



國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

線上雙狹縫彩色差動共焦量測探頭之研發

Development of *In-situ* Double-slit Chromatic Differential  
Confocal Probe

曾仁興

Jen-Yu Tseng

指導教授：陳亮嘉 博士

Advisor: Liang-Chia Chen, Ph.D.

中華民國 103 年 7 月

July, 2014

## 誌謝



在實驗室兩年多的生活中，首先感謝指導教授陳亮嘉老師的諄諄教誨與辛苦指導，在學術與研究上不厭其煩地叮嚀與要求，促使學生在思考層面更加地多元與縝密，並在學生實驗過程中不辭辛勞地教導，使研究順利，而在切磋琢磨中體認到態度足以影響一個人的發展。同時也要感謝口試委員范光照教授、葉勝利教授與林世聰教授閱讀本論文以及提供建議，使本論文更臻完善。

另外也誠摯地感謝實驗室畢業的學長奕威、Mario 和俊達，在學習上、研究過程中提供很大的協助與建議，使我能夠順利地進入這個領域並完成研究。同時，感謝同窗的戰友建衡、仲安、坤呈相互扶持、勉勵以及幫助，學弟厚佑、沛哲、豐禾、宇華以及姚穎的協助與實驗室生活的陪伴。總之感謝所有在研究上與生活中曾幫助過以及一起活過的每個人。

最後，要特別感謝我的父母、姊姊，當然還有好友們，在這兩年多的時間中給我最溫暖的支持與關懷，成為我最大的後盾以及垃圾桶，讓我在牢騷及崩潰後能夠繼續往前，順利地完成學業。在此，僅以本文獻給我最愛的家人及朋友們，願此喜悅與榮耀，能與你們一起分享。

仁興 謹誌

一百零三年仲夏 於台大

## 中文摘要



本研究之目的為發展雙狹縫彩色差動共焦技術與量測探頭之開發與測試。共焦量測技術現行的發展大多以線上即時量測作為研究方向與目標，其中一項關鍵的量測方式為彩色共焦量測技術，此技術用軸向色散原理來取代傳統共焦量測技術的垂直掃描過程，可有效提升量測速度，但也因演算法是建立於色散原理架構下造成了量測時會受到待測物體反射率影響，另外須以光譜儀作為感測器也使得量測速度及架構受到了限制；另一項關鍵量測技術是差動共焦量測術，差動架構及其演算原理使得量測也不須垂直掃描，但其缺點在於及時深度量測範圍太小，使得量測應用性受限。因此，本研究結合彩色共焦技術與差動共焦技術之優點，發展一雙狹縫彩色差動共焦量測技術與量測探頭，此研究為接續先前實驗室林俊達學長之設計概念，進一步實現線上量測探頭的開發與測試。量測系統以寬頻之白光搭配線光纖作為線型光源，結合自行設計之軸向色散物鏡達成彩色共焦量測術架構。反射光訊號經過分光鏡一分為二，並於兩個彩色線型光感測器前通過一組不同寬度大小之狹縫進行空間濾波，因此兩感測器得到一組不同全寬半高值之反射光訊號，藉此以差動演算法求出強度比值對深度關係曲線，產生一即時深度量測範圍，進行待測物之三維形貌量測與重建。目前探頭即時深度量測範圍可達  $150\ \mu\text{m}$ ，量測之設計線長為  $14\ \text{mm}$ 。經由實驗結果之驗證，量測鏡面之待測物時單條取像時間可小於  $1\ \text{ms}$ ，標準階高塊量測結果之一個標準差為  $0.12\ \mu\text{m}$ 。惟因光場強度均勻性有待提升，目前可實測之線寬範圍仍未達設計值，此可由進一步改善聚光鏡組，獲得有效解決。總結來說，研發之雙狹縫彩色差動共焦量測技術改善舊有技術問題，可大幅提升即時量測範圍、光源使用效率以及量測速度等，以利增進其工業量測上運用價值及可行性。

關鍵字：光學量測、共焦量測技術、彩色共焦量測技術、差動共焦量測技術、  
三維形貌量測

# ABSTRACT



This study develops a broadband differential confocal surface probe (profilometer) using novel double-slit chromatic confocal measuring principle for *in-situ* microscopic surface inspection. *In-situ* automatic optical inspection (AOI) on microstructures has become extremely important to ensure manufacturing quality in modern manufacturing fields. A multi-wavelength differential confocal surface profilometer is developed and tested by employment of an innovative double-slit conjugate configuration for generating the differential gradient in confocal measurement. This study aims to realize the conceptual design work carried previously by Mr. Jun-Da Lin at NTU AOI Lab into a probe prototype with improved measuring efficiency and accuracy. Two different sizes of slits are placed in front of their corresponding imaging unit and designed to conjugate with an object surface underlying inspection, generating the differential gradient by correlating two focus-depth-response curves. The developed system can achieve one shot inspection for line-scan profilometry without vertical scanning frequently required by conventional confocal measurement. Again, the scanning rate is greatly enhanced by more than 10 times from the achievable frame rate of a spectrometer to the one by a high speed line CCD. From the experimental test and analyses, it is verified that the vertical measurement range can be designed for a few hundreds of micrometers while its vertical measuring repeatability is less than 0.15 micrometers in one standard deviation. The measuring speed can match tight tact time requirements in *in-situ* AOI.

**Keywords:** Optical inspection, confocal microcopy, chromatic confocal, differential confocal, surface profilometry.

# 目錄



口試委員會審定書 .....	#
誌謝 .....	i
中文摘要 .....	ii
ABSTRACT .....	iii
目錄 .....	iv
圖目錄 .....	vi
表目錄 .....	xi
<b>第 1 章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究動機與目的 .....	2
1.3 論文架構 .....	4
<b>第 2 章 文獻回顧 .....</b>	<b>5</b>
2.1 引言 .....	5
2.2 共焦量測原理 .....	5
2.3 共焦量測系統文獻 .....	6
2.4 文獻回顧總結 .....	18
<b>第 3 章 系統量測原理與技術 .....</b>	<b>21</b>
3.1 線型共焦量測系統 .....	21
3.2 彩色共焦量測系統 .....	23
3.2.1 光譜軸向色散之原理 .....	23

3.2.2	彩色共焦量測原理.....	26
3.2.3	無窮補正型式軸向色散顯微物鏡模擬與設計之原理.....	28
3.3	彩色差動共焦量測系統與架構.....	29
3.3.1	量測系統原理.....	30
3.3.2	量測系統架構.....	35
<b>第 4 章</b>	<b>系統驗證與實驗結果分析.....</b>	<b>46</b>
4.1	量測系統之像素對位 .....	46
4.2	彩色 CCD 裝置對光源之光強響應誤差校正 .....	48
4.3	狹縫寬度組合與量測之最佳化測試 .....	52
4.4	量測系統重複性之測試 .....	55
4.5	工業樣品量測實例結果與比較 .....	58
4.5.1	標準階高塊規量測實例一 .....	58
4.5.2	標準階高塊規量測實例二 .....	61
4.5.3	量測結果分析與討論 .....	63
<b>第 5 章</b>	<b>結論與未來展望.....</b>	<b>68</b>
5.1	結論 .....	68
5.2	未來展望 .....	69
	參考文獻 .....	71

## 圖目錄



圖 1.1	各種三維形貌量儀之解析度範圍 .....	2
圖 1.2	自動化光學檢測系統可檢測於不同領域之示意圖 .....	2
圖 2.1	共焦量測系統之技術發展魚骨圖 .....	5
圖 2.2	共焦之量測系統示意圖 .....	6
圖 2.3	尼普科夫盤(Nipkow disk)共焦顯微系統示意圖 .....	7
圖 2.4	快速深度掃描之變焦架構 .....	7
圖 2.5	DMD 數位微鏡組裝置 .....	8
圖 2.6	DMD 作為主動光源投射的共焦顯微系統 .....	9
圖 2.7	聚焦形貌量測示意圖 .....	9
圖 2.8	超連續光譜之光譜圖 .....	10
圖 2.9	單點彩色共焦量測系統示意圖 .....	10
圖 2.10	線型彩色共焦系統架構 .....	11
圖 2.11	繞射式彩色共焦系統架構 .....	12
圖 2.12	面型彩色共焦系統架構 .....	12
圖 2.13	橫向彩色共焦顯微架構圖 .....	13
圖 2.14	波長穿透率式彩色共焦量測系統示意圖 .....	14
圖 2.15	差動共焦顯微鏡原理：縱向聚焦反應曲線與線性量測區間 .....	15
圖 2.16	橫向差動共焦邊緣輪廓量測架構 .....	15
圖 2.17	橫向光強對橫向位置關係曲線 .....	16
圖 2.18	差動共焦架構與針孔剖面示意圖 .....	16

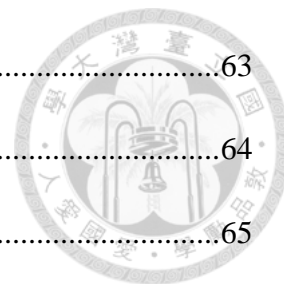
圖 2.19	兩原始光強及差動運算後所得出之光強分佈曲線 .....	17
圖 2.20	彩色差動共焦系統之光學架構 .....	17
圖 2.21	線型彩色差動共焦量測術之組成架構 .....	20
圖 3.1	線型共焦量測系統架構 .....	21
圖 3.2	單點(針孔)與線型(狹縫)共焦系統在深度反應曲線上的比較 .....	22
圖 3.3	線型共焦三維成像原理 .....	23
圖 3.4	光之折射現象示意圖 .....	24
圖 3.5	不同波長透過三稜鏡之色散現象 .....	24
圖 3.6	透鏡之軸向色散示意圖 .....	25
圖 3.7	折射式色散物鏡，可見光波段軸向色散示意圖 .....	26
圖 3.8	線型彩色共焦系統示意圖 .....	26
圖 3.9	波長與深度位置之校正曲線 .....	27
圖 3.10	2X 無窮補正色散物鏡 ZEMAX 光路模擬圖 .....	28
圖 3.11	2X 無窮補正色散物鏡可見光波段波長對焦距圖 .....	29
圖 3.12	兩不同寬度狹縫經由垂直掃描後所取得的聚焦綠色光之反應曲線 .....	31
圖 3.13	綠色色光強度比值與深度關係曲線 .....	32
圖 3.14	$R_{C_g}$ 演算法深度對光強跳動一標準差之最大誤差 .....	34
圖 3.15	量測區間內 $\alpha$ 對光強跳動一個標準差之最大誤差圖 .....	34
圖 3.16	舊型彩色差動共焦系統光路示意圖 .....	35
圖 3.17	本研究開發之新型雙狹縫彩色差動共焦系統光路圖 .....	36
圖 3.18	Free Space 架設圖 .....	37
圖 3.19	反射光進入狹縫前後之差異 .....	37



圖 3.20	半柱狀透鏡聚光模擬 .....	38
圖 3.21	聚光鏡組 SolidWorks 機構設計圖及實體照 .....	38
圖 3.22	探頭 SolidWorks 設計圖 .....	39
圖 3.23	雙狹縫彩色差動共焦系統實體圖 .....	40
圖 3.24	(a)氙燈光源、(b)線性光纖導管、(c)鉻玻璃光罩 .....	40
圖 3.25	非偏極分光鏡 NPBS .....	41
圖 3.26	2X 軸向色散物鏡 .....	41
圖 3.27	標準平面反射鏡 .....	41
圖 3.28	彩色線 CCD 裝置 .....	42
圖 3.29	三軸電控位移平台 .....	42
圖 4.1	SolidWorks 模擬 CCD 微調座機構圖 .....	46
圖 4.2	黑白棋盤格實體及光柵設計圖 .....	46
圖 4.3	CCD1 量測 35 $\mu$ m 寬棋盤格光柵片之像素對光強圖 .....	47
圖 4.4	CCD2 量測 35 $\mu$ m 寬棋盤格光柵片之像素對光強圖 .....	47
圖 4.5	二值化處理後 CCD1 像素對光強圖 .....	48
圖 4.6	二值化處理後 CCD2 像素對光強圖 .....	48
圖 4.7	校正前兩 CCD 裝置所取得之綠色光強分佈情形 .....	49
圖 4.8	校正前兩 CCD 上各像素之光強深度關係曲線 .....	50
圖 4.9	校正前各像素之光強差動比值對深度關係曲線 .....	50
圖 4.10	校正前量測一平面鏡之平坦度 .....	50
圖 4.11	校正後兩 CCD 裝置所取得之綠色光強分佈情形 .....	51
圖 4.12	校正後兩 CCD 上各像素之光強深度關係曲線 .....	51

圖 4.13	校正後各像素之光強差動比值對深度關係曲線 .....	52
圖 4.14	校正後量測一平面鏡之平坦度 .....	52
圖 4.15	寬度 10 及 15 $\mu\text{m}$ 狹縫組合之光強差動比值對深度關係曲線 .....	53
圖 4.16	寬度 10 及 20 $\mu\text{m}$ 狹縫組合之光強差動比值對深度關係曲線 .....	53
圖 4.17	寬度 10 及 30 $\mu\text{m}$ 狹縫組合之光強差動比值對深度關係曲線 .....	53
圖 4.18	各寬度狹縫正規化光強對深度關係曲線 .....	54
圖 4.19	寬度 20 和 30 $\mu\text{m}$ 狹縫組合光強差動比值對深度關係曲線 .....	55
圖 4.20	標準階高塊規實體圖 .....	55
圖 4.21	10.1 $\mu\text{m}$ 階高量測剖線圖 .....	56
圖 4.22	25.4 $\mu\text{m}$ 階高量測剖線圖 .....	56
圖 4.23	10.1 $\mu\text{m}$ 階高塊 30 次量測結果 .....	57
圖 4.24	25.4 $\mu\text{m}$ 階高塊 30 次量測結果 .....	57
圖 4.25	Keyence VK-9700 雷射共焦顯微鏡 .....	59
圖 4.26	雷射振鏡式掃描裝置示意圖 .....	59
圖 4.27	雷射共焦顯微鏡量測 10.1 $\mu\text{m}$ 階高三維形貌重建結果 .....	59
圖 4.28	雷射共焦顯微鏡量測 10.1 $\mu\text{m}$ 階高水平軸剖面圖 .....	60
圖 4.29	10.1 $\mu\text{m}$ 階高量測結果三維形貌重建圖 .....	60
圖 4.30	10.1 $\mu\text{m}$ 階高量測結果水平剖面圖 .....	61
圖 4.31	雷射共焦顯微鏡量測 25.4 $\mu\text{m}$ 階高三維形貌重建結果 .....	61
圖 4.32	雷射共焦顯微鏡量測 25.4 $\mu\text{m}$ 階高水平軸剖面圖 .....	61
圖 4.33	25.4 $\mu\text{m}$ 階高量測結果三維形貌重建圖 .....	62
圖 4.34	25.4 $\mu\text{m}$ 階高量測結果水平剖面圖 .....	62

圖 4.35	兩 CCD 光強 30 次取樣值 .....	63
圖 4.36	30 筆光強比值 .....	64
圖 4.37	CCD 取像之暈影情形 .....	65
圖 4.38	CCD 各像素之光強圖 .....	65
圖 4.39	探頭移除 Relay lenses 進行像素對光強感測 .....	66
圖 4.40	移除 Relay lenses 後 CCD 各像素之光強圖 .....	66
圖 4.41	Relay Lenses vignetting 模擬結果 .....	66



## 表目錄



表 2.1	各共焦量測系統技術之優缺點 .....	18
表 3.1	2X 軸向色散物鏡規格表 .....	28
表 3.2	各倍率軸向色散物鏡規格比較 .....	29
表 3.3	光強跳動實驗結果 .....	37
表 3.4	量測系統各元件規格表 .....	43
表 3.5	部分零件之光譜響應圖 .....	44
表 4.1	各狹縫光強對深度關係曲線曝光時間及 FWHM .....	54
表 4.2	各量測系統之階高量測結果比較 .....	58

# 第1章 緒論



## 1.1 研究背景

時代不停的演變、科技不斷的進步，各產業不停的追求更精密的產品與製程，也促使著工業界以微小化、精細化為發展目標。而精密元件之加工與生產，也代表著量測技術將須跟著提升，以確保加工的精密度及製程的穩定性與良率。而現今工業界對於製造精密元件之能力逐漸發展成熟，透過蝕刻與曝光顯影等製造流程使得元件精度已達到微奈米等級，而在要求精密化的同時，生產速度也逐漸地成為一個重要的追求目標。為了確保工業產品的質與量，對於精密元件檢測的精度也不斷地提高，並且為了縮短流程時間以及提升產能，檢測的速度跟精度是同樣重要的課題。為了達成快速且準確的檢測技術來確保產品的品質，自動化的光學檢測技術可取代傳統的人工檢測，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，目前已有許多產業皆以自動化光學檢測(Automated optical inspection, AOI)取代人工檢測。

目前的量測技術可分類為二維影像瑕疵檢測與三維形貌量測，在過去二維影像瑕疵檢測因高速且符合需求的緣故，為檢測的主軸，但近年來由於製程技術的進步與工業界的需求，需要對產品的高度、體積與共面度進行量測，因此三維形貌量測的需求不斷攀升。三維形貌量測技術主要可分為接觸式與非接觸式兩大類，由圖 1.1 可得知這兩類在空間上解析之不同。接觸式量測技術中，主要是利用探針對待測物進行單點之量測，以機器手臂在物體空間進行單點移動掃描，在量測上較為費時且由於以接觸的方式量測，對於具彈性與柔軟之元件容易產生量測誤差，並容易產生破壞性之刮痕，因此在使用上具有限制。非接觸式量測技術則是利用光電等原理技術進行量測，具有不破壞待測物表面的特性，以及較不受使用環境和樣品限制等優點。同前面所述，AOI 屬於非接觸式量測技術，以量測使用性、系統成本與量測精度來進行評估，AOI 方式是較為適用於目前工業生產流程的量測技術。

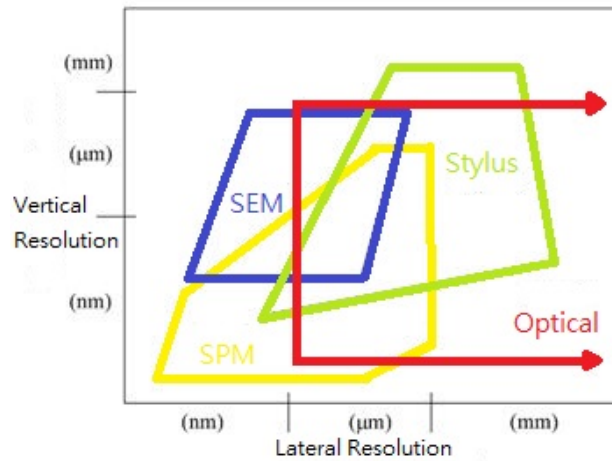


圖 1.1 各種三維形貌量儀之解析度範圍

## 1.2 研究動機與目的

隨著奈米等級之半導體、光電以及微機電製程技術的發展，細微元件之自動化光學檢測設備需求量也越來越大，我們若能在製造流程中提早發現瑕疵，剔除瑕疵元件，就能節省製造成本。工業上，主要為量測待測物之表面瑕疵、三維形貌、物體的高度以及直徑等。如圖 1.2 所示，包括金凸塊(Golden Bump)之高度檢測、IC 製程檢測、PCB 錫膏檢測、晶圓凸塊共面度之量測、端子彎曲形貌檢測與等檢測需求逐漸增加。相較於使用人工檢測之傳統方式，以自動化光學檢測設備來檢測可提升檢測速度同時降低生產的成本，能以更快速且準確的檢測技術來確保產品的品質。

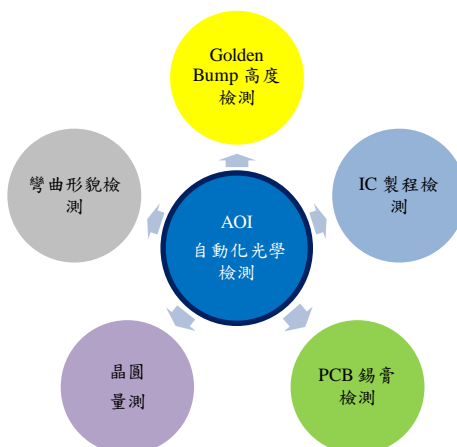


圖 1.2 自動化光學檢測系統可檢測於不同領域之示意圖



在光學量測技術中，共焦量測技術是一種具有工業檢測能力的技術，其特別的光學切片能力，能使量測之垂直解析可達到微奈米等級，透過掃描機構的配合進行逐點掃描以重建三維形貌的物體。由於現有的共焦量測儀大多須以 X、Y 以及 Z 三軸搭配掃描進行量測，因此將影響檢測速度與位移機構所衍生的量測誤差。目前共焦量測技術也發展出不同的量測架構，在其中差動共焦量測法是能進行即時量測重建不需垂直掃描，縮短量測時間及降低位移所產生的誤差，因而適合應用精密量測上，但其缺點在於即時深度量測範圍不大，使得量測應用性受到限制因而縮小；彩色共焦量測技術，可免除垂直掃描步驟進行即時量測，且具有大深度範圍量測的優勢，但其量測速度相對於差動共焦術仍較慢。因此，本研究將以共焦量測技術作為基礎，結合彩色共焦技術與差動共焦技術之優點，研發出一新型的共焦量測架構，來達到較大量測範圍與高量測速度的目標。

本實驗室於 2012 年提出一套結合彩色共焦量測技術與差動共焦量測法的系統 [1]，其目的是達成高量測速度與高量測精度與消除反射率對量測之影響的目標。此方法是以兩組線型彩色感測器元件放置在焦點前後的架構進行量測，兩組感測器位移後所取得的 RGB 三顏色的強度反應曲線也會一前一後偏移，因此可透過差動演算來進行即時量測，但因 CCD 的偏位使得兩組 CCD 的量測範圍產生差異，降低系統的水平量測範圍與水平解析。並且由於兩 CCD 並未置於焦平面上，所得之訊號為失焦訊號，光源的使用效率降低因而影響量測速度。上述之問題使得系統在線上即時量測的應用性降低。一般而言，單點式雷射共焦量測較適用此種共焦架構，對於線型掃描或寬頻光共焦量測方式運用性較低。因此於隔年，實驗室發展出一雙狹縫彩色差動共焦形貌量測術 [2]，藉由兩大小不同的狹縫 (Slit) 置於光源前，得到一組不同全寬半高值 (FWHM) 之深度與強度反應曲線，達成彩色差動架構及演算，解決了光感測器之位移而產生量測範圍縮小與水平解析降低的問題。但此技術開發到目前面臨了幾項問題：首先是量測範圍的不足，只有約  $45\text{ }\mu\text{m}$  之深度量測範圍，量測運用性受到了限制，且在工業上若遇到如 PCB 之翹曲問題將無法量測；再來是量測訊號問題，舊有系統藉由一分二之光纖得到兩組光源訊號以進行量測，且多次經過分光鏡，光路的調教以及光效率的運用上不易也不佳，

影響實際運用於工業量測之可行性。

因此，本研究主要之研究目的為發展新型雙狹縫彩色差動共焦量測技術，改善量測範圍、光源使用效率及量測速度等問題，增進其工業量測上運用價值以及可行性。本研究主要分成下面幾項目標進行討論：

1. 軸向色散顯微物鏡設計：軸向光學物鏡為本研究最主要的元件，藉由軸向色散物鏡將投射之連續波長光源進行軸向聚焦，使各個波長具教至不同的深度位置上。本研究將自行進行光學元件模擬與光學設計，針對不同量測範圍、量測倍率及量測速度進行開發，來達到本研究的需求。
2. 光路設計：光路設計的好壞與否將會影響整個系統的實用性如調教的難易度、光源的使用效率、訊號之雜訊消除等。本研究將會重新設計一雙狹縫彩色差動共焦系統，降低系統量測誤差提升量測精確性、提高光源使用效率縮短曝光時間提高量測速度、整體系統調教及更換元件之簡便性以增加工業量測上之可行性。

### 1.3 論文架構

本論文主要是研究並開發一新型雙狹縫彩色差動共焦量測系統，論文之架構共分為五個章節，以下為各章節內容大綱之說明介紹：

第 1 章：緒論-說明本論文之研究背景與動機以及目的。

第 2 章：文獻回顧-探討與歸納各種共焦量測系統之原理及文獻資料，並經由文獻的整理引導出本論文研究之方向與目的。

第 3 章：系統量測原理與技術-對本研究所發展之雙狹縫彩色差動共焦量測系統進行原理介紹、分析與討論。

第 4 章：系統驗證與實驗結果-開發之系統進行實驗驗證，呈現量測結果並且探討量測系統之性能與量測誤差分析。

第 5 章：結論與未來展望-於最後一章對本論文之研究內容進行總結，探討並提出未來之可行發展與能夠改進之方向。



## 第2章 文獻回顧



### 2.1 引言

隨著製成技術的日趨成熟與精度上的要求，光學量測技術於精密量測與檢測上扮演著越來越舉足輕重的角色。現今業界對於精密元件檢測需求及儀器設備之檢測速度、測量精密度之要求也日益增高。而隨著此趨勢，非接觸式自動化光學檢測技術益發蓬勃發展。目前已發展許多三維光學量測技術如干涉量測技術、三角法量測技術以及共焦量測技術，其中干涉量測對表面粗糙之待測物和三角量測法對於細微物件量測皆有其困難度。對此，共焦顯微量測技術針對不同粗糙度之待測物皆可適用，且其量測精度可達微奈米等級。本章節將依序討論文獻中所提出的各式共焦量測法之優缺點與量測特性。為共焦量測系統之技術發展魚骨圖。

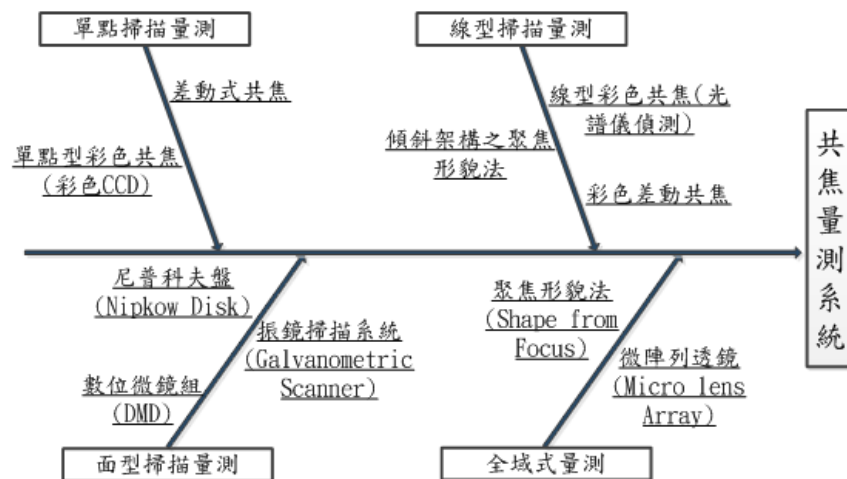


圖 2.1 共焦量測系統之技術發展魚骨圖

### 2.2 共焦量測原理

共焦一詞源至於顯微鏡之物鏡焦點與成像透鏡焦點位置相互對稱，也就是照明點與探測點在光學成像上形成共軛聚焦[3]。共焦顯微鏡之感測器前擁有獨特的針孔或狹縫以進行空間濾波，使它具備傳統光學顯微鏡所沒有的光學切片能力，圖 2.2 即為共焦系統示意圖。其原理為光束聚焦待測物之處並非焦平面位置時，自待測物反射後之光束，大部分將無法通過光偵測器前之針孔；反之，則能產生

極強之光訊號。透過垂直掃描過程取得一連串不同聚焦深度之待測物光強後，可得到一條光強與深度之訊號曲線，判斷曲線峰值位置即可得到待測物之高度資訊，利用此原理經過 X-Y-Z 方向掃描即可重建待測物之三維輪廓形貌。

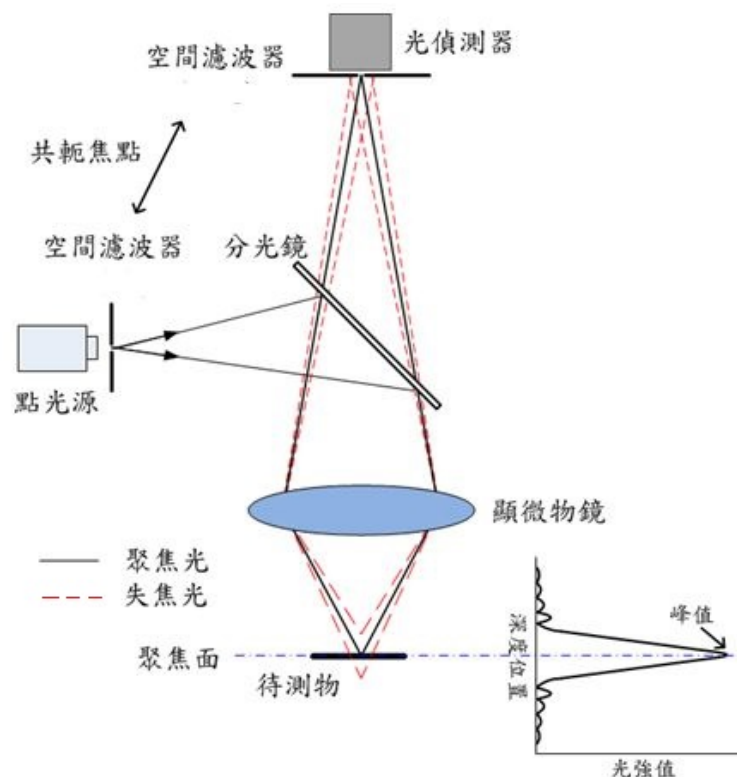


圖 2.2 共焦之量測系統示意圖

## 2.3 共焦量測系統文獻

(1) Tanaami 等人提出尼普科夫盤(Nipkow disk)結合微陣列透鏡之共焦顯微系統[4]

圖 2.3 為尼普科夫盤共焦顯微系統示意圖，其原理是利用單波長光源搭配尼普科夫盤，當光源穿過尼普科夫盤上層時，因微陣列透鏡進行聚束，接著聚束之光源將會通過下層的針孔陣列盤(Pinhole disk)，其元件對物體之反射光有空間濾波之效果。當尼普科夫盤旋轉時，透過微陣列透鏡與針孔的螺旋配置，即可快速達成 X-Y 軸(平面)之掃描，進而提升橫向掃描的速度，在系統中搭配如 PZT 等電控位移平台可增快 Z 軸(深度)之掃描速度，達成快速三維形貌之量測。

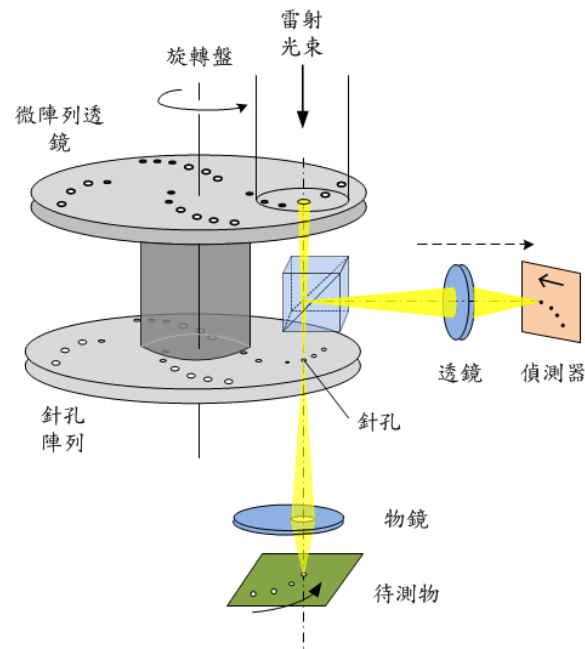


圖 2.3 尼普科夫盤(Nipkow disk)共焦顯微系統示意圖

(2) Ishihara 和 Sasaki 發展非掃描式多光束高速量測共焦顯微鏡[5]

利用微透鏡陣列元件將單一光源分成多束光源進行快速全域式掃描，取代傳統共焦之 X-Y 軸掃，可一次量測到物體整個面。將平行玻璃板放置於光路中，使得聚焦平面產生深度方向上位移之效果，達到快速 Z 軸掃描，然而平行玻璃板厚度與聚焦面偏移之距離有關，可依深度解析之需求調整玻璃厚度或數量。其系統之架構如圖 2.4 所示。

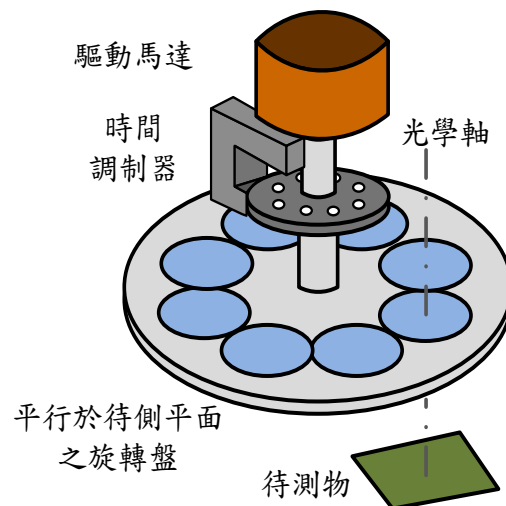


圖 2.4 快速深度掃描之變焦架構

運用此玻璃片旋轉機構與高斯曲線擬合之方式，來達到快速且精確之三維形貌量測，因此可利用少量影像來達成三維形貌重建。此系統之優點在於利用轉盤機構搭配平行玻璃片來達成快速變換聚焦深度，使用微透鏡陣列(Micro lens Array)可達成全域式量測，由此架構使得取像速度獲得提升。

### (3) Bitte 等人以數位微型反射鏡裝置作為主動光源投射之共焦顯微系統[6]

數位微鏡組裝置(Digital Micromirror Device, DMD)如圖 2.5 所示[7]，為德州儀器公司所開發，多用於影像與影片的投影上。但 DMD 也能更進一步地運用於光學檢測上，產生特定結構光圖案以進行量測。DMD 上每一個微小鏡組(Micromirror)即代表著影像中每一個像素，當移動待測物通過聚焦面時，也就是 DMD 所代表之像素對應到物體聚焦面時即可獲得最大影像強度，其系統架構如圖 2.6 所示。藉由評估深度曲線響應之峰值，可得出物體表面高度資訊，進而重建待測物之三維表面輪廓。而使用 DMD 則具備之優點為維護容易、處理參數可由軟體控制、影像高對比、高亮度與高解析等優點。在系統性能方面上，以 DMD 為基礎所發展之共焦掃描系統能夠進行全域式量測，具備速度快之優點，配合不同倍率之物鏡也能達到不錯的空間解析。

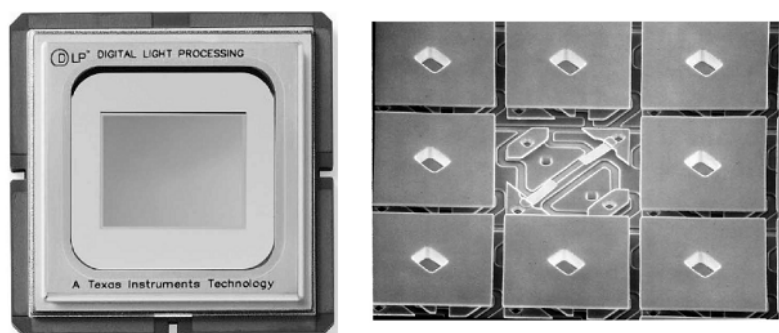


圖 2.5 DMD 數位微鏡組裝置

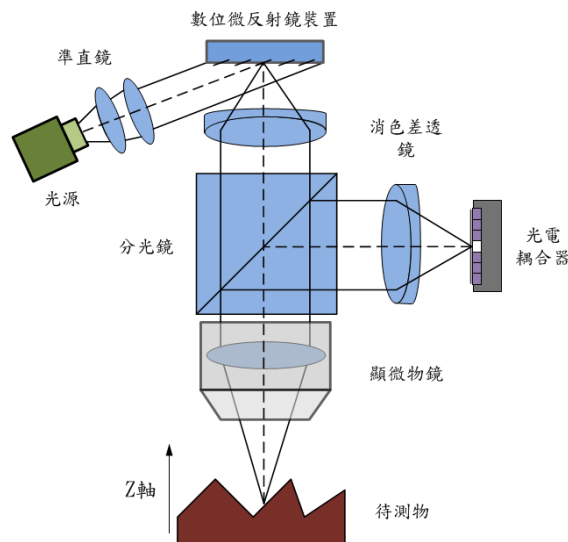


圖 2.6 DMD 作為主動光源投射的共焦顯微系統

(4) Nayar 和 Nakagawa 提出以判斷影像聚焦程度之聚焦形貌法[8]

藉由縱向上地掃描取得連續的深度影像，在不同聚焦面(深度影像)上，對每一個像素點進行聚焦點搜尋，以各式聚焦函數進行計算，找出最大的聚焦值，重建物體之三維輪廓，此方法稱為聚焦形貌法(Shape from focus, SFF)，系統架構如圖 2.7 所示，其中一種為 Sum-Modified-Laplacian (SML)，使用原理為因失焦影像類似於低通濾波器，以其作為聚焦函數判斷影像間之相關程度，評估影像之聚焦品質。此法相對於光滑表面，對於表面粗糙之待測物更具有良好之檢測效果，因粗糙表面高頻資訊充足。光滑表面也可額外對表面施以結構光之投射，藉此可提升其量測解析度。

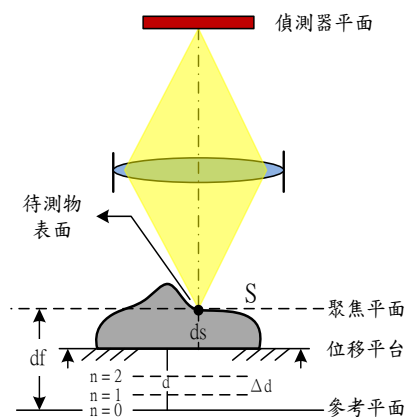


圖 2.7 聚焦形貌量測示意圖

(5) Shi 等人提出單點型快速彩色共焦之形貌量測法[9][10]

此方法是以飛秒雷射(Femtosecond laser)發出極短暫的脈衝波於晶體光纖(Photonic crystal fiber)內產生之超連續光譜作為光源，超連續光譜的波長範圍由紫外光至近紅外光，如圖 2.8 所示，以此做為彩色共焦的量測光源可增加量測範圍。圖 2.9 為量測系統架構，使用超連續光譜作為光源並搭配光纖直接入射，一開始通過兩高色差透鏡產生軸向色散，配合後端 100 倍顯微物鏡將不同波長聚焦至不同深度位置。接著待測物反射光入射至繞射光柵上，由光柵分離波長資訊，並由線型 CCD 接收。對應其波長與深度的校正曲線，將量測資訊進行曲線擬合，即可得知待測點之深度資訊。經由 X-Y 方向掃描即可重建其三維型貌。

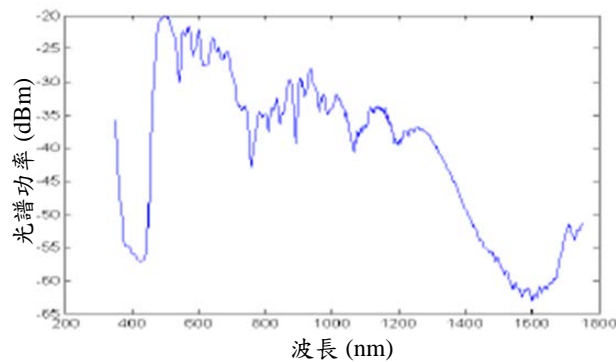


圖 2.8 超連續光譜之光譜圖

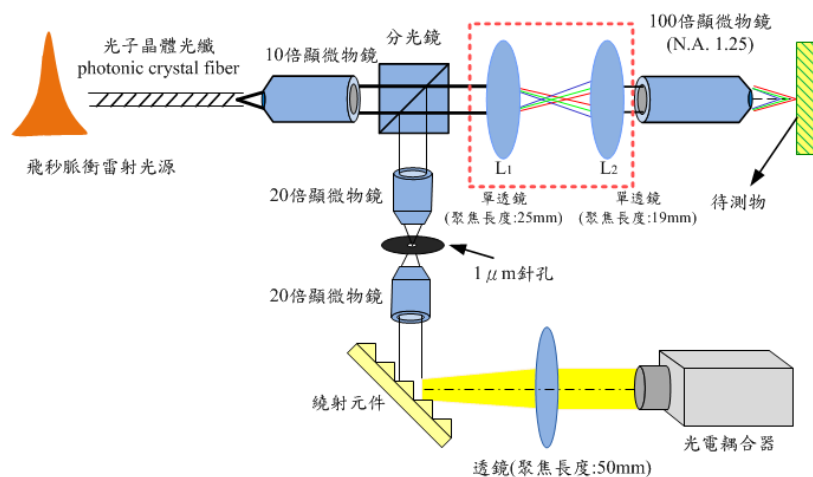


圖 2.9 單點彩色共焦量測系統示意圖

(6) Ruprecht 等人提出線型快速之彩色共焦形貌量測技術[11]

此系統使運用線狹縫與光譜儀達成線型快速之彩色共焦量測術，其架構如圖 2.10 所示。以白光作為入射光源，經準直透鏡與圓柱透鏡組合將其聚成線光源，後通過軸向色散物鏡後產生軸向色散，使不同波長聚焦於不同深度位置上。反射光將通過線狹縫濾除雜散光後，由線光譜儀接收，再透過深度與波長之校正線即可推得線剖面資訊，配合一軸方向掃描可重建待測物之三維形貌。

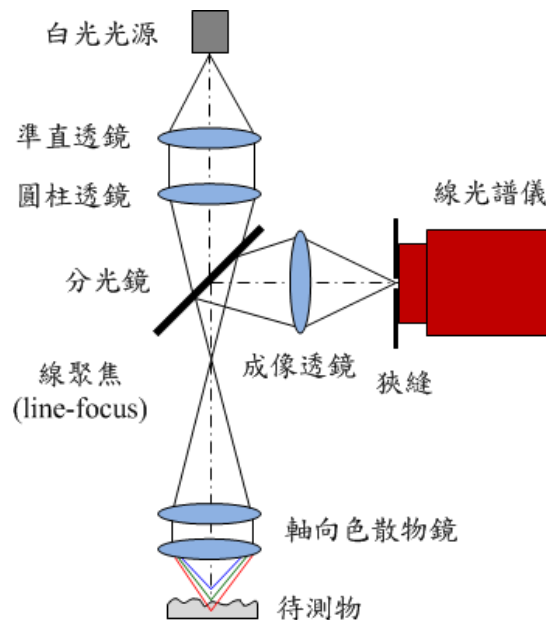


圖 2.10 線型彩色共焦系統架構

(7) Lin 等人提出繞射元件之線型彩色共焦量測法[12]

圖 2.11 為量測系統架構，使用氙燈(Xe lamps)作為光源來進行投光，其光源優點為光譜分布較為均勻。當光源通過繞射光學元件後，會依不同的波長聚焦至不同的深度位置。反射光經光柵片後再次繞射開來，最後由 CCD 來接收，因此可得一波長與強度的反應曲線，再透過橫向掃描即可重建待測物之三維形貌。其架構優勢在於相對一般色散物鏡折射方式，繞射元件可產生較平均的軸向色散，使深度與波長之校正曲線趨近線性，而缺點在於繞射元件之數值孔徑相對較小，須結合一般顯微物鏡及消色差鏡組使用，造成系統之複雜度。



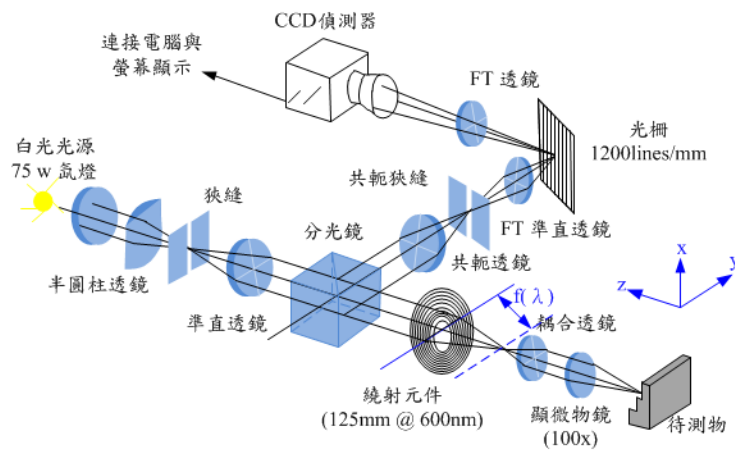


圖 2.11 繞射式彩色共焦系統架構

(8) Ruprecht 等人提出面型快速之彩色共焦形貌量測技術[11]

面型彩色共焦三維量測系統如圖 2.12 所示。白光光源經過繞射透鏡後產生軸向色差，使光源不同波長聚焦在不同深度的聚焦平面上，並反射回共軛針孔進行空間濾波濾除雜散光，最後由 CCD 取得影像資訊。經由光強正規化及 RGB 色度原理校正，可得一色度對應深度資訊，藉此可用單張影像重建出三維輪廓。此技術優點在於可進行即時快速面型量測，而缺點在於若是 RGB 三色光強訊號不足，將無法達到與同光譜儀之解析效果。

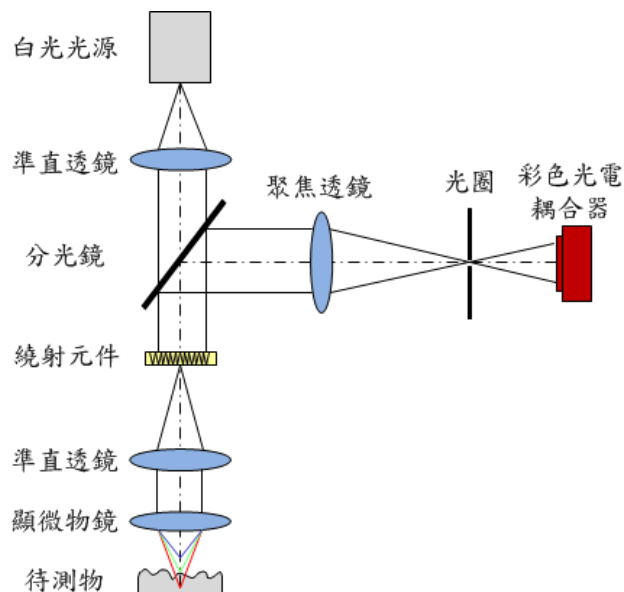


圖 2.12 面型彩色共焦系統架構



(9) Kim 等人提出之橫向彩色共焦形貌量測技術[13]

系統架構如圖 2.13 所示，寬頻光源經由繞射光柵進行橫向色散並投射於待測物上，不同波長投射於不同之橫向空間上。

反射光後經由狹縫進行空間濾波，準直投射於影像接收端的繞射光柵，此光柵與物端之光柵相同，故可由 CCD 得出一與投射於物體聚焦處相同之圖樣 (Pattern)，藉此獲得二維待測物表面資訊，並搭配縱向掃描即可重建其三維形貌輪廓。此系統優點為可達成即時面型量測，缺點為投射端與接收端之繞射光柵調整不易，光譜聚焦深度會產生誤差變化，且易受待測物表面色澤影響量測精度。

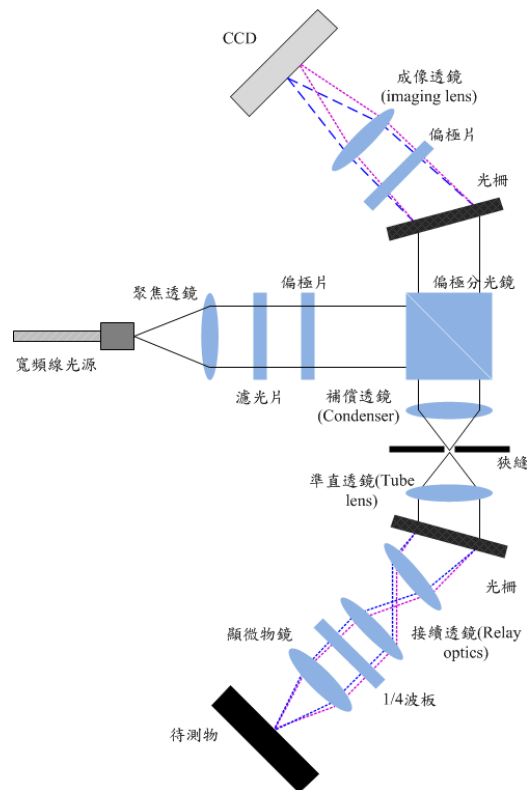


圖 2.13 橫向彩色共焦顯微架構圖

(10) Kim 等人發展一波長穿透率式彩色共焦形貌量測技術[14]

一般之彩色共焦形貌量測儀，是利用光譜儀架構作為感測器以分析反射光波長資訊才能建立波長與深度的校正曲線，將量測訊號對曲線作轉換，即可得知待測點之深度資訊。其發展之量測系統架構如圖 2.14 所示，放置一穿透率隨不同波長變化之光學濾波片於其中之一感測器前，兩反射光訊號比值即為聚焦波長對光

學濾波片之穿透率，藉此建立一穿透率與深度的校正曲線，量測時由兩反射光訊號即可得知待測點之深度資訊。此系統優點在於不須光譜儀作為感測器能大幅降低系統成本與硬體大小，而軸向解析為  $1.54\ \mu\text{m}$  略低於一般光譜儀式彩色共焦量測系統。

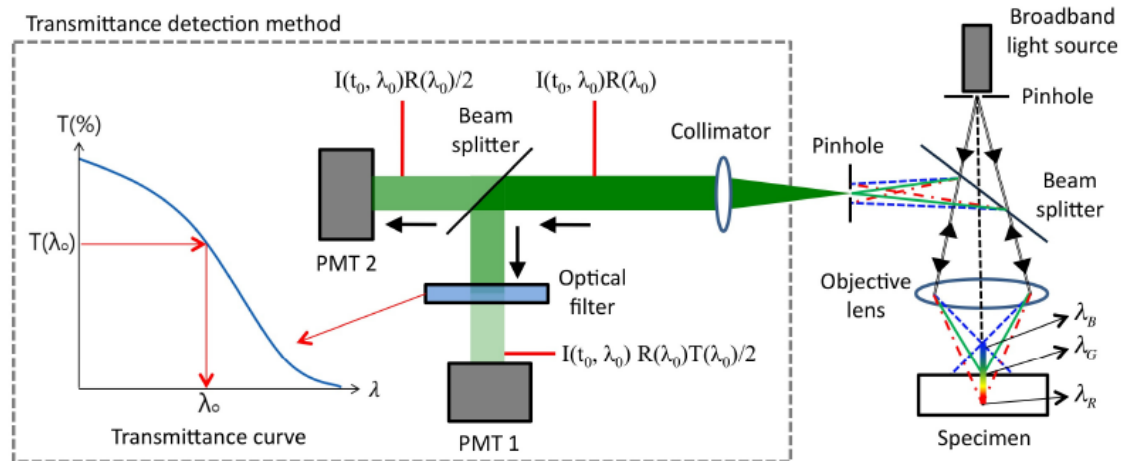


圖 2.14 波長穿透率式彩色共焦量測系統示意圖

#### (11) Lee 和 Wang 發展之差動式共焦顯微鏡[15]

1997 年台灣學者 Lee 和 Wang 為了提升單點共焦系統的量測速度，提出單點差動(differential)共焦量測術，此方法免除深度方向上的垂直掃描，提升量測速度的同時也提升量測精度。在傳統共焦量測技術中，藉由垂直掃描尋出信號光強峰值以得出相對高度資訊，但在峰值處信號強度對待測物位移的斜率卻為零，表示在該位置共焦信號對待測物的位移不敏感。而差動運算原理如圖 2.15 是將待測樣置於縱向反應曲線的斜線部分，在這區域，待測點高度的變化將會導致信號的差動變化，其信號大小對於微小的高度差異改變相對於傳統共焦尋峰方式極為敏感，因此大幅提高縱向解析度。實驗原理為只要在量測前先對待測物作縱向掃描，得到縱向反應曲線線性區的斜率，即可得到即時量測區間，量測不須垂直掃描就能直接獲得三度空間高度變化的立體影像。此方法雖然深度量測解析提升，但其缺點在於即時深度量測範圍只有數個  $\mu\text{m}$ 。

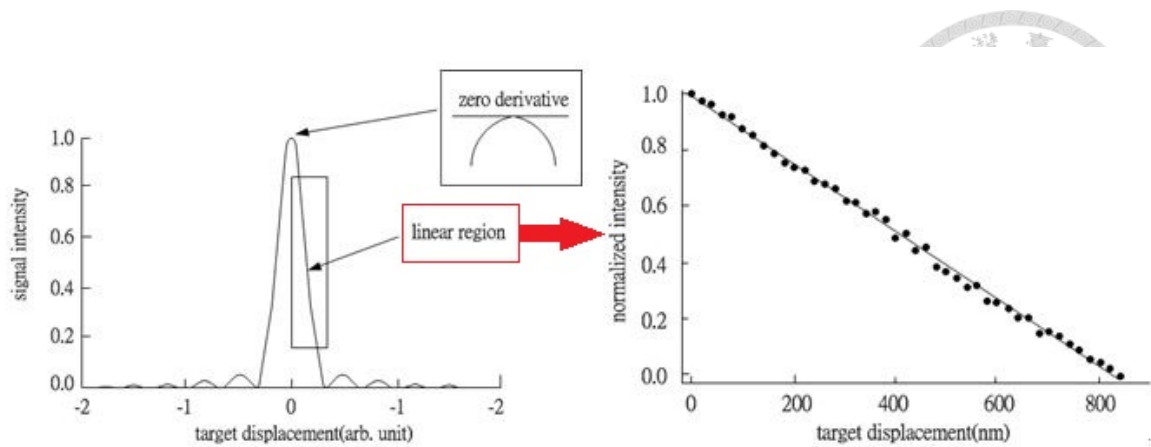


圖 2.15 差動共焦顯微鏡原理：縱向聚焦反應曲線與線性量測區間

(12) Wang 和 Kuang 等人發展一橫向差動共焦邊緣輪廓量測術[16]

一般之差動共焦量測術其優點在於相對傳統共焦較佳之深度解析，或是不須深度方向之掃描節以省量測時間。圖 2.16 為橫向差動共焦邊緣輪廓量測術架構，兩感測器其中之一平行焦平面方向作水平偏移，將兩訊號進行差動運算得出一橫向光強對橫向位置關係曲線，如圖 2.17，當探頭量測到邊緣輪廓時會產生一極值。此方法相對一般的差動共焦，在量測邊緣輪廓時有較佳之橫向解析及去雜訊功效。

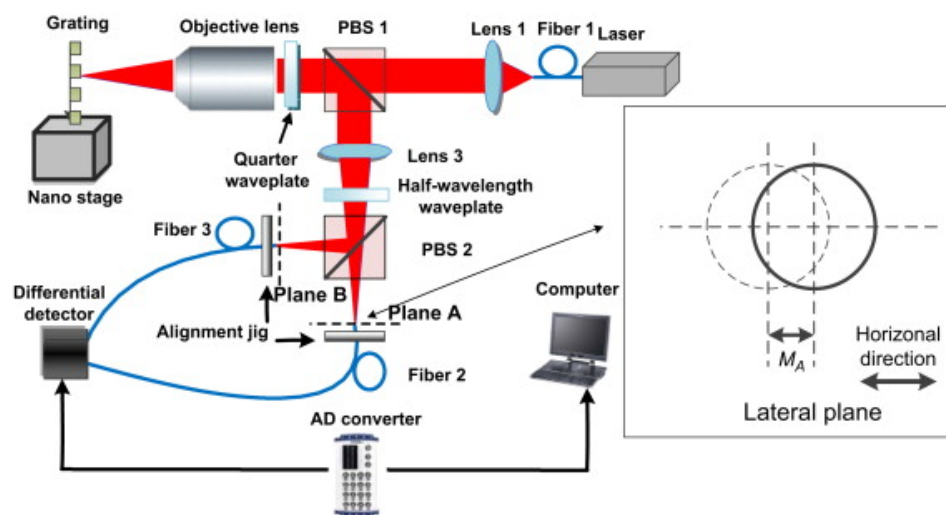


圖 2.16 橫向差動共焦邊緣輪廓量測架構

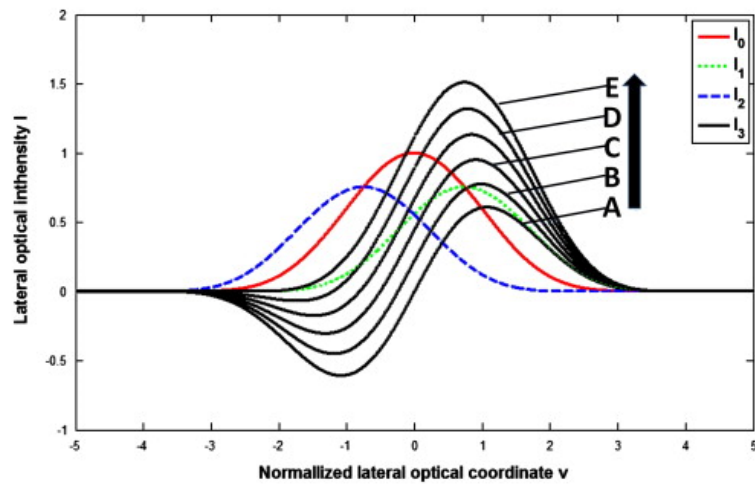


圖 2.17 橫向光強對橫向位置關係曲線

(13) Wang 等人研究差動共焦演算法以提升量測橫向解析[17]

對於傳統共焦來說，當選擇之空間濾波器，如針孔，孔徑越小橫向解析也越高，但事實上當針孔孔徑過小時信噪比(signal to noise ratio, SNR)也跟著變差。其系統架構如圖 2.18 所示，以孔徑一大一小之針孔得出兩光強訊號作為差動運算。兩大小針孔光強訊號差值為非焦點光(out-of-focus light)，將小孔徑針孔所得之光強扣除非焦點光即可得到更純粹的焦點光(in-focus light)訊號。光強曲線如圖 2.19，差動運算之光強分佈曲線有較小之全寬半高值(FWHM)，所以此演算法可得到較佳之橫向解析卻又能維持住 SNR。

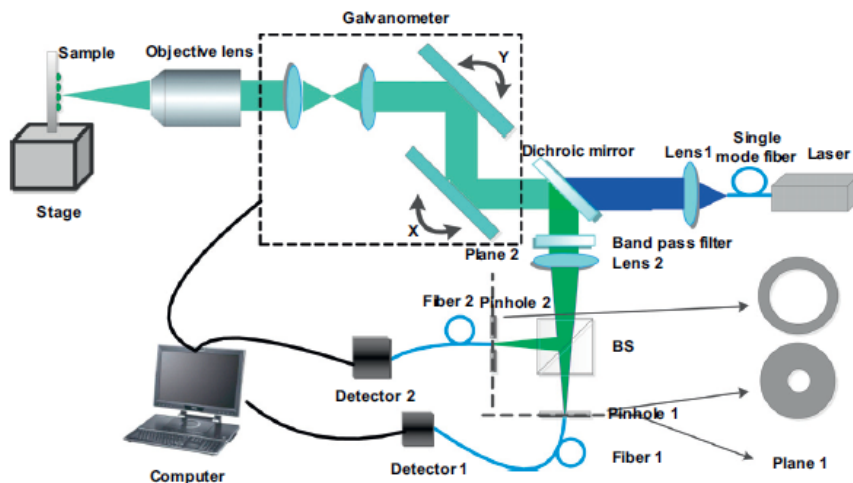


圖 2.18 差動共焦架構與針孔剖面示意圖

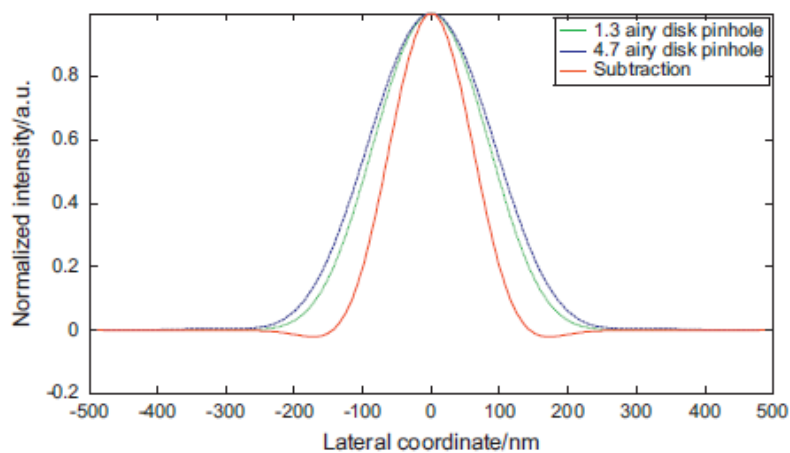


圖 2.19 兩原始光強及差動運算後所得出之光強分佈曲線

#### (14) 彩色差動共焦顯微三維形貌量測技術[1]

此技術是以彩色共焦與差動共焦兩種技術為概念基礎進行延伸發展，架構如圖 2.20 所示。系統使用寬頻白光作為光源，同時搭配軸向色散物鏡使各個波長聚焦到不同深度位置上，並採用兩組線型彩色 CCD 作為反射光訊號接收裝置，建立出多波長差動共焦架構與演算法以進行三維形貌量測。系統同時具大深度範圍量測與快速線型量測之優點，且此差動演算能消除待測物反射率的影響。

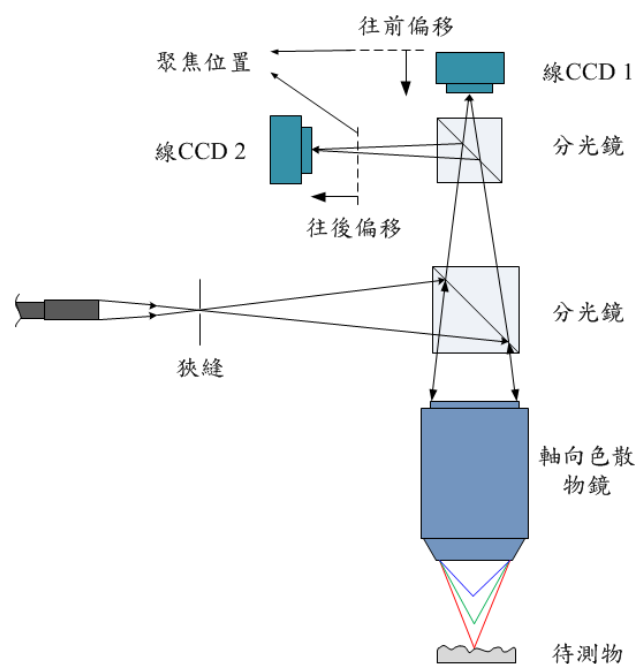


圖 2.20 彩色差動共焦系統之光學架構



## 2.4 文獻回顧總結

上述文獻所提及各種共焦量測技術與架構，皆是朝著快速且精確的量測技術為目標進行發展，針對現今產業之需求使得量測技術可提高於線上檢測環境之應用性。下為文獻回顧及整理，列出各個共焦量測系統架構之優缺點並進行評估。

表 2.1 各共焦量測系統技術之優缺點

共焦顯微鏡架構	優點	缺點
尼普科夫盤 (Nipkow Disk)	<ul style="list-style-type: none"><li>● 面掃描。(點鋪成面)</li><li>● 利用分像盤上之針孔的排列組合，提升量測之水平解析。</li><li>● 以針孔作為空間濾波，提高深度解析。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 以旋轉分像盤進行面掃描，機構震動帶進量測誤差。</li><li>● 深度掃描也需要移動平台進行量測。</li></ul>
微陣列透鏡 (Micro Lens Array)	<ul style="list-style-type: none"><li>● 以陣列式之微小透鏡取代單一物鏡，進行快速之面量測。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 微透鏡結構受限於製程，水平解析下降。</li><li>● 深度掃描也需要移動平台進行量測。</li></ul>
數位微鏡組裝置(DMD) 投光架構搭配聚焦形貌 演算法	<ul style="list-style-type: none"><li>● 數位微鏡組裝置產生特定結構光圖案進行量測，克服光滑表面高頻訊號缺乏之問題。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 解析受限光學繞射極限及微鏡製程。</li><li>● 深度掃描方面需要用移動進行量測。</li></ul>
聚焦形貌法 (Shape Form Focus )	<ul style="list-style-type: none"><li>● 用聚焦函數對影像進行聚焦程度之判別，重建物體輪廓。</li><li>● 免除針孔對準之問題。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 深度解析受限於硬體架構。</li><li>● 需搭配內插法進行補償。</li><li>● 無共焦之空間濾波器。</li></ul>
單點型彩色共焦量測法	<ul style="list-style-type: none"><li>● 無需垂直掃描。</li><li>● 使用針孔式空間濾波器水平解析與精準度優良。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 需橫向掃描逐點鋪面，量測時間較長。</li></ul>
線型彩色共焦量測法	<ul style="list-style-type: none"><li>● 無需垂直掃描。</li><li>● 單張影像即可得剖面資訊。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 水平解析度較單點型量測差。</li></ul>



繞射式線型彩色共焦量測法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 無需垂直掃描。</li> <li>● 單張影像即可獲得待測物剖面資訊。</li> <li>● 繞射元件可獲得較平均之軸向色散。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水平解析度較單點型量測差。</li> <li>● 量測解析及範圍受到繞射性元件受到製程上限制。</li> </ul>
面型彩色共焦量測法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 光源的軸向色差，使不同波長聚焦在不同深度之平面。</li> <li>● 搭配微陣列透鏡進行全域式量測。</li> <li>● 可達成即時量測。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測之深度範圍太小。</li> <li>● 聚焦位置校正複雜不易調整。</li> </ul>
橫向彩色共焦量測法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 全域式面量測。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 系統調整複雜。</li> <li>● 容易受待測物表面色澤影響。</li> <li>● 需垂直掃描。</li> </ul>
波長穿透率式彩色共焦形貌量測技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測不須垂直掃描。</li> <li>● 不須光譜儀達成彩色共焦架構，成本降低。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 深度解析不高。</li> <li>● 量測精度易受光強變化影響。</li> </ul>
差動式共焦量測法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 利用反應曲線之斜率部分之資訊，使縱向解析率達到奈米等級。</li> <li>● 可達成即時量測。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不同反射率之材質其反應曲線不同。</li> <li>● 可量測之深度範圍小。</li> </ul>
橫向差動共焦邊緣輪廓量測術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 對於邊緣輪廓量測較一般共焦量測術靈敏。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 針孔偏位須額外機構配合，調教不易。</li> </ul>
高橫向解析差動共焦演算法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 相對於傳統共焦有較佳之橫向解析。</li> <li>● SNR 佳。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測仍須垂直掃描。</li> </ul>
線型彩色差動共焦形貌量測技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 無需垂直掃描。</li> <li>● 消除待測物反射率影響。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水平解析度較單點型量測差。</li> </ul>

現今的共焦量測技術發展皆以線上即時量測作為研究的方向與目標，藉由探討與整理所研讀之文獻資料發現，其中一項關鍵的量測方式為彩色共焦量測技術。彩色共焦量測技術是以軸向色散物鏡或者是繞射性元件(DOE)搭配光譜儀的高光譜解析來達成系統的量測範圍與高量測精度，並利用軸向色散原理來取代傳統共

焦量測技術的垂直掃描過程，可有效縮短量測時間以提升量測速度。但由於搭配光譜儀作為感測器，除了造價較高之外也多出一維之資料量輸出影響解析速度，且彩色共焦術也會受到待測物體反射率影響。因此結合另一項關鍵技術-差動共焦量測術，運用其使用曲線線性段得出一即時深度量測區間的演算法，開發新型雙狹縫彩色差動共焦量測術。除了將改進彩色共焦術缺點外，並藉由光學架構的設計更進一步改善以往差動共焦架構因一前一後偏移 CCD 產生之水平對位、解析以及光效率問題，達成一新的差動共焦架構。系統以特別設計之折射式軸向色散物鏡與兩組線型彩色 CCD 的架構，搭配差動演算方式進行量測，同時建立出彩色差動共焦數學模型來找出反射光強度比值與待測物深度資訊，重建待測物體三維形貌。彩色差動共焦演算消除待測物反射率不同所帶來的影響，且開發之探頭選擇使用線型掃描架構以提升量測速度，雖然其量測解析會受到量測線上點與點之間的光強點擴散影響，水平與深度量測解析遜色於單點量測，但系統得以一次得到一整條線的高度資訊，使得線上三維形貌量測的目標可獲得實現。

因此在本研究所開發之線上雙狹縫彩色差動共焦量測探頭以下述三大系統進行研究與設計：彩色共焦量測技術、差動共焦量測技術以及線型共焦量測架構，圖 2.21 示，整合各技術及問題改善，並進行如折射式軸向色散物鏡、差動硬體架構、演算法等模擬與設計開發，以發展出一具工業線上量測可行性之量測系統。

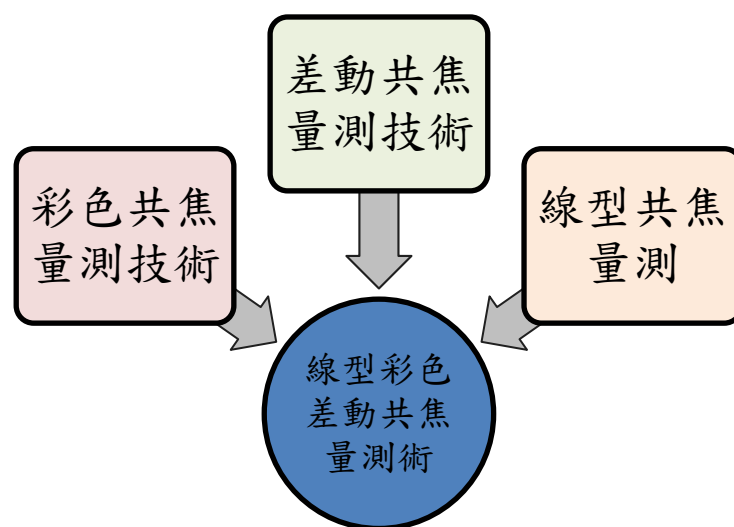


圖 2.21 線型彩色差動共焦量測術之組成架構



## 第3章

## 系統量測原理與技術



### 3.1 線型共焦量測系統

線型共焦系統是由單點型共焦系統演變而來，目的是在於加快量測速度。與單點型共焦架構的差別在於空間濾波器由針孔改變為線狹縫，線狹縫可視為空間中許多點光源排列成線之量測形式，光源入射後由物鏡聚焦於待測物，經待測物表面反射，其反射光通過共軛之線狹縫進行濾波將失焦之光強濾除，最後由線型偵測器進行接收反射光，其架構如圖 3.1。

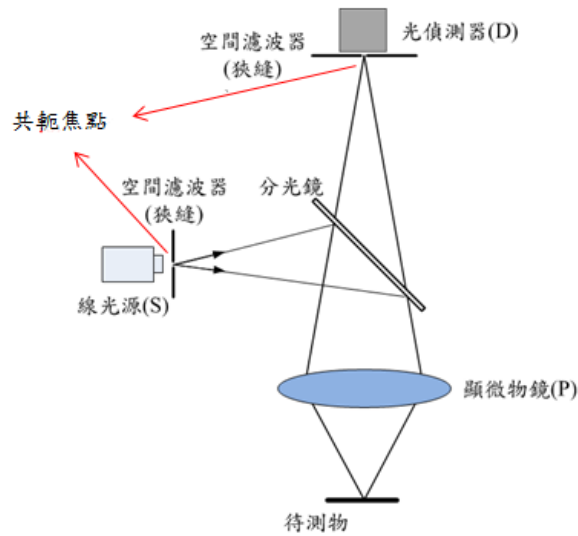


圖 3.1 線型共焦量測系統架構

在線型共焦系統中，由於針孔改為線狹縫，系統只剩一維度受到限制[18]。因此增加了一維度的干擾進入系統內，對於深度方向的訊號帶進雜訊，其深度方向訊號的變化，光強表示由方程式(3-1)所示[2]：

$$I(w, u) = \left\{ S(w) \otimes |h(w, u)|^2 \right\} \left\{ D(w) \otimes |h(w, u)|^2 \right\} \quad (3-1)$$

其中， $I$  為最後得到的光強訊號， $S$  為光源， $D$  為感測器， $\otimes$  代表摺積， $h$  為透鏡的點擴散函數(point spread function, PSF)，可表示為式(3-2)：

$$h(w, u) = \int_0^1 \int_{-\infty}^{+\infty} P(\xi, \eta) \exp[j(\eta w)] d\eta d\xi \quad (3-2)$$

而  $P(\xi, \eta)$  為透鏡之光瞳函數(pupil function)，可表示為(3-3)：

$$P(\xi, \eta) = \exp\left[\left(1/2\right)ju\left(\xi^2 + \eta^2\right)\right] \text{circ}\left(\xi^2 + \eta^2\right)^{1/2} \quad (3-3)$$

其中  $w$  為光學極座標對應之真實半徑， $u$  為光學縱向座標位置， $\xi$  與  $\eta$  則為透鏡  $x$  與  $y$  座標與透鏡半徑  $a$  之關係式，可依序表示為：

$$w = k \sin \alpha \quad (3-4)$$

$$u = 4kz \sin^2(\alpha/2) \quad (3-5)$$

$$\xi = x/a \quad (3-6)$$

$$\eta = y/a \quad (3-7)$$

$\sin \alpha$  為透鏡的數值孔徑值(numerical aperture, N.A.)， $k = 2\pi/\lambda$  為波數(wave number)。

接著由方程式(3-1)、(3-2)與(3-3) 整理後，可將深度方向強度訊號表示可改為：

$$I(w, u) = \int_0^1 \int_0^{(1-\xi^2)^{1/2}} \exp(ju\eta) d\eta \Big|_0^2 d\xi \quad (3-8)$$

從圖 3.2 可以很明顯的比較出單點(針孔)與線型(狹縫)的深度反應曲線的差異，線型系統的 FWHM 相對於單點系統的寬因此橫向解析較低，且此現象會對於傳統共焦術的峰值偵測易產生雜訊影響，因而降低系統的深度解析。但由於線型量測光源之光強使用率較佳以及檢測速度較高等優點，其仍具有相當大的發展優勢。

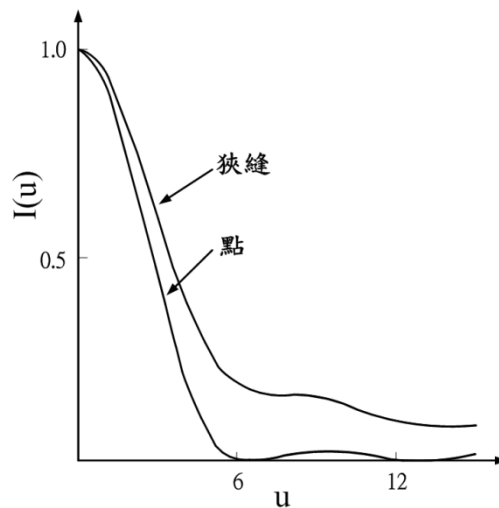


圖 3.2 單點(針孔)與線型(狹縫)共焦系統在深度反應曲線上的比較

線型共焦系統量測掃描之三維成像原理，如圖 3.3 所示。由於是線光源及線偵測，因此當進行縱向深度掃描時，可以得到一維方向的每個像素點之縱向深度響應曲線，藉由峰值的偵測即可得到待測物之剖面資訊，可以免除一維方向之逐點掃描，再配合 y 方向之位移，即可重建待測物全域性之三維形貌量測結果，大幅縮減掃描時間。

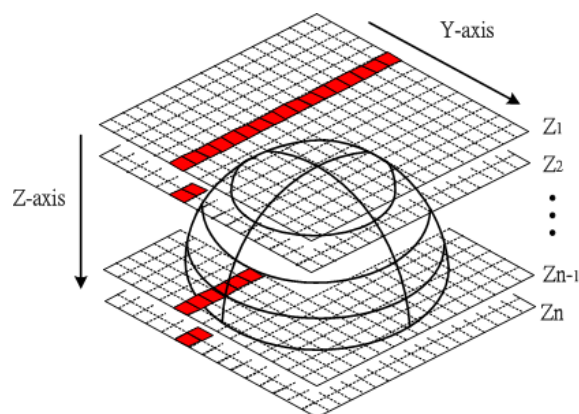


圖 3.3 線型共焦三維成像原理

## 3.2 彩色共焦量測系統

彩色共焦量測系統原理為應用光譜軸向色散的特性，於軸向深度位置上產生依據不同波長而變化之聚焦點，稱之為延伸聚焦點[19]，此軸向色散可取代傳統掃描式共焦顯微鏡的垂直掃描，可有效節省量測所需的時間提升量測速度。

### 3.2.1 光譜軸向色散之原理

折射原理是指光於行進中因介質變化而改變原行進之方向，當光線由疏介質(折射率小)進入密介質(折射率大)時，例如光從空氣入射至玻璃中，光的行進方向將會偏向法線，折射角小於入射角；反之，密介質進入疏介質，光速即從慢至快，折射角將大於入射角。此原理即是司乃耳定律(Snell's Law)：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3-9)$$

其中， $\theta_1$ 、 $\theta_2$  為入射角及折射角， $n_1$ 、 $n_2$  為兩介質之折射率(又稱折射係數)，介質之折射率為

$$n = c/v$$

(3-10)

$c$  為光於真空中之傳播速度( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )， $v$  為光於介質中之傳播速度，由於不同波長之光於介質之傳播速率不同，故折射率不只與介質有關亦與光波長有關，如圖 3.4 所示。

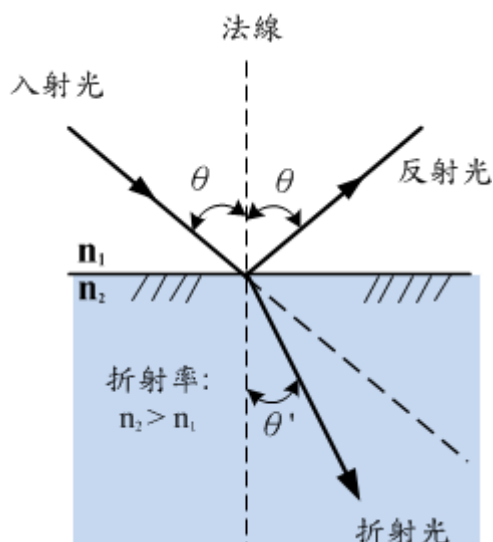


圖 3.4 光之折射現象示意圖

西元 1666 年英國科學家牛頓發現白光是由不同波長之光所混合而成，因任一波長對於介質的折射率  $n(\lambda)$  不同，使白光投射於三稜鏡時，不同顏色的光線因折射分開，這種現象叫光的色散，如圖 3.5 所示[20]。

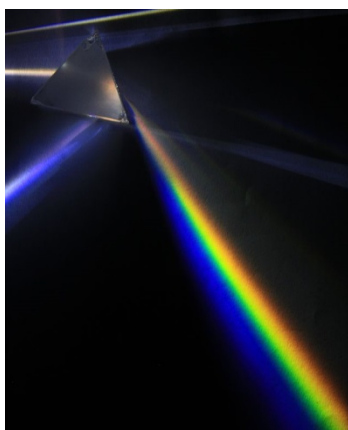


圖 3.5 不同波長透過三稜鏡之色散現象

將此色散光譜在經過三稜鏡後，可再次聚成原入射光之白光光源。由此可得知白色光源是由各種不同波長、顏色之光所組合而成，進而提出單色光的觀念，意即指某單一波長而無法再色散之光稱為單色光，但實際上單色光並不存在，一般所認定之單色光係指在某特定波長範圍內之光譜，該範圍的大小決定此單色光之頻寬大小與單色性。

法國科學家科西發現折射率和光波長之關係式，可用級數表示，稱之為柯西方程式(Cauchy's equation)，如式(3-11)所示：

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (3-11)$$

其中，A、B 與 C 為柯西色散係數，是依照不同介質的折射率而定，同一介質僅需測試三種波長之折射率，即可獲得此三係數，便可估算其他波長之折射率，由柯西方程式可得知，波長越長則折射率越小，且於同一介質不同波長之折射率為非線性，故折射之色散為非線性排列。依據薄透鏡之軸向色散，代入造鏡者公式(Lens maker's formula)，即可得知在各波長下之焦距，如式(3-12)所示：

$$f(\lambda) = \frac{1}{(n(\lambda) - 1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]} \quad (3-12)$$

其中， $R_1$ 、 $R_2$  為透鏡之曲率半徑， $n(\lambda)$  為材料中各波長之折射率， $f(\lambda)$  為透鏡各波長之對應焦距，如圖 3.6 所示。

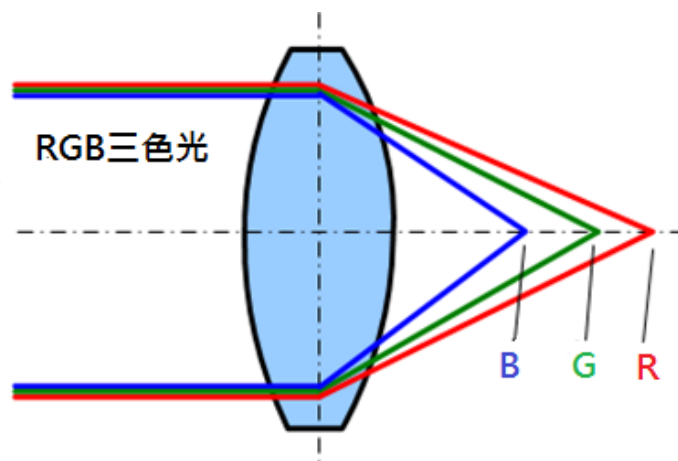


圖 3.6 透鏡之軸向色散示意圖

### 3.2.2 彩色共焦量測原理

彩色共焦系統即是運用寬頻光源與軸向色散原理，透過軸向聚焦色散元件造成軸向之光譜色散現象[21]，依此延伸聚焦點使寬頻光源中的各波長於不同深度位置產生不同之聚焦點，如所示。此方法可取代傳統共焦量測系統必須進行深度掃描的步驟，因此，可節省量測所需耗費之時間。

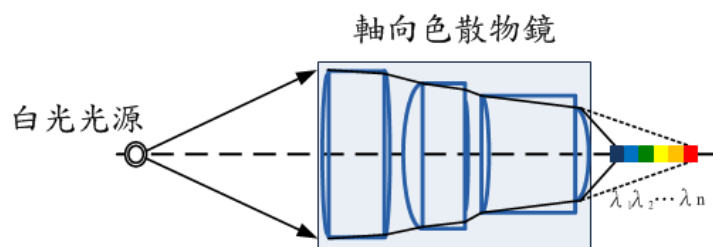


圖 3.7 折射式色散物鏡，可見光波段軸向色散示意圖

其彩色共焦原理同前面所說，利用可產生軸向色散之光學元件，配合入射之寬頻光源產生軸向色散，各波長聚焦於不同深度位置，整體量測系統架構如圖 3.8 所示。此時若待測物表面高度位於光譜  $\lambda_n$  之聚焦位置，則  $\lambda_n$  之光譜通過共軛空間濾波器，由光譜分光模組分析入射光束之光譜成分，藉由峰值偵測可精確得知聚焦點光譜之波長，進而建立縱向波長與光強之反應曲線。

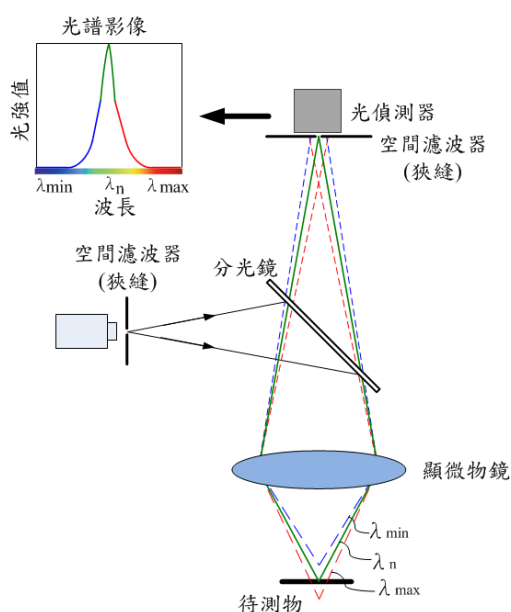


圖 3.8 線型彩色共焦系統示意圖



上述系統的光強表示式可以由線型共焦系統的表示式(3-1)與(3-2)式，進一步更改為與波長變化相關的表示式(3-13)與(3-14)式，方程式改為與波長相關，反射光的波長將會影響光強與聚焦位置的變化：

$$I_{\lambda}(w, u) = \left\{ S_{\lambda}(w) \otimes |h_{\lambda}(w, u)|^2 \right\} \left\{ D_{\lambda}(w) \otimes |h_{\lambda}(w, u)|^2 \right\} \quad (3-13)$$

$$h_{\lambda}(w, u) = \int_0^1 \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\lambda}(\xi, \eta) \exp[j(\eta w)] d\eta d\xi \quad (3-14)$$

深度方向的強度訊號表示式將由(3-8)式改為(3-15)式：

$$I_{\lambda}(w, u) = \int_0^1 \left| \int_0^{(1-\xi^2)^{1/2}} \exp(ju(\lambda)\eta) d\eta \right|^2 d\xi \quad (3-15)$$

對於共焦系統來說，縱向聚焦反應曲線之峰值決定了待測物深度位置，藉以判別待測物之表面輪廓位置，重建待測物之三維形貌，因此有效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格外重要。系統採用光譜折射原理匯聚成縱向延伸聚焦點，大幅地提升縱向解析度與量測速度。

光譜波長及形貌深度轉換需透過事先的系統校正程序，通常是於量測樣品前，利用一近似理想之平面反射鏡，先進行縱向(垂直)之掃描，並逐一記錄其深度位置與波長關係，使可用曲線擬合法(curve fitting)或查表法(look-up table)，以利建立參照轉換之關係。量測樣品時，將待測物表面所測得之波長，透過此校正程序獲得實際之縱向深度位置，圖 3.9 所示。深度位置之關係可進一步藉由曲線擬合原理方式進行轉換。

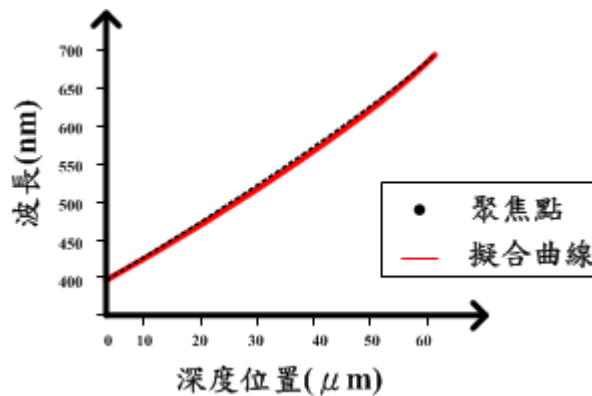


圖 3.9 波長與深度位置之校正曲線



### 3.2.3 無窮補正型式軸向色散顯微物鏡模擬與設計之原理

本研究所設計之軸向色散物鏡主要是採用無窮遠補正的架構，此類型架構可有效地提升光強度、高數值孔徑以及長工作距離，且另一好處在於未來系統須切換不同倍率之物鏡時不會產生額外的像差及聚焦距離變動之問題，系統其他元件也不須進行更換或調整。色散物鏡之設計是以光學設計軟體 ZEMAX 進行模擬以及開發，藉由更換不同的鏡片材質、曲率半徑以及厚度等，配合績效函數之調整與設定優化物鏡之設計，最後並考慮實際加工之製程難度及成本考量加以修正、設計物鏡外殼。本研究為了縮短量測時間以加快量測速度選擇設計為 2X 物鏡，量測線寬可達 14 mm。圖 3.10 所示為設計之 2X 軸向色散物鏡模擬設計圖面，三種顏色表示為三個視高(field)的入射光。準直光由光圈進入物鏡前群組(首兩片鏡片)時先聚束，主要為影響到物鏡設計之倍率；而後進入後群組(後五片鏡片)，為倒置遠攝結構(reverse-telephoto)，各類像差主要在這部分進行消除，此類結構設計也能提升物鏡之數值孔徑(N.A.)。2X 軸向色散物鏡詳細規格顯示於表 3.1 中，而色散長度如圖 3.11 所示，可見光波段色散為 920  $\mu\text{m}$ ，較先前實驗室設計之物鏡來得長，其目的為加寬光強對深度反應曲線之 FWHM 以獲得較長之即時深度量測範圍。

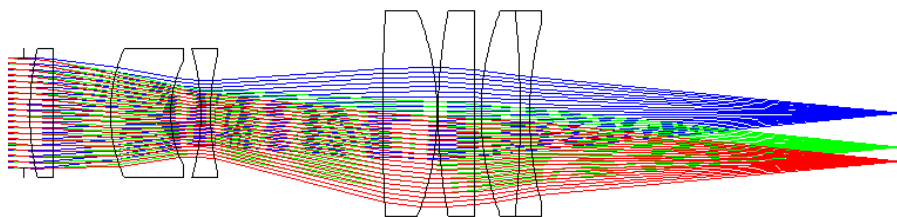


圖 3.10 2X 無窮補正色散物鏡 ZEMAX 光路模擬圖

表 3.1 2X 軸向色散物鏡規格表

	2X Chromatic Objective
波長範圍( nm)	400~700
色散範圍( $\mu\text{m}$ )	920
數值孔徑(N.A.)	0.1
工作距離(W.D.) (mm)	58



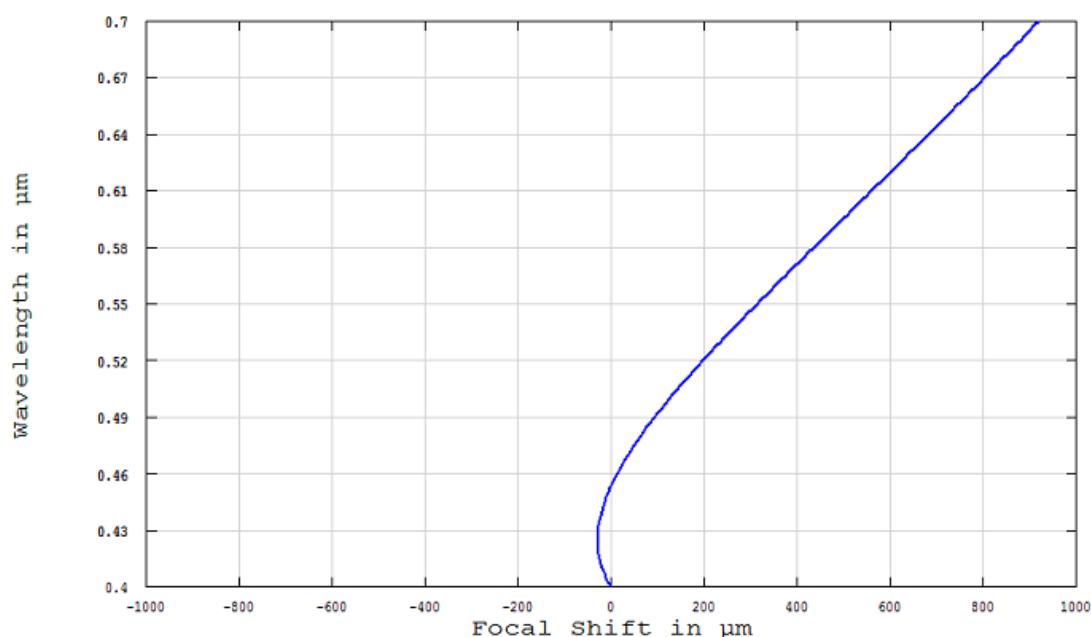
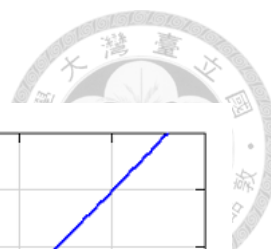


圖 3.11 2X 無窮補正色散物鏡可見光波段波長對焦距圖

實驗室其他倍率色散物鏡規格比較如表 3.2 所示。

表 3.2 各倍率軸向色散物鏡規格比較

	2X	20X	27X	50X
波長範圍( nm)	400~700	400~700	400~700	400~700
色散範圍( $\mu$ m)	920	350	600	80
數值孔徑(N.A.)	0.1	0.37	0.48	0.54

### 3.3 彩色差動共焦量測系統與架構

為了解決一般彩色共焦需要光譜儀進行訊號接收所造成量測速度的問題，並且為了進一步改善彩色共焦系統在量測時因為待測物對不同波長的反射率的差異所造成的量測誤差問題，因此本研究提出一種創新式差動共焦量測方法：以線型彩色寬頻光源並結合軸向色散物鏡、兩組彩色線型光感測裝置及置於其前方的兩大小不同寬度狹縫建構出一共焦量測系統，發展一即時線型掃描彩色差動共焦量測技術。研發之差動共焦量測系統，光源透過軸向色散物鏡聚焦至物體表面並反

射，接著通過放置於兩彩色線型光感測器前方，寬度一大一小狹縫以達成共軛焦架構，最後藉由兩感測器接收一組反射光訊號。此兩反射光的訊號具有不同全寬半高值的 RGB 三顏色的強度反應曲線，將此光強度反應曲線經由正規化差動共焦運算，以分別求得 RGB 三色光的強度比值與量測深度的關係曲線，以此曲線為依據來進行型貌量測深度資訊之重建。所提出之差動共焦運算可將物體表面反射率的參數影響消除，量測重建時可有效抑制物體表面不均勻的反射率的影響，進而大幅提升量測精度，同時避免不同量測點具有不同反射率所造成光強變異。

### 3.3.1 量測系統原理

為了提升量測速度以達到線上量測目標，本研究使用軸向色散物鏡來產生軸向色散效果，以達到大範圍之深度量測能力，使入射光源的連續波長分別聚焦至不同的深度位置上，並採用彩色光感測(CCD 或 CMOS)裝置來量取反射光的強度訊號而非以光譜儀方式分析各個波長的訊號，選擇此偵測方法可因節省波長的感測維度，縮短運算時間以提升系統量測速度。彩色光感測裝置中的三組色光(RGB)感測器會將各色光波長範圍的光強度訊號疊加起來，因此，彩色光感測裝置最後將僅獲得 R、G 與 B 三組色光強度訊號。本研究因為在實驗中發現相對 R 與 B，G 色光的光強響應最佳，所以主要以 G 色光感測器作為選擇。所以後面的量測原理與公式推導以 G 色光做為說明，但其他兩色光的量測原理也是相同的，公式及原理可進行相同之推論。

由方程式(3-13)可寫成式(3-16)，以表示感測器接收到之 G 色光的光強，其中  $\lambda$  為彩色光感測器裝置中的綠色濾波片的波長值範圍，而響應波段主要在 500nm 到 600nm 之間。

$$I_{\lambda}(w, u) = \left\{ S_{\lambda}(w) \otimes |h_{\lambda}(w, u)|^2 \right\} \left\{ D_{\lambda}(w) \otimes |h_{\lambda}(w, u)|^2 \right\} \quad (3-16)$$

在(3-16)式中  $I_{\lambda}(w, u)$  的強度分佈並不考慮待測物的反射率問題。因此，為了考慮待測物每一個量測點反射率可能不均勻對量測結果的影響，彩色光感測器裝置所接收到的訊號將改寫表示為式(3-17)。

$$I'_g(w, u) = R_g I_g(w, u) \quad (3-17)$$

其中，g 代表綠光波段波長， $R_g$  代表量測點對綠光波段的反射率值。

為了得到對應深度的關係曲線，以達到即時量測的目的，量測光學系統架構採用兩線型彩色光感測器來進行量測，同時使用兩組彩色光感測器在兩個光路之相同聚焦位置上進行光訊號之感測，藉此獲得一組 G 色光的深度響應曲線資訊。並以這一組資訊進行差動共焦運算，以獲得新的一光強差動比值與深度的關係曲線，透過此曲線進行即時線型掃描量測，同時降低不同反射率對量測所帶來的量測變異影響。

在量測系統中，光源透過軸向色散物鏡聚焦至物體表面並反射，接著通過放置於兩彩色線型光感測器前方之寬度一大一小狹縫，兩光感測器裝置各自產生一個強度反應曲線，其中一組光感測器(CCD1)因搭配寬度較小之狹縫會得到較窄的全寬半高值；而另一組光感測器(CCD2)會得到較寬的 FWHM，如圖 3.12 所示。式(3-18)和式(3-19)分別表示 CCD1 與 CCD2 裝置所得到的 G 強度訊號：

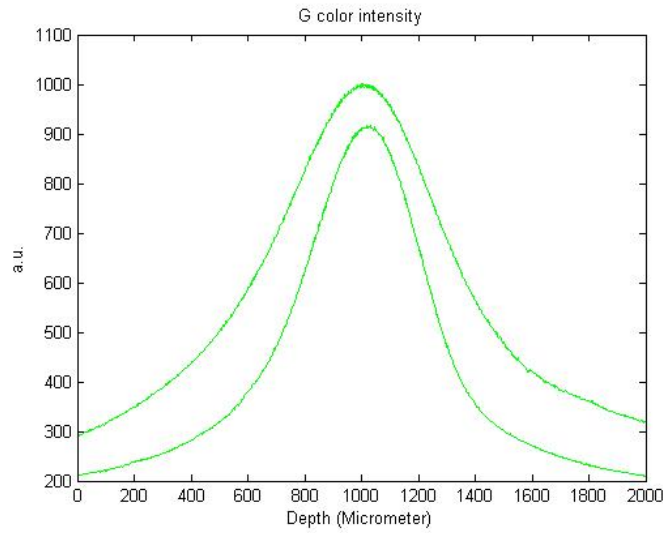


圖 3.12 兩不同寬度狹縫經由垂直掃描後所取得的聚焦綠色光之反應曲線

$$I_1'(w, u) = R_g I_1(w, u) \quad (3-18)$$

$$I_2'(w, u) = R_g I_2(w, u) \quad (3-19)$$

$I_1'$  與  $I_2'$  代表不同 CCD 收到不同寬度之狹縫產生的光強。

為了建立出一組即時量測使用的關係曲線，把 CCD 裝置取得的兩綠色光(G)的強度值，透過如式(3-20)所示之差動運算，變成一組強度比值 (Ratio curve, Rc)

對深度的曲線，因此可以獲得一條強度比值與深度的關係曲線，如圖 3.13 所示。G 色光強度比值的曲線方程式乃由式( 3-18)與( 3-19)結合而求得新的強度比值  $R_{C_G}$ ，表示為式( 3-20)。而以相同色光進行差動運算後得到的顏色強度比值曲線，此方式運算可將待測物體本身的反射率系數  $R_g$  消除，使得所求得的色光強度比值較不受不同量測物(點)表面反射率差異所造成之影響。因此，新建立的 G 色光強度比值  $R_{C_G}$  的曲線，將使量測系統獲得一個獨立有限線性區域的即時深度量測範圍，量測校正曲線不易受待測物反射率影響，增加量測運用之可行性。其強度比值  $R_{C_G}$  與深度關係曲線如圖 3.13 所示，藉由量測所得之強度比值  $R_{C_G}$  即可找出對應之相對深度，而選擇較為線性的區段(擁有同樣的斜率，所以解析度相同)作為即時深度量測區間。

$$\begin{aligned}
 R_{C_G}(w, u) &= \frac{I'_1(w, u) - I'_2(w, u)}{I'_1(w, u) + I'_2(w, u)} \\
 &= \frac{R_g I_1(w, u) - R_g I_2(w, u)}{R_g I_1(w, u) + R_g I_2(w, u)} \\
 &= \frac{I_1(w, u) - I_2(w, u)}{I_1(w, u) + I_2(w, u)}
 \end{aligned} \tag{3-20}$$

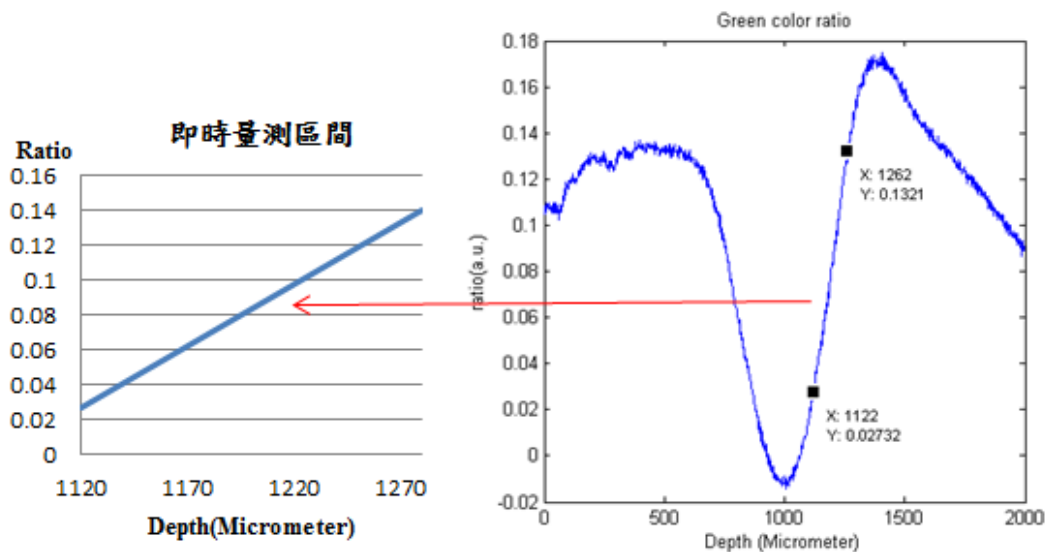


圖 3.13 綠色色光強度比值與深度關係曲線

差動運算  $R_{C_G}$  建立出一組即時量測使用的關係曲線，演算法消除反射率系數  $R_g$  的關係使量測不易受待測物反射率影響。而在實驗中發現，大小狹縫所產生之光強曲線 FWHM 差異越大，強度比值與深度反應曲線之線性即時量測區間越長[2]，且斜率也較大使得量測時受到同樣的強度比值擾動所產生之誤差也較小。所以理論上，兩狹縫分別選擇越大和越小以得到最大的 FWHM 差值。但在實際上可以知道，當狹縫越小時，量測所需曝光時間就越長，進而影響量測速度，且狹縫越小其 SNR 也越差；而大狹縫太大時雖然曝光時間相對短，但其共焦空間濾波之效果也會降低，雜散光易進入感測器中影響量測，所以大狹縫的選擇也受到限制。

因此，為了提升差動演算的功效，參考 Wang 等人之研究[17]，開發一新型差動演算法，將方程式( 3-20)中小狹縫光強  $I'_2$  改為方程式( 3-21)，得到一光強曲線 FWHM 更小之  $I'_{diff}$ 。

$$I'_{diff}(w, u) = I'_2(w, u) - \alpha(I'_1(w, u) - I'_2(w, u)) \quad (3-21)$$

其中  $I'_2$  為小狹縫光強， $I'_1$  為大狹縫光強， $\alpha$  為實驗值參數。

接著將方程式( 3-21)  $I'_{diff}$  帶入( 3-20)取代  $I'_2$ ，得到一新的強度比值 (New Ratio curve, NRc) 對深度的曲線( 3-22)。

$$\begin{aligned} NR_{C_G}(w, u) &= \frac{I'_1(w, u) - I'_{diff}(w, u)}{I'_1(w, u) + I'_{diff}(w, u)} \\ &= \frac{(1 + \alpha)(I_1(w, u) - I_2(w, u))}{(1 - \alpha)I_1(w, u) + (1 + \alpha)I_2(w, u)} \end{aligned} \quad (3-22)$$

新的強度比值  $NR_{C_G}$  隨著設定不同的實驗參數  $\alpha$  而變化，使得在選擇寬度不同之大小狹縫組合時，在維持量測速度以及狹縫之空間濾波效果限制下，仍可以獲得較長之即時深度量測區間及較大斜率。

而為了測試新的強度比值演算法，進行光強跳動實驗，後端狹縫分別為 10 和 20  $\mu\text{m}$  寬。在即時深度量測區間內，兩 CCD 每一深度進行 30 次光強取樣，以驗證每一量測區間深度內可能產生之光強跳動誤差。 $R_{C_G}$  演算法下，光強跳動一個標準差產生之最大誤差(兩 CCD 光強一正一負跳動)如圖 3.14 所示，最大可能造成 3.28  $\mu\text{m}$  誤差量。

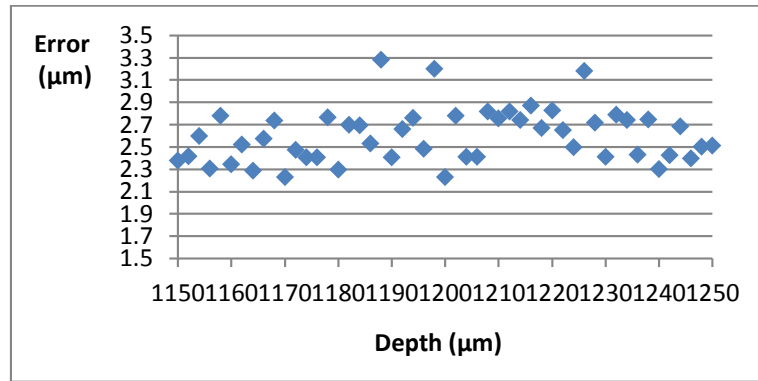


圖 3.14  $Rc_G$  演算法深度對光強跳動一標準差之最大誤差

在新的差動演算法下，隨著實驗參數  $\alpha$  的增大， $I'_{diff}$  的 FWHM 也越小，所算出  $NRC_G$  光強差值對深度即時量測區間斜率也越大，量測範圍也較長。而在深度量測區間內，隨著  $\alpha$  的變化，量測區間光強跳動一個標準差所造成之最大誤差如圖 3.15 所示，最小誤差在  $\alpha$  等於 1 時有極小值約 2.61  $\mu\text{m}$ 。

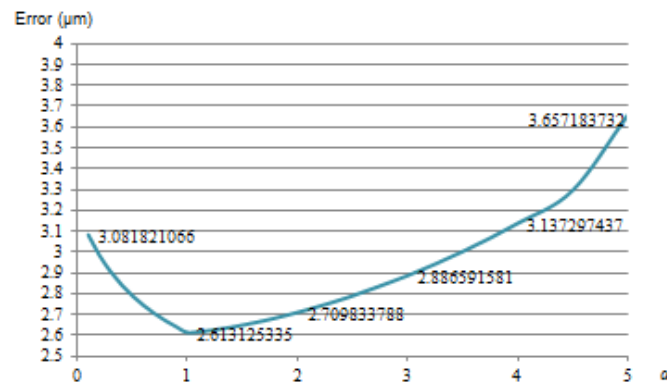


圖 3.15 量測區間內  $\alpha$  對光強跳動一個標準差之最大誤差圖

原始差動演算法  $Rc_G$ ，光強跳動一個標準差所可能造成之最大誤差為 3.28  $\mu\text{m}$ ，而新差動演算法  $NRC_G$  在光強跳動一個標準差造成之最大誤差在  $\alpha=1$  時有最小值 2.61  $\mu\text{m}$ ，有效將誤差降低了 20%。但從實驗可得知，新型差動演算法的量測誤差並非隨  $\alpha$  變大、即時量測區間斜率變大而無限變小，有其最小值，所以用新差動演算法建立即時量測曲線時依據不同狹縫組合選取最佳之實驗參數  $\alpha$ ，以最小化系統量測誤差。



### 3.3.2 量測系統架構

本實驗室先前已發展一套雙狹縫彩色差動共焦系統，其是將光源經由光纖一分為二，並在光纖前方放置大小不同的線型狹縫，讓光感測器裝置各自感測一組強度反應曲線，其中一組光感測器會得到較窄的全寬半高值(FWHM)；而另一組光感測器會得到較寬的 FWHM，其系統架構如圖 3.16 所示[2]。

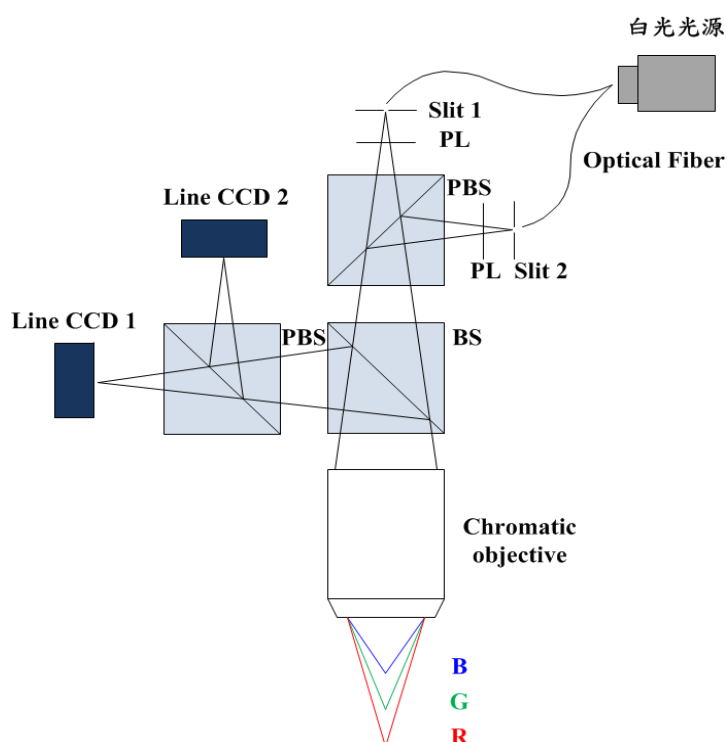


圖 3.16 舊型彩色差動共焦系統光路示意圖

但在舊有彩色差動共焦系統架構下，光源經一分二光纖之後在到達感測器之前經過四次分光鏡，大大降低光源使用效率，增長曝光時間降低量測速度。另外從架構示意圖可看出在感測器前方並無狹縫等共焦架構所需之空間濾波裝置，影響量測系統之精確性。因此，本研究所發展之新型雙狹縫彩色差動共焦量測系統如圖 3.17 所示，光源經光纖導入光路系統中，經自行設計之軸向色散物鏡聚焦於量測物表面後反射，最後經分光鏡(BS)分成兩組訊號經過大小不同之狹縫後藉由兩光感測器進行訊號之接收。在對於相同寬度之狹縫(20  $\mu\text{m}$ )下達到相同近飽和之曝光值，舊架構曝光時間約為 4 ms，新架構為 0.5 ms，大幅縮短了曝光時間。

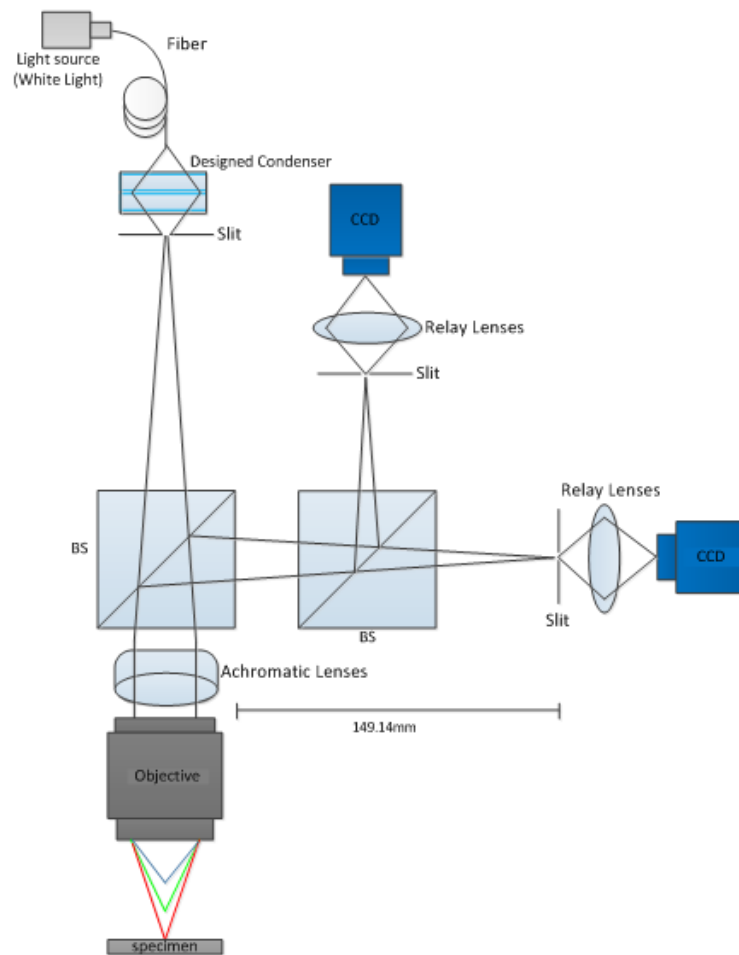


圖 3.17 本研究開發之新型雙狹縫彩色差動共焦系統光路圖

而為了測試有無後端狹縫進行空間濾波對量測系統精確度之影響，在量測探頭設計加工前，已先架設了 Free Space 光路進行驗證，如圖 3.18 所示。而由圖 3.19 可看出，加入後狹縫後有較佳之濾非聚焦光之效果。並為了量化濾波效果之差異，藉由量測同一點(pixel)同高度下的光強跳動值進行驗證(一次實驗之光強擷取總共取 30 次，各次間隔時間為 10 秒。)實驗結果如表 3.3 所示，使用之 CCD 動態範圍為 1024 灰階，在無後端狹縫的情況下(同舊有架構)，光強值因非焦點光的影響使得光強跳動約為 4 個灰度值，藉由光強差動運算所得之 Ratio 值與深度關係，可得出造成約  $4\text{ }\mu\text{m}$  誤差；而現有架構加入後端狹縫後有效濾除非焦點光，光強跳動約為 1~2 個灰度值，造成約  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  誤差。



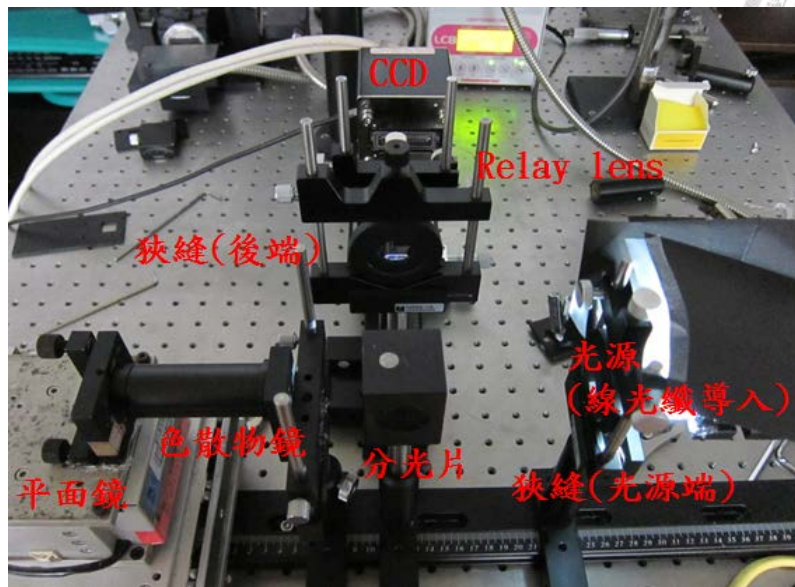
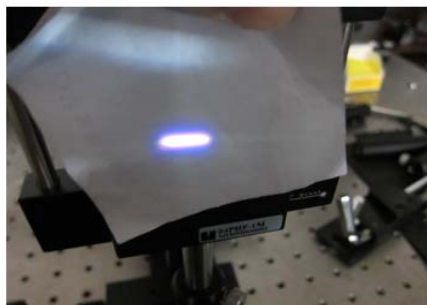


圖 3.18 Free Space 架設圖



過狹縫前



過狹縫後

圖 3.19 反射光進入狹縫前後之差異

表 3.3 光強跳動實驗結果

有後端狹縫			無後端狹縫
狹縫寬度	50 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	X
光強跳動標準差(灰度值)	0.32	0.66	1.13
光強跳動 Peak to Valley (灰度值)	1.2	2.3	4.1

另外在光強跳動實驗中也發現，曝光時間縮小也能降低光強之跳動，所以有效提高光源使用效率也能提升量測之精度。設計運用兩相同之半柱狀透鏡連結線光纖出口與前端入光狹縫，進行聚光增強光源使用效率。ZEMAX 光路模擬如圖 3.20 所示，圖 3.21 為 SolidWorks 機構設計圖及實體照。

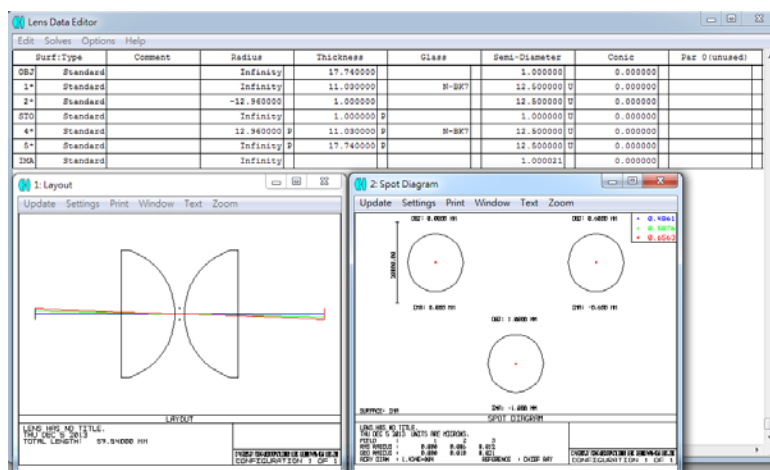


圖 3.20 半柱狀透鏡聚光模擬

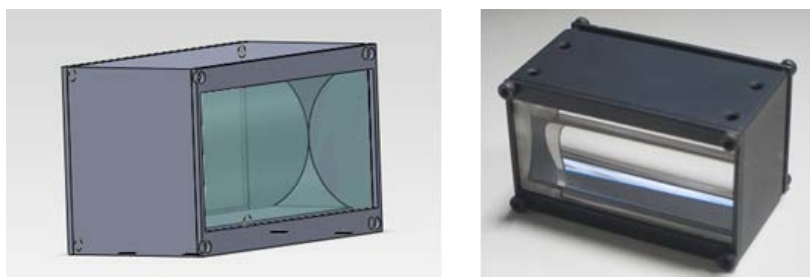


圖 3.21 聚光鏡組 SolidWorks 機構設計圖及實體照

總結來說，本研究發展之新型雙狹縫彩色差動共焦量測系統優點為：

1. 高光源效率：相較舊架構光路中經過四次分光鏡，新架構只經過三次分光鏡，提高光源使用效率，有效縮短曝光時間提高量測速度。
2. 共軛焦濾波功能：新的架構藉由兩 CCD 前之大小狹縫得到兩不同 FWHM 之訊號進行差動運算，達成共軛焦系統空間濾波之效果，降低量測誤差。
3. 系統調校簡易：舊架構須確定兩道光訊號打在同一量測點上，調校不易。新架構兩道訊號在兩 CCD 接收前才分出，共光路較長且並無量測不同點之問題，大幅縮短調教時間。另外配合設計之無窮補正色散物鏡，在未

來不同量測需求下更換物鏡時架構不受影響，增加系統可行與實際性。

本研究在以 Free Space 光路驗證之後，開始進行完整的雙狹縫彩色差動共焦量測探頭之設計。系統以 SolidWorks 來設計光學量測探頭機構，如圖 3.22 所示，圖 3.23 為加工出的探頭系統實體照。各光學元件固定機構依據不同的需求設計，可留有數個軸向自由度以符合光學架構微調之要求。

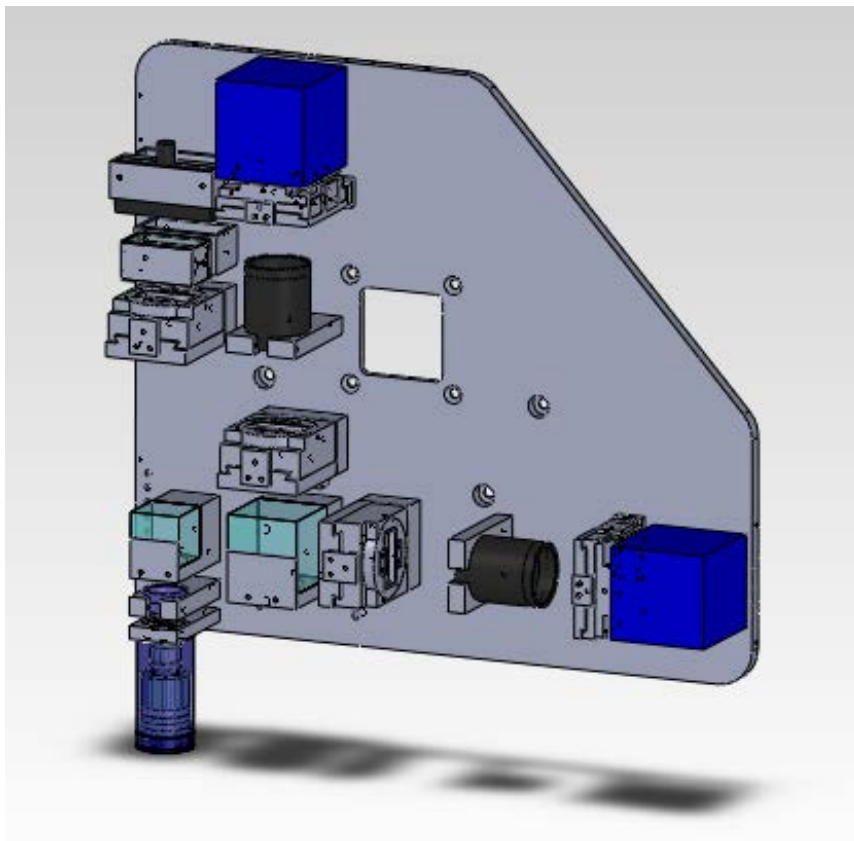


圖 3.22 探頭 SolidWorks 設計圖



圖 3.23 雙狹縫彩色差動共焦系統實體圖

硬體架構中，光源部分如圖 3.24(a)所示，以 100W 氙燈作為其寬頻光源，波長分佈範圍從 400 至 700 nm 左右，氙燈於可見光波段具備較佳的飽和程度，對於量測系統以波長及光強進行檢測較為穩定；並且以線性光導管，圖 3.24(b)，有效將光源導引至系統中；圖 3.24(c)為鉻玻璃光罩製作之狹縫，以達成線掃描共焦空間濾波效果以及差動演算法架構所需之不同 FWHM 偵測光強。



(a)



(b)



(c)

圖 3.24 (a)氙燈光源、(b)線性光纖導管、(c)鉻玻璃光罩

光路中以非偏極分光鏡(non-polarizing beam splitter, NPBS)進行分光達成同軸之彩色差動共焦顯微架構，如圖 3.25 所示；而彩色共焦的寬頻光軸向色散部分主要是靠自行設計之 2X 軸向色散物鏡，圖 3.26，使不同波長聚焦至不同深度位置，配合差動演算可得一即時深度量測曲線，量測時不須深度掃描；而即時深度量測校正曲線就需事前搭配一標準平面反射鏡進行縱向垂直掃描建立之，平面反射鏡之基板表面上通常會用鋁、銀或是其他材質鍍上一層覆膜成為全反射鏡，圖 3.27 所示，將聚焦光反射回光路系統中。

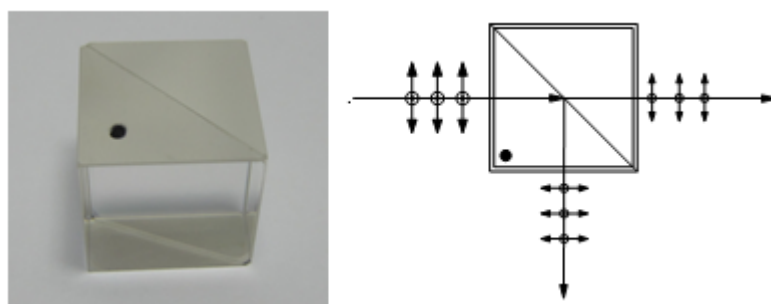


圖 3.25 非偏極分光鏡 NPBS



圖 3.26 2X 軸向色散物鏡



圖 3.27 標準平面反射鏡



最後，待測物反射光訊號通過後端不同寬度狹縫所產生一組大小 FWHM 偵測光強由兩彩色線 CCD 接收，如圖 3.28，透過差動演算法來進行即時光強比值對深度轉換。並搭配電控位移平台，圖 3.29，Z 軸進行掃描前的即時深度量測校正曲線建立、XY 軸配合掃描可完成待測物大範圍三維形貌之量測。



圖 3.28 彩色線 CCD 裝置

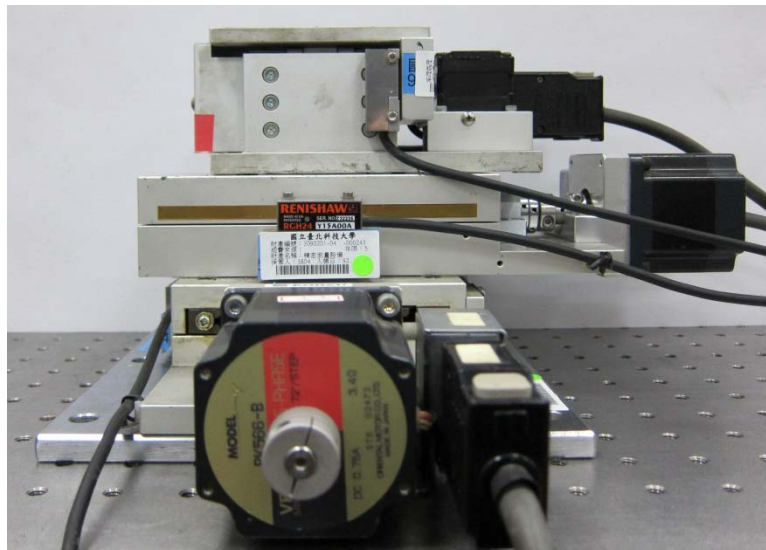


圖 3.29 三軸電控位移平台

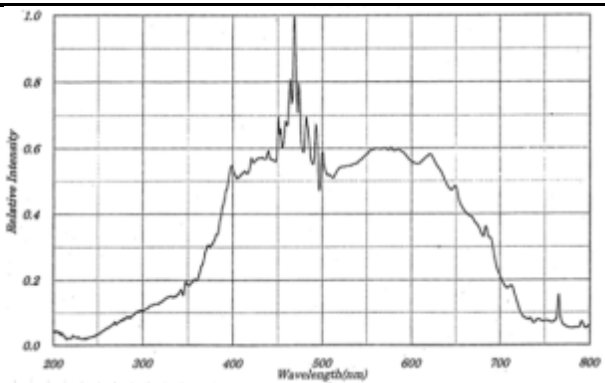
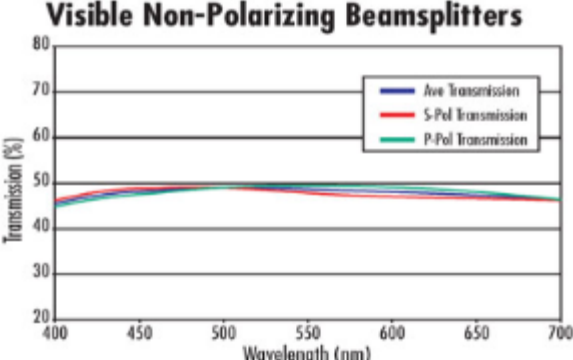
表 3.4 為雙狹縫彩色差動共焦量測系統各元件詳細規格表，而表 3.5 為系統中部分零件之光譜響應圖[22]。

表 3.4 量測系統各元件規格表

編號	名稱	型號	規格
1	氙燈 (Xenon lamp, L8253)	Hamamatsu Photonics, LC8-03	波長範圍：400-700 nm 燈泡壽命：2000 hr
2	光纖導管	TFO LG-L50-6-H-1000-F1	線長：50mm 線寬：0.6mm
3	可調式狹縫	貴儀中心加工製作	光罩尺寸：40×20 mm 寬度規格：4~60 $\mu\text{m}$ 長度：30 mm
4	非偏極分光鏡	Edmund #47-571	大小：35×35×35 $\text{mm}^3$ 波長範圍：430-670 nm 材質：BK7 穿透率：45±5%
5	非偏極分光鏡	Edmund #49-004	大小：50×50×50 $\text{mm}^3$ 波長範圍：430-670 nm 材質：BK7 穿透率：45±5%
6	軸向色散顯微物鏡	實驗室自行設計	倍率：2X 數值孔徑：0.1 工作距離：58 mm 波長範圍：400-700 nm 色散距離：920 $\mu\text{m}$
7	平面反射鏡	Edmund #01-914	表面準確度： 1/10 $\lambda$ @632.8 nm 直徑：50.8 mm 厚度：12.7 mm

8	半柱狀透鏡	Edmund #46-020	曲率半徑：12.96 mm
			寬度：25 mm
			長度：50 mm
			後焦長(BFL)：17.74 mm
			材質：N-BK7
9	消色散雙合透鏡	Edmund #32-917	直徑：25 mm
			中心厚度：12.5 mm
			後焦長(BFL)：194.14 mm
			材質：N-BK7/N-SF5
10	三軸向位移裝置	SIGMA TECH FS-1050X	最大速度：10 mm/sec
			最小步進：0.01 $\mu$ m
11	彩色 CCD	NED SUCL2030	像素大小( $\mu$ m)：14 $\times$ 14
			有效像素：2098 $\times$ 3

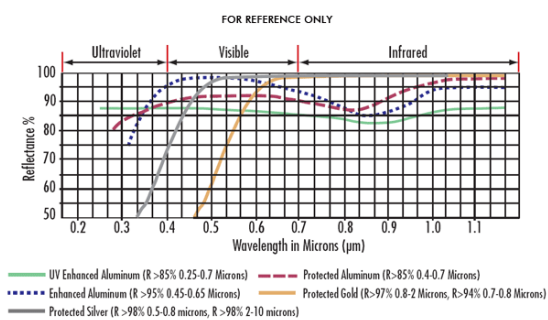
表 3.5 部分零件之光譜響應圖

名稱	光譜範圍	圖解
氙燈 (Xenon lamp, L8253)	波長範圍： 400-700 nm	
非偏極分光鏡	波長範圍： 430-670 nm	



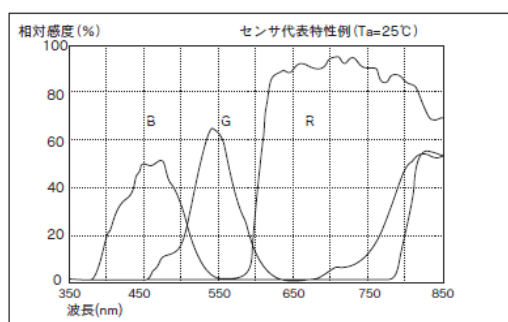
平面反射鏡

波長範圍：  
400-700 nm  
(反射率>95%)



彩色 CCD

波長範圍：  
400-700 nm



## 第4章

## 系統驗證與實驗結果分析



### 4.1 量測系統之像素對位

所開發之雙狹縫彩色共焦量測系統須使用兩個 CCD 接收訊號以進行差動演算，所以為避免量測點不同所造成之量測誤差影響，兩 CCD 像素間的對位就十分重要。兩 CCD 在探頭上皆是以自行設計之微調機構進行安裝固定，機構藉由鳩尾槽、彈簧及螺絲等設計配合，使安裝其上之 CCD 能作 XYZ 三個直線及  $\theta$  一個旋轉軸方向微調，進行像素對位。機構模擬如圖 4.1 所示。而為了進行像素校正，本研究以台灣港建公司之棋盤格光柵片來找出兩 CCD 影像中的相對映位置，以黑白棋盤格光柵片間隔  $35\mu\text{m}$  部分作為校正量測規進行取像，如圖 4.2 所示。

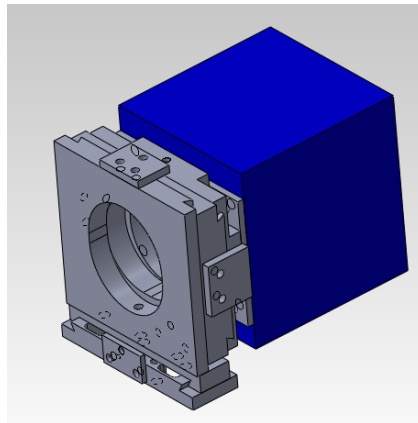


圖 4.1 SolidWorks 模擬 CCD 微調座機構圖

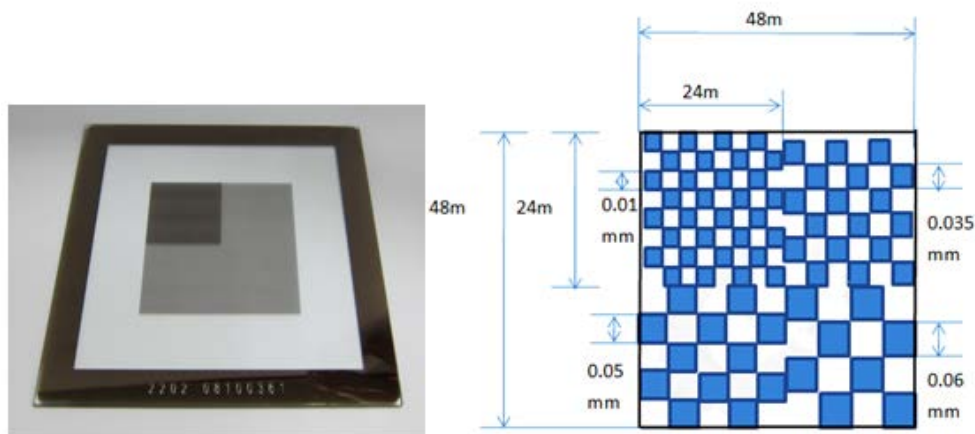


圖 4.2 黑白棋盤格實體及光柵設計圖

系統以 2X 色散物鏡進行量測，像素對光強量測結果如圖 4.3 和圖 4.4 所示。將影像以斜率變化極大值法(Maximum slope)二值化處理後，可以很清楚地找出黑白棋盤格光柵片邊緣點位置，如圖 4.5 和圖 4.6 所示，以此計算出兩彩色 CCD 裝置之像素相對應位置並校正之。CCD 像素大小為  $14\text{ }\mu\text{m}$ ，因此量測探頭水平解析為  $7\text{ }\mu\text{m}$ ， $35\text{ }\mu\text{m}$  寬之棋盤格光柵片在 CCD 影像上即為 5 個像素，從像素對光強圖可看出符合校正之結果。

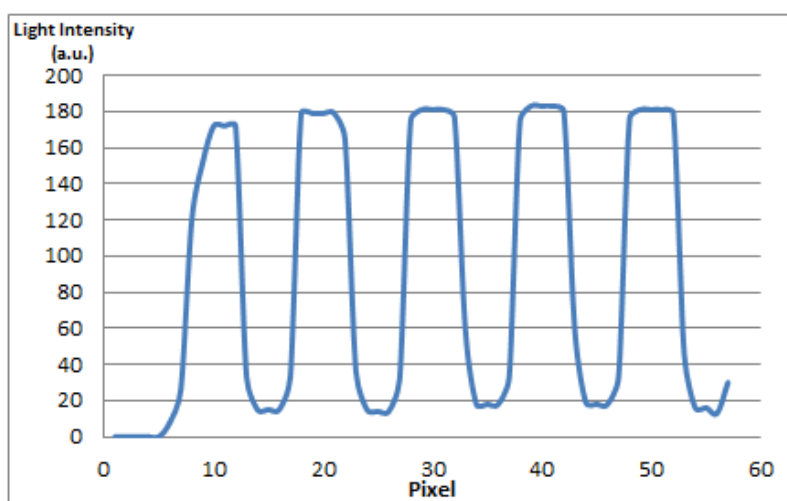


圖 4.3 CCD1 量測  $35\text{ }\mu\text{m}$  寬棋盤格光柵片之像素對光強圖

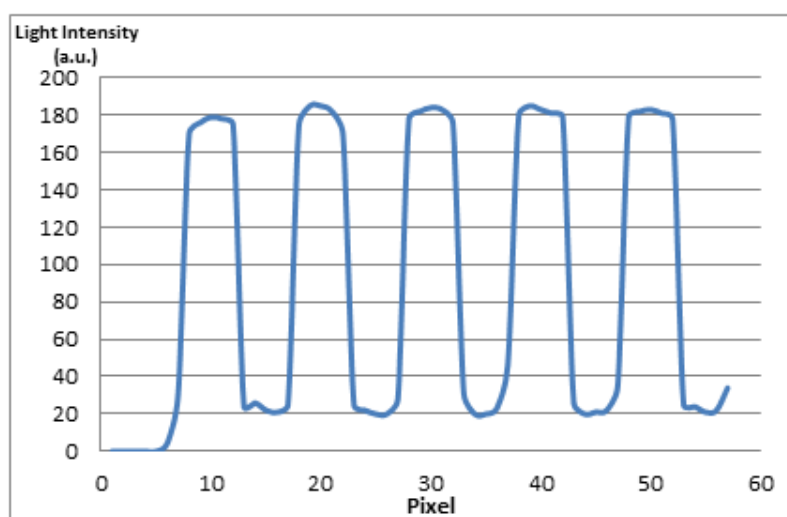


圖 4.4 CCD2 量測  $35\text{ }\mu\text{m}$  寬棋盤格光柵片之像素對光強圖

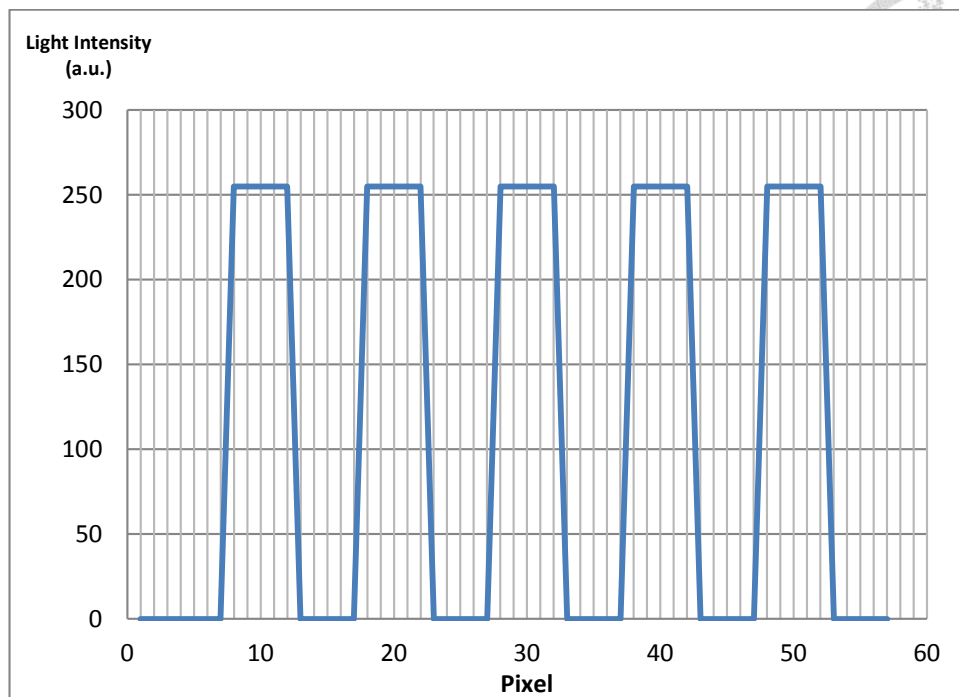


圖 4.5 二值化處理後 CCD1 像素對光強圖

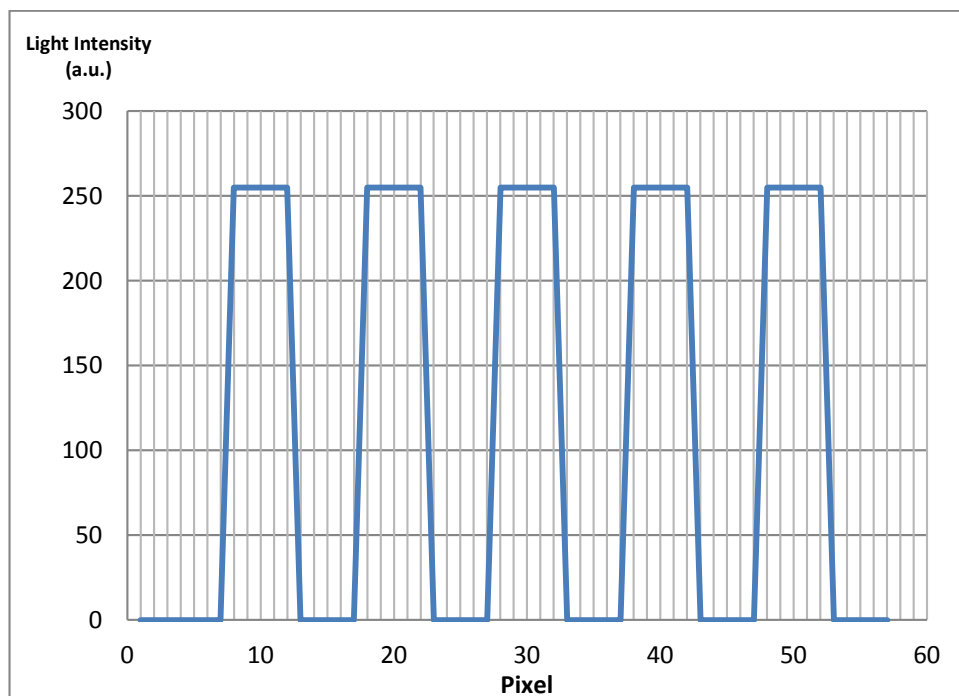


圖 4.6 二值化處理後 CCD2 像素對光強圖

## 4.2 彩色 CCD 裝置對光源之光強響應誤差校正

本研究所開發之差動演算法是利用兩 CCD 的光強差動比值對應待測物之相對

深度位置，所以反射光之光強訊號是整個演算法的基石，其變異會造成量測之誤差。也因此，在進行實物量測之前先須對系統本身光強並不均一的情況進行校正，消除系統本身之誤差。由於導入光源的線型光纖每一點的透光率以及彩色線 CCD 感測元件上的每一個像素的感光響應均不相同，此因素會造成線量測上每一點的光強均勻度不一。所以，為了避免影響量測結果，將針對線型光纖導入光源以及線 CCD 裝置的像素進行光強響應的校正。量測系統以平面反射鏡來進行測試與驗證，以兩線 CCD 裝置進行取像，並分析色光對單一深度位置的分佈情形，如圖 4.7 所示，可發現兩 CCD 的綠色色光在量測線長方向上的光強分佈並不均勻。

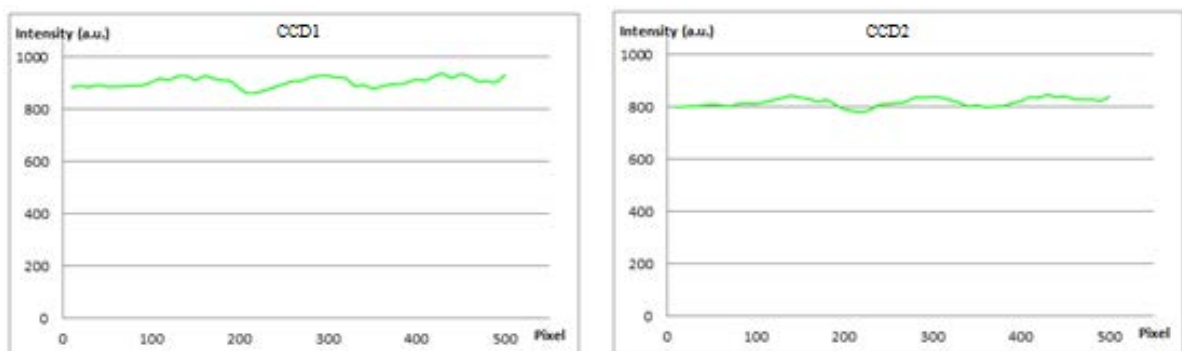


圖 4.7 校正前兩 CCD 裝置所取得之綠色光強分佈情形

所以，垂直掃描建立綠色光的光強對深度關係曲線時，可發現量測線上的各個像素之光強深度關係曲線不盡相同，此即為感測光之不均勻所帶入的量測誤差，如圖 4.8 所示。而圖 4.9 可看出，當綠色光的光強對深度關係曲線因感測光不均勻有誤差產生時，後面經過差動運算後而得到的光強差動比值對深度關係曲線，也會跟著產生了變異。在量測系統進行光強響應校正之前，此時量測一平面鏡進行平坦度量測，圖 4.10，其平面變異度約  $6\ \mu\text{m}$ 。

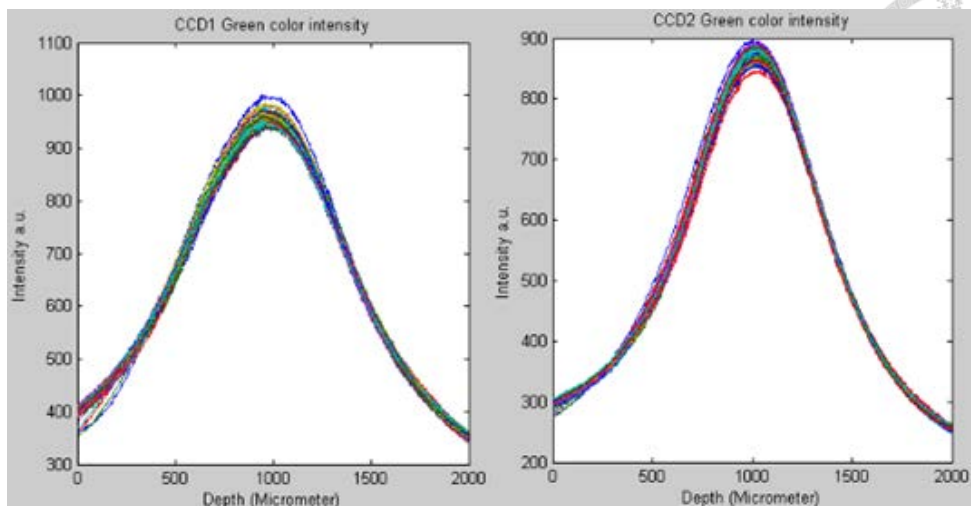


圖 4.8 校正前兩 CCD 上各像素之光強深度關係曲線

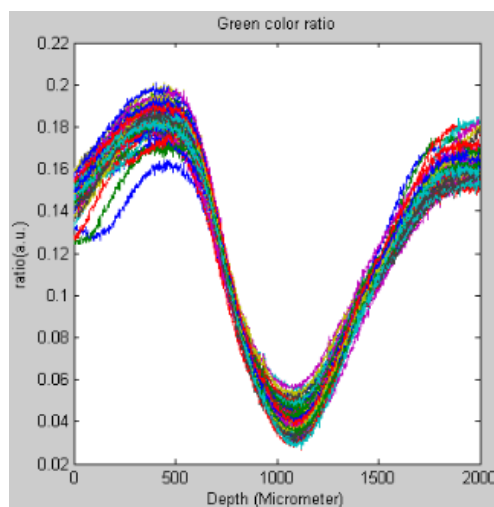


圖 4.9 校正前各像素之光強差動比值對深度關係曲線

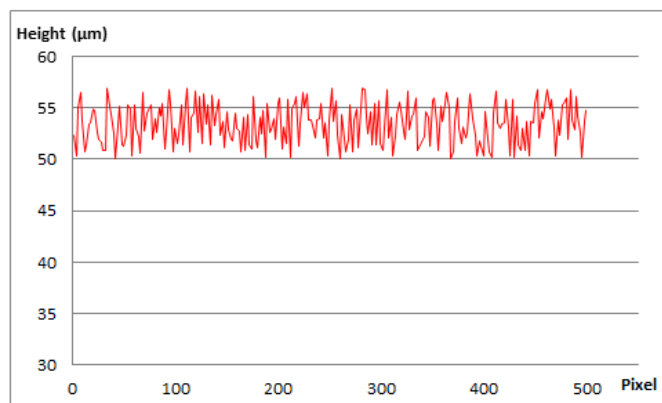


圖 4.10 校正前量測一平面鏡之平坦度

為了消除系統光源、線型光纖與線 CCD 裝置的光源不均勻所帶來的影響，本研究以光強響應校正方式進行補正，藉以降低誤差，提高量測系統之穩定性。校正出線型光纖的線光源強度分佈與對應之線 CCD 像素的光響應權重做為校正比值，在進行量測時，將校正比值帶入量測值中，以降低系統本身的光強度不均勻之誤差影響。校正後兩線 CCD 裝置接收到的光強度分佈如圖 4.11 所示，可看出光強分佈校正後較校正前均勻。接著再進行垂直掃描以建立綠色光之光強對深度曲線以及光強差動比值對深度關係曲線，圖 4.12 和圖 4.13，可發現各點的關係曲線也較為相近。經校正後，再次利用平面鏡進行平坦度量測，可發現經過校正後的平面鏡量測變異大幅降低，如圖 4.14 所示，藉此可證實經由光強響應校正之後，能夠有效地提升系統的量測穩定度。

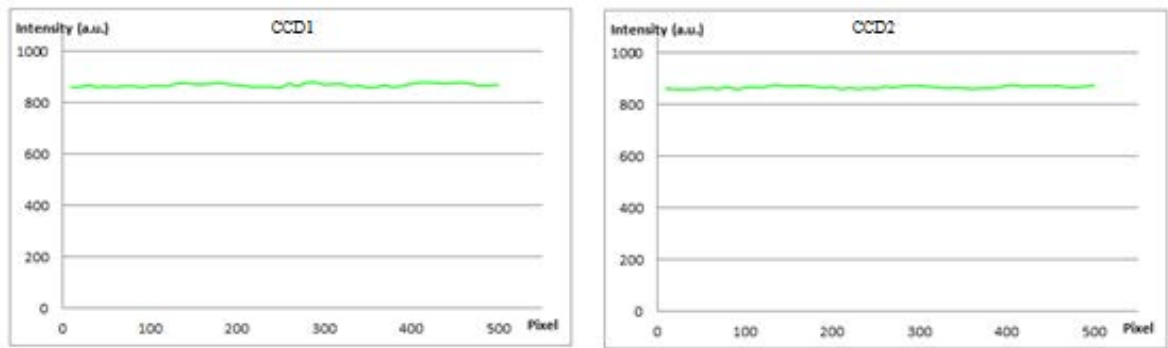


圖 4.11 校正後兩 CCD 裝置所取得之綠色光強分佈情形

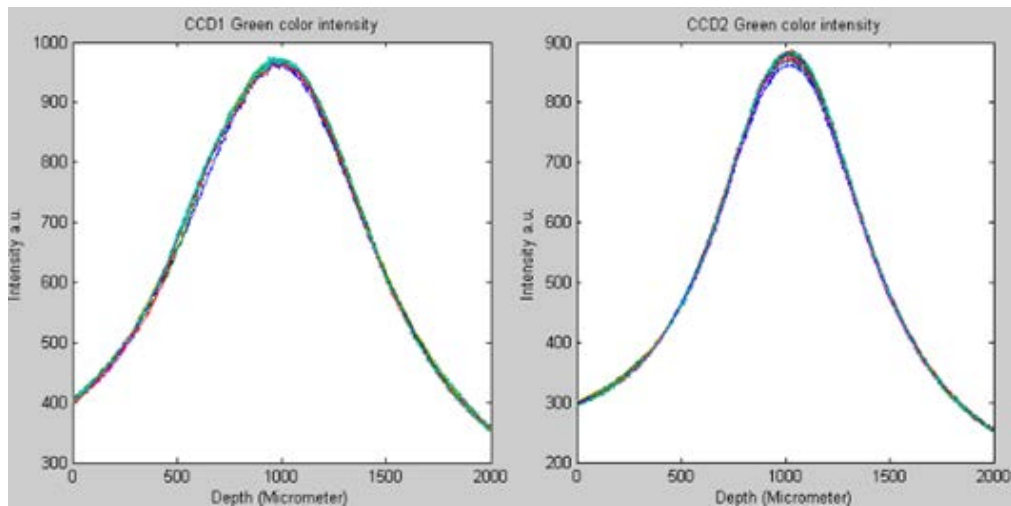


圖 4.12 校正後兩 CCD 上各像素之光強深度關係曲線

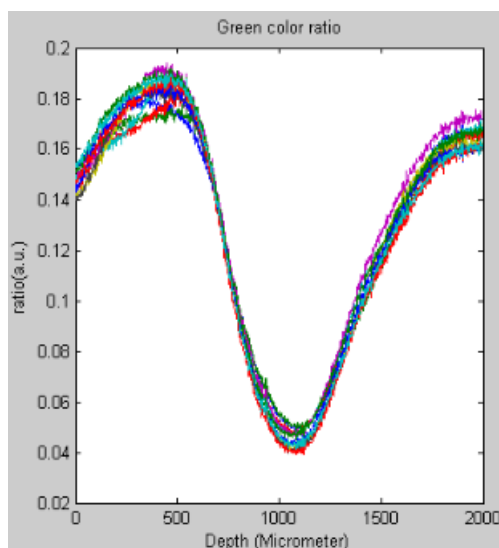


圖 4.13 校正後各像素之光強差動比值對深度關係曲線

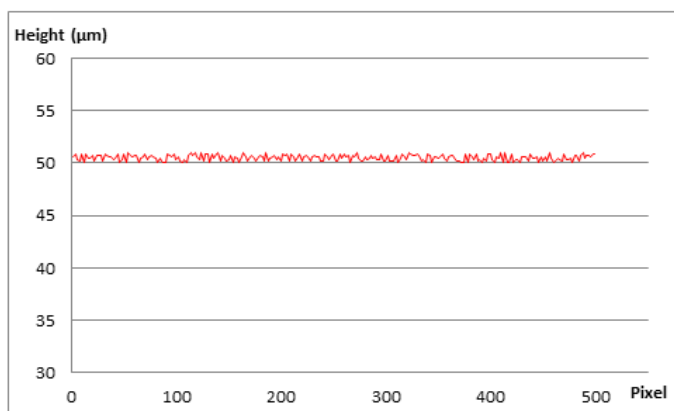


圖 4.14 校正後量測一平面鏡之平坦度

### 4.3 狹縫寬度組合與量測之最佳化測試

本研究所提出的雙狹縫差動共焦量測系統是利用兩 CCD 前寬度大小不同之狹縫得到兩反射光訊號，藉此進行差動運算產生一大深度即時量測範圍，而深度量測範圍會隨著兩狹縫大小差異而不同。如圖 4.15、圖 4.16 與圖 4.17 所示，分別為 10  $\mu\text{m}$  搭配 15、20 以及 30  $\mu\text{m}$  狹縫所產生之光強差動比值對深度關係曲線。



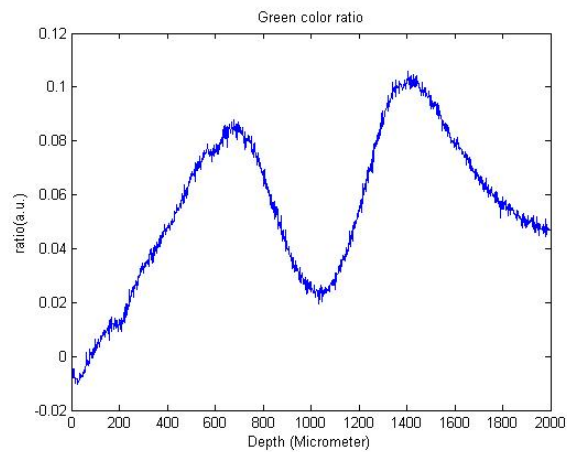


圖 4.15 寬度 10 及 15  $\mu\text{m}$  狹縫組合之光強差動比值對深度關係曲線

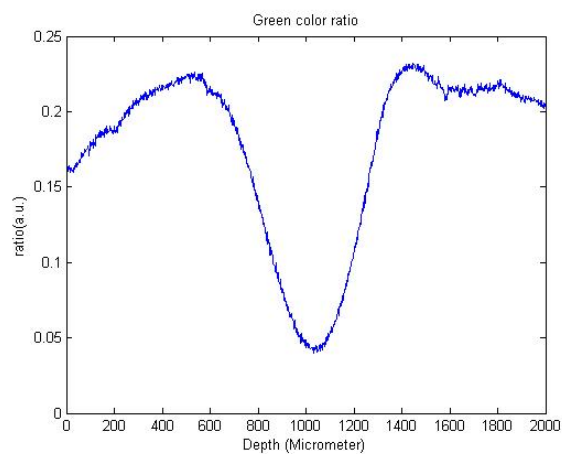


圖 4.16 寬度 10 及 20  $\mu\text{m}$  狹縫組合之光強差動比值對深度關係曲線

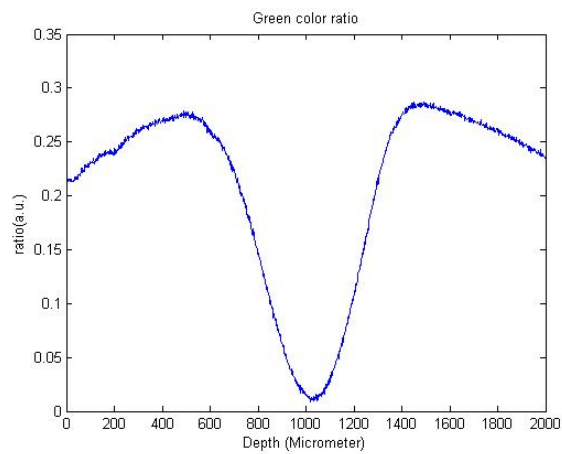


圖 4.17 寬度 10 及 30  $\mu\text{m}$  狹縫組合之光強差動比值對深度關係曲線

在上述三種組合下可看出寬度 10  $\mu\text{m}$  與 30  $\mu\text{m}$  組合產生之深度量測範圍最長、斜率最高，也因此可判斷，當兩反射光 FWHM 差異越大，其即時深度量測範圍及斜率越佳。不同寬度大小狹縫其正規化光強對深度關係曲線如圖 4.18 所示，而各狹縫光強達飽和所需曝光時間及正規化後光強對深度關係曲線 FWHM 詳細資料如表 4.1 所示。

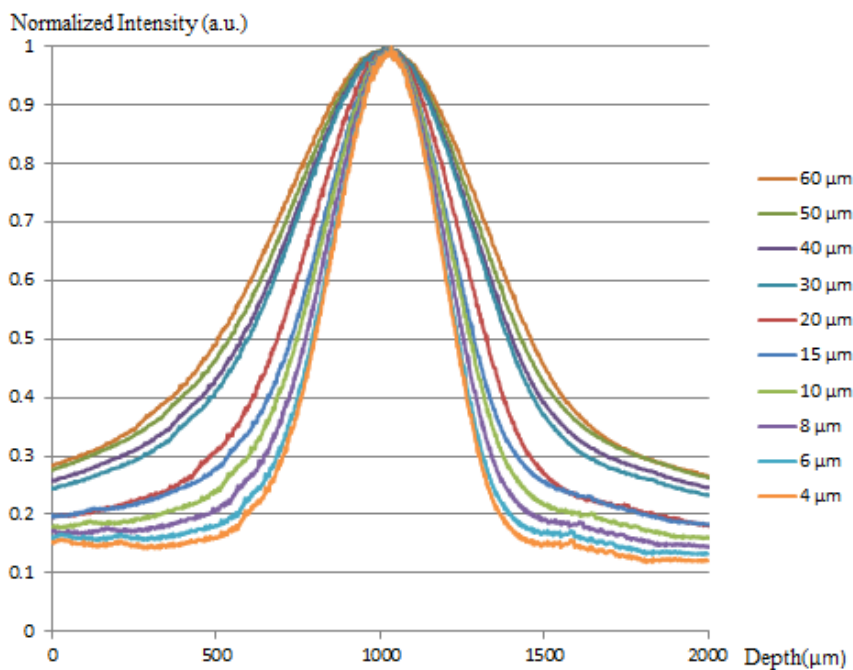


圖 4.18 各寬度狹縫正規化光強對深度關係曲線

表 4.1 各狹縫光強對深度關係曲線曝光時間及 FWHM

狹縫大小 ( $\mu\text{m}$ )	4	6	8	10	15	20	30	40	50	60
曝光時間 ( $\mu\text{s}$ )	4500	2000	1600	1500	600	500	300	180	170	140
FWHM( $\mu\text{m}$ )	446	458	494	521	564	668	792	804	840	938

從實驗結果可看出曝光時間隨著狹縫的變大而減少，但光強曲線 FWHM 變化在狹縫 10 至 30  $\mu\text{m}$  之間較大，狹縫再小再大則變化不顯著。因此，在考慮量測速度及量測範圍下，本研究所使用之狹縫組合為 20 及 30  $\mu\text{m}$  寬度狹縫，光強差動比值對深度關係曲線如圖 4.19 所示，量測範圍大於 150  $\mu\text{m}$ 。

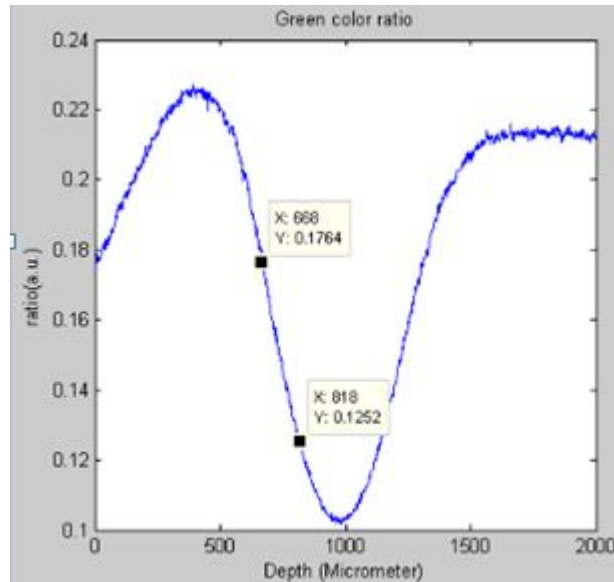


圖 4.19 寬度 20 和 30  $\mu\text{m}$  狹縫組合光強差動比值對深度關係曲線

#### 4.4 量測系統重複性之測試

為了驗證量測系統之重複性，以工研院所製作之標準階高塊規進行量測，其實體圖如圖 4.20 所示。其為以鑽石切割方式，在圓盤狀亮面金屬上刻畫出多種不同高度起伏之階高，整體信賴區間為 95%，不確定度為 35 nm。



圖 4.20 標準階高塊規實體圖

利用本研究所開發之雙狹縫彩色差動共焦量測術搭配自行設計之 2X 色散物鏡，分別對標準塊上 10.1  $\mu\text{m}$  以及 25.4  $\mu\text{m}$  階高進行量測，搭配電控位移平台進行

掃描以重建階高塊完整之三維形貌。其量測結果剖線資訊如圖 4.21 和圖 4.22 所示。

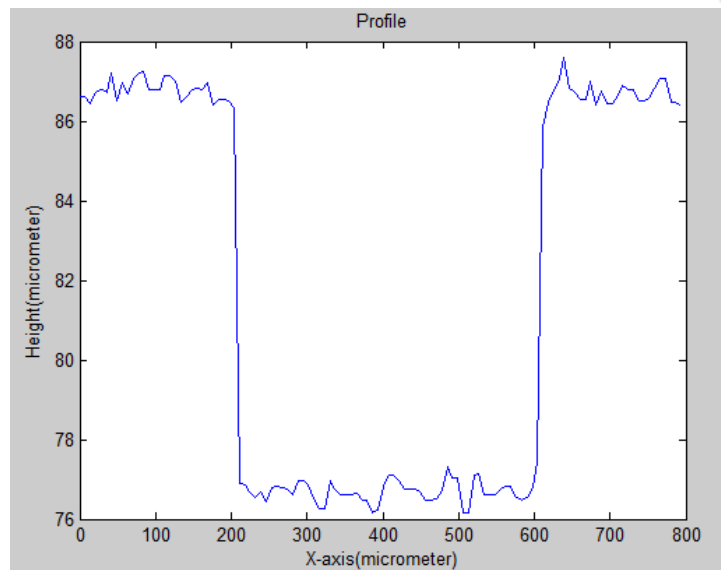


圖 4.21 10.1  $\mu\text{m}$  階高量測剖線圖

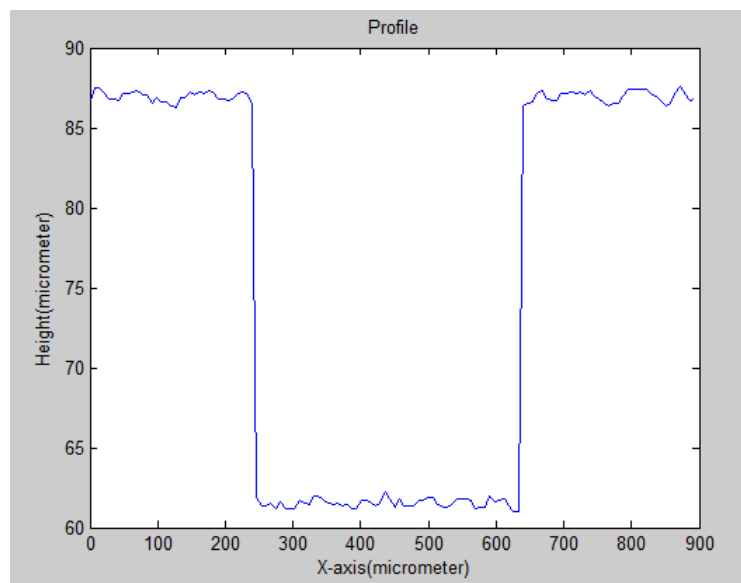


圖 4.22 25.4  $\mu\text{m}$  階高量測剖線圖

階高量測結果以 ISO 標準計算出其高度並進行 30 次的重複性量測。10.1  $\mu\text{m}$  以及 25.4  $\mu\text{m}$  階高 30 次量測結果如圖 4.23 和圖 4.24 所示。

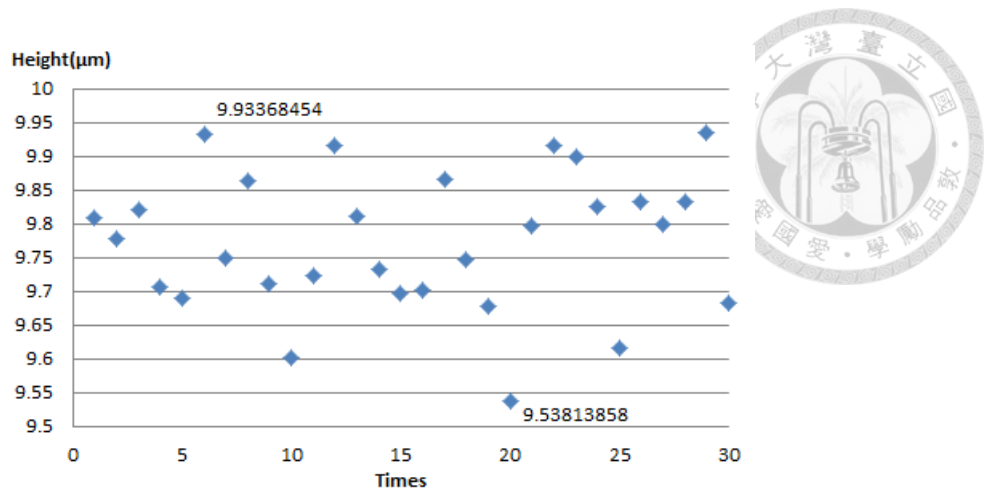


圖 4.23 10.1  $\mu\text{m}$  階高塊 30 次量測結果

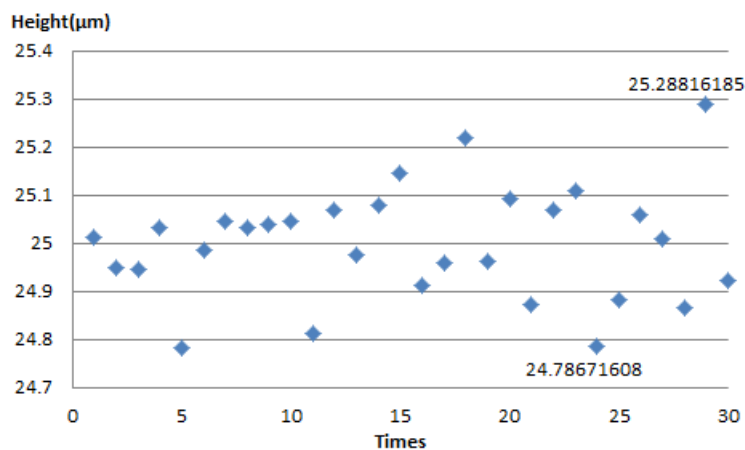


圖 4.24 25.4  $\mu\text{m}$  階高塊 30 次量測結果

而為了驗證所開發之量測系統，以本實驗室所開發之掃描式白光干涉量測系統及光譜儀式彩色共焦量測系統進行比較，結果為表 4.2。從表中整理的結果可看出，白光干涉量測系統的量測精度最高，接著是彩色共焦量測系統。其精度差異判斷為白光干涉其光學原理解析度高及量測時使用垂直掃描判斷相對高度方法，較另兩種共焦技術不垂直掃描而使用校正曲線方式對出高度資訊為穩定與準確，且這兩種共焦量測系統皆為線掃描方式，量測時會有一維方向的雜訊及橫向交談干擾問題影響量測結果；而光譜儀式共焦架構較開發之彩色差動共焦量測系統精度高的原因在於前者是利用解析反射光波長訊號對應出深度位置，相對於彩色差動共焦量測以光強度作為依據方法較不受感測器以及光源跳動雜訊影響。但在量測速度上，相對於白光干涉需要數秒、光譜儀彩色共焦需數十個毫秒的量測時間，

研究之雙狹縫彩色差動共焦量測系統對高反射性待測物僅需要幾百個微秒時間就可獲得待測物之高度資訊。

表 4.2 各量測系統之階高量測結果比較

量測系統	標準階高			
	10.1 $\mu\text{m}$		25.4 $\mu\text{m}$	
	平均值( $\mu\text{m}$ )	標準差( $\mu\text{m}$ )	平均值( $\mu\text{m}$ )	標準差( $\mu\text{m}$ )
雙狹縫彩色差動共焦量測系統	9.774	0.120	24.999	0.115
光譜儀式彩色共焦量測系統	9.897	0.029	25.052	0.024
掃描式白光干涉量測系統	10.111	0.003	25.327	0.002

## 4.5 工業樣品量測實例結果與比較

### 4.5.1 標準階高塊規量測實例一

為了驗證所開發之量測系統，以商用雷射共焦顯微鏡(Keyence VK-9700) 量測系統進行量測比較，圖 4.25。此商用系統是利用紫光雷射(波長 408 nm)作為光源之單點共焦量測術架構，搭配振鏡式掃描裝置(galvanometer scanner)進行快速區域量測，並以光電倍增管作為偵測器接收反射光訊號。振鏡式掃描裝置利用移動與聚焦鏡組將雷射光打入 XY 兩軸振鏡鏡片並反射聚焦於待測點上，配合移動鏡組變換聚焦深度與雙軸振鏡裝置選轉達成區域式三維形貌量測，其原理示意圖如圖 4.26 所示[23]。系統有不同倍率之物鏡進行搭配選擇，最佳深度解析可達 1 nm，量測重複精度為 0.02  $\mu\text{m}$ [24]。



圖 4.25 Keyence VK-9700 雷射共焦顯微鏡

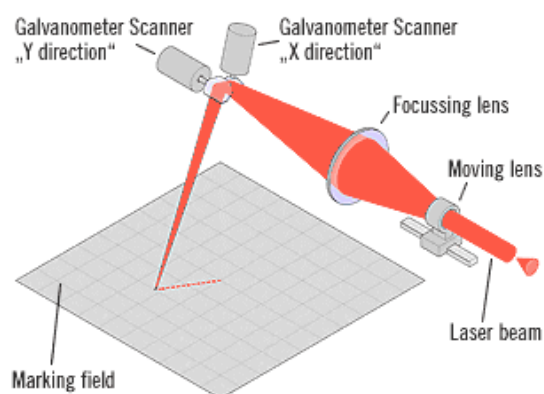


圖 4.26 雷射振鏡式掃描裝置示意圖

以工研院所製作之標準階高塊規進行量測結果比較，選擇量測之標準階高為  $10.1\ \mu\text{m}$ 。雷射共焦顯微鏡量測重建三維形貌俯視圖如圖 4.27 所示，圖 4.28 為水平軸剖面圖，量測高度結果為  $10.121\ \mu\text{m}$ 。

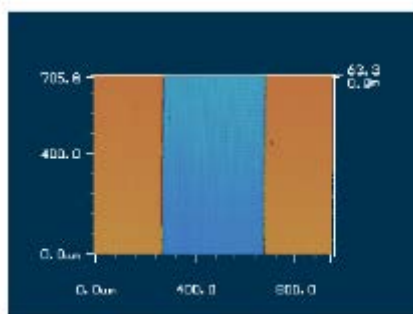


圖 4.27 雷射共焦顯微鏡量測  $10.1\ \mu\text{m}$  階高三維形貌重建結果

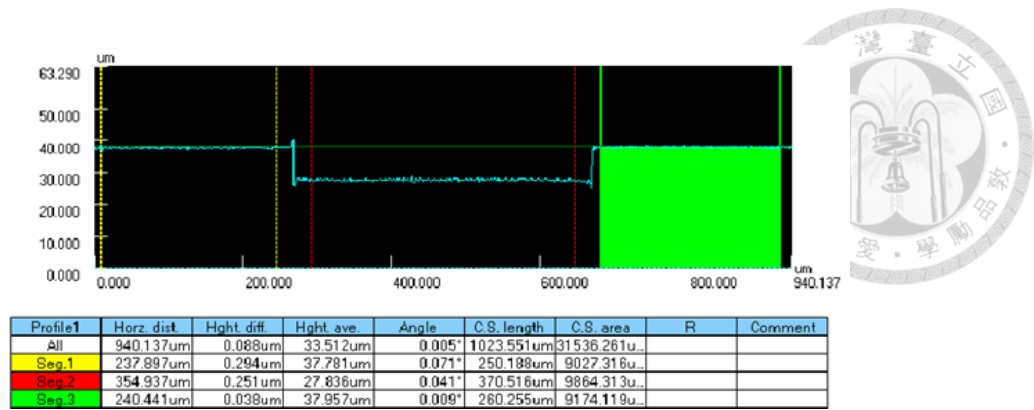


圖 4.28 雷射共焦顯微鏡量測 10.1  $\mu\text{m}$  階高水平軸剖面圖

而開發之雙狹縫彩色差動共焦量測系統，探頭線掃描架構搭配電控位移平台進行一個面的區域量測。掃描間距為  $7 \mu\text{m}$ ，掃描範圍為  $280 \times 1001 \mu\text{m}^2$ ，階高量測結果之重建三維形貌如圖 4.29 所示，而水平軸剖面資訊為圖 4.30。從結果可看出標準階高上下兩理應是平直線之線段有約莫  $2 \mu\text{m}$  跳動誤差，其為光源光強擾動以及 CCD 感測器雜訊跳動所帶進之量測誤差。本實驗量測階高之平均高度為  $9.774 \mu\text{m}$ ，量測標準差為  $0.120 \mu\text{m}$ 。雖然平均高度量測結果與實際之差異大於商用雷射顯微鏡系統，但量測標準差結果在可接受範圍，其為一般量測系統量測精度主要參考因素。

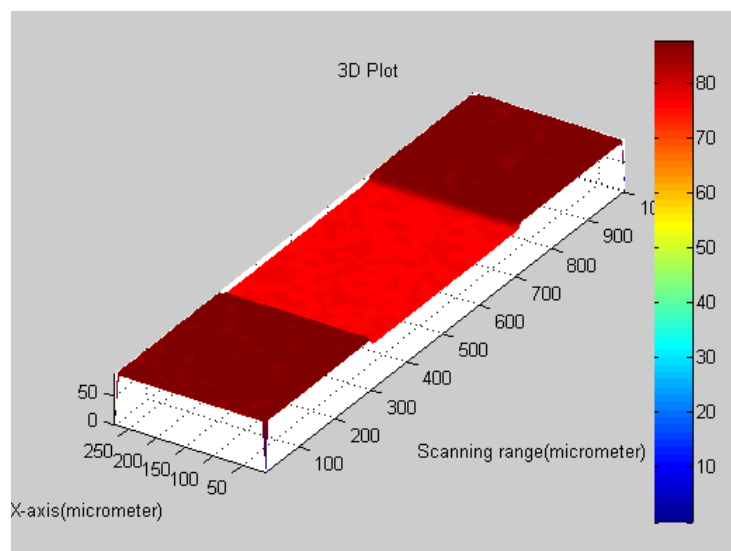


圖 4.29 10.1  $\mu\text{m}$  階高量測結果三維形貌重建圖



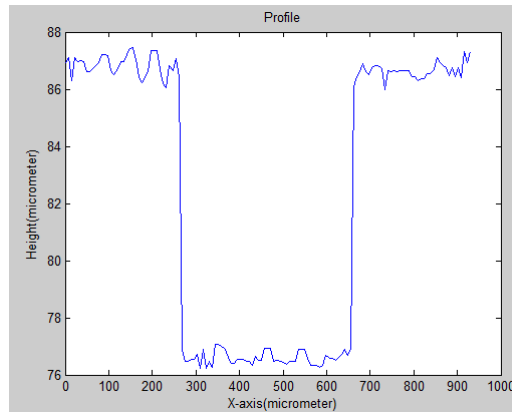


圖 4.30 10.1  $\mu\text{m}$  階高量測結果水平剖面圖

#### 4.5.2 標準階高塊規量測實例二

接著以工研院所製作之標準塊規上 25.4  $\mu\text{m}$  階高作為量測實例結果比較。雷射共焦顯微鏡量測結果之三維形貌重建俯視圖如圖 4.31 所示，而圖 4.32 為水平軸剖面圖，量測高度結果為 25.446  $\mu\text{m}$ 。

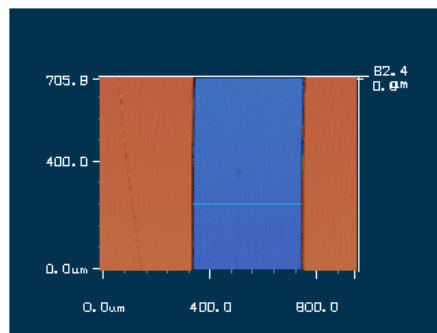


圖 4.31 雷射共焦顯微鏡量測 25.4  $\mu\text{m}$  階高三維形貌重建結果

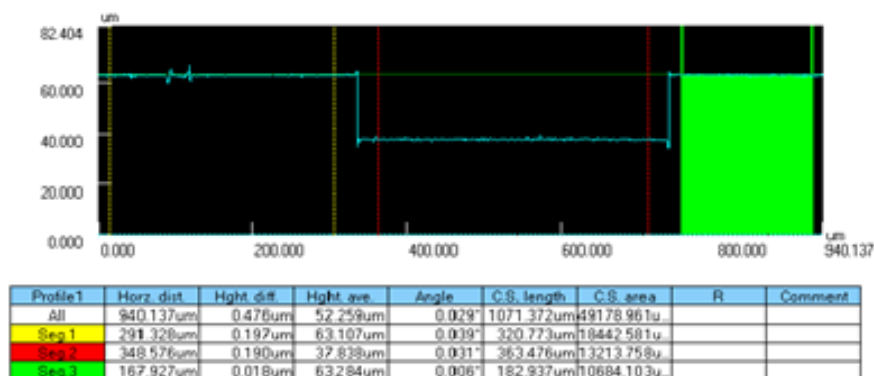


圖 4.32 雷射共焦顯微鏡量測 25.4  $\mu\text{m}$  階高水平軸剖面圖

而本系統搭配電控位移平台進行三維形貌量測，掃描間距為  $7\text{ }\mu\text{m}$ ，掃描範圍為  $280 \times 1001\text{ }\mu\text{m}^2$ ，階高量測結果三維形貌重建圖如圖 4.33 所示，圖 4.34 為水平軸剖面圖，量測之平均高度為  $24.999\text{ }\mu\text{m}$ ，量測標準差為  $0.115\text{ }\mu\text{m}$ 。從剖面圖仍可看出量測剖線上有光源光強擾動和 CCD 雜訊跳動所造成之誤差。

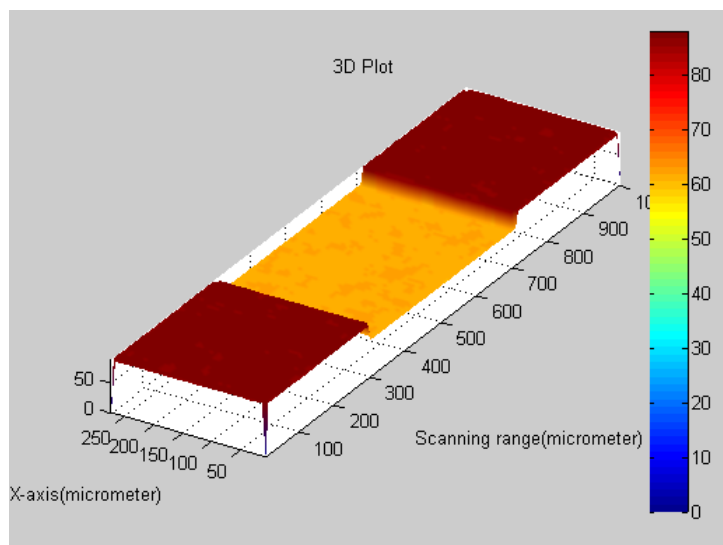


圖 4.33  $25.4\text{ }\mu\text{m}$  階高量測結果三維形貌重建圖

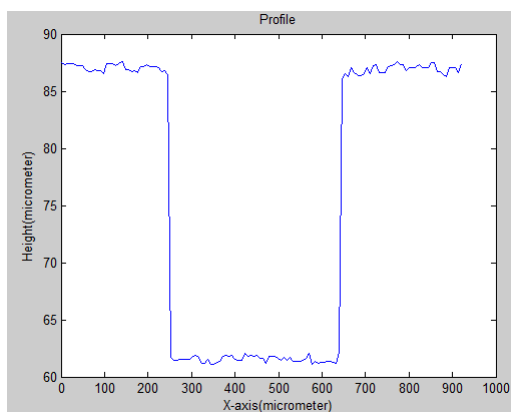


圖 4.34  $25.4\text{ }\mu\text{m}$  階高量測結果水平剖面圖

雖然此階高量測結果差異依舊大於商用雷射顯微鏡系統，但量測標準差為  $0.115\text{ }\mu\text{m}$ ，與量測  $10.1\text{ }\mu\text{m}$  時標準差為  $0.120\text{ }\mu\text{m}$  變異不大，系統量測精度符合預期之結果。

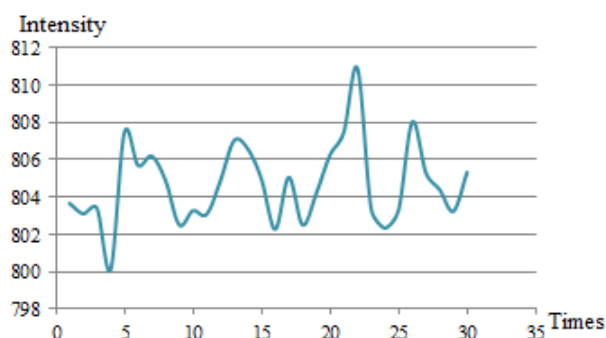


### 4.5.3 量測結果分析與討論

針對所開發之新型雙狹縫彩色差動共焦量測系統，對於其量測結果進行分析比較與討論：

1. 由上述實驗結果比較可得知，白光干涉量測系統的量測精度最高，但由於量測時需要深度方向上的掃描，其量測速度最慢；而光譜儀式彩色共焦量測系統的量測精度及速度皆次之；本研究所提出之彩色差動共焦量測系統雖然量測精度是三種方法中較差的，但其量測時不須垂直掃描的優點以及較短之曝光時間，使其擁有所提出之三種類量測系統中最高之量測速度，在精度要求允許下，使所開發之系統最擁有工業線上量測之潛力。
2. 從階高量測結果的剖線圖可以看出，在同一高度之平面上，有約莫  $2\text{ }\mu\text{m}$  大小的跳動誤差，於是進行光強跳動對量測系統精度影響實驗。將探頭不動對維持同一高度平面鏡進行 30 次光強取樣，如圖 4.35 所示，可看出灰度值最大有 7 跟 11 個的跳動。

CCD1



CCD2

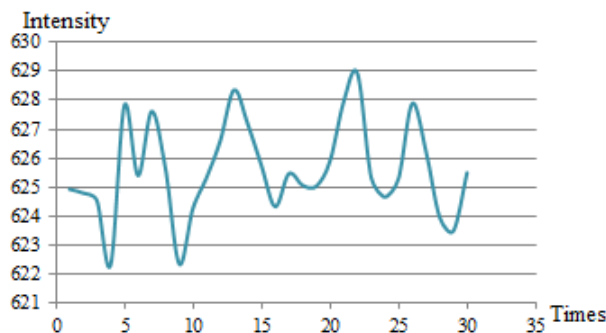


圖 4.35 兩 CCD 光強 30 次取樣值

接著將這 30 次光強取樣進行差動運算得到 30 筆光強比值，如圖 4.36 所示，其平均值為 0.12575，標準差為 0.0004。

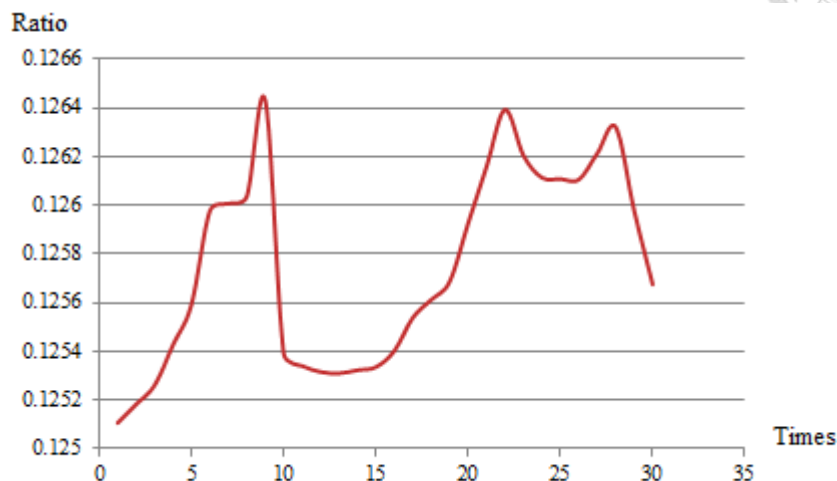


圖 4.36 30 筆光強比值

由於此時量測區間光強比值對深度的比例為 0.0003413 比 1，所以光強跳動一個標準差的情況下約會造成 1.17  $\mu\text{m}$  的系統誤差。若再加上量測時機台震動、樣品表面粗糙度等因素，符合量測階高塊平面時約 2  $\mu\text{m}$  的跳動誤差。此問題後續將利用光電二極體(photodiode)偵測光源擾動，以電路外部觸發方式讓光電二極體與兩 CCD 同時取值。由於光電二極體解析度與本身雜訊皆優於 CCD，藉此找出光源擾動權重進行光強補償校正，並可搭配新差動演算法降低光強跳動誤差。

3. 目前系統即時深度量測範圍約 150  $\mu\text{m}$ ，雖然較舊有架構提升 3 倍，但碰到待測物如翹曲等因素時仍會造成量測上之問題。而由於系統是利用線型 CCD 作為感測器偵測光強值，量測時無法即時看到待測物位置等表面影像資訊，使得量測時無法直觀確定對準待測物，此問題需進一步地以光學系統改良或判定演算法設計來改善。
4. 目前量測系統配合設計之 2X 色散物鏡理應有 14 毫米的量測線長(FOV)，但由於量測系統光路調校與光學元件暈影(vignetting)問題，如圖 4.37，導致目前穩定的量測線長約只有 1.4 毫米，遠小於目標。量化探頭聚焦時 CCD 各像素之光強如圖 4.38 所示，可看出只有約莫 500 個像素備有較佳之光強響應。



圖 4.37 CCD 取像之暈影情形

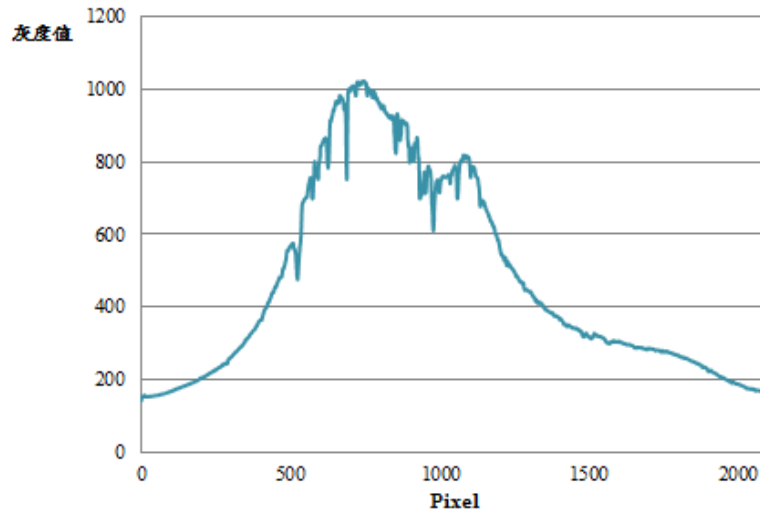


圖 4.38 CCD 各像素之光強圖

嘗試重新調教探頭各元件發現仍無法解決問題後，將各元件拆下，重新架設 Free space 光路進行測試，逐一檢測為哪樣光學元件造成暈影之問題。在檢測後判斷主要造成暈影情形之光學元件為 Relay lenses。如圖 4.39 所示，探頭移除 Relay lenses 後進行各像素光強感測，其各像素之光強圖如圖 4.40 所示，可發現此時雖然中央像素光強依舊較強，但並無發生如圖 4.38 突然衰減情形，而此時造成兩種不同實驗結果的操縱變因即為 Relay lenses，所以判斷為其造成暈影狀況。由於 Relay Lenses 在光學軟體 ZEMAX 設計檢測時並無暈影狀況產生，視野各寬度光強值均無衰減，如圖 4.41 所示，所以分析應為鏡組組裝或是外殼設計產生之問題，後續可藉由找出組裝之問題後重新組裝或是重新設計外殼以改善之。

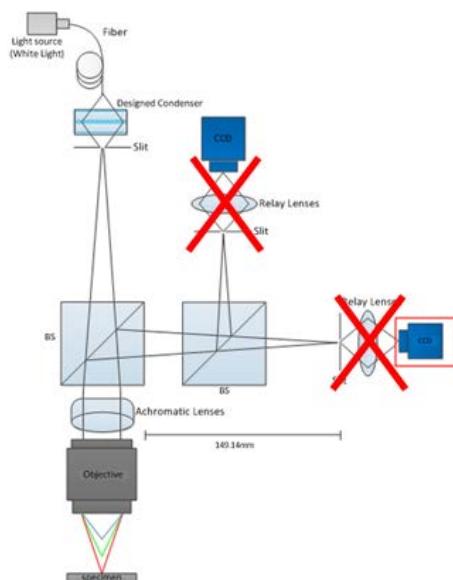


圖 4.39 探頭移除 Relay lenses 進行像素對光強感測

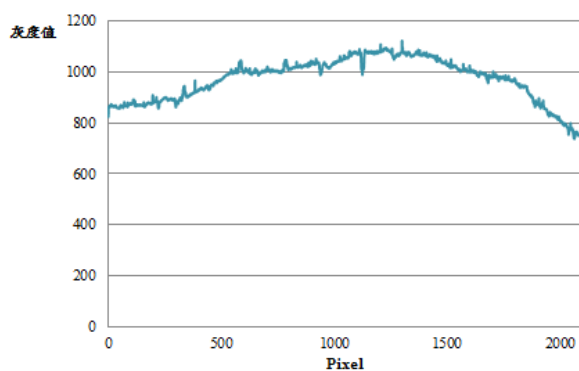


圖 4.40 移除 Relay lenses 後 CCD 各像素之光強圖

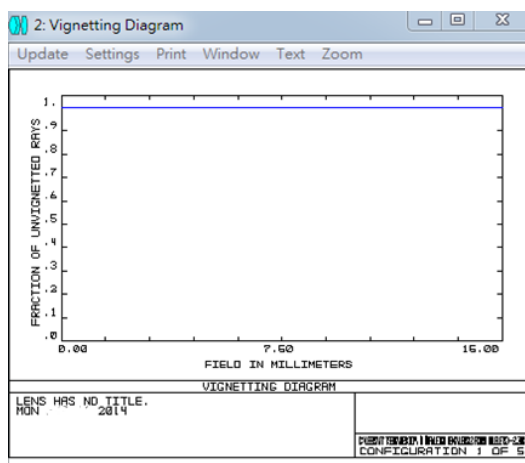



圖 4.41 Relay Lenses vignetting 模擬結果

- 
5. 量測時，若建立校正曲線的量測光軸角度與量測待測物時的不同，會因為傾斜角度的差異造成反射率參數的變異，進而影響量測之實驗結果，產生誤差。須以傾角光強演算補正或系統各機構配合上確保無傾斜等方式修正此問題。
  6. 本量測開發之演算法是以光強作為基礎進行運算，其高速之量測速度是對於量測高反射率表面之待測物的條件下達成，若量測反射率較低之物體曝光時間須加長，因此量測速度受待測物反射率而有不同之變化。

## 第5章 結論與未來展望



### 5.1 結論

為了解決傳統差動共焦量測技術一前一後離焦擺放感測器造成之水平量測範圍縮小、降低空間解析等問題而提出了雙狹縫彩色差動共焦架構以改善問題。但舊有架構卻又有量測範圍過小、光效率太低及無空間濾波裝置等問題，影響了其實際運用可行性。因此，本研究開發一新型雙狹縫彩色差動共焦量測術與系統，重新設計光路架構與軸向色散物鏡、聚光鏡組等重要光學元件以提升系統能力。量測系統利用寬頻可見光作為光源，經過線光纖與聚光鏡組有效導通光源至前端狹縫進入共焦光路架構中，入射光經自行設計之 2X 軸向色散物鏡進行軸向色散於待測物表面深度位置上，接著反射光經分光鏡分為兩束並通過不同寬度大小之後端狹縫產生不同 FWHM 之反射光訊號最後被兩線型彩色 CCD 接收，以此兩訊號作為差動運算之基礎，配合演算法算出光強比值對深度關係曲線以建立一即時深度量測範圍，藉此進行快速之三維形貌量測與重建。本系統量測範圍可達 150  $\mu\text{m}$ ，量測重複精度為次微米，且量測速度較其他實驗室量測系統更符合即時線上量測之需求，搭配電控位移平台或是未來探頭架構優化後移動探頭進行量測掃描，即可達成自動化光學量測之大範圍三維形貌檢測與重建。

本研究至今具體研究結果、問題與結論歸納如下：

1. 本研究最關鍵之光學元件為自行設計之 2X 軸向色散物鏡，將寬頻入射光訊號進行軸向色散延伸焦點，使得差動運算基礎之光強對深度曲線擁有較寬之 FWHM，因而產生足夠之即時深度量測範圍，使量測時不須垂直掃描即可獲得待測物之相對高度資訊。而設計之物鏡是使用無窮遠補正架構，未來在針對不同量測需求而更換不同之色散物鏡時不需更動到其前端其他之光學元件，簡易系統調整並提升可行性。
2. 量測系統搭配所設計之色散物鏡，目前即時深度量測範圍可大於 150  $\mu\text{m}$ ，校此演算法開發之初約 45  $\mu\text{m}$  的長度提升了 3 倍以上。
3. 利用兩 CCD 作為影像光強擷取裝置，取代一般彩色共焦系統的光譜儀，提升



量測速度。並以兩 CCD 接受之不同反射光訊號進行差動運算，得出光強比值對深度反應曲線以產生即時深度量測範圍，系統藉此進行快速的線型掃描量測與形貌重建。

4. 本研究所提出之量測法與系統經校正後，量測標準階高塊規以進行系統量測精度分析與討論，驗證本量測系統之效能。與其他量測系統如白光干涉量測系統與光譜式彩色共焦量測系統進行比較，量測標準差約為  $0.1\ \mu\text{m}$ ，雖不及其他量測系統，但其較高之量測速度(數百微秒)更可能達成工業線上即時量測之目標。但目前量測系統單點之量測誤差因為光源光強、CCD 響應與機台震動等問題造成約莫  $2\ \mu\text{m}$  的跳動誤差，此需要後面利用光感測器進行即時光強權重補償或是搭配新型差動演算法來降低此系統誤差。
5. 目前穩定的量測線長只有 1.4 毫米左右，約為系統設定目標十分之一，判斷為光學元件暈影及光路調校的問題，此須後面更換產生問題的光學元件與進行更好的光路調整改善之。

## 5.2 未來展望

本研究所開發之雙狹縫彩色差動共焦量測系統，雖然已改善舊有架構中量測範圍、光源效率以及系統調教等問題，但在發展及運用過程中還是有些實用性或是硬體部份等問題待解決或改良。本節將列舉並探討這些問題，作為此量測系統之未來展望：

1. 目前即時深度量測範圍雖可達  $150\ \mu\text{m}$ ，已較舊有架構  $45\ \mu\text{m}$  提升 3 倍之多，但在量測範圍上仍待提升以使系統運用性更廣。已測試過連結彩色 CCD 之 RGB 三色段量測範圍，但因其各即時量測線段過於接近所以並無實際提升之效果。認為提升量測範圍較佳著手點在於軸向色散物鏡之重新設計。同前面所提軸向色散物鏡將寬頻入射光源進行軸向色散延伸焦點，使得光強對深度曲線擁有較寬之 FWHM，以其較長之曲線線性段作為差動運算得到即時深度量測範圍，若將軸向色散物鏡色散範圍拉長且線性，並使各波長離焦 MTF(through-focus MTF) 更短使得各深度對應波長光強更單一化，即時深度量測範圍將會更長且穩定。
2. 由於系統量測時只是獲得單一量測線之光強訊號，並無法直觀辨識出待測點所在位置，造成量測不易。若能在系統增加自動對焦功能找出待測點或是以面

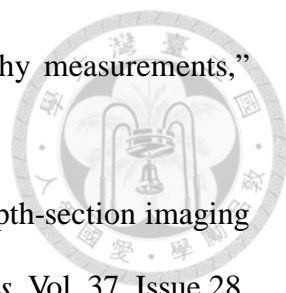
CCD 獲得即時二維影像資訊將會使得量測更為便利。

3. 目前系統兩 CCD 像素對位方式雖達一定成效，但未來可製作如表面有微粒之晶圓片作為校正規，兩 CCD 取像以數位影像相關係數法(Digital Image Correlation, DIC)找出像素相對位置，藉此調校確保像素於空間上之對位。
4. 量測系統雖為線型即時掃描架構，可得到二維(深度及平面一維方向)量測資訊，但若是要進行大範圍之三維形貌量測仍須配合機械式位移平台進行待測物或是探頭的移動，因此量測易帶入移動之震動誤差，降低系統精度。因此未來可加裝體積誤差偵測裝置進行誤差補償，降低其造成之量測誤差。
5. 系統所使用之聚光鏡組中的半柱狀透鏡是選擇市售規格進行模擬與設計，若能自行設計開模加工光學鏡片，則可最佳化聚光鏡組，提升光效率縮短曝光時間更加提升量測速度。
6. 目前系統探頭的部分體積過大，安裝於商用量測平台時可能因體積問題限制了探頭移動空間。未來可利用如三角反射鏡光學元件折向光路，縮小整體體積以改善行程可能受限問題。

## 參考文獻



- [1] 張奕威, “多波長差動共焦顯微三維形貌量測技術之研究.” 博士論文. 國立臺北科技大學機電科技研究所. 2012
- [2] 林俊達, “創新式雙狹縫彩色差動共焦高速形貌量測術之研發.” 碩士論文. 國立台北科技大學自動化科技研究所. 2013.
- [3] M. Minsky, “Microscopy Apparatus,” U.S. patent, No. 3,013,467, 1961.
- [4] T. Tanaami, S. Otsuki, N. Tomosada, Y. Kosugi, M. Shimizu and H. Ishida, “High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks,” *Applied Optics*, Vol. 41, Issue 22, pp. 4704-4708, 2002.
- [5] M. Ishihara and H. Sasaki, “High-speed surface measurement using a nonscanning multiple-beam confocal microscope,” *Optical Engineering*, Vol. 38, Issue 6, pp. 1035-1040, 1999.
- [6] F. Bitte, G. Dussler and T. Pfeifer, “3D micro-inspection goes DMD,” *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 36, Issue 2, pp. 155-167, 2001.
- [7] “DMD.” [http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/projects/pi\\_micro/pi\\_micro.php](http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/projects/pi_micro/pi_micro.php).
- [8] S. K. Nayar and Y. Nakagawa, “Shape from focus: an effective approach for rough surfaces,” *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp.218-225, 1990.
- [9] K. B. Shi, P. Li, S. Z. Yin and Z. W. Liu, “Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light,” *Optics Express*, Vol. 12, Issue 10, pp. 2096-2101, 2004.
- [10] K. Shi, P. Li, S. Yin and Z. Liu, “Surface profile measurement using chromatic confocal microscopy,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 5606. pp.124-131, 2004.
- [11] A. K. Ruprecht, K. Korner, T. F. Wiesendanger, H. J. Tiziani and W. Osten,

- 
- “Chromatic confocal detection for high Speed micro topography measurements,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 5302, pp.53-60, 2004.
- [12] P. C. Lin, P. C. Sun, L. J. Zhu and Y. Fainman, “Single-shot depth-section imaging through chromatic slit-scan confocal microscopy,” *Applied Optics*, Vol. 37, Issue 28, pp. 6764-6770, 1998.
- [13] J. Kim, D. Kang and D. G. Gweon, “Spectrally encoded slit confocal microscopy,” *Optics Letters*, Vol. 31, Issue 11, pp. 1687-1689, 2006.
- [14] T. Kim, S. H. Kim, D. H. Do, H. Yoo and D. G. Gweon, “Chromatic confocal microscopy with a novel wavelength detection method using transmittance,” *Optics Express*, Vol. 21, No. 5, 2013.
- [15] C. H. Lee and J. P. Wang, “Noninterferometric differential confocal microscopy with 2-nm depth resolution,” *Optics Communications*, Vol. 135, Issue 4-6, pp. 233-237, 1997.
- [16] Y. Wang, C. Kuang, P. Xiu, S. Li, X. Hao and X. Liu, “A lateral differential confocal microscopy for accurate detection and localization of edge contours,” *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 53, pp. 12-18, 2014.
- [17] Y. Wang, C. Kuang, Z. Gu and X. Liu, “Image subtraction method for improving lateral resolution and SNR in confocal microscopy,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 48, pp. 489-494, 2013.
- [18] E. Dusch, T. Dorval, N. Vincent, M. Wachsmuth and A. Genovesio, “Three-dimensional point spread function model for line-scanning confocal microscope with high-aperture objective,” *Journal of Microscopy-Oxford*, Vol. 228, Issue 2, pp. 132-138, 2007.
- [19] H. Perrin, P. Sandoz and G. M. Tribillon, “Profilometry by spectral encoding of the optical axis,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 2340, pp.366-374, 1994.

[20] “Prism.” <http://en.wikipedia.org/wiki/Prism>

[21] C. S. Joseph, G. G. Jérôme and C. J. Pierre, “Quasi Confocal Extended Field Surface Sensing,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 4449, pp.178-183, 2001.

[22] “Products-Optics.” <http://www.edmundoptics.com/>

[23] “3-Axis Submodules.” <http://www.raylase.de/products/3-achsensubmodule/>

[24] “Keyence VK-9700.” [http://www.keyence.com/products/microscope/laser-microscope/vk-8700\\_9700\\_generationii/index.jsp](http://www.keyence.com/products/microscope/laser-microscope/vk-8700_9700_generationii/index.jsp)

