



國立勤益科技大學
電子工程系研究所碩士班

碩士論文

使用陰影疊紋作人臉立體量測
Face 3D Measurement by Shadow Moiré

研究生：陳韋宇

指導教授：賴雲龍 博士

中華民國 九十九 年 六 月

使用陰影疊紋作人臉立體量測

Face 3D Measurement by Shadow Moiré

研究生：陳韋宇

指導教授：賴雲龍 博士



國立勤益科技大學

電子工程系研究所

碩士論文

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering
in

Institute of Electronic Engineering
National Chin-Yi University of Technology

June 2010

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 六 月

國立勤益科技大學
研究所碩士班
論文口試委員會審定書

本校 電子工程系(所) 碩士班 陳韋宇 君

所提論文 使用陰影疊紋作人臉立體量測

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

論文口試委員會：

召集人：林宸生

委員：賴聖龍

楊嘉貞

林宸生

指導教授：賴聖龍

所長：陳文淵

中華民國九十九年六月

國立勤益科技大學

博碩士論文全文上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學
電子工程系 多媒體 組 98 學年度第 二 學期取得碩士學位之論
文。

論文題目：使用陰影疊紋作人臉立體量測
指導教授：賴雲龍

■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校圖書
館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方式重製與利
用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢索、閱覽、下載及列
印。

論文 全文 上傳 網路 公開 之範 圍及 時 間：	校內區域網路	■ 中華民國 102 年 7 月 21 日公開
	校外網際網路	■ 中華民國 102 年 7 月 21 日公開

授權人：陳韋宇

簽名：陳韋宇

中華民國 99 年 7 月 21 日

使用陰影疊紋作人臉立體量測

學生：陳韋宇

指導教授：賴雲龍

國立勤益科技大學 電子工程系研究所碩士班

摘要

在聽障生的學習過程中，口語學習也是非常重要的一部份，正確的發音嘴形若能以立體的圖像呈現，相信對於唇語的學習是一大幫助，更能在聽障學生的教育提供一個學習方法，為能達到實際對嘴唇發音時的變化檢測，本文使用陰影疊紋法建置光學量測，以非接觸方式量測嘴形輪廓，使用一般影像擷取裝置擷取疊紋影像，經過影像處理後獲得類似等高線的紋路，計算填入相對應的高度數值，將各個等高線間做平滑插值後，繪圖出立體的嘴巴圖形。

陰影疊紋量測其架設方式簡易且不需昂貴的量測設備即能得到立體的圖像資訊，等高線輪廓也可以檢測差異程度，做輪廓相似度的程度分析，達到辨識的功能。

關鍵字：陰影疊紋量測、影像處理、輪廓匹配、三維影像重建

Face 3D Measurement by Shadow Moiré

Student : Wei-Yu Chen

Advisor : Dr. Yun-Long Lay

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering
in
Institute of Electronic Engineering
National Chin-Yi University of Technology

Abstract

Hearing impaired people lost their hearing ability. If they want to learn the verbal language, they should mimic teacher's mouth shape to pronounce the words. Thus, in order to help hearing impaired learn speaking, this research applied a shadow Moiré method to build an optical measurement system without touching people's face to measure the face-shaped contour for creating a 3D language tutor. A digital camera was used to capture the Moiré images through an image processing to get the texture of each contour line. Each correspondence value will make smooth contour interpolation and then three-dimensional image of face was plotted.

This method for 3D measurement is simple and does not need an expensive measurement device to get precisely image information.

Keywords: Shadow Moiré measurement, image processing, contour matching, 3D graphics.

誌 謝

首先誠摯的感謝指導老師賴雲龍及楊惠貞教授，在這兩年多來細心地教導，不僅順利完成本論文，除了論文指導外，在從未接觸過的光電領域學習也讓我獲益匪淺，老師對於求學問的踏實、認真更是我學習的典範，也要感謝家人的支持，讓我無憂地專注於學習，給與求學或生活的所有需求，遭遇困難時也能給予依靠。

在這兩年的日子裡，感謝學長名村、錦豪在學業上的指導，以及在實驗室共同奮鬥的同學家佑，學弟哲暉、信甫、炳生、柏伸、尚澤、孟毅、文鎮、仁德，回想起生活點滴，課業上的討論、生日慶生、All night的趕作業，都讓我的研究生生活變得更快樂充實。

最後要感謝系主任陳文淵教授的協助，系辦的行政人員以及在碩士班幫助過我的人，接下來也要踏入社會，結束了學生生涯，但在未來的日子裡仍然會繼續努力，也會記得在勤益科技大學的美好回憶。

韋 宇

目 錄

中文摘要	-----	i
英文摘要	-----	ii
誌謝	-----	iii
目錄	-----	iv
圖目錄	-----	vi
表目錄	-----	viii

第一章	緒論	-----1
1.1	前言	-----1
1.2	研究動機與目的	-----2
1.3	文獻回顧	-----3
1.4	章節概要	-----4
第二章	三維量測技術	-----6
2.1	接觸式量測	-----7
2.2	非接觸式量測	-----8
2.2.1	非接觸主動式量測	-----9
2.2.2	非接觸被動式量測	-----16
2.3	疊紋量測	-----17
2.4	陰影疊紋法	-----26
第三章	影像處理技術	-----29
3.1	數位影像簡介	-----30
3.2	數位影像處理	-----34
3.2.1	去除參考光柵條紋	-----35
3.2.2	降低畫面雜訊及平滑化	-----44
3.2.3	增強影像對比度	-----48
3.2.4	疊紋影像分割	-----51
3.2.5	連接斷線的疊紋	-----54
3.2.6	疊紋影像細線化	-----58

3.2.7	搜尋線段紋路並標記	60
3.2.8	輪廓相似度比較	62
3.2.9	疊紋間填充灰階色度	65
第四章	重建三維模型	66
第五章	實驗結果	72
5.1	實驗環境	72
5.2	實驗結果	73
第六章	結論	85
參考文獻		86



圖目錄

圖 2.1 座標量測機多軸量測探頭實體圖	8
圖 2.2 飛時測距系統架構圖	11
圖 2.3 飛時測距量測示意圖	11
圖 2.4 三角測距法原理圖	13
圖 2.5 利用結構光投影到不同物體上，所產生的條紋扭曲現象。	15
圖 2.6 光柵疊合角度所產生不同間距的疊紋現象(a)10°(b)5°(c)3°(d)0°	20
圖 2.7 兩組不同間距形成的疊紋示意圖	21
圖 2.8 兩組不同間距光柵平行疊合的疊紋	23
圖 2.9 陰影疊紋量測架構放大圖	27
圖 2.9 疊紋影像處理流程	35
圖 3.1 原始影像疊上光柵所產生的直條紋影像	41
圖 3.2 傅立葉轉換後的影像	41
圖 3.3 使用陷波濾波器濾除十字型亮紋	42
圖 3.4 使用陷波濾波後返傅立葉轉換後的影像	42
圖 3.5 原始疊紋影像(a)濾波前(b)濾波後	43
圖 3.6 原始疊紋影像濾波前灰階值分析	43
圖 3.7 原始疊紋影像濾波後灰階值分析	44
圖 3.8 將遮罩置於原始影像上進行旋積運算	45
圖 3.9 經過均值濾波後疊紋影像	47
圖 3.10 經過均值濾波後的疊紋影像線段分析	48
圖 3.11 疊紋影像的灰階分佈圖	49
圖 3.12 均化後的直方圖	50
圖 3.13 擴展值方圖後疊紋更為清晰明顯	51
圖 3.14 抓取最灰階度最低的像素位置	52
圖 3.15 分別為(a)水平掃描及(b)垂直掃描後的最低像素點紀錄	53
圖 3.16 合併後的最低像素點紀錄	53
圖 3.17 為 B 像素點集合又可稱為膨脹結構元素	54
圖 3.18 平移位置到(-1,-1)與(-1,1)	55
圖 3.19 平移位置到(1,-1)與(1,1)	55
圖 3.20 將平移的像素作聯集後的圖像	55
圖 3.21 為 B 像素點集合又可稱為侵蝕結構元素	56
圖 3.22 將結構圓速契合至 A 像素集合保留原點(0,0)	56

圖 3.23 依序尋找出契合點並侵蝕如步驟(a)~(f)	57
圖 3.24 黑色方格為完成侵蝕後的圖像，灰色是原始圖像	58
圖 3.25 使用 Zhang-Suen 細線化過程	59
圖 3.26 搜尋到第一個像素點後，往八個方向依序尋找鄰近像素點	60
圖 3.27 完成外圈標記後	61
圖 3.28 繼續搜尋內圈並將其標記數值為 3，並依八連通搜尋標記	62
圖 3.29 完成填充灰階圖	65
圖 4.1 以不同灰階值表示高度圖例	67
圖 4.2 以 mesh 產生的三維圖像	68
圖 4.3 以 surf 產生的三維圖像	69
圖 4.4 以 surf 產生的三維圖像，並使用 shading 繪製	70
圖 4.5 以 surf 產生的三維圖像，有表面顏色明暗變化	70
圖 4.6 以圖 3.29 灰階圖轉換為 3D 的立體圖像	71
圖 5.1 立體物件量測方式架構圖	72
圖 5.2 臉部量測方式架構圖	73
圖 5.3(a)原始疊紋影像(b)以不同灰階值填充並平滑影像	74
圖 5.4 經由 MATLAB 的 mesh 指令所繪製的立體圖	74
圖 5.5(a)原始疊紋影像(b)填充灰階色度	75
圖 5.6 完成立體圖繪製	75
圖 5.7(a)原始疊紋影像(b)增強對比度	76
圖 5.8(a)分離輪廓與背景(b)填充灰階色度	76
圖 5.9 影像平滑化	77
圖 5.10 立體圖像繪製	77
圖 5.11 嘴部(a)(b)(c)連續變化擷取三張影像	78
圖 5.12 對應圖 5.11(a)(b)(c)繪製立體圖像	78
圖 5.13 全臉量測(a)原始灰階影像(b)增強對比(c)分割影像	79
圖 5.14 全臉量測(a)灰階色度填充(b)影像平滑化	79
圖 5.15 全臉量測結果圖形	79
圖 5.16 全臉量測兩種唇形變化(a)發音"U"及(b)發音"E"	80
圖 5.17 全臉量測發音"U"時的三維量測	80
圖 5.18 全臉量測發音"E"時的三維量測	80

表 目 錄

表 1 樣板一計算 Hu 矩結果	81
表 2 樣板二計算 Hu 矩結果	82
表 3 輪廓差異度比較表	83



第一章 緒論

1.1 前言

聽覺機能障礙學生由於先天病毒感染、後天疾病或外力傷害導致永久性的聽覺受損，輕度障礙者可使用助聽器輔助，借助老師的教學指導，聽障者不致於喪失語言溝通的能力[1]，但在學習過程中若有輔助的教學工具對聽障生將更有所幫助。聽障者在學習口語的過程中，必須模仿學習老師的唇形及發音，並不斷地修正，對話中會靠近發話者並會仔細觀察嘴唇的變化，瞭解其語意；聽障者學習唇語後對溝通的能力提升是有實質幫助的。

人類在語言都是模仿學習聽、說、讀、寫來完成，但對聽障生來說，聽覺障礙導致語言的學習基礎受到阻礙，無法回饋清晰的聲音修正自己的發音，造成學習上的困難。對於聽障生的溝通學習方法有很多種：手語教學、口手標音法、聽覺口語法、語調聽覺法與口語教學法等等[2]，通常透過口語教學法學習視覺讀唇、聽覺訓練、發話訓練，能瞭解別人所說的話，並發出正確的聲音給對方，在視覺讀唇練習時，注意力要非常集中，利用殘餘聽力搭配上下文連貫的嘴唇變化，發話

者不需刻意放慢速度或誇大嘴型變化，否則唇語資訊過度扭曲造成聽障生更難以理解，學生上課時以口語交談，並加強注音符號發音練習得到正確的口形發音，加強短句作文能力以得到正確的詞句用法[3]，本研究為非接觸量測發音時實際嘴形變化，提供 3D 的圖像結果，對聽障者的學習能有更大的幫助。

1.2 研究動機與目的

目前三維量測常用於工業，尤其是接觸式的量測對品質的檢測管控非常重要，但接觸式量測較為緩慢，通常會選定較特殊的幾的探測點做檢測，缺乏全面性的資料，光電科技的進步，目前也有廠商使用光學式的檢測方式，如雷射掃描，其速度較快，探測頭不接觸物體，可量測軟性物質等等優點，但光學設備價格又比接觸式的量測設備昂貴許多。

有鑒於此，本論文中以低成本量測方式，使用陰影疊紋來量測三維資訊，其最大特點就是架設簡易，只需要取像設備、光源、及光柵片即可完成，每個人都可輕易地架設，達到唇形的立體量測功能，以便於聽障生學習利用。

1.3 文獻回顧

疊紋 Moiré(莫爾)為一個法國字，人們發現將兩層絲綢重疊在一起，當光線透過後，產生一圈一圈的紋路，這就是最早發現的疊紋，科學家對此現象非常感興趣，也把此條紋稱作 Moiré Fringe，在 1871 年 Lord Rayleigh 利用疊紋技術來量測光柵的線間隔均勻程度，但當時製作光柵技術不成熟，無法證實其科學性，實際利用疊紋量測的方法是在 1948 年才提出，並在最近 50 年內有快速的發展，在疊紋的應用上，是由兩組互相重疊的直條柵線之間的干涉現象，產生明暗的條紋。

回顧一下疊紋應用，在 1970 年 Sobolewski[4]利用疊紋來量測電視機的顯示畸變、失真程度，Dirckx 與 Decraemer[5]在 1989 年提出了使用相位移法疊紋量測立體表面，以提高量測解析度，在 2002 年電子產業發展快速，能將更多的電路及中在很小的晶片上，其表面平整度，對良率佔重要的影響力，Ding[6]等人提出使用陰影疊紋及投影疊紋，用於量測表面翹曲程度量測，並且分析結果，且認為疊紋是具有可靠性的量測方式。

另外對於輪廓的匹配，在 1962 年 Hu.[7]提出了不變矩，以 7 個不變矩參數表達旋轉不變、平移不變、縮放不變，改善了直接匹配不良，

2008 年 Gandhe[8] 等人，提出使用輪廓匹配作人臉辨識，透過計算匹配率達成人臉辨識，2009 年 Chew[9] 等人在 3D 的頭像模型，使用水平分割及垂直分割，將輪廓查找出，並做匹配比較，在陰影疊紋裡，使用疊紋拓樸學量測物體的表面起伏，得到的等高線資訊，對於人臉辨識提供一個良好的辨識條件。

1.4 章節概要

本論文架構分為五個章節：

第一章 緒論

前言摘要，介紹本論文研究動機，討論過去在疊紋的應用方法，及本篇論文的架構介紹。

第二章 三維量測技術

目前應用的三維量測技術方法，依量測方式又細分為接觸式量測及非接觸式量測，其中非接觸量測又可再分為主動式及被動式量測，另外也獨立一個小節對本論文使用的陰影疊紋量測介紹。

第三章 影像處理技術

本章節裡對數位影像處理做一個基本的介紹，以及處理疊紋影像

的相關方法，包括去除影像中光柵的直條紋、影像形態學、影像切割，對影像輪廓做相似度分析。

第四章 重建三維模型

介紹地形圖原理並使用 MATLAB 重新建立三維量測圖形。

第五章 實驗結果

依據本文方法進行量測與實驗結果。

第六章 結論

對本篇論文作一總結和未來改進探討，最後是參考文獻整理。



第二章 三維量測技術

三維量測技術，用於分析地形環境或物體輪廓及表面的起伏、顏色等等，藉由量測獲得的資料可藉由電腦重建成三維的立體模型，且在應用領域有相當廣泛的用途如下：

- **工業應用領域：**

模具加工製造、逆向工程、品質檢測、加壓應力分析、汽機車製造、零件製造業等。

- **土木應用領域：**

房屋建築、地形探堪，隧道工程等。

- **醫學工程領域：**

外科手術模擬訓練、義肢設計、關節矯正、整形外科手術、齒模掃描、假牙設計等。

- **多媒體應用領域：**

藝術文物數位化展示、古文物數位 3D 建檔、遊戲物件創作等。

三維的量測，是由多種技術應用整合而成，各種不同的量測方法技術各有優缺點，量測的精密程度與成本售價也有高低之分，在量測

的方法可分為接觸式及非接觸式兩大類，其中在非接觸的量測中又可分為主動式量測和被動式量測。在此對這兩類量測方式做個簡單介紹，另外在本篇論文所使用的陰影疊紋量測方式，介紹在獨立的一節裡。

2.1 接觸式量測

透過實際接觸物體表探知深度，此種量測方式相當精準，配合光學尺作橫軸、縱軸的方向移動細微的移動，其解析度主要依據探針的大小及移動的尺度，可量測的縱深範圍大，適用於物件表面有較大的起伏變化，但量測速度緩慢，另外必須對探針頭的幾何偏差做補正，對於品質管控以接觸式量測有較佳的效果。

座標量測機(CMM, Coordinate Measuring Machine)，即是一經典的接觸式掃描儀器，在機械結構以三個互相垂直方向如左右 x 軸、前後 y 軸、上下 z 軸軌道移動探針位置，當探頭接觸物件表面時，利用光學尺量測記錄該軸的位置，經過數據處理後產生物件的量測點座標 (x, y, z) ，更有移動裝置使用空氣軸承，以去除機械移動所產生的摩擦震動，目前座標量測機已可達微米 (μm) 級的量測，座標量測機通常用於物件的尺寸量測、輪廓量測、菱角或定向量測、深度映射、蒐集雲點數位化成像。



圖 2.1 座標量測機多軸量測探頭實體圖

圖 2.1 為座標量測機(CMM, Coordinate Measuring Machine)的探針 [10]，能做到多軸轉向的探針可改變探測角度，將整個立體直角座標旋轉，以便探頭能以不同角度伸入構造較為複雜的物件，新式的探頭可以沿著物件的表面掃描式移動，以時間間隔抓取量測點的座標，又稱為掃描探頭，其精準度及速度皆比傳統的觸摸式探頭要來的好。

2.2 非接觸式量測

在非接觸量測方法，通常是利用光學方式作物件的量測，以不接觸物件的方式取得空間資料，量測時間較短，適用於軟性的物質量測，

且可以快速的量測曲面點資料，對於曲面作重建非常迅速，並無探頭幾何偏差的問題，非接觸量測可分為主動式量測與被動式量測。

所謂主動式量測是在受測的物件加入額外的能量，藉由反射能量來計算三維資訊，如雷射、可見光、紅外線、超音波、X 射線等；而被動式量測是本身不發出任何能量，以待測物反射週遭環境光輻射，提供量測資訊，這類型設備通常價格較為便宜，但此方法通常以較複雜的演算法做量測，這種以可見光視覺基礎的量測方式，正是目前視覺機器的研究主流。

以光學方式量測，受限於光照、反射、雜訊、陰影等影響，例如受測物件的表面過於光亮，鏡面反射能量過度，或材質為透明、黑色，反射能量不足等，造成量測上的困難，通常會在受測物件表面塗上白色漆或粉末，對於光學陰影處、光學對焦範圍之外區域皆造成無法量測。以下介紹幾種常用的非接觸量測方法。

2.2.1 非接觸主動式量測

- 飛時測距法：

利用光速來計算距離，是一種主動式測距方式，外加能量通常為

雷射，以發出雷射開始計時到探測物反射回到感應元件為止，由於光速 c 為一已知條件，於國際單位制被定義 1 公尺為光在 $1/299,792,458$ 秒的傳播距離，由感測器可測得時間 t ，由此可知 $(c*t)/2$ ，即可計算光行走的距離，略約計算可求得：

往返時間	距離
33ns	- 10m
3.3ns	- 1m
3.3ps	- 1mm

以此類推，準確度受限於檢測元件是否能準確地記錄時間。

比較常見的兩種量測方法，一種是使用脈衝雷射做量測，透過大量的脈衝雷射以多次的量測求反射脈衝的時間差並算出平均距離，如圖 2.2 為量測系統架構圖，透過微控制器與 TDC(Time to Digital Converter)將發射的脈衝雷射與接收的反射信號做延遲時間的計算，獲得量測距離[11]。

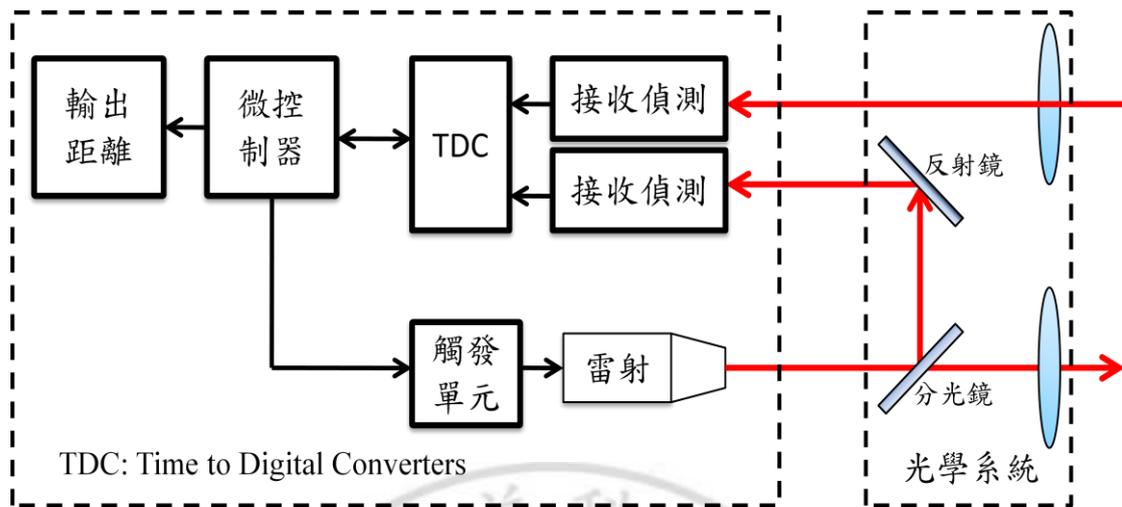


圖 2.2 飛時測距系統架構圖

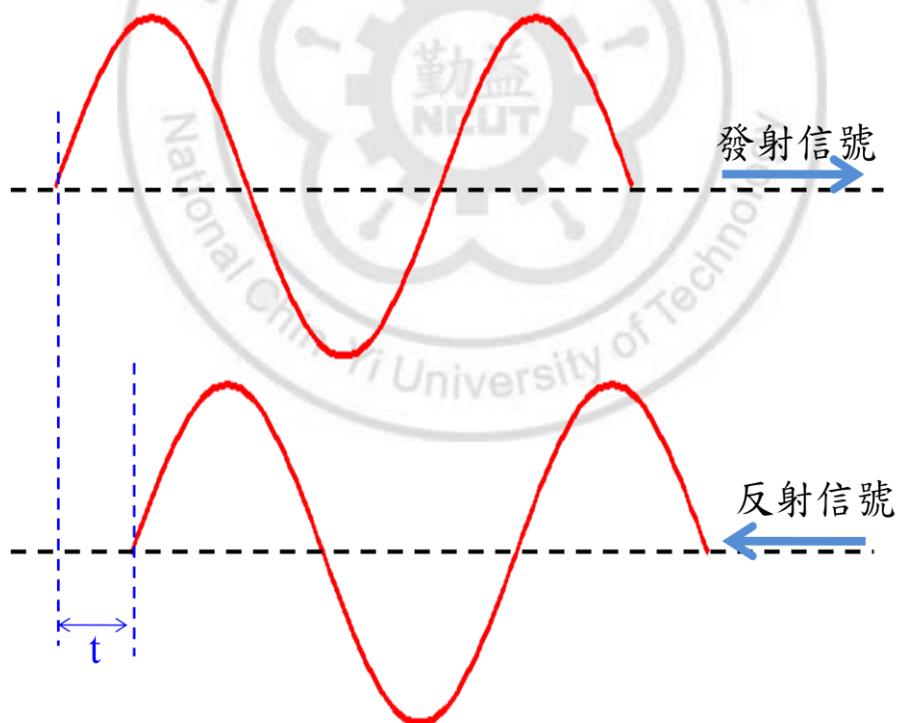


圖 2.3 飛時測距量測示意圖

另一種是使用連續的相位差計算反射延遲的時間 t 如圖 2.3，雷射光束調製成弦波，將反射的弦波與調製信號作相位差的計算，求得距離。

目前電路及處理元件的速度增快，能另外搭配快速水平或垂直的旋轉鏡，將雷射以垂直或水平的方向作空間的掃描，可將整個場景做重建，又稱雷射雷達，可在短時間內獲得大量的點資訊。

飛時測距通常運用於建築量測、隧道探勘或置於機器人上建立場景資訊，避免碰撞障礙物，另外有置於飛機上量測地形、地貌產生準確的高程模型，也應用於監測冰川變化分析等。

● 三角測距法：

因為光速非常地快，對短距離量測並不準確，若精準度要小於毫米級可使用三角測距法，此方法是一種主動式量測方法，將雷射照射於受測物件上，再經由攝影機或線型感測器偵測雷射光點的位置，以雷射源、照射在物件的雷射光點及攝影機的三個位置構成一個三角形，稱為三角測距法[12]如，對於攝影機的觀測角度，因物體的高低起伏，可測得雷射光點的位置變化，由已知的觀測固定角度來計算光點的偏

移量。另外已研發線形的雷射條紋，以線形掃描代替點狀掃描增加整個物件的量測速度。

與飛時測距之優缺點比較，飛時測距法可量測的距離較遠，但由於光速傳播速度快，些微的時間量測差將造成很大的距離變化，通常以多次量測求取平均距離來減低誤差；相對於三角測距，則是在一個有限的量測範圍，有較高的精準度，三角測距法應用於部分座標量測機，以光學式探頭取代傳統的接觸式探頭。

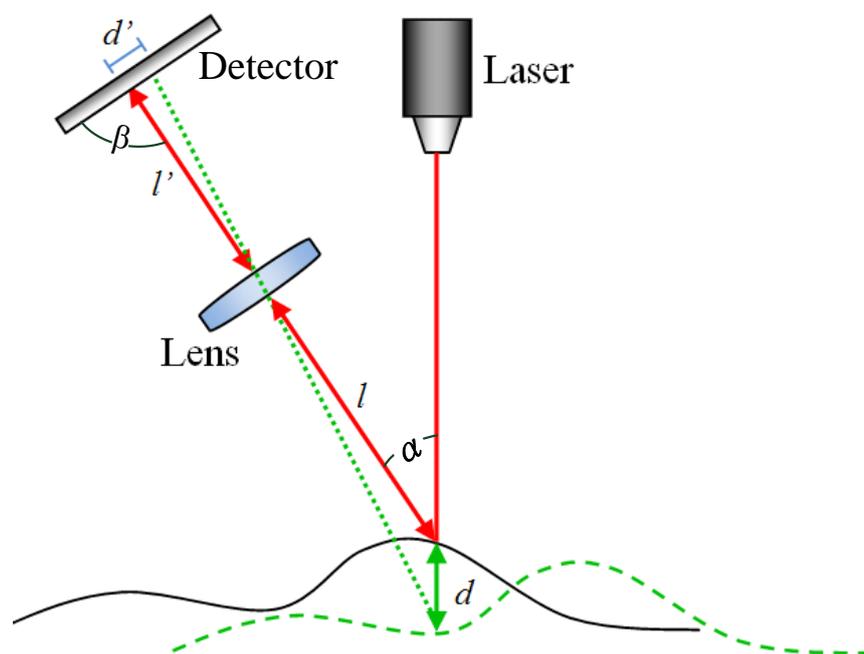


圖 2.4 三角測距法原理圖

在三角量測參考圖 2.4 量測原理圖，可由關係式(2.1)求得相對距離

變化：

$$d = \frac{ld' \sin \beta}{l' \sin \alpha - d' \sin(\alpha + \beta)} \quad (2.1)$$

- **手持式雷射掃描：**

主動式量測法，其量測原理類似於三角測距法，但使用較為方便且待測物件不必置於機械移動設備，使用者手持一線形的雷射發光源，搭配高解析度的攝影機，由於線形雷射照射於物件上，因表面的起伏產生彎曲的曲線，取像設備記錄取線的彎曲變化重建立體的模型，由於手持雷射光源，無法將照射的角度列入計算，通常會在待測的物件背景黏貼標記，用於影像定位參考點，相較於前兩項方法，手持式雷射掃描更偏重於取像後的影像處理及影像的定位及演算法。通常用於較不須精準量測的物件，如遊戲裡的立體物件輔助創作、立體藝術品建模數位展示等。

- **結構光三維成像：**

基本計算原理為雷射三角測距法之延伸，透過投影機將一定模式的光源結構，有如光柵條紋結構如圖 2.5、正弦調變光等，將條紋投影

至物體上因為表面的起伏變化如，造成條紋結構的扭曲，藉由計算扭曲程度，得知三維座標，在量測時可將結構光位移，以不同相位差，分別量測，增加量測的精準度，在表面起伏較大時產生條紋對位錯誤，也應用空間編碼技術，以不同間隔大小的光柵條紋，依序對投影物體作多次的投影，解決條紋歸屬問題。

在此方面研究更有提出以彩色條紋的結構光方法[13]，以不同顏色條紋作投影，在取像設備色彩分辨率容許範圍內，條紋間距可以更加密集。由於結構光投影，取像可以一整個視場作分析處理，速度比線形雷射掃描更為快速，也可高速分時截取應用於動態的變形物體，由於結構光投影於物體，有較高的亮度及對比度，條紋清晰，對後續影像處理較為方便，目前也逐漸應用於工業自動化檢測。

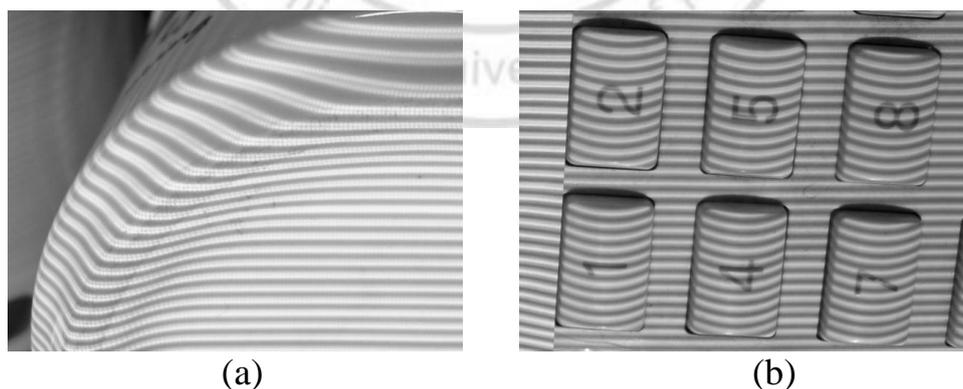


圖 2.5 利用結構光投影到不同物體上(a)杯子底部(b)電話按鍵，所產生的條紋扭曲現象。

2.2.2 非接觸被動式量測

在被動式量測，是依賴週圍環境可見光與陰影變化、輪廓偵測、多角度拍攝合成等等影像處理方法，此方法正是目前機器視覺的主要研究，目前並無法提供非常準測的量測結果，但可以提供相對的測距高度變化，以下介紹常用幾種量測的方法。

- **雙目立體視覺法：**

利用兩個攝影機，模擬類似人眼將影像疊合，推算目標物與取像設備距離，運用已知的資訊參數如兩攝影機距離、目標點成像像素距離、對焦長度等，並使用相似三角關係求解，兩張圖必須做有效的像素點匹配，才能計算出每個點的位置深度資訊[14]。

- **明暗成形法：**

在待測物上照射一固定的方向及角度，透過分析像素點位置與亮度的變化程度來計算，將亮度變化代入已預先設定的色度模型方程求解，由於未知的條件過多，必須加入限制條件，如物件的材質限定，曲率變化程度限定等等，以增加精準度[15]。

- **立體光度量測：**

此一方法是明暗成形法的延伸應用，利用多張不同光源角度的影像做分析，最常用的方式是用三張不同光源位置均勻地照射物體，符合 Lambertiana 漫射表面的反射光線可以數學模型計算出光影的灰階梯度變化，物件高度及重建 3D 表面，此方法對光源的均勻及穩定度要求較高，否則量測出的高度將會產生失真[16]。

- **輪廓法：**

通常將待測物件置於一旋轉平台，以固定的旋轉角度旋轉物件，利用影像擷取裝置，每次旋轉一個角度後將物體的外觀輪廓偵測出並記錄，至旋轉一圈後以輪廓線重建構成 3D 的表面，建構的表面精細度在於旋轉角度以及是否在影像處理中能精準地取得待測物件輪廓線，通常置於有色彩反差的單色背景上，以方便濾除背景並取得較佳的輪廓線。

2.3 疊紋量測

疊紋又稱為雲紋、莫爾，源自法國文字”Moiré”，指的是一種紡織品，傳統絲綢或合成纖維，將兩層絲綢重疊在一起後，相對地移動透

過光線將會有類似飄動的雲狀條紋出現，提出實際量測應用是在 1948 年，於近 50 年來有快速的發展，目前並應用於工業的檢測工作，產生疊紋的方法最基本的要件就是光柵(grating)，用各種不同的光柵圖案組合可以產生不同的疊紋，且可以用數學來解釋幾何現象，大致可分為下列：

對數光柵：

線條的密度由小至大排列。

輻射光柵：

將整個圓以每 3 度劃分 120 條黑色的輻射狀線條。

同心圓光柵：

以等差半徑從圓心畫圓往外增加。

圓形環光柵：

圓環半徑與圓環數的半徑成平方根正比，越往外圈線條間距越小，此種圖形黑色線分部面積與白色分布面積相等。

對數螺旋光柵：

以黑白以對數螺旋狀共 65 條，以 45 度螺旋線對旋轉延長，類似貝殼的紋路。

細紋光柵：

以黑線與白線構成，兩線對的寬度相等。

產生疊紋最常用的光柵是直線黑白間距相等的光柵片，在光柵中由透光與不透光的線對組成，相鄰的兩組黑白線對間距 p 稱為節距 (step)，光柵的密度常用的線對密度為 2 line/mm 到 100 line/mm，疊紋量測通常應用於分析較精密的位移量測、受力變形量測、輪廓量測等。

取用兩片同類型的光柵片可將一片稱為量測光柵 (Measuring Grating)，另一片稱為參考光柵 (Reference Grating)，重疊放置可觀察出疊紋的現象產生，以小於 45 度交角疊合在一起，可看到如圖 2.6 所示產生疊紋，將角度縮小可觀察到如圖 2.6(b)，疊紋的間距隨之增加，直到距離無限遠，即兩組光柵條紋為平行疊合，如圖 2.6(d)，此現象可稱為疊紋的剛體旋轉效應，將測試光柵固定，轉動參考光柵的角度 θ ，兩光柵片角度 θ 與疊紋的間距 L 的關係參考[17]。

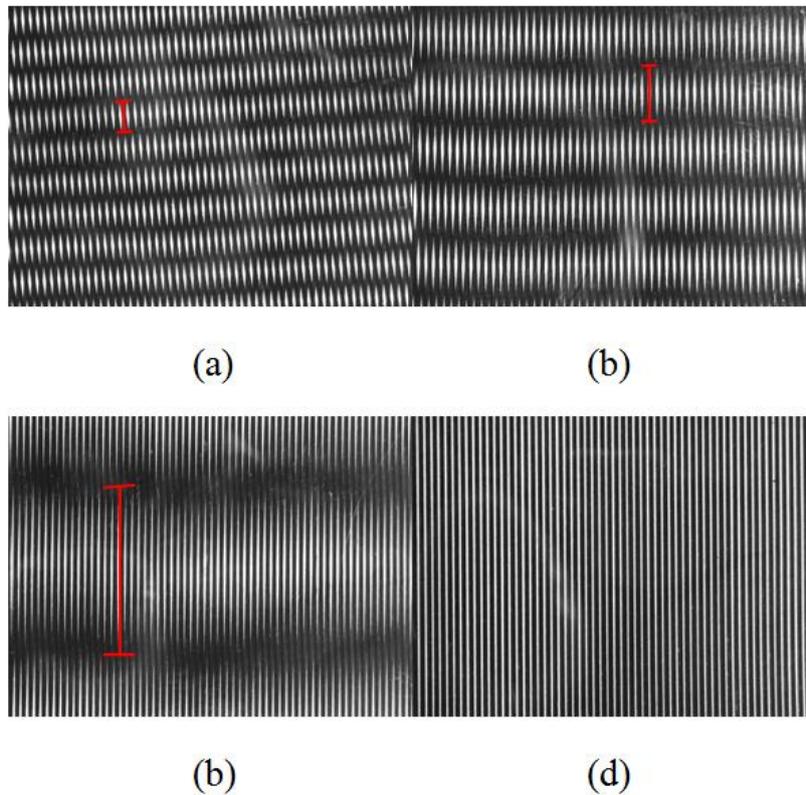


圖 2.6 光柵疊合角度所產生不同間距的疊紋現象(a)10°(b)5°(c)3°(d)0°

若柵線間距相等 $p=p'$ ，則可由以下式子表示疊紋的間距：

$$L = \frac{p}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2.2)$$

L : 疊紋間距

p : 光柵條紋間距

θ : 兩組光柵疊合夾角

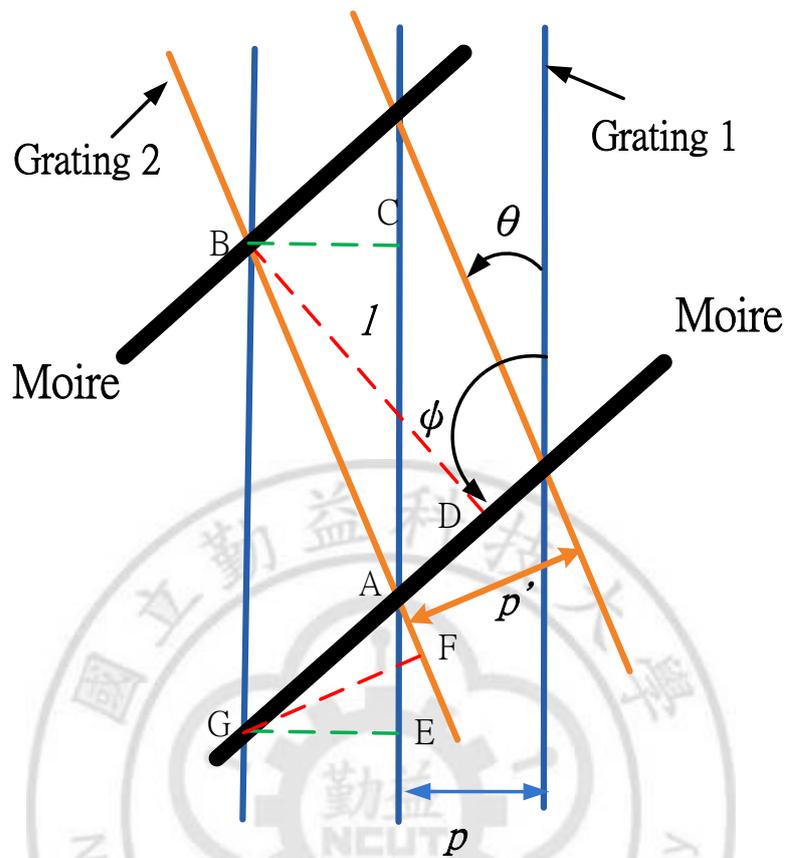


圖 2.7 兩組不同間距形成的疊紋示意圖

若轉動的 θ 角很小可簡化為

$$L = \frac{p}{\theta} \quad (2.3)$$

由此式可以量測疊紋間距 L 及光柵間 p 距來計算出疊合的角度 θ 。

另外可以得到疊紋斜率與光柵疊合夾角的關係式：

$$\tan \phi = \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2.4)$$

ϕ : 疊紋紋路與參考光柵(Grating1)之夾角

若取用不同間距之光柵，即 $p \neq p'$ 則可得關係式：

$$p' = p \frac{\sin(\phi - \theta)}{\sin\phi} \quad (2.5)$$

疊紋斜率：

$$\tan\phi = \frac{p \sin\theta}{p \cos\theta - p'} \quad (2.6)$$

疊紋間距：

$$l = \frac{p \sin\theta}{\sqrt{p^2 + p'^2 - 2pp' \cos\theta}} \quad (2.7)$$

這種疊紋的現象特性有幾個特點，疊紋圖案幾乎與光柵成垂直，且疊紋的間距相等。

若將光柵片角度固定，以水平方向移動，則可觀察出疊紋的剛體位移效應，若兩光柵間距不同，即 $p \neq p'$ 也可產生疊紋，此現象可稱為節拍或拍頻(beat)。

當 $\theta=0$ ， $\cos\theta=1$ ，則

$$l = \frac{pp'}{|p - p'|} \quad (2.8)$$

表示兩片光柵條紋間不同平行疊合所產生的疊紋間距如圖 2.8，由此式可發現當 p 與 p' 差距越大， l 越小疊紋將越密集，反之 p 與 p' 相距越小 l 就越大到不出現疊紋。

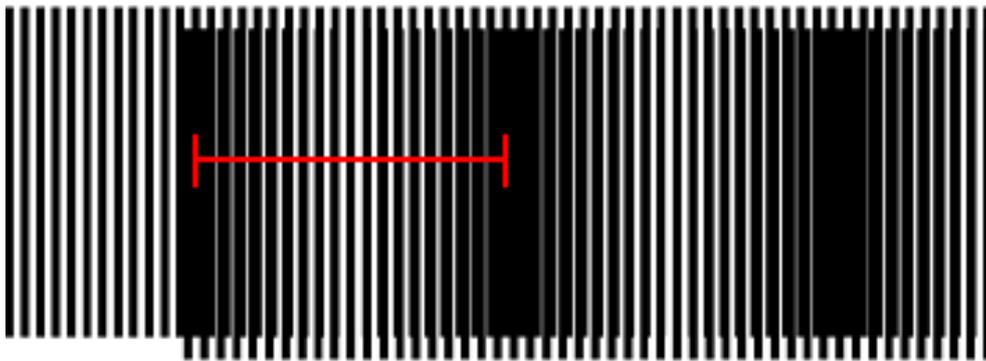


圖 2.8 兩組不同間距光柵平行疊合的疊紋

更進一步討論，當光柵轉動及位移產生的疊紋效應[18]參考圖 2.7，由 B 點做垂直線 \overline{BC} 及 \overline{BD} ，分別垂直於 C 及 D，在圖中 $\triangle ABC$ 與 $\triangle ABD$ 利用正弦定理，其 \overline{AB} 是這兩個三角型的共邊，可得關係式：

$$\frac{p}{\sin\theta} = \frac{\overline{AB}}{\sin(\pi/2)} = \frac{l}{\sin(\phi - \theta)} \quad (2.9)$$

把式中的三角函數展開可得：

$$\tan\theta = \frac{p\sin\phi}{l + p\cos\phi} \quad (2.10)$$

由上式可得到旋轉角 θ 。

由圖 2.7 中 G 點做垂直線 \overline{GE} 及 \overline{GF} ，分別垂直於 E 及 F， \overline{AG} 是 $\triangle AGE$ 與 $\triangle AGF$ 這兩個三角形的共同邊，可得關係式：

$$\frac{p\sin\phi}{\sin(\pi - \phi)} = \frac{\overline{AG}}{\sin(\pi/2)} = \frac{p'}{\sin(\pi - \theta)} \quad (2.11)$$

可得到：

$$p' = \frac{p\sin(\phi - \theta)}{\sin\phi} \quad (2.12)$$

將上式展開整理後可得：

$$\tan\phi = \frac{p\sin\theta}{p\cos\theta - p'} \quad (2.13)$$

將上式代入三角公式

$$\sin\phi = \frac{\tan\phi}{\sqrt{1 + \tan^2\phi}} \quad (2.14)$$

可得到

$$\sin\phi = \frac{p\sin\theta}{\sqrt{p^2\sin^2\theta + (p\cos\theta - p')^2}} = \frac{p\sin\theta}{\sqrt{p^2 + p'^2 - 2pp'\cos\theta}} \quad (2.15)$$

由式(2.9)與式(2.12)可得：

$$p\sin(\phi - \theta) = l\sin\theta = p'\sin\phi \quad (2.16)$$

$$l = p'\sin\phi/\sin\theta \quad (2.17)$$

將式(2.15)帶入上式可得到

$$l = \frac{pp'}{\sqrt{p^2\sin^2\theta + (p\cos\theta - p')^2}} = \frac{pp'}{\sqrt{p^2 + p'^2 - 2pp'\cos\theta}} \quad (2.18)$$

運用三角公式

$$\sin\theta = \frac{\tan\theta}{\sqrt{1 + \tan^2\theta}} \quad (2.19)$$

及式(2.10)整理後得到：

$$p' = \frac{l}{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{p}\right)^2 + 2\left(\frac{l}{p}\right)\cos\phi}} \quad (2.20)$$

從上式可計算出疊紋距離 l 變化後與 p' 的關係，由式(2.13)或(2.14)可以

計算出在不同光柵間距 p 、 p' 和 θ 之間的關係。

2.4 陰影疊紋法

疊紋是把兩個光柵片疊何產生另一種紋路，陰影疊紋只使用一片光柵當作參考光柵置於待測物前，光線透射後在待測產生陰影，形成一組虛擬光柵，我們稱之為陰影光柵，如圖 2.9 為陰影疊紋的量測架構，此時所觀測到的干涉條紋是由光柵陰影與參考光柵疊合而成，光柵的大小必須注意不能太細密產生繞射效應，且能夠在物體表面產生清晰的直線條紋陰影。

這裡說明陰影疊紋形成原理參考圖 2.9，在待測物前放置一片參考光柵，其中一個平行光束以 θ_1 角照射到光柵 A，光柵線段陰影投射置物體表面形成亮點 B，以 θ_2 為觀察角度，C 正好為陰影疊紋與參考疊紋亮點部分，因為光源為多束的平行光線，產生一系列的亮點與被疊紋遮蔽的暗點，形成疊紋[19]。

定義線段 $\overline{AC}=l$ ，可觀察出 l 長度式參考光柵間距 p 的整數倍數：

$$l = Np \quad (2.21)$$

$$N=0,1,2,3,\dots$$

藉由三角公式得知

$$l = \overline{AO} + \overline{OC} = d \tan \theta_1 + d \tan \theta_2 \quad (2.22)$$

代入(2.21)可得到

$$d = \frac{Np}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} = \frac{Np \times o}{m} \quad (2.23)$$

若光源平行，且觀測距離較遠， θ 角度變化很小可視為相等若觀察角為 $\theta_2=0$ ，則式(2.23)可改寫成：

$$d = \frac{Np}{\tan \theta_1} \quad (2.24)$$

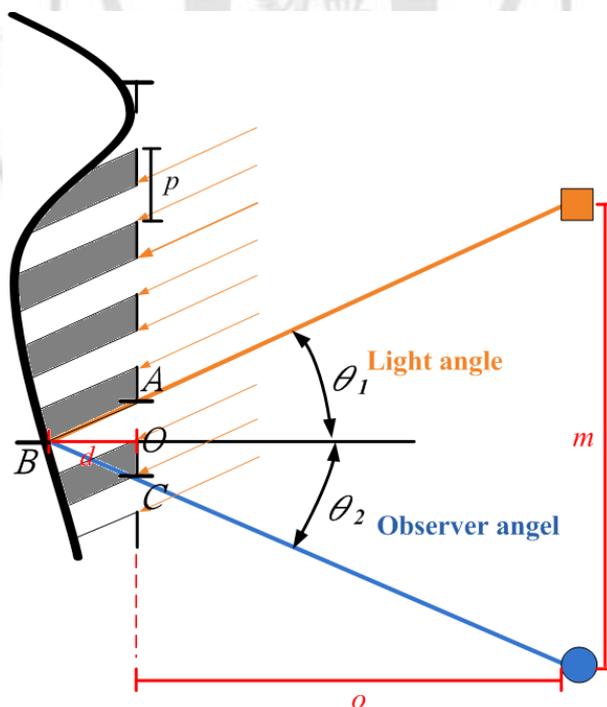


圖 2.9 陰影疊紋量測架構放大圖

θ_1 光源入射角

θ_2 :取像設備觀測角

d :待測物體與參考光柵距離

p :光柵的間距

其中 p 與 θ 角度為已知數根據條紋 N 即可計算出相對應的 d 值，從式 (2.23) 中可以對每條疊紋計算出深度變化，深度間距是一個定值，由此可得知每條疊紋為一等高線，在此我們可以對每一圈疊紋標號以利計算。

在種非接觸量測方法以陰影疊紋為最省成本，也是最簡易架設的，以等高線顯示讓觀察者更能直覺地瞭解表面的起伏，且改變光源角度及光柵的間隔距離，即可改變量測解析度，非常適合用於量測物體的外部輪廓，也是本篇論文使用此方式量測的主要原因。

第三章 影像處理技術

在生活中，人類五個感官之中對於訊息的接收視覺與聽覺占了大部分，尤其以視覺最為直接與重要，任何詳盡文字敘述的投影片或報告比不上一張圖片說明來的清晰瞭解，目前電腦發展快速，數位相機、掃描器等等曲項設備能快速地將自然界的景象轉換為數位的信號儲存或處理，數位影像處理的目的廣泛，通常處理對象可分為兩種。

- **對象為人類：**

目的為改善影像輸出，如加強影像品質、降低雜訊、增強對比、清晰度、修復、編碼、壓縮傳輸…等。

- **對象為機器視覺：**

目的為影像分割、邊緣偵測、特徵值擷取、降低細節程度…等，以利於電腦更適合自動辨識。

在本節裡將會介紹本論文使用到的影像處理方法及概念，著重在灰階的影像處理。

3.1 數位影像簡介

數位影像是以有限的數值來表示二維影像，透過取樣例如一張 320×240 的影像就代表是 76800 個點所組成的，要得到更清晰的影像就必須以更多的點來取樣，取樣的結果又可稱為該影像的解析度。接下來是量化，例如一張灰階的影像通常是以 8bit 即 0~255 個灰階度層級來表示每個像素點的值。若有一 $m \times n$ 影像可以 $f(x,y)$ 表示在矩陣座標 (x,y) 的灰階值，可以下列矩陣來表示一張灰階影像的資訊[20]：

$$G = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,n-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(m-1,0) & f(m-1,1) & \dots & f(m-1,n-1) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

另外在數位影像的應用中，有一統計影像灰階值的表式方式為直方圖，其橫坐標表示灰階層次，縱座標表示該灰階值得像素點統計，可由直方圖的分布得知影像的亮度、灰度分佈關係：

影像較亮：直方圖聚集在數值較高的灰階值區域。

影像較暗：直方圖聚集在數值較低的灰階值區域。

對比較低：直方圖聚集在某一數值，寬度較窄。

要增強影像的反差或對比度可透過直方圖擴展法進行修正，在下節的

數位影像處理將會做詳盡的介紹。

彩色影像中可利用三個函數來個別表示紅、綠、藍三種顏色的色階紀錄如 $f_R(x, y)$ 、 $f_G(x, y)$ 、 $f_B(x, y)$ ，為了描述正確的顏色，必須要建立色彩空間模型，也會在不同模型中做轉換，對於彩色影像處理應用的領域也會使用不同的顏色模型，以下介紹常見的模型[21]。

● RGB 色彩模型

RGB 三原色光模型，分別代表紅色(Red)、綠色(Green)、藍色(Blue)在一個立體座標的 x 軸、y 軸及 z 軸，原點(0, 0, 0)為黑色，通常 3 個原色以深至淺 255 個階層，總共可表現的顏色為 $256 \times 256 \times 256 = 1670$ 萬色使用 24bit 來儲存表示。

在 RGB 模型中也常使用 RGB 正規化，應用於處理影像，例如以正規化後的 r 值與 g 值取代原有的 RG，降低 R 與 G 對光線的敏感程度。

RGB 正規化的轉換公式如下：

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (3.2)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (3.3)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (3.4)$$

另外我們對於影像識別常會把彩色 RGB 影像轉換為灰階色彩後做處理，可利用以下公式線性計算出每個像素點的灰階值：

$$Gray = 0.2989 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (3.5)$$

● YCrCb 色彩模型

YcrCb 色彩模型，Y 代表亮度、Cb 代表藍色差、Cr 紅色差，以 8bit 的 RGB 取樣轉換公式如下：

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.504 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

YcrCb 色彩模型應用廣泛，在 JPEG 影像格式、MPEG 影片格式、一些攝影器材、數位電視等等皆利用此種色彩空間模型。

● YIQ 色彩模型

YIQ 色彩空間，Y 代表亮度，I、Q 兩個分量則為顏色的色偏，I 分量表是橙色到青色的變化，Q 代表紫色到黃綠色的變化，此種色彩空間為 NTSC 的電視式統所採用，以下公式為 GRB 轉換為 YIQ 的轉換方法：

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

● HSV 色彩模型

HSV 色彩空間模型，H 代表色相(Hue)、S 飽和度(Saturation)、數值(Value)，V 也可稱為明度或亮度，是一種將 RGB 的非線性轉換方式，經常利用在電腦圖學的颜色選擇，因為使用者可以快速的選擇想要的色彩，首先選擇顏色，然後可以明確的選擇所需的飽和度及亮度，其對顏色分割有不錯的效果，以下為 RGB 轉換 HSV 的公式：

$$H = \begin{cases} \left(6 + \frac{G - B}{MAX - MIN}\right) \times 60, & \text{if } R = MAX \\ \left(2 + \frac{B - R}{MAX - MIN}\right) \times 60, & \text{if } G = MAX \\ \left(4 + \frac{R - G}{MAX - MIN}\right) \times 60, & \text{if } B = MAX \end{cases} \quad (3.8)$$

$$S = \frac{MAX(R, G, B) - MIN}{MAX(R, G, B)} (R, G, B) \quad (3.9)$$

$$V = MAX(R, G, B) \quad (3.10)$$

以上色彩空間模型可發現，RGB 空間模型色彩會因為光源亮度的強弱產生明顯的變化，其他的色彩空間常會將亮度與色調做分離，這使得在影像處理中可以降低光線亮度所造成的影響。

3.2 數位影像處理

數位影像處理指利用電腦或圖形處理器將影像進行降噪、增強、復原、分割、特徵擷取、識別處理、隱藏資訊…等影像相關理論方法，其應用範圍非常廣泛，例如傳播媒體的影像效果、郵遞區號編號自動辨識分類、條碼識別、指紋或掌形辨識、醫學領域 X 光照片、CT 斷層掃描…等等皆須使用到數位影像處理以幫助各種功能實現。

影像處理可分為點處理、鄰域處理以及轉為頻域後做處理：

- **點處理：**

不考慮周圍的像素，直接對每個像素做計算、置換。

- **鄰域處理：**

指定的像素點計算必須將周圍的數值列入計算。

- **頻域轉換：**

將影像透過傅立葉轉換後，影像畫面將以頻率變化排列顯示，在頻域處理可以做到空間濾波的效果，也可做到其他方式無法得到的結果[22]。

在這個小節裡將介紹在取得疊紋影像後，使用的影像處理方法，其處理流程如圖 3.1。

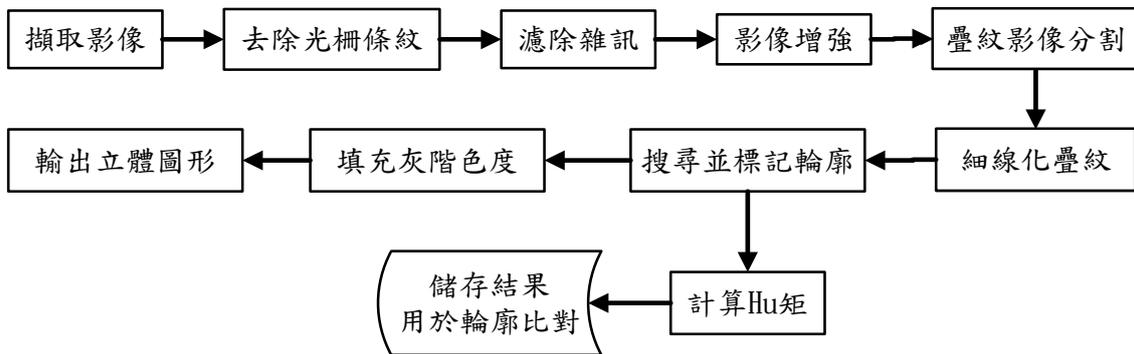


圖 3.1 疊紋影像處理流程

3.2.1 去除參考光柵條紋

拍攝疊紋影像時如果對焦到光柵片，而不是疊紋上時，或光柵條紋間距太大，擷取疊紋影像後，將會產生很明顯的直條紋如圖 3.2，直條紋對於疊紋影像是不要的，可視為雜訊，這些雜訊整個影像影響是全面性的，且可視為一種週期性的雜訊，必須使用頻率域的濾波才能夠去除，也就是要經過傅立葉，將影像轉為頻域後做處理；在影像中低頻代表較為粗糙部分變化量較少的部分，高頻代表畫面較細膩的部分。

● 離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform)

由於電腦只能夠處理離散數據，所以在連續的傅立葉轉換在電腦上是不可行的，必須將連續的函數離散化，且要將無限大的演算轉換，

作有限制的終結，將 $f(x)$ 與 $F(x)$ 寬度分割為 N 個間隔，一維的離散傅立葉轉換為

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (3.11)$$

$$k \in [0, 1, 2, 3, N-1]$$

其反轉換為

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (3.12)$$

$$n \in [0, 1, 2, 3, N-1]$$

對於擴展到二維傅立葉轉換，假設原始矩陣是 $f(x, y)$ ， x 與 y 為矩陣元素，傅立葉轉換後輸出矩陣為 $F(u, v)$ ，假設索引 $M \times N$ 矩陣的 x 索引範圍為 0 到 $M-1$ ， y 索引範圍 0 到 $N-1$ ，以下為二維的離散傅立葉轉換公式

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-2\pi j \left(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N}\right)\right] \quad (3.13)$$

其反轉換為

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp\left[2\pi j \left(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N}\right)\right] \quad (3.14)$$

由於離散傅立葉轉換計算量非常大，實際做轉換時會利用快速傅立葉轉換，增快計算速度。

- **快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform)**

快速傅立葉轉換可將離散傅立葉轉換的運算複雜度降低。

令

$$W_N = \exp\left(\frac{-j2\pi}{N}\right) \quad (3.15)$$

可把式(3.11)、(3.12)改寫為

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) W_N^{kn} \quad (3.16)$$

$$k \in [0, 1, 2, 3, \dots, N-1]$$

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) W_N^{-kn} \quad (3.17)$$

$$n \in [0, 1, 2, 3, \dots, N-1]$$

也可由矩陣相乘運算來實現

$$\begin{bmatrix} F(0) \\ F(1) \\ \vdots \\ F(N-1) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} W_N^{00} & W_N^{00} & \cdots & W_N^{0(N-1)} \\ W_N^{10} & W_N^{11} & \cdots & W_N^{1(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_N^{(N-1)0} & W_N^{(N-1)1} & \cdots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(0) \\ n(1) \\ \vdots \\ n(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

利用 W 的週期性與對陣性，對傅立葉轉換作一系列的分解組合，將整個運算過程轉變為迭代運算，以節省計算次數，達到快速傅立葉轉換。

將式(3.16)的 $f(n)$ 分成兩部分，分別為偶數部分 $f(2n)$ 與奇數部分 $f(2n+1)$ ， $n=0,1,2,\dots,N/2-1$ ，可改寫為下列式子：

$$F(k) = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n) W_N^{k2n} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n+1) W_N^{k(2n+1)} \right] \quad (3.19)$$

其中

$$W_{2N}^k = W_N^{\frac{k}{2}} \quad (3.20)$$

將式(3.20)代入(3.19)可得到

$$\begin{aligned}
F(k) &= \frac{1}{N} \left[\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n) W_N^{\frac{kn}{2}} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n+1) W_N^{\frac{kn}{2}} W_N^k \right] \\
&= \frac{1}{N} \left[\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n) W_N^{\frac{kn}{2}} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n+1) W_N^{\frac{kn}{2}} \right] \\
&= F_0(k) + F_1(k) W_N^k \tag{3.21}
\end{aligned}$$

式(3.21)中，

$$F_0(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n) W_N^{\frac{kx}{2}} \tag{3.22}$$

$$F_1(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2n+1) W_N^{\frac{kx}{2}} \tag{3.23}$$

$F_0(k)$ 和 $F_1(k)$ 是 $f(n)$ 和 $f(2x+1)$ 的 $N/2$ 點的傅立葉轉換， $F_0(k)$ 和 $F_1(k)$ 的

週期為 $N/2$

$$F_0\left(k + \frac{N}{2}\right) = F_0(k) \quad F_1\left(k + \frac{N}{2}\right) = F_1(k) \tag{3.24}$$

由(3.21)可得到

$$F\left(k + \frac{N}{2}\right) = F_0\left(k + \frac{N}{2}\right) + F_1\left(k + \frac{N}{2}\right)W_N^{k+\frac{N}{2}} \quad (3.25)$$

$$W_N^{k+\frac{N}{2}} = W_N^k W_N^{\frac{N}{2}} = -W_N^k \quad (3.26)$$

將式(3.26)代入(3.25)可得到

$$\begin{aligned} F\left(k + \frac{N}{2}\right) &= F_0\left(k + \frac{N}{2}\right) + F_1\left(k + \frac{N}{2}\right)W_N^{k+\frac{N}{2}} \\ &= F_0(u) - F_1(u)W_N^k \end{aligned} \quad (3.27)$$

由式(3.21)和式(3.27)可將傅立葉轉換分成兩個 $N/2$ 點的傅立葉轉換，由式(3.22)和(3.23)得到 $F_0(k)$ 和 $F_1(k)$ ，代入式(3.21)後求出 $k=0,1,2,\dots,N/2-1$ 的傅立葉轉換，可見計算量減少了。

圖 3.2 是原始影像疊上了光柵片所產生的影像，有很嚴重的直條紋雜訊，經過傅立葉轉換後的影像如圖 3.3，可觀察出有十字的亮紋，在轉換為頻域後，圖形的中心代表低頻，越往外頻率越高頻，可使用陷波濾波器如圖 3.4，之後將影像做反轉換回空間域的影像如圖 3.5，黑色條紋的影像雜訊影響明顯已經降低。

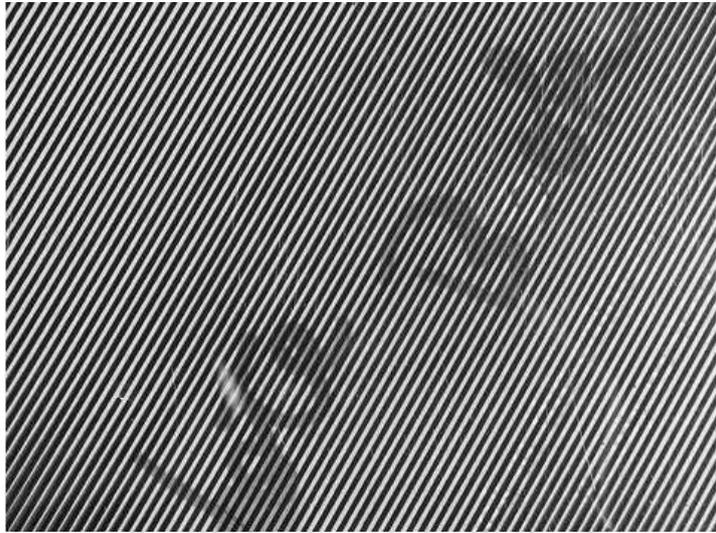


圖 3.2 原始影像疊上光柵所產生的直條紋影像

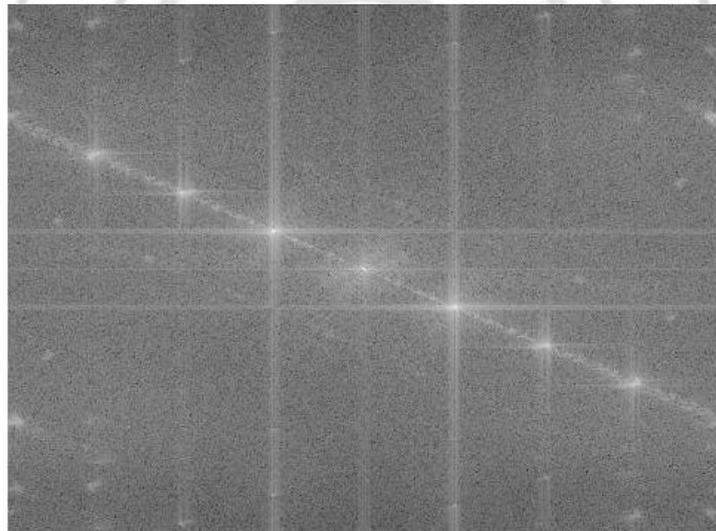


圖 3.3 傅立葉轉換後的影像

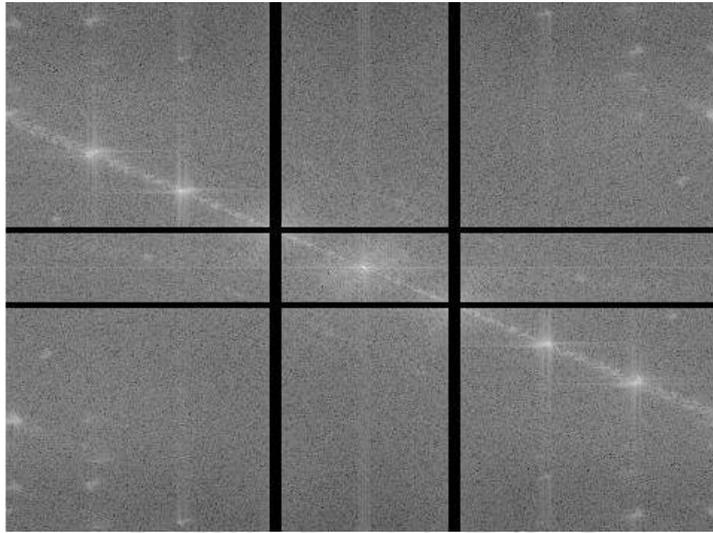
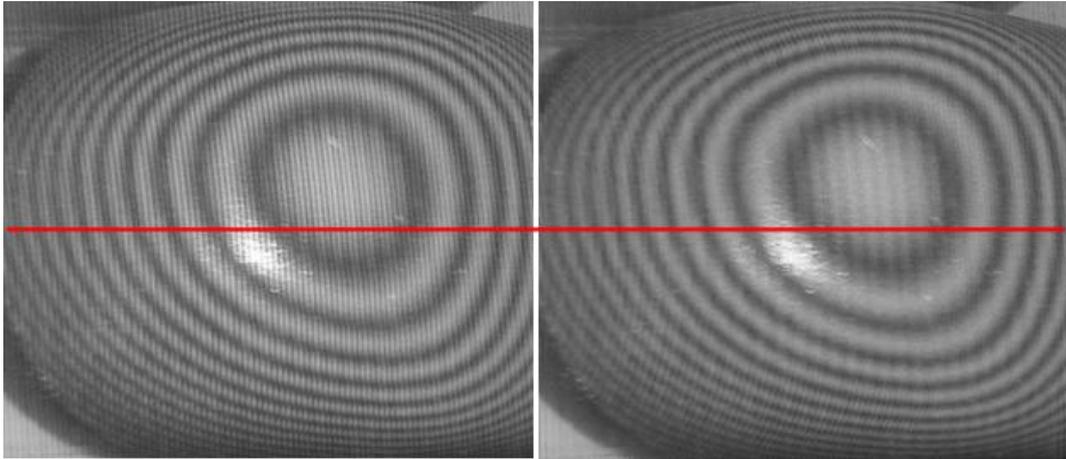


圖 3.4 使用陷波濾波器濾除十字型亮紋



圖 3.5 使用陷波濾波後返傅立葉轉換後的影像



(a)

(b)

圖 3.6 原始疊紋影像(a)濾波前(b)濾波後

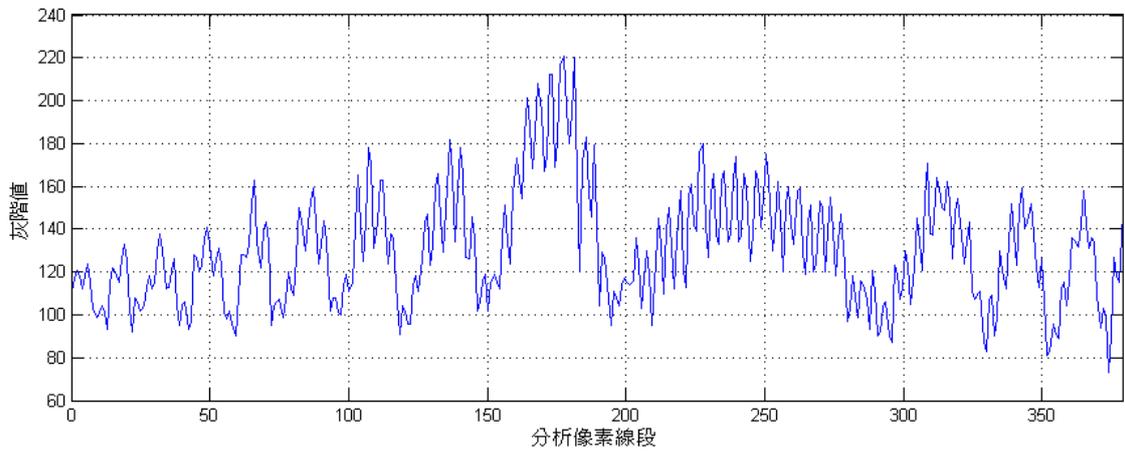


圖 3.7 原始疊紋影像濾波前灰階值分析

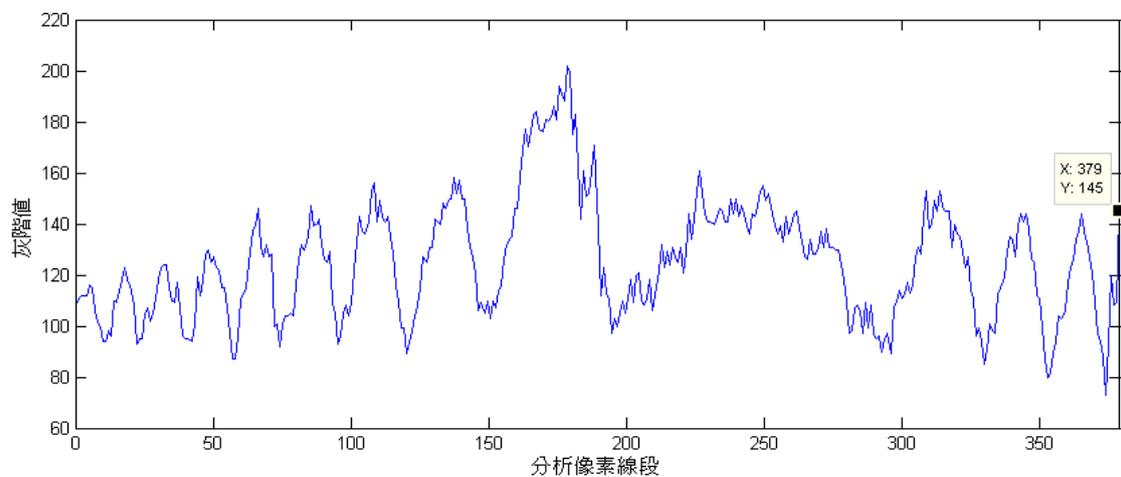


圖 3.8 原始疊紋影像濾波後灰階值分析

我們實際對一個物件做陰影疊紋量測，可以看到如圖 3.6(a)為量測物件上疊了一片光柵所產生的直條紋影響，圖 3.6(b)是濾波後的影像，可明顯發現直條紋的影響已經減少許多，圖 3.7 為濾波前的灰階分析圖，圖 3.8 為濾波後的灰階分析圖，可發現曲線已較為平滑。

3.2.2 降低畫面雜訊及平滑化

在取得疊紋影像時，並不需要過多的細節資訊，應該是說畫面過多細節時會造成疊紋紋路判斷的困難度，在疊紋只需分析黑色疊紋的位置並將其分割，通常可使用空間濾波，或轉為頻率域做低通濾波，在空間濾波可使用空間遮罩卷積、或使用高斯濾波，如式(3.28)是一個

均值濾波器遮罩，其中”*”代表指定的輸出位置像素：

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 * & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

P ₀	P ₁	P ₂	P ₀₃	P ₀₄
P ₅	P₆	P ₇	P ₈	P ₉
P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄
P ₁₅	P ₁₆	P ₁₇	P ₁₈	P ₁₉
P ₂₀	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄

圖 3.9 將遮罩置於原始影像上進行旋積運算

以式(3.28)的遮罩例子對於圖 3.9 來計算其方法為

$$P_6 = \frac{1}{9} (P_0 + P_1 + P_2 + P_5 + P_6 + P_7 + P_{10} + P_{11} + P_{12}) \quad (3.29)$$

計算完畢後計算下一個像素點依序為 P₇、P₈、P₁₁、P₁₂、P₁₃、P₁₆、P₁₇、

P₁₈。以數學表達方式為

$$P(x, y) = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n W(i, j) I(x - i, y - j) \quad (3.30)$$

$W(i, j)$ 遮罩大小是 $(2m+1)(2n+1)$ ，例 3×3 的遮罩 $m=1, n=1$ ； 3×5 的遮罩 $m=1, n=2$ ， I 為原始圖像、 P 為修改後圖像。

進行運算可發現幾個問題：

- **邊界問題：**

當遮罩移至影像邊緣時會缺少許多參考像素，通常使用幾種方法一種是忽略邊緣，只對能夠計算的像素做處理，其結果圖形將會比原來的小，另一種方法是將邊界補零以便計算，但有可能會產生影像邊緣，第三種方法是擴充影像，複製邊緣影像往外擴充，能夠正確的計算邊緣的像素點。

- **計算量問題：**

遮罩的旋積運算量較大，以 3×3 的遮罩如式(3.29)計算需要 9 次的乘法、8 次加法、1 次除法，若影像較大則運算量大為增加，所以遮罩大小不能過大，也可選用可分離的遮罩執行兩次運算，一次水平遮罩，一次垂直遮罩，如下

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 * & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 * \\ 1 \end{bmatrix} \frac{1}{3} [1 \quad 1 * \quad 1] \quad (3.31)$$

圖 3.10 是經過 3×3 的均值濾波器運算之後的影像，由分析線段像素圖 3.11 分析可發現疊紋影像已經較為平滑。

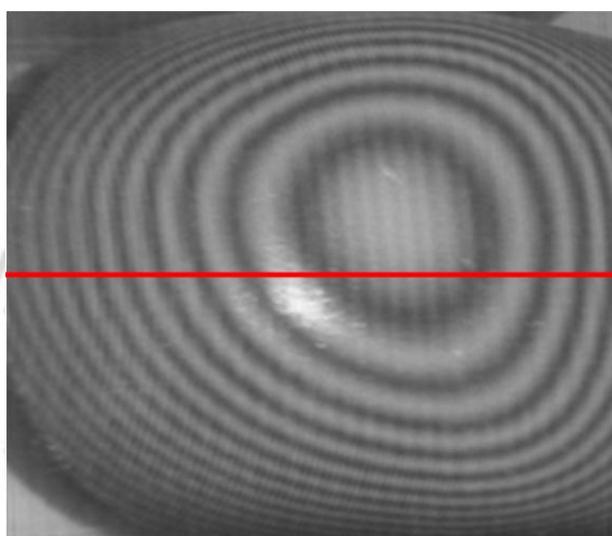


圖 3.10 經過均值濾波後疊紋影像

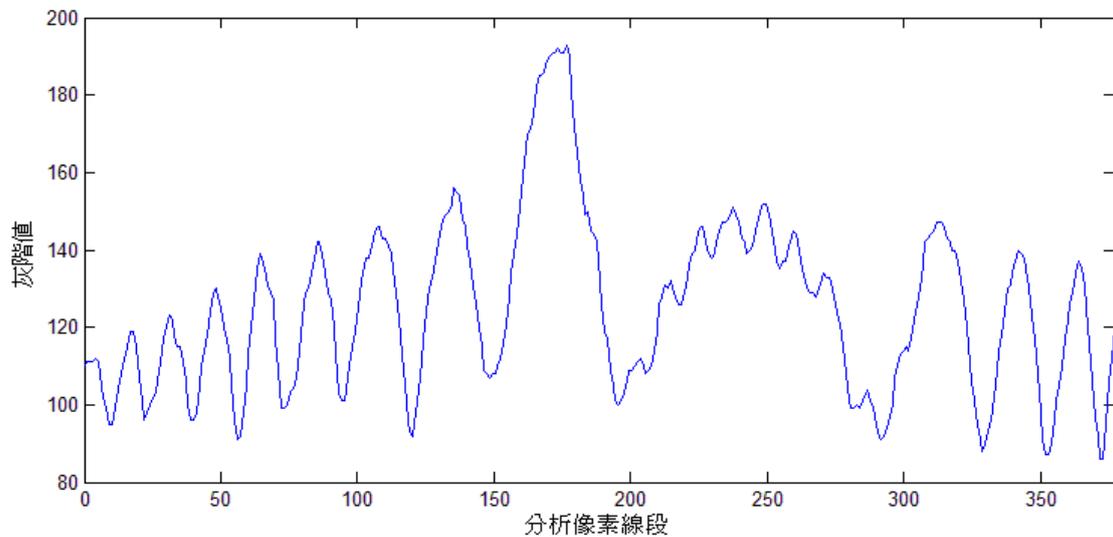


圖 3.11 經過均值濾波後的疊紋影像線段分析

3.2.3 增強影像對比度

接下來的步驟是將對比度增強以增加疊紋的顏色深度，以便做影像的分割，使用的做法通常為改變影像像素的灰度分佈圖，也稱為影像直方圖，如圖 3.10 透過 MATLAB 直方圖分析結果為圖 3.12，在圖中，橫坐標代表影像灰階值，縱座標代表每個灰階值出現的像素點次數，直方圖有幾個特點：

- 具有疊加性

直方圖可由圖片各部份的值方圖總合而成。

- 不包含圖像素位置資訊

直方圖指表現整張影像的灰階分布位置，及灰度的像素點位置與值方圖無關係，不同的影像可能會有近似的直方圖。

- 整體的影像明亮度

對於較暗的影像，直條圖形會聚集在灰階度較低的部分；對於較亮的影像，直條圖形會聚集在灰階值較高的部分；直方圖若是均勻地分布在所有的像素，代表該影像可能有較高的對比度，反之若值方圖聚集在某個小範圍代表影像色階較接近，對比度較低。

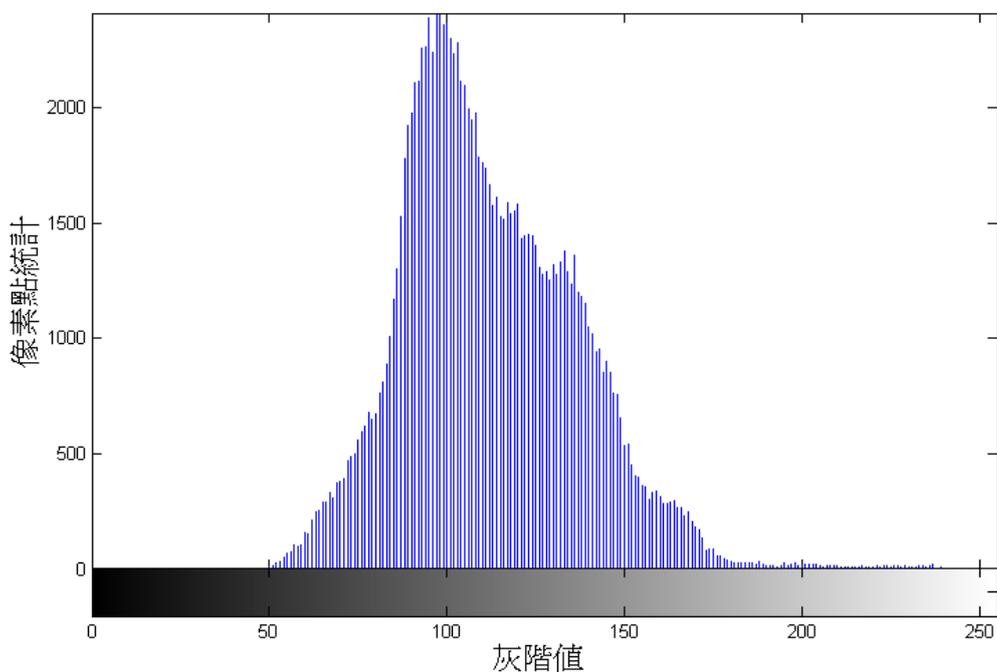


圖 3.12 疊紋影像的灰階分佈圖

直方圖等化方法：

這是一種透過機率計算的值方圖擴展方法，把原始影像的值方圖改變為均勻分布的樣式，讓灰度範圍增加，以增加影像的對比度。

其轉換的公式如下

$$L_i = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n} \quad (3.32)$$

影像中有不同的灰階層次 $0、1、2\dots k+1$ ， n_i 為在影像中出現了灰階值為 i 的個數， n 表示影像像素總個數。

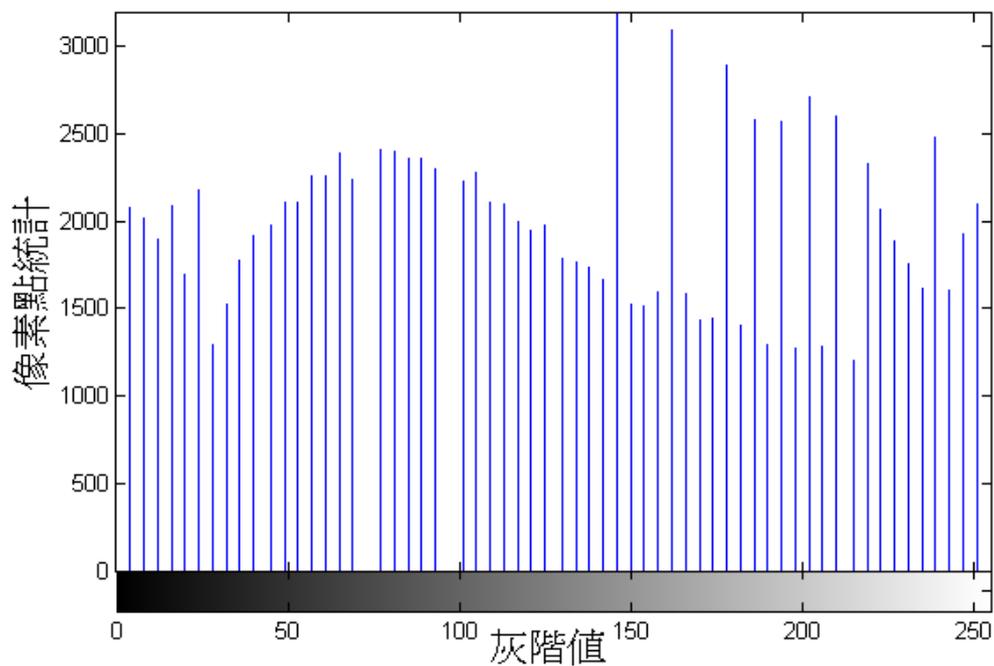


圖 3.13 均化後的直方圖

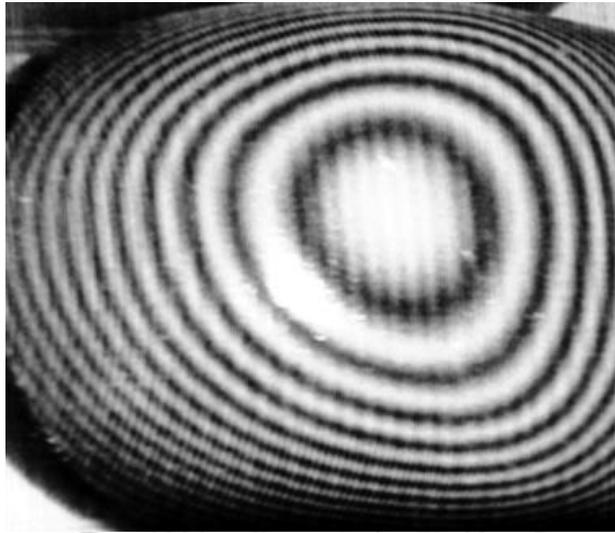


圖 3.14 擴展值方圖後疊紋更為清晰明顯

3.2.4 疊紋影像分割

此步驟最主要是將一圈一圈的疊紋影像做分割，使用閾值分割法，將灰階度大於或小於某個數值，將其分為兩類，也就是只有兩種像素值，可將疊紋與其他背景做分離，另一種方法是使用邊緣偵測濾波器遮罩做影像分割，如 Sobel 濾波器。

可以分別偵測垂直的邊緣

$$C_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0^* & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

與水平的邊緣

$$C_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0^* & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

另外可以分析每個影像將最低值抓取出來如圖 3.15，以水平與垂直掃描影像分析出最暗的反折點，並將影像位置儲存至新的影像陣列裡，對於掃描疊紋切線部分可能較難以判斷，甚至誤判導致雜訊產生。

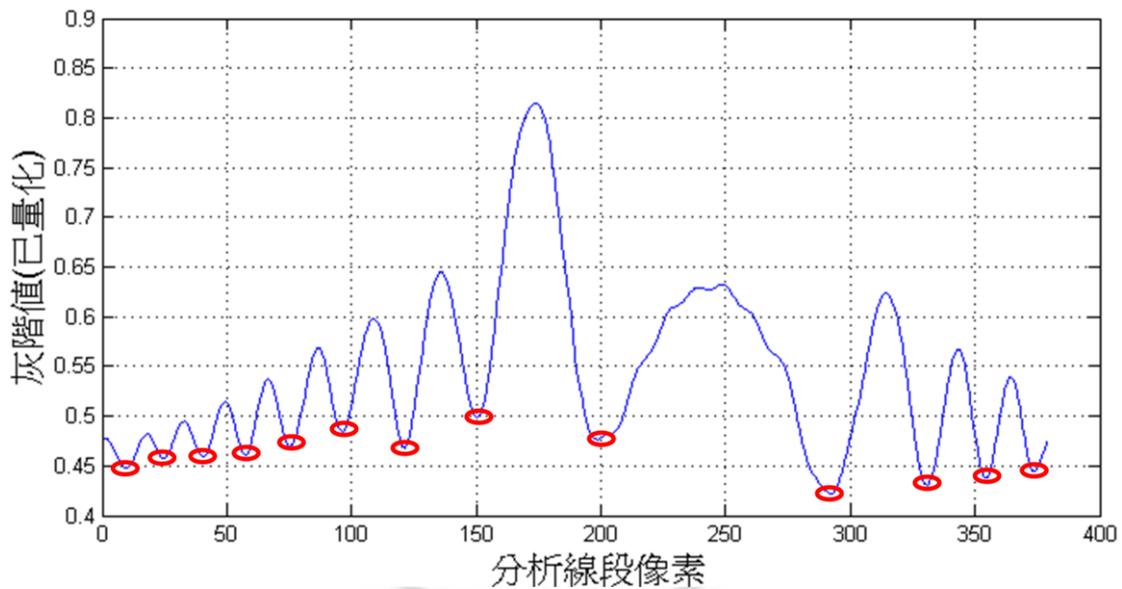


圖 3.15 抓取最灰階度最低的像素位置

分別抓取水平及垂直，最後將兩張影像像素點合併產生如圖 3.17 的疊紋影像。

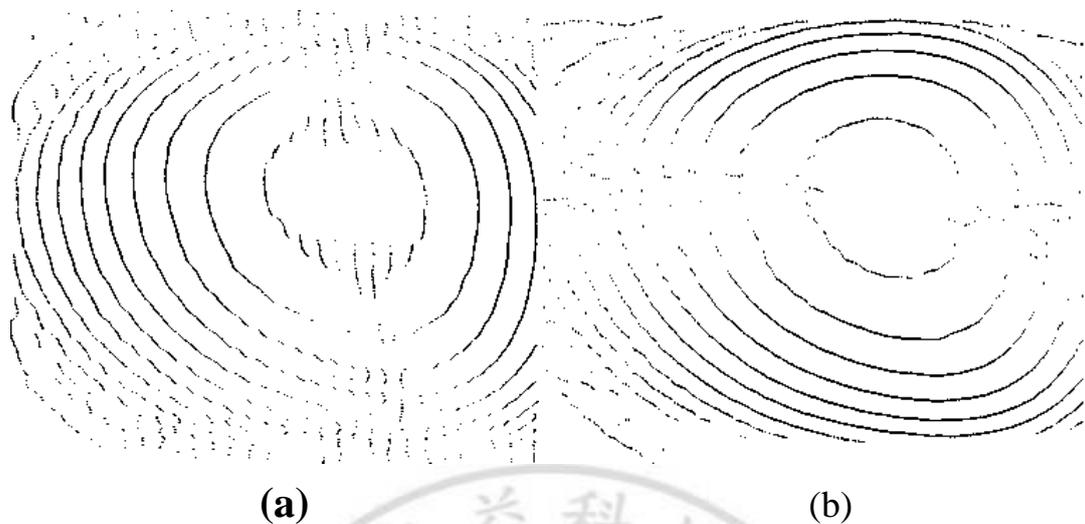


圖 3.16 分別為(a)水平掃描及(b)垂直掃描後的最低像素點紀錄

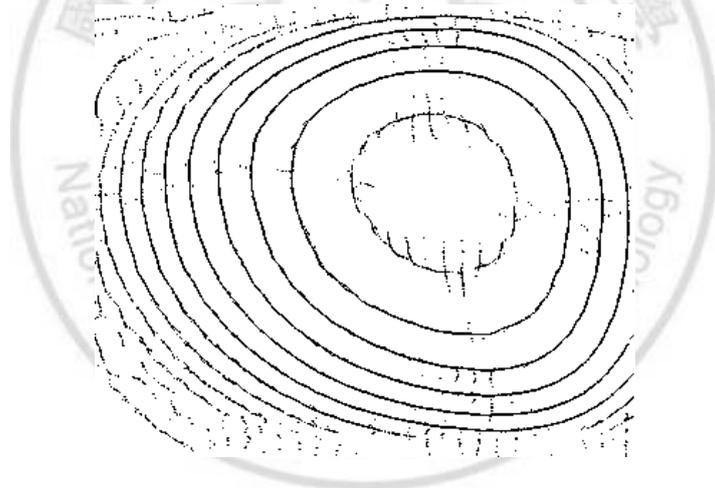


圖 3.17 合併後的最低像素點紀錄

外圍不需要的雜訊部分可能要手動去除，或裁切影像以免造成疊紋線段判斷上的困難，對於疊紋斷開不連續時，可使用影像的型態學經過膨脹與侵蝕將兩斷線連接起來，下一節將介紹影像型態學。

3.2.5 連接斷線的疊紋

數學形態學是影像應用於識別領域的方法，可以分析影像中的形狀，其中膨脹與侵蝕是形態學操作的基本做法，一般處理二值影像，但也可延伸應用至灰階影像。

● 膨脹

膨脹的過程是在影像的像素點邊界增加像素，其膨脹的公式如下

$$A \oplus B = \{k | (\hat{B})_k \cap A \neq \phi\} \quad (3.35)$$

假設有 A、B 兩個像素集合，A 由 B 來做膨脹，表示為 $A \oplus B$ ，表示膨脹的過程由 B 先做原點的映射平移 k，一般會往各八連通方向平移然後對所有的平移結果取聯集，舉個例子，假設

$$B = \{(-1, -1), (-1, 1), (0, 0), (1, -1), (1, 1)\} \quad (3.36)$$

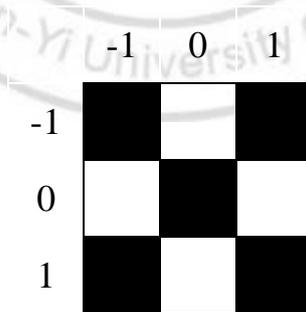


圖 3.18 為 B 像素點集合又可稱為膨脹結構元素

B 的每個座標點代表 A 要平移的座標，灰色為 A 原始圖像素點集合，黑色方格為平移後的像素，對每個座標平移作聯集產生圖 3.21。

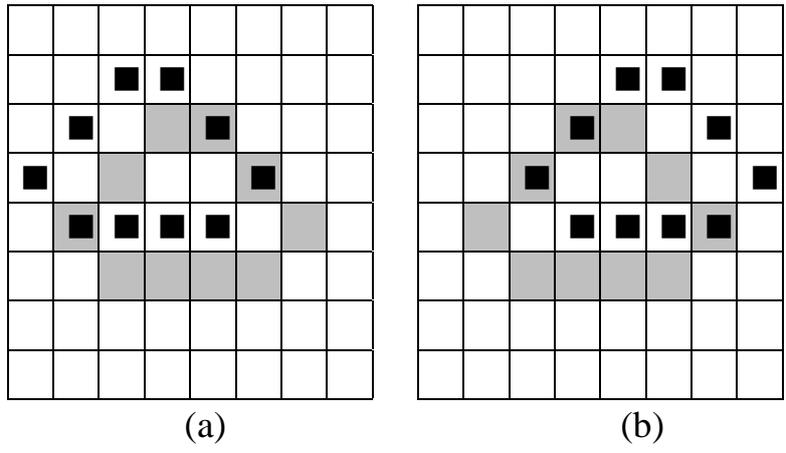


圖 3.19 平移位置到(-1,-1)與(-1,1)

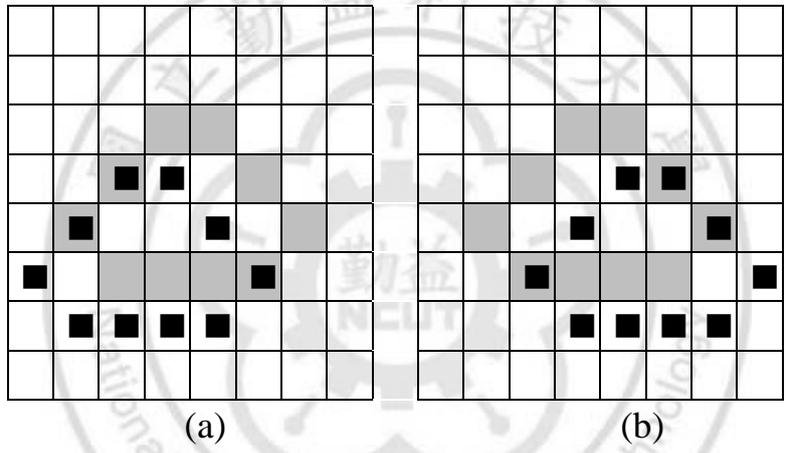


圖 3.20 平移位置到(1,-1)與(1,1)

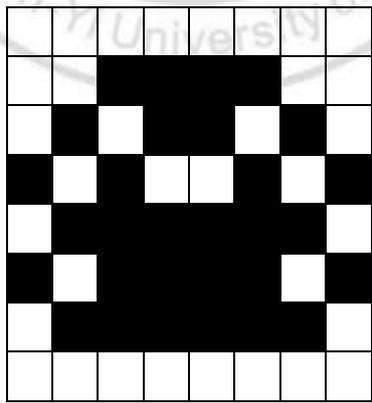


圖 3.21 將平移的像素作聯集後的圖像

● 侵蝕

可消除邊界點像素，將邊界往內收縮，其侵蝕公式如下

$$A \ominus B = \{k | (B)_k \subseteq A\} \quad (3.37)$$

假設有兩個像素集合 A、B，使用 B 來侵蝕 A，表示為 $A \ominus B$ ，

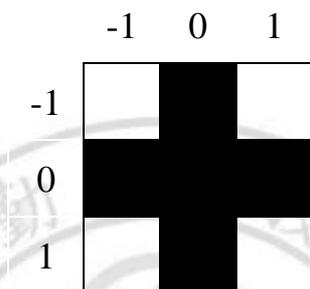


圖 3.22 為 B 像素點集合又可稱為侵蝕結構元素

其中必須先要在灰色 A 原始圖像素點集合中找出能夠契合 B 結構元素的位置，然後保留原點(0,0)對 A 原始圖像做侵蝕產生之結果。

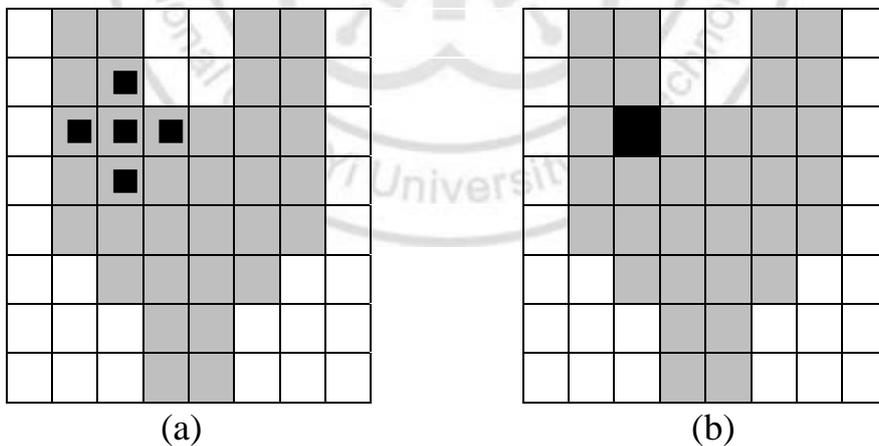


圖 3.23 將結構圓速契合至 A 像素集合保留原點(0,0)

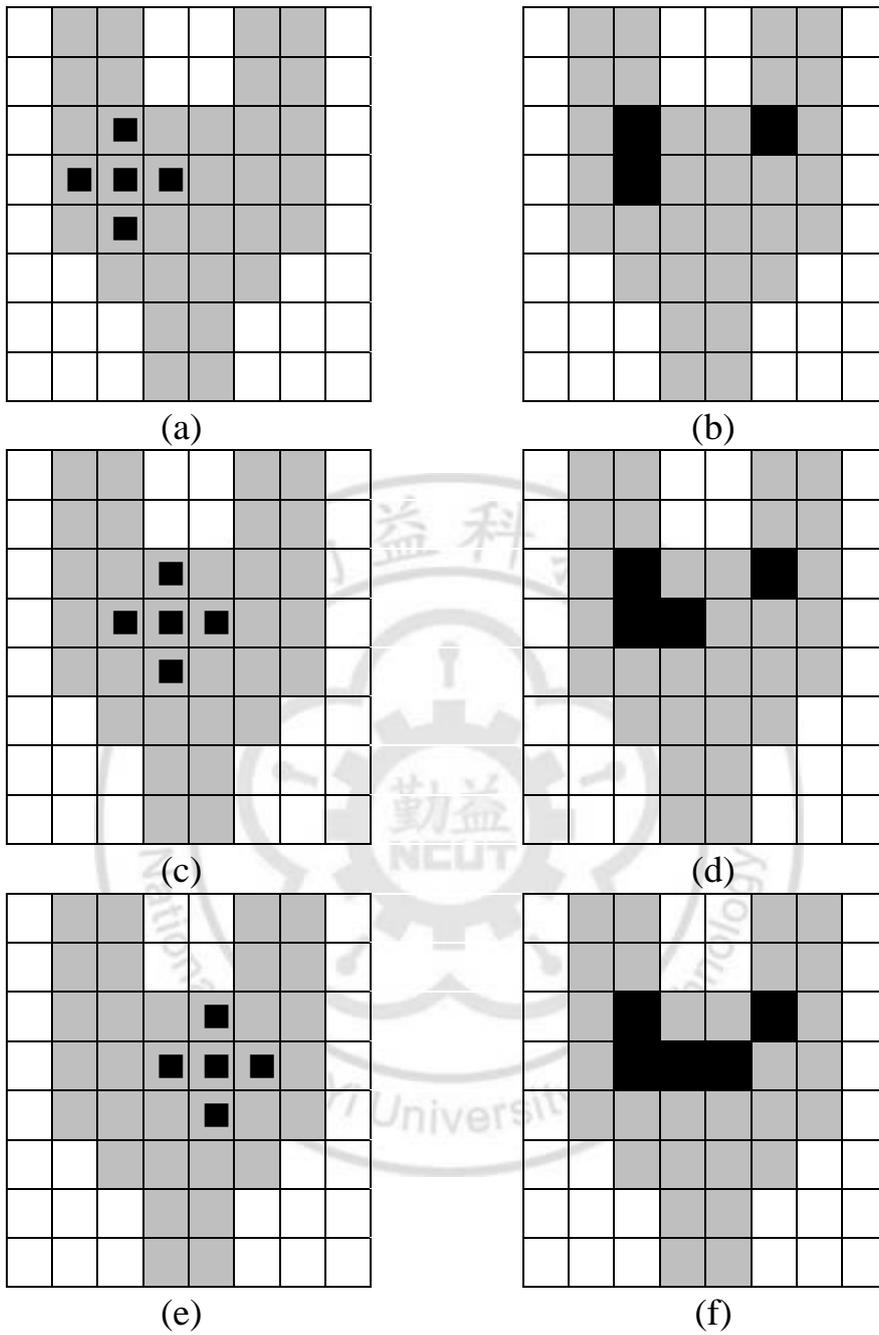


圖 3.24 依序尋找出契合點並侵蝕如步驟(a)~(f)

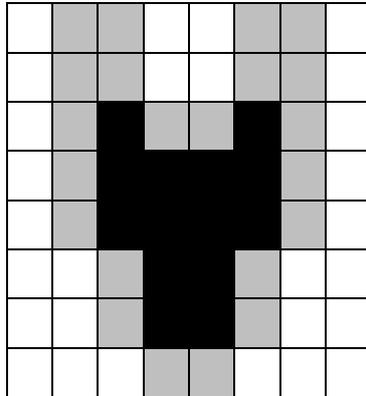


圖 3.25 黑色方格為完成侵蝕後的圖像，灰色是原始圖像

最後可得到完成侵蝕後的圖像如圖 3.25，灰色部分為原始像素集合，黑色方格部分為完成侵蝕後的圖像。

對於兩個像素點使之連接的方法，可以使用膨脹後再侵蝕，也就是所謂的關閉處理如以下表示式

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (3.38)$$

反之先侵蝕後再膨脹稱之為開啟處理，能夠將較細窄的像素斷開，其運算表示式為

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3.39)$$

3.2.6 疊紋影像細線化

經過閉合處理可以得到較完整的疊紋線段，接下來將膨脹過後的影像細線畫留下像素寬度為一的像素點疊紋影像以便做搜尋及標記，

這裡使用的細線化方法為 Zhang-Suen[23]演算法，使用判斷的方式檢測有無可消除的像素，並作多次的判斷運算，分為兩的重複步驟：

1. 奇數次消除目標像素右方，下方及左上角的像素點。
2. 偶數次消除目標像素左方，上方及右上角的像素點。

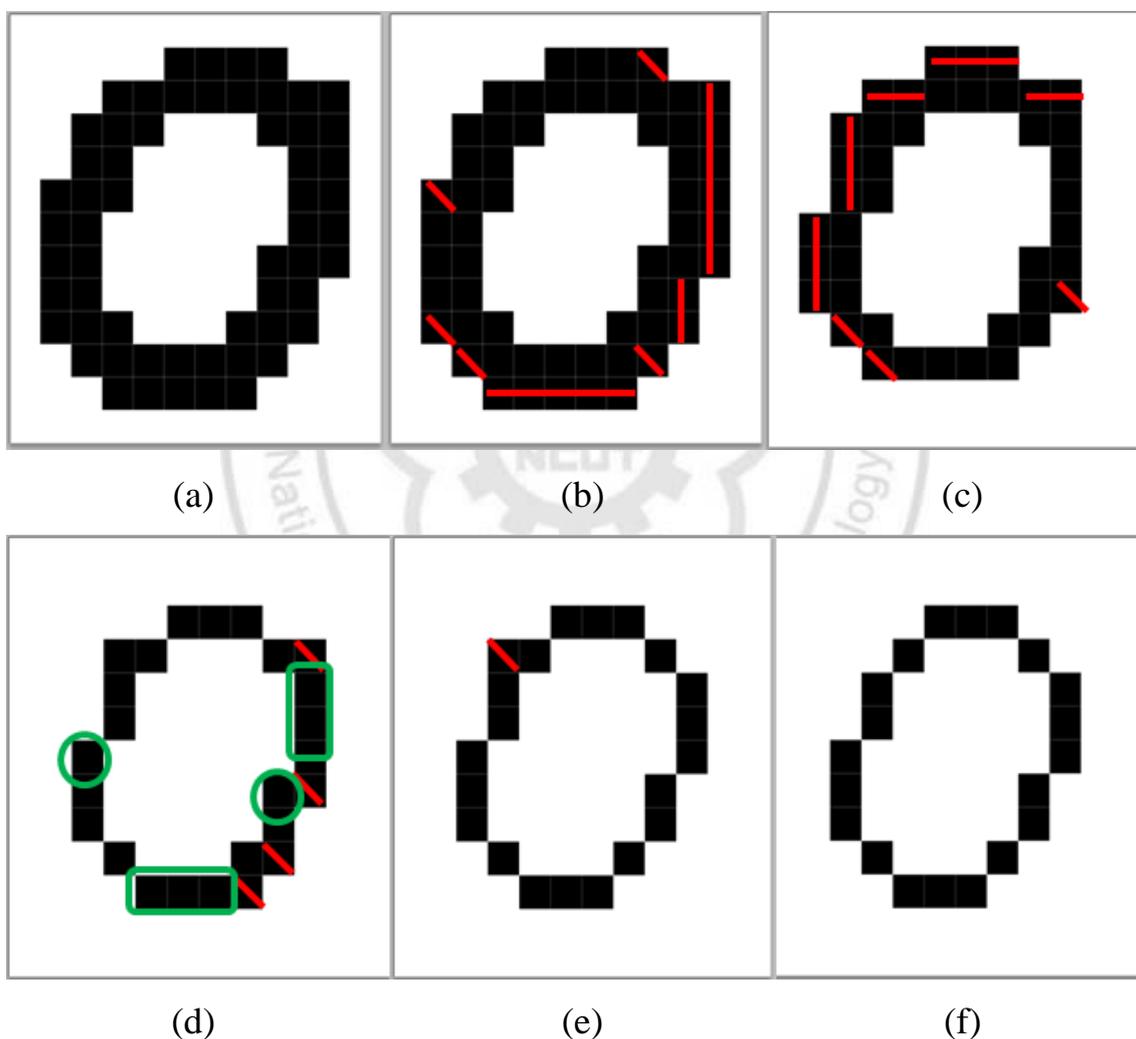


圖 3.26 使用 Zhang-Suen 細線化過程

消除的過程必須有條件限制，要確保有一個鄰近像素，不可繼續

消除若只有一個鄰近像素點代表可能是位於端點；若有七個以上像素點也不予以消除，否則可能會改變原始像素的形狀。圖 3.26 中(a)是原始像首先消除右方、下方及左上角像素如(b)，接下來消除左方、上方及右下角像素如圖(c)，在(d)中可發現綠色圈選部分是只有一個鄰近像素，不可繼續消除，(e)只剩下左上角一個像素消除，(f)完成細線化。

3.2.7 搜尋線段紋路並標記

此步驟是將每條線段做標記以區隔不同的條紋，例如有一圖像如是兩個封閉性連線的圖案且不相接，目的是將兩條線圈分別標示不同記號用於分辨每條線段。

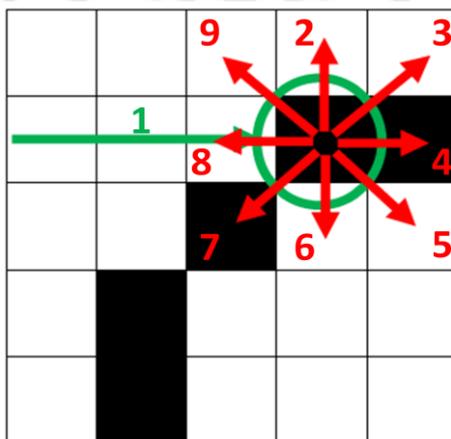


圖 3.27 搜尋到第一個像素點後，往八個方向依序尋找鄰近像素點

假設白點像素為 0，黑點像素為 1，搜尋陣列由左上角往右搜尋如

圖 3.27 中標示為 1 的步驟，找出第一點位置後，將其像素標記為 2 或其他數值，之後可依順時鐘或逆時鐘尋找鄰近的像素點，將尋找的指標移到下一個鄰近像素點，重複鄰域搜尋動作至回到原點，完成第一次可得出最外圈的紋路，第二次搜尋時尋找到像素點為 1 的是第二圈紋路，可以把他標記為 3 或其他數值，用以區分不同的紋路，完成線段搜尋及標記，此種狀況適用於線段完整，且畫面上只有一組疊紋，若影像出現若干組疊紋則必須分割。

0	0	0	0	0
0	0	0	2	2
0	0	2	0	0
0	2	0	0	0
0	2	0	0	0

圖 3.28 完成外圈標記後

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2	2	2	2	0
0	0	2	0	0	0	0	2
0	2	0	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	1->3	3
0	2	0	0	0	3	0	0
0	2	0	0	0	3	0	0
0	0	2	0	0	3	0	0

圖 3.29 繼續搜尋內圈並將其標記數值為 3，並依八連通搜尋標記

3.2.8 輪廓相似度比較

在抓取疊紋後，可以做等高的輪廓比較法，使用此方法可以實現簡易的辨識效果，例如我們可以比較臉部無法自由控制的區域，如額頭、鼻頭或顴骨等等，最簡單的方法就是比較兩個輪廓的座標位置，對輪廓上所有的像素點作加總運算，得到一個特徵，計算方式如下

$$m_{p,q} = \sum_{i=1}^n I(x,y)x^p y^q \quad (3.40)$$

其中 p 對應 x 維度上的矩 q 對應 y 維度上的矩，對輪廓所有的像素 n 進行加總，也可使用最小距離法，應用在圖形的識別上[24]，可用於比

較兩張圖形的相似程度，假設有兩個點 x 及 y ，以兩點距離的計算方式

如下：

$$d(x, y) = \left[\sum_{i=1}^d (x_i - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.41)$$

上述方法對於固定的影像輪廓有較良好的辨識率，因為其方法依賴座標系，這表示輪廓若發生平移或旋轉，將造成很大的誤差，可以使用 hu 矩來做計算，此方法會產生 7 個矩，這些矩對於輪廓的平移旋轉或鏡像具有不變性，其 hu[25] 矩的 7 個不變量計算方法如下：

$$h_1 = \eta_{20} + \eta_{02}$$

$$h_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + (2\eta_{11})^2$$

$$h_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2$$

$$h_4 = (\eta_{30} + 3\eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2$$

$$h_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]$$

$$h_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} \\ + \eta_{03})$$

$$h_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (\eta_{30} \\ - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(3\eta_{30} - \eta_{12})^2 - (\eta_{21} - \eta_{03})^2]$$

$$\eta_{p,q} = \frac{\mu_{pq}}{m_{00}^{(p+q)/2+1}} \quad (3.42)$$

其中心矩定義為

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (3.43)$$

$f(x, y)$ 是數位影像

質心為：

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (3.44)$$

影像矩為

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y) \quad (3.45)$$

在這七個矩中低階的矩，對於整體變化有較大的描述，而高階矩是對細微的變化做描述，零階矩 m_{00} 代表面積，每個矩除上零階矩，顯示所得到的數值與形狀尺度有關連性，一階矩表式輪廓圖形的質心位置，二階矩為慣性矩，三階矩表示均值分佈的偏差度，四階矩表示在統計中的峰值分佈，也是表示圖形的平緩程度，計算後可以比較每個矩的像似程度，以此依據來做判斷。

3.2.9 疊紋間填充灰階色度

接下來可以將不同標記的疊紋紋路之間進行著色，也就是填入不同的灰階值，用以重建三維影像，假設有個封閉區域內有個像素點 f ，使用時十字形結構元素，也就是四連通的 B 膨脹，這種結構可以防止跨越邊界，每次執行膨脹時必須與原始像素反相做交集，以公式表示如下， X_n 是代表執行膨脹的集合數列，

$$X_n = (X_{n-1} \oplus B) \cap \bar{A} \quad (3.46)$$

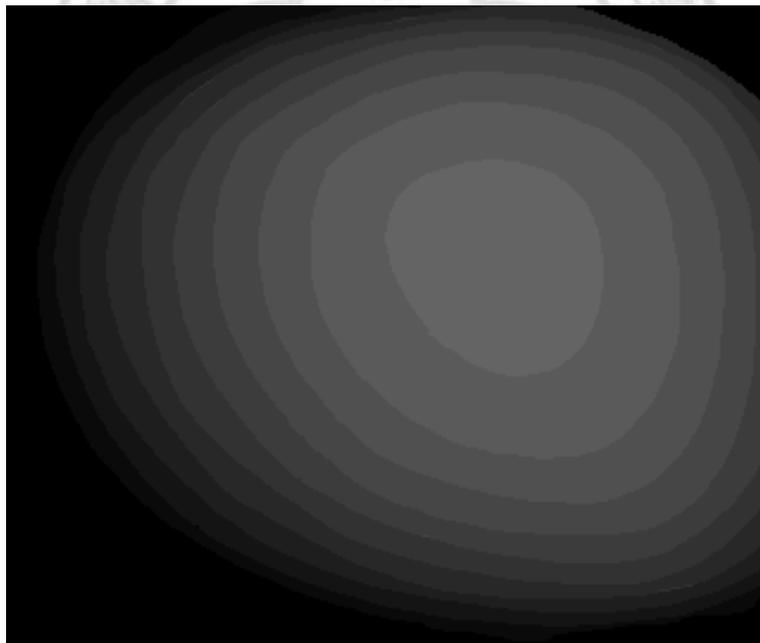


圖 3.30 完成填充灰階圖

第四章 重建三維模型

一般繪製立體圖像，不外乎使用專業的美術建模軟體如 AutoCAD、Maya 或 3dsMax 輸出高度頂點及表面建構，這可能需要儲存大量的資料，在電腦圖學中常會使用 Heightmap 地形顯示，儲存的格式是一個二維的陣列內容儲存高度資訊，電腦繪圖會把高度資訊轉變為模型，水平的資訊則由內插計算來取得。

一般的灰階圖使用 8 位元灰階影像，也就是 2 的 8 次方有 256 個階層來表示灰色度深淺，所以轉換為高度資訊能儲存 256 個不同高度，有時也可以使用 16 位元或 32 位元來儲存以提高精確度，繪製立體圖形時所載入的資料並不一定要使用標準的影像格式，只需要有高度的資訊及長度與寬度範圍即可，使用灰階影像時必須將高度重新量化。

使用 MATLAB 建立立體圖形，只需要把包含高度的陣列資料載入，利用 `mesh(x,y,z,c)` 或 `surf(x,y,z,c)` 指令繪圖即可，`x,y,z` 為三個立體軸參數，`c` 為指定繪圖顏色，其方法較為簡單，簡短的幾行指令就可以將二維的高度圖轉為立體的影像，接下來以圖 4.1 為例介紹如何使用 MATLAB 指令繪製立體圖形。

使用 mesh 繪圖

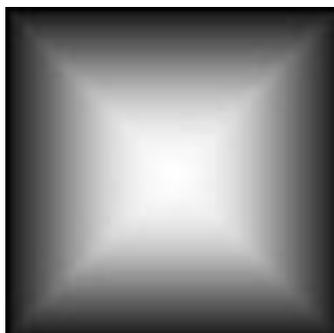


圖 4.1 以不同灰階值表示高度圖例

首先載入灰階圖像

```
>>tm= imread('graymap.bmp');
```

由於 MATLAB 讀入的影像儲存的資料形態為 unit8，必須轉換成

double 格式後才能被繪圖出

```
>>p1=im2double(tm);
```

使用 mesh 指令即可立即繪出網格立體的圖像如圖 4.2

```
>>figure, mesh(p1);
```

加入各個座標軸標註

```
>>xlabel('影像大小 X 軸'),ylabel('影像大小 Y 軸'),zlabel('高度資訊 Z  
軸');
```

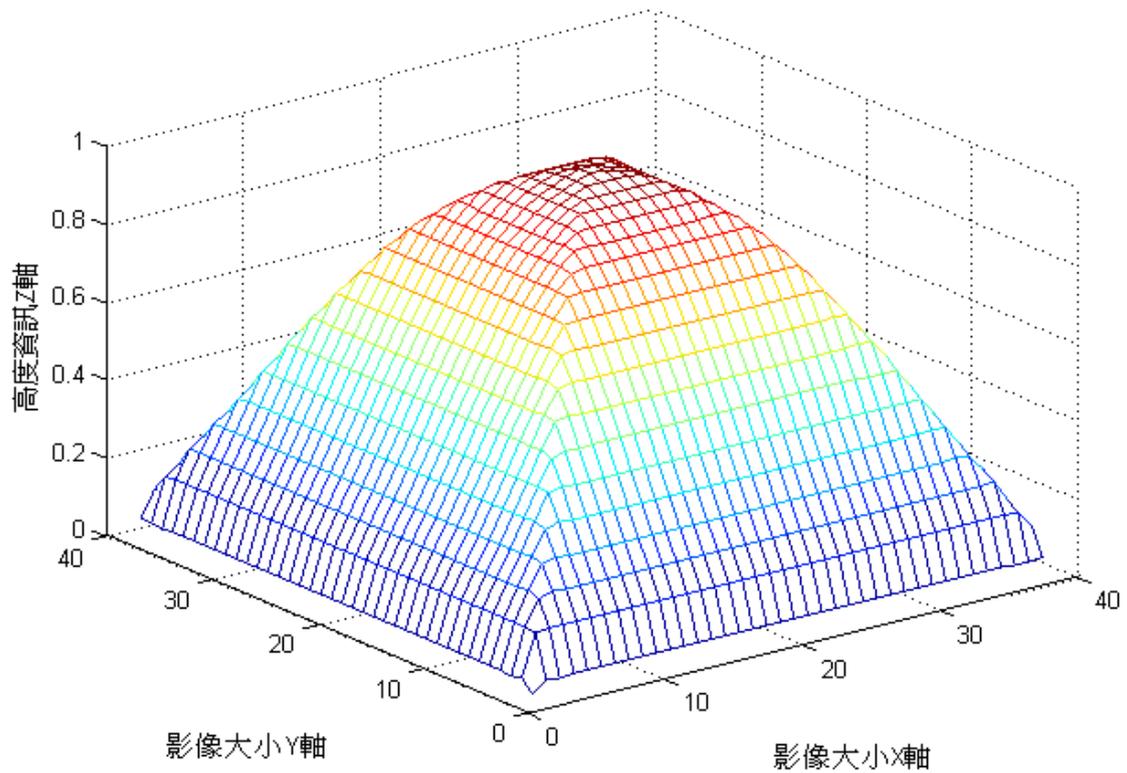


圖 4.2 以 mesh 產生的三維圖像

使用 surf 繪圖

使用方法步驟與 mesh 一樣，其差別在於使用 surf 會將表面填滿並上色。

```
>>figure, surf(p1);
```

以下介紹幾種常用的繪圖參數指令：

`colormap ([R G B])`

可以不同的顏色繪製網格，RGB 代表三原色混合比例其每個數值的範圍為 0~1。

Colorbar

指令產生一個顏色高度的參考，如圖 4.3 中右邊的顏色高度表。

Rotate3d on

可以直接在圖像上旋轉觀察視角。

另外可使用 surf1 指令將會使用表面顏色濃淡處理及光源效果，這將使得不繪製邊線也可區分出物體的形體，繪製的表面會顯得較為真實，

如圖 4.5 以 surf1 產生的三維圖像，有表面顏色明暗變化。

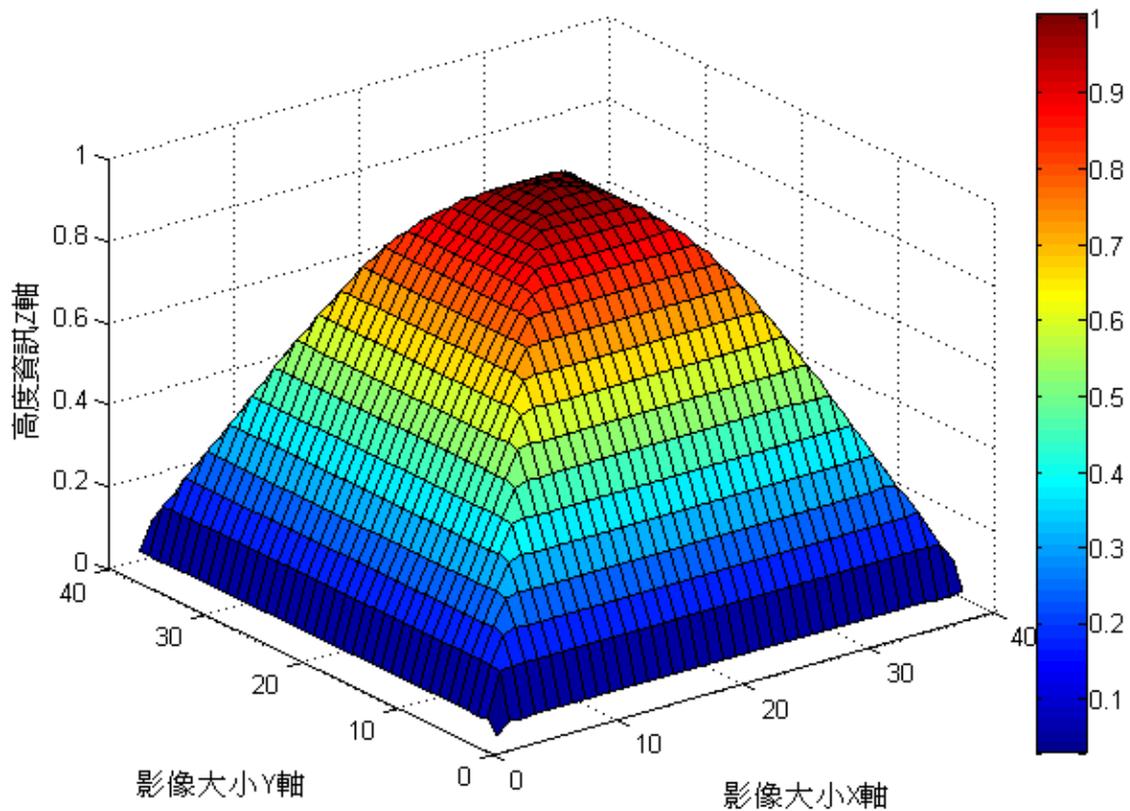


圖 4.3 以 surf 產生的三維圖像

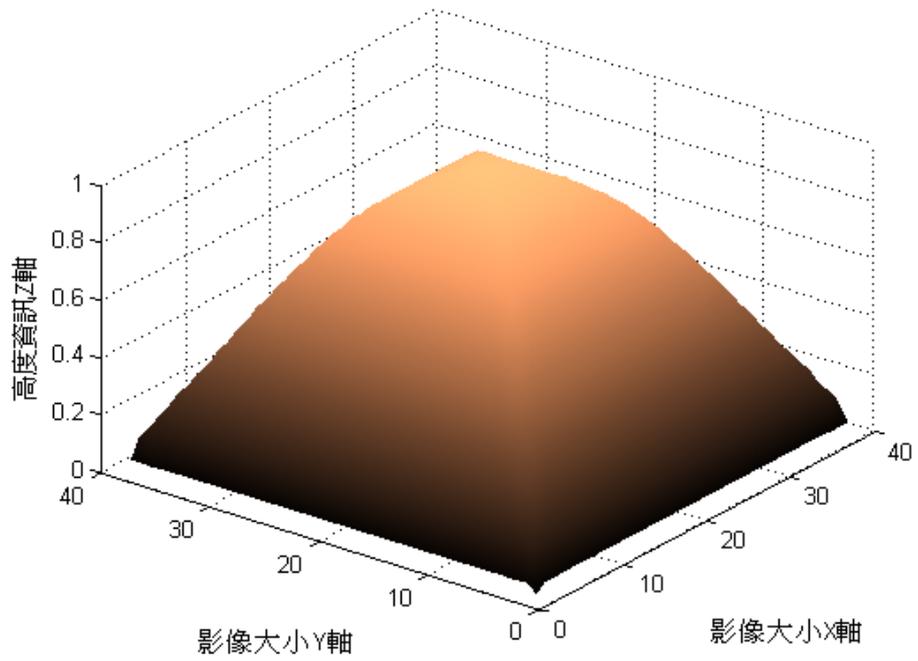


圖 4.4 以 surf 產生的三維圖像，並使用 shading 繪製

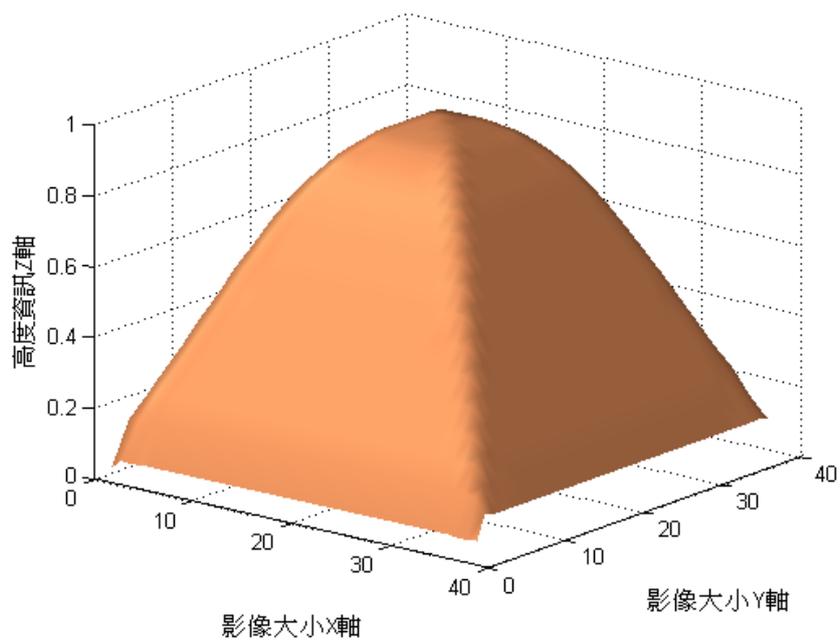


圖 4.5 以 surf 產生的三維圖像，有表面顏色明暗變化

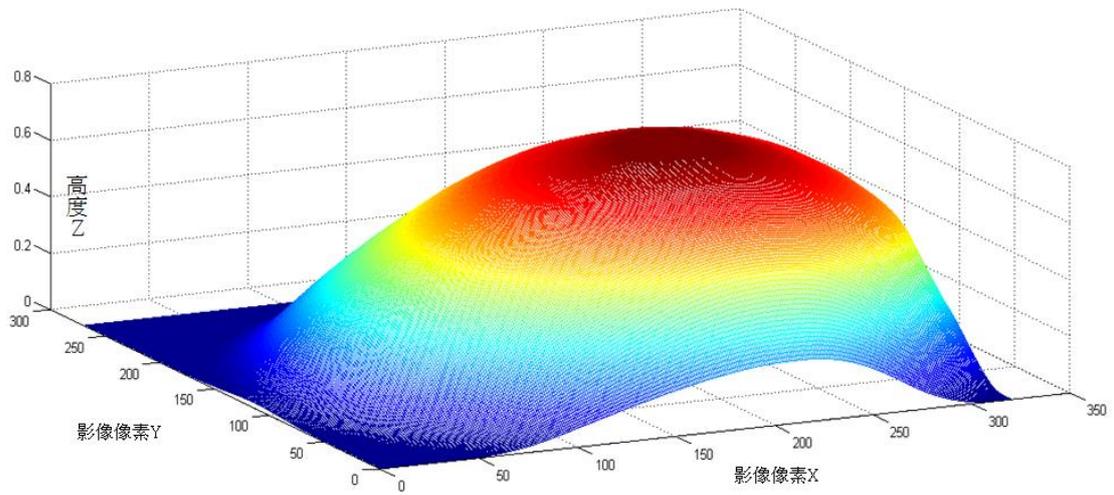
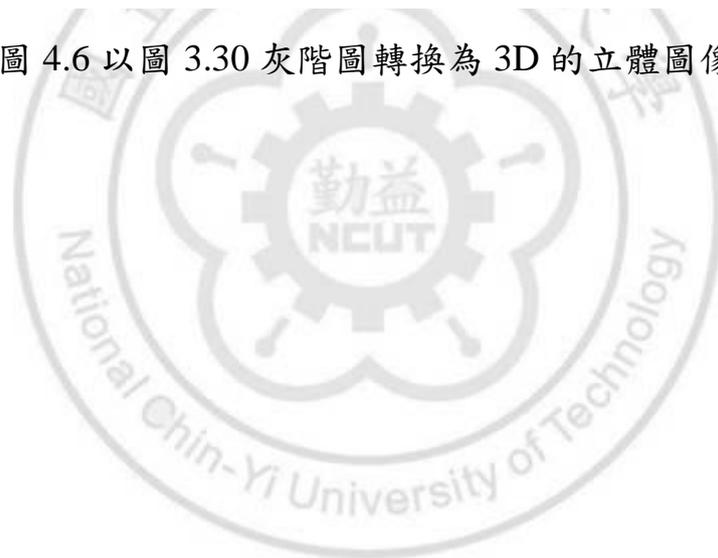


圖 4.6 以圖 3.30 灰階圖轉換為 3D 的立體圖像



第五章 實驗結果

5.1 實驗環境

實驗的系統架構圖如圖 5.1 光源與照相機以一個固定不變的角度照射及拍照，其中光源是使用白光鹵素燈以 45 度角照射，取像設備是一般網路攝影機以 0 度拍照，光柵間距為 0.375mm，為達到良好的陰影疊紋效果，會在量測表面塗上白色粉末或塗料，量測人臉架構為圖 5.2 以水平拍攝，光源以 45 度俯角拍攝。

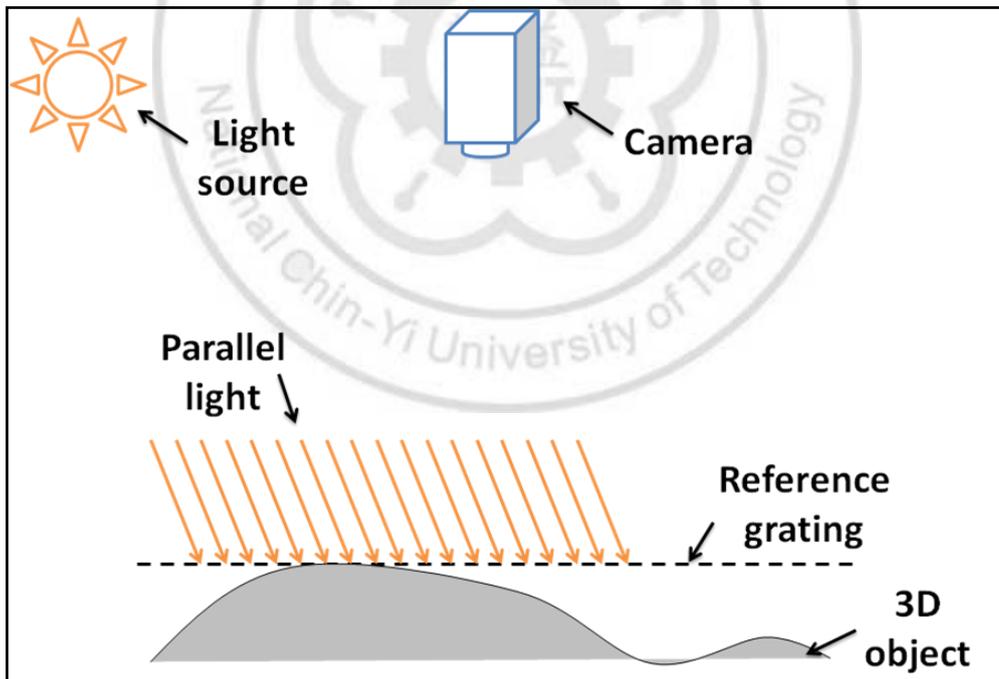


圖 5.1 立體物件量測方式架構圖

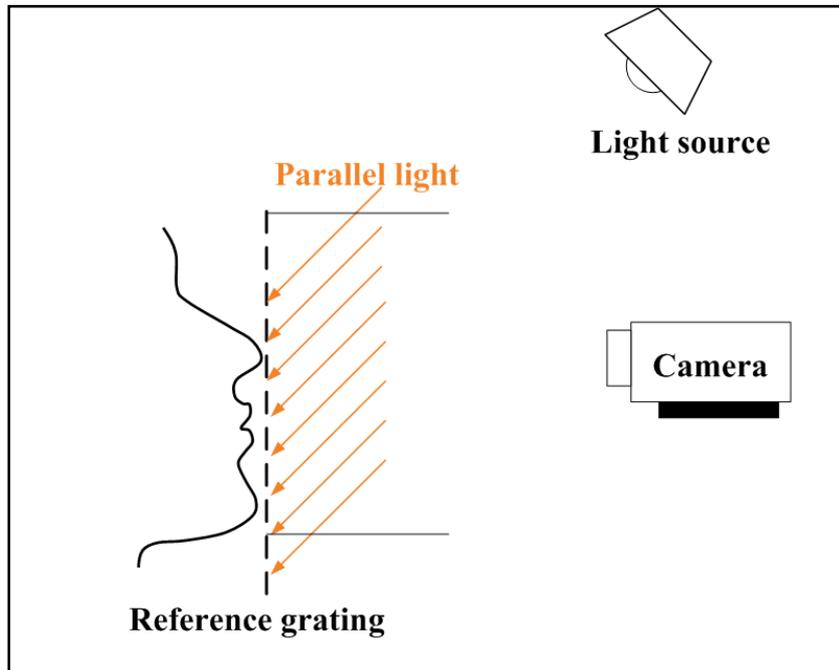


圖 5.2 臉部量測方式架構圖

5.2 實驗結果

先對各種物體作量測，接下來對嘴部及臉部作量測，影像處理以 MATLAB 來實驗，使用一般網路攝影機拍攝擷取成 bmp 點陣圖檔後，開始對影像做處理，經過去直條紋、去除雜訊及平滑化、疊紋紋路分離、細線化、搜尋疊紋及標記、填入不同色階灰度後，利用 MATLAB 轉換為立體圖形，參考圖 2.9 及式(2.23)將相關參數代入，其中可求得

$$d = \frac{Np}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} = \frac{N \times 0.5}{\tan 0^\circ + \tan 5^\circ} \quad (5.1)$$

代表每圈疊紋深度差約為 0.714 mm

- 不規則物體量測

這部份我們先對一些不同形狀的物件做量測，量測物體為一錐形物，如圖 5.3(a)為原始疊紋影像，量測的物件上有明顯的疊紋，標記紋路的高度資訊後，填入量化後的灰階值如圖 5.3 (b)，最後使用 MATLAB 重建三維量測結果。

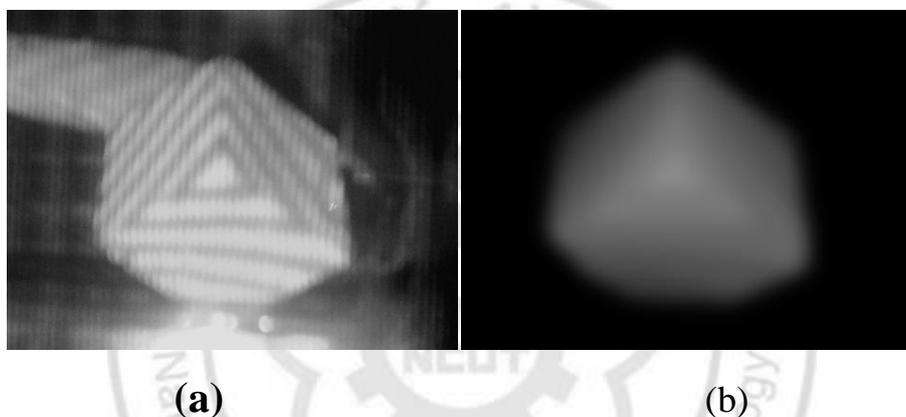


圖 5.3(a)原始疊紋影像(b)以不同灰階值填充並平滑影像

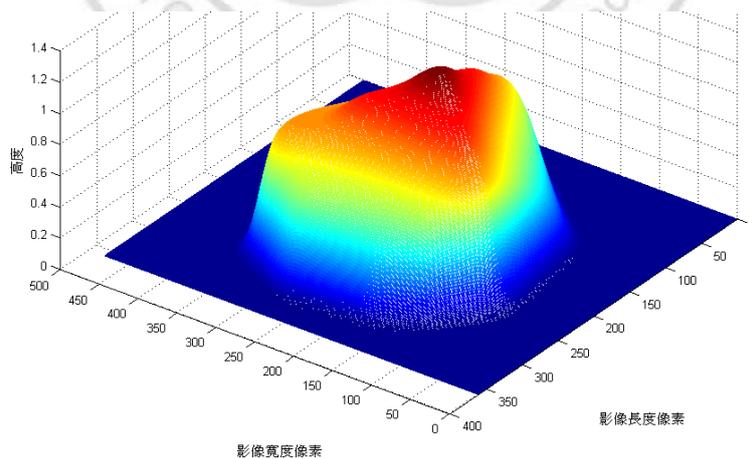
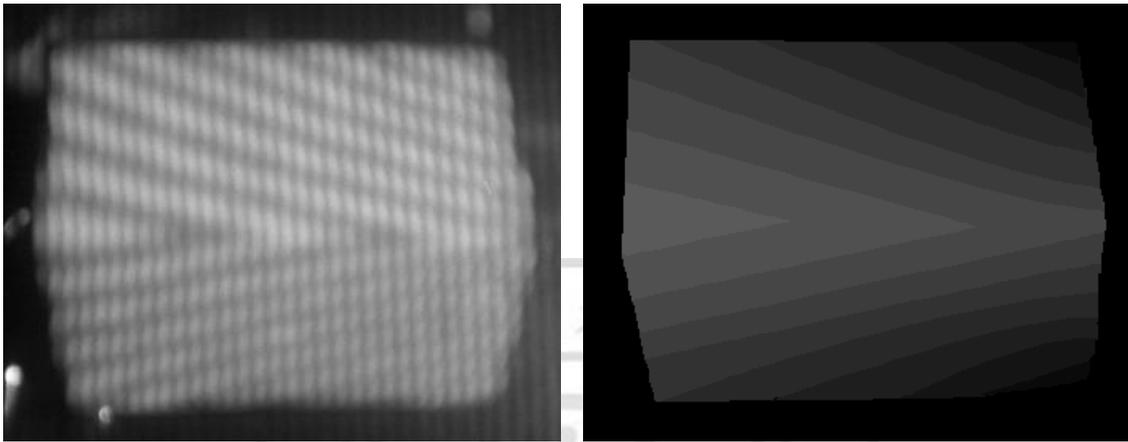


圖 5.4 經由 MATLAB 的 mesh 指令所繪製的立體圖

原始影像為三角形的立體物件如圖 5.5(a)對每個疊紋間距填入不同的灰階直如圖 5.5(b)，轉換為立體影像如圖 5.6，。



(a)

(b)

圖 5.5(a)原始疊紋影像(b)填充灰階色度

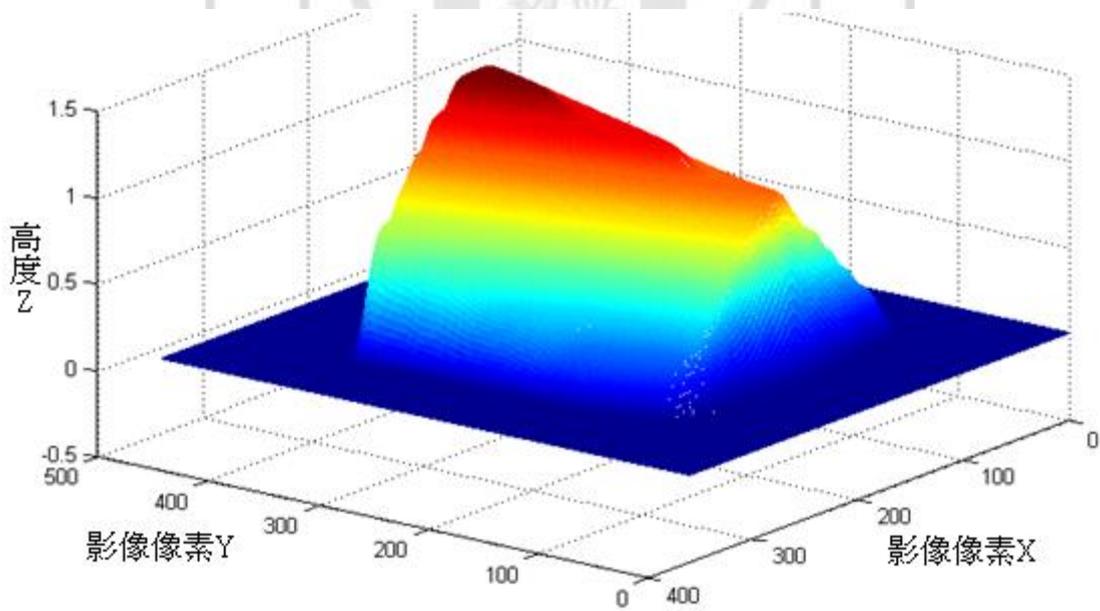


圖 5.6 完成立體圖繪製

● 嘴部量測

這部分是量測人臉嘴形如圖 5.10(a)，是原始拍攝的嘴部疊紋照片，經過影像處理強化對比度後的結果如圖 5.7(b)，接下來對疊紋影像作分割，將所需的條紋保留其餘部分去除如圖 5.8(a)，再疊紋之間填入不同灰階值如圖 5.8(b)，最後對階層影像作平均濾波或高斯濾波如圖 5.9，使其階層較為平滑，5.10 為單張疊紋影像立體圖。

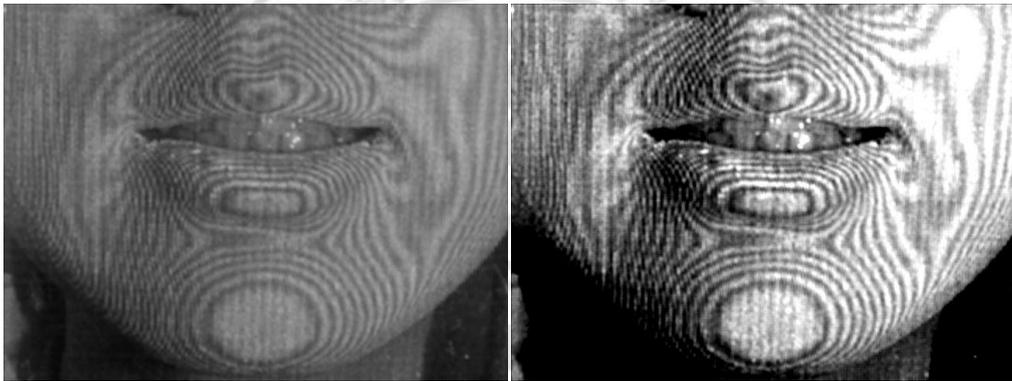


圖 5.7(a)原始疊紋影像(b)增強對比度



圖 5.8(a)分離輪廓與背景(b)填充灰階色度



圖 5.9 影像平滑化

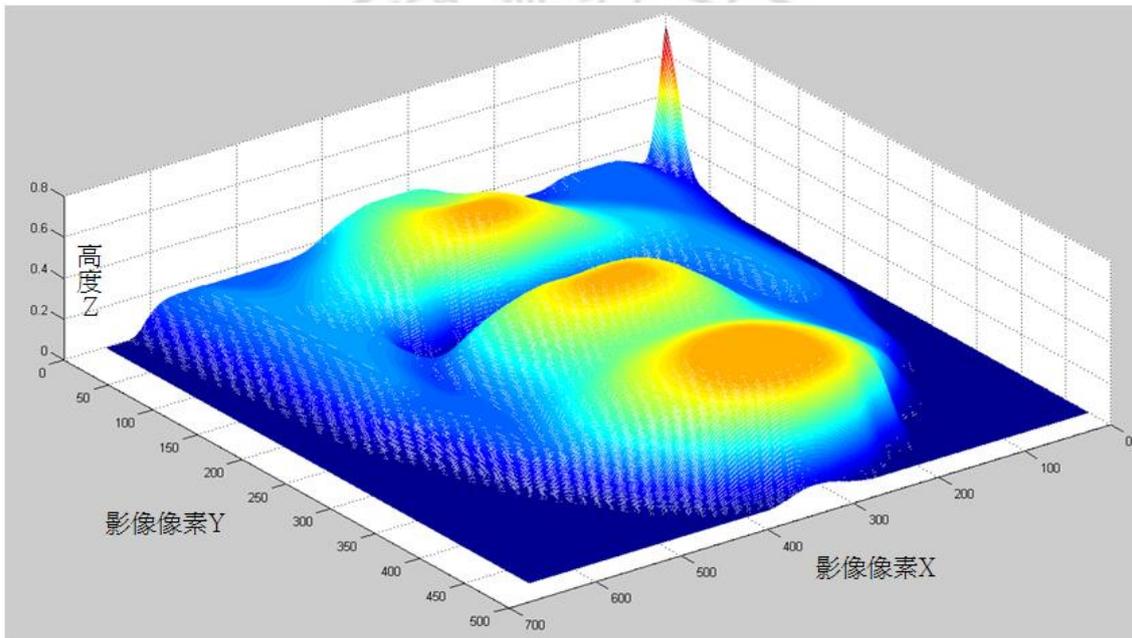


圖 5.10 立體圖像繪製

接下來我們連續拍攝三張疊紋影像如圖 5.11(a)到圖 5.11(c)作量測及處理，其變化結果為圖 5.12。

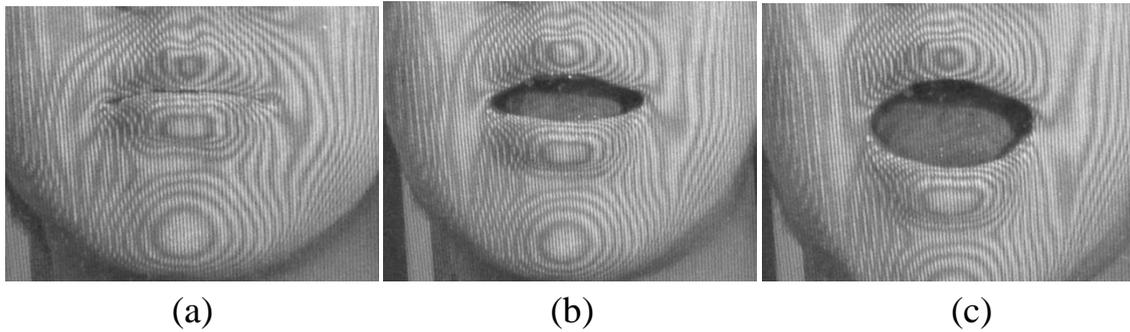


圖 5.11 嘴部(a)(b)(c)連續變化擷取三張影像

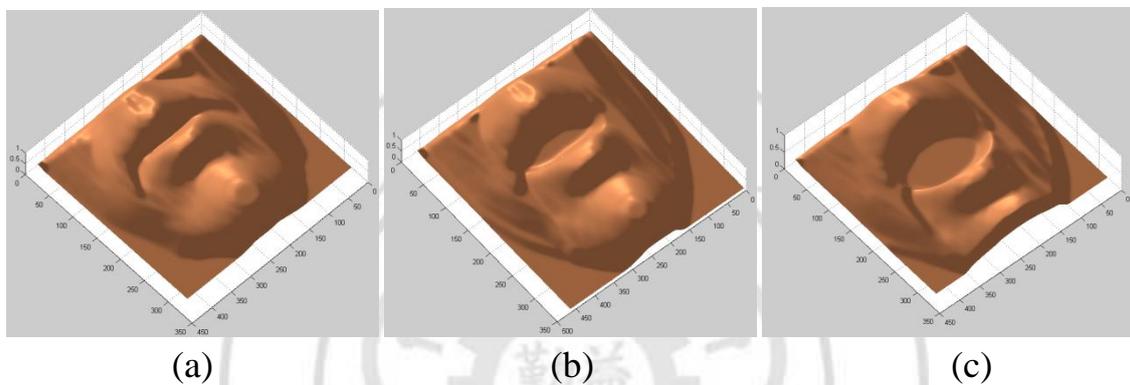


圖 5.12 對應圖 5.11(a)(b)(c)繪製立體圖像

● 全臉量測

這部分是做整個臉部的量測，以及嘴形變化時的量測，同樣地，拍攝全臉原始疊紋影像，如圖 5.13(a)利用直方圖等化進行對比增強，結果為圖 5.13(b)，分割出疊紋部分。圖 5.14 填充灰階值，並做影像平滑處理，並以 matlab 重建立體圖像如圖 5.15，接下來我們分別以發音 ”U” 及發音 ”E” 來量測唇形及臉部變化如圖 5.16，量測結果為圖 5.17 及 5.18，可發現確實量測出唇形的變化狀態。

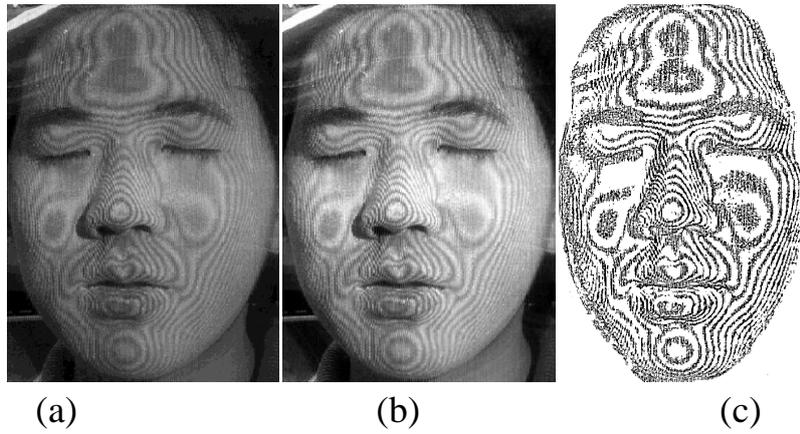


圖 5.13 全臉量測(a)原始灰階影像(b)增強對比(c)分割影像

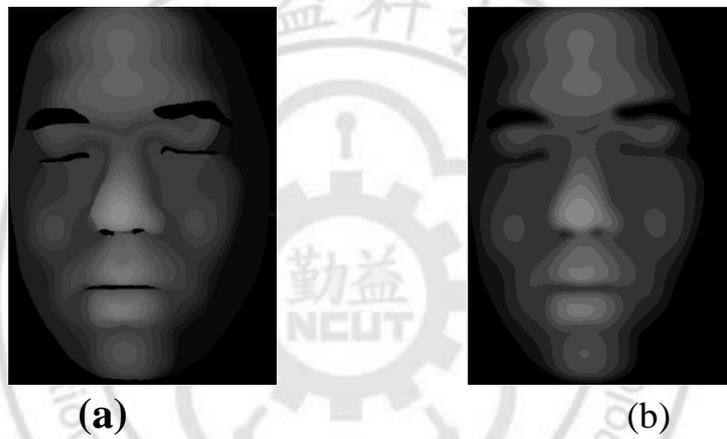


圖 5.14 全臉量測(a)灰階色度填充(b)影像平滑化

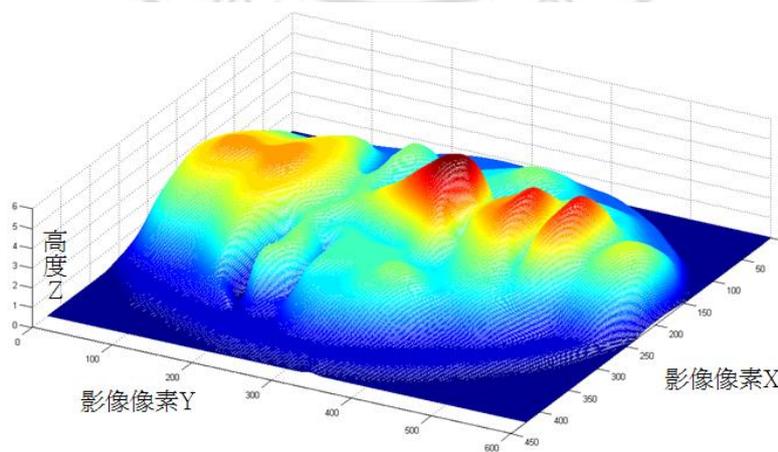


圖 5.15 全臉量測結果圖形

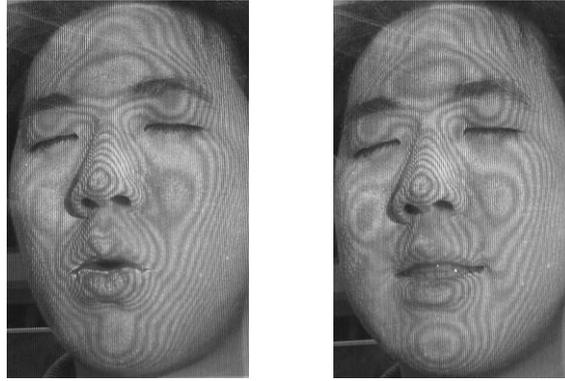


圖 5.16 全臉量測兩種唇形變化(a)發音”U”及(b)發音”E”

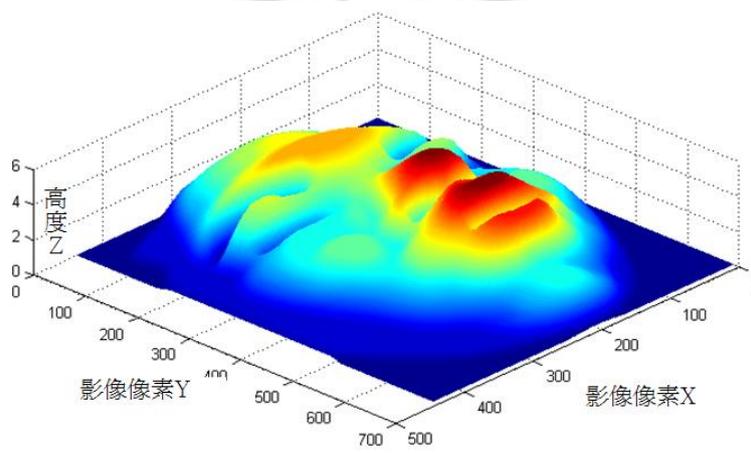


圖 5.17 全臉量測發音”U”時的三維量測

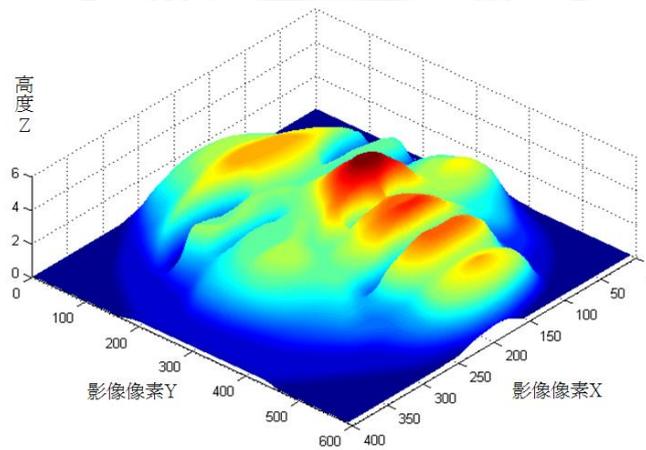


圖 5.18 全臉量測發音”E”時的三維量測

● Hu 矩計算結果

我們利用 Hu 提出的影像矩，做臉部的輪廓分析，先將立體的臉部高度分成 10 個階層，並分別計算每階層的 7 個不變矩，這些特徵值就可以成為臉部輪廓匹配的依據，做匹配時只要對每個階層的差異度做判斷，並設定一個容許範圍值，即可達到識別的功能。如表 1，輪廓階層影像分層顯示，使用同一位試驗者，且嘴部發音形狀不同。

表 1 樣板一計算 Hu 矩結果

輪 廓 階 層					
					
h1	2.19975	2.05215	1.71236	1.52510	1.21045
h2	2.74969	2.46258	1.74520	1.40211	0.90784
h3	5.84313	4.85707	2.88034	2.05205	1.05518
h4	13.36805	10.69931	6.20185	4.32069	2.15602
h5	117.56086	76.78185	26.08703	12.80033	3.23715
h6	22.16218	16.78766	8.19229	5.11568	2.05391
h7	-11.75971	-7.31539	-2.55847	-1.29246	-0.30979

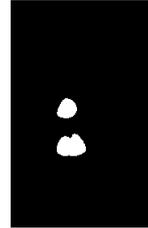
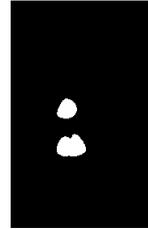
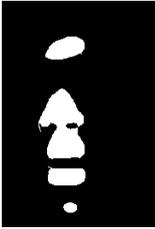
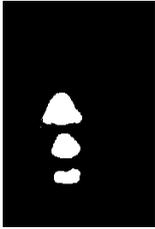
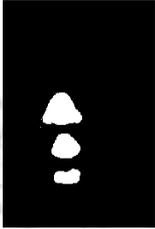
輪 廓 階 層					
					
h1	1.05053	0.92419	0.85181	0.78971	0.77995
h2	0.68172	0.52992	0.45077	0.39095	0.38314
h3	0.69203	0.48160	0.38339	0.31167	0.30188
h4	1.42925	0.98667	0.78321	0.62849	0.60451
h5	1.41527	0.67714	0.42730	0.27696	0.25713
h6	1.17974	0.71798	0.52558	0.39275	0.37398
h7	-0.13218	-0.06381	-0.04014	-0.02576	-0.02385

表 2 樣板二計算 Hu 矩結果

輪 廓 階 層					
					
h1	2.09402	1.91670	1.81835	1.62497	1.36672
h2	2.21898	1.90031	1.78481	1.46614	1.04408
h3	4.09651	3.14142	2.85186	2.08865	1.26163
h4	11.49826	8.59638	7.26683	5.10098	3.08139

h5	78.43050	44.40747	32.92846	16.57515	6.05095
h6	17.11684	11.84587	9.70361	6.17427	3.14752
h7	-8.72394	-4.85543	-3.17545	-1.57689	-0.54619
輪 廓 階 層					
					
h1	1.04104	0.88347	0.81562	0.76493	0.74368
h2	0.62991	0.46551	0.40218	0.35841	0.34302
h3	0.59494	0.37948	0.30894	0.26131	0.24384
h4	1.39202	0.85169	0.67549	0.55919	0.51123
h5	1.26299	0.48248	0.30733	0.21286	0.17972
h6	1.10412	0.58082	0.42818	0.33463	0.29931
h7	-0.09806	-0.04066	-0.02777	-0.01956	-0.01671

接下來做差異度分析，將上兩表計算出的數值相減得到表 3

表 3 輪廓差異度比較表

	1	2	3	4	5
h1	0.10573	0.13545	-0.10599	-0.09987	-0.15627
h2	0.53071	0.56227	-0.03961	-0.06403	-0.13624
h3	1.74662	1.71565	0.02848	-0.0366	-0.20645
h4	1.86979	2.10293	-1.06498	-0.78029	-0.92537
h5	39.13036	32.37438	-6.84143	-3.77482	-2.8138
h6	5.04534	4.94179	-1.51132	-1.05859	-1.09361
h7	-3.03577	-2.45996	0.61698	0.28443	0.2364

	6	7	8	9	10
h1	0.00949	0.04072	0.03619	0.02478	0.03627
h2	0.05181	0.06441	0.04859	0.03254	0.04012
h3	0.09709	0.10212	0.07445	0.05036	0.05804
h4	0.03723	0.13498	0.10772	0.0693	0.09328
h5	0.15228	0.19466	0.11997	0.0641	0.07741
h6	0.07562	0.13716	0.0974	0.05812	0.07467
h7	-0.03412	-0.02315	-0.01237	-0.0062	-0.00714

在表 3 中可發現，在分別做出不同嘴形時，外圍的整體輪廓變化較大，所計算出的數值差異度也較大，在高度較高的階層，可發現差異量減少了許多，因為在較高階層的影像不可變動的部分較多如額頭、顴骨、鼻子，在拍攝人臉疊紋影像時，盡量保持自然，以利提高辨識的效果。

第六章 結論

本篇論文使用陰影疊紋對不同物件及人臉做量測，主旨以非接觸的方式做整面的量測，且能以廉價的設備完成實驗，其中影像處理部分可能顯得較為繁雜，但只要注意擷取影像時取像射設備盡量不對焦在光柵片上，而是稍微往後一點對焦在臉部，以減少光柵片上直條紋的影像干擾，另外光源選擇也是很重要的，若能選擇白光鹵素燈，其陰影的效果較黃光鹵素燈來的好。

實驗各種不同物體量測，陰影疊紋對於漸進的曲面變化有較好的量測效果，對於正方體，長方體等邊角過於陡峭則無法清晰的在表面觀察出疊紋，量測的延伸應用也利用等高輪廓線匹配，做相似度的比對，達到初步的人臉識別功能，本項研究雖然無法到達即時且全自動產生三維影像，但對於研究過程中的陰影疊紋原理、影像處理到最後建置立體圖像的方法，皆有所涉及，使用於3D娛樂教育及口語學習上，相信更有應用價值。

參考文獻

- [1] 身心障礙服務資訊網, <http://disable.yam.org.tw/index.htm>
- [2] 林寶貴, 李麗紅, “語調聽覺法對聽障生口語教學效果之研究”, 聽語會刊, Volume:11, page(s):43-56, 1995.
- [3] 林宏旻, 李允文, 洪靜怡, 許士禮, 柯志明, 全方位課程設計—以聽障學生為例, 特殊教育現在與未來 特殊教育叢書, 2007.
- [4] V.C. Sobolewski, “Using moire patterns to determine the distortion of graphic displays and graphic input devices”, Proceedings of the IEEE, Volume: 58 , Issue: 4, Page(s): 567 - 583, 1970.
- [5] J. J. J. Dirckx, W. F. Decraemer, “Phase shift moire apparatus for automatic 3D surface measurement”, Review of Scientific Instruments, Volume: 60, Issue: 12, Page(s): 3698 - 3701 ,1989.
- [6] D. Hai, R.E. Powell, C.R. Hanna, I.C. Ume, “Warpage measurement comparison using shadow Moire and projection Moire methods”, Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, Volume: 25 , Issue: 4, Page(s): 714 - 721, 2002.
- [7] M. K. Hu, "Visual Pattern Recognition by Moment Invariants", IRE Trans. Info. Theory, vol. IT-8, Page(s): 179–187, 1962.
- [8] S. T. Gandhe, K. T. Talele, and A.G.Keskar, “Face Recognition Using Contour Matching”, IAENG International Journal of Computer Science, Volume: 35 Issue: 2, Advance online publication: 20 May 2008.
- [9] W.J. Chew, K.P. Seng, L.M. Ang, “3D Face Recognition using Combination Rule for Horizontal and Vertical Face Contour”, International Journal of Computer and Network Security, Volume: 1, No. 2, 2009.
- [10] CMM inspection, <http://www.renishaw.com/en/cmm-inspection--6850>
- [11] E. Kim, H. Lim, T. Lee, D. Choi, J. Park, “Time of flight (TOF) measurement of adjacent pulses”, Nuclear Science Symposium Conference Record, volume: 1, Page(s): 609 – 612, 2001.
- [12] J.Wu, J.S.Smith, J. Lucas, “Weld bead placement system for multipass welding”, IEE Proc.-Sei. Meas. Technol., Volume: 143, No. 2, 1996.
- [13] P. Fechteler, P. Eisert, “Adaptive colour classification for structured light systems”,

- Computer Vision, IET, Volume: 3 , Issue: 2, Page(s): 49 - 59, 2009.
- [14] W.Y. Yau, H.Wang, “Fast Relative Depth Computation for an Active Stereo Vision System” ,Real-Time Imaging Volume: 5, Page(s): 189–202 , 1999.
- [15] Emmanuel Prados, Olivier Faugeras, Shape From Shading, Book chapter in Mathematical Models of Computer Vision: The Handbook – Page(s): 375-388, chapter 23, 2006.
- [16] R.J. Woodham, Photometric method for determining surface orientation from multiple images. Optical Engineering 19, I, Page(s):139-144, 1980.
- [17] 林宸生，陳德請，近代光電工程導論，全華科技圖書，2001
- [18] 王仕璠，資訊光學理論與應用，北京郵電大學出版社，2004
- [19] 胡錦標，林宸生，林憲陽，楊宗興，蔡奇能，謝宏榮，謝啟堂，精密光電技術，高立圖書，1997
- [20] 吳國平，數位影像處理原理，中國地質大學出版社，2007
- [21] M.D. Fairchild., Color appearance models, Chichester, West Sussex, England Hoboken, NJ :J. Wiley ,2005
- [22] Alasdair McAndrew, “Introduction to digital image processing with MATLAB” , Thomson Learning Company, 2008
- [23] S. Zhang and K. Fu., “A Thinning Algorithm for Discrete Binary Images”, Proceedings of the International Conference on Computers and Application. Page(s): 879-886, Beijing, China, 1984
- [24] 賴岱佑，數位影像分析之智慧型監視系統，文魁資訊，2009
- [25] M. K. Hu, “Visual Pattern Recognition by Moment Invariants”, IRE Trans. Info. Theory, Volume: 8, Page(s): 179–187, 1962
- [26] 張錚，MATLAB 教學範本程式設計與應用，知城圖書，2002