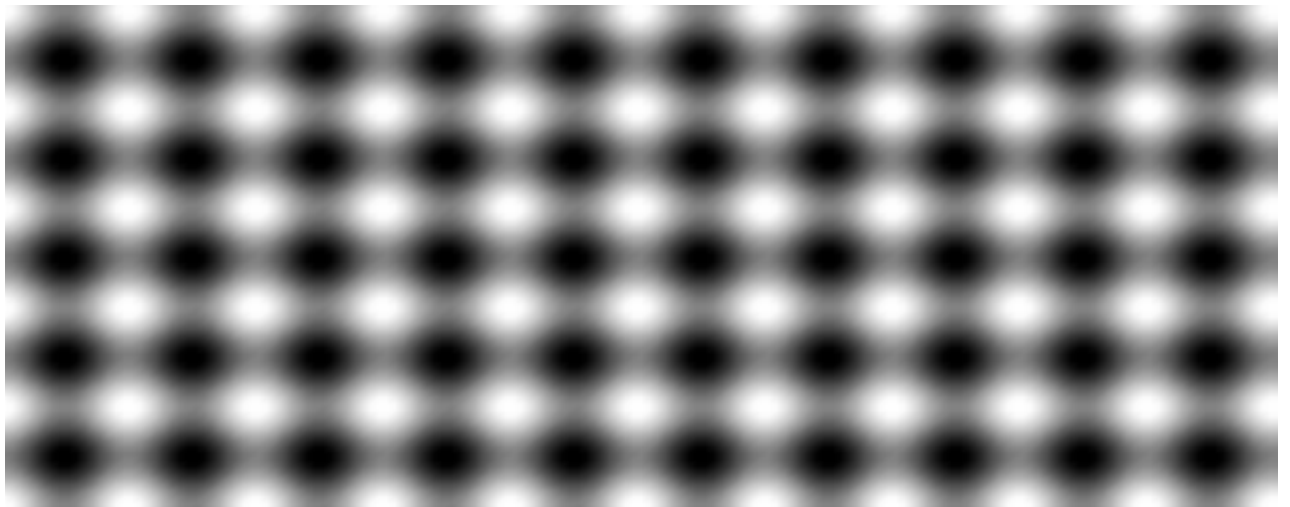


圖4.1 二維圖案光柵投影

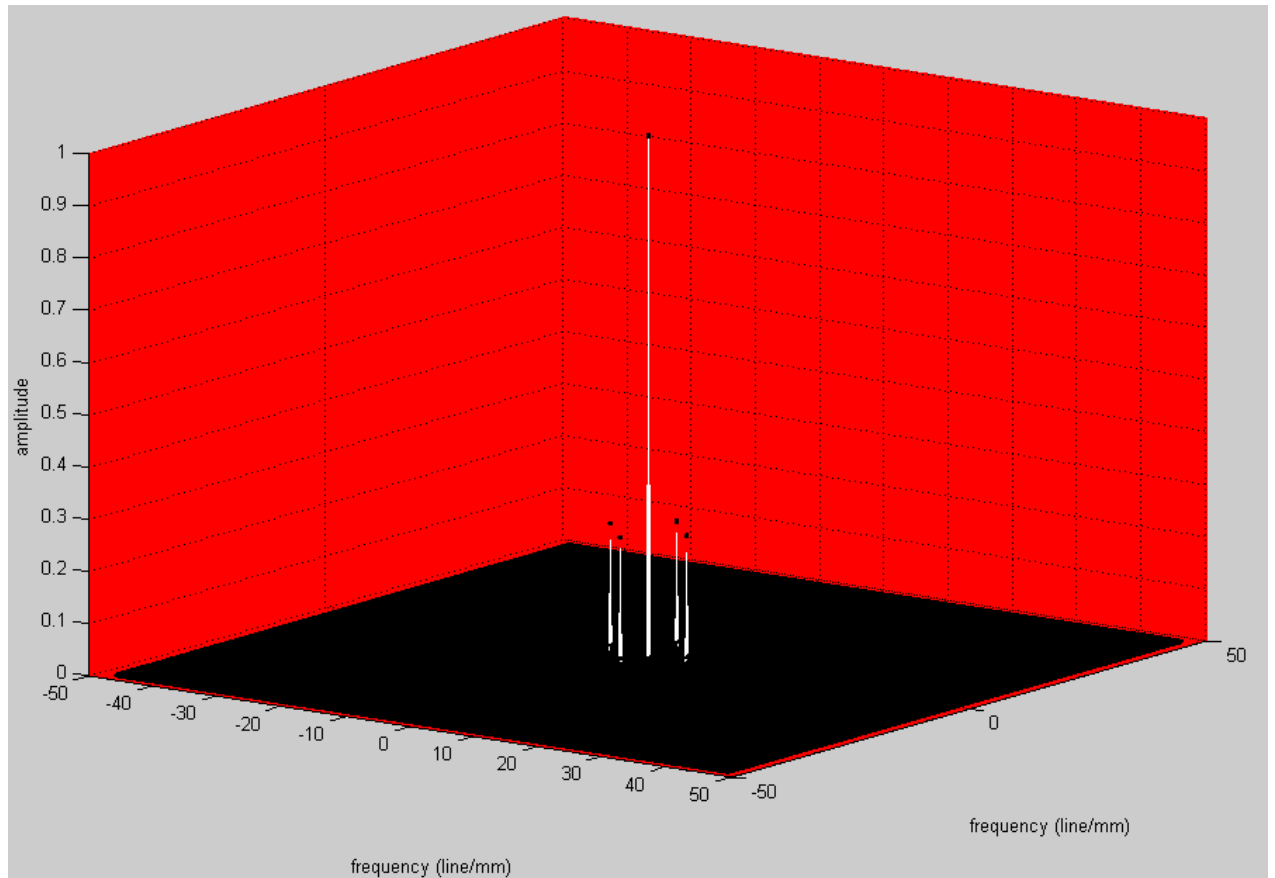


圖4.2 二維圖案傅立葉展開頻譜



圖4.3 傳統圖形配準用之一維圖案光柵投影

4-2 實驗步驟流程

4-2-1 程式流程：

本實驗所有硬體儀器控制，皆由LabVIEW圖控式程式語言自動化操控(CCD擷取影像資訊、PZT執行光柵條紋相位移動作以及使用移動平移台移動待測物體至不同深度位置)，由程式求解得其展開相位值(φ_u)，再以C++程式將後續校正步驟及圖形配準動作程式化。最後，將二側圖形之座標系統轉換為共同參考座標系統，以Render surface software描繪出融合後完整的三維形貌。流程如圖4.4所示：

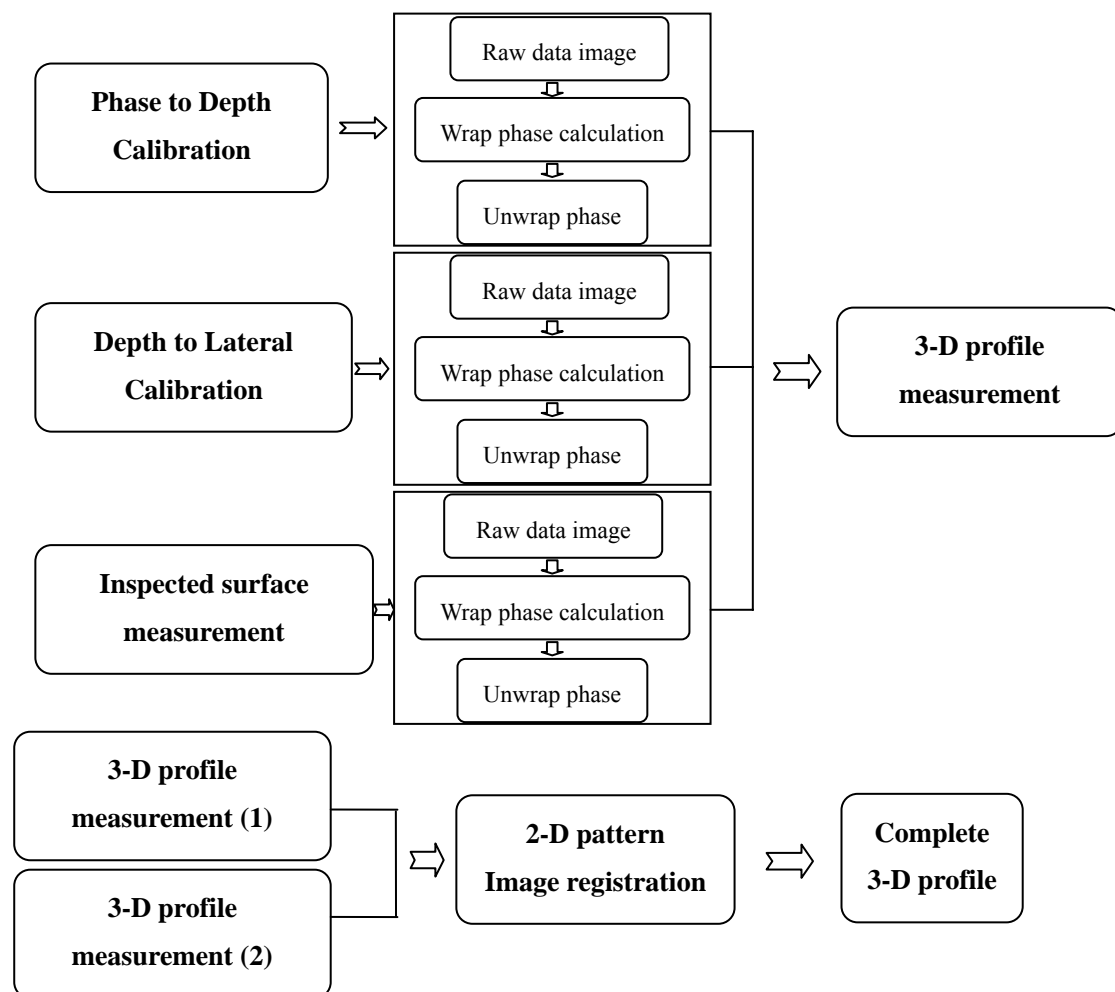


圖4.4 實驗流程圖

4-2-2 校正系統實驗步驟：

1. 「相位-縱深」的校正

首先，將平整的鋼板置於移動平移台SGSP26-50(X)之縱深 Z_0 上，由鹵素燈射出光源，透過聚光透鏡聚成平行光，打入一維圖案光柵而投影條紋，經由廣角透鏡發散到平整的鋼板上，再逐步將鋼板往前移動，由縱深 Z_1 …移至縱深 Z_{20} (共20步)，一維圖案光柵放於PZT上(移動PZT即可達成投影條紋之相位移目的)，移動平移台的縱深每移動一步則PZT做一遍相位移，其中PZT每做一遍相位移時CCD Camera隨即拍下五張照片，每張照片都記錄下一維圖案光柵投影條紋扭曲的位移，重覆上述實驗步驟直到鋼板往前移動到縱深 Z_{20} (共20步)，而後可由鋼板移動的縱深(Z)(已知)與藉由相位移法求得的展開相位(ϕ)而知縱深(Z)與展開相位(ϕ)的關係式。

2. 「側向」的校正

將預先刻好間距3mm的校正條紋鋼板換上(分別為水平方向與垂直方向的條紋)，擺置於移動平移台之縱深 Z_0 上，鋼板同樣由縱深 Z_1 移動到 Z_{20} (共20步)。不同的是縱深位置每移動一次時僅拍攝一張影像，最後由傅立葉轉換式(FFT)求得相位並展開得到縱深(Z)與X軸位置以及縱深(Z)與Y軸位置的關係式。

4-2-3 圖形配準系統實驗步驟:

1.

鹵素燈射出光源，透過聚光透鏡聚成平行光，打入二維圖案光柵而投影條紋，經由廣角透鏡發散到待測物體上。在此，利用Motorized Stages SGSP20-20(XY)替代PZT來達成二維圖案光柵的相位移。在不同視野的二側局部表面量測實驗中，分別先沿著橫軸方向相位移之後，再沿著縱軸方向相位移。

2.

經由4-2-2節校正後即可得知，每側圖形畫素位置的3D座標點與其所對應的展開相位(ϕ)之關係，藉由比對不同圖形的展開相位(ϕ)可得知，二側圖形互相重疊區域所對應之個別畫素位置座標點，其實是實際物體上相同的位置，藉此達到圖形配準之目的。須特別注意的是，左右二側的圖形在作相位展開動作時，必須以投影在物體上相同的條紋位置(在二側圖形中位於不同畫素位置)作展開，並且二側圖形拍攝的視野必須與稍後欲作影像融合系統的形貌量測視野一致。最後要強調的是，此圖形配準量測系統於實驗過程中於光學桌上為固定位置、始終保持不動。

4-2-4 影像融合系統實驗步驟:

1.

由圖形配準實驗中比對二側圖形的展開相位(φ)，可知二側圖形相互重疊區域，所對應之個別畫素位置座標點，其實是實際物體上相同的位置點。由於校正後重疊區域眾多相位等值之各別三維座標點位置已知(通常有成千上萬點)，因此可求得其二側圖形之座標轉換關係式。

2.

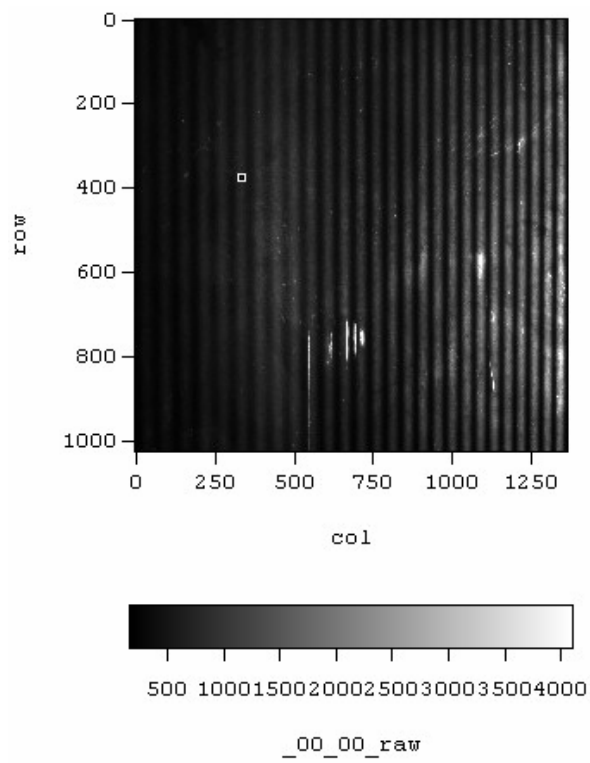
一旦二側圖形的座標轉換關係式已知，則可將二側圖形的座標位置轉換成共同參考座標位置系統。視個別待測物體的形貌資訊而截取二側圖形的局部形貌資訊之後，於共同參考座標系統中融合成完整的三維形貌影像。

第五章 實驗結果與未來研究工作

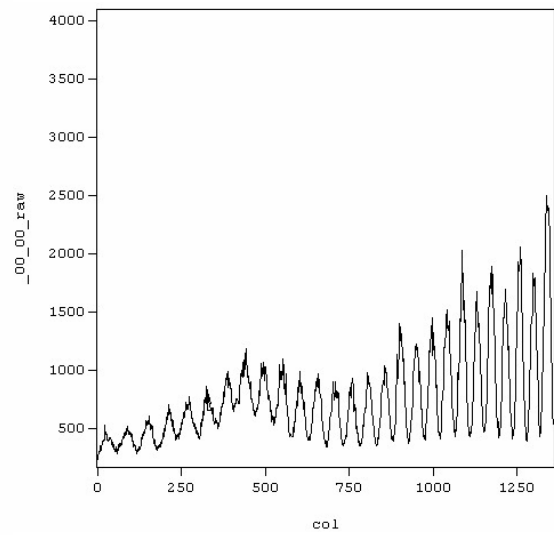
5-1 三維形貌量測實驗之誤差值分析

本節以校正鋼板當作待測物體，進行形貌量測的誤差分析。已知校正鋼板為非常平整的表面，理想情況下所量測之三維形貌影像應為非常平整的表面輪廓圖形。然而，由實驗結果發現，描述單一週期條紋的pixels數，於原始「相位-縱深」校正影像太大時，其三維形貌影像於深度位置上具有明顯的外加條紋形貌起伏。探究其原因也就成了當前的首要目標。

圖5.1顯示以平均pixels數目為50pixels，描述單一週期投影條紋的原始「相位-縱深」校正影像。圖5.2(a)顯示以圖5.1(a)原始「相位-縱深」校正影像當作待測物體之三維形貌圖形，圖5.2(b)為圖5.2(a)沿著橫截面分析的深度位置圖形。由圖5.2(a)可知，描述單一週期條紋的pixels數於原始「相位-縱深」校正影像太大時，會產生於深度位置上具有明顯的外加條紋形貌起伏誤差。以圖5.2(b)為例，平均為150um的非原始鋼板表面之外加輪廓起伏誤差，其中圖5.1(b)縱軸單位:灰階值、橫軸:col pixels，圖5.2(a)三軸的單位皆為:mm、圖5.2(b)縱軸單位:mm、橫軸:col pixels。

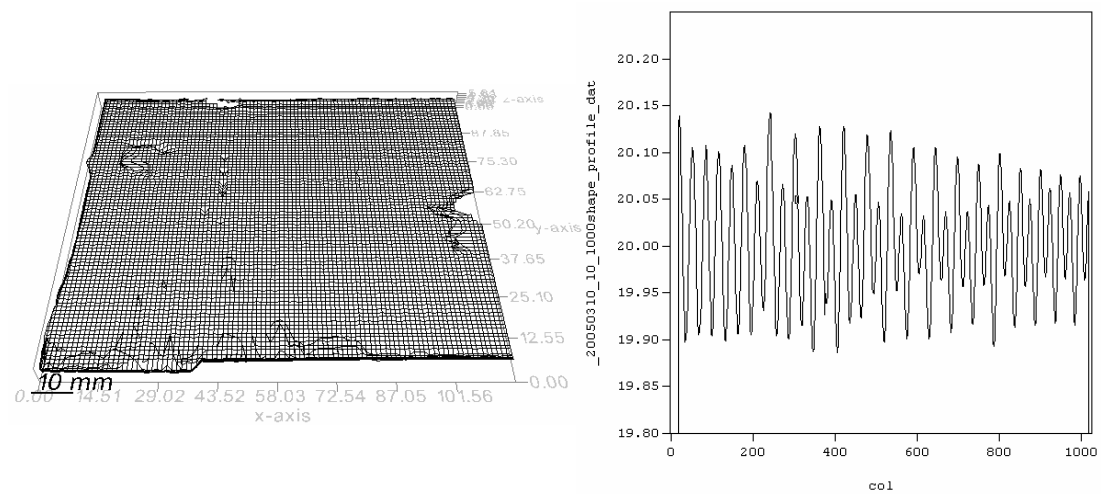


(a)

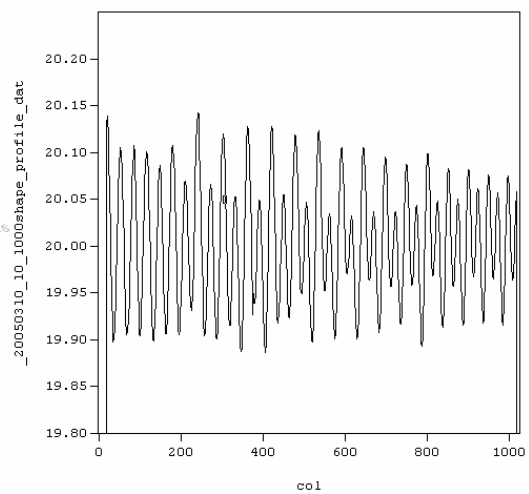


(b)

圖5.1 平均50pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像



(a)



(b)

圖5.2 以圖5.1當作待測物體之三維形貌圖形

由實驗結果得知，描述單一週期條紋的pixels數於原始「相位-縱深」校正影像太大時，輸出的三維形貌影像於深度位置上會有明顯的外加條紋形貌起伏誤差。因此，下面一系列的實驗用來證明，當縮短原始「相位-縱深」校正影像描述單一週期條紋的pixels數時，外加條紋形貌起伏誤差情況會得到顯著地改善。

圖5.3顯示以平均pixels數目為27pixels，描述單一週期投影條紋的原始「相位-縱深」校正影像。圖5.4(a)顯示以圖5.3(a)原始「相位-縱深」校正影像當作待測物體之三維形貌圖形，圖5.4(b)為圖5.4(a)沿著橫截面分析的深度位置圖形。由圖5.4(a)可知，描述單一週期條紋的pixels數於原始「相位-縱深」校正影像仍太大，依然會產生於深度位置上具有明顯的外加條紋形貌起伏誤差。以圖5.4(b)為例，平均為25um的非原始鋼板表面之外加輪廓起伏誤差，將其與圖5.2(b)誤差為150um作比較後，可知縮短描述單一週期條紋的pixels數時，外加條紋形狀起伏的誤差情況會得到顯著地改善。其中圖5.3(b)的縱軸單位:灰階值、橫軸:col pixels，圖5.4(a)三軸的單位皆為:mm、圖5.4(b)縱軸單位:mm、橫軸:col pixels。

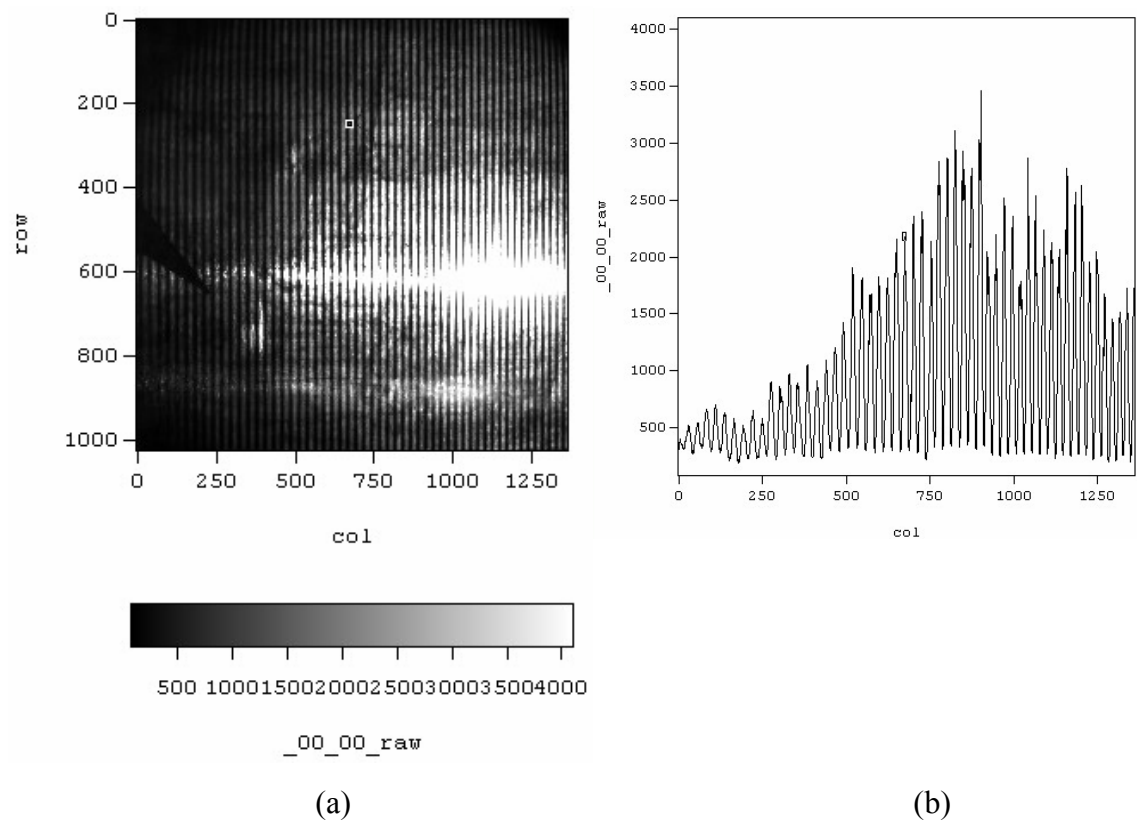


圖5.3 平均27pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像

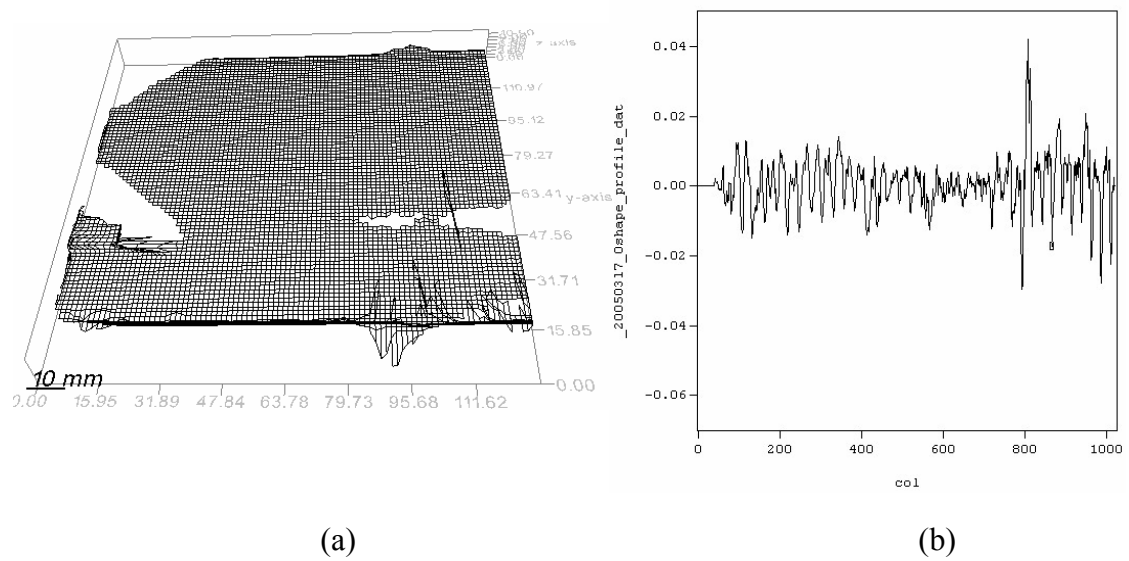
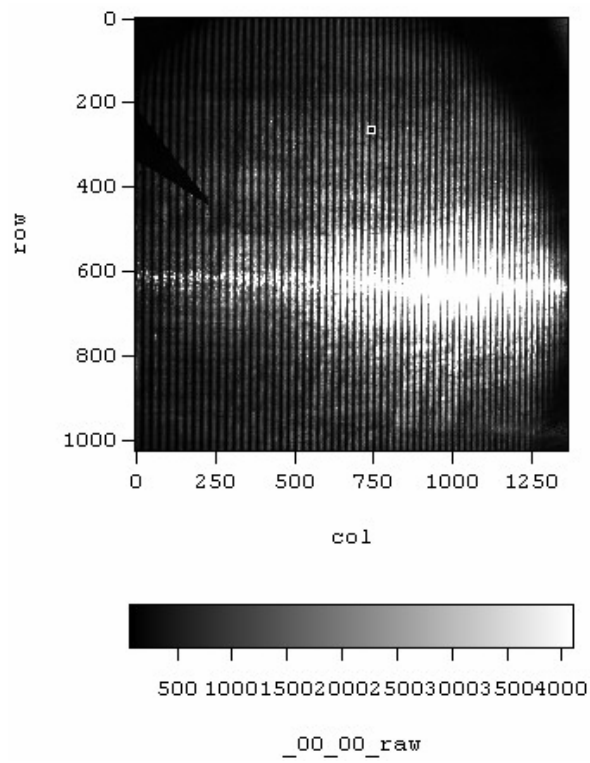


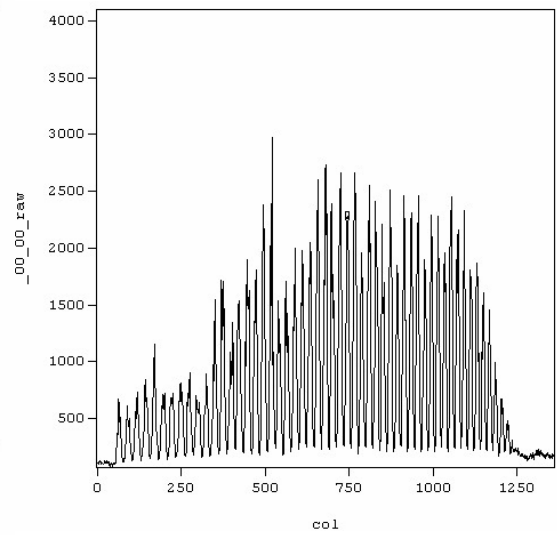
圖5.4 以圖5.3當作待測物體之三維形貌圖形

以上實驗初步證明，當縮短原始「相位-縱深」校正影像描述單一週期條紋的pixels數時，外加條紋形貌起伏誤差情況將會得到顯著地改善。

接下來，將描述單一週期條紋的pixels數，繼續縮短至22pixels。其中，CCD之廣角透鏡與鋼板的工作距離為55cm，校正系統之投影透鏡距離鋼板25cm，投影光源光軸與待測鋼板法線的夾角為 23.5° 。圖5.5顯示以平均pixels數目為22pixels，描述單一週期投影條紋的原始「相位-縱深」校正影像。圖5.6(a)顯示以圖5.5(a)原始「相位-縱深」校正影像當作待測物體之三維形貌圖形，圖5.6(b)為圖5.6(a)沿著橫截面分析的深度位置圖形。由於繼續縮短了單一週期條紋pixels數(由27pixels縮短到22pixels)，產生於深度位置上具有非常明顯的外加條紋形貌起伏的誤差情況漸漸獲得改善。以圖5.6(b)為例，平均為23um的非原始鋼板表面之外加輪廓起伏誤差，將其與圖5.4(b)誤差為25um作比較後，可知縮短單一週期條紋的pixels數時，外加條紋形狀起伏的誤差情況會得到改善。其中圖5.5(b)的縱軸單位:灰階值、橫軸:col pixels，圖5.6(a)三軸的單位皆為:mm、圖5.6(b)縱軸單位:mm、橫軸:col pixels。

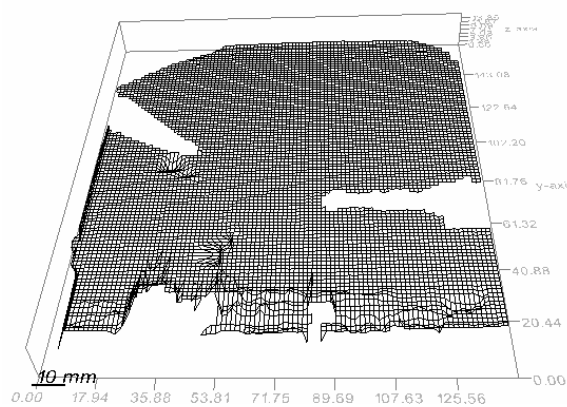


(a)

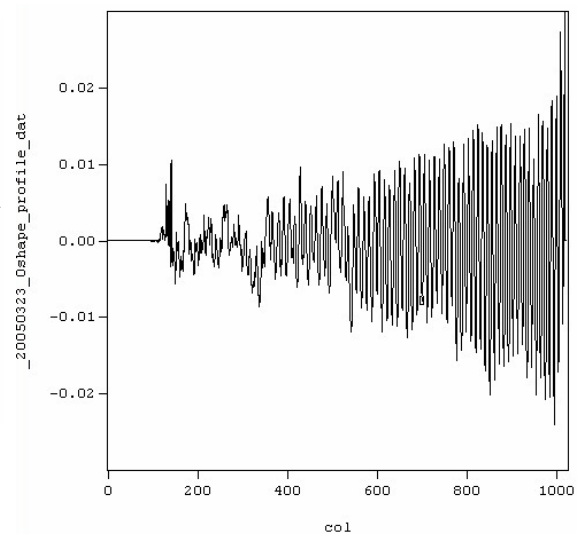


(b)

圖5.5 平均22pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像



(a)



(b)

圖5.6 以圖5.5當作待測物體之三維形貌圖形

重複上述實驗步驟，再次將原始「相位-縱深」校正影像，單一週期條紋的pixels數繼續縮短至20pixel。其中，CCD之廣角鏡頭與鋼板的工作距離為50cm，校正系統之投影透鏡距離鋼板18cm，投影光源之光軸與待測鋼板法線夾角為 26.56° 。圖5.7顯示以平均pixels數目為20pixels，描述單一週期投影條紋的原始「相位-縱深」校正影像。圖5.8(a)顯示以圖5.7(a)原始「相位-縱深」校正影像當作待測物體之三維形貌圖形，圖5.8(b)為圖5.8(a)沿著橫截面分析的深度位置圖形。由於繼續縮短了單一週期條紋pixels數(由22pixels縮短到20pixels)，於深度位置上，具有非常明顯的外加條紋形貌起伏的誤差情況漸漸獲得改善。以圖5.8(b)為例，平均為20um的非原始鋼板表面之外加輪廓起伏誤差，將其與圖5.6(b)誤差為23um作比較後可知，縮短單一週期條紋的pixels數時，外加條紋形狀起伏的誤差情況會得到顯著地改善。其中，圖5.7(b)縱軸單位:灰階值、橫軸:col pixels，圖5.8(a)三軸的單位皆為:mm、圖5.8(b)縱軸單位:mm、橫軸:col pixels。

依此規則，繼續縮短單一週期條紋的pixels數卻發現，單一週期條紋CCD pixels數不可降至太低，否則如圖5.12(b)所顯示，即使降至10 pixels仍會導致較大的誤差值再度出現。圖5.13為八次不同的校正實驗條件下，將外加條紋形貌起伏誤差與單一週期條紋pixels數之關係整理成表。

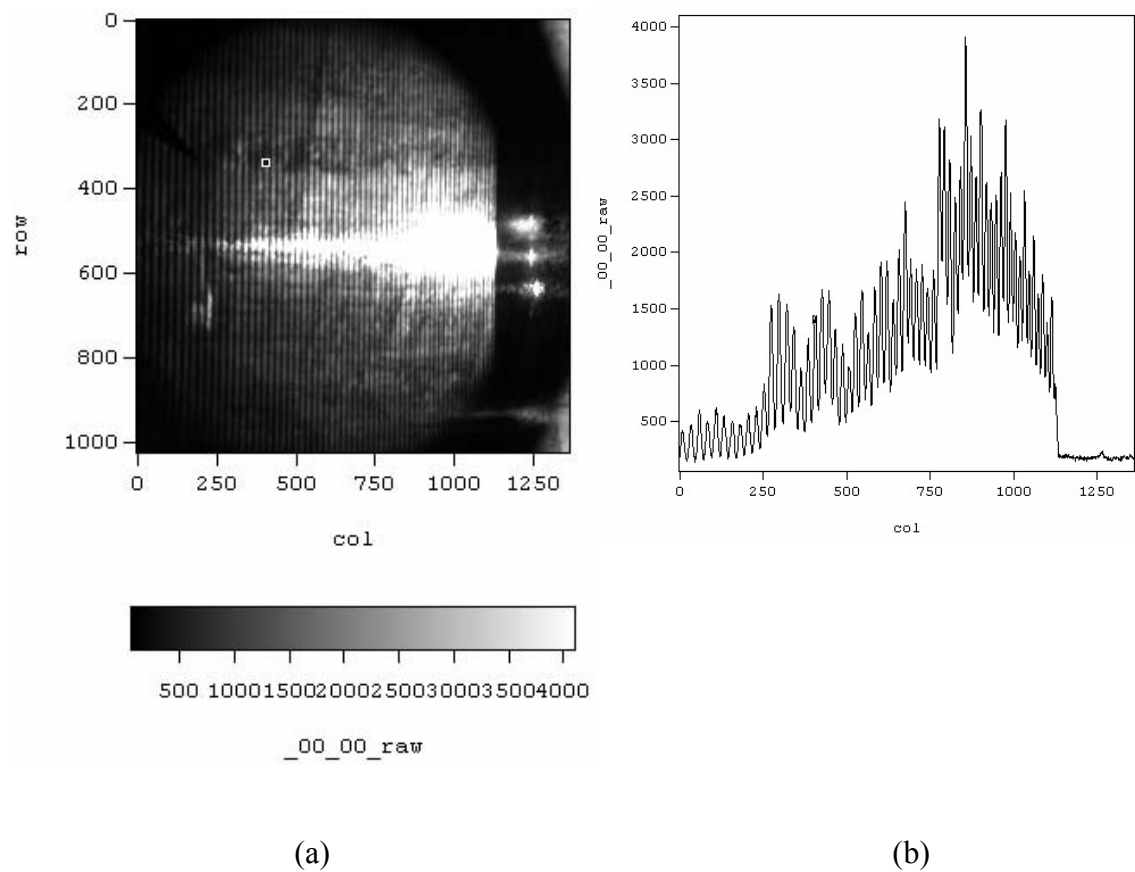


圖5.7 平均20pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像

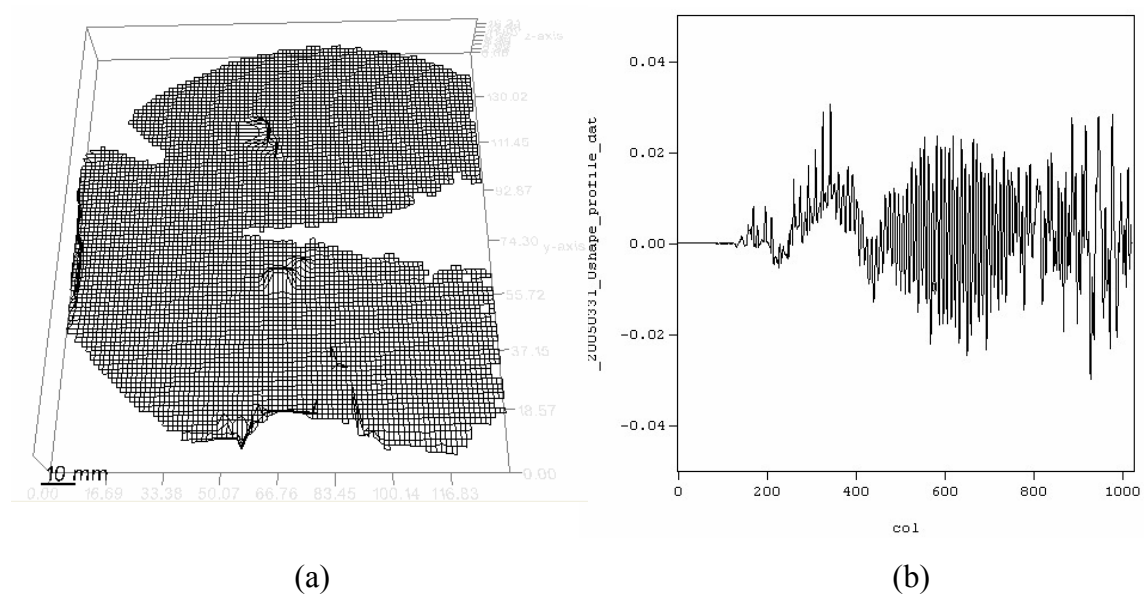
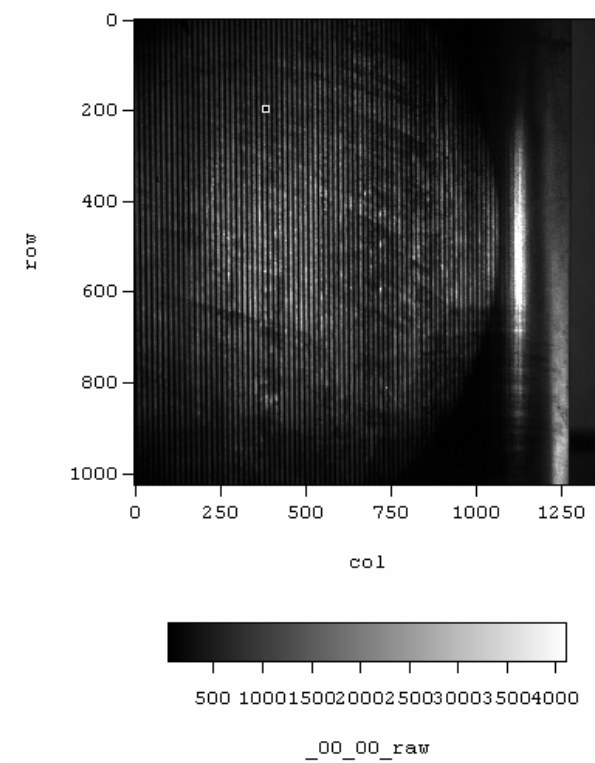
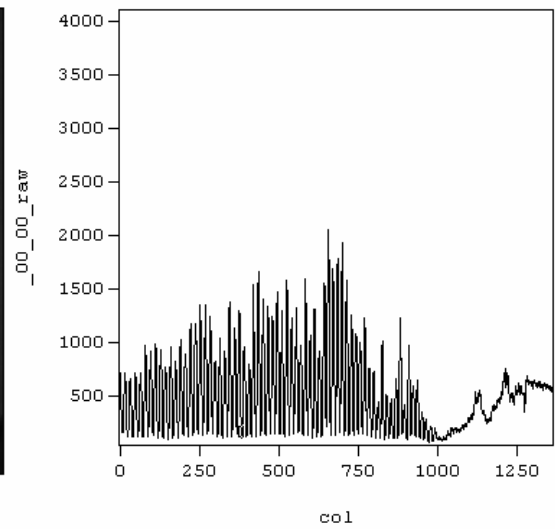


圖5.8 以圖5.7當作待測物體之三維形貌圖形

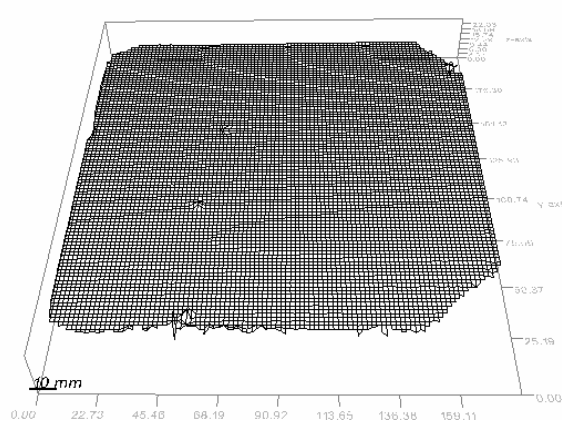


(a)

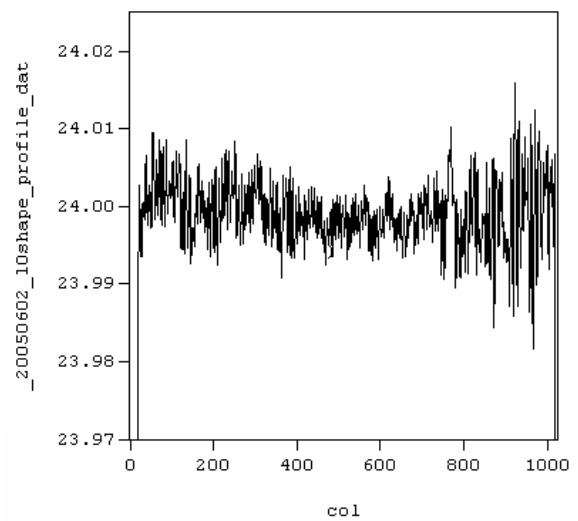


(b)

圖5.9 平均15pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像

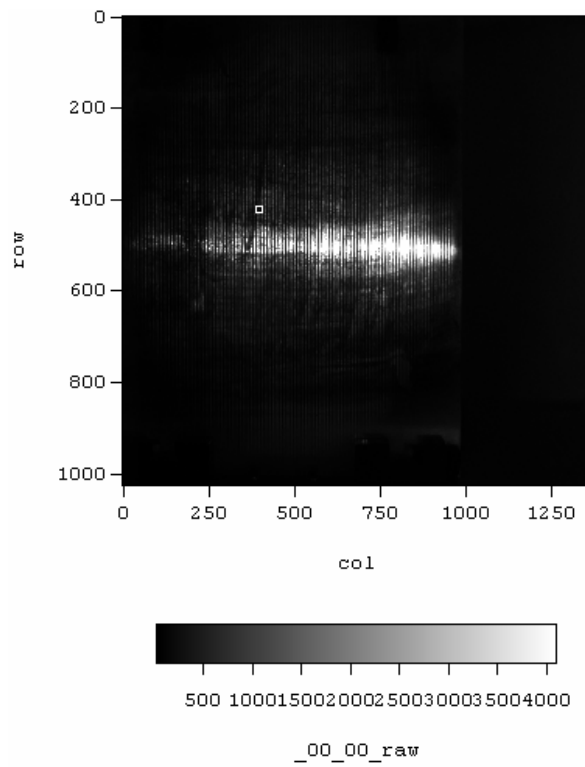


(a)

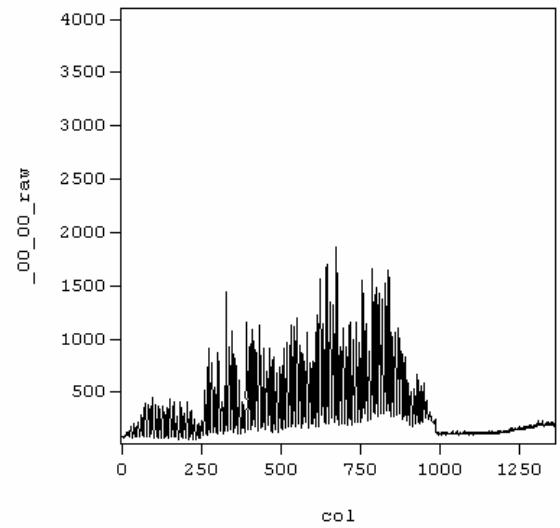


(b)

圖5.10 以圖5.9當作待測物體之三維形貌圖形

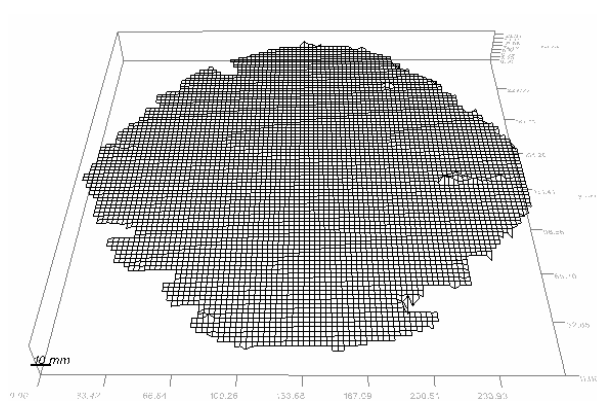


(a)

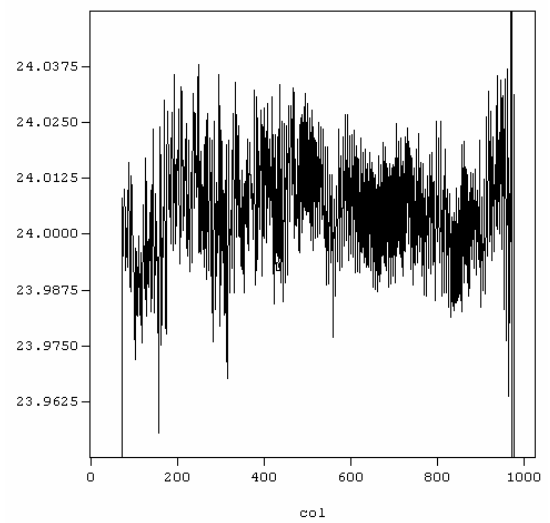


(b)

圖5.11 平均10pixels描述單一週期投影條紋的「相位-縱深」校正影像



(a)



(b)

圖5.12 以圖5.11當作待測物體之三維形貌圖形

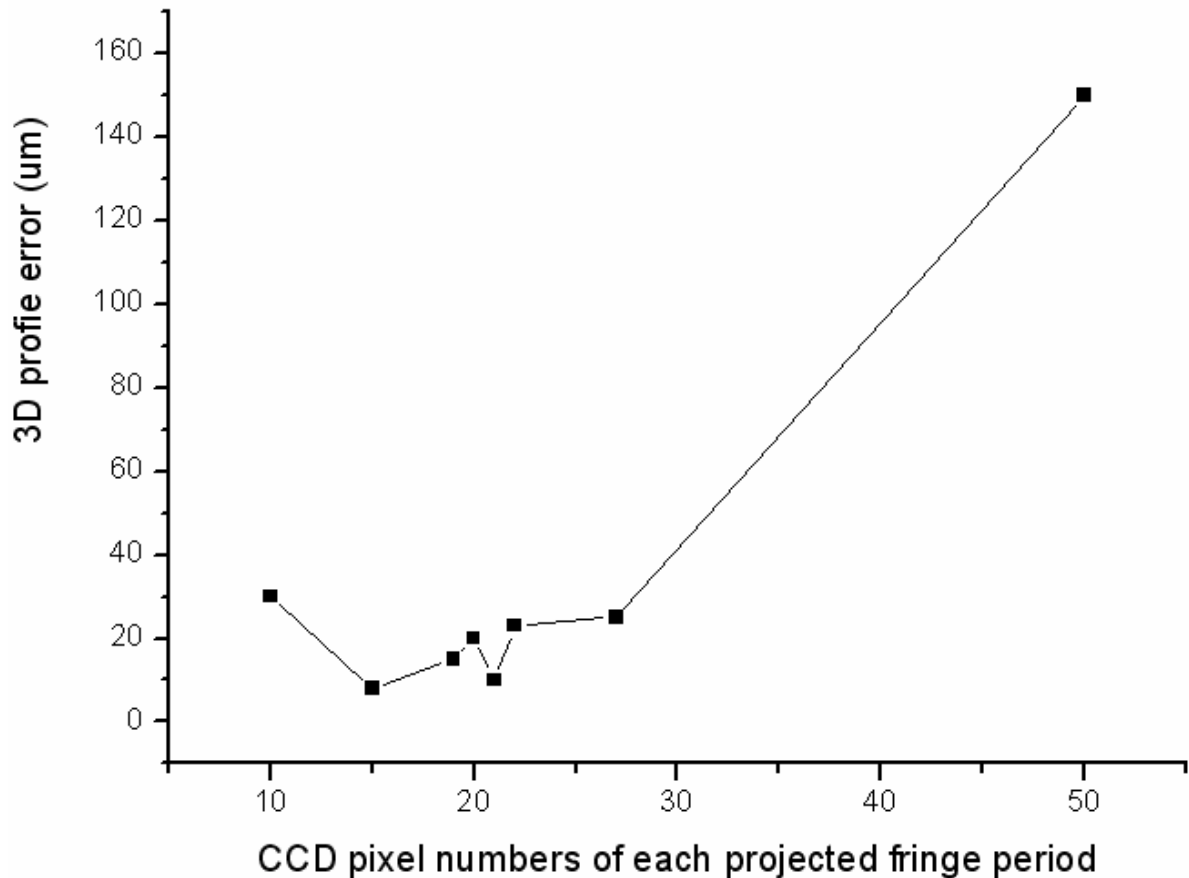


圖5.13 校正影像CCD pixels數與不正常外加輪廓起伏誤差之關係圖

圖5.13為「相位-縱深」校正影像單一週期條紋pixels數與不正常外加輪廓起伏誤差之關係圖，根據實驗經驗可預測降至15~25pixels數目時會有最佳的表現。其中，圖5.8(a)右側影像資訊消失的原因，係由於圖5.7(a)右側校正鋼板所產生的反光效應，導致投影條紋毫無對比可言，因此無法有相位移的效果產生，也就無法得知其相位值。所以，圖5.8(a)三維形貌圖形中無法得知該區域的影像資訊，未來勢必要盡量減少反光效應的產生，避免過多的影像資訊消失。

5-2 三維形貌量測實驗結果(1)

由上述實驗數據可知，縮短單一週期條紋pixels數至15到25pixels時，具有明顯外加條紋形貌起伏的誤差情況將漸漸獲得改善。因此往後皆依據此規則設定實驗條件，圖5.14為本次實驗架構示意圖(CCD工作距離為47.2~51.76cm、M1614投影鏡頭工作距離為20cm)，校正距離為45.6mm。此時大約是以平均24 pixels描述單一週期投影條紋。圖5.15(b)顯示在此實驗架構下，非原始條紋形貌輪廓起伏平均誤差值大約為7 μ m，圖5.16~圖5.19為待測物體的不同視角所量測到的Transform深度圖形及Render surface三維形貌圖形。其中，圖5.17三軸的單位皆為mm。

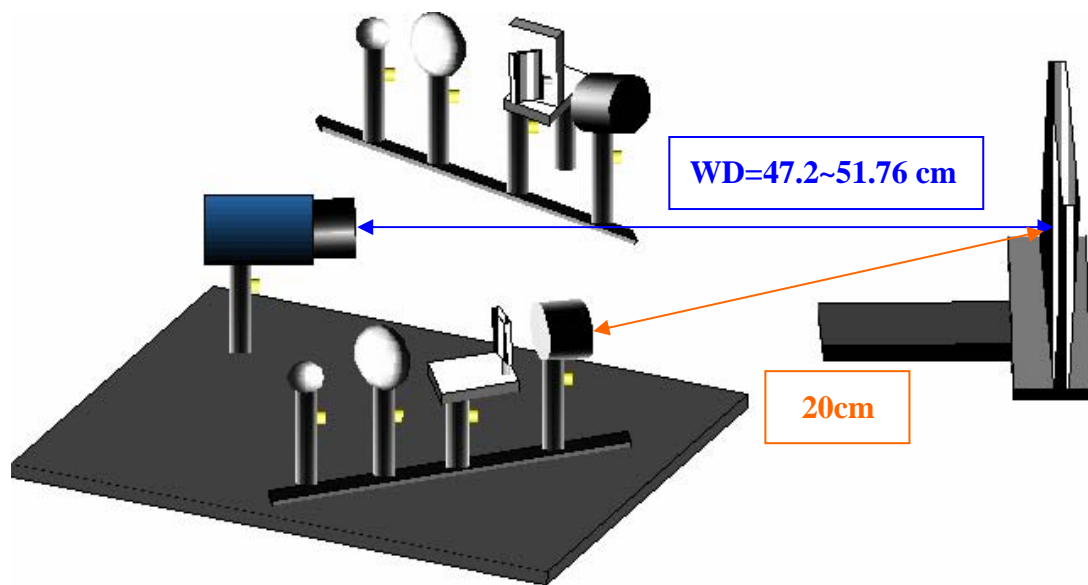
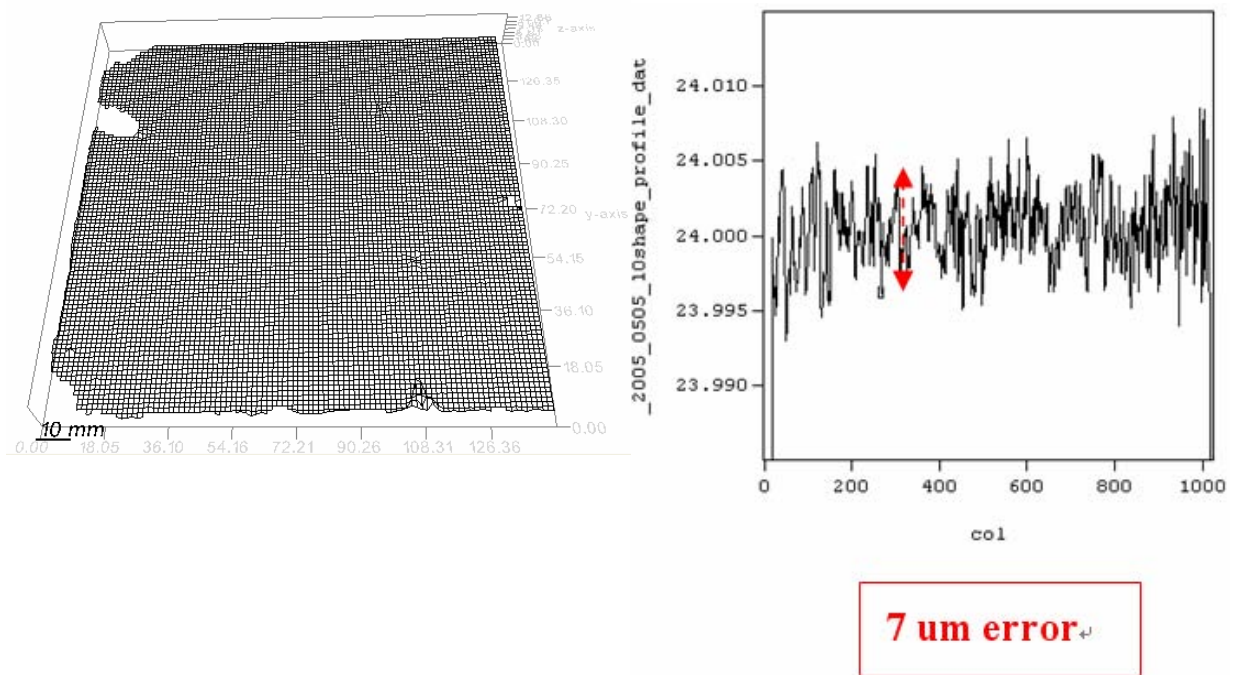


圖5.14 三維形貌量測實驗架構示意圖



(a)

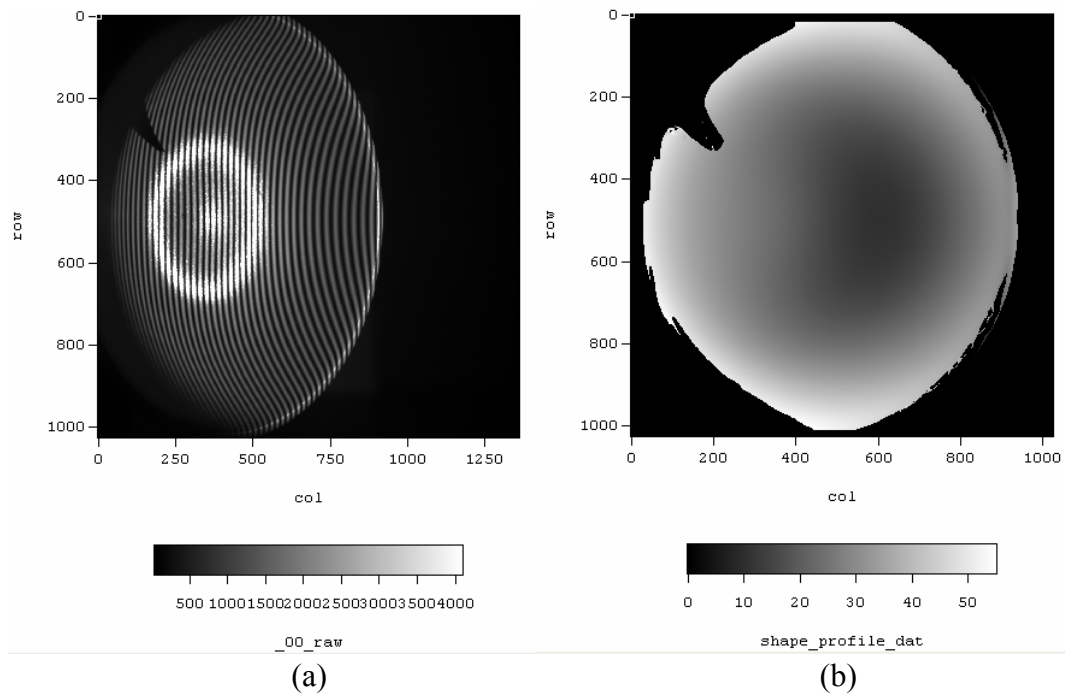
(b)

圖5.15 非原始條紋形貌輪廓起伏誤差值

Calibration 1st: CCD 30~19 pixels catch one period fringe

Calibration 2nd: CCD 20 pixels catch one period fringe

Calibration distance: 45.6mm



S-Bowl-L-Depth profile by transform

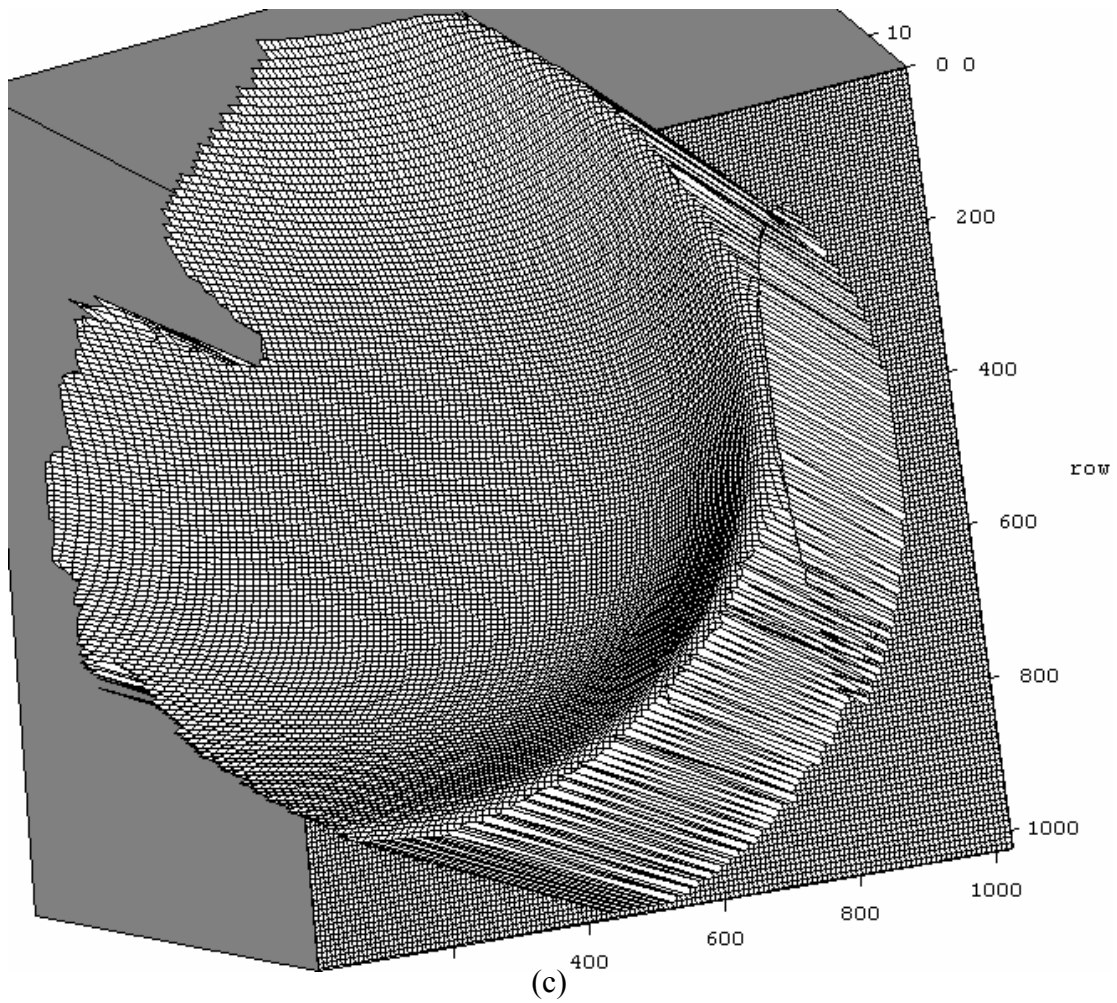
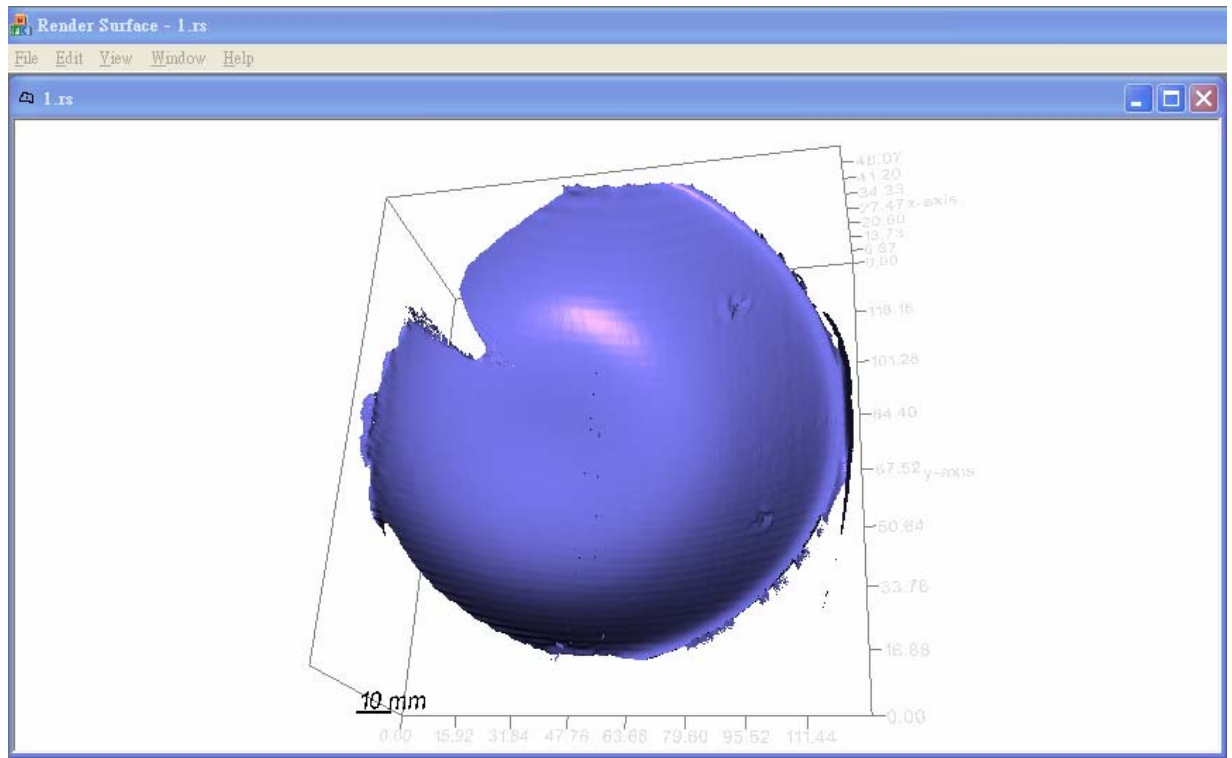
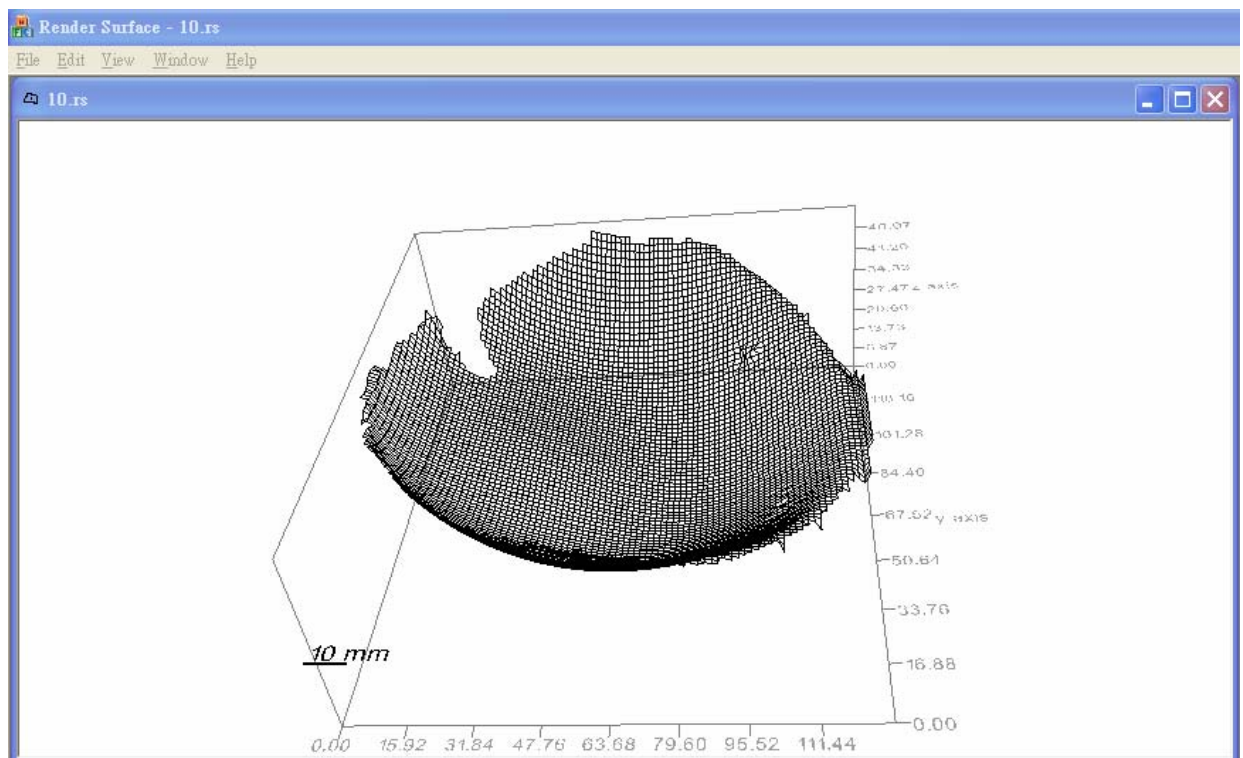


圖5.16 CCD在左側位置(S-Bowl-L)的深度圖形

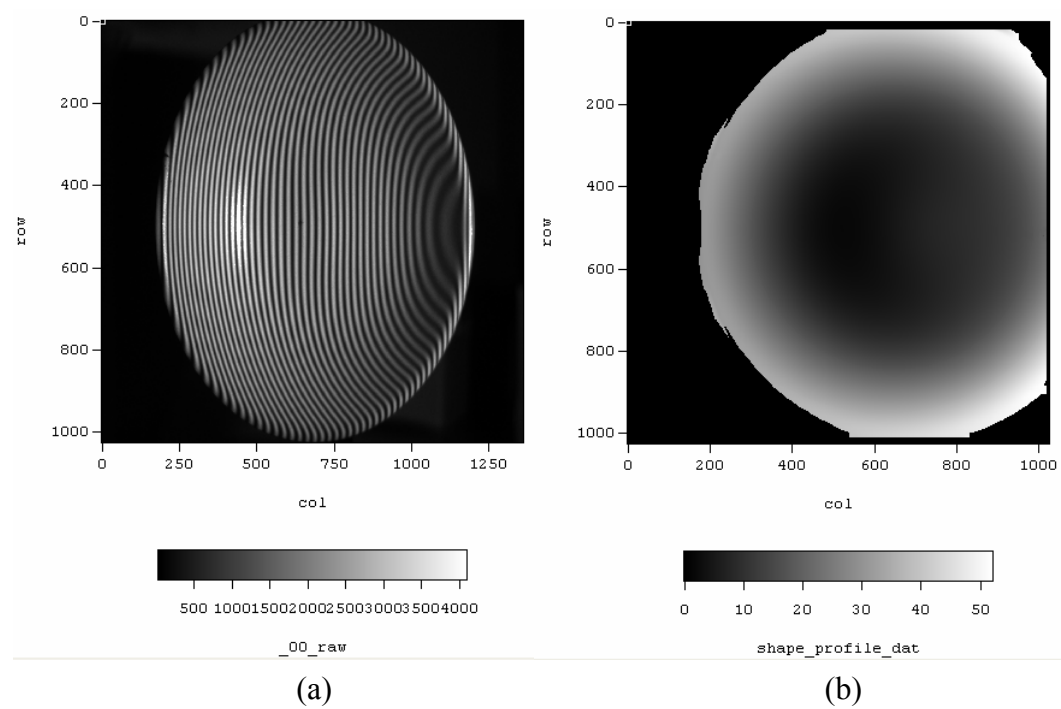


(a)



(b)

圖5.17 CCD在左側位置(S-Bowl-L)的Render surface三維形貌圖形



S-Bowl-R-Depth profile by transform

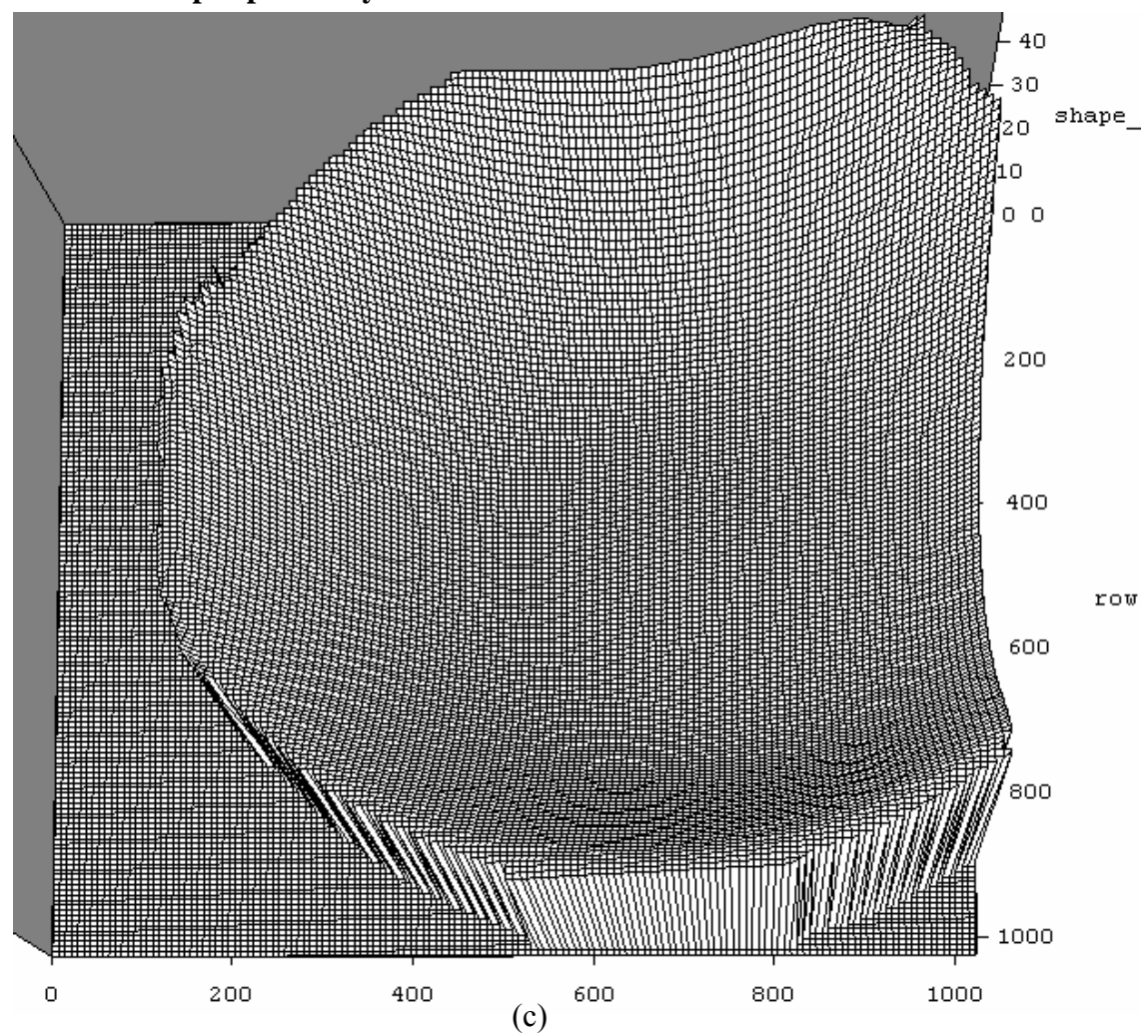
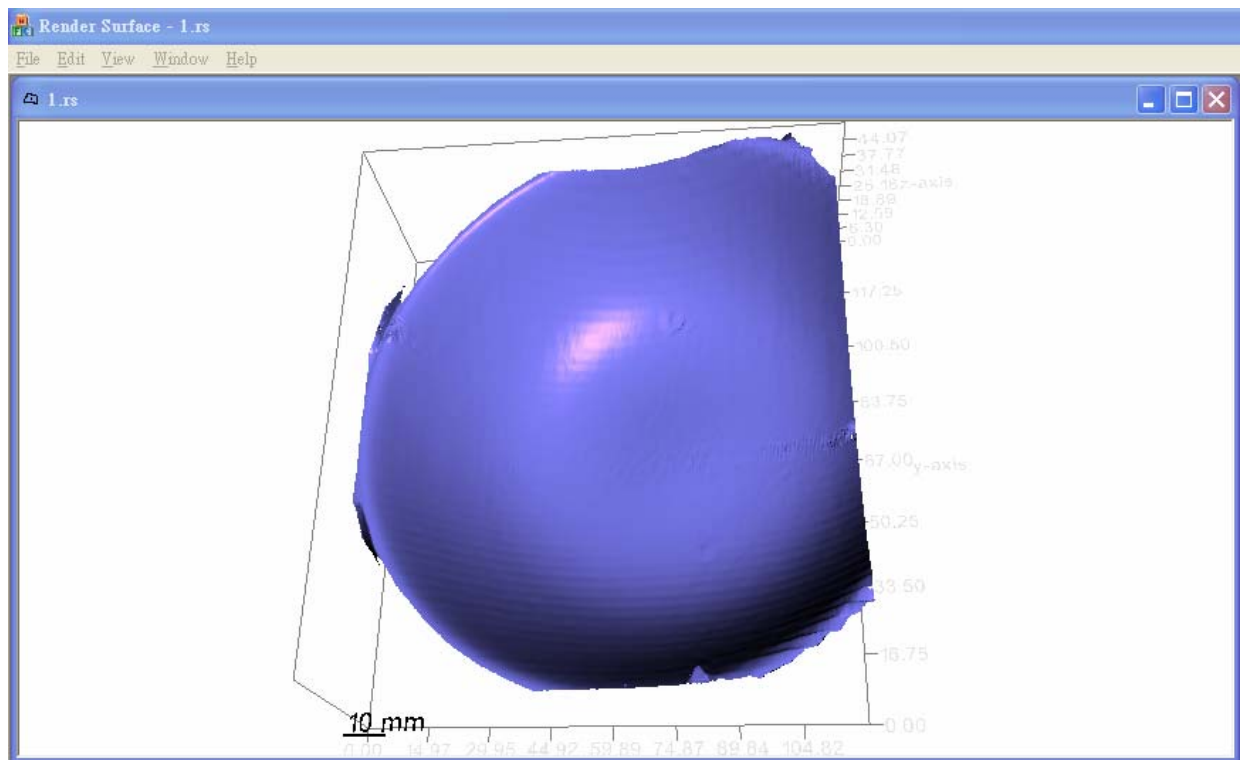
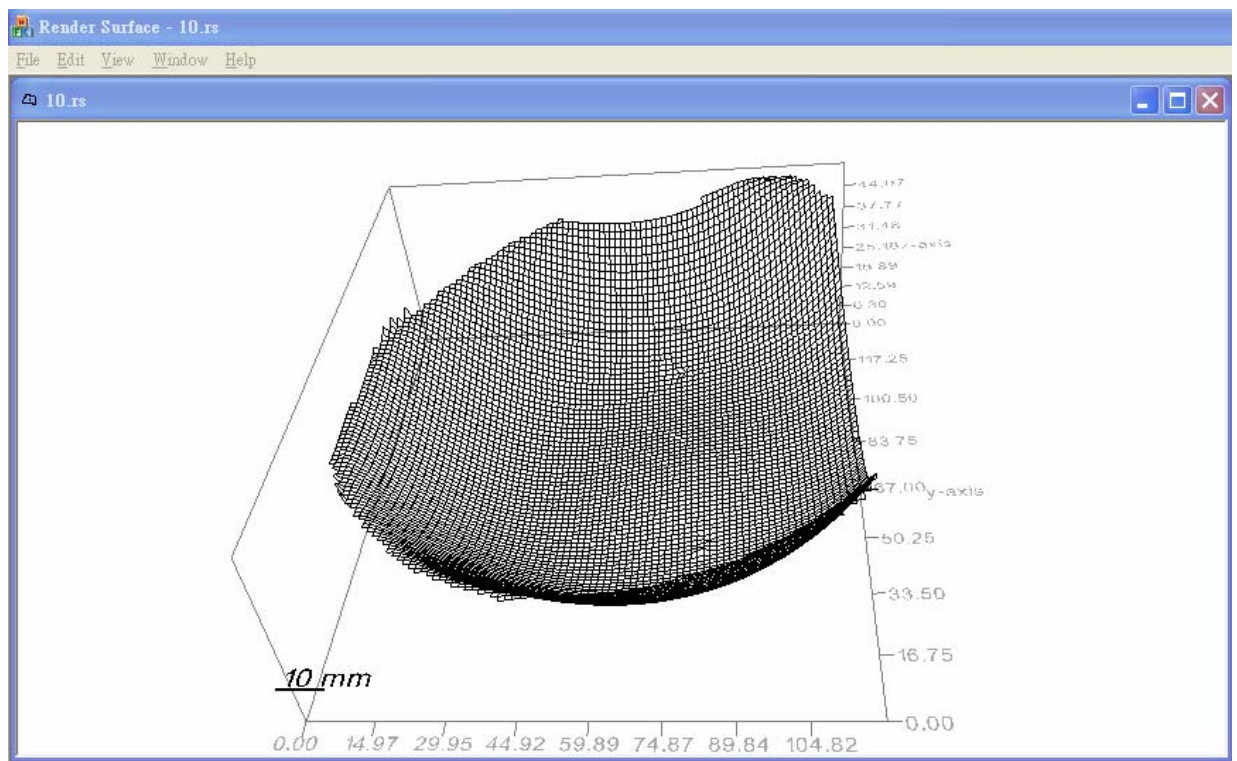


圖5.18 CCD在右側位置(S-Bowl-R)的深度圖形



(a)



(b)

圖5.19 CCD在右側位置(S-Bowl-R)的Render surface三維形貌圖形

5-3 三維形貌量測實驗結果(2)

此次實驗中，將投影透鏡由16mm焦距、2/3inch直徑的M1614 TV LENS改進為焦距50mm、1inch直徑的CF50HA TV LENS，校正距離依舊設定為45.6mm。由光學的基本成像定理可知，較大焦距之CF50HA投影透鏡將使得成像放大倍率縮小、單一週期投影條紋pixels數降至更低、單位面積的投影條紋數目增加，因此可應用於更大尺寸之待測物體量測。圖5.20為本次實驗架構示意圖(CCD工作距離為61.2~65.76cm、CF50HA投影鏡頭工作距離為74cm)。大約是以平均15 pixels描述單一週期投影條紋。圖5.21(b)顯示在此實驗架構下的非原始條紋形貌輪廓起伏，平均誤差值大約為8um，而圖5.22~圖5.25為待測物體不同視角所量測到的Transform深度圖形及Render surface三維形貌圖形。其中，圖5.23以及圖5.25三軸的單位皆為mm。

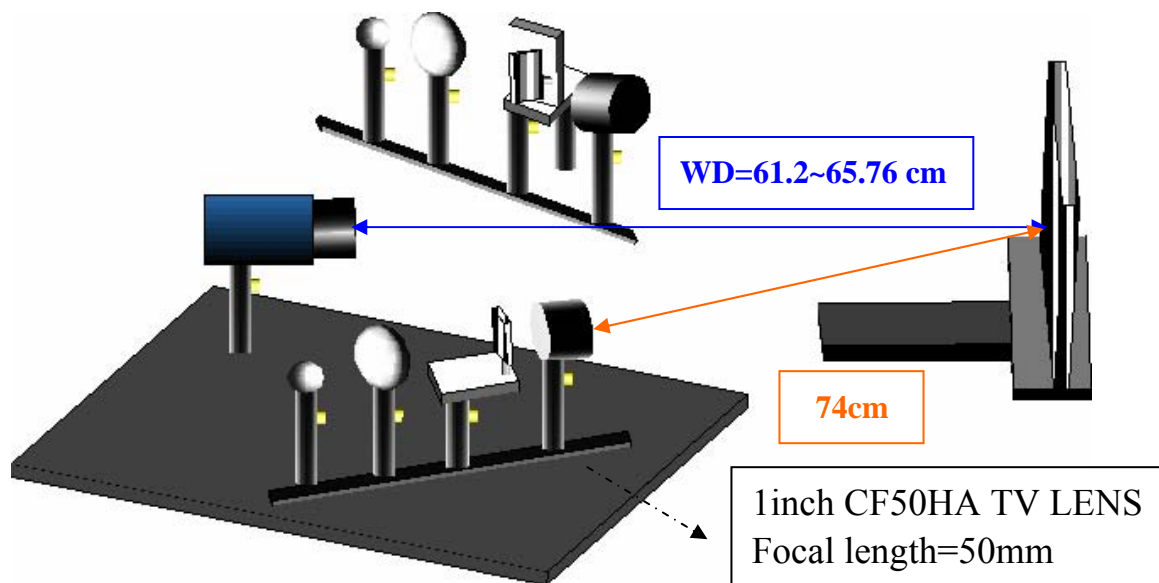
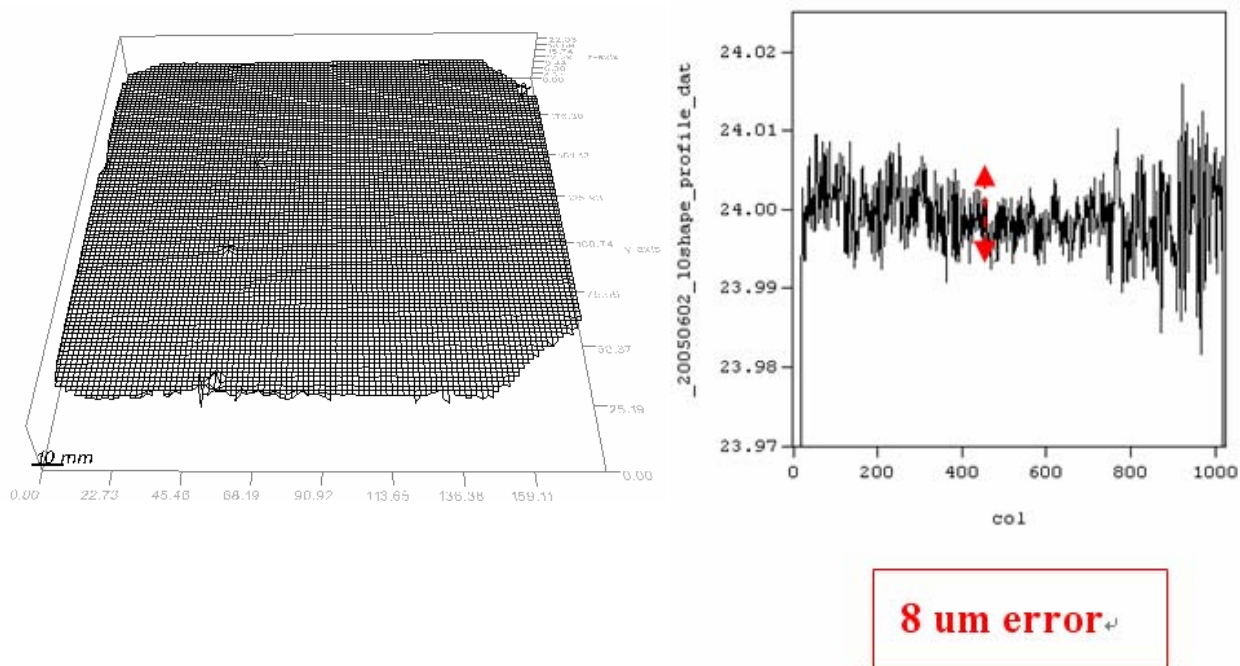


圖5.20 三維形貌量測實驗架構示意圖



(a)

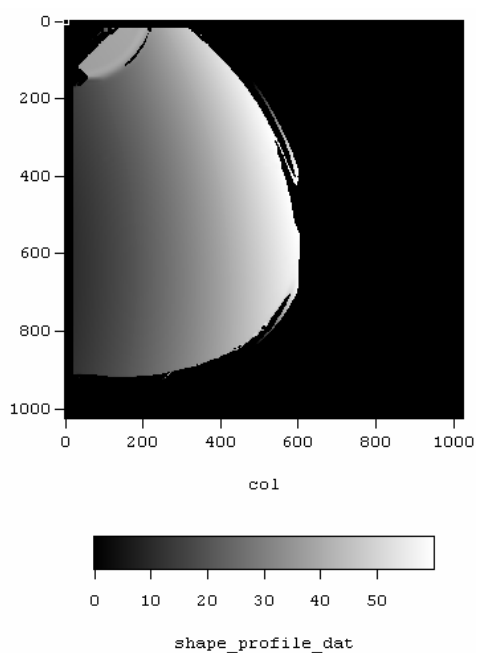
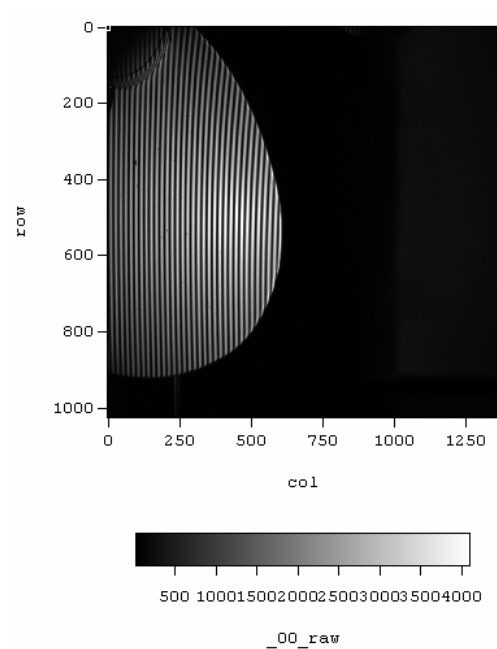
(b)

圖5.21 非原始條紋形貌輪廓起伏誤差值

Calibration 1st: CCD 15 pixels catch one period fringe

Calibration 2nd: CCD 15 pixels catch one period fringe

Calibration distance: 45.6mm



B-Fan-L-Depth profile by transform

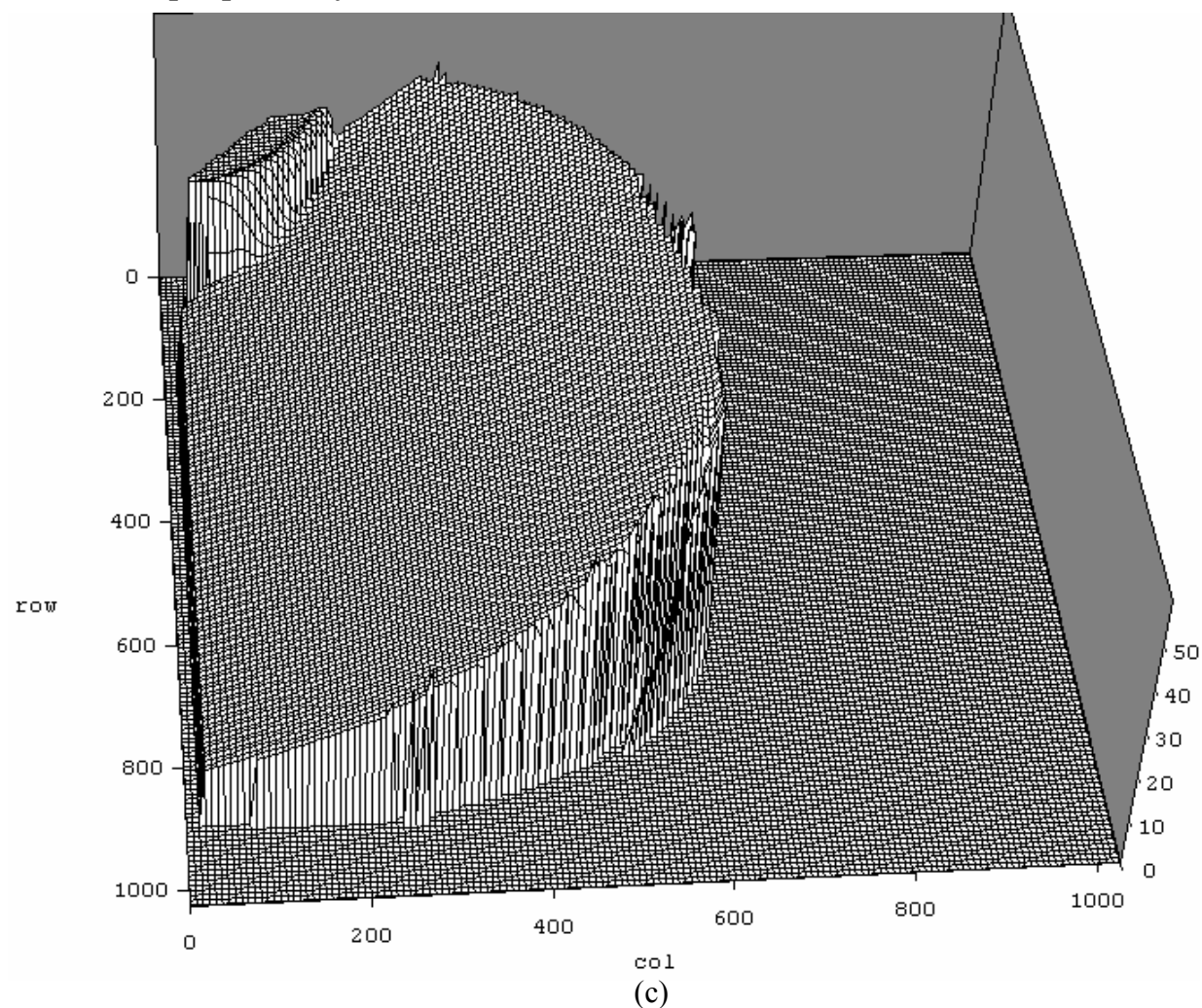
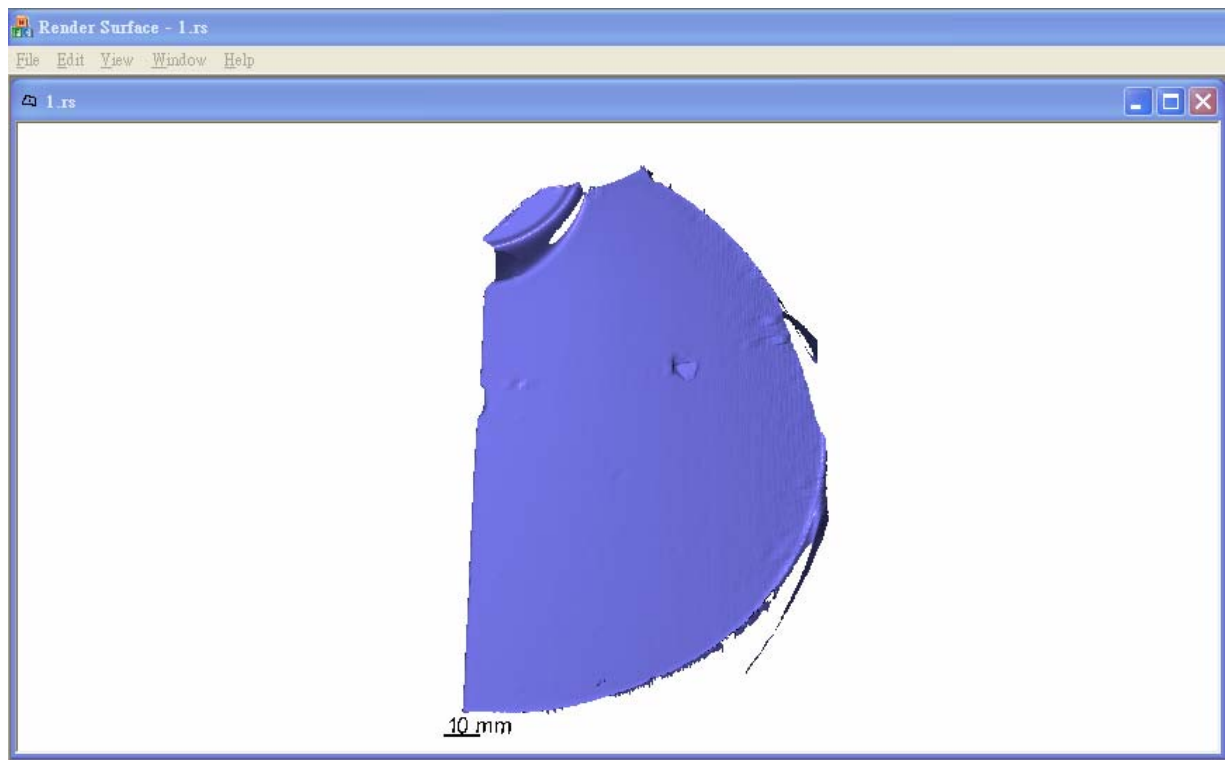
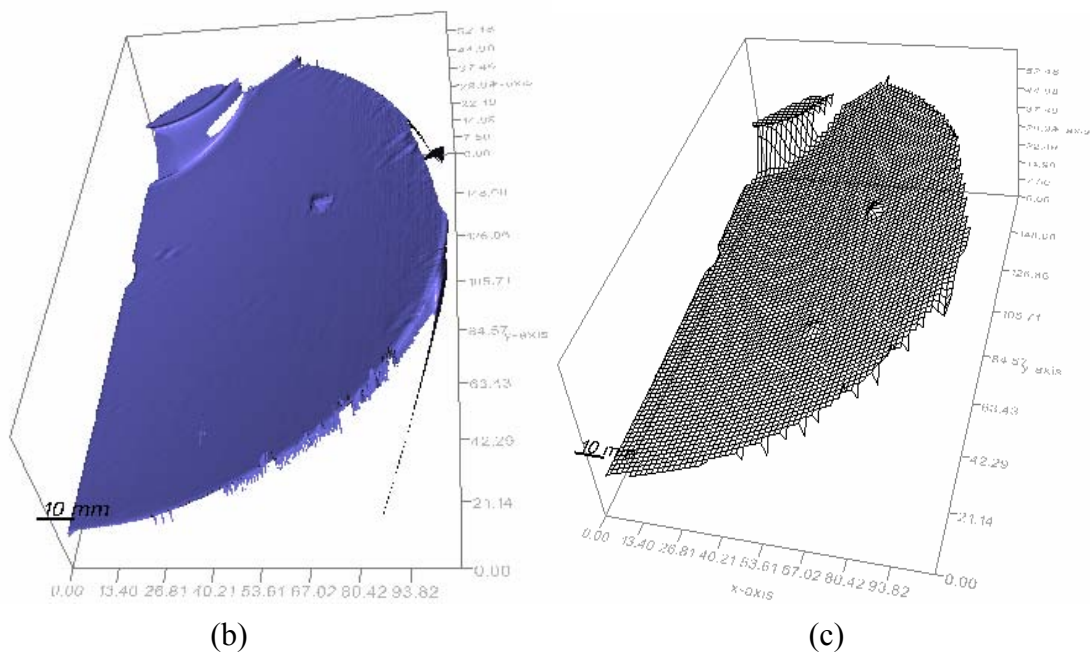


圖5.22 CCD在左側位置(B-Fan-L)的深度圖形



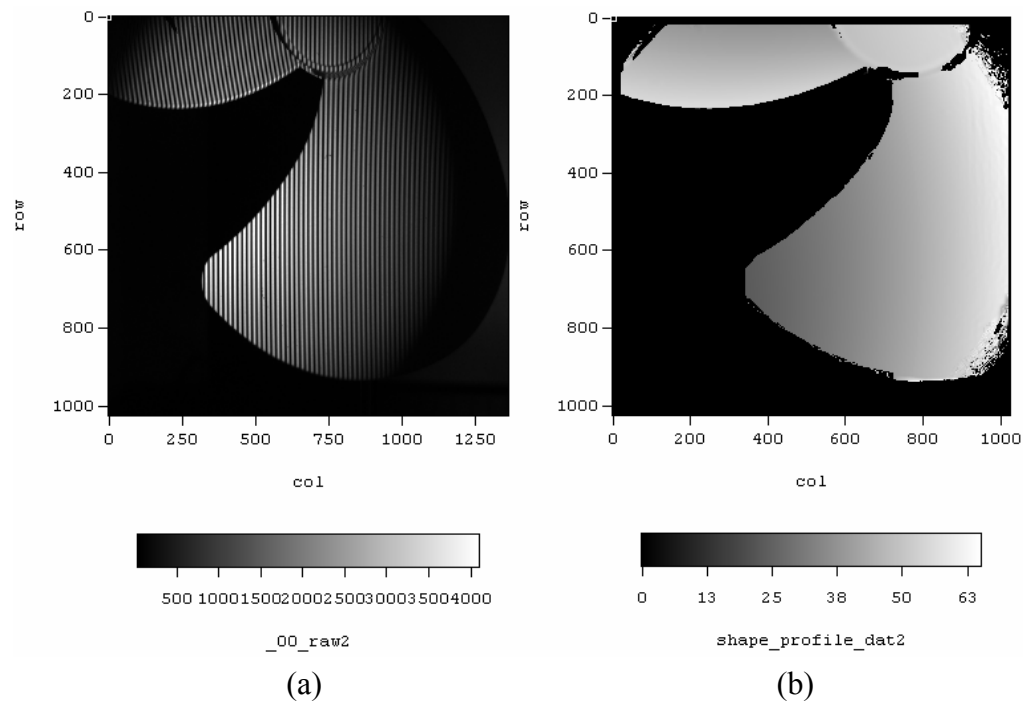
(a)



(b)

(c)

圖5.23 CCD在左側位置(B-Fan-L)的Render surface三維形貌圖形



B-Fan-R-Depth profile by transform

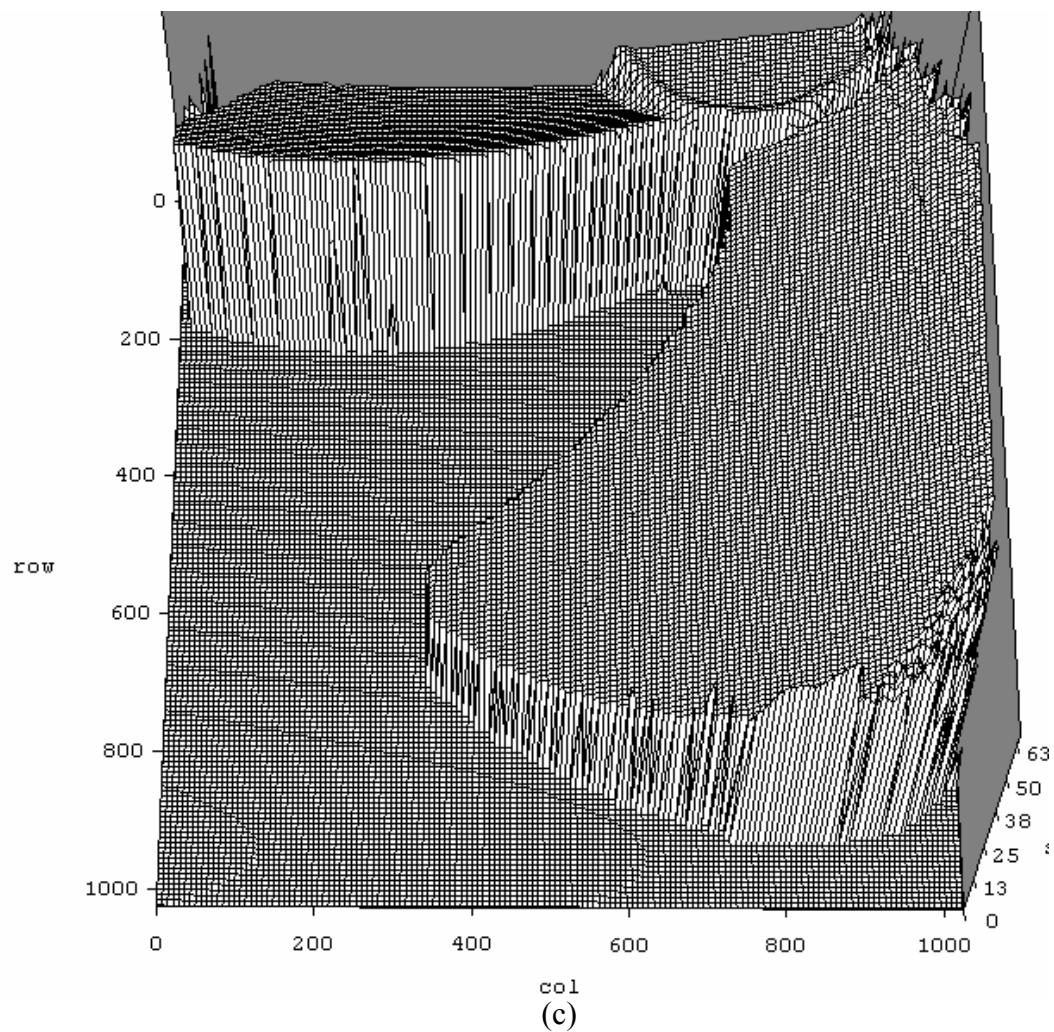
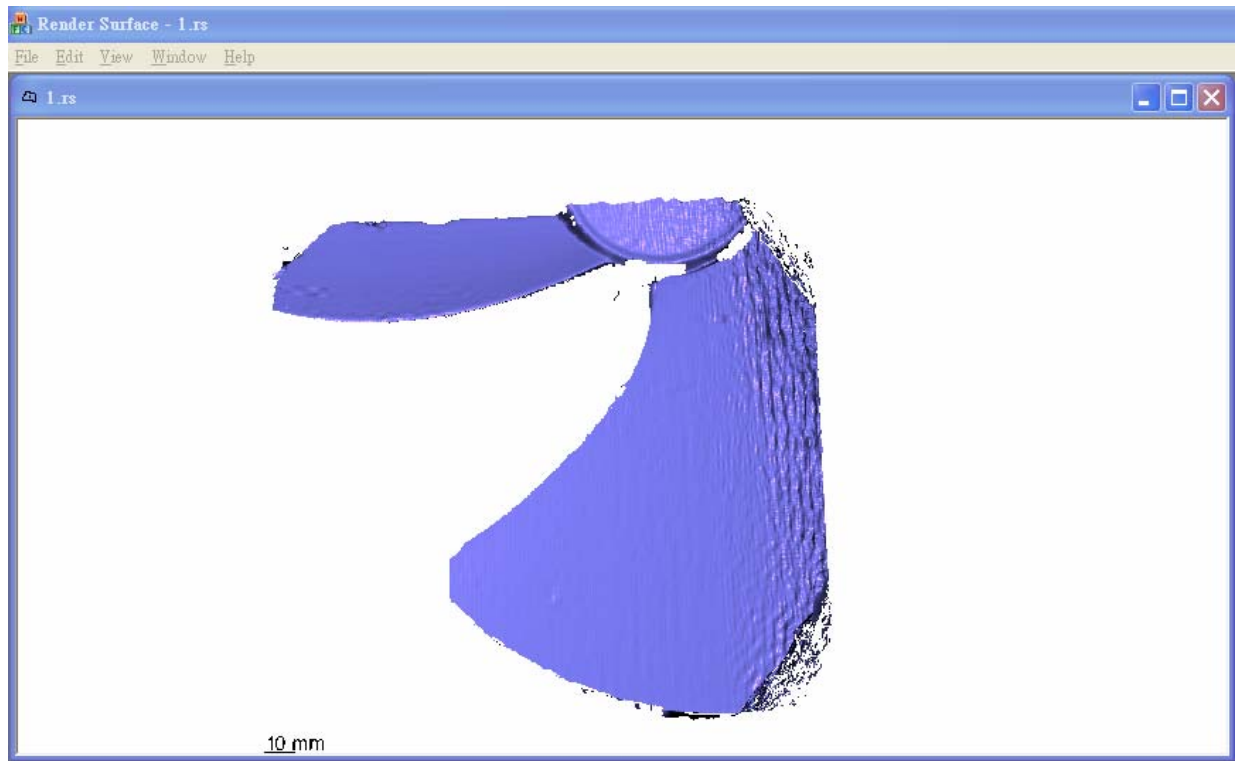
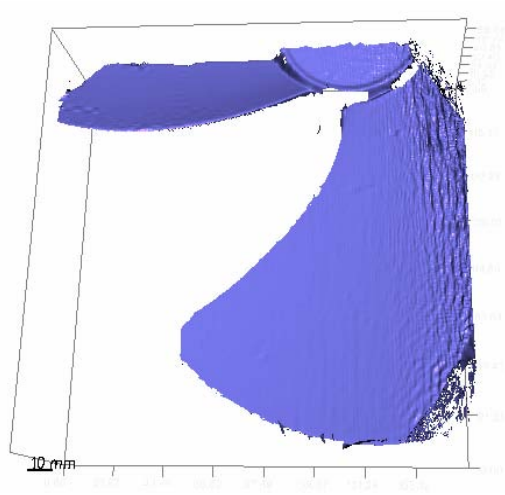


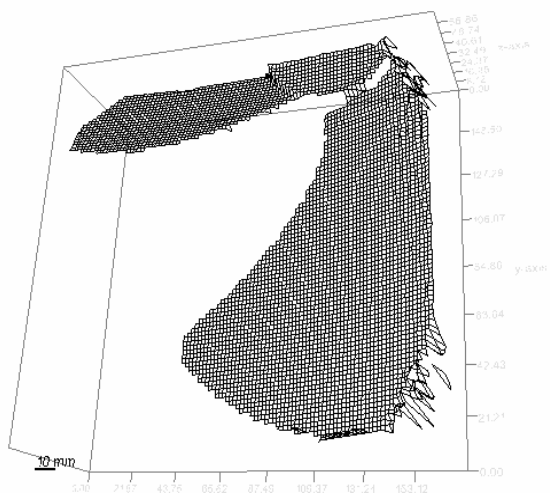
圖5.24 CCD在右側位置(B-Fan-R)的深度圖形



(a)



(b)



(c)

圖5.25 CCD在右側位置(B-Fan-R)的Render surface三維形貌圖形

5-4 圖形配準與影像融合實驗結果

比對兩側圖形水平與垂直方向的展開相位(φ)，可知其互相重疊區域所對應之個別畫素位置座標點，其實是實際待測物體上相同的位置，此即為圖形配準(Image Registration)之目的。由於重疊區域內眾多相位等值之各別三維座標點位置間對應關係已知(通常有成千上萬對)，可得到二側圖形之座標轉換關係式。根據二側圖形之座標轉換關係式，將二側圖形之座標位置轉換成共同參考座標系統。最後，截取二側圖形局部的三維形貌資訊，於共同參考座標系統中融合成完整的三維形貌影像。

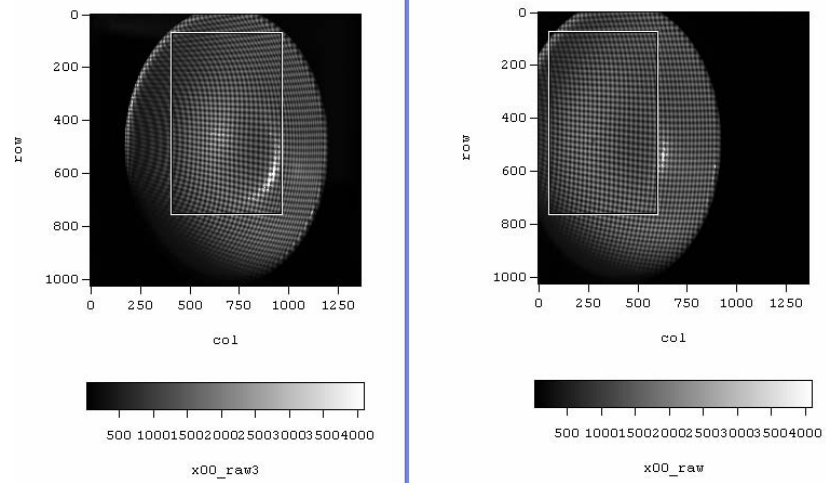
以下將描述5-2節及5-3節局部形貌量測實驗之圖形配準與影像融合結果。圖5.26為5-2節圓碗之左側與右側視野之圖形配準圖形，方框內為二側投影條紋重疊區域，比對二側圖形水平與垂直方向的展開相位(φ)後，可得知其重疊區域所對應之個別畫素位置三維座標點。藉此重疊區域的資訊得到二側座標系統轉換關係式，將圖5.27(R)轉換成與圖5.27(L)相同座標系統的圖5.27(NEW R)，由程式的參數設定，可知其配準的解析度為影像畫素大小的5.96% $[10.5/176]$ ，其中單一週期(2π)投影條紋pixels數為21pixels，相位配準原則： $\pm\pi/176$]。比較圖5.27(NEW R)與圖5.27(L)相同位置點之深度值，可知誤差值為11.9um左右，擷取圖5.27(L)的A區與圖5.27(NEW R)的B區作影像融

合，結果顯示於圖5.28(c)，圖5.29為其不同角度的影像融合圖形。

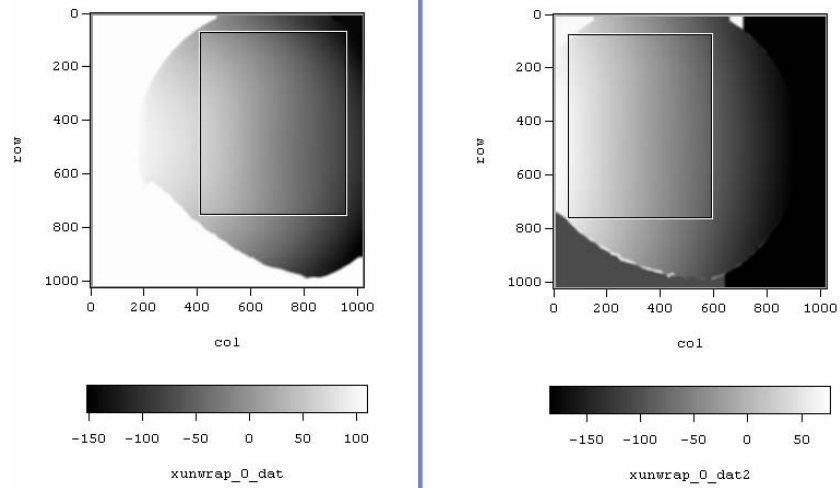
實驗結果顯示，此影像融合技術可以克服當待測物體的尺寸遠大於量測系統的景寬範圍，或是待測物體的表面由於光源投射的角度所造成之陰影，導致訊息短缺...等等問題。

同樣地，圖5.30為風扇之左側與右側視野之圖形配準圖形，方框內仍為二側投影條紋重疊區域，比對二側圖形水平與垂直方向的展開相位(φ)，可知重疊區域所對應之個別畫素位置三維座標點，藉此重疊區域的資訊得到二側座標系統轉換關係式。由程式的參數設定，可知配準的解析度為影像畫素大小的6.3% $[10.5/166]$ ，其中單一週期(2π)投影條紋pixels數為21pixels，相位配準原則： $\pm \pi /166$]，將圖5.31(R)轉換為與圖5.31(L)相同座標系統的圖5.31(NEW R)。比較圖5.31(NEW R)與圖5.31(L)相同位置點之深度值，可知誤差值為0.9um左右，擷取圖5.31(L)的A區與圖5.31(NEW R)的B區作影像融合，結果顯示於圖5.32(c)，而圖5.33為其不同角度的影像融合圖形。

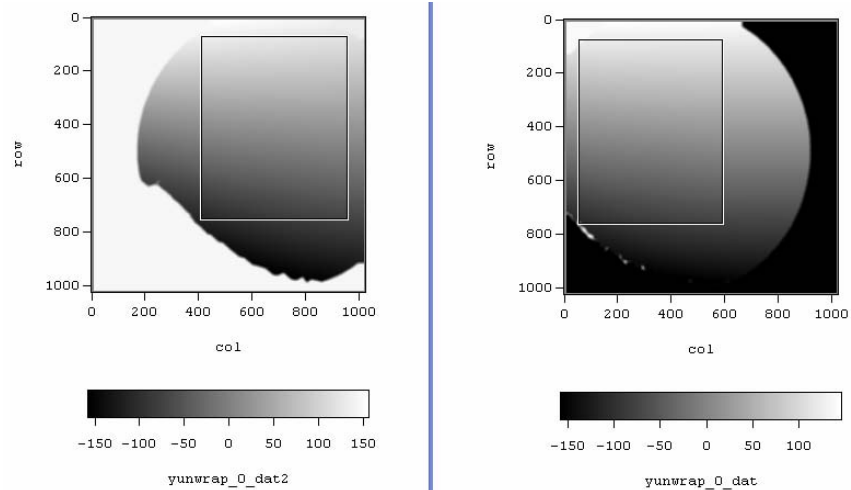
實驗結果同樣顯示本系統影像融合的效果相當的好。克服了當待測物體的尺寸遠大於量測系統的景寬範圍，或是待測物體的表面由於光源投射的角度所造成之陰影，導致訊息短缺...等等問題。



(a) 2-D pattern projected

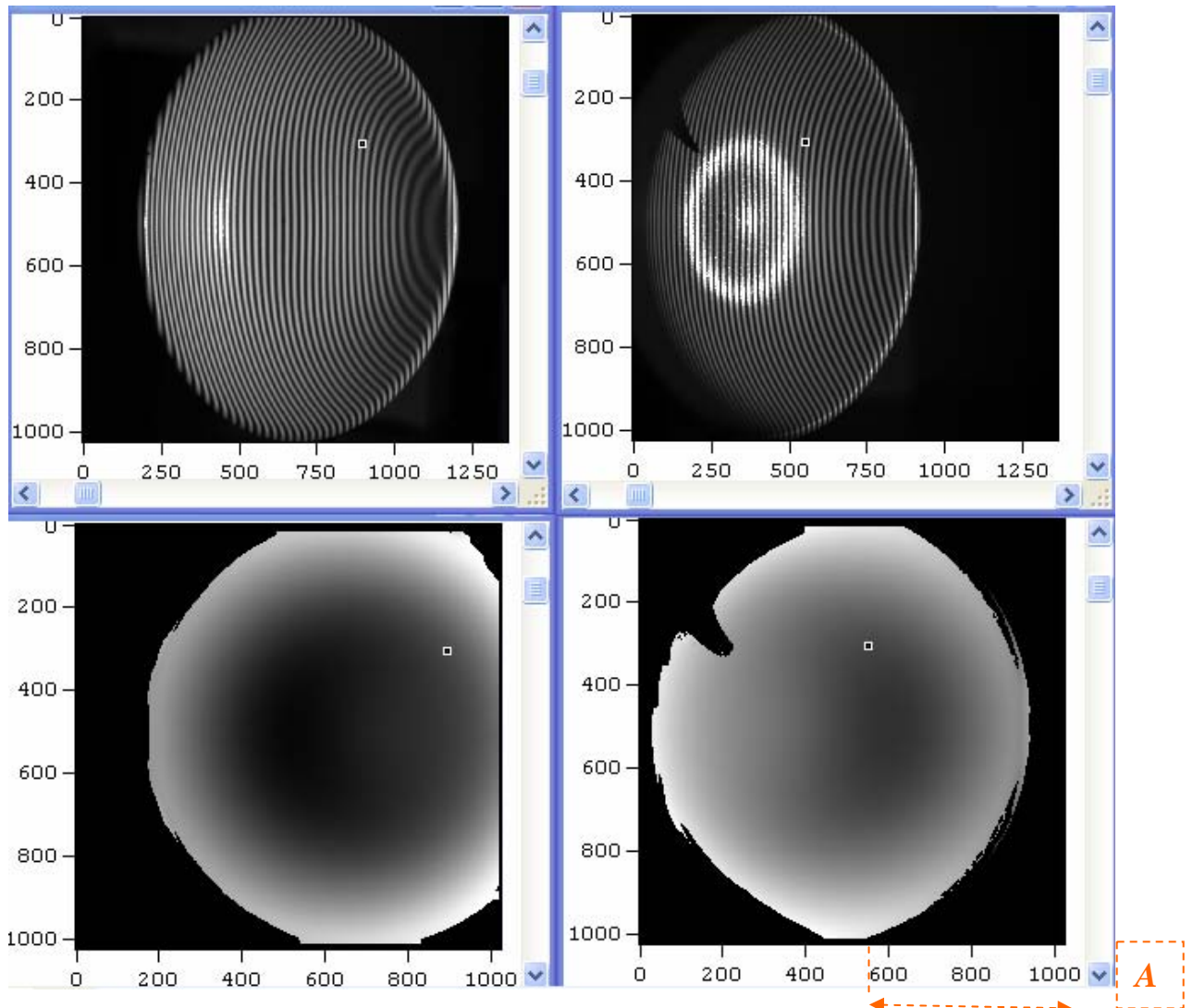


(b) Horizontal unwrapped phase



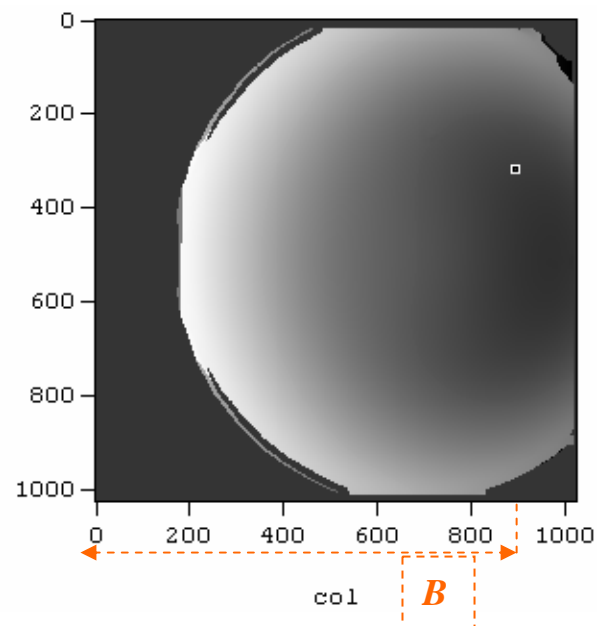
(c) Vertical unwrapped phase

圖5.26 圓碗左側(S-bowl-L)與右側(S-Bowl-R)之圖形配準



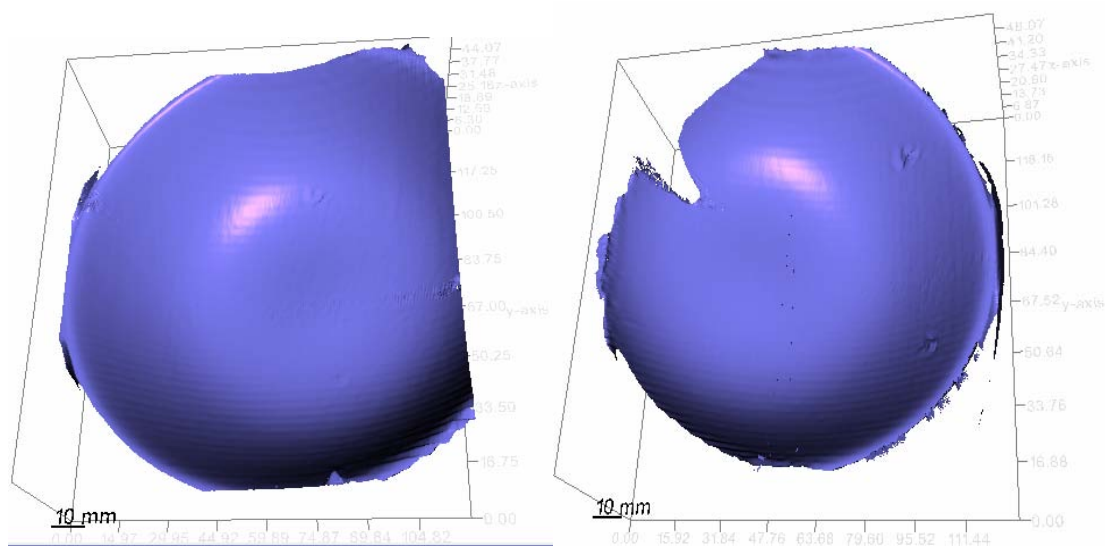
(R) Pixels at: (305, 896) Depth: 15.0392 mm (L) Pixels at: (305, 550) Depth: 15.0137 mm

After transformation from R:
Depth error=15.0137-15.0018mm
=0.0119mm=11.9um



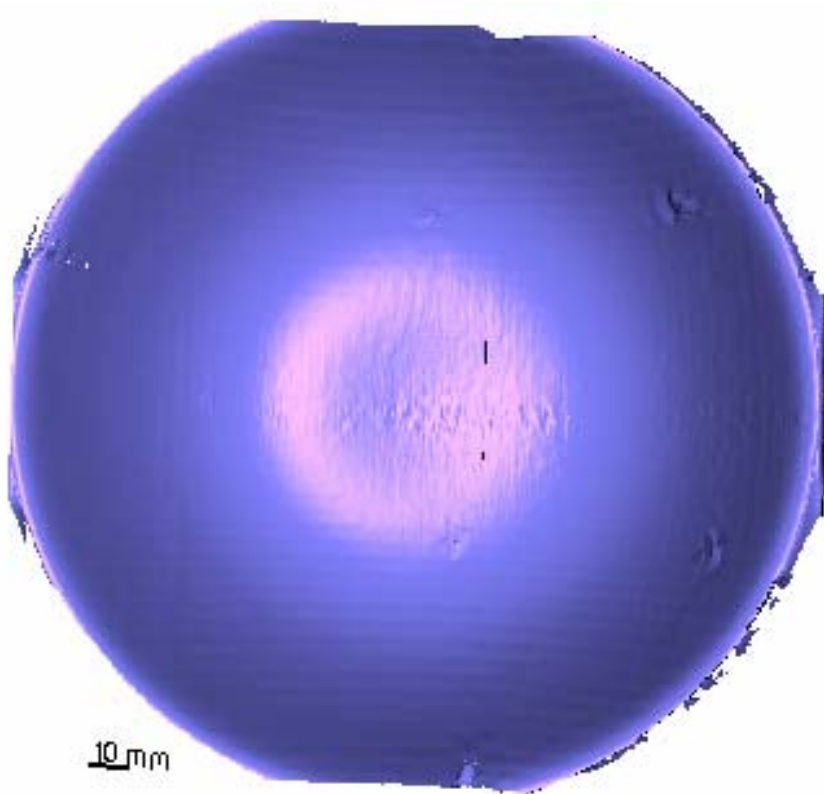
(New R) Pixels at: (305, 896) Depth: 15.0018 mm

圖5.27 圓碗左側(S-bowl-L)與右側(S-Bowl-R)之融合深度誤差



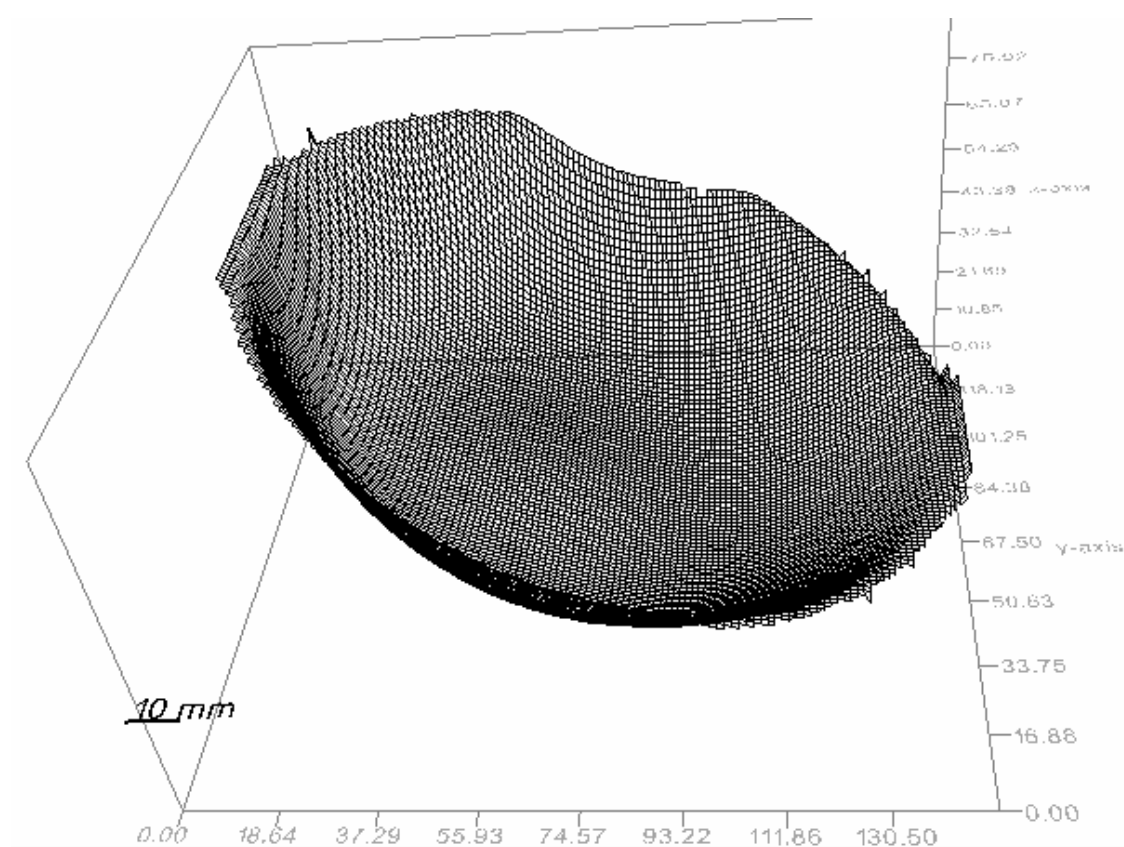
(a)

(b)

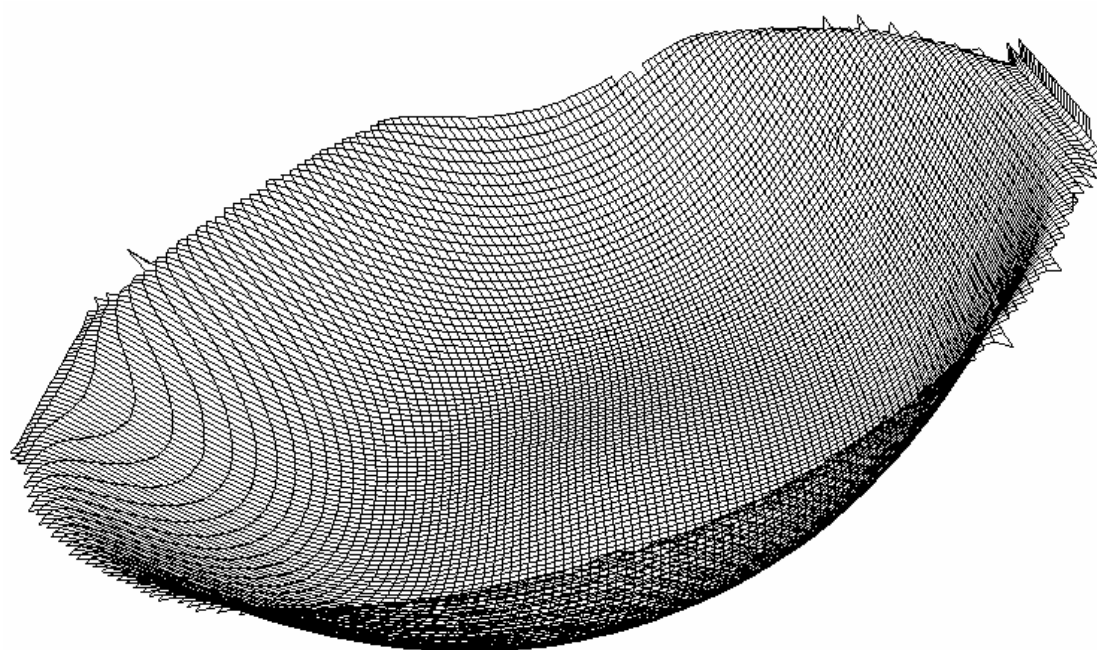


(c)

圖5.28 圓碗左側(S-bowl-L)與右側(S-Bowl-R)之影像融合

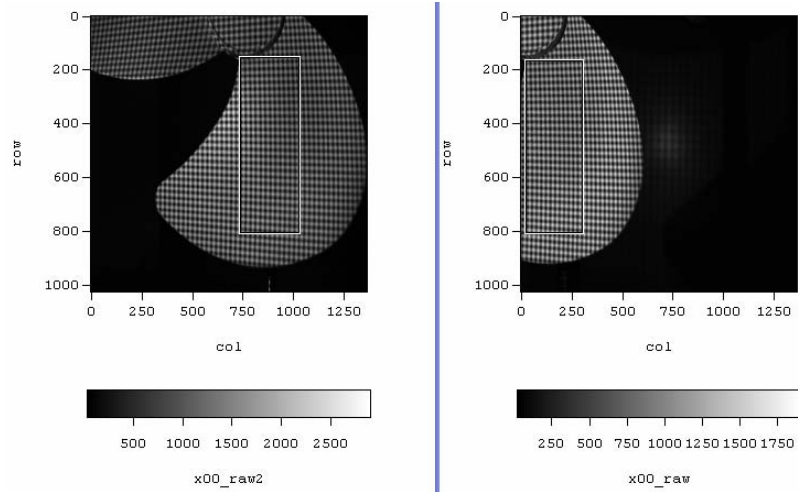


(a)

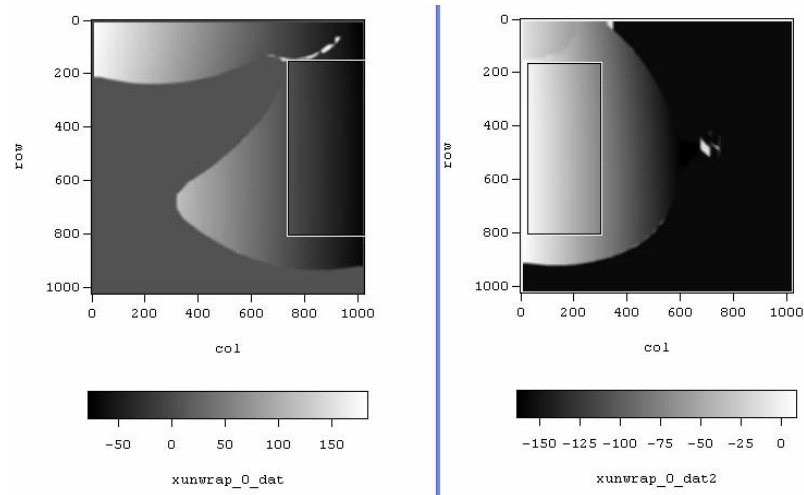


(b)

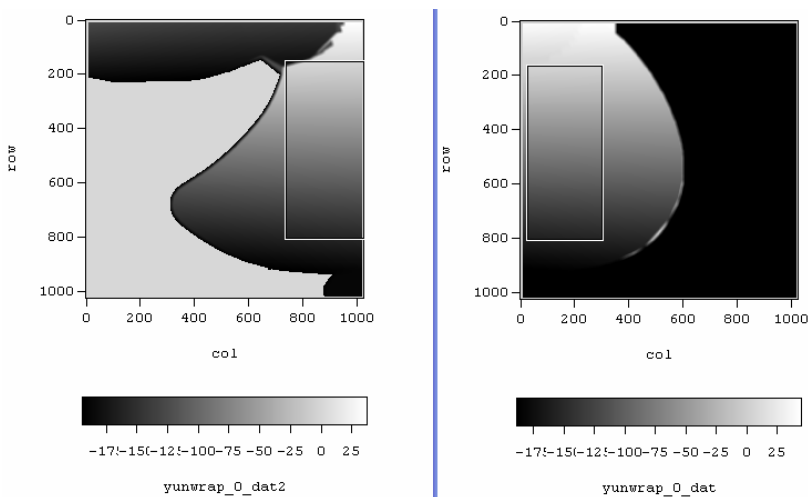
圖5.29 圓碗不同角度的影像融合圖形



(a) 2-D pattern projected

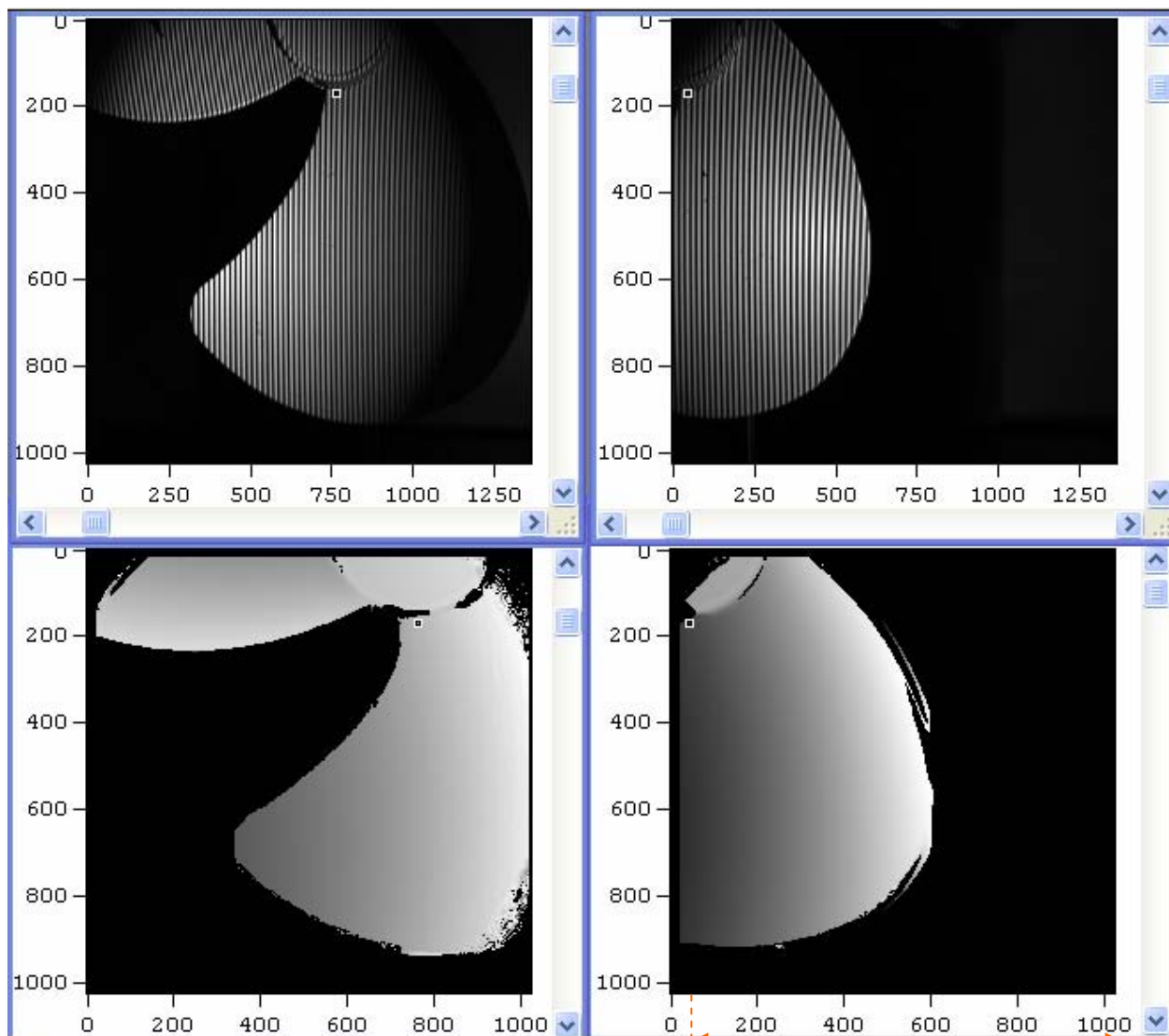


(b) Horizontal unwrapped phase



(c) Vertical unwrapped phase

圖5.30 風扇左側(B-Fan-L)與右側(B-Fan-R)之圖形配準

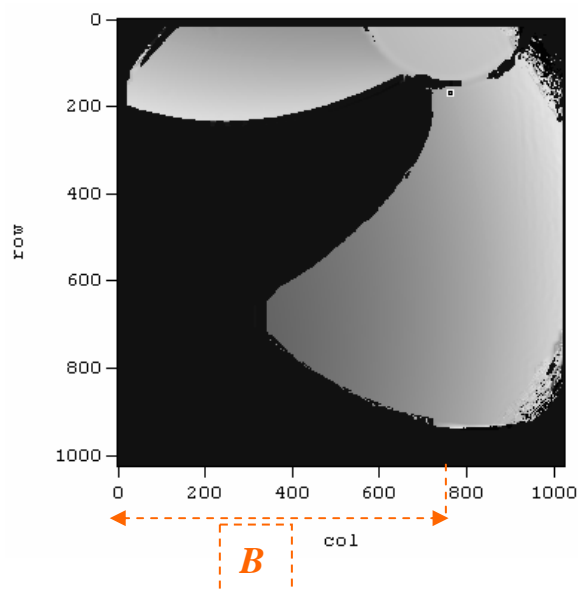


(R) Pixels at: (170, 763) Depth: 46.2381mm

(L) Pixels at: (170, 45) Depth: 16.8047mm

A

After transformation from R:
Depth error=16.8047-16.8038mm
=0.0009mm=0.9um



B

col

(New R) Pixels at: (170, 763) Depth: 16.8038mm

圖5.31 風扇左側(B-Fan-L)與右側(B-Fan-R)之融合深度誤差

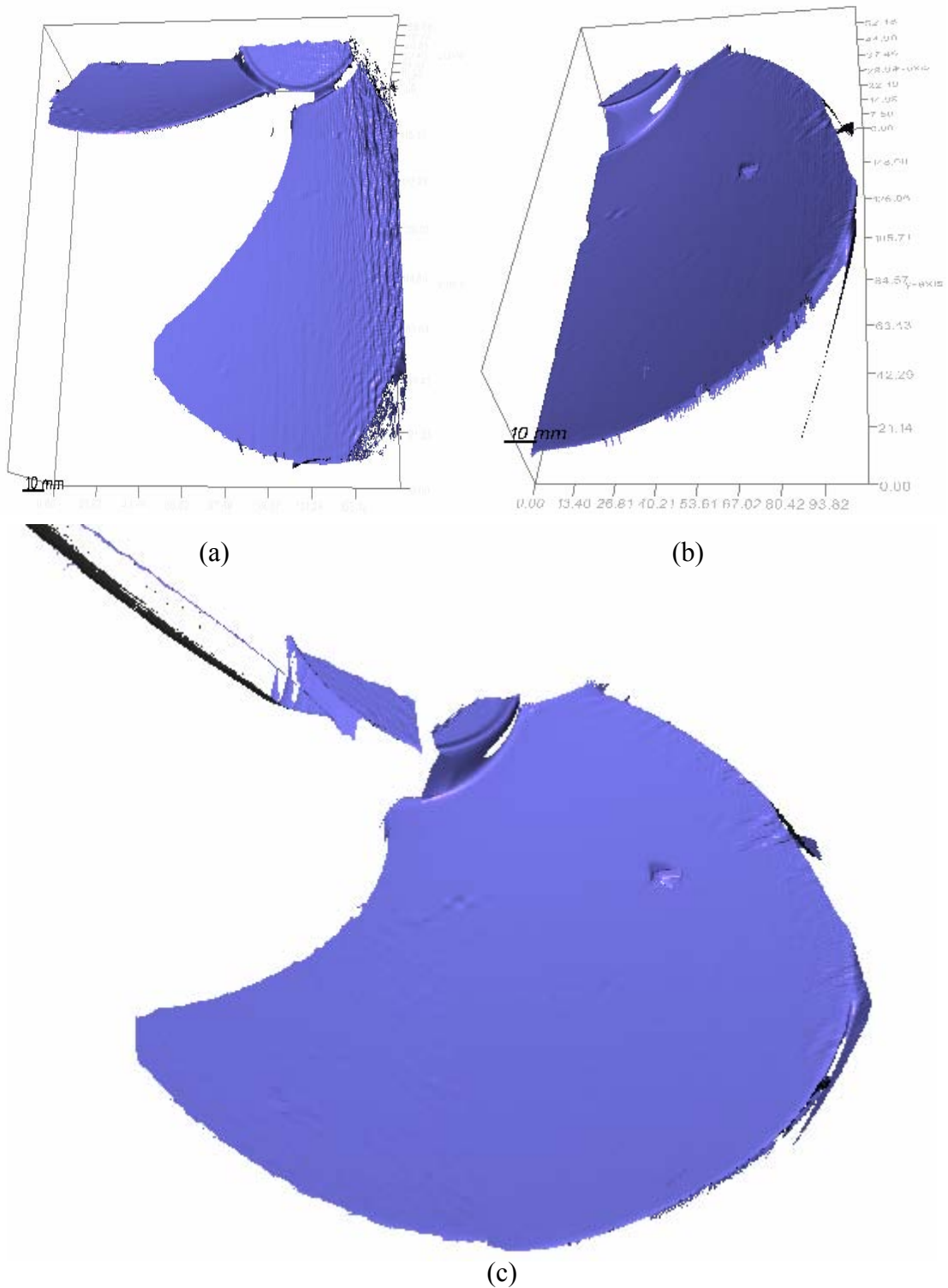


圖5.32 風扇左側(B-Fan-L)與右側(B-Fan-R)之影像融合

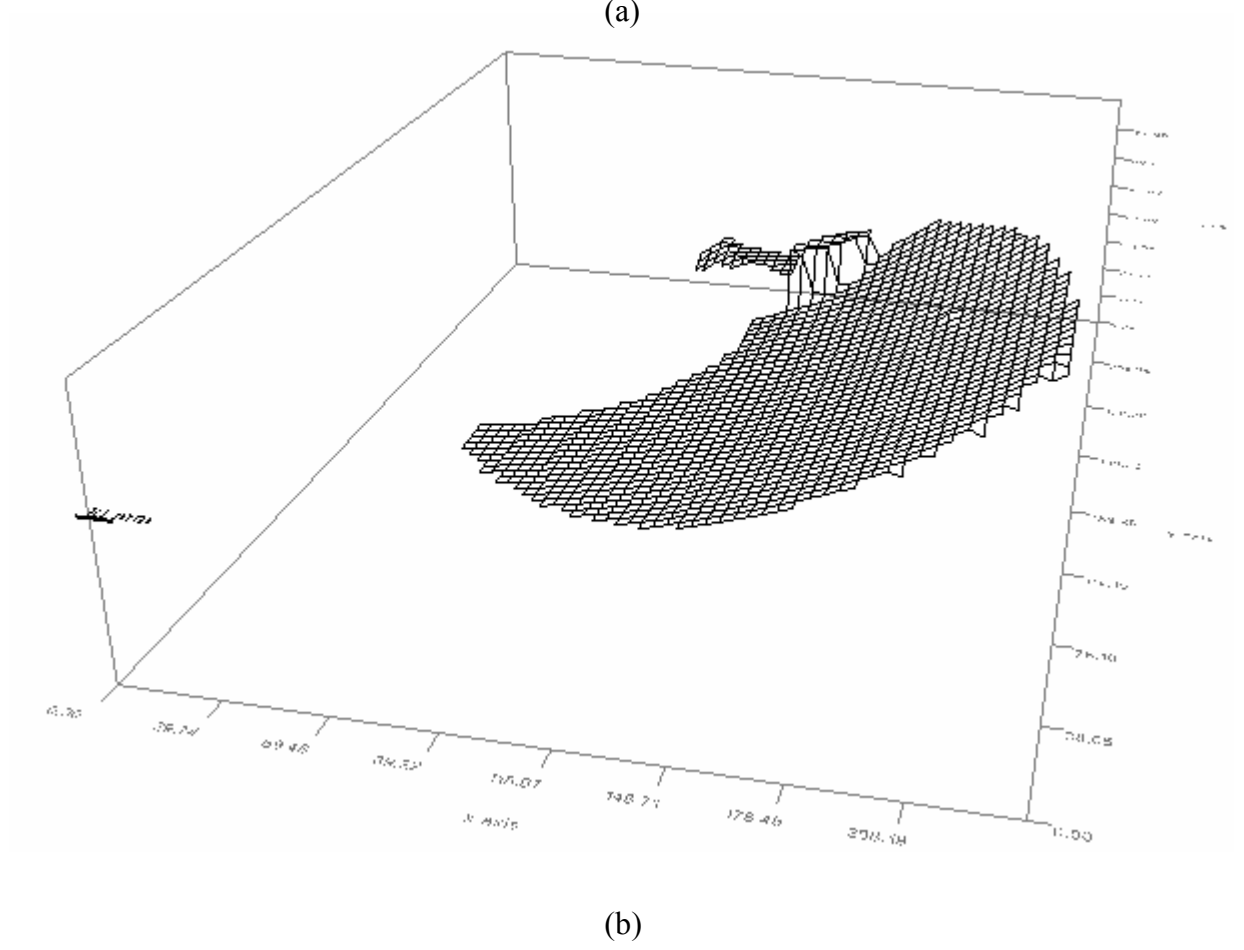
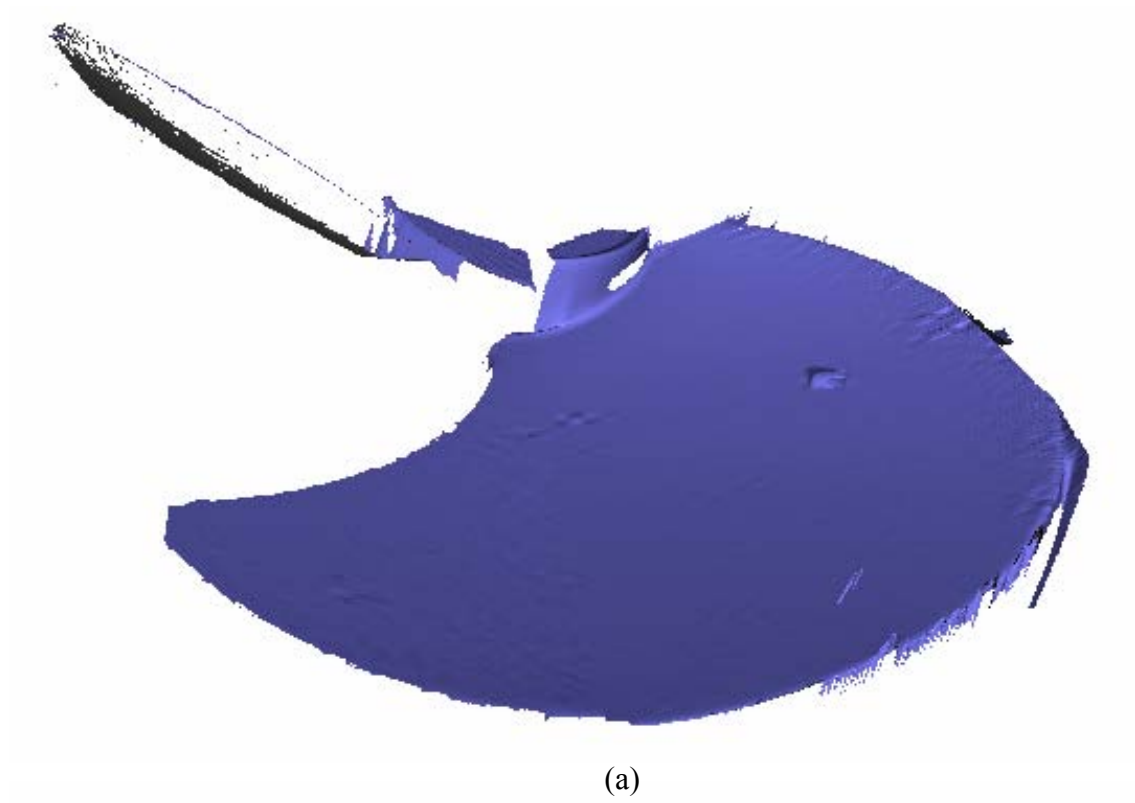


圖5.33 風扇不同角度的影像融合圖形

第六章 結論與未來研究工作

6-1 結論

本研究提出設計及製造二維條紋光柵圖案的方法，並應用於三維形貌融合技術中配準。二維條紋光柵設計圖形可更輕易地得到影像之相位值(φ)，免除傳統上使用一維條紋光柵設計圖形必須手動旋轉 90° 之不便，並且真正地達到快速而簡單地全自動化量測目的。

配合相位移條紋投影輪廓儀之校正技術，即使是有過多的影像干擾，仍可達成量測解析度超過景寬大小的萬分之一，此結果已符合目前產業界大多數的解析度要求($0.5\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$)。

5-4節-圖形配準與影像融合實驗的結果顯示，本研究之三維形貌量測系統的圖形配準解析度為次微米等級，最高配準解析度可達到影像畫素大小的5.96%(10.5/176)。此次微米等級的圖形配準解析度已可滿足目前大多數工業界的基本要求，同時克服了當待測物體的尺寸遠大於量測系統的景寬範圍，或是待測物體的表面由於光源投射的角度所造成之陰影，導致訊息短缺...等等問題。

6-2 未來研究工作

1.

未來將繼續探討原始「相位-縱深」校正影像單一週期條紋的 pixels 數，導致其輸出的三維形貌影像於深度位置上，具有明顯的外加條紋形貌起伏的問題。

2.

致力於提升圖形配準系統的解析度，並且進一步探討二側圖形重疊區域的大小與圖形配準解析度之關係。

3.

應用白光點光源之技術[43]於三維形貌量測系統的光源上，使得系統量測範圍增大、景深變得無限長。同時，可將整套量測系統微型化而做成顯微鏡量測系統。應用影像融合技術使得高解析度影像，即使大過於量測系統的視野時，仍可透過影像融合技術，將完整的三維形貌描繪出來。

附錄

表4-1 德國PCO. Image公司PixelFly HiRes CCD Camera規格表(右)

System Data

CCD Sensor	VGA	Scientific	HiRes
Number of Pixels	640 (H) x 480 (V)	1280 (H) x 1024 (V)	1360 (H) x 1024 (V)
Pixel Size	9.9µm x 9.9µm	6.7µm x 6.7µm	4.65µm x 4.65µm
Sensor Format	1/2"	2/3"	1/2"
Scan Area	6.3 x 4.8 mm	8.6 x 6.9 mm	6.3 x 4.7 mm
Full Well Capacity	32.000 e ⁻	20.000 e ⁻	12.000 e ⁻
Readout Noise	16 e ⁻	12 e ⁻	12 e ⁻
Scan Rate	16 MHz	20 MHz	16 MHz
Imaging Frequency ...			
... at binning mode 1	40 fps	12,5 fps	9,5 fps
... at binning mode 2	76 fps	24 fps	18 fps
... at binning mode 4	140 fps	not available	not available
A/D Conversion Factor	7 e ⁻ /count	4,5 e ⁻ /count	3 e ⁻ /count
Average Dark Charge @20°C (per pixel)	< 3 e ⁻ /sec	< 3 e ⁻ /sec	< 3 e ⁻ /sec
Spectral Range b/w	280 ... 1000 nm	280 ... 1000 nm	280 ... 1000 nm
Spectral Range color	primary color, RGB	primary color, RGB	primary color, RGB
Anti Blooming	> 1000	> 1000	> 1000
CCD Quality	grade 0	grade 0	grade 0
Non-Linearity (Differential)	< 1,5%	< 1,5%	< 1,5%
Binning Vertical	factor 1, 2, 4	factor 1, 2	factor 1, 2
Binning Horizontal	factor 1, 2	factor 1, 2	factor 1, 2

表4-2 美國Mad City Lab's Nano-LR200 PZT規格表

解析度	1.2nm
X軸的移動範圍	0~204.535um
Y軸的移動範圍	0~205.225um
最大負載(橫向/縱向)	0.5/0.2kg
重量	500g
輸出電壓值範圍	0~150V
輸出的電流值	150mA
類比輸入電壓值範圍	0.0到10.0V
本身材料	鋁 或 鎳鐵合金

表4-3 日本SIGMA-KOKI公司 Motorized Stages SGSP26-50(X)規格表

Product Specifications										
Model	SGSP26-50(X)									
Travel (mm)	50									
Table size (mm)	80 × 80									
Five-phase stepping motor	C6002-90215(0.375A/phase), PMM33BH2-C30 (0.75A/phase)									
Travel per pulse ^{*1} (Relative division number)	1	2	4	5	8	10	16	20	40	80
Travel per pulse ^{*1} (μm)	4	2	1	0.8	0.5	0.4	0.25	0.2	0.1	0.05
Precision ball screw diameter and lead	8mm in diameter, 2mm lead									
Movement guide	Outer rail construction									
Positional Accuracy (mm)	0.005 or less									
Positional Repeatability (mm)	0.003 or less									
Backlash (mm)	0.003 or less									
Y axis direction straightness (mm)	0.01 or less									
Z axis direction straightness (mm)	0.01 or less									
Load capacity (kg)	12									
Weight (kg)	1.4									
Maximum travel speed (mm/sec)	30									
Limit sensor	PM-L24 (SUNX Ltd.)									
Cable	DMINI cable (Mark-202, Mark-204, CSG-602R) or MINI cable (Mark-102)									
Accessories	M4 × 8mm ... six									

Explanatory notes:

*1 Resolution with Mark-202 and Mark-204.

表4-4 SIGMA-KOKI公司 Motorized Stages SGSP20-20(XY)規格表

Product Specifications										
Model	SGSP20-20(XY)									
Travel (mm)	20									
Table size (mm)	60 × 60									
Five-phase stepping motor	TS3664N4 (0.66A/phase)									
Travel per pulse ^{*1} (Relative division number)	1	2	4	5	8	10	16	20	40	80
Travel per pulse ^{*1} (micron m)	2	1	0.5	0.4	0.25	0.2	0.125	0.1	0.05	0.025
Precision ball screw diameter and lead	6mm in diameter, 1mm lead									
Movement guide	Outer rail construction									
Positional Accuracy (mm)	The value changes by assembling precision and settings. Please contact us for the further information.									
Positional Repeatability (mm)										
Backlash (mm)										
Y axis direction straightness (mm)										
Z axis direction straightness (mm)										
Load capacity (kg)	4									
Weight (kg)	1.0									
Maximum travel speed (mm/sec)	15									
Limit sensor	PM-L24 (SUNX Ltd.)									
Cable	DMINI cable (Mark-202, Mark-204, CSG-602R) or MINI cable (Mark-102)									
Accessories	M3 × 6mm ... four									

Explanatory notes:

*1 Resolution with Mark-202 and Mark-204.

資料來源:

http://www.sigma-koki.com/english/D/MotorizedStage/SGSPSeries/dr_SGSPSeries/dr_SGSPSeries.html

表4-5 美國Computar公司廣角透鏡M1614-MP規格表

computer

Factory Automation Lenses

M1614-MP

16mm F1.4

for 2/3" format cameras

C-Mount

Model No.	M1614-MP	Effective	Front	f 18.5mm
Focal Length	16mm	Lens Aperture	Rear	f 13.2mm
Max. Aperture Ratio	1 : 1.4	Distortion	-0.3%(γ=4.0)	
Max. Image Format	8.8 x 6.6mm (f11mm)	Back Focal Length	13.1mm	
Operation Range	Iris	F1.4 - 16C	Flange Back Length	17.526mm
	Focus	0.3m - Inf.	Mount	C-Mount
Control	Iris	Manual	Filter Size	M30.5 P=0.5mm
	Focus	Manual	Dimensions	f33.5 x 28.2mm
Object Dimension at M.O.D.	16.5 x 12.4cm		Weight	65g
Angle of View	D	38.0°	28.2°	
	H	2/3" 30.8°	22.7°	
	V	23.4°	17.1°	
Operating Temperature	-20°C ~ +50°C			

M.O.D. : Minimum Object Distance

M.O.D. : Minimum Object Distance

資料來源: <http://www.jknelectronics.com/computar.htm>

表4-6 日本Fujinon公司CF50HA TV LENS規格表



For FA/Machine Vision Fixed Focal

CF50HA-1

Applicable camera (model)
1 2/3 1/2 1/3 1/4

NEW

FIXED Fixed Focal
1.5 Mega For Megapixel Camera
MANUAL Manual Iris
C-mt C Mount
METAL Metal Mount

- High-resolution design, providing support for up to 1.5 megapixel camera resolution.
- Wide-aperture (F1.8) design achieves clear images under low light intensity, despite the long focal distance.
- Low-distortion design achieving accurate image input.
- Robust enclosure resistant to vibrations and shocks. Equipped with locking knobs for the iris and the focus.



Unit : mm

Focal Length (mm)		50
Iris Range		F1.8 ~ F22
Operation	Focus	Manual
	Iris	Manual
Angle Of View (H×V)	1"	14°35' × 10°58'
	2/3"	10°03' × 7°33'
	1/2"	7°19' × 5°30'
Focusing Range (From Front Of The Lens) (m)		∞ ~ 0.4 *1
Object Dimensions at M.O.D. (H×V) (mm)	1"	101 × 76
	2/3"	70 × 52
	1/2"	51 × 38
Back Focal Distance (in air) (mm)		17.81
Exit Pupil Position (From Image Plane) (mm)		-49
Filter Thread (mm)		M49 × 0.75
Mount		C
Mass (g)		235

Remarks
 • With Metal Mount
 • With Locking Knob for Iris and Focus
 *1 Using an extension tube longer than 5mm will increase the M.O.D. to 0.3m.

資料來源: <http://www.rmassa.com/manu/fujinon.htm>

參考文獻

1. R. E. Brooks and L. O. Heflinger, "Moiré gauging using optical interference patterns," *Applied Optics*, **8**, 935-939 (1969).
2. D. M. Meadows, W. O. Johnson, and I. B. Allen, "Generation of surface contours by Moiré patterns," *Applied Optics*, **9**, 942-947 (1970).
3. H. Takasaki, "Moiré topology," *Applied Optics*, **9**, 1467-1472 (1970).
4. G. T. Reid, R. C. Rixon, and H. I. Messer, "Absolute and comparative measurement of three-dimensional shape by phase measuring Moiré topography," *Optical Laser Technology*, **16**, No. 6, 315-319 (1984).
5. A. Asundi and C. S. Chan, "Phase shifted projection grid effect of pitch and profile," *Optics and Lasers in Engineering*, **21**, 31-47 (1994).
6. Mitsuru Baba and Tadataka Konishi, "Range image system with multiplexed structured light by direct space encoding," *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, **3**, 1437-1442 (1999).
7. S. H. Rowe and W. T. Welford, "Surface topography of non-optical surfaces by projected interference fringes," *Nature*, **216**, No. 5117, 786-788 (1967).
8. S. H. Rowe, "Projected interference fringes in holographic interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, No. 12, 1599-1603 (1971).
9. R. Crane, "Interference phase measurement," *Applied Optics*, **8**, 538 (1969).
10. J. H. Burning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, and D. J. Brangaccio, "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Applied Optics*, **13**, 2693 (1974).

11. G. W. Johnson and D. T. Moore, "Design and construction of a phase-locked interference microscope," *Proc. SPIE*, **103**, 76 (1977).
12. V. Srinivasan, H. C. Liu, and M. Halioua, "Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects," *Applied Optics*, **23**, No. 18, 3105-3108 (1984).
13. V. Srinivasan, H. C. Liu, and M. Halioua, "Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach," *Applied Optics*, **24**, No. 2, 185-188 (1985).
14. S. K. Case, J. A. Jalkio, and R. C. Kim, "3-D vision system analysis and design," in *Three-Dimensional Machine Vision*, Takeo Kanade, Ed., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, pp. 63-95, (1987).
15. G. Lu, S. Wu, N. Palmer, and Hongyu Liu, "Application of phase-shift optical triangulation to precision gear gauging," *Proc. SPIE*, **3520**, 52-63 (1998).
16. Hongyu Liu, B. A. Bard, Wei-Hung Su, Fei Wu, Shizhuo Yin, and T. S. Yu, "Accuracy enhancement in phase-shifting projected fringe profilometry by microscanning," *Proceedings of Optical Society of America Annual Meeting*, Santa Clara, California, September 26 - October 1, (1999).
17. Hongyu Liu, B. A. Bard, Wei-Hung Su, and Fei Wu, "Precision profile measurement by phase-shifting projected-fringe profilometry," ARL year 2000, The Pennsylvania State University (internal publications).
18. Wei-Hung Su, Hongyu Liu, Karl Reichard, Shizhuo Yin, and Francis T. S. Yu, "Fabrication of digital sinusoidal grating and precisely controlled diffusive flat and their applications to highly accurate projected fringe profilometry," *Optical Engineering*, **42**, No. 6, 1730-1740 (2003).

19. Hongyu Liu, Wei-Hung Su, Karl Reichard, and Shizhuo Yin, "Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement," *Optics Communications*, **216**, Issues 1-3, 65-80 (2003).
20. Wei-Hung Su, Karl Reichard, Hongyu Liu, and Shizhuo Yin, "Integration of segmented 3D profiles measured by calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry (PSPFP)," *Optical Memory & Neural Networks*, **12**, No. 1, (2003).
21. R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and Werner C.L., "Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional phase unwrapping," *Radio Sci.*, **23**, 718-720, (1988).
22. E. Kreysig, "Advanced Engineering Mathematics," Wiley, New York, 700-701, (1966).
23. J.M Huntley and J.R. Buchland, "Characteristization of sources of 2π phase discontinuity in speckle interferograms," *Journal of the Optical Society of America*, **12**, No.9, 1990-1996, (1995).
24. J. M Huntley, "Noise-immune phase unwrapping algorithm," *Applied Optics*, **28**, No. 15, 3268-3270, (1989).
25. D. C. Ghiglia, G. A. Mastin, and L. A. Romero, "Cellular automata method for phase unwrapping," *Journal of the Optical Society of America*, **4**, No.1, 267-280, (1987).
26. H. Zhao, W. Chen, and Y. Tan , "Phase-unwrapping algorithm for the measurement of the three-dimension object shapes," *Applied Optics* , **33**, No.20, 4497-4500, (1994).
27. J. Szumowski, W. R. Coshov, F. Li, and S. F. Quinn, "Phase unwrapping in the three-point Dixon method for fat suppression MR imaging ," *Radiology*, **192**, No. 2, 555-561, (1994).

28. S. M. song, S. Naple, N. J. Pelc, and G. H. Glover , "phase unwrapping of MR phase image using Poisson equation," IEEE Transaction on Image Processing, **4**, No. 5, (1995).
29. J. C. Marron, P. P. Sanchez, and R. C. Sullivan, "Unwrapping algorithm for least-square phase recovery from the modulo 2π bi-spectrum phase," Journal of the Optical Society of America, A, **7**(1), 14-20, (1990).
30. Judg T. R. and P. J. Bryanston-Cross, " A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis," Optical Laser Techno edge , **21** , 199-239, (1994) .
31. L. G. Brown, "A survey of image registration techniques," ACM Computing Surveys, **24**, No. 4, 325-376, (1992)
32. Chitra Dorai, Gang Wang, Anil K. Jain, and Carolyn Mercer, "Registration and integration of multiple object views for 3D model construction," IEEE Transactions on Pattern analysis and Macine Intelligence, **20**, No. 1, 83-89, (1998).
33. G. Simon and M. O. Berger, "A two-stage robust statistical method for temporal registration from features of various type," IEEE Computer Vision, Sixth International Conference, 261-266, (1998).
34. Nicola Ritter, Robyn Owens, James Cooper, Robert H. Eikelboom, and Pail P. van Saarloos, "Registration of stereo and temporal images of the retina," IEEE Transactions on Medical Imaging, **18**, No. 5, 404-418, (1999).
35. J. A. Williams and M. Bennamoun, "Evaluation of a novel multiple point set registration algorithm," IEEE Pattern Recognition, Proceedings. 15th International Conference, **1**, 1007-1010, (2000).
36. H. A Martins, J. R. Birk, and R. B. Kelly, "Camera model based on data from two calibration planes," Computer Graphics and Image Processing, **17**, 173-180, (1981).

37. M. Born and E. Wolf, Principle of optics, 7th ed. The Macmillan Company, Place, (1999).
38. Wei-Hung Su, “Advance phase-shifting projected fringe profilometry Techniques,” Ph.D. dissertation (USA PSU Electrical Engineering 2002)
39. Wei-Hung Su, Yi-Ling Hsu, Cho-Yo Kuo, and Hung-Ming Chen , “Integration of segmented 3D image data measured by projected fringe profilometry,” SPIE's 49th Annual Meeting 2004 Denver, Colorado USA
40. D. G. Bailey and T. H. Lill, “Image Registration Methods for Resolution Improvement,” Proceedings of image and Vision Computing NZ, pp 91-96 (August 1999).
41. T. J. Silva, C. S. Lee, T. M. Crawford and C. T. Rogers, “Inductive measurement of ultra-fast magnetization dynamics in thin-film Permalloy,” JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. **85**, 7849-7862, (1999).
42. João Carlos Machado, Marco Antônio von Kruger, Eva Maria Almeida Fontes and Márcio Manhães Gomes de Almeida, “Evaluation of an ultrasonic method applied to the measurement of blood coagulation time,” *Physiol. Meas.* **18**, 129-143, (1997).
43. Wei-Hung Su, “Kebin Shi, Zhiwen Liu, Bo Wang, Karl Reichard, and Shizhuo Yin, “A large-depth-of-field projected fringe profilometry using supercontinuum light illumination,” *Applied Optics*, **13**, No. 3, 1025-1032 (2005).