

國立臺灣大學工程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

光斑與結構光複合式三維形貌量測研究

Research on 3-D Surface Measurement using Synthesis of  
Speckle and Structured Fringe Composite Patterns

謝仲安

Chung-An Hsieh

指導教授：陳亮嘉 博士

Advisor: Liang-Chia Chen, Ph.D.

中華民國 103 年 8 月

July, 2014

## 誌謝



首先感謝指導教授陳亮嘉老師的指導，培養我獨立思考及解決問題的能力，讓我對於進入職場或面對壓力之應變也有很大的學習，才使本篇論文能順利完成。

在實驗室的這兩年大家朝夕相處之下，培養了許多情誼，十分感謝實驗室，以及剛踏進 AOI 實驗室時，學長奕威、Mario 以及明軒的幫忙，帶領我更快適應實驗室的生活，同時也要感謝實驗室同學仁興、建衡以及坤呈在這段時間相互切磋砥礪、相互扶持與互相鼓勵。同時也要感謝學弟宇華、姚穎、厚佑、沛哲以及豐禾，實驗室有你們的幫忙及歡笑聲，帶給大家無限的歡樂。由於大家才能讓我順利地完成碩士學業。

最後則要特別感謝我的父母親及家人，給我這樣的機會及資源供我修習碩士學位，謝謝你們一路以來對我的全力支持，讓我能毫無後顧之憂地做研究及撰寫論文。在此感謝所有幫助、提攜過我的人，以此論文獻給你們。

仲安 謹誌

2014/08 於台大

## 中文摘要



三維形貌量測在自動光學檢測上有著不可取代的地位，而三角量測法則在是最常被使用的量測方法，不管是相移術或是灰階編碼法都是利用三角量測法之原理進行量測，以往在相移術有著相位模糊的問題，故相移術所能量測的物件有所限制，當相位模糊產生時，量測的結果有極大的誤差產生；而利用雷射光斑的數位影像辨識法在量測時會有解析度較差、量測結果的邊界容易產生錯誤的問題存在；而量測解析度與量測範圍的提升一直都是相當重要的課題，為了提升量測範圍與解析度，本研究利用一個新的量測方法，結合雷射光斑與條紋結構光投影與待測物之上，利用數位影像辨識法使用雷射光斑計算絕對相位而條紋結構光利用相移術計算相對相位，藉由此方法可以將絕對與相對相位進行結合，利用此方法可以有數位影像辨識的大範圍而有較高的解析度與精度，藉由實驗驗證，此方法可達到深度解析  $10\ \mu\text{m}$  且量測範圍達到  $100\text{mm}$ ，是以往相移術較難達成的量測能力。

關鍵字：自動光學檢測、三維形貌量測、相移術、相位模糊、階高限制、複合圖案

# ABSTRACT



Three-dimensional profilometry is an indispensable surface profile measuring technology for ensuring the quality of manufacturing process in the modern manufacturing industry, especially for automated optical inspection (AOI). Triangulation-based three-dimensional profilometry most frequently employed nowadays includes phase-shifting, gray-code and speckle-projecting profilometry. Theoretically, the measuring depth is traded off with the measuring resolution as a physical limit for 3-D optical detection. To address this measuring barrier, this article presents a new optical measuring method for one-shot three-dimensional profilometry, in which random speckles and structured fringes are simultaneously projected onto tested objects for forming a pair of deformed speckle and fringe images to be acquired concurrently. The speckle image is utilized to determine an absolute phase of each position using digital image correlation (DIC) while the fringe image is employed to determine a relative phase by using phase shifting profilometry (PSP). Each pair of absolute and relative phases corresponding to each measured position is respectively converted into an absolute and a relative depth. As a result, depth information of each position on the surface of the object is then reconstructed by synthesizing the corresponding absolute depth and the relative depth. With this, full-field surface profilometry with high measuring accuracy and large range of surface depth can be realized. Verified by some measuring experiments, the developed method can achieve a measuring depth resolution of 10  $\mu\text{m}$  while the measuring depth range can be extended to more than 100 mm or higher. This kind of measuring capability cannot be achieved by the conventional Moiré, speckle or structured light projection methods currently available.

Keyword: Automated optical inspection (AOI), three-dimensional profilometry, digital image correlation (DIC), Phase shifting profilometry.

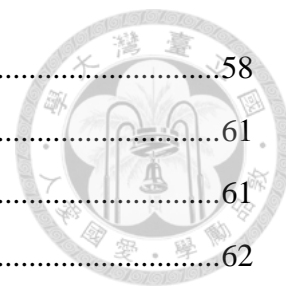
# 目錄



|                            |          |
|----------------------------|----------|
| 口試委員會審定書 .....             | #        |
| 誌謝 .....                   | i        |
| 中文摘要 .....                 | ii       |
| ABSTRACT .....             | iii      |
| 目錄 .....                   | iv       |
| 圖目錄 .....                  | vii      |
| 表目錄 .....                  | x        |
| <b>Chapter 1 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 研究目標 .....             | 3        |
| 1.4 論文架構 .....             | 3        |
| <b>Chapter 2 文獻回顧.....</b> | <b>5</b> |
| 2.1 相移法 .....              | 5        |
| 2.1.1 相移法原理 .....          | 5        |
| 2.1.2 相移法文獻 .....          | 6        |
| 2.2 傅立葉轉換輪廓術 .....         | 9        |
| 2.2.1 傅立葉輪廓術 .....         | 9        |
| 2.2.2 傅立葉輪廓術文獻 .....       | 10       |
| 2.3 光斑數位影像辨識量測法 .....      | 13       |
| 2.3.1 光斑數位影像辨識量測法原理 .....  | 13       |
| 2.3.2 光斑數位影像辨識量測法文獻 .....  | 13       |
| 2.4 解決階高限制之量測法 .....       | 16       |
| 2.4.1 解決相位模糊之量測法文獻 .....   | 16       |
| 2.5 相位轉換高度校正 .....         | 19       |
| 2.5.1 相位與高度轉換之文獻 .....     | 19       |
| 2.6 文獻分析與總結 .....          | 21       |

|                  |                  |           |
|------------------|------------------|-----------|
| <b>Chapter 3</b> | <b>系統量測原理與技術</b> | <b>25</b> |
| 3.1              | 研究原理之介紹          | 25        |
| 3.2              | 研究方法原理           | 25        |
| 3.2.1            | 三維表面輪廓量測原理       | 25        |
| 3.2.2            | 光斑法量測原理          | 27        |
| 3.2.3            | 傅立葉輪廓術原理         | 28        |
| 3.2.4            | 相移術原理            | 30        |
| 3.2.5            | 相位重建理論           | 30        |
| 3.2.6            | 三維資訊高度補償原理       | 32        |
| 3.2.7            | 條紋頻率校正           | 33        |
| 3.2.8            | 相機校正理論           | 34        |
| <b>Chapter 4</b> | <b>系統架構與演算法</b>  | <b>39</b> |
| 4.1              | 量測系統之光學設計        | 39        |
| 4.2              | 硬體架構             | 41        |
| 4.2.1            | 影像擷取規格           | 41        |
| 4.2.2            | 近紅外線雷射二極體光源      | 43        |
| 4.2.3            | 近紅外線 LED 光源      | 43        |
| 4.2.4            | 位移平台規格           | 43        |
| 4.2.5            | 光學元件規格表          | 44        |
| 4.3              | 研究之演算法流程         | 46        |
| 4.4              | 演算法之驗證           | 47        |
| 4.5              | MTF 分析           | 50        |
| 4.6              | CCD 視野校正         | 50        |
| 4.7              | 邊緣及缺失補正演算法       | 51        |
| 4.8              | 系統驗證量測標準件設計      | 53        |
| <b>Chapter 5</b> | <b>實驗結果與討論</b>   | <b>56</b> |
| 5.1              | 系統重複度量測及精度分析     | 56        |
| 5.1.1            | ISO 5436-1:2000  | 56        |
| 5.1.2            | 重複量測             | 57        |

|                  |                     |           |
|------------------|---------------------|-----------|
| 5.1.3            | 自行設計之標準件量測驗證.....   | 58        |
| 5.2              | 量測結果.....           | 61        |
| 5.2.1            | 半球型物件.....          | 61        |
| 5.2.2            | 鉗子頭模型量測.....        | 62        |
| 5.2.3            | 玩偶量測.....           | 64        |
| 5.2.4            | 水五金量測.....          | 65        |
| 5.3              | 結果討論.....           | 66        |
| <b>Chapter 6</b> | <b>結論與未來展望.....</b> | <b>68</b> |
| 6.1              | 結論.....             | 68        |
| 6.2              | 未來展望.....           | 69        |
|                  | REFERENCE.....      | 70        |



## 圖目錄

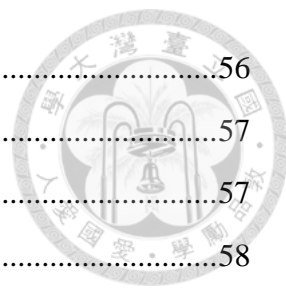


|        |                                                                                            |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 圖 2-1  | 同步梯形相移法示意圖 .....                                                                           | 7  |
| 圖 2-2  | Zhang 量測之結果 .....                                                                          | 7  |
| 圖 2-3  | Huang 量測系統示意圖 .....                                                                        | 8  |
| 圖 2-4  | 非等相位相移投影系統 .....                                                                           | 9  |
| 圖 2-5  | 擷取第一基頻轉換取得影像頻率資訊求解相位 .....                                                                 | 10 |
| 圖 2-6  | Onodera 和 Ishiiy 之系統架構圖 .....                                                              | 11 |
| 圖 2-7  | Skydan 所使用之不同色澤結構光量測(a)同時投射色與藍色條紋光;(b)分離紅色頻譜;(c)分離藍色頻譜;(d)紅色頻譜之相位封裝;(e)藍色頻譜之相位封裝;.....     | 12 |
| 圖 2-8  | 改良型傅立葉三維輪廓量測法(a)投影條紋光;(b)投影無條紋光;(c)無條紋光之二值化遮罩;(d)3D 結果與 3D 結果放大圖;.....                     | 12 |
| 圖 2-9  | Dai 等人之演算法(a)隨深度改變之光斑資料庫;(b)理想之相關係數與深度圖;(c)物件上的模板之高度極為相關係數最高之值;.....                       | 14 |
| 圖 2-10 | Dekiff 等人之量測結果 .....                                                                       | 14 |
| 圖 2-11 | Estela 等人之系統架構.....                                                                        | 15 |
| 圖 2-12 | Estela 等人之量測結果.....                                                                        | 16 |
| 圖 2-13 | Takeda 等人之多頻傅立葉輪廓術.....                                                                    | 17 |
| 圖 2-14 | 多相機之絕對相位判斷 .....                                                                           | 18 |
| 圖 2-15 | 多感應機制之三維視覺(a)含有不連續點之物件;(b)點陣列光;(c)點光源量測解析較差之資訊;(d)條紋光;(e)傅立葉輪廓術量測相位誤差之資訊;(f)比較與補償之結果;..... | 19 |
| 圖 2-16 | Guo 等人所做之不同指數之函式的誤差分析 .....                                                                | 20 |
| 圖 2-17 | Paulo 等人之(a)校正系統;(b)對不同位置像素之相位轉換公式修正;.....                                                 | 21 |
| 圖 2-18 | Su 等人所設計之校正塊 .....                                                                         | 21 |
| 圖 2-19 | Su 等人之量測結果 .....                                                                           | 21 |
| 圖 3-1  | 三角量測法示意圖 .....                                                                             | 26 |



|        |                                          |    |
|--------|------------------------------------------|----|
| 圖 3-2  | 相關係數與資料庫比對之結果，縱軸為相關係數，橫軸為資料庫之高度<br>..... | 28 |
| 圖 3-3  | 相位封裝結果剖線圖 .....                          | 31 |
| 圖 3-4  | 相位還原剖線圖 .....                            | 32 |
| 圖 3-5  | 空間頻率與高度變化圖 .....                         | 34 |
| 圖 3-6  | 相機校正流程 .....                             | 35 |
| 圖 3-7  | 坐標系表示圖 .....                             | 35 |
| 圖 3-8  | 相機畸變示意(a) 枕型畸變;(b)桶型畸變;.....             | 36 |
| 圖 3-9  | 校正流程圖 .....                              | 37 |
| 圖 3-10 | 影像校正用棋盤格 .....                           | 38 |
| 圖 4-1  | 系統光學設計圖 .....                            | 39 |
| 圖 4-2  | 系統設計圖細部 .....                            | 40 |
| 圖 4-3  | 系統實際組裝圖 .....                            | 41 |
| 圖 4-4  | acA1300-60gmNIR 實體圖.....                 | 42 |
| 圖 4-5  | 影像擷取裝置光譜響應圖 .....                        | 42 |
| 圖 4-6  | 近紅外線雷射二極體尺寸圖 .....                       | 43 |
| 圖 4-7  | 位移平台實體圖 .....                            | 44 |
| 圖 4-8  | 演算法流程圖 .....                             | 46 |
| 圖 4-9  | 驗證機構示意圖 .....                            | 47 |
| 圖 4-10 | 電腦設計投影之結構光 .....                         | 48 |
| 圖 4-11 | 分離之影像 .....                              | 48 |
| 圖 4-12 | 傅立葉輪廓術之階高剖線圖 .....                       | 49 |
| 圖 4-13 | 三維資訊高度補償結果 .....                         | 49 |
| 圖 4-14 | 影像校正所取之棋盤格影像 .....                       | 51 |
| 圖 4-15 | 視野校正後之結果(a)校正後之 CCD 影像與;(b)校正目標影像;.....  | 51 |
| 圖 4-16 | 光斑法之量測邊界 .....                           | 52 |
| 圖 4-17 | 相移術之量測邊界 .....                           | 52 |
| 圖 4-18 | 比較後之補償區域 .....                           | 53 |
| 圖 4-19 | 自行設計之標準件 .....                           | 54 |

|        |                                                                |    |
|--------|----------------------------------------------------------------|----|
| 圖 5-1  | ISO 標準階高量測示意圖.....                                             | 56 |
| 圖 5-2  | 9mm 標準階高塊.....                                                 | 57 |
| 圖 5-3  | 9mm 階高塊三十次重複量測結果.....                                          | 57 |
| 圖 5-4  | 階高塊量測剖線圖.....                                                  | 58 |
| 圖 5-5  | 自行設計之階高塊.....                                                  | 59 |
| 圖 5-6  | 量測結果(a)數位影像辨識量測法結果;(b)本研究之量測結果;(c)量測結果剖線圖;.....                | 60 |
| 圖 5-7  | 量測之三維形貌圖(a) 數位影像辨識量測法結果;(b)五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;.....     | 61 |
| 圖 5-8  | 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;.....                                   | 62 |
| 圖 5-9  | 半球物件高度資訊示意圖(a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;.....     | 62 |
| 圖 5-10 | 鉗子頭三維形貌量測結果(a) 數位影像辨識量測法結果;(b) 五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;..... | 63 |
| 圖 5-11 | 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;.....                                   | 63 |
| 圖 5-12 | 鉗子量測剖線圖 (a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;.....        | 63 |
| 圖 5-13 | 玩偶三維形貌量測資訊(a) 數位影像辨識量測法結果;(b) 五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;.....  | 64 |
| 圖 5-14 | 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;.....                                   | 64 |
| 圖 5-15 | 玩偶量測剖線圖 (a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;.....        | 65 |
| 圖 5-16 | 水五金三維形貌量測資訊(a) 數位影像辨識量測法結果;(b) 五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;..... | 65 |
| 圖 5-17 | 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;.....                                   | 66 |
| 圖 5-18 | 水五金量測剖線圖 (a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;.....       | 66 |



# 表目錄



|        |                    |    |
|--------|--------------------|----|
| 表格 2-1 | 各種三維輪廓量測法之比較 ..... | 22 |
| 表格 4-1 | 感光耦合元件規格表 .....    | 41 |
| 表格 4-2 | 鏡頭規格 .....         | 42 |
| 表格 4-3 | 位移平台規格表 .....      | 43 |
| 表格 4-4 | 光學元件規格表 .....      | 44 |
| 表格 4-5 | 光學元件之頻譜響應 .....    | 45 |
| 表格 4-6 | MTF 比較表 .....      | 50 |
| 表格 4-7 | 量測面積比較表 .....      | 53 |
| 表格 4-8 | 滾珠公差 .....         | 54 |
| 表格 4-9 | 微三次元測量儀規格 .....    | 54 |
| 表格 5-1 | 數據結果統整 .....       | 58 |
| 表格 5-2 | CMM 之階高量測結果 .....  | 59 |
| 表格 5-3 | 量測結果比較表 .....      | 60 |
| 表格 5-4 | 球心距離量測結果 .....     | 60 |

# Chapter 1 緒論

## 1.1 研究背景

隨著人力成本的不斷上揚，如何將以往手工的作業改為藉由自動化工作已經是未來的趨勢了，而最容易取代手工的作業就是工業上的檢測，取代以往的人工檢測，自動化檢測有著其必要性，近年來量測的技術蓬勃發展，許多三維的量測技術逐漸完善，市面上也越來越多使用這些三維量測技術的量測探頭，藉由這些探頭可以進行物件的形貌量測，改善產線上的自動化能力，除此之外提高量測探頭的精度還可以進行物件的瑕疵檢測，藉由量測的結果判斷物件是否有瑕疵。

傳統量測技術可以分為接觸式與非接觸式掃描量測兩種，非接觸式量測利用光學方式進行量測，不須接觸工件，可以避免量測時造成對工件的表面損害。在非接觸式量測技術中的光學量測技術又可分為主動式與被動是兩種，其主要差異在於是否需要額外之特定光源來輔助量測，主動式三維量測有雷射掃描三角量測法，結構光法、疊紋法...等。

目前工業界所使用之三維量測系統以相移術為大宗，相移術之優點在於其高深度解析以及高精度，然而相移術本身有著階高限制的缺陷存在，由於此缺陷之存在會造成量測物件的限制性，減少相移術系統的泛用性，除此之外相移術之量測需要量測基準面的存在才可計算相位差，這也會造成量測的侷限性，這些問題對於相移術乃是一相當大的限制；而常見的絕對量測則有著深度解析不足之問題，此問題則造成工業界較少使用絕對量測。

現今的形貌量測技術種類繁多，可藉由不同的量測精度與量測演算方法來進行分類，各種量測方法與量測解析度皆有差異，而光學非接觸式檢測技術則是最常被工業使用的技術，其優點在於光學非接觸式量測有著不會對物件表面進行損傷以及快速的優點，非接觸式檢測技術可再細分為立體視覺法 (Stereo Vision)、投影結構光法、時間飛行法等等的光學量測技術，各種方法存在著使用環境、量測速度與量測精度等限制，可根據不同情況選用不同的方法。





## 1.2 研究動機與目的

傳統的三維形貌量測多是使用投影結構光的相移術，相移術有著高深度解析以及高精度，但是相移術在使用上有其限制，即是對於不連續的物件表面會有著階高限制的產生，階高限制的存在會使的不連續的表面產生錯誤的量測資訊，由於此皆高限制的存在會限制量測的物件大小以及物件型態，對於產業的應用產生許多不便，因此如何對於不連續的表面進行量測是一個相當大的挑戰，除此之外相移術乃是一種相對量測，此種量測方法需建立在量測時有參考基準面的存在，如果量測時沒有參考基準面時容易造成量測上的錯誤。傳統上為了解決此問題，一般多是使用投影多張不同週期的條紋光來進行量測，藉由不同週期的條紋光有著不同量測範圍的特性，來達到解決階高限制的結果，然而此方法為了投影多張不同週期的條紋從而犧牲了量測的速度，造成量測速度受限的結果，如何在不增加過多投影的結構光而同時能解決階高限制是一個值得研究的題目。


以往也有人使用編碼法來進行三維的形貌量測以避免階高限制，但是編碼法有著若編碼長度不夠時造成的量測誤差，如果為了增加編碼的長度又容易落入減少量測時間或是量測物件受限的情形(如彩色結構光法)，從而降低了編碼法的使用效益。

數位影像辨識法利用散亂光斑資訊進行物件高度量測是現今常見的作法，此方法不須投影多張不同圖案，可達到即時量測，但數位影像辨識法在量測物體時，會受到邊界影響造成在邊界資訊的錯誤或是缺失。

本研究之目的在於藉由結合數位影像辨識法的絕對量測與相移術的相位量測，得到一絕對與相對之複合三維形貌量測法，相較於一般使用編碼法與相移術來達成之三維量測法，本研究可以減少投影之張數，同時並可以達到如編碼法一般的絕對相位量測，因此本研究之目的在於發展一可取代利用編碼法來得到絕對相位之方法，並配合光學架構以達到此目的。

針對上述的缺點以及欲達成之目標，本研究發展出絕對與相對量測結合之表面三維形貌量測技術，本研究有以下的功能及特點：

1. 利用光斑進行數位影像辨識的絕對量測得到絕對距離並由此進行補正來解決條紋結構光所產生的相位不連續問題。

- 
2. 利用同時取像取得雷射光斑與條紋結構光之影像，同時配合傅立葉輪廓術只需單張條紋結構光之特點，藉由此方法可以達到即時取像、及時量測的特性，可避免受到環境擾動與震動的影響。
  3. 利用條紋結構光的高深度解析特點，補足一般絕對量測之量測深度解析不足之問題，提高量測的應用性。

本研究利用主動投影結構光與光斑的方式，並可搭配遠紅外線光源，可減少一般環境光所造成的影響。

### 1.3 研究目標

現今之條紋結構光量測多有因不連續點所產生之像為模糊的問題，造成量測區間受限，以往之解決方法多是使用編碼搭配相移術進行量測以解決此問題，然而編碼法會增加所需之投影圖案之增加，量測時間也因此增加，因此本研究的目標在於達到以下幾點：

1. 解決相位量測方法的階高量測問題。

以往的相移術所量測之物件多選擇連續曲面或是高度小於階高限制的物件以避免因不連續點所造成的相位模糊，本研究目標在於令此皆高量測問題藉由絕對相位來解決。

2. 提高絕對相位量測的深度解析。

傳統的絕對相位量測，如雷射光斑配合數位影像辨識有著深度解析不足的問題存在，本研究之目標在於利用相對量測的高深度解析來搭配以解決以往深度解析不足的問題。

3. 發展一可投影光斑與條紋並利用絕對與相對相位複合之量測光學架構。

藉由絕對與相對複合之光學架構，本系統可以達到同時得到絕對與相對之相位，並藉由演算法達到彼此互補之功用之光學系統。

### 1.4 論文架構

本論文架構分成以下幾部分：

第一章 緒論：本章節之目的在於使讀著能了解目前技術的現況，並提出欲解決之問題。

第二章 文獻討論：本章節之目的在於研究現有之研究方法，分析各種方法之優劣並加以比較，同時找出本研究之優勢。

第三章 量測系統原理：本章節之目的在於介紹系統所使用的量測方法原理以及理論推導。

第四章 量測系統架構及演算法：本章節之目的在於介紹系統的硬體架構以及所使用的演算法詳細流程。

第五章 量測結果與討論：本章節將呈現實驗結果與分析，並討論量測之結果正確性。

第六章 結論與未來展望：本章節將研究之成果進行總結，並討論此研究之未來可發展與改進之方向。



## Chapter 2 文獻回顧



由於科技的蓬勃發展，即時線上的自動化量測技術在現今已經有著越來越重要的地位，而光學非接觸式的三維輪廓量測在自動化量測技術中有著舉足輕重的地位，光學非接觸式的量測有著快速以及精確的優點，適合用於產線上的自動化生產，相對於一般接觸式量測可能會對物件表面產生傷害的問題，光學非接觸式有著相當大的應用性。

目前市面上常見的非接觸式量測技術有以下幾種:時間飛行法(Time of Flight)，此法乃是利用發出的電磁波時間與接收時間的差別來進行量測，其解析度可以達到釐米等級；干涉法則是利用干涉元件產生干涉條紋投影至待測物上，藉由計算相位的差距達到量測的結果；除此之外還有諸如灰階編碼法[1]、疊紋法...等，常見的光學形貌量測技術為三角量測法，三角量測法包含編碼法與相位量測法等等；相位量測法藉由投影的相位資訊為基礎進行物件的三維輪廓計算，藉由計算相位與深度資訊的關係，可以得到物件的三維資訊，相位量測法的優勢在於乃是一面量測技術，可以獲得極大的量測範圍，且量測速度快、精密度高，但是由於相位移法對於不連續點以及陰影的判斷容易產生錯誤，造成量測上的誤差。本研究在經過整理與分析後將與本研究相關之文獻進行說明並剖析其量測原理、架構與優缺點。

### 2.1 相移法

#### 2.1.1 相移法原理

相移法乃是藉由投影正弦結構光於待測物之上並藉由 CCD 取像得到相位並由此來進行量測，而投影的正弦結構光可以表示為：

$$I_n(x, y, t) = I_n'(x, y) + I_n''(x, y)\cos[\phi(x, y) + \delta_n] \quad (2.1)$$

其中(x,y)為影像的座標位置，x,y分別代表影像座標的列與行。

$I_n'$  為影像背景之平均光強度

$I_n''$  為正弦結構光之光強值，亦可稱為條紋對比度





t 為條紋之時域

$\varphi(x,y)$  為待測物之相為分布

$\delta_n$  為相位變化量

在重建三維物體高度時必須計算出相位差，藉由相位差來反求物體之高度，因此我們將條紋結構光投影至物體上，並做出 N 次的相位移，相位移量可以為  $\beta = 2\pi \times N$ ，其中 N 為相位移之總次數，則每次擷取得像一變化的條紋結構光強度可以表示為

$$I_n(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + n\beta] \quad (2.2)$$

其中  $I_n(x,y,t)$  為不同相位移的條紋強度值。為了得到相位  $\psi(x,y)$  可以從式 11 中求得，但是式 (2.2) 中有三個未知數  $I'(x,y)$ 、 $I''(x,y)$  及  $\phi(x,y)$ ，因此至少需進行三次或以上的相位移後由三組方程式求解，因此相位移的次數 N 需大於或等於 3，次數越多則可得到精準的結果。本文中使用的五步相移進行求解，求解後我們可以得到

$$\phi(x, y) \cong \tan^{-1} \left[ \frac{2 \times (I_2 - I_4)}{2 \times I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (2.3)$$

由式 (2.3) 所得到之相位即可進行深度轉換得到三維資訊。

### 2.1.2 相移法文獻

#### (1) Zhang 和 Huang 所提出之高解析與即時三維輪廓之量測方法[2]

藉由投影機投影三張不同相位且週期間隔為  $2\pi/3$  的圖案於待測物之上，並由黑白 CCD 進行取像，利用得到之三張影像進行三步相移術，由此得到待測物之高度資訊，除此之外亦使用彩色 CCD 或取待測物之表面顏色資訊，利用這些資訊來重建三維輪廓。此文獻亦使用同步梯形相移法來快速得到相位圖。

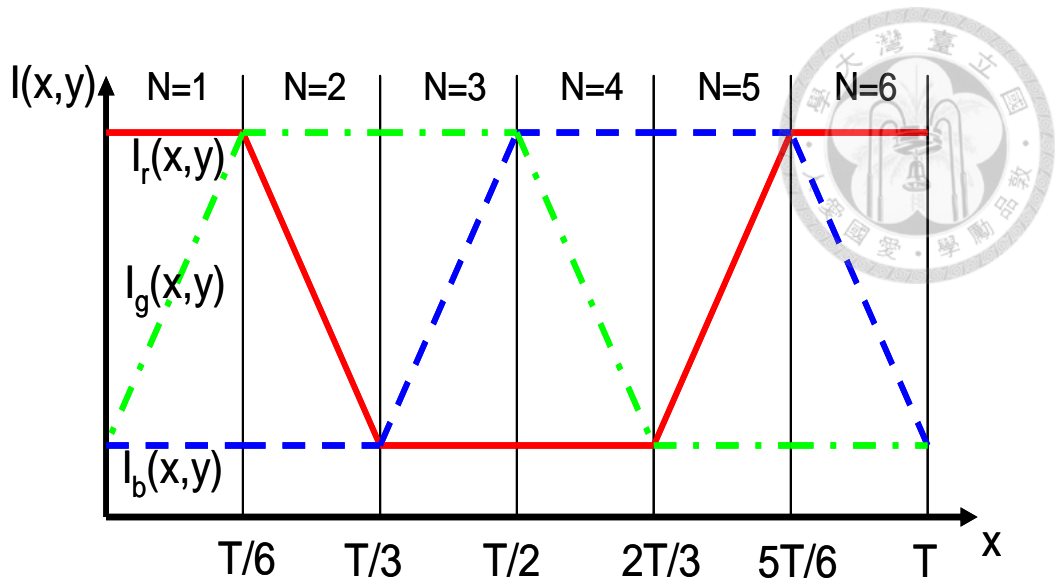


圖 2-1 同步梯形相移法示意圖

(2) 由 Zhang 和 Yau 所提出高速且即時之相移法量測[3]:

此文獻以 30fps 的速度或取其三維輪廓，使用三步相移法與標註偵測演算法(Marker Detection Algorithm)，藉由投影機在同一點投影一標註點，當沒有像差存在的時候，在成像面即可得到同一點，於作者實驗中，標註偵測的成功率高達 99%，即可從相位圖中得到其座標位置。

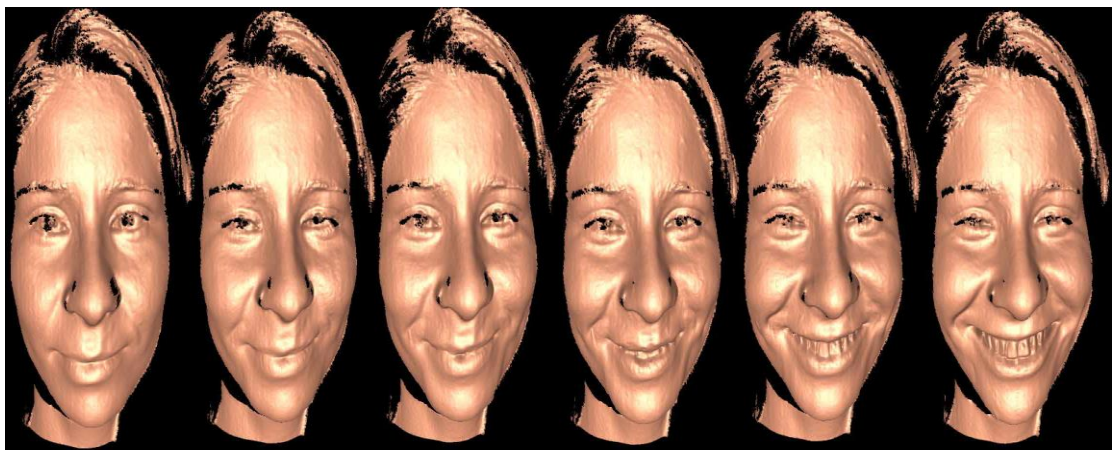


圖 2-2 Zhang 量測之結果

(3) 由 Huang 等人所研究雙彩色數位條紋投影技術應用於高速三維曲面輪廓[4]:

此文獻採用三步相移法，藉由將三張不同顏色(R、G、B)以及不同相位差(120 度)的影像組合到一張影像上，最後合成一張具有不同顏色之正弦條紋結構光。藉由 DLP 將影像投影至待測物上，並藉由彩色 CCD 進行取像，對取得的影像進行三色分離後取得三色的灰階值並使用三步相移法進行計算相位封裝與相位還原，由於只投影一張結構光於待測物之上，固可以將原本投

影三張影像的三步相移術縮短為只需一張影像即可計算相位之高速三維輪廓計算法，圖 2-3 微系統架構以及流程圖，其優點在於縮短一般三步相移術所需之取像時間，可應用於量測動態物件。缺點則是頭光色彩會造成邊界處的調色現象並產生色彩不均之現象，造成色彩分離時產生誤差。

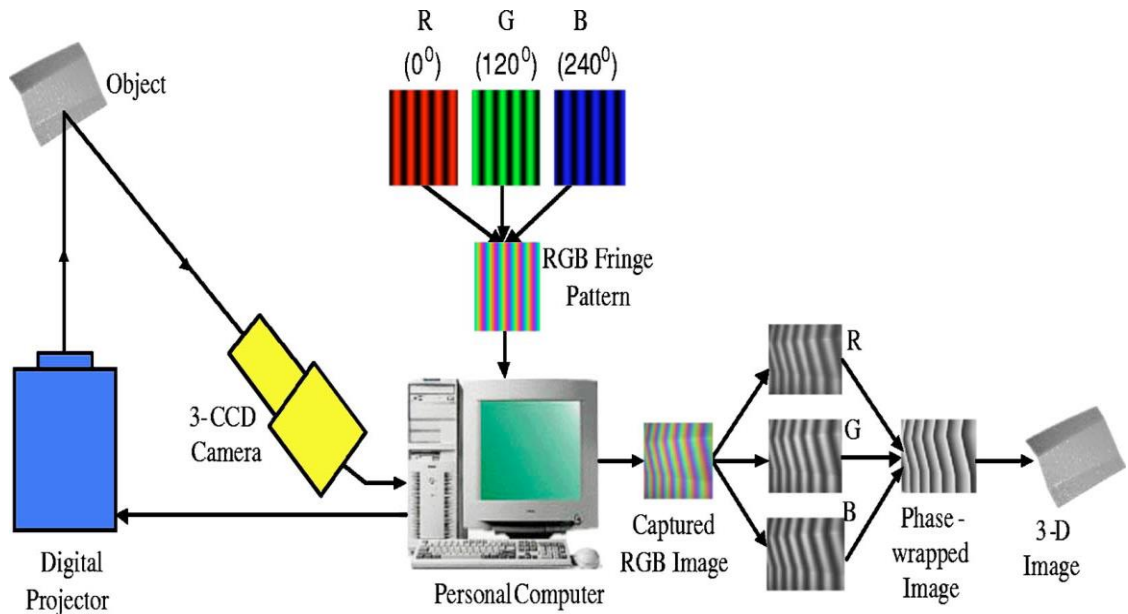


圖 2-3 Huang 量測系統示意圖

(4) 由 Huo 所提出利用三色 LED 投影之非等相位三步相移[5]：

此文獻使用三色 LED 經由同軸投影，並利用兩光學稜鏡產生相移，用以替代以往所使用之位移平台所產生之相移，此方法所產生之相移相位因受限於光學頻譜而無法達成同相位相移，故此文獻亦提出一非同步相為之三步相移演算法，此文獻目的在於避免以往由於使用位移平台而產生之相位誤差，此系統之系統架構如下圖所示：

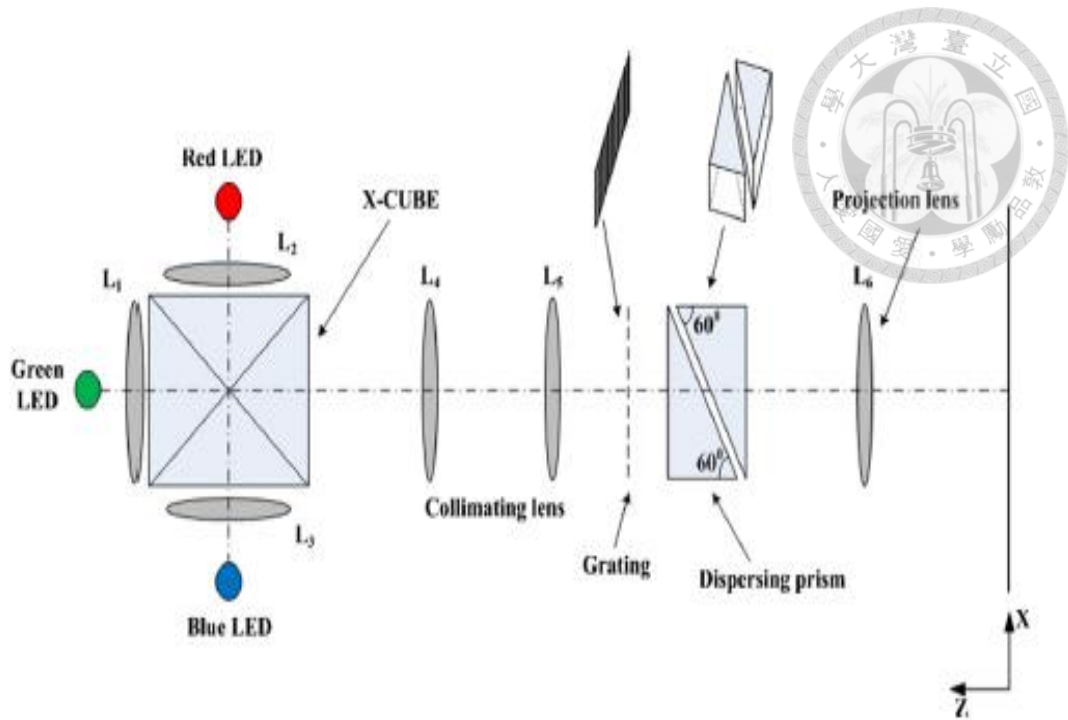


圖 2-4 非等相位相移投影系統

## 2.2 傅立葉轉換輪廓術

### 2.2.1 傅立葉輪廓術

傅立葉轉換三維形貌量測術是由 Takeda 在 1982 年所提出的一種不同於相移術的演算法[6]，此演算法之關鍵在於利用由 CCD 取得的正弦條紋光強資訊透過快速傅立葉轉換將資訊由空間域轉換至頻率域，並藉由帶通濾波器 (band-pass filter) 擷取第一基頻資訊，如圖 2-5 所示，此法可以減少高頻雜訊以及背景光強對於相位重建之影響，從而得到所需之相位重建資訊，並結合三角量測法得到相位與深度之關係，由此建立物件之三維輪廓資訊。

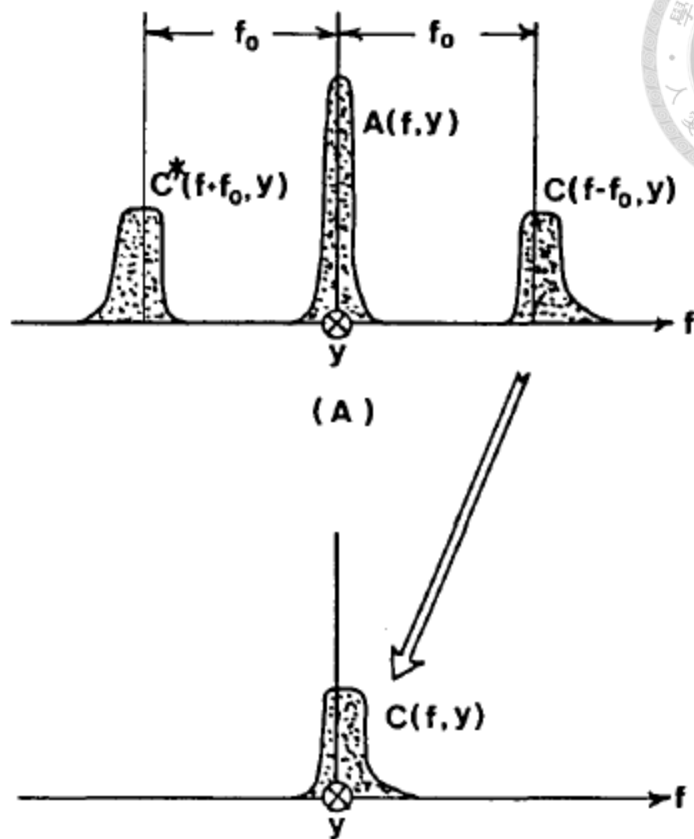


圖 2-5 擷取第一基頻轉換取得影像頻率資訊求解相位

### 2.2.2 傅立葉輪廓術文獻

(1) 由 Onodera 和 Ishiiy 在 1998 年所提出利用雙波長傅立葉轉換量測一階高大於  $1\mu\text{m}$  之物體[7]:

Onodera 和 Ishiiy 於文獻中使用雙波長傅立葉轉換，利用 YAG 雷射 ( $\lambda_1=532\text{nm}$ )和 He-Ne 雷射( $\lambda_2=632.8\text{nm}$ )，其等效波長為  $3.3\mu\text{m}$ ，藉由等效波長之觀念來提高階高限制之量測，並結合傅立葉轉換輪廓術求得資訊，其缺點在於直接使用等效波長之資訊進行重建，因此量測精度較為不佳。其系統架構如所示。

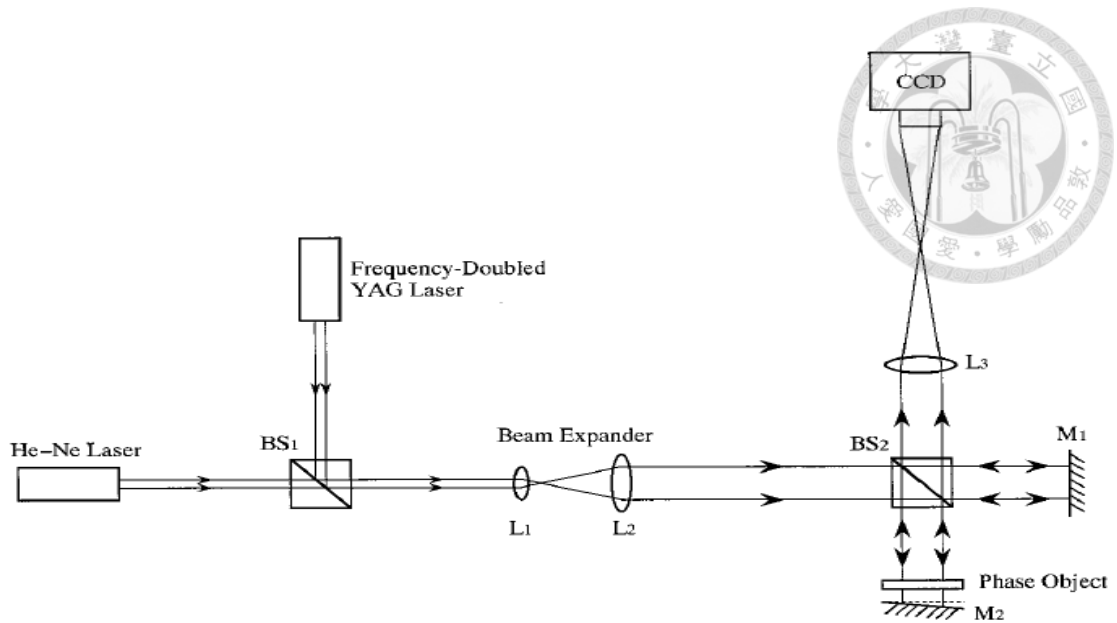


圖 2-6 Onodera 和 Ishiiy 之系統架構圖

(2) 由 Skydan 所提出之使用色澤結構光之相移量測與表面三維重建[8]:

本文獻利用以不同顏色之結構光在不同角度上投射至代測物上，如圖 2-7 所示；可以增加量測之區域並減少傅立葉量測技術之限制與缺點。作者之方法乃是利用三種不同色彩投射至物體上，並搭配不同之投光角度來增加量測範圍，減少陰影的產生，同時以 CCD 對不同顏色取像，經過相位封裝之相位關聯，幫助實現快速與完整的曲面量測。

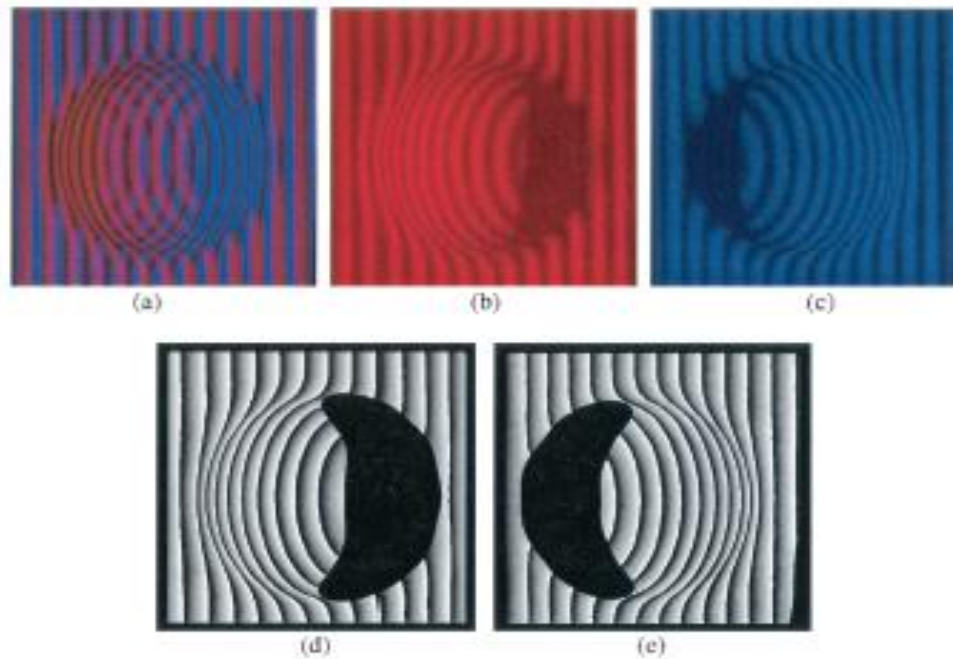


圖 2-7 Skydan 所使用之不同色澤結構光量測(a)同時投射色與藍色條紋光;(b)分離紅色頻譜;(c)分離藍色頻譜;(d)紅色頻譜之相位封裝;(e)藍色頻譜之相位封裝;



(3) Huang 等人所提出之改良型傅立葉三維輪廓量測法[9]:

本文獻藉由投影一張條紋結構光以及一無條紋光於代測物之上，如圖 2-8 所示；藉由將條紋結構光之影像進行背景去除，以消除因環境光不穩定之相位誤差，同時並加入標註偵測演算法以得到絕對相位資訊，同時利用均勻白光之二值化影像製作遮罩，幫助計算時去除陰影以及無資訊之區域，以達到最佳之量測效果。

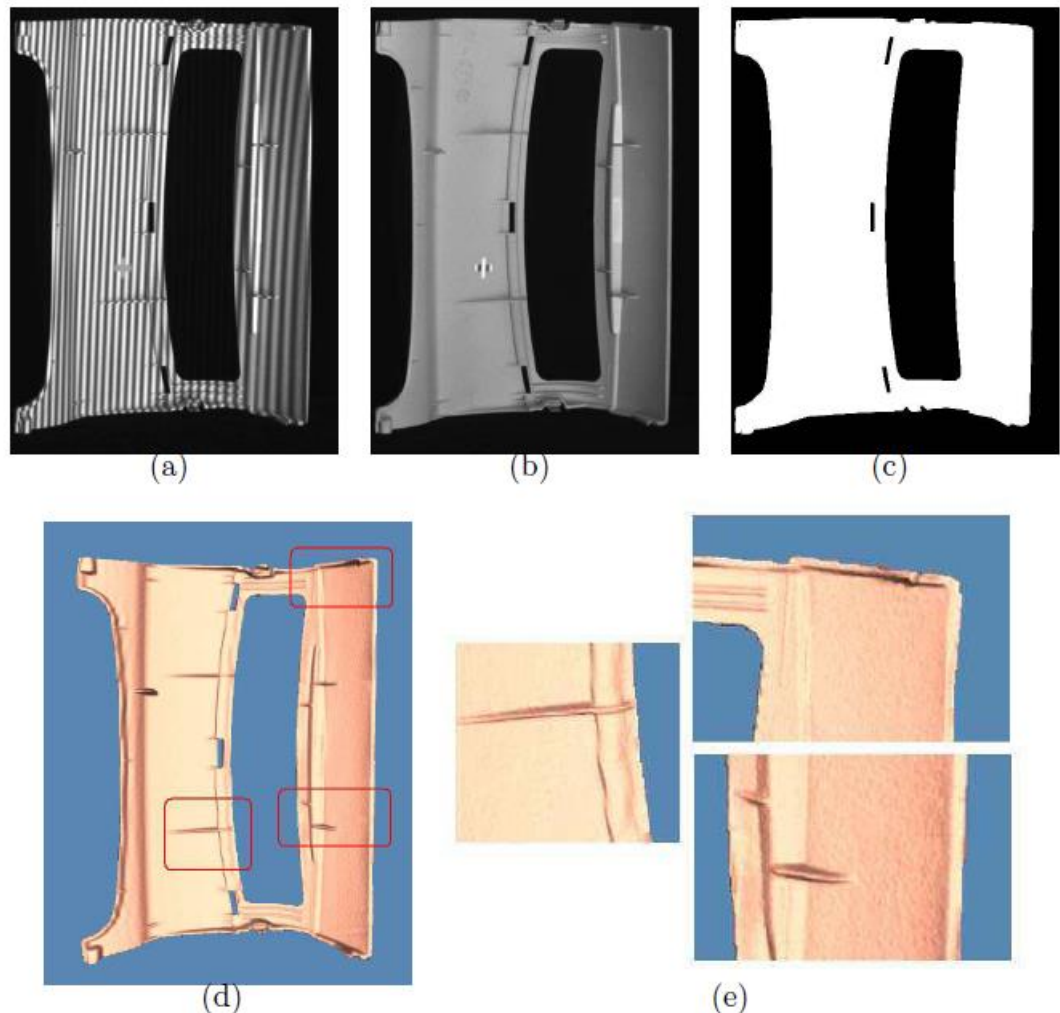


圖 2-8 改良型傅立葉三維輪廓量測法(a)投影條紋光;(b)投影無條紋光;(c)無條紋光之二值化遮罩;(d)3D 結果與 3D 結果放大圖;



## 2.3 光斑數位影像辨識量測法

### 2.3.1 光斑數位影像辨識量測法原理

光斑乃是由於光干涉產生之隨機光點，由於光斑具有隨機性以及獨立性，顧可以利用數位影像比對技術(Digital Image Correlation)，將欲量測的物件光斑影像切割成  $n*n$  ( $n$  為奇數) 產生模板並與真平面之光斑影像進行比對，即可算出模板在真平面之移動量，由此即可計算物件深度。

假設一模板之像素位置為  $T(x',y')$ ，欲比對之平面光斑影像像素位置為  $I(x,y)$ ，比對結果之像素位置為  $R(x,y)$ ，我們即可由數位影像比對技術得到：

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} T(x',y') * I(x+x',y+y')}{\sqrt{\sum_{x',y'} T(x',y')^2 * \sum_{x',y'} I(x+x',y+y')^2}} \quad (2.4)$$

當取得  $R(x,y)$  的位置即可計算偏移量，由此可得到物件的高度資訊。

### 2.3.2 光斑數位影像辨識量測法文獻

(1) Dai 與 Su 所提出利用投影機模擬光斑之形貌量測技術[10]:

本文獻利用電腦生成隨機光斑藉由數位投影機投影至平面上，並藉由建立每個高度的光斑資料庫，將資料庫的光斑影像資訊切割成  $n*n$  ( $n$  為奇數) 產生模板，再將待測物的影像也同樣切割為  $n*n$  的模板，經由數位影像比對(Digital Image Correlation)可以得到相似度最高的模板，如圖 2-9 所示；經由此模板之深度資訊即可得到此  $n*n$  區塊的高度。



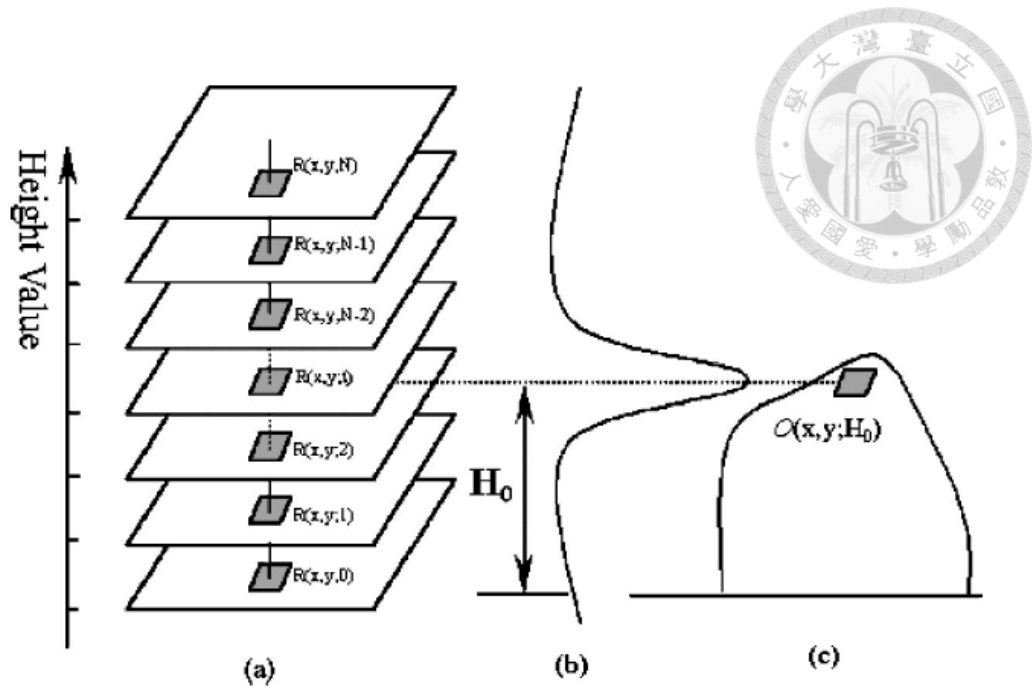


圖 2-9 Dai 等人之演算法(a)隨深度改變之光斑資料庫;(b)理想之相關係數與深度圖;(c)物件上的模板之高度極為相關係數最高之值;

(2) Dekiff 等人所提出之利用數位影像辨識提取物件之三維資訊法[11]:

本文獻使用雷射光經過繞射元件投影光斑於待測物之上，藉由計算可能的光斑圖案的變形量，提高可辨認的光斑資訊；本文亦對不同之系統參數進行分析，包括光源與 CCD 之角度以及亮度之影響，並分析影像辨識模板與使用濾波器於不同大小模板對辨認的幫助，找出提取三維資訊的最佳參數，最後使用彩色 CCD 將色彩資訊與深度資訊進行結合，得到深度與色彩之資訊，結果如圖 2-10 所示。

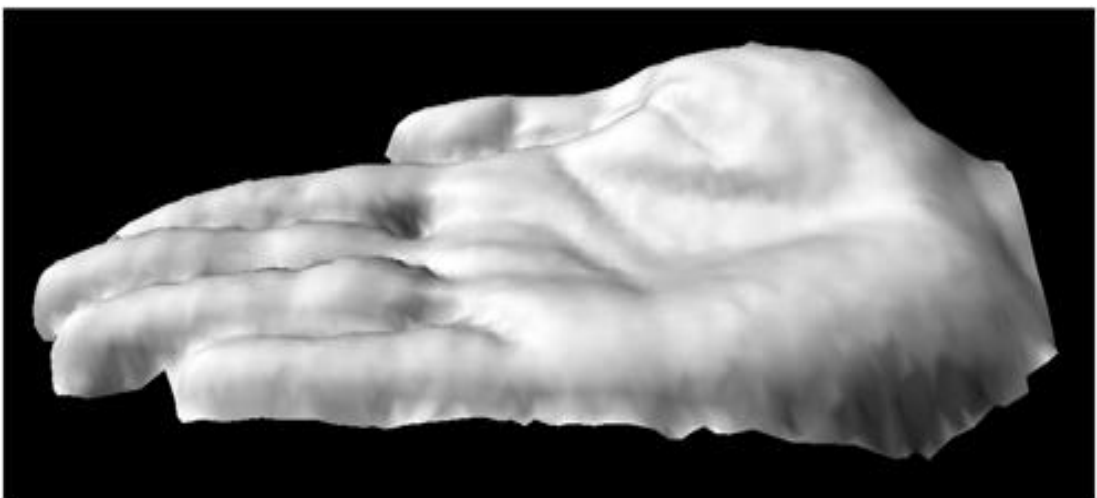


圖 2-10 Dekiff 等人之量測結果

(3) Estela 等人以電子散般干涉技術進行物體量測[12]：

此文獻利用電子散般干涉裝置(ESPI)，對所量測之物體進行干涉，透過光程差判斷待測物的距離，此方法利用斑紋的深度編碼進行量測，此方法無須深度掃描，但使用此方法會受物體的表面反射率所影響造成精度不佳之問題。

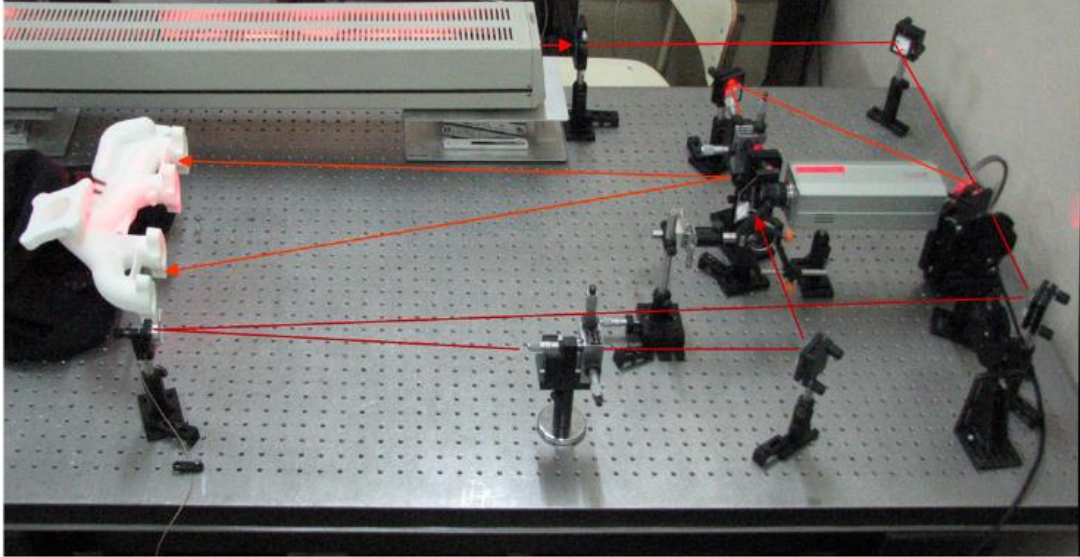


圖 2-11 Estela 等人之系統架構

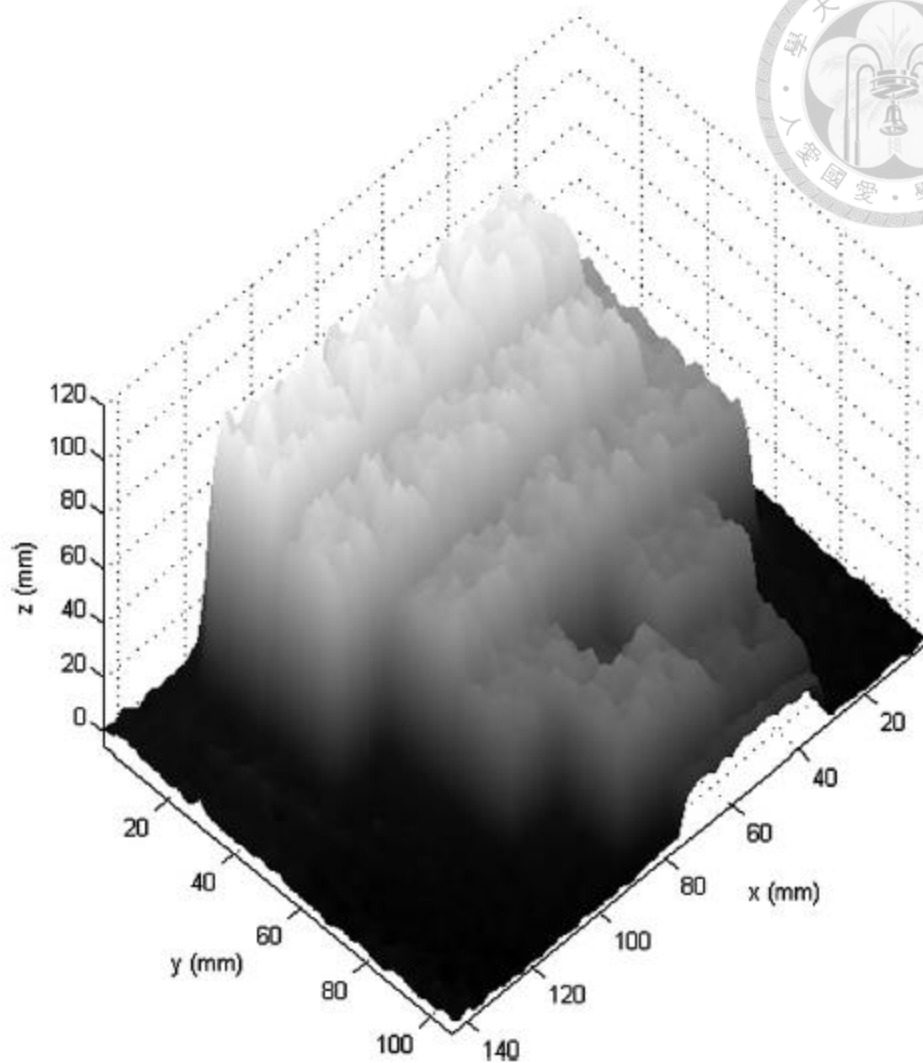


圖 2-12 Estela 等人之量測結果

## 2.4 解決階高限制之量測法

一般相移術之量測乃是利用基準面與物件之相位差來進行量測，相位差之計算乃是藉由計算條紋彼此之差異量所得到，然而由於條紋的相似性，因此在不連續位置上的相位計算是相當困難的容易因此造成量測上的誤差，唯有當不連續位置的相位差距在小於 $\pm\pi$ 時才可進行計算，此為相移法之階高限制，由於此限制的存在造成量測時量測物件的侷限以及量測誤差的增加，以下之文獻乃是改良相移法解決階高限制問題。

### 2.4.1 解決相位模糊之量測法文獻

(1) Mitsuo Takeda 等人之多頻傅立葉輪廓術[13]:

本文獻利用投影一張含有不同週期與角度之條紋光於待測物之上(如圖 2-13)，藉由條紋之角度來分離不同頻率之條紋光，藉由不同頻率之條紋光來提高量測不連續物件時所產生之階高限制，此法有著單張取像、計算速度快之優點；缺點為相位誤差大、對於階高限制的提高量取決於條紋的頻率。

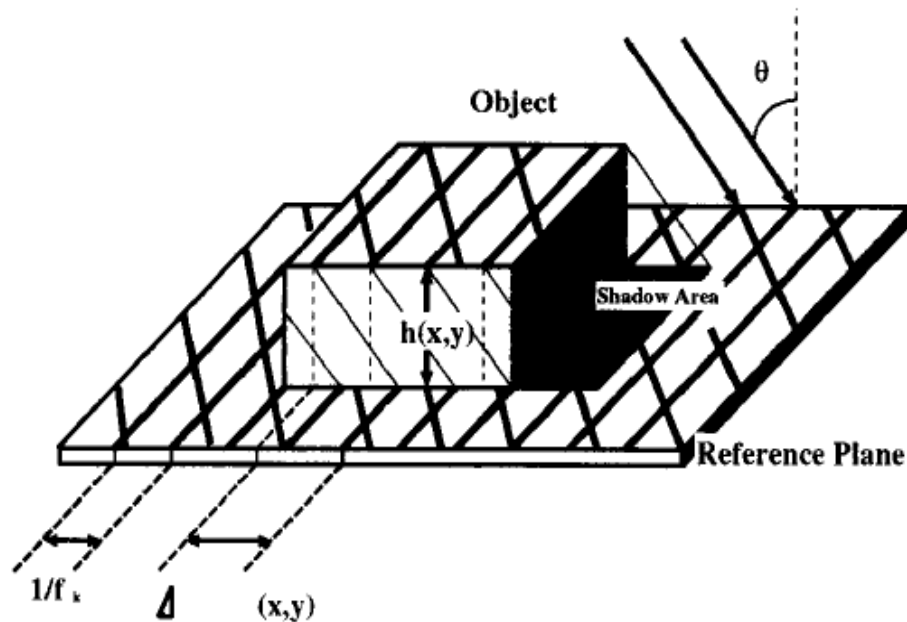


圖 2-13 Takeda 等人之多頻傅立葉輪廓術

(2) Rui 等人之藉由相機幾何之絕對相位量測[14]:

本文獻投影條紋結構光於待測物之上並利用多個 CCD 進行取像，藉由計算 CCD 之間的幾何關係，判斷條紋之可能移動相位並找出最適值，如圖 2-14 所示；藉由此判斷來解決因不連續物件量測時所可能產生之階高限制，此法優點在於系統架構簡單、可得到絕對相位；缺點在於當條紋之頻率較小時，容易產生判斷錯誤之情形，因此對於使用的條紋頻率有一定限制。

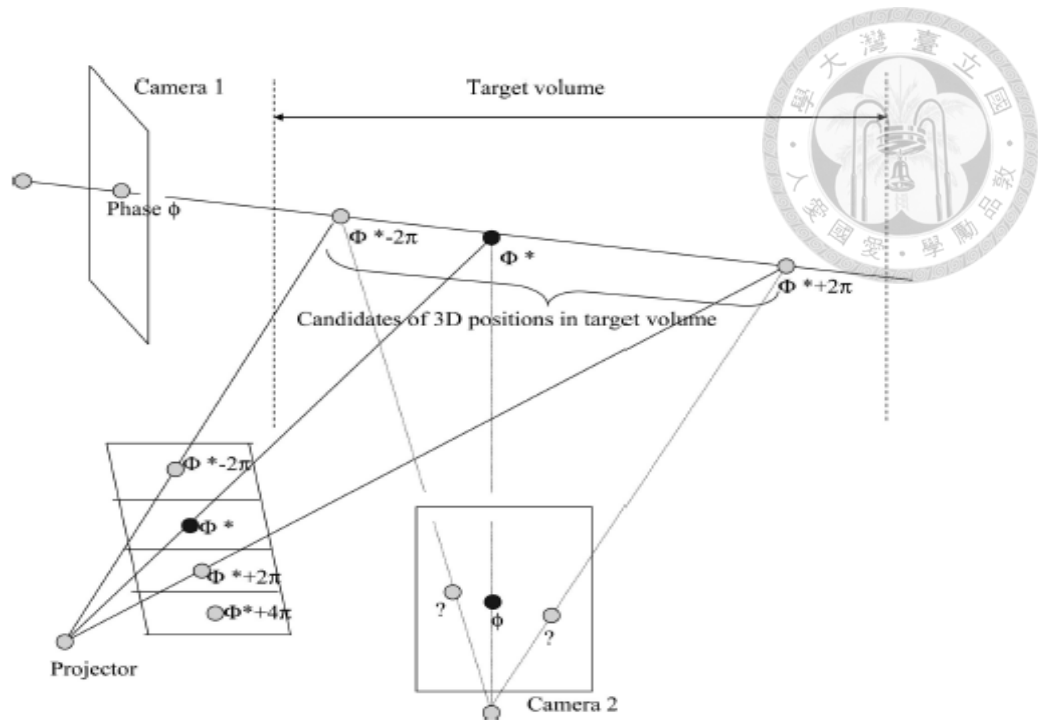


圖 2-14 多相機之絕對相位判斷

(3) Tian 與 Peng 所提出之多感應機制之三維視覺[15]:

此文獻使用投影機投影條紋光與點陣列光於待測物上，如圖 2-13；藉由點陣列計算解析度較差之高度資訊，再將此資訊轉換為相位作為參照，結合傅立葉輪廓術量測之結果進行比對，藉由比對將不連續高度所產生之相位錯誤進行判斷與補償，由此可以得到可量測階高之量測法，此方法之演算法簡單且不須投影多張編碼即可得到正確之相位資訊。

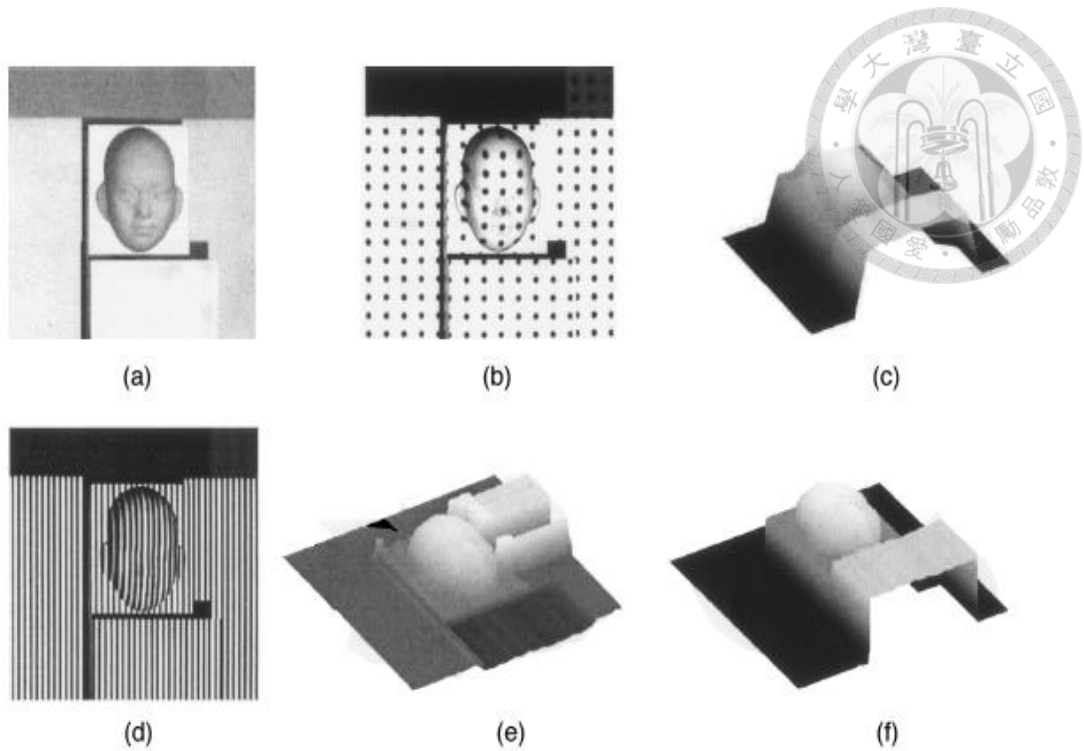


圖 2-15 多感應機制之三維視覺(a)含有不連續點之物件;(b)點陣列光;(c)點光源量測解析較差之資訊;(d)條紋光;(e)傅立葉輪廓術量測相位誤差之資訊;(f)比較與補償之結果;

## 2.5 相位轉換高度校正

傳統之相移術多使用遠心鏡頭以確保成像不會受到物體的高度影響，然而在許多使用上，投影或是接收無法使用遠心鏡頭，造成條紋的成像會受物體的高度而變化，此時的相位轉換高度無法再如以往單純使用  $K$  值進行轉換，故 Zhou[16]等人利用幾何關係式對相位轉換進行修改，利用建立每一點的對照表進行相位與高度轉換的對照。

以下之文獻乃是利用各種不同的相位與高度比對方式進行相位轉換之研究文獻。

### 2.5.1 相位與高度轉換之文獻

- (1) Guo 等人利用最小平方法對不同次方的相位與高度關係式之誤差分析 [17]：

Guo 利用不同指數的關係式進行擬合測試，並利用不同高度的平面量測相位與高度進行驗證，比較不同指數的擬合函式之間的誤差量，由此可以找出最適合的高度與相位轉換函式，並由此減少誤差。

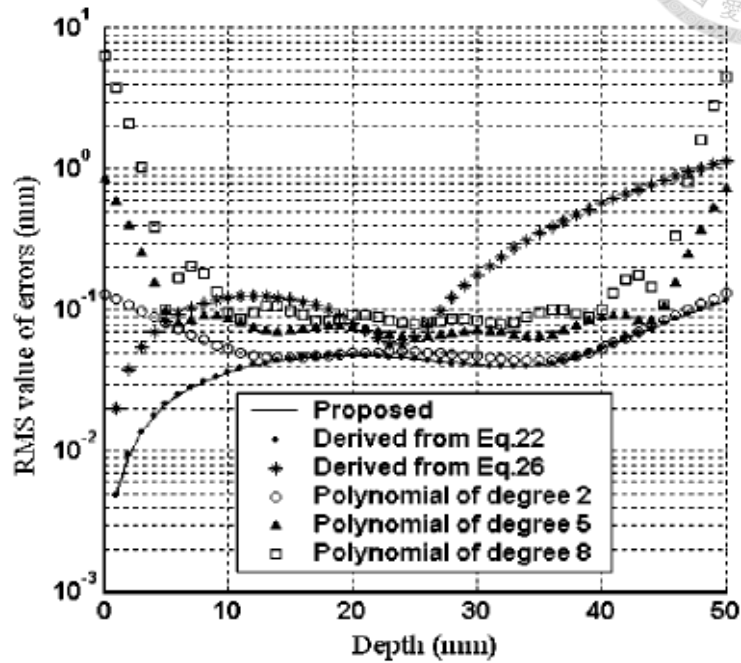


圖 2-16 Guo 等人所做之不同指數之函式的誤差分析

(2) Paulo 等人提出一種利用移動標準面進行校正的方式[18]：

Paulo 等人使用一可移動之標準平面並用於校正相位與高度之轉換函式，利用此標準面可進行不同函式，除此之外並加入 CCD 與投影機之角度關係，使相位轉換能更準確地對不同位置的像素有更準確的結果，此文獻亦加入使用不同指數模擬之校正函數與量測結果進行誤差分析與比較，並找出最適合之校正函式。

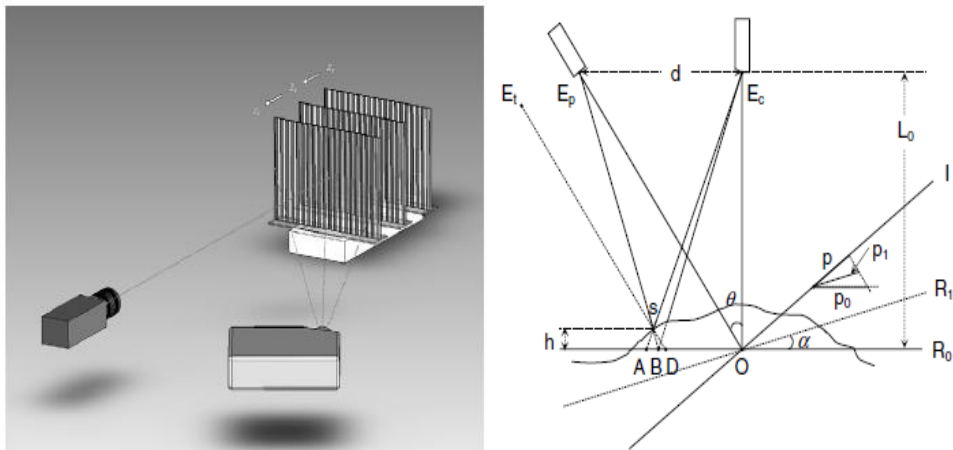


圖 2-17 Paulo 等人之(a)校正系統;(b)對不同位置像素之相位轉換公式修正;  
 (3) Su 等人所提出之相移術之相位與高度轉換校正[19]：

Su 等人利用自行設計之高度校正快進行相位與高度的校正，同時利用此校正快進行水平解析的校正，由此來提高系統的水平以及軸向之準確度，並縮短校正系統之時間。

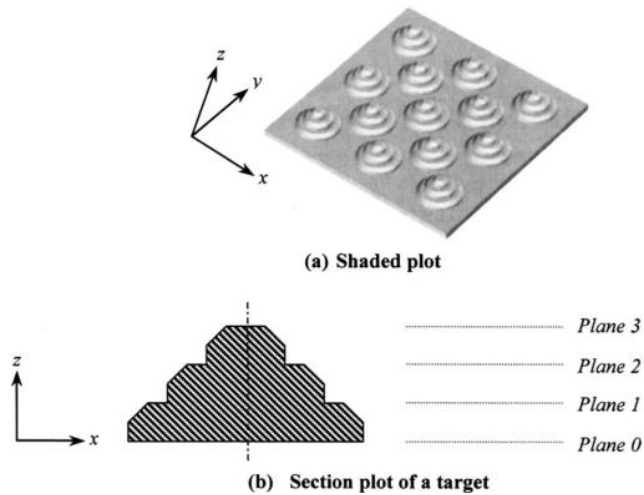


圖 2-18 Su 等人所設計之校正塊

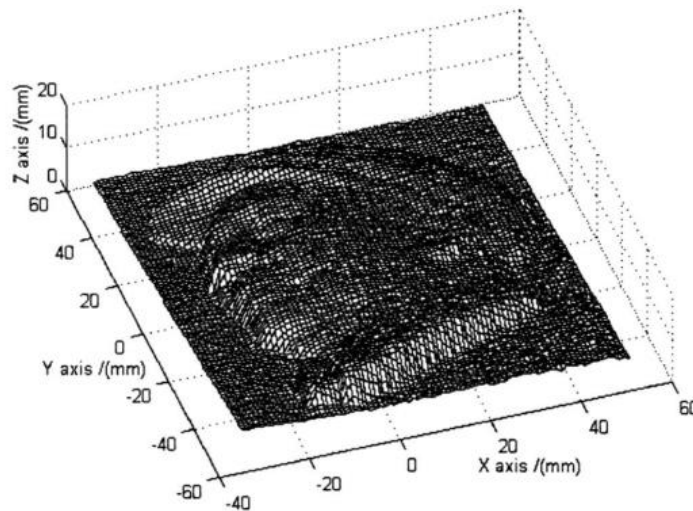


圖 2-19 Su 等人之量測結果

## 2.6 文獻分析與總結

根據本對於不同研究所進行之三維形貌量測技術之開法與研究文獻中，可以歸納出以下幾種演算法之優缺點，如表格 2-1 所示：



表格 2-1 各種三維輪廓量測法之比較

| 三維形貌量測技術    | 演算法則   | 優點                                        | 缺點                                         |
|-------------|--------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 相移術         | 傳統相移法  | 以相位進行量測，可使用傳統 3 步或多步相移術，步數越多則取得資訊越多，精度較高。 | 投影多張條紋造成量測速度無法提升，有階高限制之存在。                 |
|             | 同步向移法  | 只需擷取單張影像即可得到物體之相位資訊。                      | 色彩三原色之頻譜會相互耦合，而待測物之顏色資訊也容易影響還原結果，有階高限制之存在。 |
| 傅立葉輪廓術      | 傅立葉轉換法 | 單張取像即可得到動態三維資訊。                           | 帶通濾波位置取得不易，相位誤差較大，有階高限制之存在。                |
| 光斑數位影像辨識量測法 | 數位影像辨識 | 單張取像即可得到動態三維資訊。                           | 演算法較複雜，深度解析度較差。                            |

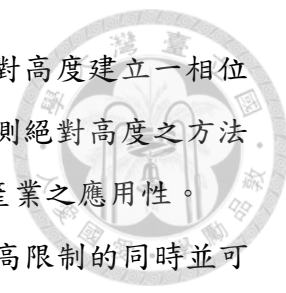
|            |                   |                                |                         |
|------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 編碼法        | 自行定義之結構光法         | 設計編碼不須有週期性，量測範圍較廣，具有獨特性。       | 量測時間較長，若編碼長度不夠容易造成量測誤差。 |
| 解決階高限制之量測法 | 相移法或傅立葉輪廓術配合自訂演算法 | 具有相移法或傅立葉輪廓術之較高解析度，同時不受階高限制影響。 | 系統架構與演算法較複雜。            |

傳統之相移術之優點在於高精度以及高深度解析，因此在工業上的應用相當廣泛，但是由於相移術需投影多張不同相位之條紋，因此造成了量測速度的下降，同時相移術於不連續點所產生之相位誤差造成了相移術的應用有著侷限性。

而傅立葉輪廓術則是為了解決相移術量測速度不佳的問題，藉由擷取一張條紋影像並將之轉換至頻率域即可獲得相位資訊，但是此法所得到之結果誤差較大，精度不如相移術，同時也有著不連續點所產生之相位誤差，因此應用較少。

而傳統上解決此階高限制之方法乃是配合編碼法與相移法或式使用多種不同週期之條紋進行階高限制之排除，此法的確可以解決階高限制的存在，然而此種方法之缺點在於需投影更多結構光於待測物之上，造成量測之速度大幅下降。

由以上之比較結果可以發現，傳統相移法與具有高精度、高解析度之優點，但是由於量測速度以及階高限制造成應用上的侷限性，編碼法也有著量測速度上的問題，而光斑數位影像辨識量測法雖然可應用範圍大，但是由於精度以及解析度不佳，對於光學檢測之應用性不佳。而解決階高限制之量測法可以保留相移術或是傅立葉輪廓術的精度及解析度，卻又不會受到階高限制的影響，可以提高產業之應用性。



為了解決階高限制並同時不影響量測速度，藉由一絕對高度建立一相位導引，即可將階高限制進行排除，同時可以選擇一快速量測絕對高度之方法進行配合，減少因解決階高限制所造成之多張投影，提高產業之應用性。本研究結合光斑數位影像辨識量測法與條紋投影，解決階高限制的同時並可引入光斑數位影像辨識量測法之絕對高度，避免量測時基準面的需求，增加應用性並提高量測結果之可靠度；本系統亦可選擇使用傅立葉輪廓數來達成單次投影之取像，以達到提高量測速度之結果。

## Chapter 3 系統量測原理與技術



### 3.1 研究原理之介紹

以往之相移法與傅立葉輪廓術在量測不連續物件時，容易產生相為錯誤，除此之外，由於相移法與傅立葉輪廓術皆為相對量測，故需要基準面的存在才能進行絕對高度計算，這些問題皆是造成相移法與傅立葉輪廓術應用上的侷限性。

目前可量測階高物件之量測方法主要為編碼法與光斑量測法，但是編碼法有著編碼長度的問題；光斑法則有著深度解析不足的問題，造成在光學檢測上的應用性有限，無法完全取代相移法或是傅立葉輪廓術。

本研究之主題在於結合光斑量測法與相移術，藉由光斑量測之絕對高度補償相移術因階高所產生之相位錯誤，同時利用相移術之高深度解析來提高絕對高度之解析度。系統利用雷射經過繞射元件投影雷射光斑，同時並利用不同波長之光源經過光柵投影週期性條紋光於待測物，在藉由兩個 CCD 進行取像，隨後進行計算高度資訊，由於兩個 CCD 為同時取像，固可避免環境之震動所造成之問題，減少量測上的誤差。

### 3.2 研究方法原理

#### 3.2.1 三維表面輪廓量測原理

本研究使用的是結合三角量測與相位量測法之技術，當系統取得相位資訊  $\phi(x,y)$  後，由三角量測法所建立之相位差與深度之間的關係進行轉換，其架構示意圖如圖 3-1 所示：

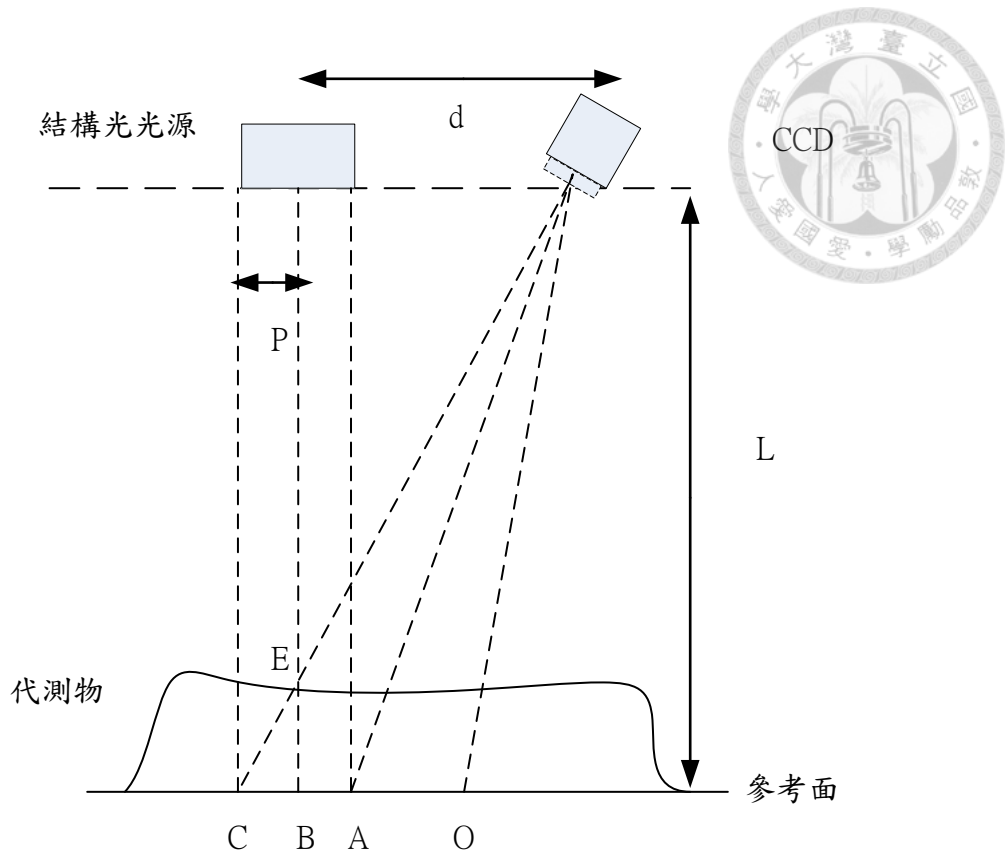


圖 3-1 三角量測法示意圖

首先相機與參考面之間的距離為  $L$ ，相機與投影機之間的距離為  $d$ ， $E$  點為待測物體上之一點，再參考面上有點  $o$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 。當結構光投影至待測物表面時，假設  $o$  點的相位值為零，根據三角形的相似關係可得到：

$$\frac{\overline{BC}}{d} = \frac{\overline{BE}}{L - \overline{BE}} \quad (3.1)$$

其中  $B$  點的相位值為  $\phi_B$ ， $C$  點相位值為  $\phi_C$ ，條紋之空間頻率為  $f$ ， $\overline{BE}$  為物體高度  $h$ ，則  $B$  點與原點  $o$  的距離可表示為：

$$\overline{OB} = \left(\frac{\phi_B}{2\pi}\right) \times \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

$C$  點與原點  $O$  的距離可表示為：

$$\overline{OC} = \left(\frac{\phi_C}{2\pi}\right) \times \frac{1}{f}$$

$$\overline{BC} = \overline{OC} - \overline{OB} = (\phi_C - \phi_B) / 2\pi f \quad (3.3)$$

由於  $C$  點與  $E$  點為相同入射之光源，所以  $\phi_C$  與  $\phi_E$  相等，式 (3.3) 改寫為：

$$(\phi_C - \phi_B) / 2\pi f = (\phi_E - \phi_B) / 2\pi f = \phi_{BE} / 2\pi f \quad (3.4)$$



其中  $\phi_{BE}$  為  $\phi_B$  與  $\phi_E$  之相位差。將式(3.4)代入式(3.1):

$$\phi_{BE} / 2\pi f = \frac{h}{L-h} \quad (3.5)$$

經過移項整理後可得式(3.6):

$$h(x, y) = \frac{\square\phi(x, y) \times L}{[2\pi \times d + \square\phi(x, y)] * f} \quad (3.6)$$

其中  $\square\phi(x, y)$  代表  $\phi_{CE}$ ， $h(x, y)$  代表  $\overline{BE}$ 。

以往在進行量測時，吾人可以假定  $L \gg h$ ，或是利用遠心鏡頭，藉由此方法可以將式(3.5)進行改寫：

$$\frac{\phi_{CE}}{2\pi df} = \frac{h}{L} \quad (3.7)$$

其中由於  $L$ 、 $2\pi d$ 、 $f$  為定值，故式(3.7)可以改寫為：

$$\phi_{CE} * K = h \quad (3.8)$$

其中  $K$  為一系統常數，由此可以進行相位與高度之換算。

### 3.2.2 光斑法量測原理

此節將介紹光斑量測法的原理；首先建立一連串於不同高度的標準面光斑影像資料庫，當進行量測時，將欲量測的物件光斑影像擷取之後，把此物間光斑影像切割成  $N*N$  的模板，此模板之像素可表示為  $T(x, y, p, q, H)$ ，其中  $x, y$  為此模板在光斑影像的位置， $p, q$  為此像素在模板的像素位置， $H$  為物件之高度；而標準面的像素可表示為  $R(x, y, p, q, t)$ ，其中  $x, y$  為此模板在光斑影像的位置， $p, q$  為此像素在模板的像素位置， $t$  為此一系列表準面的編號，此系列之標準面之高度差為定值  $\Delta h$ ，本研究之  $\Delta h$  為 1 mm；考慮將  $T(x, y, p, q)$  與  $R(x, y, p, q, t)$  進行比對，由數位影像辨識理論比較一系列同一位置標準面的模板我們可以得到相關係數  $C(x, y)$ ：

$$C(x, y) = \frac{\sum_{x, y} T(x, y, H) * R(x, y, t)}{\sqrt{\sum_{x, y} T(x, y, H)^2 \sum_{x, y} R(x, y, t)^2}} \quad (3.9)$$

當  $C(x, y)$  有最大值時，即是物件之高度與標準面  $t$  之高度為最接近值；故可得到物件之高度值：

$$H(x, y) = t(x, y) * h \quad (3.10)$$

量測之相關係數與高度資料庫之示意圖如下所示：

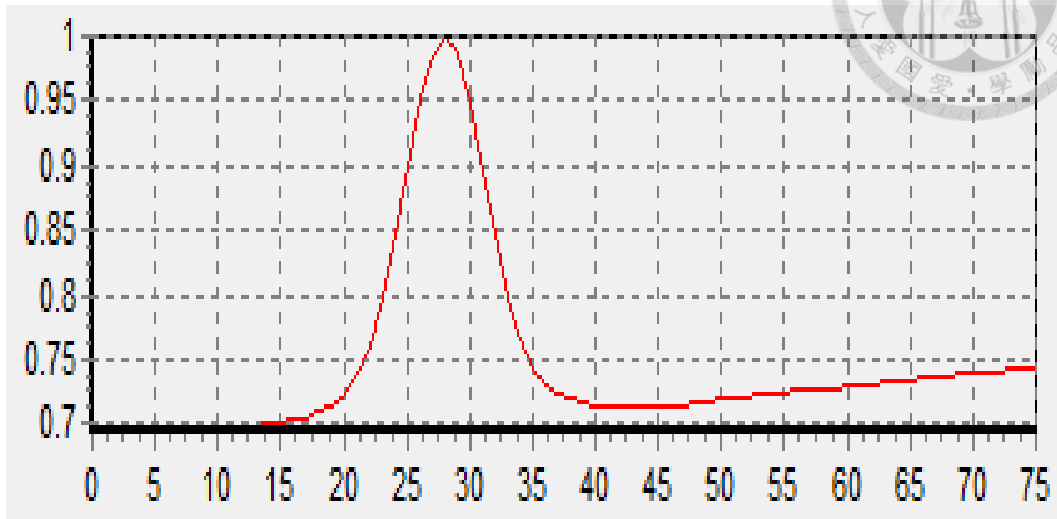


圖 3-2 相關係數與資料庫比對之結果，縱軸為相關係數，橫軸為資料庫之高度

為提高量測時之深度解析，吾人亦使用內插法來提高量測之深度解析，因為實際量測上所算出之相關係數，不一定能得到最佳解，深度內差的計算過程如下所示：

$$\Delta z = \frac{1}{2} \frac{\gamma(z-1) - \gamma(z+1)}{\gamma(z+1) + \gamma(z-1) - 2\gamma(z)} \quad (3.11)$$

透過上式即可內插出更精細之深度。

### 3.2.3 傅立葉輪廓術原理

此節將介紹離散傅立葉轉換(discrete Fourier transform,DFT)，一般傅立葉中之取樣限頻從 $-\infty \sim \infty$ 的連續週期性函數，實際上，我們所處裡的乃是有限取樣點，因此傅立葉的轉換可為：

$$F(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi\mu t} dt \quad (3.12)$$

其中  $f(t)$  表示為經取樣的函數

$$f(t) = f(t) S_{\square T}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - n \square T) \quad (3.13)$$

將式(3.12)改寫為:

$$F(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi\mu t} dt \quad (3.14)$$



$$\begin{aligned}
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - nT) e^{-i2\pi\mu t} dt \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - nT) e^{-i2\pi\mu t} dt \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{-i2\pi\mu nT}
 \end{aligned}$$

此時 $f_n$ 可以定義為離散函數，但是為無窮的週期函數，因此接下來需假設 $\mu=0$ 到 $\mu=1/\Delta T$ 的範圍並取 $M$ 個等間隔取樣。此時可以利用下列式子定義；

$$\mu = \frac{m}{M\Delta T} \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3.15)$$

將 $\mu$ 代入(3.13)式中，並令 $F_m$ 表示之：

$$F_m = \sum_{n=0}^{M-1} f_n e^{-i2\pi mn/M} \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3.16)$$

由以上說明可以清楚地得到離散傅立葉轉換的通式，假設是二維離散傅立葉轉換時，只需將變數增加為兩個，在經過以上過程轉換後便可以得到二維離散傅立葉轉換式子：

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi \left( \frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)} \quad (3.17)$$

其中 $f(x, y)$ 是大小為 $M \times N$ 的影像。此時和一維情況一樣，範圍是 $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 和 $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

在對影像作頻率域分析時，不單單只是將資訊利用傅立葉轉換至頻率域即可，也需要將資訊反向轉換回空間域這樣才能達到我們的目的；因此將 $F_m$ 轉換的方法可以用反離散傅立葉轉換(inverse discrete Fourier transform, IDFT)來取回 $f_n$ ：

$$f_n = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} F_m e^{i2\pi mn/M} \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3.18)$$

我們可以將上式套用於二維函式中：

$$f_n = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} F_m e^{i2\pi mn/M} \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3.19)$$

此時和一維情況一樣，範圍是 $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 和 $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。





### 3.2.4 相移術原理

當系統投影條紋結構光於待測物上之條紋之光強分佈可以表示為:

$$I(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\phi(x, y) + \delta(t)] \quad (3.20)$$

此時 $(x, y)$ 為影像的像素位置、 $I'$ 為背景光強、 $I''$ 為條紋光之正弦分佈光強、 $t$ 為條紋時域、 $\phi(x, y)$ 為相位分佈、 $\delta(t)$ 為相位變化量，在不同時間  $t$  下所產生之相位變化是由相移次數所決定，相位變化  $\beta$  可以表示為  $\beta=2\pi/N$ ， $N$  為總相移之次數，而此時在每次擷取的光強變化可以表示為：

$$I_n(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\phi(x, y) + n\beta] \quad (3.21)$$

此時 $I_n(x, y, t)$ 為在相移之後的光強分佈，此時我們有三個未知數需要求解，分別為  $I'$ 、 $I''$ 、及  $\phi(x, y)$ ，因此我們需要至少三步相移來進行求解的動作，我們系統採用五步相移，藉由最小平方法可以求解此方程式：

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2(I_4 - I_2)}{2I_3 - I_1 - I_5}\right) \quad (3.22)$$

此時 $\phi$ 為條紋之相位。

### 3.2.5 相位重建理論

當使用傅立葉轉換或是三步相移術時，我們皆使用取得的條紋相位資訊來進行形貌重建，但是當我們使用  $\tan^{-1}$  來求解相位時，在數學上  $\tan^{-1}$  範圍皆是在  $-\frac{\pi}{2}$  到  $\frac{\pi}{2}$  之間，考慮我們所需之相位資訊為  $0$  到  $2\pi$  之間，故我們須利用以下定義來進行排列：

下定義來進行排列：

$$\phi(x, y) = \begin{cases} \phi(x, y) & \text{for } I_1 - I_3 > 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 > 0 \\ \phi(x, y) + \pi & \text{for } I_1 - I_3 > 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 < 0 \\ \phi(x, y) + 2\pi & \text{for } I_1 - I_3 < 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 > 0 \\ \phi(x, y) + \pi & \text{for } I_1 - I_3 < 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 < 0 \\ 0 & \text{for } I_1 - I_3 = 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 > 0 \\ \pi & \text{for } I_1 - I_3 = 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{for } I_1 - I_3 > 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 = 0 \\ \frac{3\pi}{2} & \text{for } I_1 - I_3 < 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 = 0 \\ 0 & \text{for } I_1 - I_3 = 0 \text{ and } 2I_2 - I_1 - I_3 = 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

藉由以上的相位封裝(Phase wrapping)判別方式可將相位資訊轉換為  $0$  到  $2\pi$  的不連續訊息。結果如圖 3-3 所示：

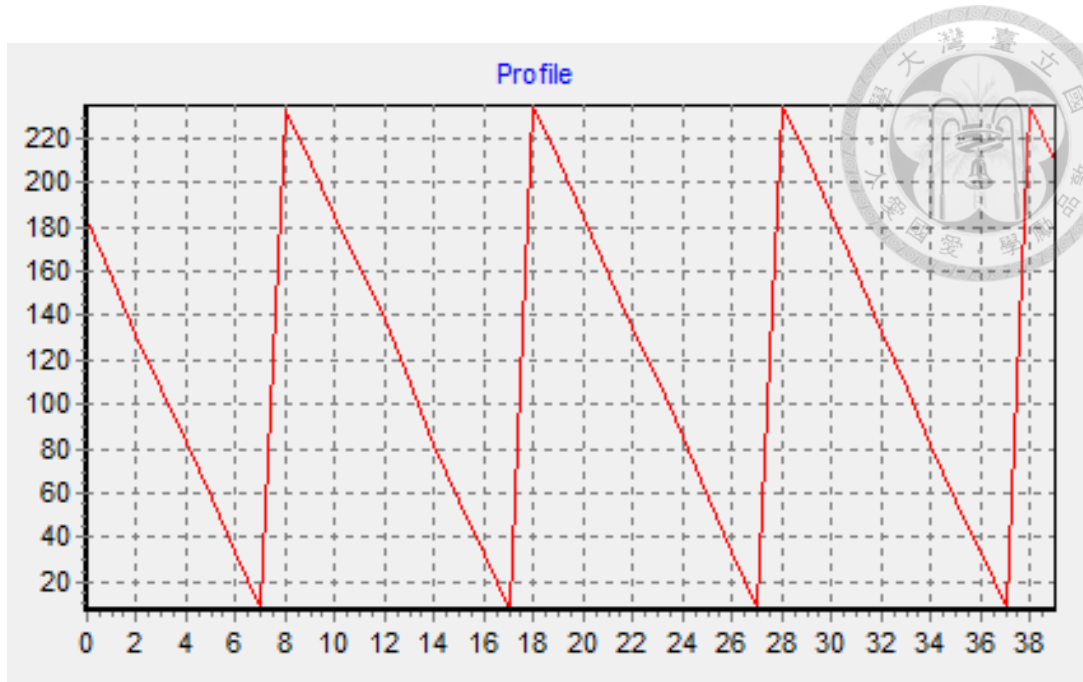


圖 3-3 相位封裝結果剖線圖

圖中之橫軸為像素位置，縱軸為灰階值。

傅立葉輪廓術以及相移術皆是求取相位封裝資訊進行處理，然而實際上此資訊無法直接利用將之轉換為高度資訊，因為相位封裝乃是一不連續資訊，故無法直接求得物體的正確三維輪廓資訊，因此許多研究利用特定演算法將相位封裝資訊進行連結，由此即可將資訊進行高度轉換；本研究所採用的是 Goldstein's 演算法，此演算法的優點是當遇到陰影或是條紋資訊不足時，此演算法會避開缺陷繼續進行演算。這對於影像中因為陰影或是條紋資訊不足時有相當的效果，因此步驟可以將相位封裝之資訊展開，故又稱之為相位還原 (Phase unwrapping)，如圖 3-4 所示：

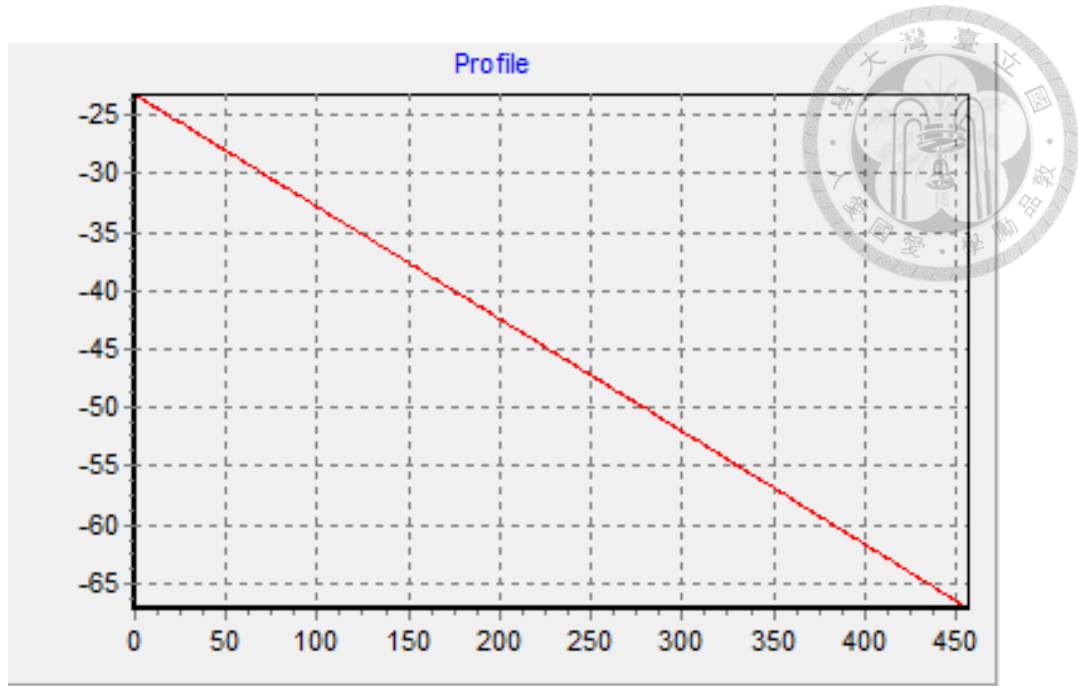


圖 3-4 相位還原剖線圖

圖中之橫軸為像素位置，縱軸為灰階值。

### 3.2.6 三維資訊高度補償原理

當遇到不連續點時，演算法無法判斷條紋的連結，因此會產生階高限制的存在，考慮已知一由光斑所計算之絕對高度  $H_s(x,y)$ ，其中  $x,y$  為像素在影像上的位置，代入式可以得到：

$$\frac{\phi_s}{2\pi d * f} = \frac{H_s}{L - H_s} \quad (3.24)$$

經移項可以得到絕對相位：

$$\phi_s = \frac{H_s * (2\pi * f * d)}{(L - H_s)} \quad (3.25)$$

此時藉由傅立葉輪廓術或是相移術所得到之相對相位為  $\phi_f(x,y)$ ，其中  $x,y$  為像素在影像上的位置，已知當不連續點出現時誤差為  $2\pi$  之倍數，故吾人可以假設當不連續點之真實相位為  $\phi_f(x,y) + 2N\pi$  其中  $N=0,1,2,3,\dots$  之整數， $x,y$  為像素在影像上的位置，故我們可以藉由絕對相位來計算相位誤差所需之補償量  $2N\pi$ ；

$$N = \text{MINT}\left[\frac{\phi_s(x,y) - \phi_f(x,y)}{2\pi}\right] \quad (3.26)$$



其中 MINT 為一將計算結果取整數之函式，N 為條紋的相位補償量來源，由此可以得到絕對與相對結合之真實相位：

$$\phi(x, y) = \phi_f(x, y) + 2N\pi \quad (3.27)$$

藉由補償後之相位轉換後可得到絕對與相對高度之結合 H：

$$H = \frac{(\phi_f(x, y) + 2N\pi) \times L}{2\pi * f * d + (\phi_f(x, y) + 2N\pi)} \quad (3.28)$$

其中 H 為所求之真實高度， $\phi_f(x, y) + 2N\pi$  為經過絕對高度補償相位，f 為投影條紋之頻率，相機與參考面之間的距離為 L，相機與投影機之間的距離為 d。

當  $\phi_s(x, y) - \phi_s(x + 1, y) > 2\pi$  時，此時絕對相位已到達邊界區域，為避免因受絕對相位之水平解析造成之補償錯誤，我們對此區域的補償結果進行交叉比對：

$$D = \phi(x, y) - \phi_s(x, y) \quad (3.29)$$

其中 D 為補償後之結果與絕對相位之誤差，當  $D > T$ ，T 為一閾值，代表此處不應使用此補償值，故將此處之相對相位  $\phi_f$  繼續與  $\phi_s(x + 1, y)$ ,  $\phi_s(x - 1, y)$ ,  $\phi_s(x, y + 1)$ ,  $\phi_s(x, y - 1)$  進行比對，直到找到誤差值最小之絕對相位處，並進行補償。

經過此演算法之補償，可以將不連續點所造成的相位誤差消除，對於缺少參考面條紋資訊的情況也可做出補償，將相對高度轉換為絕對高度；藉由此合成可以提高單純雷射光斑法的深度解析不足的問題，同時也可以解決傅立葉輪廓術對於階高的限制。

### 3.2.7 條紋頻率校正

以往文獻在進行相移術的相位與高度換算時，乃是使用式(3.6)並進行簡化，以往對於式(3.6)的簡化條件有以下兩項：當  $L \gg h$  時與使用遠心鏡頭使空間頻率之變化為定值。

考慮當系統之硬體鏡頭如果未使用遠心鏡頭或是由於量測範圍較大而  $L \gg h$  無法成立時，由於影像的放大縮小，造成空間頻率的變化，因為此變化的存在使的式(3.6)內的空間頻率不可視為定值，因此方程式須改為：

$$h(x, y) = \frac{\Delta\phi(x, y) * L}{f(H) * 2\pi * d + \Delta\phi(x, y)} \quad (3.30)$$

其中 f 為頻率之關係式，由相機之成像原理可以推測空間頻率乃是一與深度有關之線性關係式，藉由此關係式可以得到正確的空間頻率並由此提升精度，故吾人可以對在不同高度的空間頻率進行量測，找出空間頻率與高度之關係。其結果如圖 3-5：

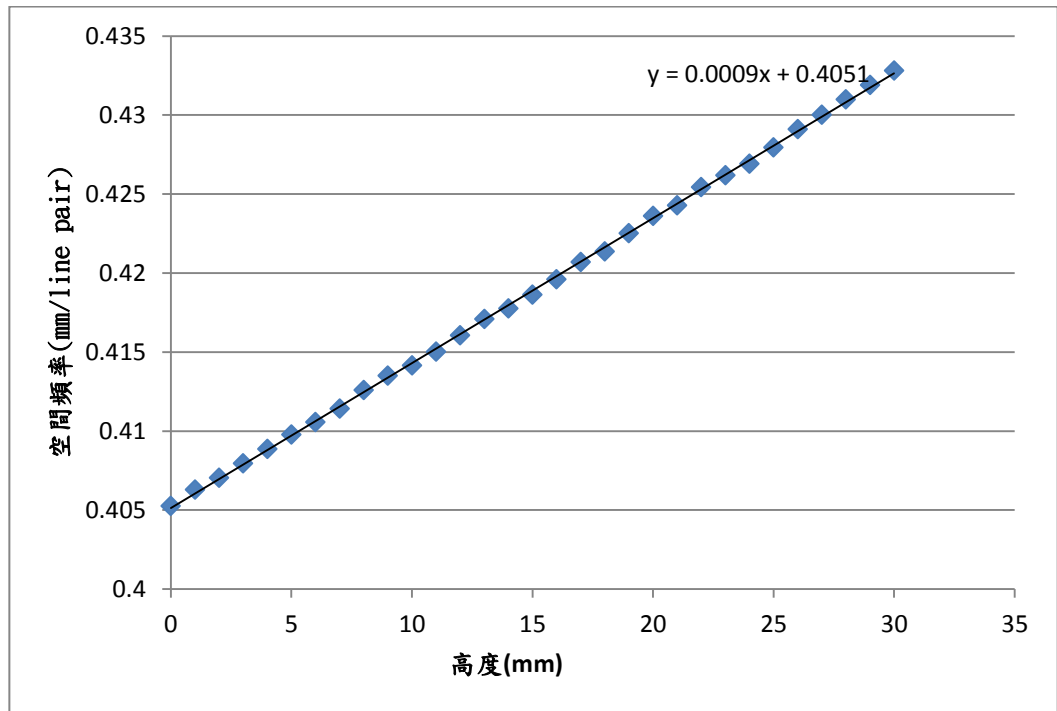


圖 3-5 空間頻率與高度變化圖

由圖中可以看出空間頻率與高度乃是一線性關係，故求得線性關係式後，吾人即可由此得到在不同高度所式合使用之空間頻率，由於我們有絕對高度之資訊  $H_s$  的存在，因此我們可以將此高度帶入線性關係式：

$$h(x, y) = \frac{\Delta\phi(x, y) * L}{[2\pi * d + \Delta\phi(x, y)]f(H_s)} \quad (3.31)$$

其中空間頻率之值乃是將絕對高度代入線性關係式所得到之空間頻率，由此可以減少因相機成像之空間頻率變化所成之誤差。

### 3.2.8 相機校正理論

相機校正乃是一對於將影像座標與空間座標連結一過程，藉由相機校正可以將影像與空間進行結合，在影像處理中乃是一相當重要之步驟，除此之外亦可得到三角法之所需參數，其對應方式如下圖所示：

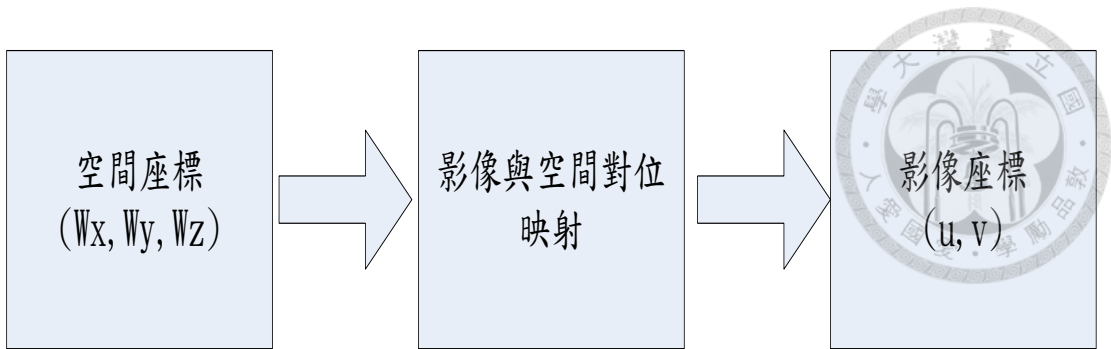


圖 3-6 相機校正流程

在尋找轉換關係的同時，我們可以定義相機的外部參數( $R_x, R_y, R_z, T_x, T_y, T_z$ )以及內部參數( $f_x, f_y, C_x, C_y$ )還有鏡頭畸變參數( $K_1, K_2$ )進行討論，藉由找出以上的參數可令我們得到影像與真實座標的關係式，圖 3-6 是座標系的示意圖，坐標系可以分為空間座標、影像座標以及相機座標，其中影像座標( $u, v$ )為二維座標，相機座標與空間座標為三維座標：

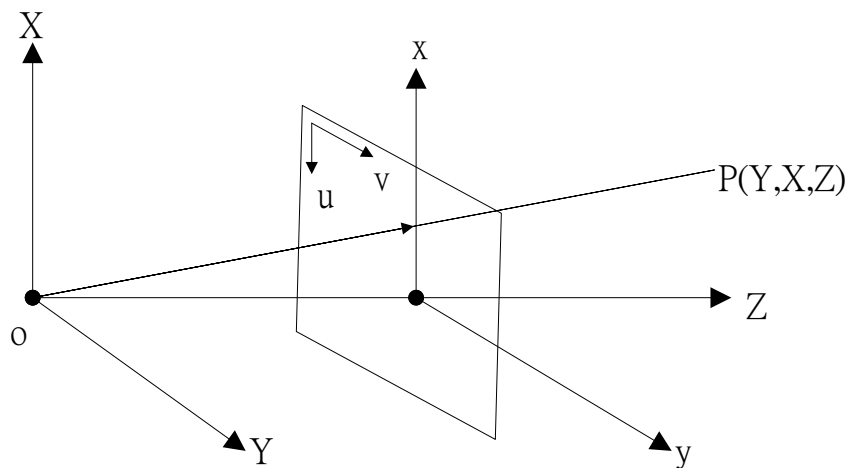


圖 3-7 坐標系表示圖

相機校正的外部參數乃是相機與空間座標的關係，其關係與相機的架設角度以及旋轉有關。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T \quad (3.32)$$

其中  $R$  矩陣為世界座標軸( $X_w, Y_w, Z_w$ )的旋轉矩陣、 $T$  為世界座標與相機座標的平移量，由以上之參數可以得到相機座標與空間座標的關係式

相機校正的內部參數乃是相機本身之特性，諸如焦距  $f$ 、光軸偏移量都屬於此參數。



$$X_u = f \frac{X}{Z} , X_v = f \frac{Y}{Z} \quad (3.33)$$

其中  $X_u$  與  $Y_v$  乃是相機的水平分量， $f$  為相機的焦距。

藉由式(3.27)我們即可得到相機座標與影像座標的關係式。

當座標系彼此的關係式確定後，吾人必須考慮因鏡頭設計時所造成的影像失真的情況，這種情況稱之為影像畸變，影像畸變大致上會產生桶型與枕型畸變較多，如圖 3-8 所示：

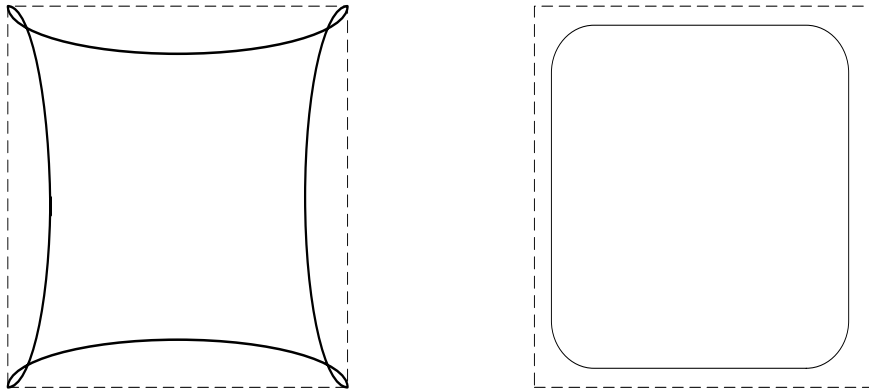


圖 3-8 相機畸變示意(a) 枕型畸變;(b)桶型畸變;

將上述的參數進行運算後，我們可以得到相機的校正步驟如下圖所示：

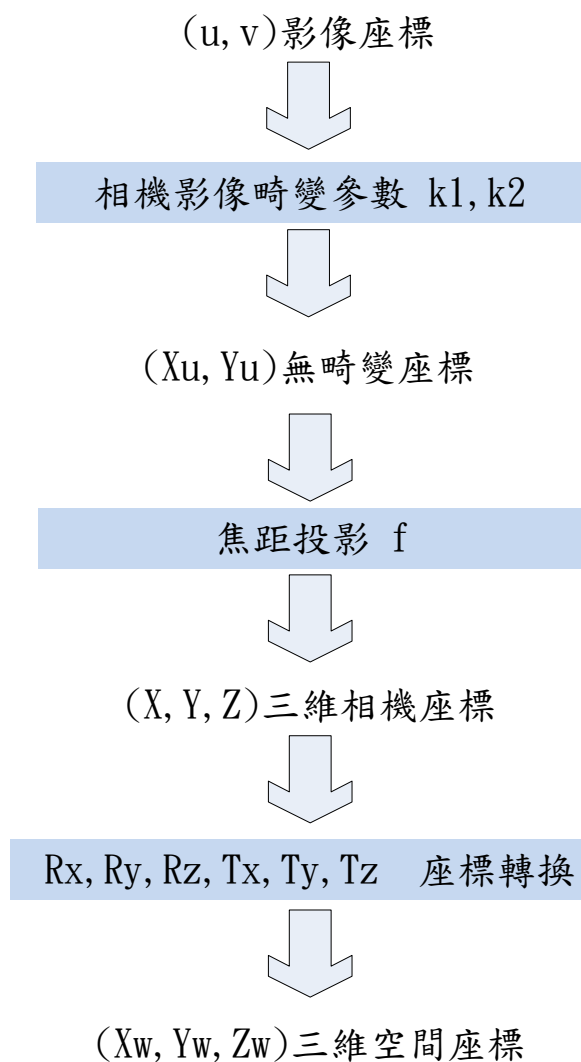


圖 3-9 校正流程圖

上圖呈現了相機校正的演算法流程，藉由相機校正的流程，我們可以將相機的影像座標與空間座標進行連結，使原本的影像座標轉換為三維空間座標。

校正時所使用之校正版乃是利用棋盤格來進行校正，棋盤格如下圖所示：



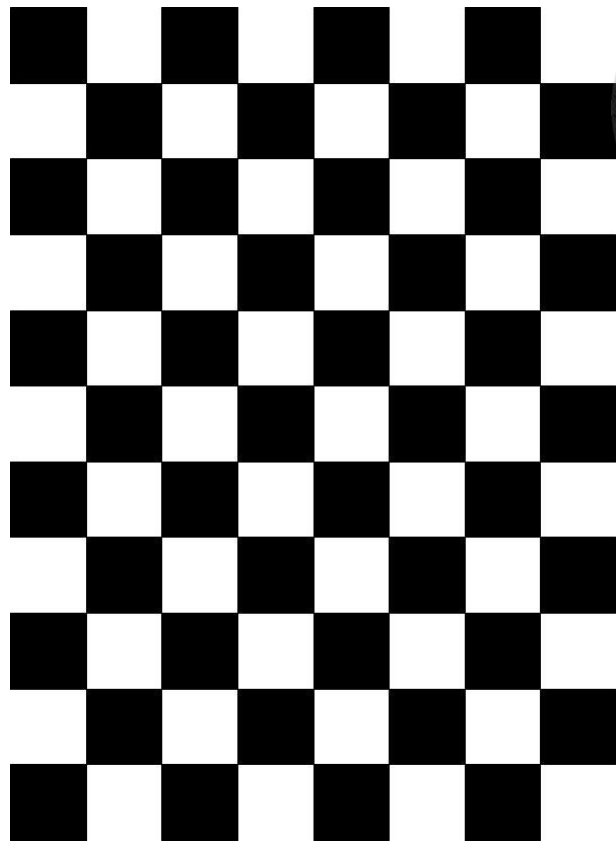


圖 3-10 影像校正用棋盤格

利用棋盤格之格點即可進行系統的鏡頭校正工作。



CCD 進行取像，CCD 前裝有濾波鏡分別過濾 785nm 與 850nm 之光，為使兩 CCD 取像之視野相同，故前方裝設一分光鏡確保兩 CCD 有相同之視野。

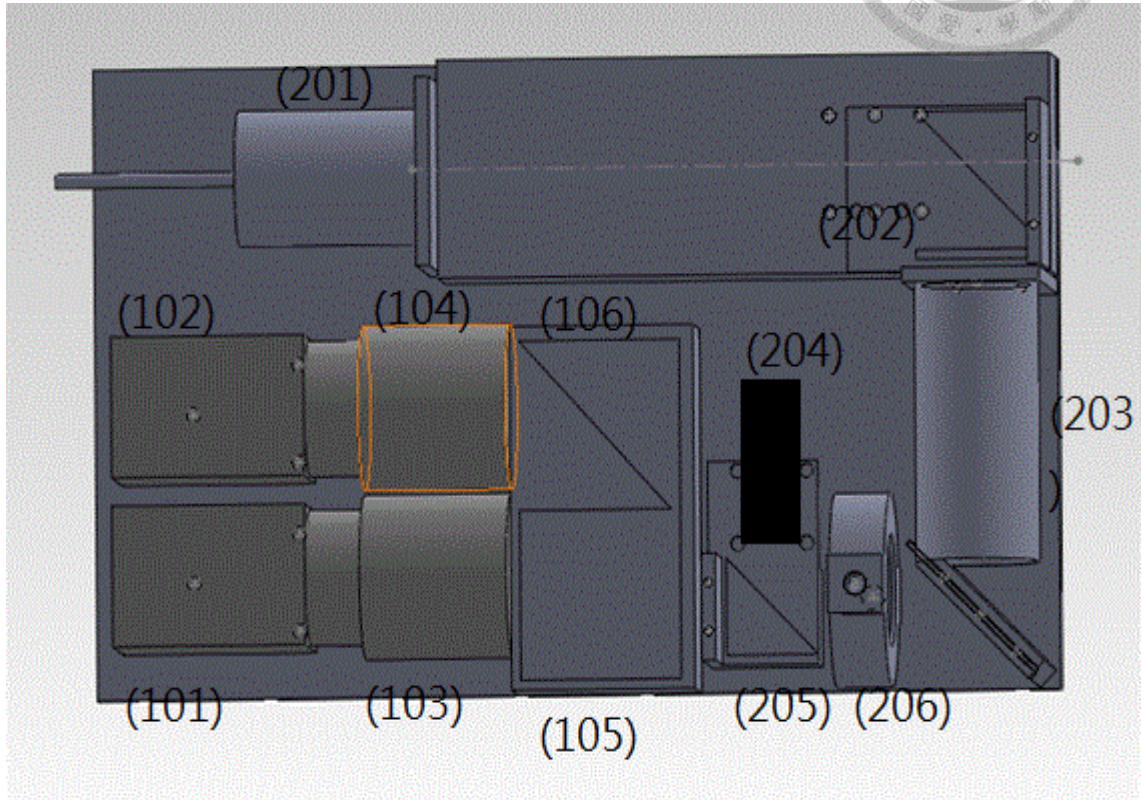


圖 4-2 系統設計圖細部

圖 4-2 為使用 Solid Works 3D 繪圖軟體，將其各硬體系統元件以真實大小，繪製於繪圖軟體中，並使用此軟體進行硬體系統架構之設計；其中(101)、(102)為光電耦合裝置 CCD，(103)與(104)為取像鏡頭，(105)為非偏極分光鏡，(106)為直角反射鏡，此部份為整體硬體架構之取像系統，(201)為條紋結構光投影光源，(202)為正弦條紋光柵，(203)為投影物鏡，(204)為雷射光斑之雷射光源，(205)為光學繞射元件，(206)為放大物鏡，(207)為非偏極分光鏡，此部份為整體硬體架構之投光系統部分。



圖 4-3 系統實際組裝圖

藉由此系統可同時投影光斑與條紋於待測物之上，並可同時取像，減少量測時間，搭配演算法可以得到一絕對與相對相位之複合量測。

## 4.2 硬體架構

### 4.2.1 影像擷取規格

系統擷取影像所使用的是感光耦合元件 CCD(charge-coupled device)，此唯一積體電路排列整齊的電容，藉由將接收到的光強訊號轉換為類比訊號。本系統採用的是兩台 Basler acA1300-60gmNIR；其實體圖如圖 4-4，規格如下：

表格 4-1 感光耦合元件規格表

|       |                        |
|-------|------------------------|
| 廠牌型號  | Basler acA1300-60gmNIR |
| 尺寸    | 42(L)x29(H)x29(W) mm   |
| 傳感器尺寸 | 1/1.8" inch            |
| 影像解析度 | 1280 px x 1024 px      |
| 彩色/黑白 | 黑白                     |



圖 4-4 acA1300-60gmNIR 實體圖

本系統使用之光源為近紅外光光源，故影像擷取系統所擷取之波長範圍須符合近紅外光區，此影像擷取系統之頻譜響應圖如下所示：

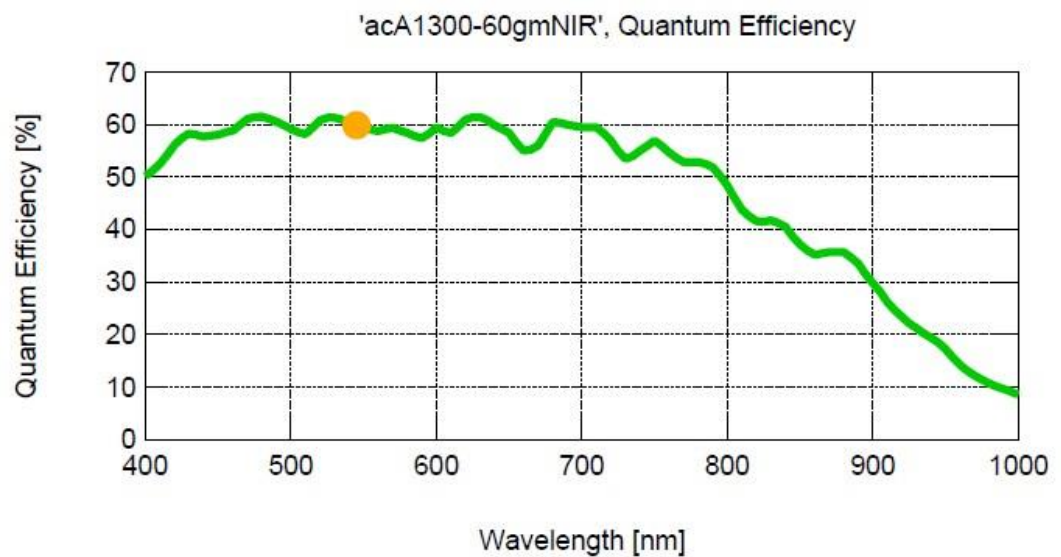


圖 4-5 影像擷取裝置光譜響應圖

除了 CCD 之外，我們所配合的鏡頭 LM12JCM 規格如下：

表格 4-2 鏡頭規格

|       |              |
|-------|--------------|
| 廠牌型號  | Kowa LM12JCM |
| 焦距    | 12 mm        |
| 最大光圈比 | 1.4          |
| 變焦控制  | Manual       |
| 光圈控制  | Manual       |
| 質量    | 75g          |



#### 4.2.2 近紅外線雷射二極體光源

本研究所使用之光斑投影光源是近紅外線雷射二極體(Near-Infrared Laser Diode)光源。此近紅外線雷射二極體波長為  $780\text{nm}\pm 5\text{nm}$ ，雷射功率為  $30\text{mW}$ ，元件尺寸為  $\phi 16\text{mm}\times 45\text{mm}$ 。電源部分為直流電 3 伏特。外觀尺寸規格如下圖所示：

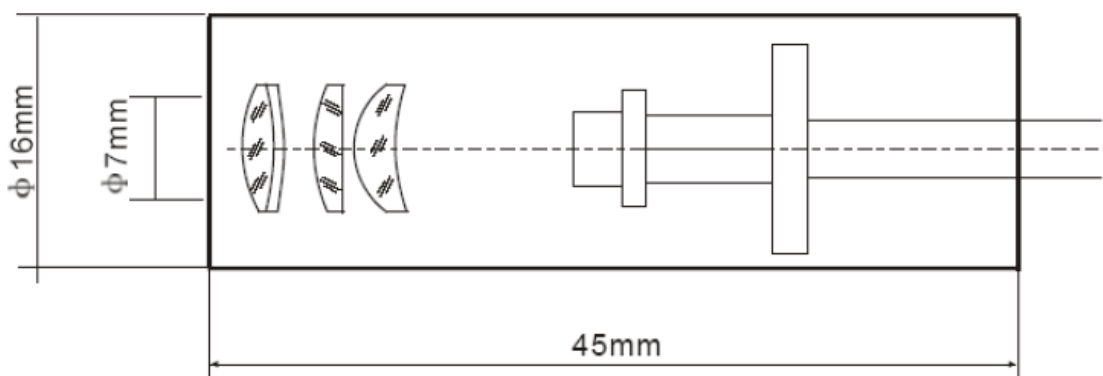


圖 4-6 近紅外線雷射二極體尺寸圖

#### 4.2.3 近紅外線 LED 光源

本研究投影條紋結構光之光源是使用發光二極體(Lighting-Emitting Diode, LED)光源。此光源之波長為  $850\text{nm}\pm 45\text{nm}$ ，功率為  $3\text{W}$ 。

#### 4.2.4 位移平台規格

為了移動光柵產生多步相移，我們須要一組位移平台移動光柵，這裡所選用的位移平台乃是 CONEX-MFACC 的位移平台，藉由位移平台移動光柵產生不同相位的條紋影像，位移平台的規格如下表：

表格 4-3 位移平台規格表

| 廠牌與型號  | CONEX-MFACC        |
|--------|--------------------|
| 行程     | 25 mm              |
| 最小移動距離 | $0.1\ \mu\text{m}$ |
| 重複精度   | $0.3\ \mu\text{m}$ |



圖 4-7 位移平台實體圖

#### 4.2.5 光學元件規格表

本研究所使用的光學元件包含反射鏡、分光鏡等等，光學元件將以表列的方式呈現，本研究所使用的光學元件規格如下表：

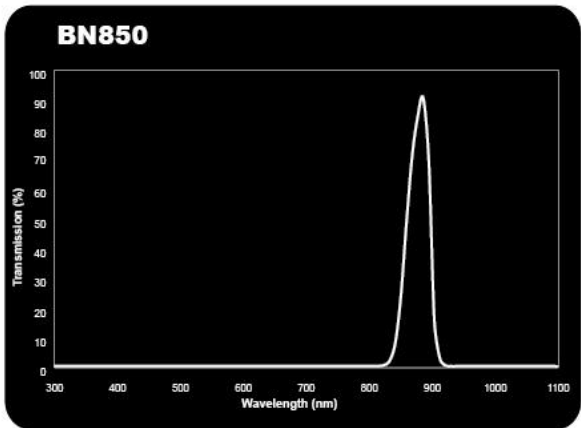
表格 4-4 光學元件規格表

| 名稱   | 型號               | 詳細規格                                                      |
|------|------------------|-----------------------------------------------------------|
| 正弦光柵 | SF-5.0-80-TM-G   | 大小:25mm*25mm<br>Frequency:5.0 c/mm                        |
| 分光鏡  | #47-572          | 大小:35mm*35mm<br>穿透率:45%                                   |
| 分色鏡  | FF801-Di02-25x36 | 大小:25.2mm*35.6mm<br>穿透區間:813.5-1100 nm<br>反射區間:450-790 nm |
| 擴散片  | #83-083          | 大小:10mm*10mm                                              |

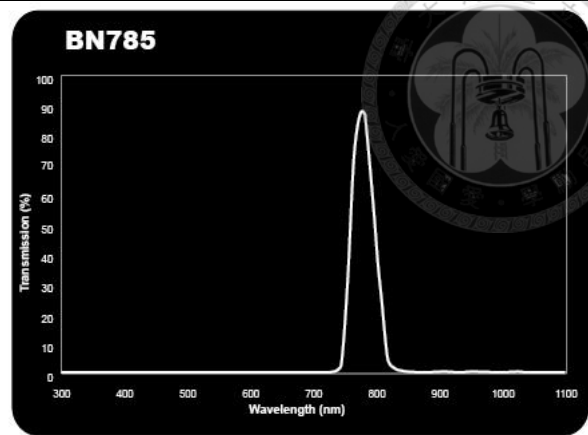


|       |         |                                         |
|-------|---------|-----------------------------------------|
| 透鏡陣列  | #64-476 | 大小:10mm*10mm<br>Pitch:300μm<br>擴散角:1.6° |
| 直角反射鏡 | #49-406 | 大小:35mm*35mm                            |
| 直角反射鏡 | #45-594 | 大小:20mm*20mm                            |
| 直角反射鏡 | #45-595 | 大小:25mm*25mm                            |
| 濾光鏡   | BN850   | 大小:27mm                                 |
| 濾光鏡   | BN785   | 大小:27mm                                 |

表格 4-5 光學元件之頻譜響應

|     |       |                                                                                      |
|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 濾光鏡 | BN850 |  |
|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|





### 4.3 研究之演算法流程

本研究之演算法流程 如下所示：

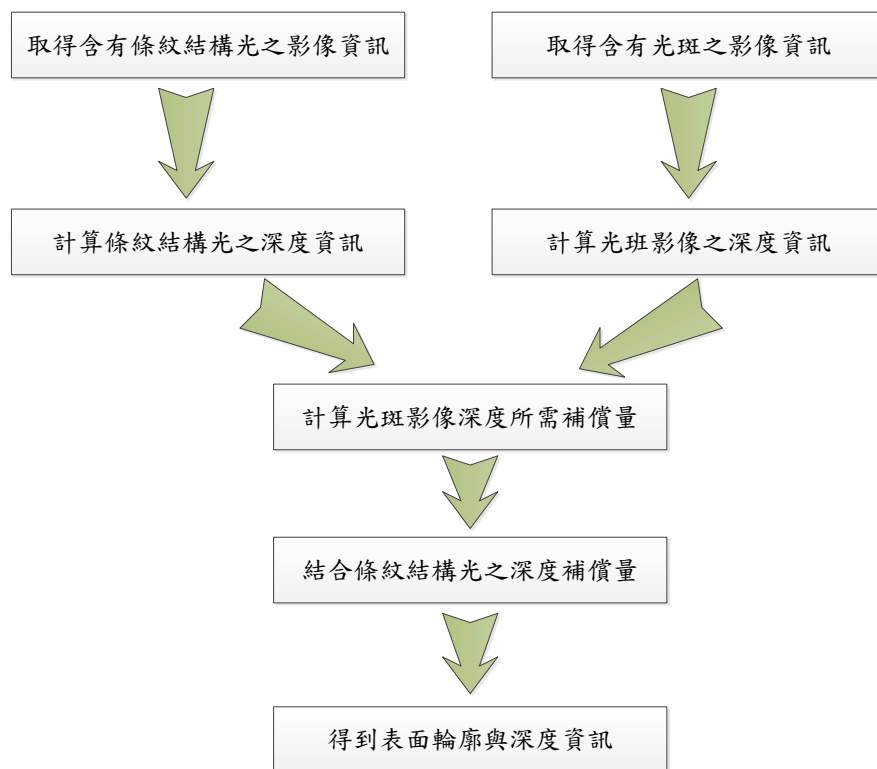


圖 4-8 演算法流程圖

演算法結合光斑量測法與相位量測法，首先進行光斑資訊與結構光資訊的取得，藉由 CCD 將光斑資訊與結構光資訊分別取出，得到之光斑影像藉由光斑量測法量測絕對高度，所得到之量測高度進行轉換為絕對相位，同時將結構光影像利用結構光法所量測得到之相對相位與絕對相位進行比較，在不連



續點所產生的相位錯誤處會有  $2N\pi$  的誤差存在，此時即可利用絕對相位進行誤差補償，補償後的相位資訊再利用三維表面輪廓量測原理將相位轉換為高度，由此即可得到大範圍並且高深度解析之量測結果。

#### 4.4 演算法之驗證

本實驗之架構之重點在於使用相位量測與絕對量測，吾人與使用之方法乃是利用投影正弦條紋結構光作為相位量測之結構光，而絕對量測乃是利用投影雷射光斑進行量測，因此須能投影條紋結構光與光學光斑於待測物之上，故吾人可以藉由電腦設計結構光圖案，並由數位投影機(DLP)投影設計之結構光圖案於待測物上模擬相位量測與絕對量測並進行原理驗證；驗證所需之架構如圖 4-9 驗證機構示意圖所示：

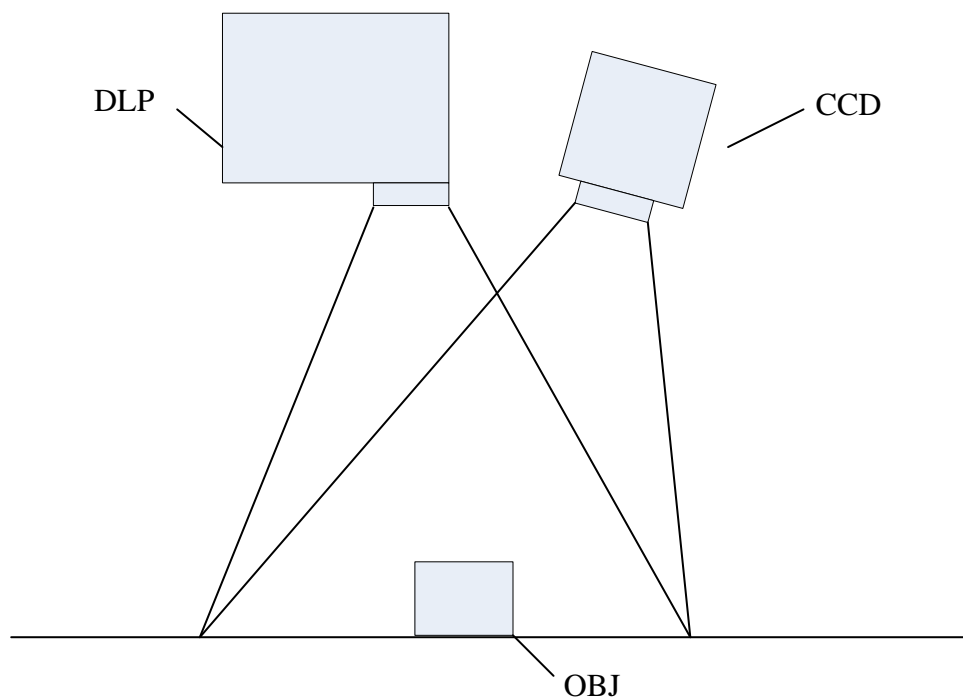


圖 4-9 驗證機構示意圖

研究所使用的結構光乃是使用紅色條紋光與藍色隨機光斑，使用不同顏色之條紋光與光斑乃是為了模擬使用不同波長之光源同時投影條紋光與光斑，使用紅色及藍色是由於紅色之波段與藍色之波段距離較遠，在進行顏色分離時較不容易產生分離不乾淨之問題。在進行顏色分離時較不容易產生分離不乾淨之問題。如圖 4-10 電腦設計投影之結構光所示：

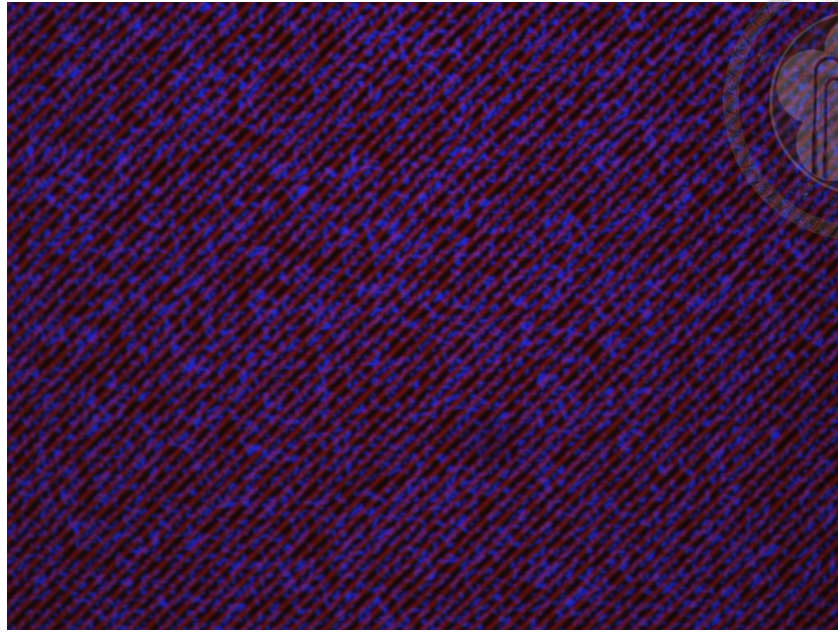


圖 4-10 電腦設計投影之結構光

利用彩色 CCD 取像後吾人可以將影相藉由顏色分離取得條紋結構光與光斑資訊，為使分離之結果不互相影響故選用藍色與紅色，分離之結果如圖 4-11；

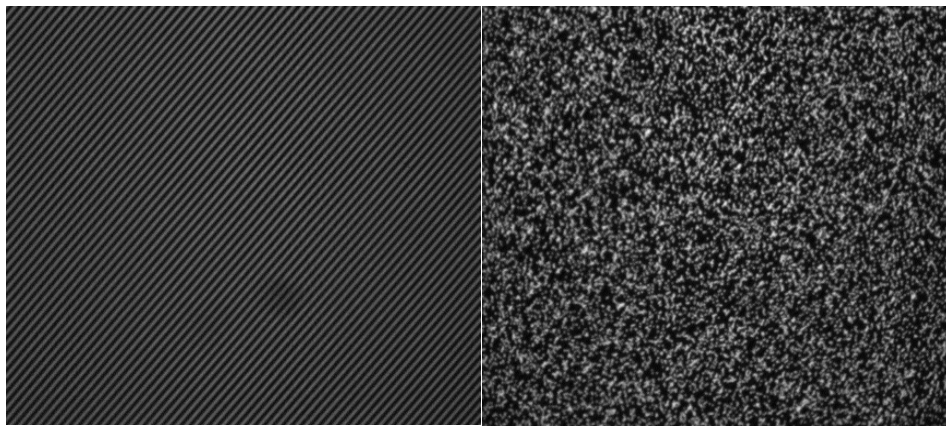


圖 4-11 分離之影像

分離後之影像藉由傅立葉輪廓術以及光斑量測法可以分別得到相對相位以及絕對高度，當吾人獲取高度資訊時，即可利用高度補償原理，利用補償原理可以將原本的不連續點所造成的相位錯誤進行補償。

為驗證本文提到之方法可以彌補因不連續點所產生之相位誤差，吾人將以超過階高限制之物件進行量測驗證。

考慮量測一 16 mm 之階高物件，若吾人以單純之傅立葉輪廓術進行量測，由於不連續點的產生會造成相位之錯誤，如下圖所示：

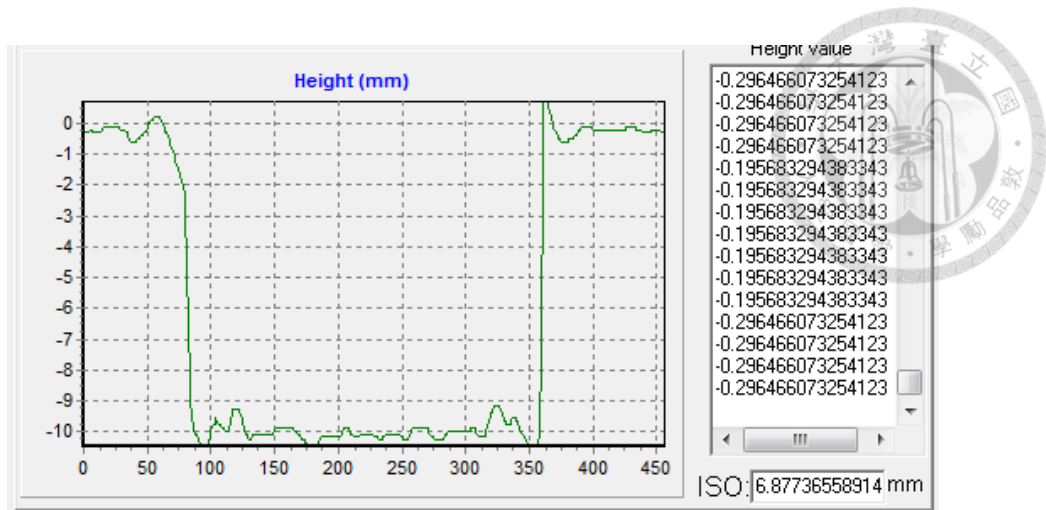


圖 4-12 傅立葉輪廓術之階高剖線圖

圖中之橫軸為像素位置，縱軸為高度，由圖 4-12 圖 4-12 可以看出由於階高塊為一不連續物件，故超過階高限制時由於頂位模糊造成無法判斷正確的相位，而此相位模糊造成結果缺少  $2N\pi$  的補償而產生量測的相位誤差，故吾人使用三維資訊高度補償原理，藉由使用光斑量測法所得到之絕對高度進行引導，並藉由判斷階高的存在以及階高所需之補償量進行補償，其結果如下圖所示：

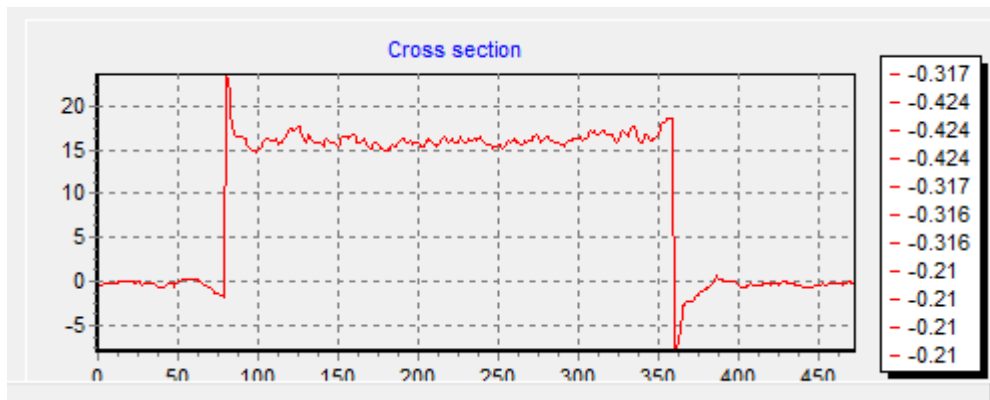


圖 4-13 三維資訊高度補償結果

圖中之橫軸為像素位置，縱軸為高度，由圖 4-13 可以看出原本錯誤的階高資訊經過補償之後可以將缺少的  $2N\pi$  相位補償，從而得到正確的高度資訊。

由以上驗證可以得知，結合光斑之絕對相位量測搭配相移術之相對相位量測，可以彌補相移術於不連續點所造成的相位模糊問題。



## 4.5 MTF 分析

本研究的硬體驗證可以分為兩個部分，投影條紋結構光的系統以及投影雷射光斑的系統。條紋結構光的投影系統是利用近紅外線 LED 光源經過正弦條文光柵後利用物鏡投影於待測物之上，為驗證投影的條紋光可行性，我們對條紋的對比度與數位投影機的條紋對比度進行調制轉換函數 (MTF, Modulation Transfer Function)，其公式如下：

$$\text{Modulation} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4.1)$$

藉由 MTF 比較可以得到本光學系統對於投影條紋的對比度，結果如下表：

表格 4-6 MTF 比較表

|            |      |
|------------|------|
| 數位投影機之 MTF | 0.51 |
| 本研究之 MTF   | 0.55 |

由上表可以看出本系統投影之條紋結構光有著比數位投影機更好的對比度。

## 4.6 CCD 視野校正

本研究為擷取不同波長之資訊，故本研究使用兩 CCD 進行擷取，為確保兩 CCD 能使用相同之視野，故本系統使用一分光鏡確保 CCD 能使用同樣的視野，然而機構系統有其架設誤差之存在，故本研究使用 openCV 之函式，利用棋盤格建立兩 CCD 的關係式，並藉由程式取出校正後之影像，確保兩 CCD 之視野能保持一致。

校正時利用一 CCD 設定為 1024\*768 pixels 而另一 CCD 為 1278\*958 pixels，如下圖所示：

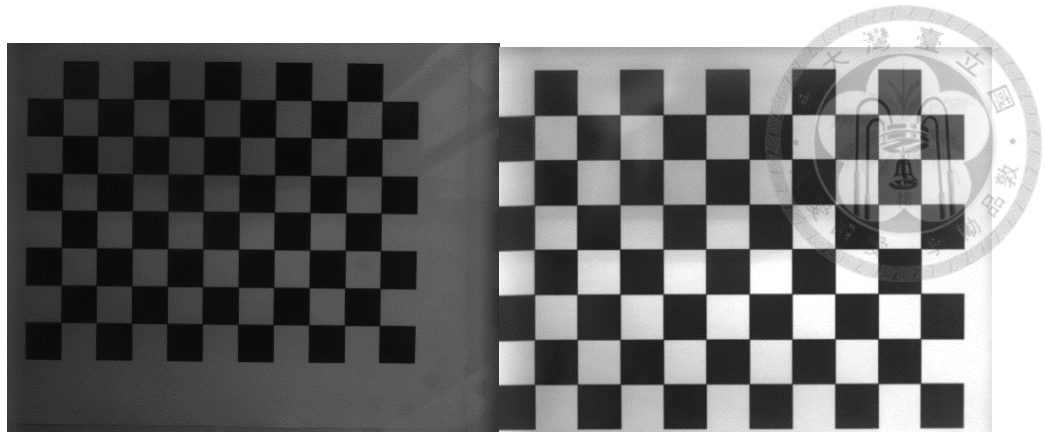


圖 4-14 影像校正所取之棋盤格影像

當擷取到棋盤格影像之後，利用 openCV 之函式找尋棋盤格之格點進行比對，並利用最小平方法找出格點之最小誤差距離，並利用函式進行影像之轉換，即可找出兩影像之轉換式，並將其轉換之同樣之視野，結果如下所示：

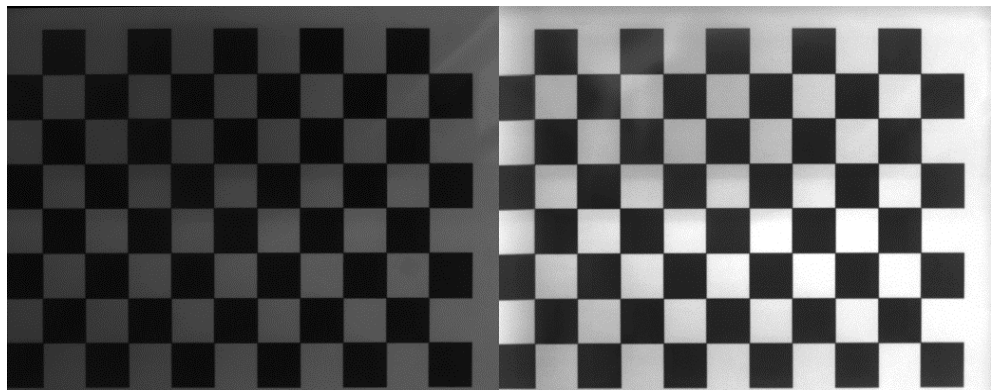


圖 4-15 視野校正後之結果(a)校正後之 CCD 影像與;(b)校正目標影像;

藉由此方法進行校正，即可得到兩 CCD 影像之相對關係，並可由此確保兩 CCD 之影像有相同之視野。

## 4.7 邊緣及缺失補正演算法

當進行量測時，由於使用之光斑法量測水平解析度受限，同時由於光斑法之演算法，在物件之邊界時光斑法較容易有雜訊的產生，在濾除雜訊的同時，此處的光斑資訊也會缺失，由於本研究之演算法需要光斑法之量測結果進行相位補償量之計算，因此當雜訊或是邊界的部分會有無法進行相位補償的問題存在，故此處將討論邊緣及缺失補正的演算法。

當光斑法量測的結果邊緣有缺是或是有雜訊時，量測一長方形物件時光斑法的量測邊界結果如下圖所示：



圖 4-16 光斑法之量測邊界

由圖中可以發現，由於光斑法之演算法特性，造成光斑法之量測結果無法得到較完整的邊界。

而相移術所量測結果有較佳之邊界，故我們利用相位還原圖先進行判斷物體之邊界所在處，由相位還原圖可以找出相位產生變化的區域如下圖所示：

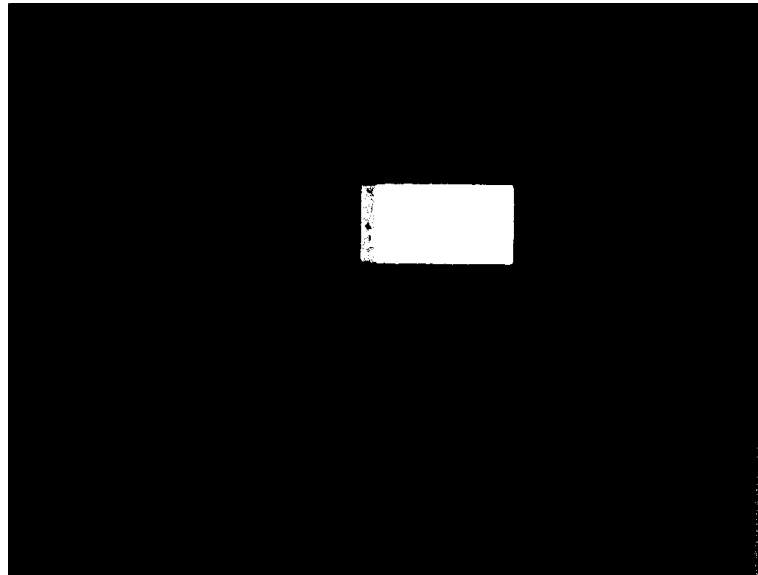


圖 4-17 相移術之量測邊界

當獲得正確的邊界之後將物件之區域標記並與光斑法所獲得之區域進行比對得到尚需補償的區域

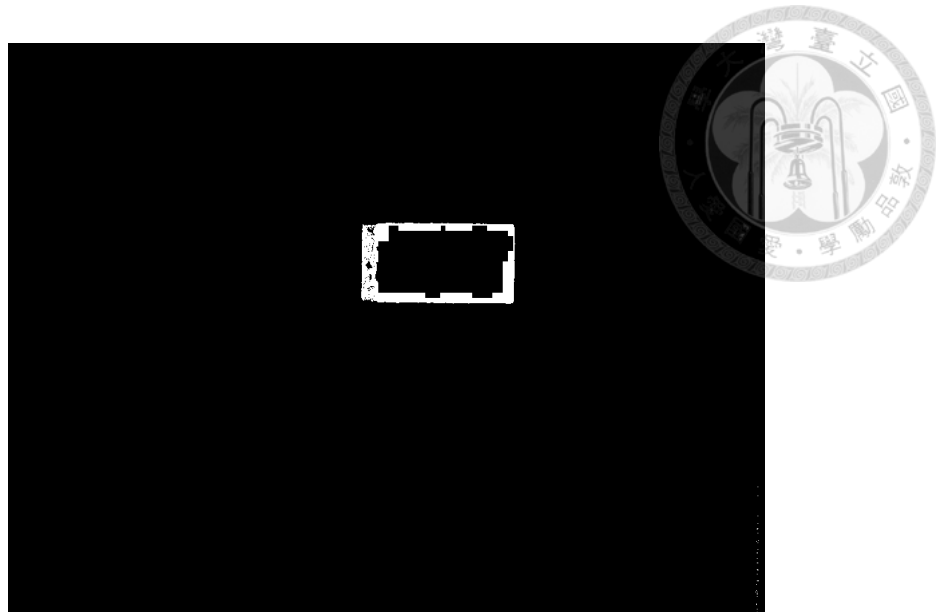


圖 4-18 比較後之補償區域

由圖 4-18 所示可以看到白色區域為缺少光斑資訊而無法進行補償的部分，將此部分的點全部找出之後，再將補償的區域點以尋找最近可用的光斑資訊計算補償量，由此即可將由於光斑解析不足或是由於光斑量測邊界的雜訊而被去除所無法補償的部分進行補償。

經過補償後之面積誤差結果如下所示：

表格 4-7 量測面積比較表

|           | 面積(mm <sup>2</sup> ) | 面積誤差百分比(%) |
|-----------|----------------------|------------|
| 實際物件      | 700                  | 0          |
| 數位影像辨識法量測 | 730.58               | 4          |
| 本研究演算法之量測 | 536.03               | 23.4       |

由表格 4-7 可以看出本研究可以將數位影像辨識法所量測之結果進行補正，減少量測的誤差量。

## 4.8 系統驗證量測標準件設計

為了驗證系統的量測結果，我們自行設計較大範圍的量測標準件，利用不同高度驗證系統的量測結果，同時並利用此標準件進行水平量測之驗證，系統設計 solidworks 結果如下所示：



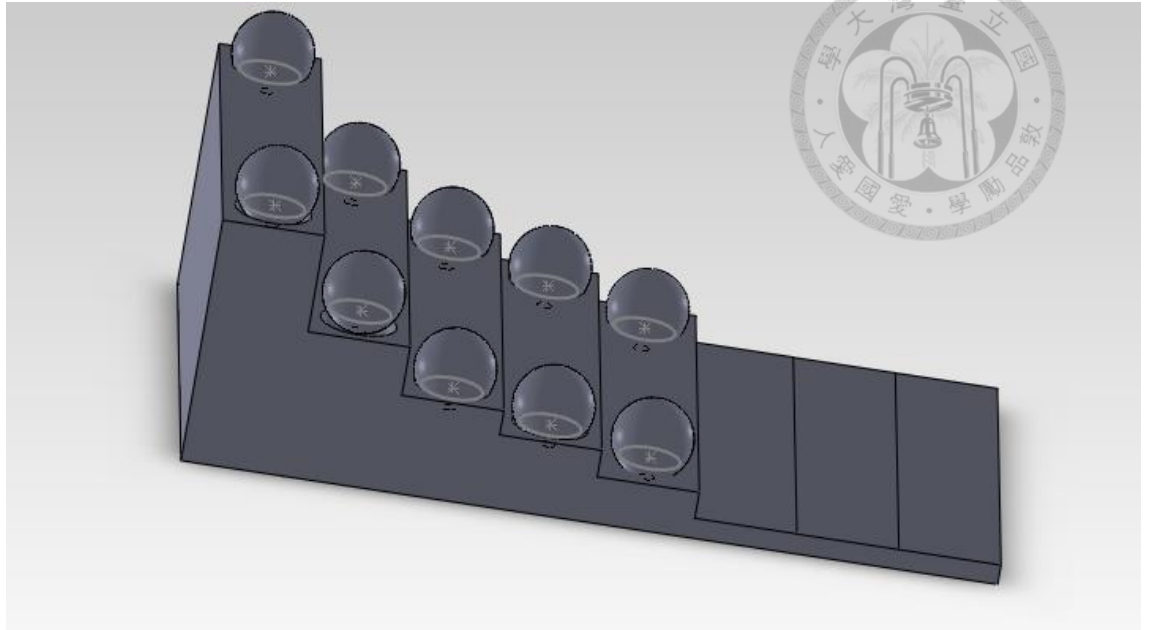


圖 4-19 自行設計之標準件

此標準件之設計最高階高為 50 mm，以配合量測系統之量測範圍，此高度可以使相移術產生相位模糊之問題，量測之標準件之高度最小差距為 10 $\mu$ m，同時於階高上裝設軸承之滾珠，藉由滾珠可以進行球心之判斷，利用系統量測出所有滾珠之球心即可進行球心水平及高度量測，藉由量測球心彼此之距離即可判算系統量測之準度。

此處所使用之滾珠為市售之滾珠，直徑為 15.85mm，此滾珠之公差如下表所示：

表格 4-8 滾珠公差

| 直徑公差( $\mu$ m) | 真圓度( $\mu$ m) | 表面粗糙度( $\mu$ m) |
|----------------|---------------|-----------------|
| 5.00           | 5.00          | 0.200           |

為了驗證此標準件之製造之結果，本標準件利用微三次元測量儀(CMM)進行標準件之量測，並以此為基準與系統進行比對，微三次元測量儀之規格如下表所示：

表格 4-9 微三次元測量儀規格

|                |         |
|----------------|---------|
| 解析度(mm)        | 0.00005 |
| 量測範圍(mm)       | 560     |
| 最大誤差( $\mu$ m) | 1.8     |

藉由三次元測量儀之量測結果，我們可以得到準確之階高以及球心距離，  
並以此作為基準驗證系統之量測結果。





## Chapter 5 實驗結果與討論

### 5.1 系統重複度量測及精度分析

本系統利用 9mm 之標準階高塊做系統重複量測，本研究之量測結果與傅立葉輪廓數、本研究之演算法及三次元量測各量測 30 次，並利用國際標準階高量測規範 ISO[20]來計算不同方法的重複度及精度分析。

#### 5.1.1 ISO 5436-1:2000

依據 ISO 5436-1 Geometrical Product Specifications-Surface texture : Profile method; Measurement standards-Material measures 之規範，計算量測標準階高塊之階高。規範中為深度量測標準，利用量測之標準階高塊之階高剖線進行計算，如圖 5-1 所示，將量測結果剖線分成三等份之區域，再以每個區域的三分之一作為計算依據，計算之方程式如下所示：

$$Z = \alpha X + \beta + h\delta \quad (5.1)$$

其中 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 為未知數， $Z$ 為量測資訊之高度、 $X$ 為量測資訊之位置，當 $\delta$ 在區域 A、B 中為+1，C 區中為-1 時即可用最小平方法得到 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 。最後即可利用得到之  $h$  計算實際階高高度：

$$d=2*h \quad (5.2)$$

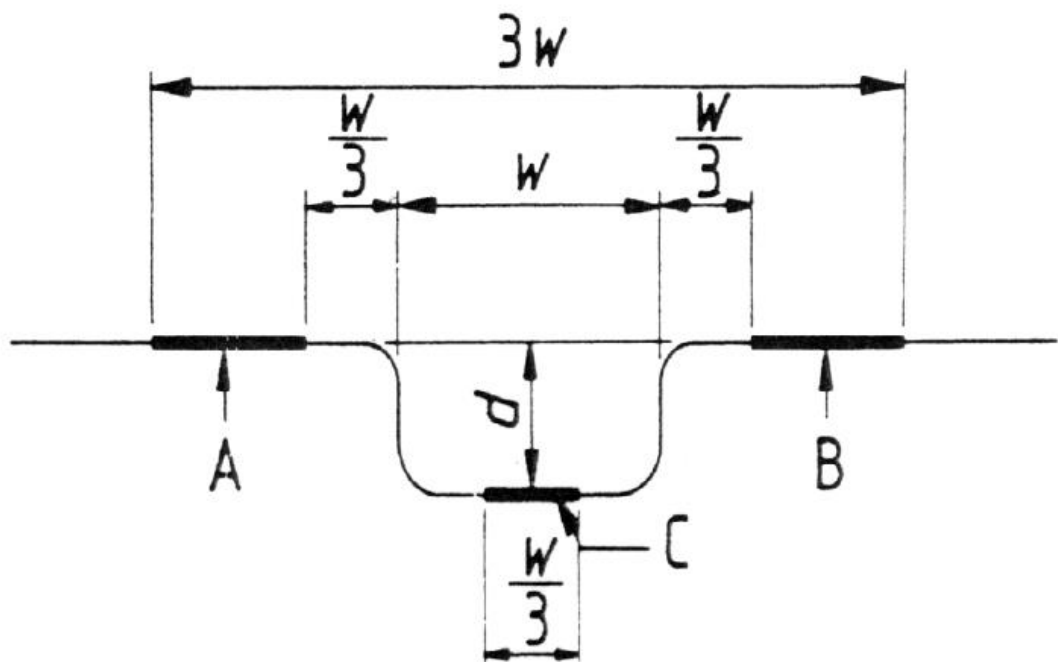


圖 5-1 ISO 標準階高量測示意圖



### 5.1.2 重複量測

重複量測利用標準階高塊進行三十次的重複量測，藉由重複量測歸納出其穩定度、精度以及標準差。

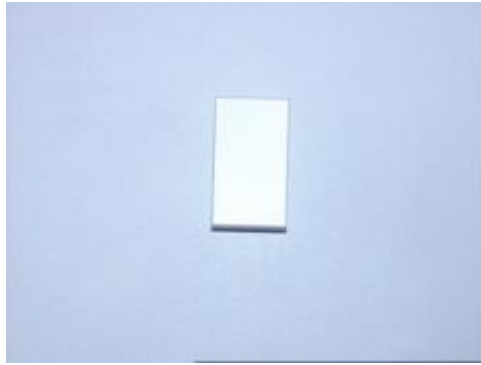


圖 5-2 9mm 標準階高塊

下圖為使用本演算法所得到之三十次重複量測結果：

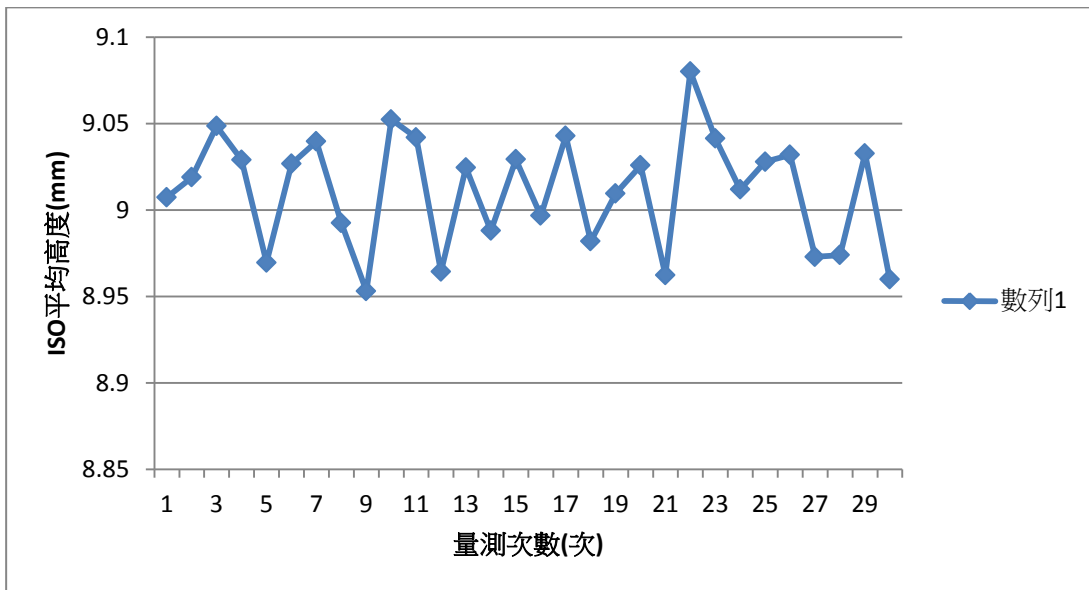


圖 5-3 9mm 階高塊三十次重複量測結果

量測結果之剖線圖如下所示，橫軸剖線位置(pixels)，縱軸為量測高度(mm)：

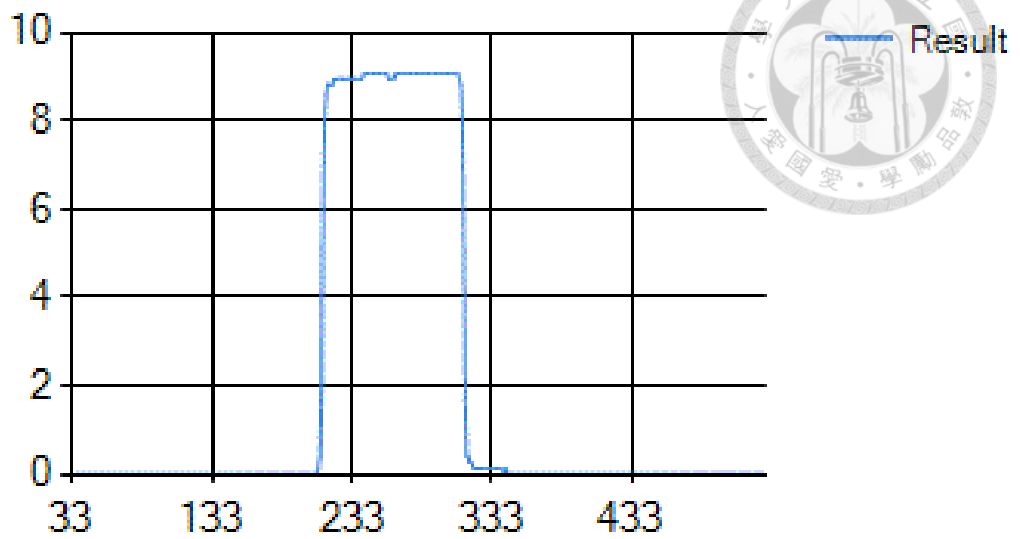


圖 5-4 階高塊量測剖線圖

由三十次重複量測可以計算出本演算法的精度如下表所示：

表格 5-1 數據結果統整

|                 | 數位影像辨識量測法 | 本研究之演算法 |
|-----------------|-----------|---------|
| ISO 平均高度值(mm)   | 8.694     | 9.011   |
| 最大誤差(mm)        | 0.424     | 0.08    |
| 最大誤差百分比(%)      | 4.71      | 0.88    |
| 標準差( $\sigma$ ) | 0.069     | 0.0327  |

透過以上結果可以得知，本研究相較於數位影像辨識量測法有較高之精度及穩定度，同時誤差也遠小於數位影像辨識量測法之量測結果。

### 5.1.3 自行設計之標準件量測驗證

使用自行設計之階高塊進行量測，量測結果與微三次元測量儀進行比較，分析量測系統在不同高度之誤差量，量測之標準件如下所示：



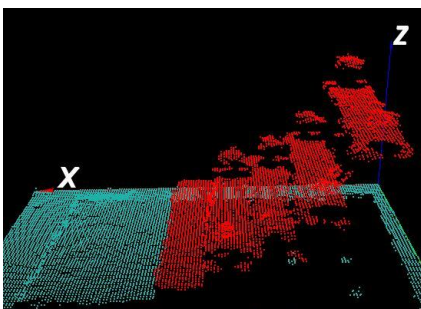
圖 5-5 自行設計之階高塊

量測之階高塊如圖 5-5 所示，階高之實際高度由 CMM 進行量測，量測結果如表格 5-2 所示：

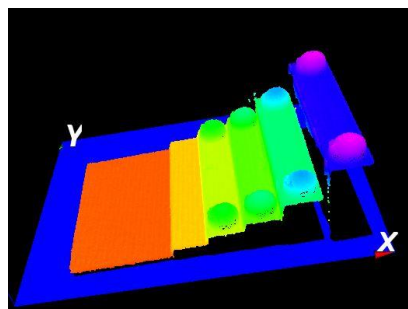
表格 5-2 CMM 之階高量測結果

|        | Measurement result(mm) |
|--------|------------------------|
| Step A | 4.11227                |
| Step B | 9.544512               |
| Step C | 15.03877               |
| Step D | 20.03706               |
| Step E | 30.02482               |
| Step F | 50.00841               |

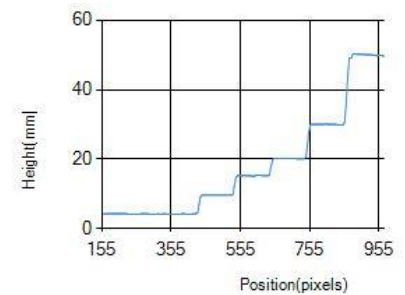
以 CMM 之量測結果為基準與傳統相移術使用 K 值還有本演算法之頻率校正之結果進行比較，其量測結果如下所示：



(a)



(b)



(c)

圖 5-6 量測結果(a)數位影像辨識量測法結果;(b)本研究之量測結果;(c)量測結果剖線圖;



表格 5-3 量測結果比較表

|   | 使用 K 值量測結果 |        |           | 本演算法之量測結果 |        |           |
|---|------------|--------|-----------|-----------|--------|-----------|
|   | 高度(mm)     | 誤差(mm) | 誤差百分比 (%) | 高度(mm)    | 誤差(mm) | 誤差百分比 (%) |
| A | 4.046      | -0.066 | 1.60      | 4.182     | 0.070  | 1.70      |
| B | 9.294      | -0.249 | 2.61      | 9.584     | 0.039  | 0.41      |
| C | 14.754     | -0.284 | 1.89      | 15.054    | 0.016  | 0.10      |
| D | 19.660     | -0.376 | 1.87      | 19.949    | -0.087 | 0.43      |
| E | 29.754     | -0.270 | 0.90      | 29.846    | -0.178 | 0.59      |
| F | 50.807     | 0.798  | 1.59      | 49.716    | -0.291 | 0.58      |

由表格 5-3 可以看出，由於系統並非使用遠心鏡頭，故量測時會受到物件高度而影響準度，傳統之 k 值換算高度在此大範圍之量測並不適用，而利用頻率校正可有效降低此問題，減少量測之誤差。

利用量測結果進行球心位置之判斷，量測球心距離之量測結果，並與 CMM 之量測結果進行比較：

表格 5-4 球心距離量測結果

|           | CMM 量測結果 (mm) | 研究之球心擬合結果(mm) | 誤差百分比 (%) |
|-----------|---------------|---------------|-----------|
| 球心 1、2 距離 | 80.014        | 81.124        | -1.3      |
| 球心 3、4 距離 | 80.007        | 80.903        | -1.2      |
| 球心 5、6 距離 | 80.013        | 80.931        | -1.1      |
| 球心 7、8 距離 | 80.024        | 81.184        | -1.4      |

由表格 5-4 可以看出，在三維量測結果相較深度資訊有較大的誤差百分比，此誤差百分比來自包括深度以及水平之量測誤差，此部分之三維資訊校正需要更加精確之校正方式，除此之外此量測系統之水平解析為 0.2 mm，造成量測準度較差，未來可考慮使用較小之視野或是更高解析之 CCD 來提高水平解析。

## 5.2 量測結果

針對不同物件進行量測與驗證本研究的可行性，量測物體包括半球形物體、玩偶...等。

### 5.2.1 半球型物件

本研究物體為一半球型物件，此物件因其不連續點之存在，故使用一般之相移術量測會產生相位模糊之問題，量測之結果如下所示：

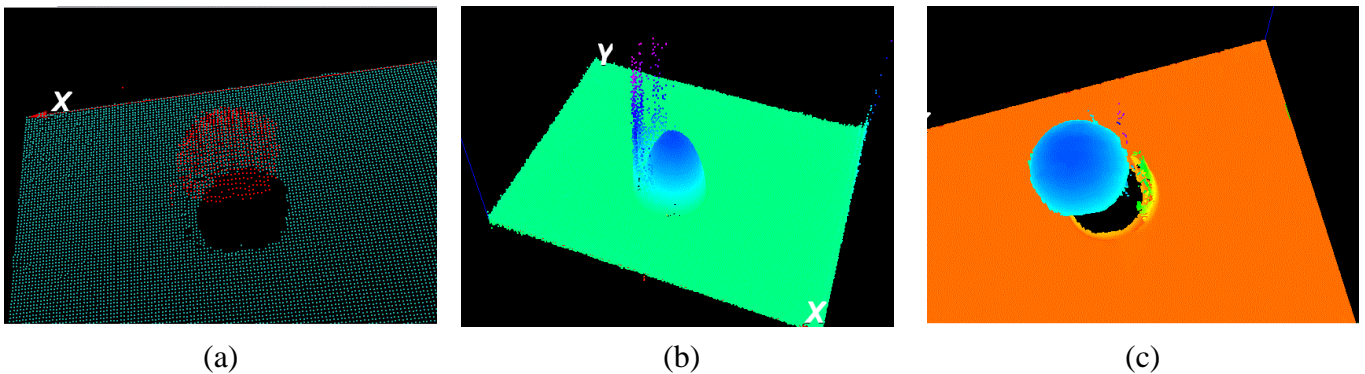
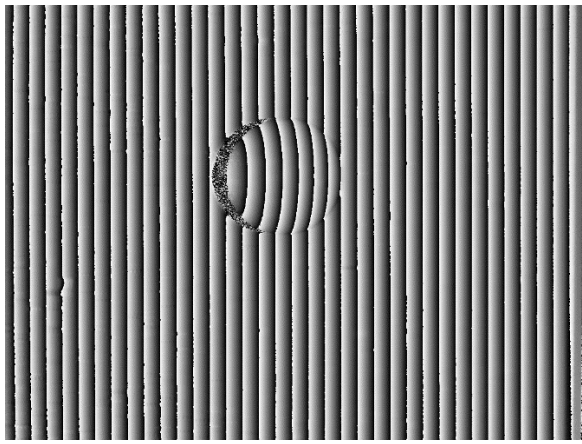


圖 5-7 量測之三維形貌圖(a) 數位影像辨識量測法結果;(b)五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;

由三維形貌可以發現，數位影像辨識量測法之量測結果受限於解析度以及邊緣之錯誤，造成量測之結果缺完整邊緣，相移術雖可有完整之量測邊緣與結果但受限於階高限制之存在，高度資訊有誤，而本研究之演算法可得到相移術之完整邊緣，但不受階高限制之影響，造成高度資訊的缺失。



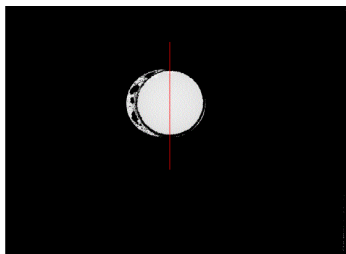


(a)

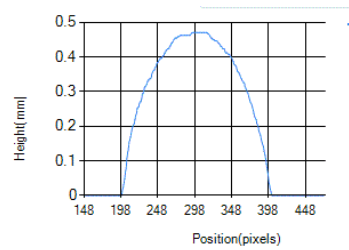


(b)

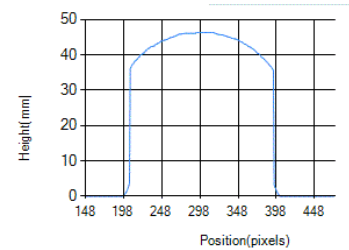
圖 5-8 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;



(a)



(b)



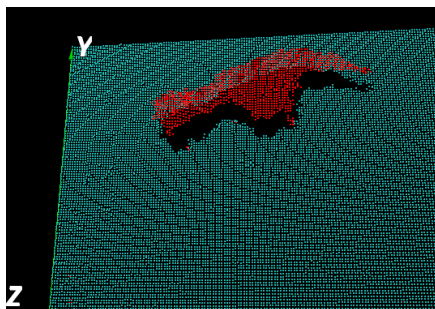
(c)

圖 5-9 半球物件高度資訊示意圖(a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;

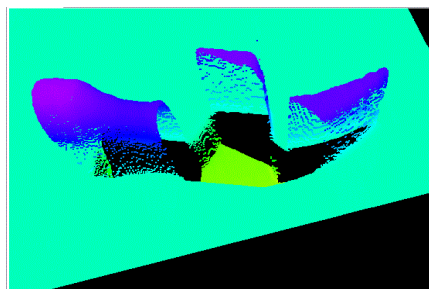
由以上之結果可以發現，對於半球形之物件本研究之演算法結合五步相移術以及數位影像辨識量測法，避免了數位影像辨識量測法之邊緣不清楚之問題以及五步相移法的相位模糊問題。

### 5.2.2 錘子頭模型量測

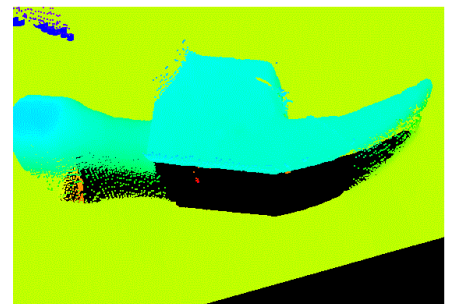
此量測物件為一錘子頭之模型，此量測物件由於高度關係變化之關係，造成相移術在進行相位還原時產生部分缺失。



(a)



(b)



(c)

圖 5-10 鉗子頭三維形貌量測結果(a) 數位影像辨識量測法結果;(b) 五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;

由上圖可以發現數位影像辨識量測法仍然無法取得較佳之量測邊緣，而五步相移法則由於相位還原所產生之問題，造成量測結果部分錯誤，而本演算法則將此部分因相位還原所產生的錯誤進行補償。

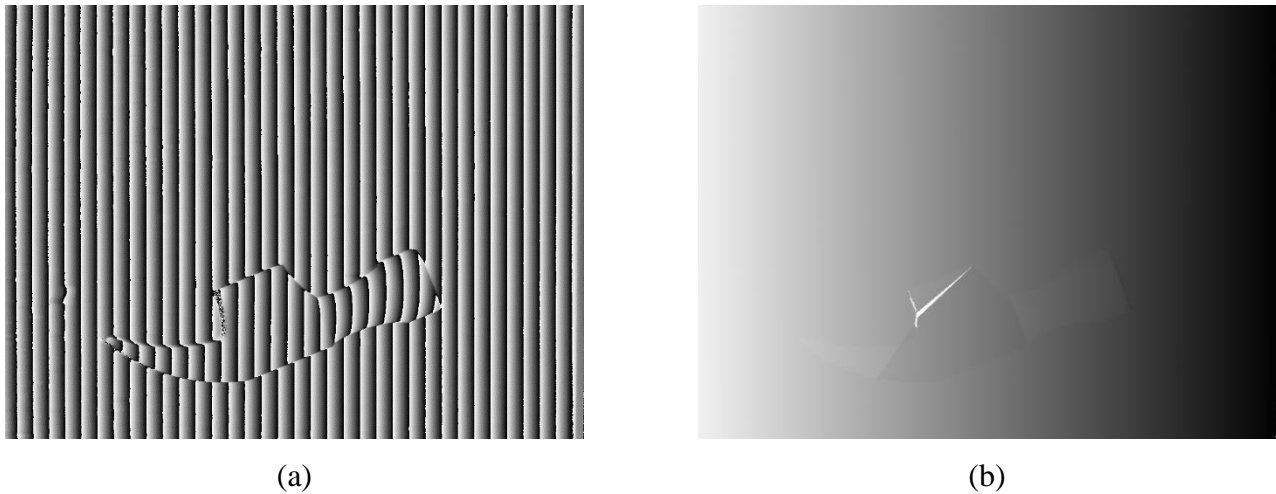


圖 5-11 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;

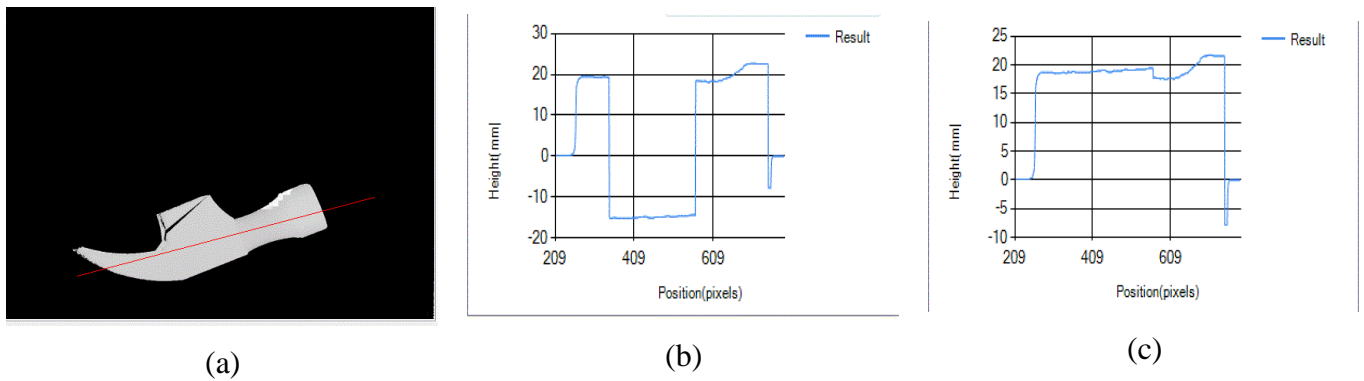


圖 5-12 鉗子量測剖線圖 (a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;

由以上的結果可以發現，在階高限制內五步相移有較佳的量測結果，但當相位還原產生問題時，五步相移無法進行處理，但是本研究之演算法可以判斷相位產生錯誤的地方進行補償，已得到較佳之結果。



### 5.2.3 玩偶量測

此量測物件為玩偶模型，此物件有較複雜之邊界同時又包含許多自由曲面之部分，藉由此物件可以檢視演算法對於複雜邊界以及多自由曲面的量測結果。

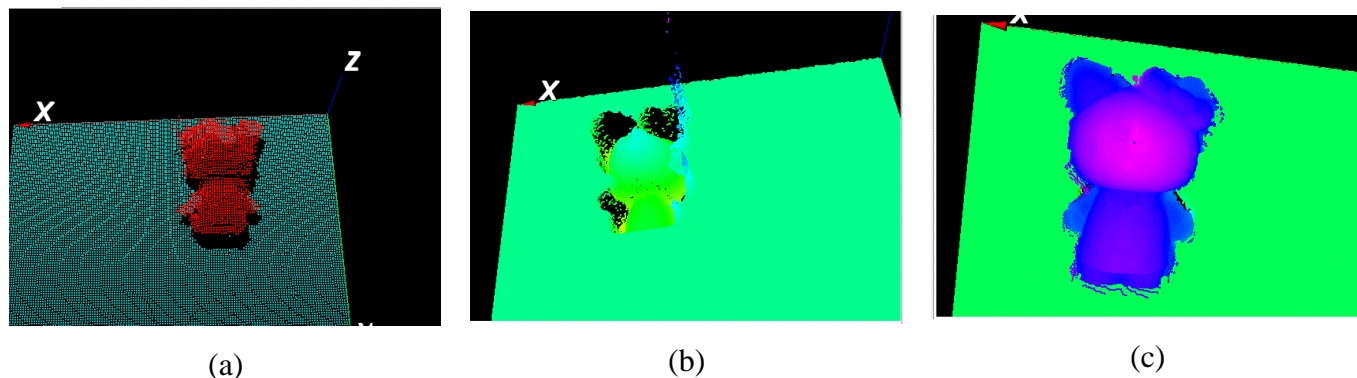


圖 5-13 玩偶三維形貌量測資訊(a) 數位影像辨識量測法結果;(b) 五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;

由以上結果可以看出，數位影像辨識量測法對於物件的多個邊界的無法有較完整的結果，而五步相移由於物件的階高限制，造成因相位模糊而使高度資訊錯誤，本研究之演算法可將此問題進行補償。

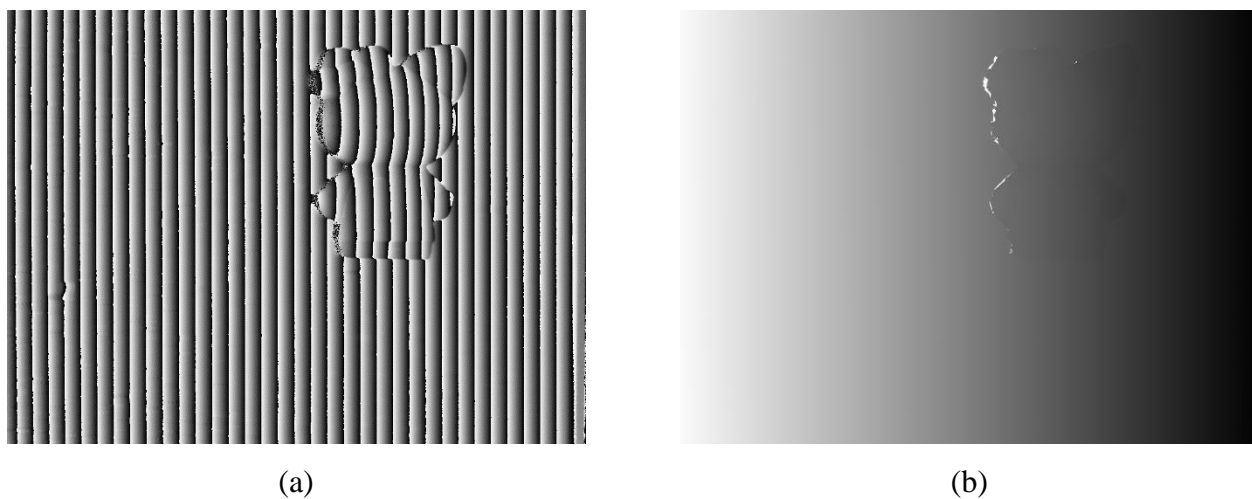


圖 5-14 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;

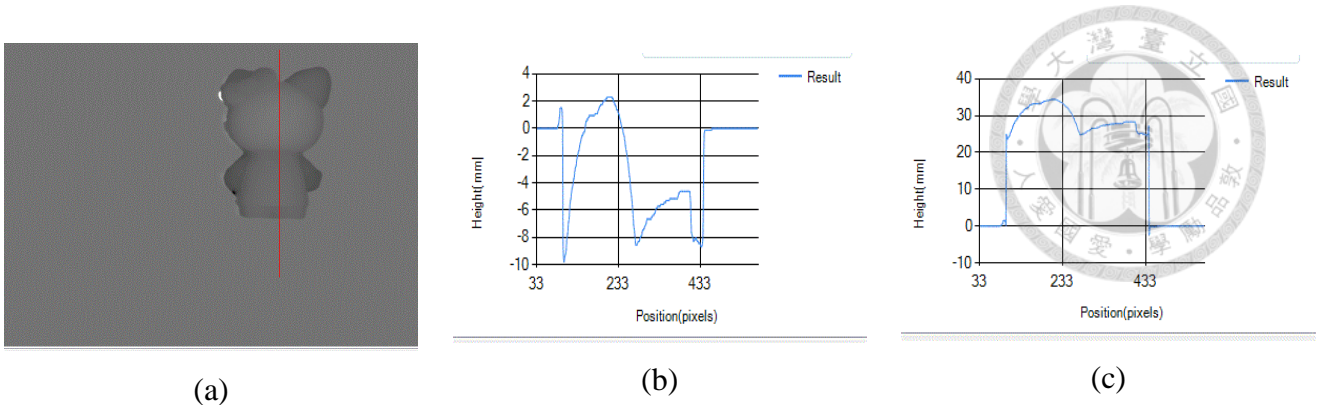


圖 5-15 玩偶量測剖線圖 (a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;

由剖線途中可以清楚看出，五步相移雖然可以有極佳的邊緣出現，但是由於相位模糊造成物件的高度資訊錯誤，而本演算法補償之後，可以將物件錯誤的高度補償回來，得到真實高度並同時保有相移術之邊緣。

#### 5.2.4 水五金量測

此量測物件為工業產品之水五金，藉由量測此物件可以檢視此法應用於工業量測之可能性。

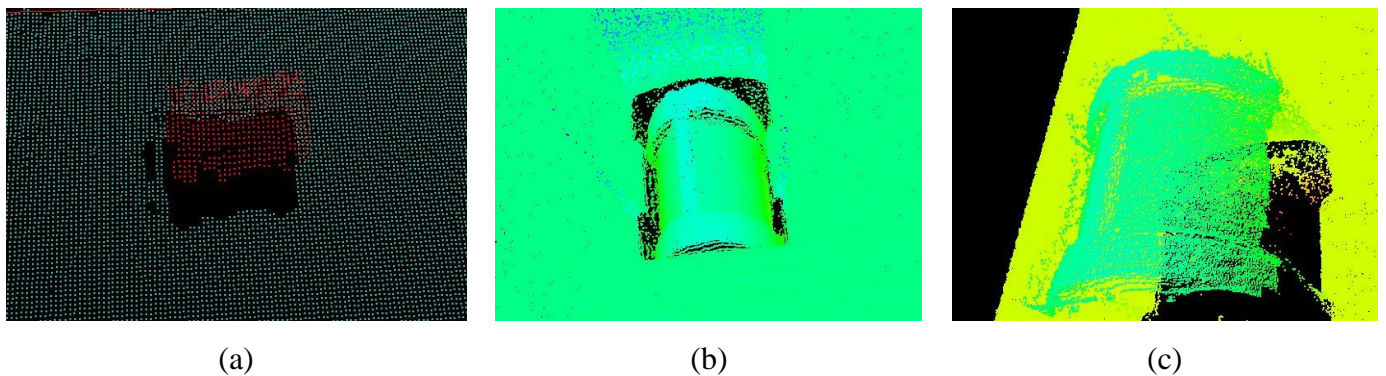


圖 5-16 水五金三維形貌量測資訊(a) 數位影像辨識量測法結果;(b) 五步相移法之量測結果;(c)本研究之演算法量測結果;

由以上結果可以看出，數位影像辨識量測法對於此物件的量測結果較破碎且特徵不明顯，而五步相移由於物件的階高限制，造成因相位模糊而使高度資訊錯誤，本研究之演算法可將此問題進行補償，同時可以看出明顯的水五金特徵。

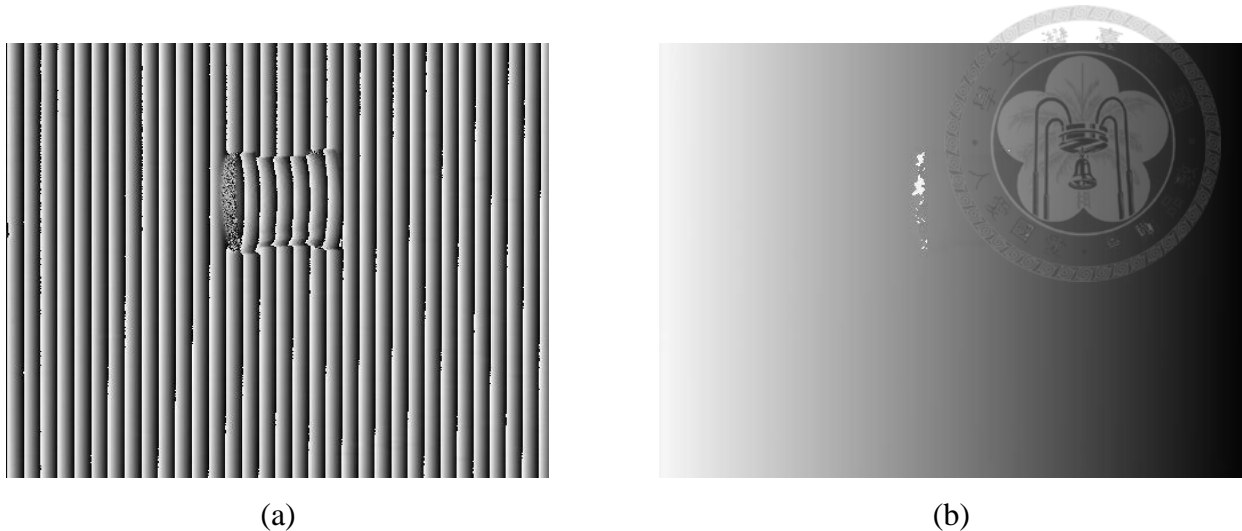


圖 5-17 量測相位結果(a)相位封裝;(b)相位還原圖;

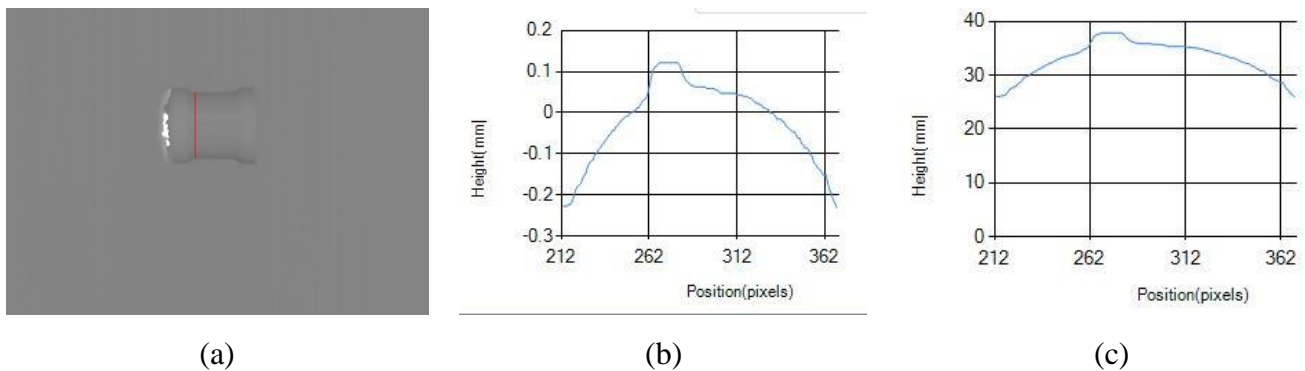
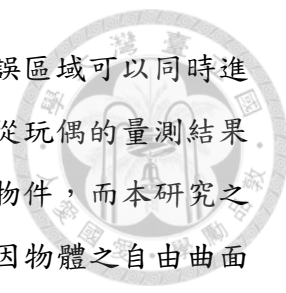


圖 5-18 水五金量測剖線圖 (a)剖線資訊位置示意圖;(b) 五步相移術剖線資訊;(c)本研究之演算法剖線資訊;

由以上的結果可以發現，本系統可用於工業產品之檢測及量測，相較於雷射光斑數位影像辨識，本研究有更佳的量測解析，可提供更多的量測物件的細節，達到瑕疵檢測的目的。

### 5.3 結果討論

藉由重複性量測實際物件的實驗之中，可以清楚了解本實驗之量測之優勢在於本研究相比較於數位影像辨識量測法之結果，我們可以有較佳的量測精度，而本研究與五步相移術比較之後，最大的優勢在於本研究不受相位模糊的影響，對於量測的物件限制較低，而同時能保有五步相移術的可靠性。由半球形物件的量測，我們可以發現本研究可以對單純形貌的物件進行量測，同時可以進行相位模糊的補償，代表本研究之演算法可以處理單純自由形貌之物件，同時可以有相較數位影像辨識量測法之較佳邊緣；而藉由鏈子頭的



量測結果可以發現，當量測之物件因相位還原所產生的錯誤區域可以同時進行補償來補正，使量測結果不受相位還原之問題影響；而從玩偶的量測結果中可以發現，玩偶乃是一含有多重邊界以及多自由曲面之物件，而本研究之演算法仍然能在相移術產生相位模糊時進行補正，同時不因物體之自由曲面及多重邊界之影響，仍然能產生正確的補正結果。

在三維量測資訊上面，受限於量測之水平解析較差之影響，造成量測之三維誤差較大，若是需要更佳準確之結果可以改用更高解析之 CCD，除此之外在深度校正的部分，受限於三角量測原理之影響，造成量測之深度資訊在高度較高時有較大的誤差，此部分可以改用更精確之校正方式來提高量測準度。

本研究之結果仍然受到相位誤差的影響，從剖線之結果可以發現相位誤差仍然影響本研究形貌之結果，如何解決相位誤差是未來的一大挑戰。

## Chapter 6 結論與未來展望



### 6.1 結論

在解決因為階高限制所產生的相位模糊上方法相當多元，其中已多頻率條紋以及條紋解碼較為多元，多頻率條紋之產生較簡單，同時配合傅立葉輪廓術可以藉由投影較少的結構光來進行量測，缺點在於不同頻率仍然無法完全解決所有量測區間的相位模糊問題；而條紋編碼法可以解決所有的量測區間的相位模糊問題，缺點則為條紋編碼所需投影的結構光過多，造成量測時間的增加。本研究之演算法利用數位影像辨識量測法的結合進行補償，解果可以歸納為以下幾點：

1. 配合數位影像辨識法來進行相位模糊補償之優點在於投影結構光時只需額外投影一張光斑影像即可進行量測，相較於其他之演算法所需之額外多次投影結構光，此方法可以減少量測所需之時間。
2. 在三十次的量測之中，本研究對於階高塊的量測最大誤差為 0.080mm，相較於數位影像辨識法的 0.424mm，本研究之準度遠高於數位影像辨識法，而本研究的標準差 0.032 也高於光斑法的 0.069，由此可見本研究之演算法的可靠度優於數位影像辨識法之量測。
3. 此方法可以搭配傅立葉輪廓術進行量測以達到單張取像的工作，系統可視需求自行切換選擇使用傅立葉輪廓術或是五步相移進行量測。
4. 本研究在陰影所造成的相位錯誤區之資訊無法有較有效的分離，故本研究之邊界會因陰影所造成的相位錯誤而影響，同時若是數位影像辨識法的資訊錯誤也會造成補償時的錯誤。
5. 由於本演算法之概念來自於相移術，故實驗結果可以發現相位誤差的存在，此相位誤差相同於相移術所產生之相位誤差，故如何減少相位誤差的影響是一件相當重要的工作。
6. 本演算法使用三角法配合近紅外線投影結構光，故在面對高反射面物件時會因光線無法正常散射並由 CCD 接收而產生問題，固本研究目前適合量測物件之材質為低反射面物件。



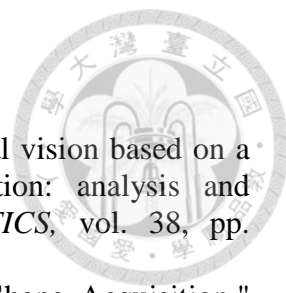
## 6.2 未來展望

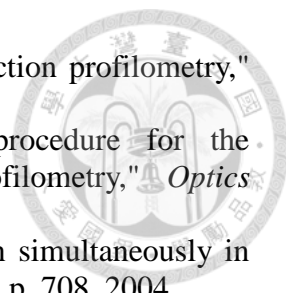
本研究之量測實用性仍然受到系統發展時某些因素之限制，因此本節將對此部分進行探討，以做為未來的改進方向：

1. 因陰影所產生的相位錯誤造成量測結果的邊界問題，此問題是由於光遮蔽的陰影區造成相位還原時的錯誤區域，未來也許可以利用二維的陰影檢測製作遮罩，避免此部分的相位還原錯誤。
2. 數位影像辨識在邊界處造成量測錯誤會使相移術在補償時產生錯誤，故須先進行錯誤資訊的去除與判斷，避免錯誤的補償量，此部分之演算法有加強的需求。
3. 由於系統投影的方式，再進行三角量測時必然會產生光遮蔽的區域，此部分會造成量測結果的缺失以及物體重建的完整性，未來也許可以利用多台相機以及多個投影光源進行取像，減少光遮蔽所產生的資料缺乏區域。
4. 本研究目前適合量測的物件由於三角法的關係而有受限，對於鏡面或是高反射物件表面會造成無法量測的問題存在，未來可以結合高反光物件的量測方法，提升可量測物件的種類。
5. 演算法部分乃是使用 vc++ 配合 openCV 等函式庫進行量測計算，未來可以考慮使用嵌入式晶片等方式進行計算，以提高計算之效率。
6. 量測誤差方面由於使用相移術之方式進行量測，故存在有相位誤差之問題，未來也許可以加入相位誤差之補償，增加量測精度。
7. 由於相位與高度轉換的方程式受限於理論無法達到更佳的结果，固可考慮使用其他理論進行校正，提高量測系統的準度。
8. 目前的系統架構仍然有加強的空間，未來可以考慮進行微小化，並提升光源效率減少量測時間。



## REFERENCE

- 
- [1] G. Sansoni, M. Carocci, and R. Rodella, "Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors," *APPLIED OPTICS*, vol. 38, pp. 6565-6573, 1999.
- [2] S. Zhang and P. Huang, "High-resolution, Real-time 3D Shape Acquisition," *Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, vol. 3, pp. 28-37, 2004.
- [3] S. Zhang and S. T. Yau, "High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method," *Opt Express*, vol. 14, pp. 2644-9, Apr 3 2006.
- [4] P. S. Huang, "Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement," *Optical Engineering*, vol. 45, p. 013602, 2006.
- [5] J. Huo, Q. Wu, and X. Zeng, "A technique of phase-shifting for 3-D measurement using spectral-transform," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, pp. 1133-1137, 2013.
- [6] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 72, pp. 156-160, 1982.
- [7] R. Onodera and Y. Ishii, "Two-wavelength interferometry that uses a Fourier-transform method," *Applied Optics*, vol. 37, pp. 7988-7994, Dec 1 1998.
- [8] O. A. Skydan, M. J. Lalor, and D. R. Burton, "Technique for phase measurement and surface reconstruction by use of colored structured light," *Applied Optics*, vol. 41, pp. 6104-6117, Oct 10 2002.
- [9] P. S. Huang, H. Guo, P. S. Huang, T. Yoshizawa, and K. G. Harding, "3-D shape measurement by use of a modified Fourier transform method," *Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology VI*, vol. 7066, pp. 70660E1-70660E8, 2008.
- [10] H. Dai and X. Su, "Shape measurement by digital speckle temporal sequence correlation with digital light projector," *Optical Engineering*, vol. 40, pp. 793-800, 2001.
- [11] M. Dekiff, P. Berssenbrügge, B. Kemper, C. Denz, and D. Dirksen, "Three-dimensional data acquisition by digital correlation of projected speckle patterns," *Applied Physics B*, vol. 99, pp. 449-456, 2010.
- [12] E. Valero, V. Micó, Z. Zalevsky, and J. García, "Depth sensing using coherence mapping," *Optics Communications*, vol. 283, pp. 3122-3128, 2010.
- [13] M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita, H. Takai, and Y. Takahashi, "Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations," *APPLIED OPTICS*, vol. 36, pp. 5347-5354, 1997.
- [14] R. Ishiyama, S. Sakamoto, J. Tajima, T. Okatani, and K. Deguchi, "Absolute phase measurements using geometric constraints between multiple cameras and projectors," *Applied Optics*, vol. 46, pp. 3528-3538, Jun 2007.
- [15] J. Tian and X. Peng, "Three-dimensional vision from a multisensing mechanism," *APPLIED OPTICS*, vol. 45, pp. 3003-3008, 2006.
- [16] W. S. Zhou and X. Y. Su, "A Direct Mapping Algorithm for Phase-measuring Profilometry," *Journal of Modern Optics*, vol. 41, pp. 89-94, 1994.

- 
- [17] H. Guo, "Least-squares calibration method for fringe projection profilometry," *Optical Engineering*, vol. 44, p. 033603, 2005.
- [18] P. J. Tavares and M. A. Vaz, "Linear calibration procedure for the phase-to-height relationship in phase measurement profilometry," *Optics Communications*, vol. 274, pp. 307-314, 2007.
- [19] W. Song, "Phase-height mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry," *Optical Engineering*, vol. 43, p. 708, 2004.
- [20] R. Leach, "The Measurement of Surface Texture using Stylus Instruments" *Measurement Good Practice Guide* vol. No. 37, 2001.
- [21] Y. Morimoto, M. Fujigaki, A. Masaya, Y. Amino, P. K. Rastogi, and E. Hack, "Shape Measurement by Whole-space Tabulation Method Using Phase-shifting LED Projector," pp. 377-382, 2010.