

國立中興大學機械工程學系

碩士學位論文

影像處理輔助無人搬運車

走行輪磨耗量測研究

The wheel abrasion measurement of automatic guide vehicle  
assisted with an image processing system

National Chung Hsing University

指導教授：李吉群 Ji-Chun Lee

研 究 生：王紹義 Zhao-Yi Wang

中華民國 104 年 6 月 18 日

國立中興大學機械工程研究所

碩士學位論文

題目：影像處理輔助無人搬運車走行輪磨耗量測研究

姓名：王紹義

學號：5101061016

經 口 試 通 過 特 此 證 明

論文指導教授 李吉群 博士

李吉群

論文考試委員 黃敏睿 博士

黃敏睿

蔡東憲 博士

蔡東憲

中華民國 104 年 06 月 18 日

## 誌謝

感謝指導教授李吉群老師，學生在入學時，對影像處理的專業知識殷殷教誨以及傾囊相授，使學生受益良多，在學生有問題討論時，會以深入淺出的說明，讓學生能知道問題要由那方面著手研究，在學生有討論不解之處，都細心舉例為學生講解，讓學生能充分了解，故此論文才能夠順利的完成，在此表達學生的最高謝意。感謝口試委員黃敏睿博士、蔡東憲博士，百忙之中抽空校閱論文，並於口試時提供寶貴的意見與建議，使得論文更加完備。

另外，感謝部門主管：育民、玉芬的支持讓我在研究上的資源不虞匱乏，能夠專心於研究與工作，順利完成學業。在研究過程中，感謝耀仁、允睿學長及清俊同學適時給予寶貴意見，使我獲益良多。

最重要的，要感謝家人的鼓勵與支持，感謝老婆雯琪在我讀書及撰寫論文時，照顧家中三個小寶貝，非常辛苦。感謝老婆的體諒與付出，讓我可以無後顧之憂，順利完成研究所的學業。在此，謹將此學位論文獻給我的家人、同事及同學們，並致上我最高的敬意。

王紹義 謹誌

中華民國 104 年 6 月

## 中文摘要

本文影像處理輔助無人搬運車走行輪磨耗量測，主要是在發展一種快速簡易非接觸式的量測方法，並以程式來監測薄膜電晶體液晶顯示器面板廠的無人搬運車走行輪表面的磨耗變化。利用光學量測的優勢，本系統有非接觸性、非破壞性、儀器架設快速、不受量測空間侷限等優點。且本系統的光源為雷射光源，因此可以做較長距離的量測，不同於陰影量測法有距離上的限制。

量測系統主要包括線型雷射結構光源、CCD 攝影機與鏡頭、樹莓派單板機電腦、線性滑軌與滑塊、針盤指示量錶及自行撰寫影像處理與量測程式。根據針孔攝影機模型、透視投影及全域座標與攝影機座標系轉換原理得知，可由影像上雷射線的強度峰值評估輪子表面的磨耗量；利用不同位移量的影像之校驗結果，可由計算輪子表面與基準平面掃描線強度峰值的偏移量求出磨耗量。若輪子表面有破損時，也可以被檢測出來。

以本系統進行實例應用，在無人搬運車走行輪磨耗量與表面量測中，以百分表校驗磨耗結果，量測標準差 0.04mm。另外，輪子表面破損情況也可以經由量測數據的差異量得知。

National Chung Hsing University

關鍵字：AGV、機械視覺、走行輪磨耗量測、無人搬運車。

## ABSTRACT

The research “the wheel abrasion for automatic guide vehicle assisted with an image processing system” develops a kind of fast and simple measurement mainly. Monitor the change of the wheel abrasion for automatic guide vehicle wheel in the factory of TFT-LCD. This system has untouchable, non-destructive, erect the system quickly which also not measures by the space limitation. And the light source of this system comes from the laser light source, so it can do the long distance measurement that different from measurement of shade law has distances restriction.

The developed system mainly consists of a linear laser structure light 、 a CCD camera, Raspberry Pi computer, linear guide, dial indicator, a programmable image process and measurement. According to the pin camera model, perspective projection, world coordinate system and camera coordinate system transformation theorem, a correlation was investigated between the surface abrasion of the wheel measured with dial indicators instrument and the laser line intensity maximum projected onto the wheel surface. The abrasion value of the object can be calculated, base on the offset between the position projected onto the object and the position projected onto platform after carry out the calibration with different offset image. If the wheel surface is damaged, it can be detected. The developed system was applied to measure the wheel abrasion for automatic guide vehicle assisted. The wheel abrasion standard deviation was about 0.04mm. In addition, the position related to the damage of wheel surface could also detected by the developed system.

**Keywords :** AGV,machine vision,image process,the measurement of wheel abrasion,automatic guide vehicle

# 目錄

	頁次
中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
目錄 .....	III
圖目錄 .....	VI
表目錄 .....	VIII
第一章、緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 研究動機與目地 .....	2
1.3 文獻回顧 .....	3
1.4 論文架構 .....	4
第二章、相關技術文件探討 .....	5
2.1 自動化物料搬運系統簡介 .....	5
2.2 無人搬運車簡介 .....	6
2.2.1 磁帶導引 .....	7
2.2.2 雷射導航 .....	8
2.2.3 磁點導引 .....	8
2.3 無人搬運車走行輪簡介 .....	10
2.4 無人搬運車走行輪磨耗和缺陷 .....	12
2.5 數位影像處理簡介 .....	13
2.5.1 灰階處理 .....	14
2.5.2 影像二值化處理 .....	15
2.5.3 平滑影像 .....	16
2.5.4 角點檢測 .....	17

2.5.5 攝影機校正 .....	18
2.5.5.1 攝影機參數.....	18
2.5.5.2 攝影機模型.....	18
2.5.5.3 透視投影.....	19
2.5.5.4 影像、螢幕座標轉換.....	21
2.5.5.5 空間、攝影機座標系轉換.....	22
2.5.5.6 鏡頭失真.....	22
2.5.6 曲線擬合.....	24
第三章、系統建置與實驗操作.....	25
3.1 研究設備.....	25
3.1.1 光源.....	26
3.1.2 數位影像擷取設備.....	26
3.1.3 線性滑軌與滑塊組.....	27
3.1.4 電腦設備.....	27
3.2 影像處理程式操作執行流程.....	27
3.2.1 量測設備座標系定義.....	30
3.2.2 攝影機設定與位置調整.....	31
3.2.3 擷取校正影像.....	31
3.2.4 攝影機校正.....	32
3.2.5 調整紅光雷射投射在鋁板的位置.....	33
3.2.6 L 型鋁板位移及影像擷取.....	33
3.2.7 影像失真校正.....	35
3.2.8 擷取感興趣區域與角點偵測.....	36
3.2.9 曲線擬合及雷射線強度峰值位置計算.....	38
3.2.10 交點與角點位置與影像、全域座標關係建立.....	39

3.2.11 影像與空間座標位置關係方程式.....	40
3.2.12 驗證雷射光平面 $Z$ 軸方向方程式 .....	41
第四章、實驗結果與分析.....	42
4.1 攝影機校正結果與分析.....	42
4.2 紅光雷射強度調整結果與分析.....	46
4.3 紅光雷射垂直投射 L 型鋁板結果與分析 .....	48
4.4 紅光雷射線投射區間結果與分析.....	49
4.5 紅光雷射線影像平滑處理與多項式曲線擬合結果與分析.....	52
4.6 定義交點座標與全域座標的結果.....	54
4.7 取得 $X$ 及 $Z$ 方程式與驗證方程式結果與分析 .....	56
4.8 量測系統應用：無人搬運車從動輪量測.....	56
第五章、結論與建議.....	60
5.1 結論.....	60
5.2 建議.....	60
第六章、參考文獻 .....	61
附錄一 .....	63



## 圖目錄

圖 2-1	自動化物料搬運系統簡圖.....	5
圖 2-2	自動化物料搬運系統配置圖.....	6
圖 2-3	AGV 系統架構圖.....	7
圖 2-4	磁帶導引無人搬運車.....	8
圖 2-5	雷射導航無人搬運車.....	8
圖 2-6	磁性位置傳感器.....	9
圖 2-7	無人搬運車外觀圖.....	9
圖 2-8	無人搬運車主動輪與從動輪配置.....	11
圖 2-9	無人搬運車走行驅動輪與輪框.....	11
圖 2-10	無人搬運車行進方向示意圖.....	12
圖 2-11	無人搬運車轉彎模擬路徑圖.....	12
圖 2-12	無人搬運車主動輪側視圖.....	13
圖 2-13	數位影像座標表示方式圖.....	14
圖 2-14	影像灰階處理.....	15
圖 2-15	影像二值化處理.....	15
圖 2-16	二維高斯濾波器.....	16
圖 2-17	5*5 的高斯濾波器.....	17
圖 2-18	角點偵測運作原理.....	17
圖 2-19	針孔攝影機模型.....	19
圖 2-20	攝影機模型透視投影.....	19
圖 2-21	影像與螢幕座標關係.....	21
圖 2-22	空間與攝影機座標轉換關係.....	22
圖 2-23	曲線擬合.....	24
圖 3-1	模擬無人搬運車走行輪檢測設備.....	25
圖 3-2	攝影機校正流程.....	28
圖 3-3	影像量測處理流程.....	30
圖 3-4	量測系統座標系定義.....	30
圖 3-5	攝影機拍攝位置調整.....	31
圖 3-6	攝影機校正用影像.....	32

圖 3-7	校正用影像角點檢測結果.....	32
圖 3-8	校正後的影像.....	33
圖 3-9	影像擷取.....	34
圖 3-10	明影像與暗影像經校正後影像.....	35
圖 3-11	定義棋盤角點在全域座標位置.....	36
圖 3-12	擷取感興趣區域.....	37
圖 3-13	角點偵測結果.....	37
圖 3-14	紅光雷射影像強度值.....	38
圖 3-15	二條直線交點.....	39
圖 4-1	攝影機校正用棋盤格子.....	42
圖 4-2	校正用影像.....	44
圖 4-3	使用 6×6 棋盤格子參數校正後影像 .....	44
圖 4-4	使用 10×11 棋盤格子參數校正後影像 .....	45
圖 4-5	使用 16×15 棋盤格子參數校正後影像 .....	46
圖 4-6	紅光雷射 (a)衰減前與(b)衰減後 .....	46
圖 4-7	RGB 影像 R 影像直方圖.....	47
圖 4-8	紅光雷射垂直投射影像.....	48
圖 4-9	紅光雷射投射影像區間多項式擬合.....	49
圖 4-10	紅光雷射傾斜線影像.....	50
圖 4-11	紅光雷射傾斜線局部曲線擬合.....	51
圖 4-12	紅光雷射投射影像平滑處理.....	53
圖 4-13	雷射影像多項式擬合後峰值分佈.....	54
圖 4-14	雷射影像 2 階多項式擬合後峰值.....	55
圖 4-15	雷射影像分段 3 階多項式擬合後峰值.....	55
圖 4-16	無人搬運車從動輪磨耗量測.....	56
圖 4-17	從動輪輪面標註.....	57
圖 4-18	線型雷射投射從動輪輪面情形.....	57
圖 4-19	從動輪輪面破損檢測.....	58
圖 4-20	線型雷射光強度峰值影像座標位置.....	59
圖 4-21	從動輪輪面磨耗情形.....	59

## 表目錄

表 2-1	無人搬運車走行驅動比較表.....	10
表 3-1	線型紅光雷射規格表.....	26
表 3-2	樹莓派主機板規格表.....	26
表 3-3	CCD 攝影機鏡頭規格表 .....	27
表 3-4	攝影機參數與失真參數輸出.....	33
表 3-5	定義角點在全域座標位置.....	36
表 3-6	角點偵測結果.....	37
表 4-1	3 個棋盤格子校正後取得參數.....	43
表 4-2	紅光雷射線多項式階數實驗結果表.....	54



# 第一章、緒論

## 1.1 前言

本研究的無人搬運車主要運用在第 5 代(1100mm × 1300mm)的 TFT-LCD 面板廠，其製程性質可區分為 Array、Cell、Module 等三大廠區，Array 廠區主要製程為薄膜、黃光、蝕刻及測試等，上述的製程反覆進行 4 次或 5 次，稱之為四道光罩(4 Photo Engraving Process，簡稱 PEP)或五道光罩(5 Photo Engraving Process，簡稱 PEP)；而 Cell 廠區再依製程在細分為前段區(FEOL)及後段區(BEOL)，FEOL 區的製程為：PI 膜塗佈、PI 膜配向、TFT 與 CF (Color Filter)對組，BEOL 區的製程為：切割、貼偏光膜、脫泡等，最後將這些半成品送至 Module 廠進行後續零組件組裝。

在地狹人稠的台灣，要將上述的製程以一條龍方式進行製造生產 TFT-LCD 幾乎是達不到的事情；於是自動化物料搬運系統(Auto Material Handling System，簡稱 AMHS)便扮演相當重要的角色，自動化物料搬運系統可依製程機台的配置搭配符合其所需的自動化物料搬運系統設備。自動化物料搬運系統設備最常見的有倉儲搬運系統(Stocker)、無人搬運車、貨梯(Lifter)及軌道車(Rail Guide Vehicle)等等，其中無人搬運車設備在 5 代以下的 TFT-LCD 面板 Array 及 FEOL 廠區中使用最多的設備之一。

TFT-LCD 廠內使用的無人搬運車，主要是依靠固定於高架地板(Raised floor)的磁點，修正走行前進及改變方向的導引，在廠內無人搬運車的工作就是將各個製程串起，搬運每個站點生產所需玻璃的重要設備之一。無人搬運車內載著裝 40~50 片滿玻璃的卡匣(Cassette)送至每一道製程，由於卡匣內放的玻璃厚度只有 0.7mm 或 0.5mm，若是在搬運的過程震動太大，會造成玻璃排列錯位或位移，嚴重者造成玻璃破片，雖然只是 1~2 片玻璃破片，但其產生的玻璃碎屑可能讓四周的玻璃遭到刮傷影響整批卡匣內的玻璃；因此對無人搬運車在行走時可能產生的危害，進行研究與分析，其震動來源幾乎都是因為無人搬運車的二個走行輪磨耗不均或破損造成，二個走行輪在轉動時產生速差，使無人搬運車在走行產生搖晃。因此若能即早發現無人搬運車的走行輪磨耗或破損情形並進行調整，就可以免除因震動而對產品產生的危害。

## 1.2 研究動機及目地

無人搬運車體積小、機動性高，能靈活搭配於自動化物料搬運系統中，但也因為車體小讓所有的零組件幾乎全部擠在一起，這點為預防保養的人員帶來相當大的困擾，因為這會讓很多檢查工作不易展開。由於無人搬運車的走行輪在組裝後只剩一小部份區域能提供技術人員以目視方式檢查走行輪的外觀缺陷，且這局部小的區域也無法讓工程人員來量測輪徑大小，因此往往要等到輪子間差異量變大，無人搬運車在行進間發生搖晃時，工程人員才會介入處理及解決問題，亦即工程人員是處於被動的方式在解決問題與改善。因此若能有準確、快速有效的檢測缺陷與量測輪徑的方法，便能讓工程人員做好預防與保養的工作而這也是各面板廠積極想推動改善的部份。

為有效解決無人搬運車走行輪磨耗、破損，造成車身搖晃對 TFT 玻璃片所造成危害。現況無人搬運車走行輪目視不易，且沒有及時有效的方法能準確判斷是否有破損情形，又受限於走行輪周圍空間的因素，使得工程人員無法準確有效量測走行輪輪徑，以致於不能即時對輪子磨耗進行參數補正的動作。本研究希望建立自動化量測系統紀錄無人搬運車走行輪磨耗監控系統，監控當輪徑磨耗量達到需要補正時或磨耗量數據出現異狀時，立即通知工程人員介入進行走行輪更換或磨耗參數補正等作業。人員只須透過量測數據分析，即可了解無人搬運車走行輪狀況，不需額外安排人力做走行輪點檢動作，有效降低人員的工作量、增加工作效率。

### 1.3 文獻回顧

目前對於物體表面量測的方法可分為接觸式量測及非接觸式量測二種，接觸式量測方法主要是利用探針或探頭直接接觸待測物表面，並配合運動控制軟體，逐點觸發或掃描的方式進行，量測待測物表面的資訊，因此量測比較花費時間，且探針直接接觸量測物的表面，除了探針容易受到污染外，一旦受測物產生破損或變形現象時，容易造成探針或探頭等量測設備的損壞。非接觸式量測方法基本是以光學量測技術為主，利用不同視覺角度的比對，得到待測物體的表面或輪廓資訊，故可以大量縮短量測的時間，且因非接觸式量測的方式，不需要擔心因待測物體破損或變形而危及量測設備。

非接觸式量測可分為主動式與被動式二種[1-2]，被動式量測是指系統不提供任何能量源給待測物體，而是讓待測物體藉由四周的環境光源或物體本身自發的能量源；而主動式量測則必須用特定的光源形式投射在物體表面上，再經由光感測器接收反射光，並利用影像處理與數值分析方法對擷取投射光源的影像變化進行處理，即可以幾何方式求出物體表面上投射光源的變化，進而獲得物體表面的尺寸資訊。用光學量測方法來量測物體的表面或輪廓的方法有很多種，例如雙鏡頭立體視覺量測法[3-5]、條紋量投射量測法[6-8]，疊紋量測法[9-12]。雙鏡頭立體視覺量測法主要是使用二個 CCD 攝影機，透過不同的視角取得相同場景及配合影像處理的方式，將影像的座標轉換為空間座標。雖然量測範圍非常的廣，但左右二個 CCD 內影像的相互對應點不容易確認，在量測前必須先標示出某些特定的控制點及相關參數等，量測影像處理相當複雜。條紋投影量測法，主要將量測所需的圖案藉由投影設備與立體顯微鏡將結構光投射至待測物表面，以 CCD 攝影機作取像動作，最後合併格雷氏編碼與相位移法計算得到絕對相位，配合三角量測原理得到待測物三維的外貌輪廓；但受限於條紋密度跟影像處理系統的解析度，對於密度稍微密的條紋，會失去黑白對比度造成難以解析，條紋密度太疏又無法精細量測。疊紋量測法為利用干涉所產生的即時正弦強度分佈的光柵投射在物體表面，在將物體表面變形的疊紋影像擷取下來，經由電腦數位化分析條紋相位的訊息，而獲得物體的三維輪廓資料，疊紋量測法雖然可以準確且靈敏量測物體表面的外形輪廓及各點的高度變化，但複雜的影像處理與相位移法的操作過程，限制了疊紋量測的應用。

本研究使用雷射線型結構光投射量測法優點在於設備架設成本低，不佔空間

，運用針孔攝影機透視投影方法，搭配跨平台電腦視覺庫、MATLAB<sup>®</sup>及自撰 C++ 程式，可準確的計算投射在待測物表面的結構光源各點的高度變化。

## 1.4 論文架構

本論文共為五章，第一章緒論中介紹無人搬運車在 TFT-LCD 運用的概況、自動化物料搬運系統架構及說明本研究之研究動機，研究目的；第二章相關技術文件探討，對本研究有相關的理論與方法學習與了解；第三章磨耗量測系統的建立；第四章磨耗量測系統的實驗成果；第五章提出本研究的結論與建議。



## 第二章、 相關技術文件探討

本章節將針對自動化物料搬運系統及本研究相關的研究方式，分為三個部份回顧：第一部份是 TFT-LCD 自動化物料搬運系統介紹。第二部份是無人搬運車系統架構說明及主動輪損耗。第三部份為本研究使用影像處理相關文獻整理。

### 2.1 自動化物料搬運系統簡介

自動化物料搬運系統在工廠自動化(Facility Automation, FA)、彈性製造系統(Flexible Manufacturing System, FMS)及電腦整合製造系統(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)的物流中佔有很重要的一環。自動化物料搬運系統主要目的是在降低生產成本，提升工廠自動化、進而達到工廠無人化目標。圖 2-1 簡述自動化物料搬運系統基本的設備，其中包括：倉儲系統(Stocker)主要是用在存放卡匣或做為製程之間的轉運站、貨梯用於跨樓層的卡匣搬送、無人搬運車應用在倉儲系統與製程機台間或倉儲系統與倉儲系統間的倉儲系統搬送，其中無人搬運車設備因體積小且容易與其它設備搭配使用，因此在 5 代面板廠的自動化物料搬運系統中為使用數量最多的設備。

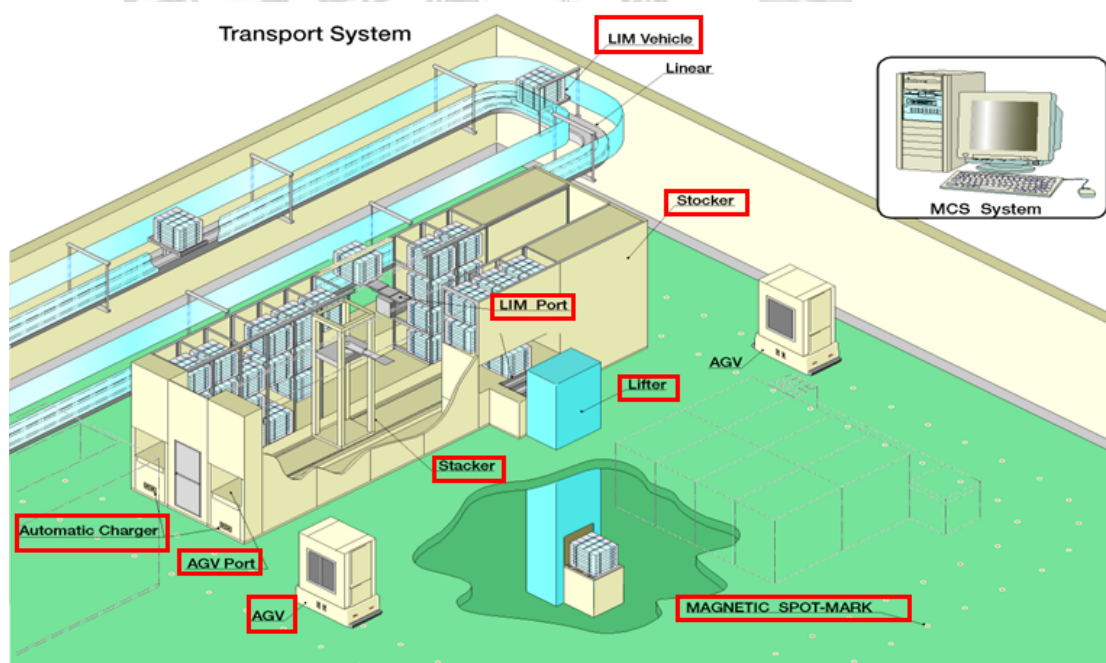


圖 2-1 自動化物料搬運系統簡圖

1990 年代 TFT-LCD 產業崛起於日本，當時日本設計建造了一代廠( 簡稱 G1 ) 的製程。一代廠的玻璃基板大約是  $30 \times 40$  公分大小，演進至今，已發展至 8.5 代廠(G8.5)製程，玻璃基板尺寸則達到了  $220 \times 250$  公分，本文自動化物料搬運系統配置在 G5 代廠房，玻璃基皮尺寸約  $110 \times 130$  公分，以 48 片玻璃作為一個



搬運單位裝載在卡匣內，滿批卡匣總重量高達約 200 公斤，已遠遠超出操作員的人體負荷的極限，再加上迴流的特性使得 TFT 製程變的更複雜，若用人來搬運卡匣也容易造成搬運出錯。因此，為了追求安全及高搬送效率之下，一座有效率的自動化物料搬運系統是相當重要的。圖 2-2 為 G5 面板廠其中部份生產線的自動化物料搬運系統配置圖。

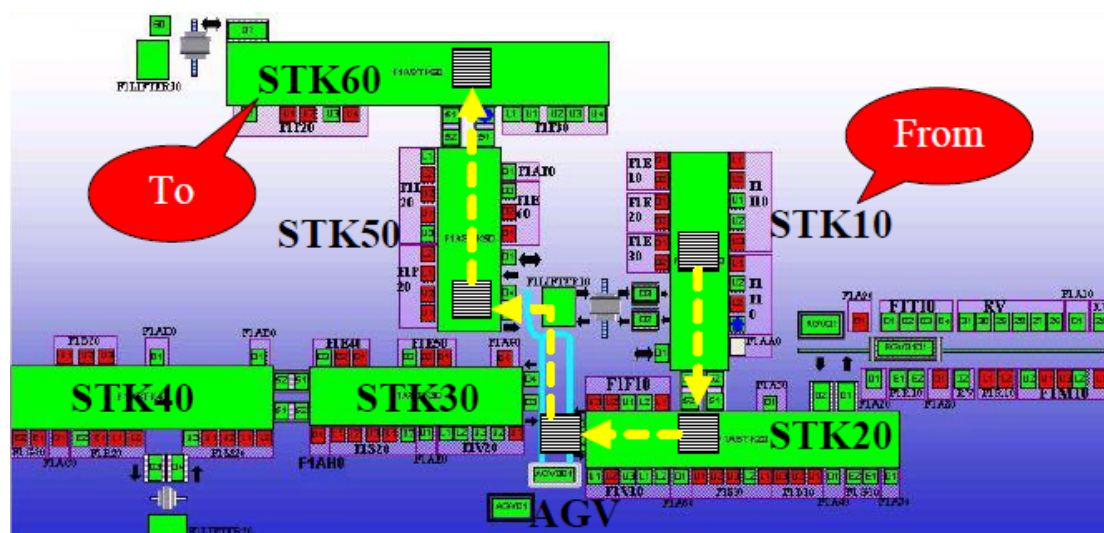


圖 2-2 自動化物料搬運系統配置

## 2.2 無人搬運車簡介

無人搬運車的優點：一、提高自動化程度與工作效率，減少生產過程中因搬運或加工前、後等待時間，而造成無形成本的增加；二、降低人力成本；以前由人力搬運裝載玻璃的卡匣，由於世代的演進 TFT 玻璃片尺寸越來越大，使得卡匣的體積及重量無法再由人力來搬送，而無人搬運車靈活穿梭的特性，可節省廠房設備配置的空間，讓它成為自動化搬運物料系統中應用最廣泛的設備之一。圖 2-3 說明無人搬運車搬送命令的傳送方式。無人搬運車的搬送命令來自於製造控制系統 (Manufacturing Control System；簡稱 MCS) 所下達的搬送命令，經由 AGVC ( Automatic Guide Vehicle Controller) 電腦接收後，藉由派車軟體 NT7000 處理過後再將命令透過無線網路基地台 (Access point；簡稱 AP) 指派無人搬運車進行貨物搬送。其中 NT7000 的主要功能為：命令控管 (Order Manager)、車輛控管 (Carrier Manager) 及交通控管 (Traffic Manager)。

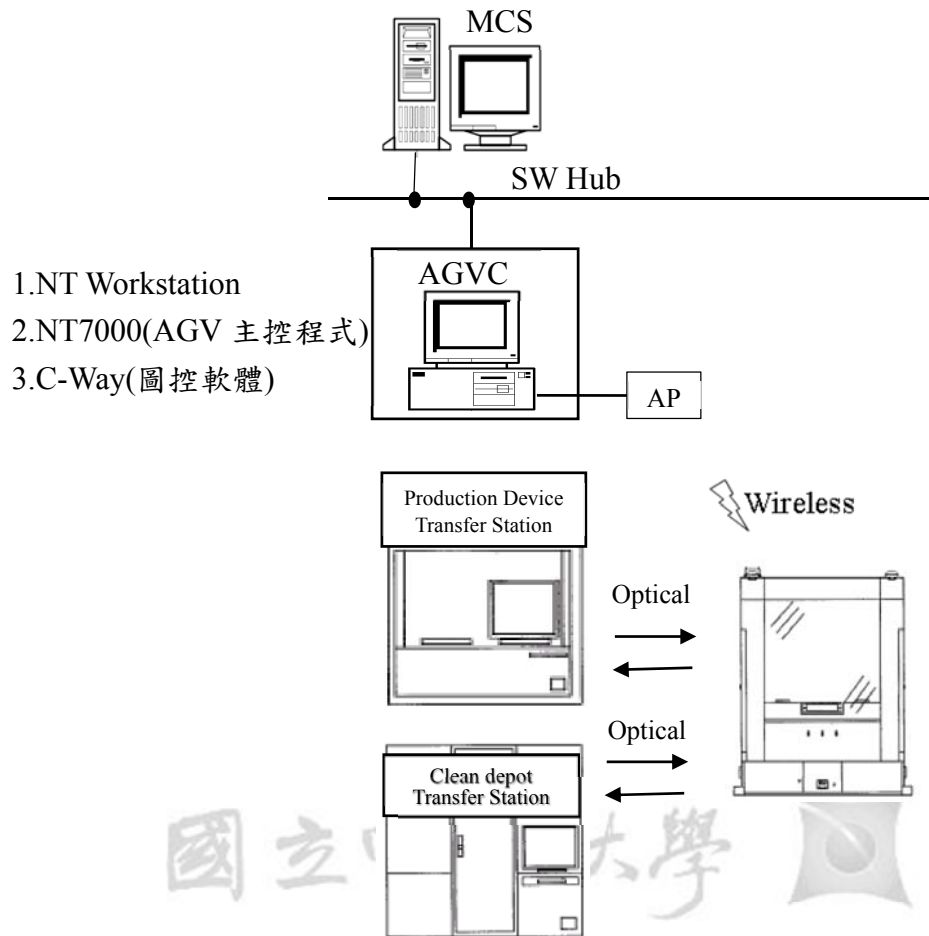


圖 2-3 AGV 系統架構圖

無人搬運車是一種獨立作業的搬運系統，在製程中擔任物料倉儲、運輸工作，從不同的負載點至不同的卸載點，使得生產線彈性化、降低成本；其動力來源通常藉由蓄電池供應，而走行的路徑導引方式可分為磁點導引、磁帶導引、雷射導引等。

### 2.2.1 磁帶導引 (Magnetic Tape Guidance)

磁帶導引[13]無人搬運車是將磁帶貼在無人搬運車行走路線的地面上，如圖 2-4 所示無人搬運車依靠著車上的感應器如光檢知器等元件偵測磁帶，當偏離路徑時立即進行校正。但將磁帶貼在地面上的缺點，磁帶容易受到灰塵、油污或破損的影響，使光檢知器無法讀取或判別錯誤，當無人搬運車經過時會使無人搬運車上的檢知器判讀失敗造成走行迷失而發生發生異常，造成搬送中斷無法進行的困擾。

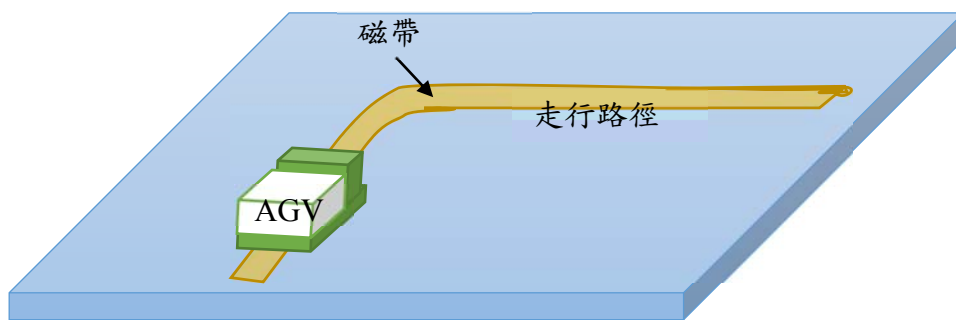


圖2-4 磁帶導引無人搬運車

### 2.2.2 雷射導航 (Laser Navigation)

雷射導引的概念跟飛機、船舶定位使用的GPS(Global Positioning System)相類似，都是利用已知座標當作參考點，計算出航行器目前所在的位置。雷射導航的無人搬運車是利用安裝於車頂上的雷射掃瞄器及固定在四周的反射板，雷射掃瞄器收集反射片的夾角及位置座標，再輔以編碼器(Encoder)作精密繁複的運算，可準確的控制及導引雷射導航無人搬運車的方向及定位，如圖2-5所示。

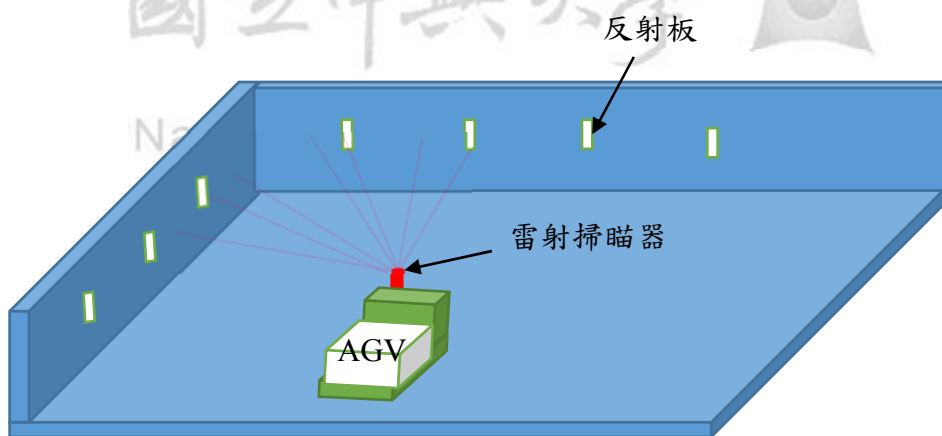


圖 2-5 雷射導航無人搬運車

### 2.2.3 磁點導引

磁點導引無人搬運車其工作原理是利用安裝在車體下方特製的磁性位置傳感器如圖2-6所示，檢測安裝在地板上的小磁鐵，再利用陀螺儀技術連續控制無人搬運車的運行方向。這種引導方式是在沿引導路徑的地面上每隔5~10 m安裝一對小磁鐵。磁性傳感器是利用霍耳元件檢測磁場的基於微處理器的傳感器，當無人搬運車通過地面上的小磁鐵時，傳感器送給無人搬運車 $X$ 和 $Y$ 坐標。陀螺傳感器是一種固態、六軸角速率傳感器，其輸出電壓與其感測軸上的轉速成正比，

由此確定無人搬運車的行進方向。

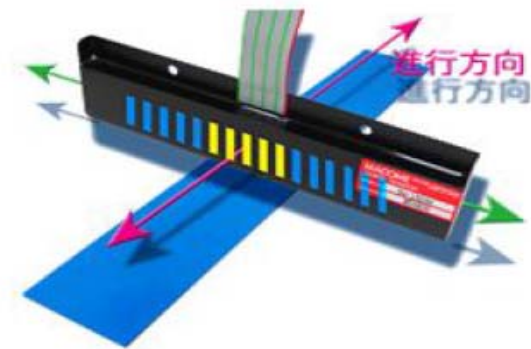


圖2-6 磁性位置傳感器

本文無人搬運車走行引導的方式即是採用此方法，將磁點嵌在高架地板中，無人搬運車透過磁性位置傳感器偵測地板的磁點進行移動軌跡修正運行於無塵室廠房內，無人搬運車外觀如圖2-7所示。



圖 2-7 無人搬運車外觀圖

## 2.3 無人搬運車走行輪簡介

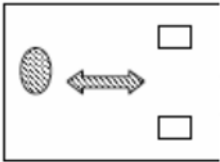
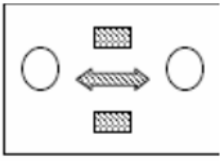
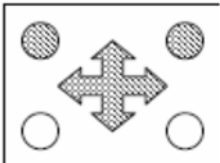
無人搬運車走行驅動方式可以歸納為三種：單輪驅動與軸向模式(Steer Driving)、差速驅動模式及全方位驅動模式(Quad Motion)。

單輪驅動是指用一個驅動輪並有行走和轉向的功能，兩個從動輪為固定輪，若無人搬運車行進間穩定性不夠時，還可以增加活動輪作為輔助支撐。此種驅動方式的無人搬運車其運動性能稍差，轉彎半徑較大，但導引及運動的可靠性高。

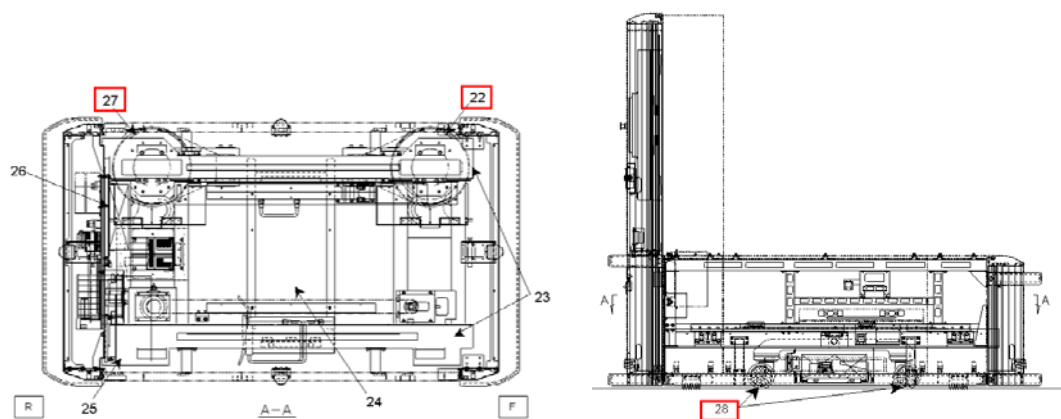
差速驅動方式是指在無人搬運車左右對稱位置安裝兩個不包含轉向的驅動輪，以2個或多個活動輪為從動輪，依靠左右輪的差速來實現轉向，差速驅動模式的無人搬運車可以有跟單輪驅動的功能，且轉彎半徑小，靈活性也比較好。

全方位驅動方式是指以2個包含行走和轉向功能的驅動輪，以及2個或多個活動輪當作從動輪，實現全方位包括位置和方向的運動。它是目前無人搬運車中應用較複雜的驅動方式，不僅可以實現單輪驅動的轉向模式及雙輪差速驅動模式，還可以實現平移或側移動作。

表 2.1 無人搬運車走行驅動比較表

名稱 類別	車輪配置架置	可行進 方向	導引控制 難易度	回轉 空間	價格	適用場合
單輪 驅動		前進， 亦可較 慢速後 退	易	較大	較價 宜	多適用於 單向搬運 迴路，不 需雙向行 駛者
差速 驅動		前進及 進退	普通	中	普通	多適用於 雙向來回 搬運或迴 轉空間有 限者
全方位 驅動		前進， 後退及 橫移	難	最小	較貴	多適用於 迴轉空間 極小之窄 巷道必須 橫移行走 者

本文無人搬運車走行輪驅動的方式採用全方位驅動，主動輪與從動輪的配置如圖2-8所示，主動輪的輪框包覆一層硬矽膠如圖2-9所示，圖2-10 描述無人搬運車行進方向的示意圖；全方位的驅動方式讓無人搬運車在狹小的道路上，在行進及轉彎的控制上更為靈活，圖2-11為模擬無人搬運車左轉、右轉以及迴轉路徑圖。



22	前輪走行驅動裝置	28	從動輪
27	後輪走行驅動裝置		

圖 2-8 無人搬運車主動輪與從動輪配置



圖 2-9 無人搬運車走行驅動輪與輪框



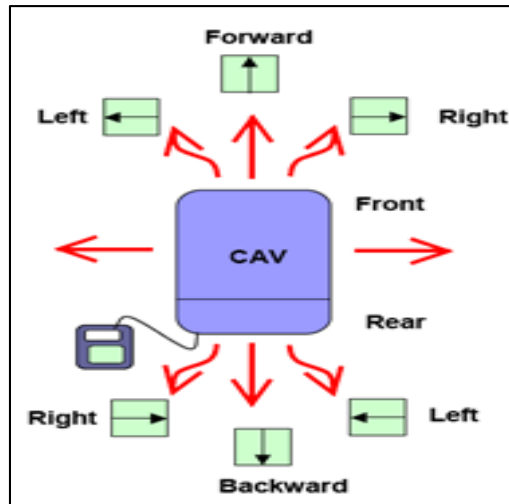


圖 2-10 無人搬運車行進方向示意圖

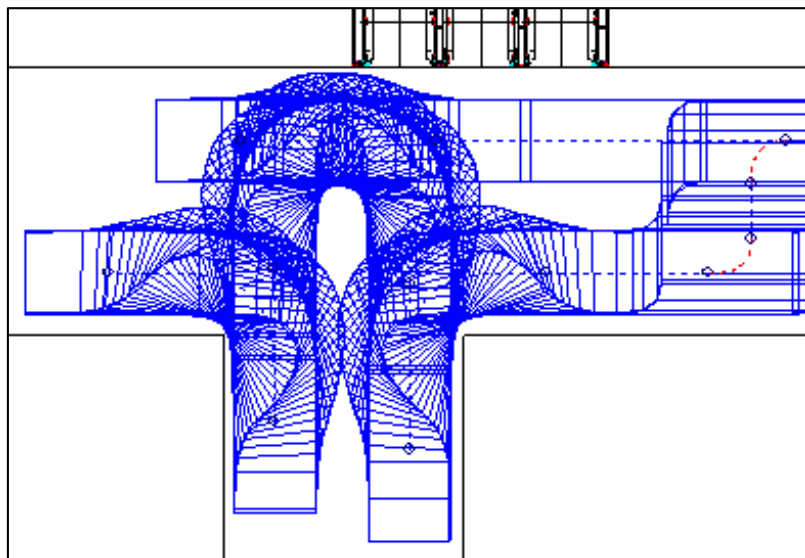


圖 2-11 無人搬運車轉彎模擬路徑圖

## 2.4 無人搬運車走行輪磨耗和缺陷

無人搬運車走行輪在磨耗的部份，由於無人搬運車主要是行走高架地板上，而高架地板的種類區分為盲板及孔板兩類；當無人搬運車走行輪在孔板位置要進行側移或改變行進方向時，走行輪必需先旋轉 90 度或 180 度，這個動作對走行輪會產生很大的傷害，嚴重會造成走行輪的磨耗快速。由於目前廠內並沒有直接有效且準確可靠的方法，來進行無人搬運車走行輪磨耗的量測方法；由於走行輪大部分被鐵製外殼所包覆著(如圖 2-12)，能露出的輪面範圍又受限於空間狹小使得技術人員不容易量測輪徑。而現有的方法只能依賴技術人員利用厚薄規量測胎皮的厚度，透過胎皮厚度量測來計算走行輪輪徑大小，用來斷定是否達到使用極限需要進行更換動作，或是比較兩顆主動輪輪徑之間差異量，用來評估是否要

進行無人搬運車走行校正的動作。

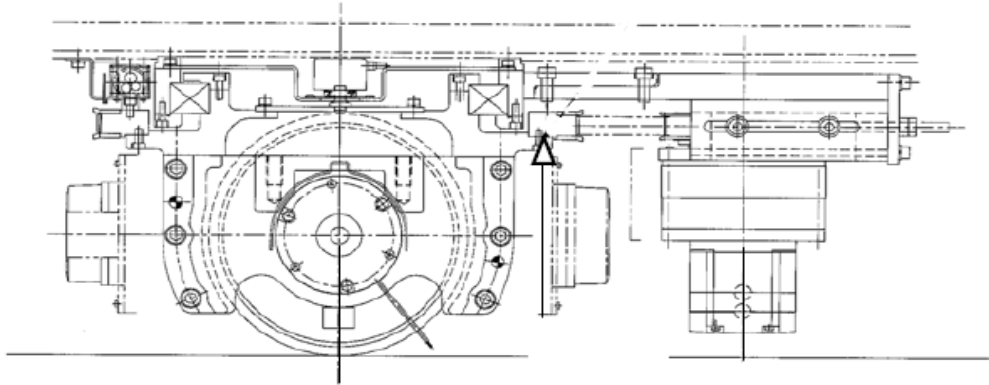


圖 2-12 無人搬運車主動輪側視圖

## 2.5 數位影像處理簡介

藉由記錄下來利用各種形式呈現出來的”像”就是通常所說的影像，它包含各種的圖片、照片及 X 光底片等等。而影像處理就是為了達到某種目的，而針對影像的強度(Intensity)分佈作某些特殊加工和分析。雖然使用的是同一張的影像，但是使用不同的方法處理，所得到的影像資訊也會產生不一樣的結果。

一張平面的影像可以使用二維函數  $f(x, y)$  來定義，而  $x$  和  $y$  是空間(spatial)座標。在任一個座標點  $(x, y)$  上， $f$  的大小稱為影像在該點的強度(Intensity)。影像經過取樣和量化在空間和數值上都離散化，形成一個數位點陣，當  $x$ 、 $y$  與  $f$  之大小值都是有限的離散量時，稱影像為數位影像(digital image)。利用電腦來處理數位影像則稱為數位影像處理(digital image processing)[14]。

一張影像  $f(x, y)$  取樣後，可得到  $M$  列和  $N$  行的數位影像，此  $M \times N$  的數位影像可以寫成陣列形式如下：

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

此方程式右邊定義為一數位影像，而此陣列的每一個元素稱為像素。一般將數位影像座標定義如圖 2-13 所示。



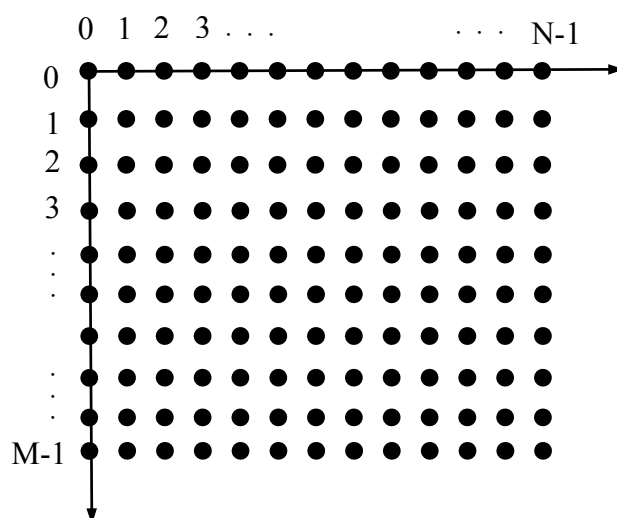


圖 2-13 數位影像座標表示方式圖

### 2.5.1 灰階影像處理

彩色影像轉灰階影像為影像處理中最常用的方法，而將彩色影像轉成灰階影像約有兩個方法，例如利用 RGB 轉換成 HIS 公式中的 I 值，其方法是將 RGB 三個值加總並取平均值[15]，如(2.1)式所示；另一個方式利用 RGB 轉換 Y 值，如(2.2)式所示。其中 Y 值代表亮度也可表示成灰階值，如(2.3)式所示。本研究運用 OpenCV2.4.6 的 cvtColor[16]進行影像灰階處理。

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.528 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

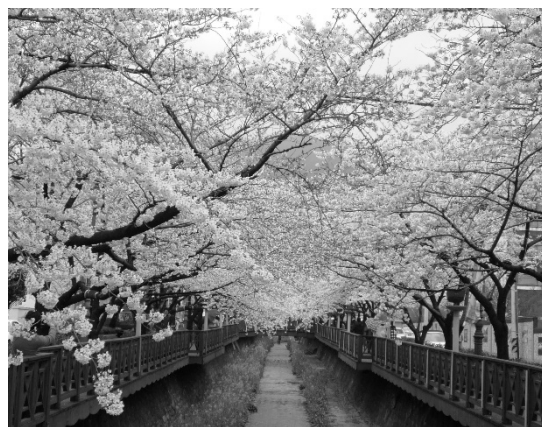
其中

$$Y = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (2.3)$$

圖 2-14(b)為將圖 2-14(a)利用 2.3 式轉成灰階影像後的結果。



(a) 彩色影像



(b) 二值化後灰階影像

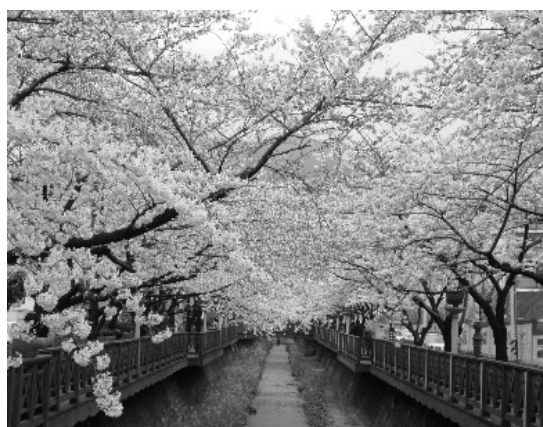
圖 2-14 影像二值化處理 (a)彩色影像 (b)灰階影像

## 2.5.2 影像二值化處理

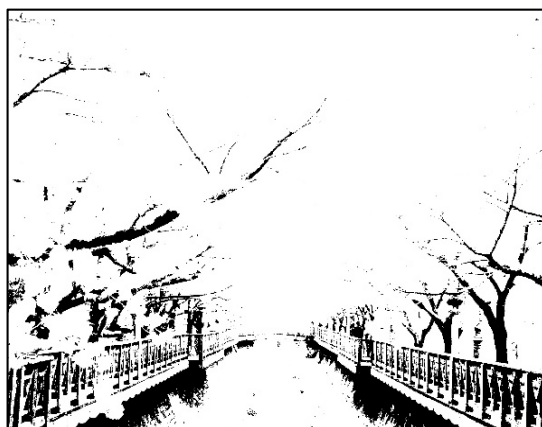
影像的二值化處理就是將灰階影像上點的強度設置為 0 或 255，將整個影像呈現出明顯的黑與白效果。將有 256 個強度等級的影像藉由適當的閾值 (Thresholding)選用，得到仍然可以反映影像整體或局部特徵黑與白的二值化影像。在數位影像處理中，二值化影像佔有很重要的地位，若要進行二值影像的處理與分析，首先要將影像強度二值化，得到二值化影像後，影像的集合性質就只與像素值為 0 或 255 的點的位置有關，使得影像處理變得簡單。設置閾值為  $t$  可以得到一幅二值影像  $f_t$ ，它由

$$f_t(x,y) = \begin{cases} 255, & f(x,y) \geq t \\ 0, & f(x,y) < t \end{cases} \quad (2.4)$$

圖 2-15(a)為灰階影像，圖 2-14(b)為灰階影像進行二值化後的影像。



(a)



(b)

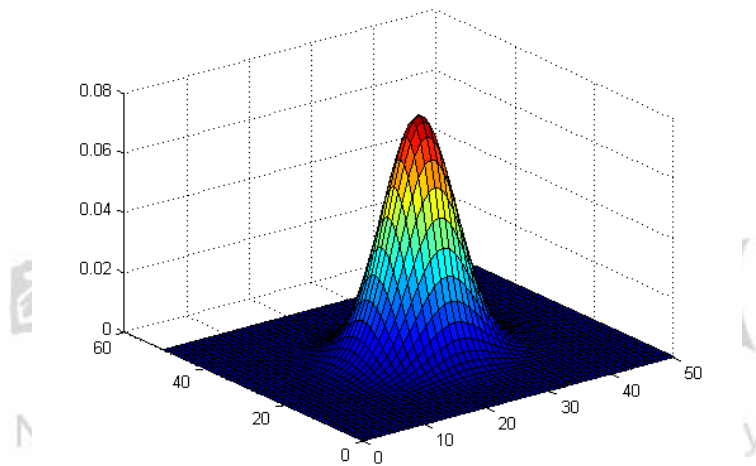
圖 2-15 影像二值化處理 (a)灰階影像 (b)二值化影像

### 2.5.3 平滑影像(Smooth Images)

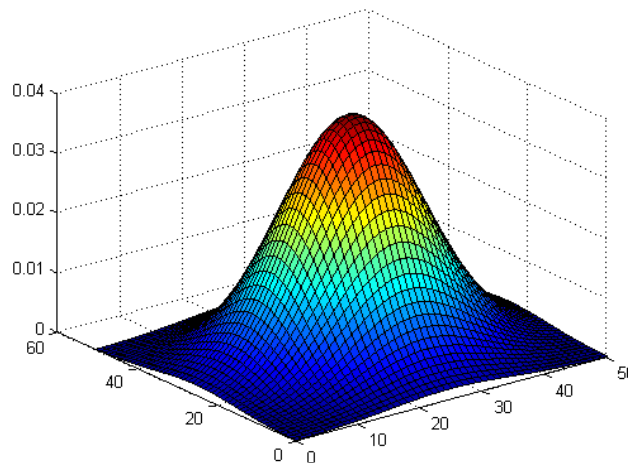
為了除去影像的某些雜訊，對影像進行平滑處理，這對影像在進行邊緣偵測時，能讓角落邊緣比較為圓滑，同時也可以使部份的雜訊被模糊，避免雜訊干擾。

高斯濾波器(Gaussian Filter)是一個平滑化濾波器，平滑化程度是由標準差 $\sigma$ 來控制， $\sigma$ 值越大，平滑程度越高，影像越模糊。二維空間的高斯分布的函數定義為：

$$G_0(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x)^2+(y)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.5)$$



(a)  $\sigma$  值小



(b)  $\sigma$  值大

圖 2-16 二維高斯濾波器

在二維空間中這個公式生成的曲面的等高線是從中心開始呈正態分佈的同心圓。分佈不為零的像素組成的卷積矩陣(convolution matrix)與原始圖像做轉換。每一個像素的值都是周圍相鄰像素值的加權平均。原始像素的值有最大的高斯分佈值，所以有最大的權重，相鄰像素隨著距離原始像素越來越遠，其權重也越來越小。這樣進行模糊處理比其它的均衡模糊濾波器更高地保留了邊緣效果。

$$\frac{1}{273}$$

1	4	7	4	1
4	16	26	16	4
7	26	41	26	7
4	16	26	16	4
1	4	7	4	1

圖 2-17 5×5 的高斯濾波器

## 2.5.4 角點檢測(Corner Detection)

特徵檢測是電腦視覺(Computer Vision) 應用重要的一部分，這需要尋找影像之間的特徵並建立對應關係。點，也當作影像中的特殊位置，是很常用的特徵之一，點的局部特徵也可以叫做關鍵特徵點(keypoint feature)，或感興趣點(interest point)，或角點(corner)。角點的具體描述可以有幾種：一階導數(即灰度的梯度)的局部最大所對應的像素點、兩條及兩條以上邊緣的交點、影像中梯度值和梯度方向的變化速率都很高的點、角點處的一階導數最大，二階導數為零，指示物體邊緣變化不連續的方向。

Harris[17]角點檢測，是根據某個特定的像素，檢視周遭方向的色階變化情形，而判斷它是位於平面上、邊緣上或是角落上。

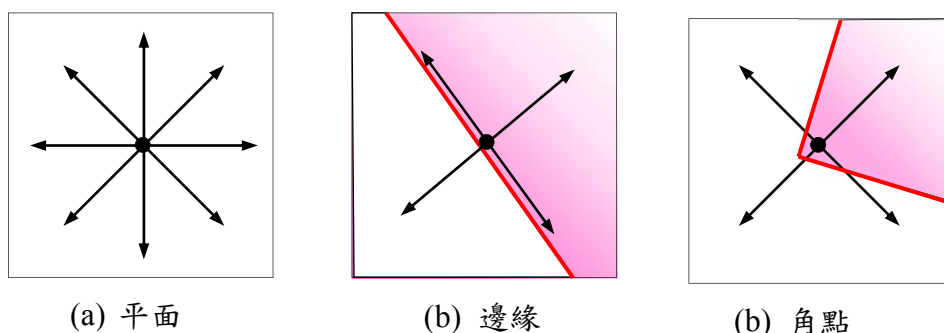


圖 2-18 角點偵測運作原理

圖 2-18(a) 若某一點的周遭色階都沒有太大變化，那麼這個點判定位於平面上；圖 2-18(b) 若點的某個方向色階變化很大，且正交方向的色階變化很小，那

麼判定它是位於一條邊緣上；圖 2-18(c) 若某一點的所有方向，色階變化都很大，那麼就判定它是位於一個角落上；Shi-Tomasi 角點檢測算法[18]是 Harris 算法的改進。Shi 和 Tomasi 提出改進的方法，若兩個特徵值中較小的一個大於最小閾值，則會得到角點。

本研究使用 OpenCV2.4.6 提供的 goodFeaturesToTrack 來取得角點位置及 FindCorner-SubPix 來達到次畫素精度，而 goodFeaturesToTrack 與 FindCorner-SubPix 將在第三章進一步說明。

## 2.5.5 攝影機校正(Camera Calibration)

Zhang 在 1999 年提出的技術報告[19]中，將攝影機校正方法區分為二大類：攝影測量校正(Photogrammetry Calibration)和自主校正(Self-Calibration)。攝影測量校正是利用一個已知 3 維座標校正模型進行校正，這是一個有效率的校正方法，但校正所需的設備昂貴且必需要有詳細的規劃；而自主校正方法不需要額外的校正模型，只需在靜態的場景中移動攝影機取得影像的資訊，經過計算取得攝影機內部及外部參數，重建 3D 結構；本研究參考 OpenCV 2.4.6 攝影機校正[20]所提供的方法。

### 2.5.5.1 攝影機參數

攝影機校正的目的主要是計算攝影機本身的內部參數(Intrinsic parameter)及描述全域座標(World coordinate)和攝影座標(Camera coordinate)之間的座標系統轉換關係的外部參數(Extrinsic parameter)，以下介紹這二類參數：

1. 內部參數：攝影機本身的光學特性，包含攝影機焦距(focal length)、影像中心(image center)、鏡頭失真參數(lens distortion)與比例係數(scale factor)。
2. 外部參數：包含攝影機在全域座標的方向及位置，每次攝影機被移動後，這些參數會跟著改變，必須重新被校正。

### 2.5.5.2 攝影機模型(Camera Model)

使用一個簡單的攝影機模型，也就是針孔攝影機模型，如圖 2-19。 $(x, y, z)$ ：表示攝影機座標系、 $(\eta, \zeta)$ ：表示影像座標系，假設 $(y, z)$ 為被攝物體上的一點， $f$ 稱為焦距(focal length)，呈像點為透鏡投影理想狀態下的點，由於透鏡或多或少會對影像產生失真(distortions)，所以鏡頭失真呈像點即為失真影像的一點； $y'$ 及 $y''$ 分別為焦距 1 的理想狀態呈像點及鏡頭失真呈像點。

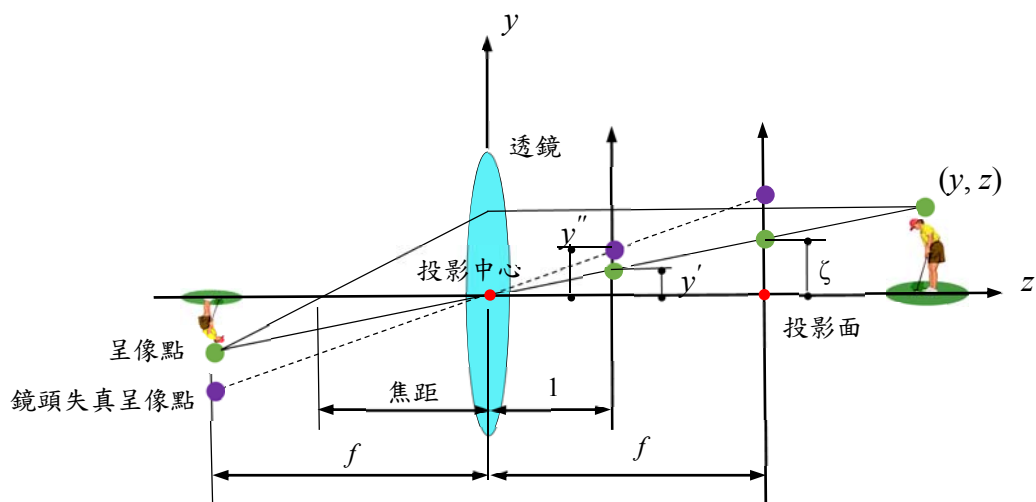


圖 2-19 針孔攝影機模型

### 2.5.5.3 透視投影(Perspective projection)

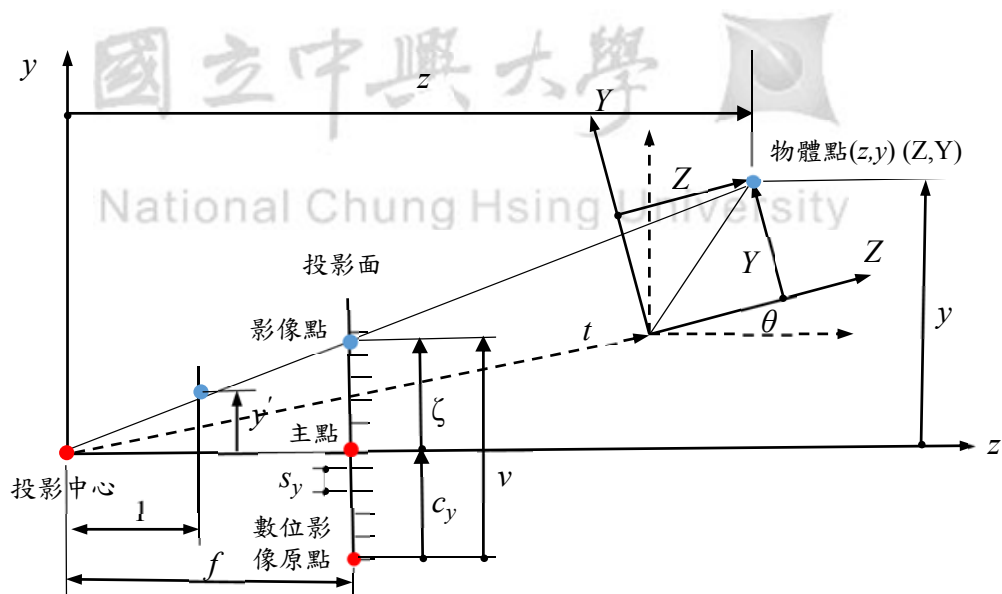


圖 2-20 攝影機模型透視投影

$(X,Y,Z)$ ：表示物體在空間座標系、 $(x,y,z)$ ：表示攝影機座標系，我們將圖 2-19 的投影面移到眼睛前方，平面上的影像就不會上下顛倒。從圖 2-20 中，藉由相似三角形可以得到下面的結果：

$$x = f \frac{X}{Z} \quad (2.6)$$



$$y = f \frac{Y}{Z} \quad (2.7)$$

$$\eta = f \frac{X}{Z} \quad (2.8)$$

$$\text{其中 } x' = \frac{X}{Z}$$

$$\zeta = f \frac{Y}{Z} \quad (2.9)$$

$$\text{其中 } y' = \frac{Y}{Z}$$

$f$  是投影中心(center of projection)到投影面之間的距離，而主點(principal point)為光軸(optical axis)和投影面的交點。理想主點是投影面的中心，也就是影像的中心，但是實際上因為攝影機在組裝上的誤差，整個影像感測元件(image sensor)的中心不會準確的落在主點上，因此加入主點座標( $c_x$ 、 $c_y$ ) 參數來描述影像中心的偏差；另外，由於影像平面是以畫素(pixel)為單位，且感測元件上的像素長寬比(aspect ratio)有可能不是 1，也就是說像素是矩形而不是正方形，因此加入  $s_x$ 、 $s_y$  參數，新的公式如下：

$$x = f \frac{X}{Z} s_x + c_x \quad (2.10)$$

$$y = f \frac{Y}{Z} s_y + c_y \quad (2.11)$$

此處  $f$  的單位為 mm， $s_x$ 、 $s_y$  的單位為 mm，重新整理後得公式如下：

$$x = f_x \frac{X}{Z} + c_x \quad (2.12)$$

$$y = f_y \frac{Y}{Z} + c_y \quad (2.13)$$

$f_x$ 、 $f_y$ 、 $c_x$ 、 $c_y$  四個參數稱為攝影機內部參數(camera intrinsic)。使用鏡片可以增加光線進入投影面的單位時間光線總量，縮短曝光所需要的時間，但是鏡片會造成影像畸變，因此需要校正程序把畸變校正回來，校正程序需要使用到攝影機內部參數。

#### 2.5.5.4 影像、螢幕座標轉換

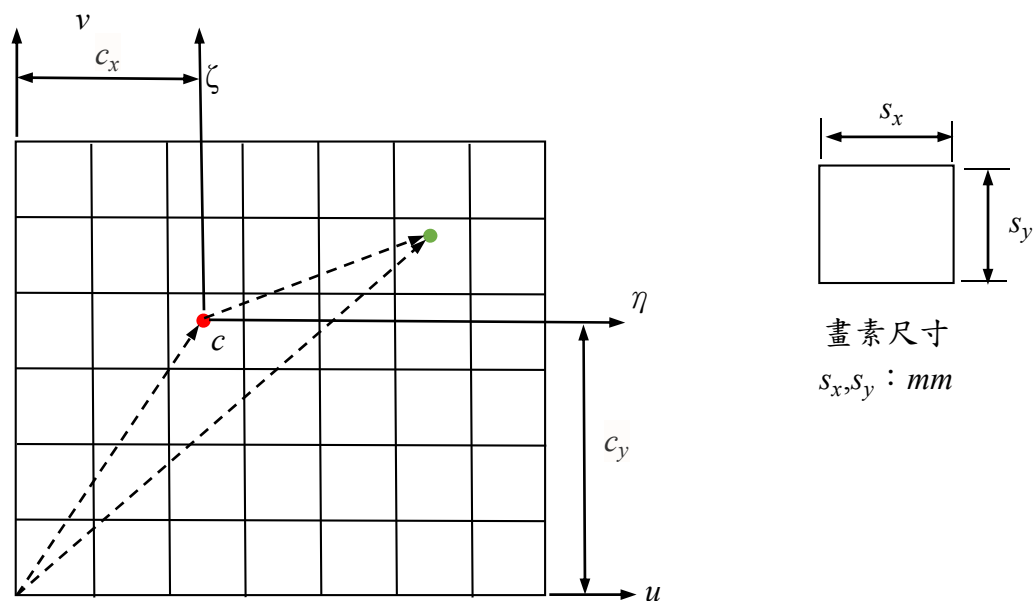


圖 2-21 影像與螢幕座標關係

主點  $c$  位於影像座標上的一點  $(\eta, \zeta)$ ，定義畫素長和寬的尺寸  $(s_x, s_y)$ ，可以得到以下公式：

$$u = \frac{\eta}{s_x} + c_x \quad (2.14)$$

$$v = \frac{\zeta}{s_y} + c_y \quad (2.15)$$

其中  $c_x, c_y$  為主點座標，單位為 pixel、 $(u, v)$  為畫素座標，單位為 pixel、 $(\eta, \zeta)$  為影像座標，單位為  $mm$ 。



### 2.5.4.5 空間、攝影機座標系轉換

圖 2-22 為攝影機模型以透視投影方式將 3D 座標點位轉換為影像平面， $(X,Y,Z)$ 表示全域座標系、 $(x,y,z)$ 表示攝影機座標系；這個轉換關係包括旋轉(Rotation)及平移(Translation)，即(2.16)式中的 $[R \ t]$ ：

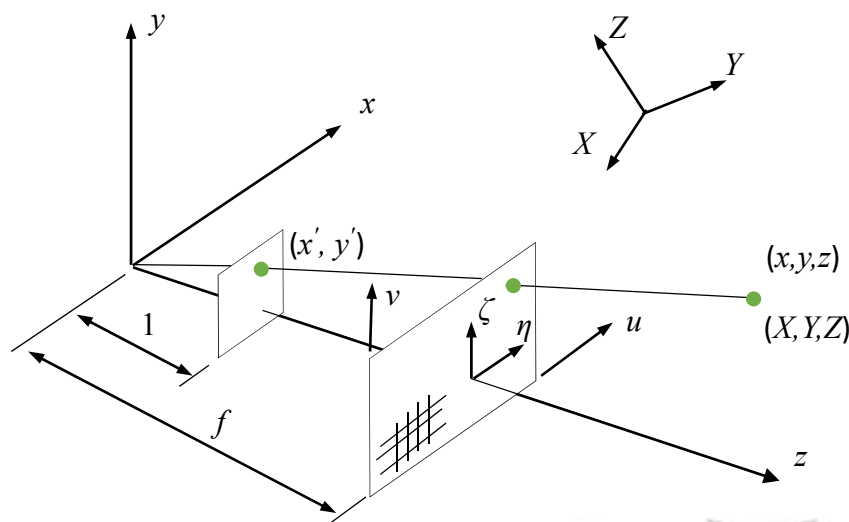


圖 2-22 空間與攝影機座標轉換關係

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = [R \ t] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$$\text{其中 } [R \ t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix}$$

### 2.5.5.6 鏡頭失真(Lens Distortion)

使用鏡頭雖然可以增加進光量，縮短曝光時間，但缺點會造成非線性的影像形變[21]，最常見的兩種主要形變，分別是徑向形變(Radial Distortion)及切向形變(Tangent Distortion)，以下說明這兩種形變：

1. 徑向形變：由於鏡片的形狀，讓距離鏡片中心越遠的光線在通過鏡片時彎折較大，越靠近鏡片中心的光線彎折越小。
2. 切向形變：因攝影機模組組裝的誤差造成的，主要是鏡片和感測元件並不是平行對齊。

由於透鏡所產生的徑向和切向失真，將(2.16)式延伸如下：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t \quad (2.17)$$

從圖 2-19 中，藉由相似三角形可以得到下面的結果：

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{z} \\ y' = \frac{y}{z} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} x'' = x' \frac{1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6}{1+k_4r^2+k_5r^4+k_6r^6} + 2p_1x'y' + p_2(r^2+2x'^2) \\ y'' = y' \frac{1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6}{1+k_4r^2+k_5r^4+k_6r^6} + p_1(r^2+2y'^2) + 2p_2x'y' \end{cases} \quad (2.19)$$

其中 $r^2 = x'^2 + y'^2$ ， $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 為徑向形變變數， $p_1$ 、 $p_2$ 為切向形變變數；  
校正徑向形變及切向形變。

又 $\eta = fx''$ 、 $\zeta = fy''$ ，代入(2.14)與(2.15)式，得到如下式子：

$$\begin{cases} u = \frac{fx''}{s_x} + c_x = f_x x'' + c_x \\ v = \frac{fy''}{s_y} + c_y = f_y y'' + c_y \end{cases} \quad (2.20)$$

## 2.5.6 曲線擬合(Curve Fitting)

在處理科學或工程問題時，常常需要從實驗所獲得的一組數據中，找尋變量與變量之間的變化規律，而曲線擬合的目的就是將這些數據，透過數學式子推導出一組函數來描述原始資料點的趨勢。

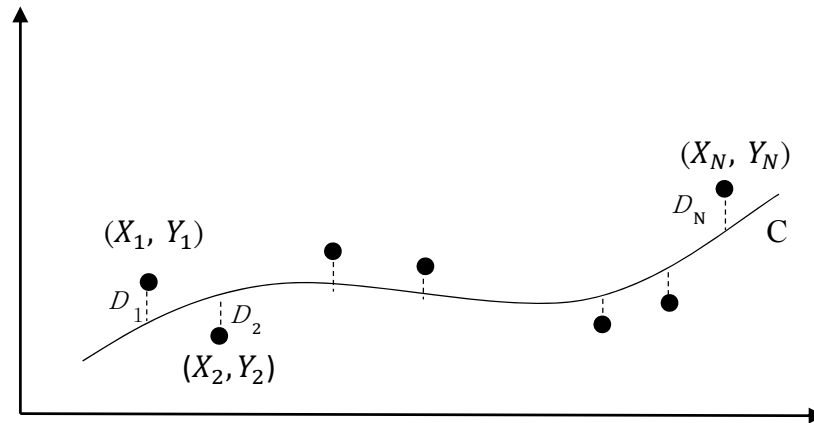


圖 2-23 曲線擬合

用幾何的方式來說明，如圖 2-23 所示，平面有  $N$  個數據點，座標分別為  $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$ .....  $(X_n, Y_n)$ ，對於每個點的座標例如  $(X_i, Y_i)$ ，在  $Y$  軸上相對應的值和曲線  $C$  上的  $Y$  值存在一個偏值，我們用  $D_i$  來表示這個差值  $D_i$ ，它有可能是正、負或零。通常會利用平方差來衡量曲線擬合的最佳程度，這個值越小越好，如式 (2.26)：

$$\sum_{i=1}^N D_i^2 \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2.21)$$

任何一種類型的曲線都有一個共且特性，當  $\sum_{i=1}^N D_i^2$  最小時，稱為最佳擬合曲線。

### 第三章 系統建置與實驗操作

本研究建置無人搬運車走行輪檢測的模擬環境，使用數位影像處理方法，檢測模擬無人搬運車走行輪磨耗、脫膠與輪面破損等情形，提供輪子即時的磨耗量、脫膠與破損情形相關資料。本文在線性滑塊上固定一片 L 型鋁板，雷射光源打在鋁板上，使用百分表來量測鋁板的移動量，而鋁板移動的情形即是模擬走行輪的磨耗量；運用樹莓派(Raspberry Pi)主機板及 CCD 攝影機模組來擷取鋁板移動時的數位影像，以無線網路方式將擷取的影像傳送至分析用的電腦；再利用自撰的 C++ 程式、OPENCV2.4.6 影像處理函式庫及 MATLAB<sup>®</sup>處理影像與分析，最後得到所需要的資訊。後續將針對研究設備、數位影像法操作程式執行流程、設備測試與狀況監測等進行探討及實驗規劃設計。

#### 3.1 研究設備

本實驗之模擬無人搬運車走行輪檢測設備主要由線性滑塊、線性滑軌、L 型鋁板、百分表、雷射光源、樹莓派主機板、CCD 攝影機模組及無線網卡設備組成，如圖 3-1 所示，各裝置說明如下：

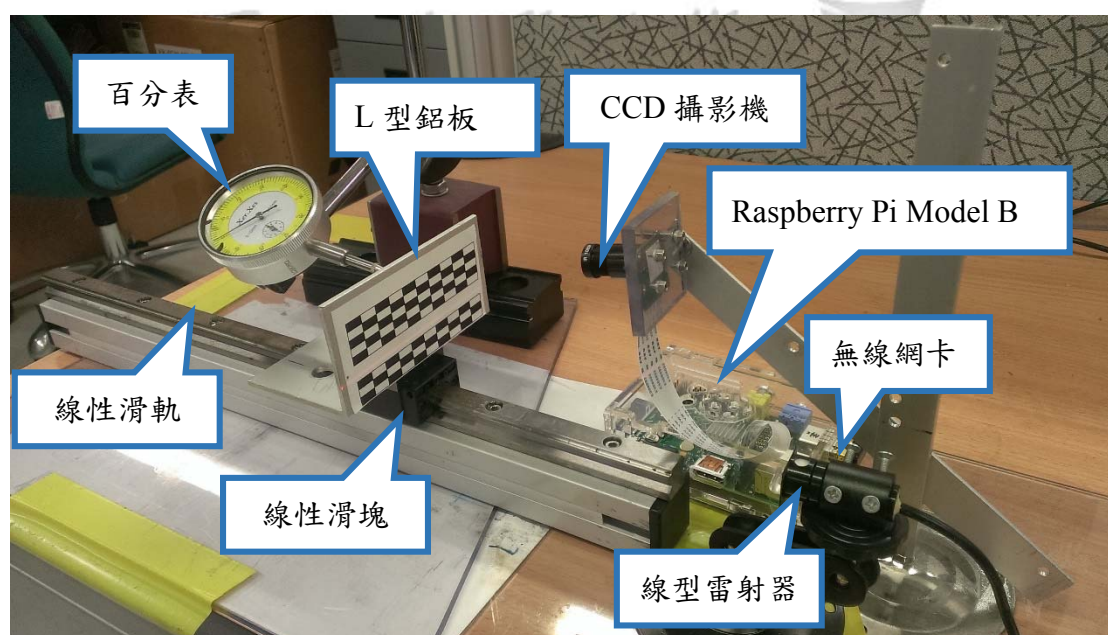


圖 3-1 模擬無人搬運車走行輪量測設備

### 3.1.1 光源：

線型紅光雷射器

規格表	
輸出波長：	635nm
工作電壓：	DC 3-5V
光學系統：	玻璃鏡
光斑形狀：	線狀
工作溫度：	-10℃ ~ +40℃
發散角度：	0.1-1.0mrad

表 3-1 線紅光雷射規格表

### 3.1.2 數位影像擷取設備：

a. Raspberry Pi Model B

採用 Raspberry Pi 2.0 model B 512MB 主機板其主要規格如表 3-2 所示。

規格表	
系統單晶片：	BroadcomBCM2835
CPU：	700 MHz;ARM1176JZF-S core
GPU	Broadcom VideoCore IV; OpenGL ES 2.0; MPEG-2 and VC-1; 1080p30 h.264/MPEG-4 AVC
記憶體	512MB SDRAM (和 GPU 共享)
視訊輸出：	Composite RCA; HDMI
儲存：	32G SD card
其他周邊：	USB 2.0 x 2; Ethernet RJ45
作業系統	Linux

表 3-2 樹莓派主機板規格表

#### b. CCD 攝影機鏡頭模組

模組採用 OmniVision 公司生產的 1/4 英吋 OV5647 感光晶片，藉由軟排線直接與樹莓派主機板連接，動態影像擷取解析度 1080p，靜態相片解析度可達 2592×1944，其規格如表 3-3 所示。

規格表	
Lens：	1/4" 5M
Aperture (F)：	1.8
Focal Length：	3mm
Diagonal：	75.7°
Still picture resolution：	2592 × 1944
Max video resolution：	1080p
Max frame rate：	30fps

表 3-3 CCD 攝影機鏡頭規格表

### 3.1.3 線性滑軌與滑塊組

本研究是假想移動鋁板並使用百分表來量測它的位移量，其位移量所代表的就是假想走行輪磨耗量。因此，鋁板在移動時必需要良好的定位精度及解析度。故本研究採用銀泰科技公司的MSA系列線性滑軌與滑塊組，由於線性滑軌平滑的滾動運動方式，摩擦係數特別小，尤其靜摩擦力與動摩擦力的差距很小，即使在微量進給時也不會有空轉打滑的現象，解析能力與重現性佳，能達到很好的定位精度。

### 3.1.4 電腦設備

市售筆記型電腦，裝置硬體規格為 Intel Core i5 1.8 GHz 中央處理器、4GByte 記憶體、500GByte 硬碟、安裝 Windows 8.0 Professional 作業系統及 CodeBlock 13.12 C++語言程式開發軟體、Opencv(Open Source Computer Vision)電腦視覺庫、MATLAB® 7.14 等相關應用軟體。

## 3.2 影像處理程式操作執行流程

數位影像處理程式操作執行流程分為二部份，第一部份的目的是為了取得攝影機參數及失真參數，主要內容包括：攝影機位置調整、攝影機校正用影像擷取、攝影機校正、儲存攝影機參數及失真參數；第二部份為模擬走行輪磨耗檢測及影像數據分析與處理，主要內容包括：線型雷射器位置調整、鋁板位置移動及開燈時雷射投射在鋁板上(簡稱:明影像)與關燈時雷射投射在鋁板上(簡稱:暗影像)

數位影像擷取、鋁板位移的影像輸入、輸入的影像失真校正、感興趣區域分析、多項式曲線擬合、角點偵測、取得雷射亮度峰值的位置、取得二條直線交點位置、定義鋁板影像畫素跟全域位置相對應關係、最小平方法解影像與空間座標位置關係聯立方程式方程式的係數、得到全域座標 $X$ 與 $Z$ 二組線性方程式，最後驗證雷射光平面 $Z$ 方向線性方程式等，其執行流程如圖3-2及圖3-3所示，各執行流程主要工作說明如下：

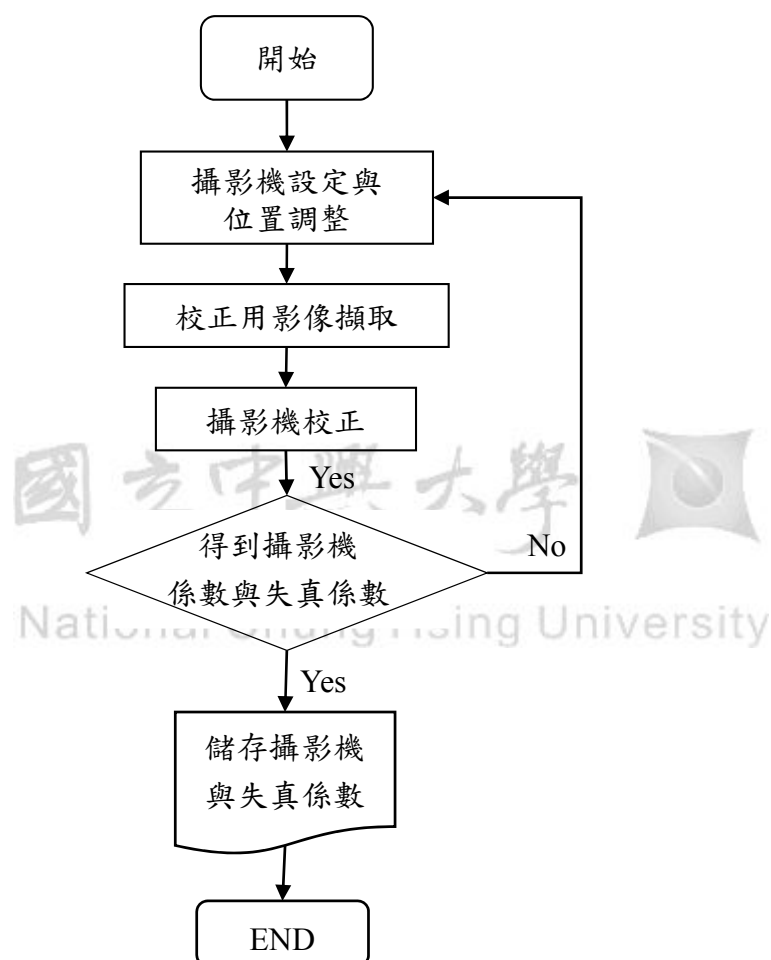
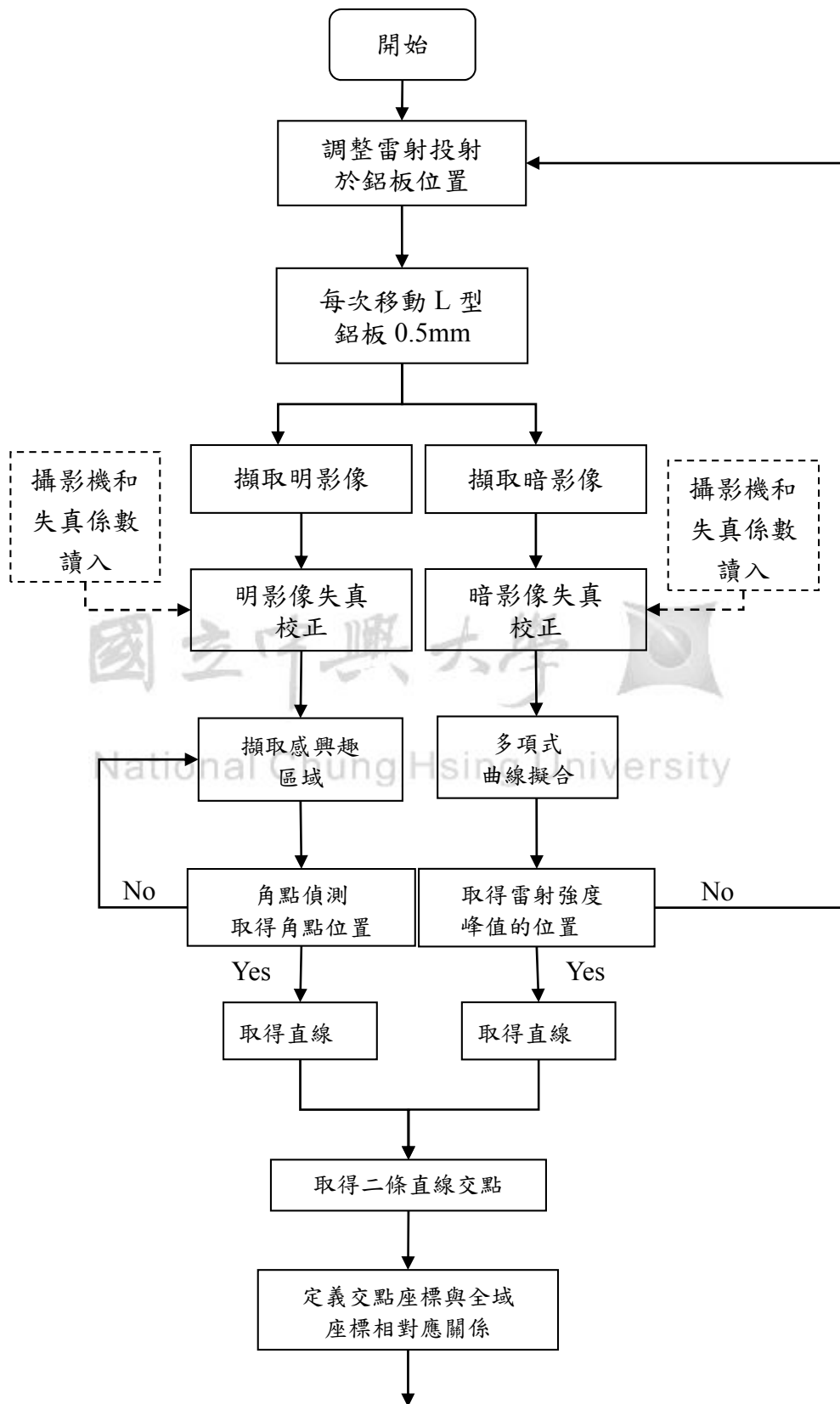


圖 3-2 攝影機校正流程





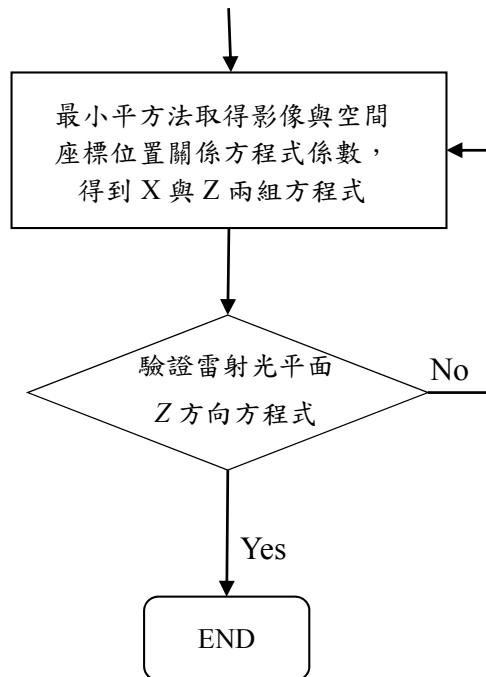


圖 3-3 影像量測處理流程

### 3.2.1 量測設備座標系定義

圖 3-4 用來定義量測系統空間座標系 $(X,Y,Z)$ 、影像平面座標系 $(u,v)$ 及攝影機座標系 $(x,y,z)$ 的關係，而紅光雷射投射器光平面的方向位於空間座標的 $Z$ 軸上。

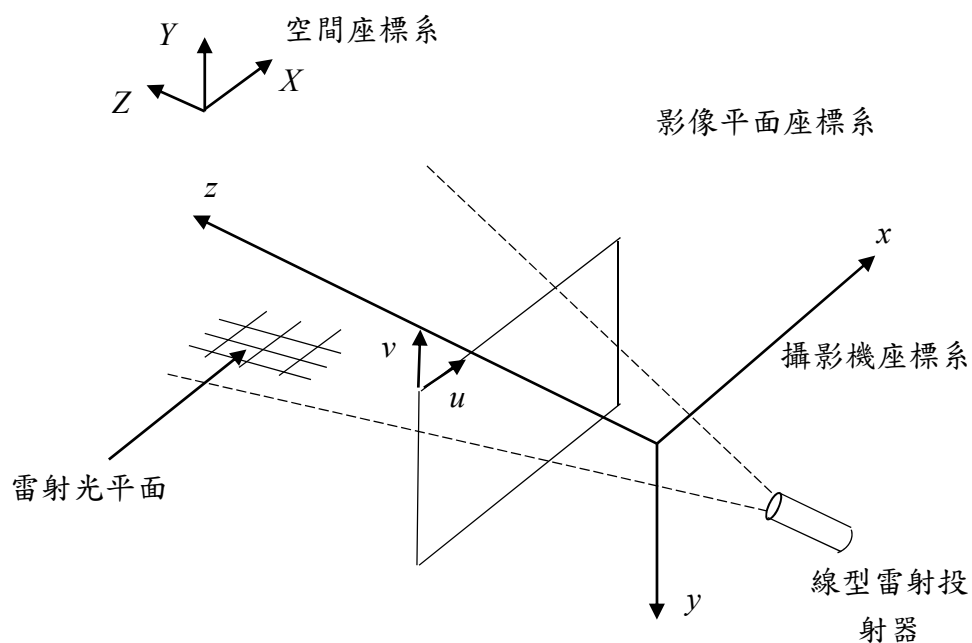


圖 3-4 量測系統座標系定義

### 3.2.2 攝影機設定與位置調整

本研究實驗方法是藉由CCD攝影機擷取影像，並分析其影像像素的RGB值，樹莓派攝影機模組的擷取控制程式雖然提供很多參數供使用者應用，但為了不影響後續分析結果，在取像時只調整快門速度至適當的影像亮度、視訊格式設定為攝影機最大解析度 $2592 \times 1944$ 。除了設定攝影機基本功能外，及為了能得到準確的結果，將攝影機位置與鋁板的焦距調整到讓鋁板寬度大小佔滿影像寬約4/5畫面，拍攝角度調整至正確地擷取要分析的畫面，如圖3-5所示。圖中鋁板的大小約等同走行輪的寬度。另外，本研究利用直角規來調整鋁板與工作平台垂直度情形；利用與線型滑軌中心垂直的面來校正鋁板水平情形；而紅光雷射投射在鋁板上是否為直線部份確認，本研究用校正後的影像以多項式擬合並求其峰值後，來確認紅光雷射線直線性情形。



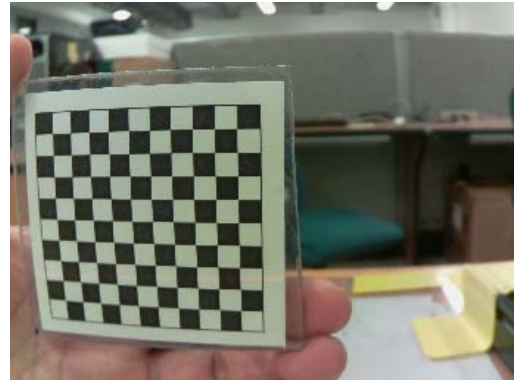
圖 3-5 攝影機拍攝位置調整

### 3.2.3 擷取校正影像

攝影機調整完畢後，開始擷取攝影機校正所需要影像，圖 3-6 (a)~(d)為擷取攝影機校正所需影像，其中 4 張不同位置的棋盤影像。



(a)



(b)

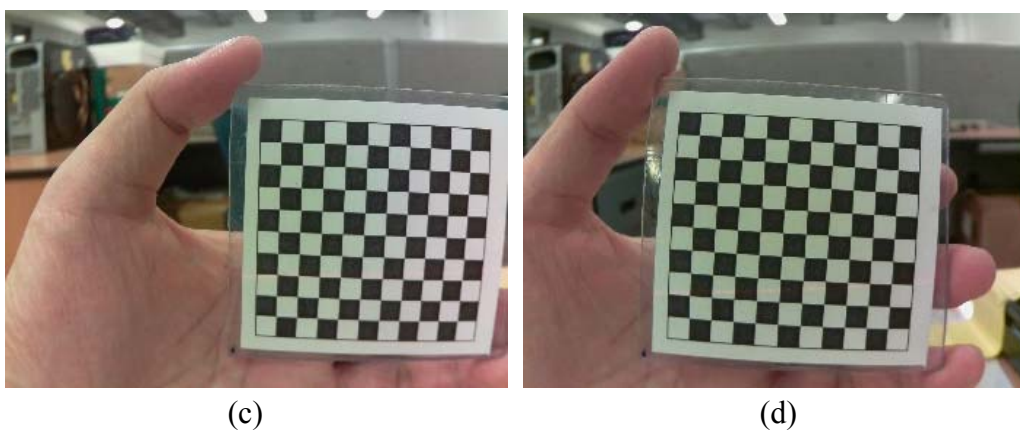


圖 3-6 攝影機校正用影像

### 3.2.4 攝影機校正

本研究使用 OpenCV2.4.6 的 Camera calibration with square chessboard 進行攝影機校正。程式讀取欲校正的影像，並找到每張影像中棋盤內的角點位置共  $10 \times 9$  個點位，每列的點位會以不同的顏色標記在影像上如圖 3-7 所示，根據以上影像所找到的棋盤內角點位置，程式在進行運算得到  $3 \times 3$  矩陣的攝影機參數及  $5 \times 1$  的失真參數，如表 3-4 所示。

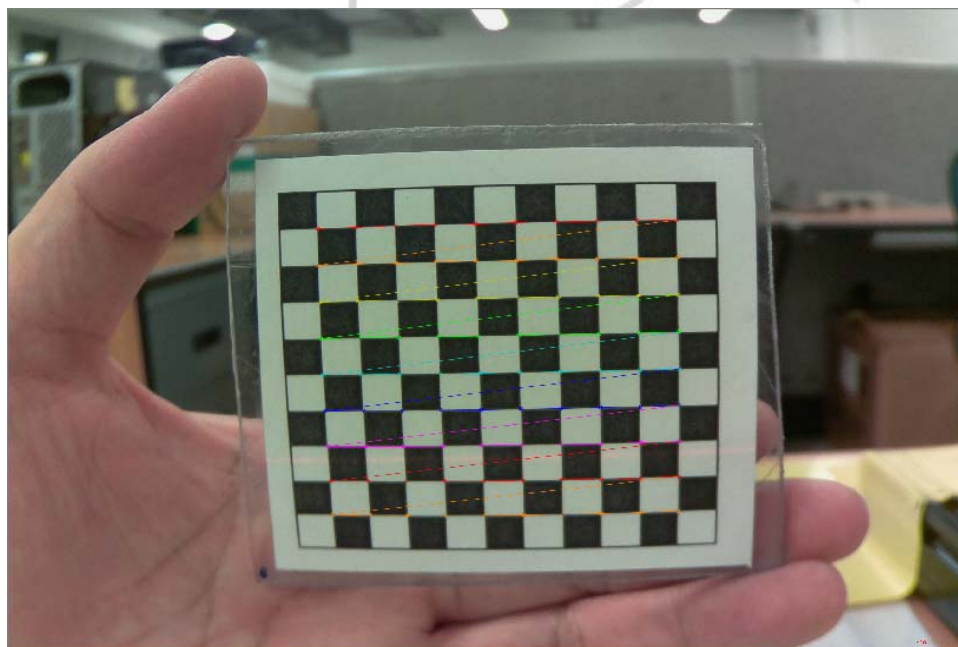


圖 3-7 校正用影像角點檢測結果

$f_x$	$c_x$	$f_y$	$c_y$
2791.63	1357.92	2906.84	954.04

$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$k_3$
-0.4507	0.5028	-0.0022	-0.0011	-0.6574

表 3-4 攝影機參數與失真參數輸出

其中攝影機參數  $3 \times 3$  矩陣大小為  $\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，而失真參數  $5 \times 1$  矩陣大小為  $[k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3]$ 。

### 3.2.5 調整紅光雷射投射在鋁板的位置

為了讓每列雷射線高度都能用 MATLAB® 進行曲線擬合運算及求得每列雷射強度最大值，故在調整雷射線的水平時，期望在影像校正後雷射線能達到水平的狀態，讓雷射線最左邊與最右邊的畫素高度差越小越好，這樣在選擇雷射線範圍做曲線擬合及求雷射強度最大值，可以得到比較好的結果。

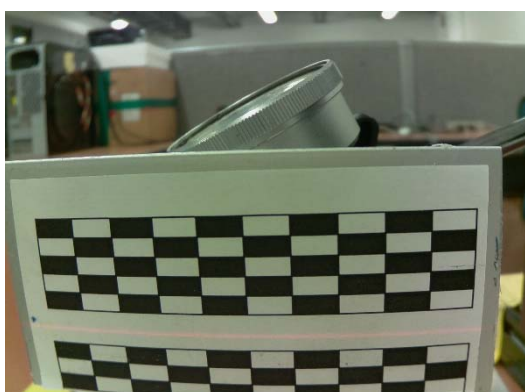


圖 3-8 校正後的影像

### 3.2.6 L 型鋁板位移及影像擷取

本研究使用百分表來量測鋁板移動的位移量，每次移動鋁板 0.5mm 並擷取明影像與暗影像各 1 張，如圖 3-9 所示。為了得到足夠多且適當的校正點位  $(X, Y, Z)$ ,  $(u, v)$ ，並獲得足夠多且獨立的方程式，本研究移動鋁板共 5mm，取得明影像與暗影像共 22 張影像。





(a)  $Z=0\text{mm}$  明影像



(b)  $Z=0\text{mm}$  暗影像



(c)  $Z=5\text{mm}$  明影像



(d)  $Z=5\text{mm}$  暗影像



(e)  $Z=10\text{mm}$  明影像



(f)  $Z=10\text{mm}$  暗影像

圖 3-9 (a),(c),(e)在開燈時擷取的影像 (b),(d),(f)在關燈時擷取的影像

### 3.2.7 影像失真校正

OpenCV2.4.6 的 Camera calibration with square chessboard 章節中的 `initUndistortRectifyMap` 與 `remap` 物件，提供計算失真與校正的 map 轉換。本研究將 3.2.4 章節中得到的攝影機參數、失真參數及欲校正的影像分別代入上述二個物件中，得到校正後的影像。圖 3-10 (a) ,(b),(c),(d)分別為  $Z=0\text{mm}$  及  $Z=5\text{mm}$  校正後明影像與暗影像結果。



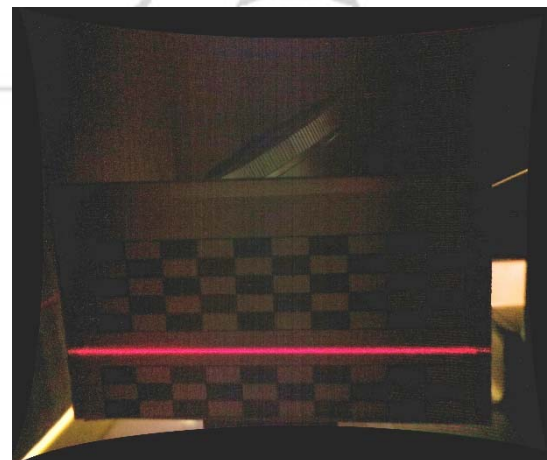
(a)  $Z=0\text{mm}$  明影像



(b)  $Z=0\text{mm}$  暗影像



(c)  $Z=5\text{mm}$  明影像



(d)  $Z=5\text{mm}$  暗影像

圖 3-10 明影像與暗影像經校正後影像

### 3.2.8 擷取感興趣區域與角點偵測

擷取紅光雷射線投射 L 型鋁板的明影像，目的用來定義位棋盤格子全域座標  $(X,Y,Z)$  與影像座標  $(u,v)$  相對應關係，本研究對橫方向棋盤角點共 22 個位置如圖 3-11 所示，分別量測其在空間中的位置尺寸，並定義最左邊為原點座標位置，如表 3-5 所示。

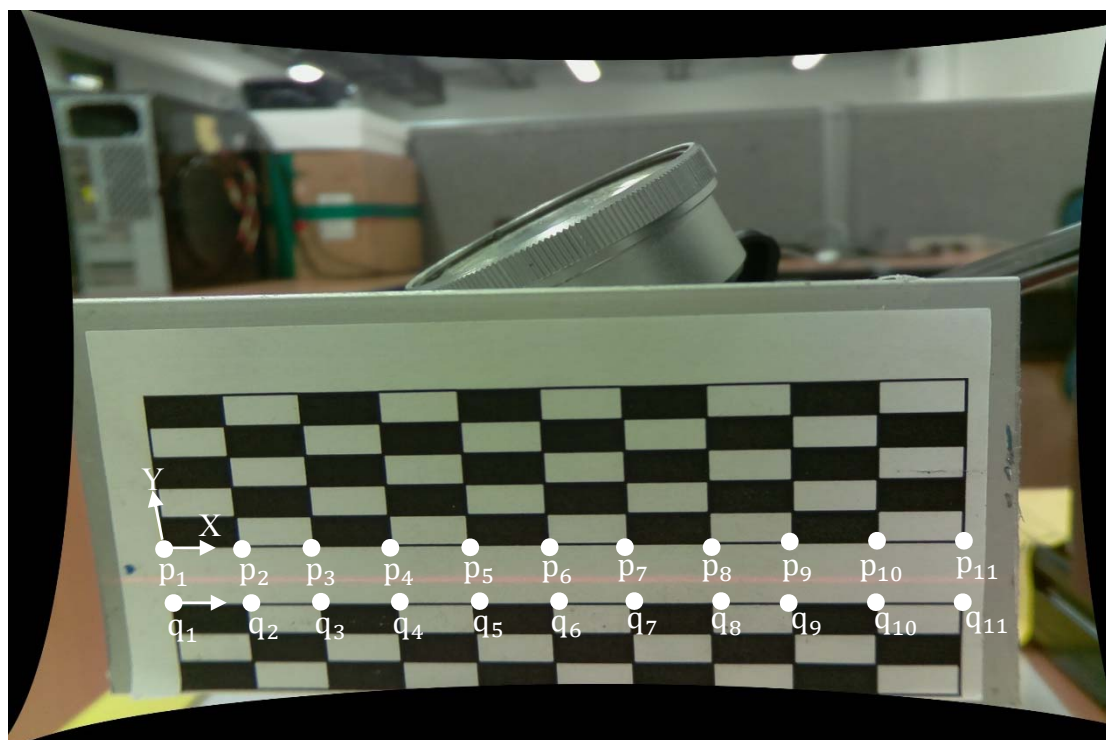


圖 3-11 定義棋盤角點在全域座標位置

表 3-5 定義角點在全域座標位置

單位：mm

	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>	p <sub>5</sub>	p <sub>6</sub>	p <sub>7</sub>	p <sub>8</sub>	p <sub>9</sub>	p <sub>10</sub>	p <sub>11</sub>
X	0	9	17.5	26.5	35	44	52.5	61	70	79	87.5
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>	q <sub>5</sub>	q <sub>6</sub>	q <sub>7</sub>	q <sub>8</sub>	q <sub>9</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>11</sub>
X	0	9	17.5	26.5	35	44	52.5	61	70	79	87.5
Y	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8

本研究在角點偵測的部份使用 OpenCV2.4.6 的 GoodFeaturesTo -Track、FindCornerSubPix 二個物件來找尋棋盤角落的位置。首先將圖 3-12 影像擷取感興趣區域。

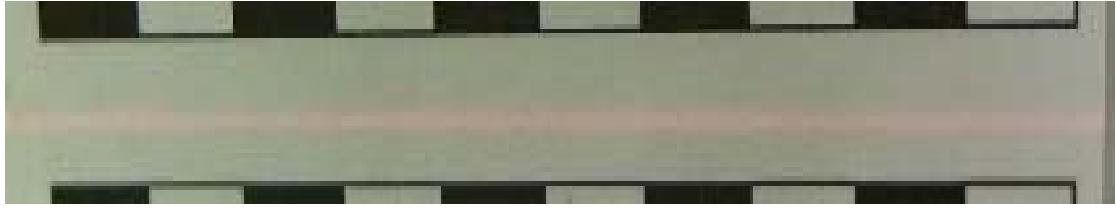


圖 3-12 擷取感興趣區域

為了能夠將角點位置精確到次像素(subpix)的精度，先使用 GoodFeaturesToTrack 找出感興趣區域內的角點位置，再以 FindCornerSubPix 進一步精確估計角點位置。FindCornerSubPix 最後的一個參數，為角點的疊代過程的終止條件，參數可設定疊代次數及最小精度來得到次畫素，這 2 個方法可以單獨使用也可以同時使用。本研究同時使用這 2 個方法，角點次畫素位置的確定簡單的說：當疊代次數大於使用者所設定的值或者最小精度達到使用者所設定的值時，即獲得該角點次畫素位置。圖 3-13 (a) 在感興趣區域內棋盤角落紅色圓點即為角點偵測的結果，角點數量總共 22 個，圖 3-13 (b) 為被偵測出來的角點次像素座標位置。

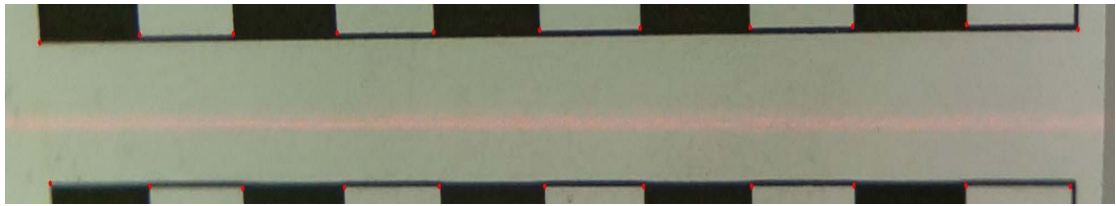


圖 3-13 角點偵測結果

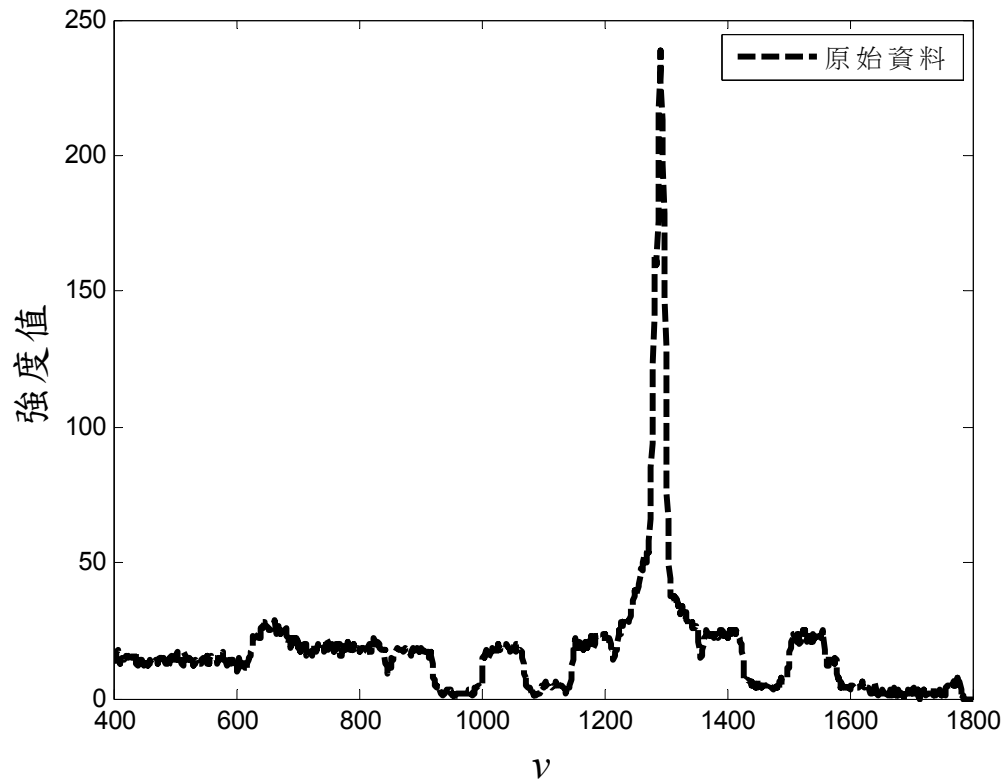
表 3-6 角點偵測結果

	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$
$u$	256.1	475.8	683.9	908.5	1116.8	1341.5	1549.0	1773.6	1980.2	2203.4	2419.3
$v$	1110.0	1103.5	1104.4	1105.5	1107.2	1107.2	1108.0	1107.5	1107.3	1107.0	1116.0
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$	$q_9$	$q_{10}$	$q_{11}$
$u$	288.7	501.9	703.8	922.4	1123.1	1341.8	1542.0	1760.6	1959.9	2177.2	2387.3
$v$	1294.5	1304.2	1304.2	1304.6	1305.6	1306.2	1306.3	1305.8	1306.3	1305.6	1299.1

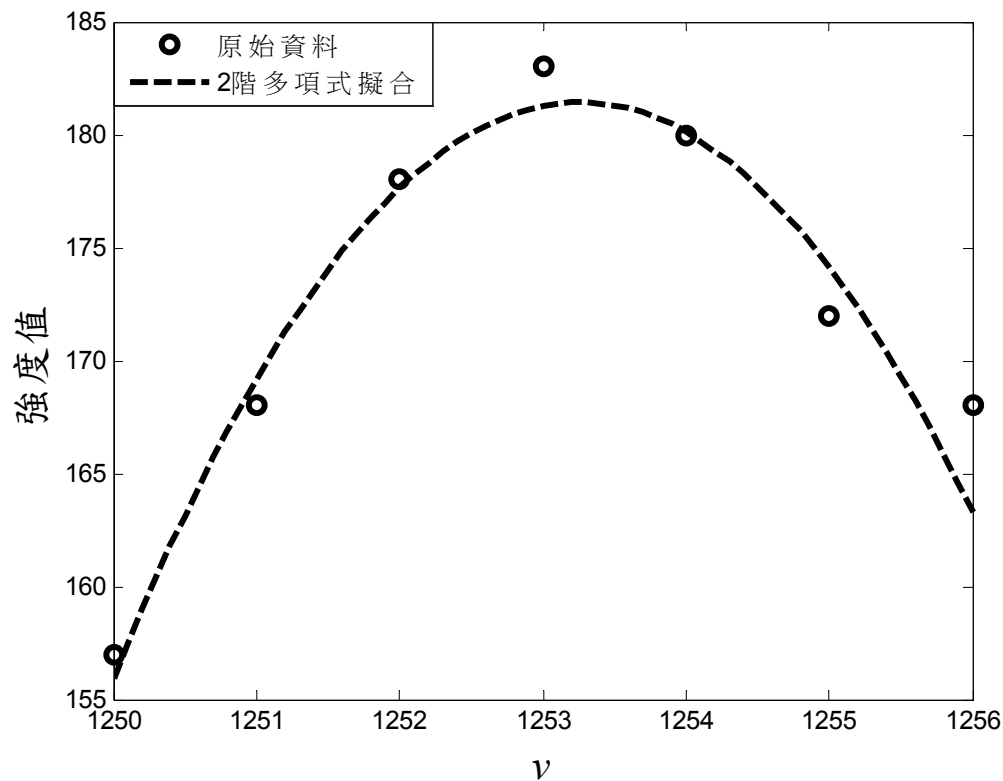


### 3.2.9 曲線擬合及雷射線強度峰值位置計算

3.2.6 節中取得的暗影像部份，其目的是用來模擬實際環境裏紅光雷射線投射在走行輪面上的影像。2.7 節中說明了一張影像在取樣後，得到  $M$  列和  $N$  行的數位影像，此  $M \times N$  的數位影像可以寫成陣列形式，而暗影像的解析度為  $2952 \times 1944$ ，這也表示暗影像的陣列大小為  $2952 \times 1944$ 。在這裡將影像每一行強度值當作一條曲線來看，再利用 MATLAB® 曲線擬合方法來找出每 1 行影像強度值的分佈情形，如圖 3-14(a)為  $Z=0.5\text{mm}$  影像中第 1200 行強度值分佈的情形，其中強度最大的部份即為紅光雷射線的區域，因此只要找出曲線的最大值，這也代表第 1200 行紅光雷射線強度最大的位置，圖 3-14(b)即是以多項式擬合來求出強度最大值；因此只要將紅光雷射線的每 1 行進行曲線擬合並求得曲線最大值，就能得到紅光雷射線的每 1 點強度值最大的位置。



(a) 紅光雷射線影像強度值



(b) 影雷射強度值多項式擬合

圖 3-14 紅光雷射線影像強度值

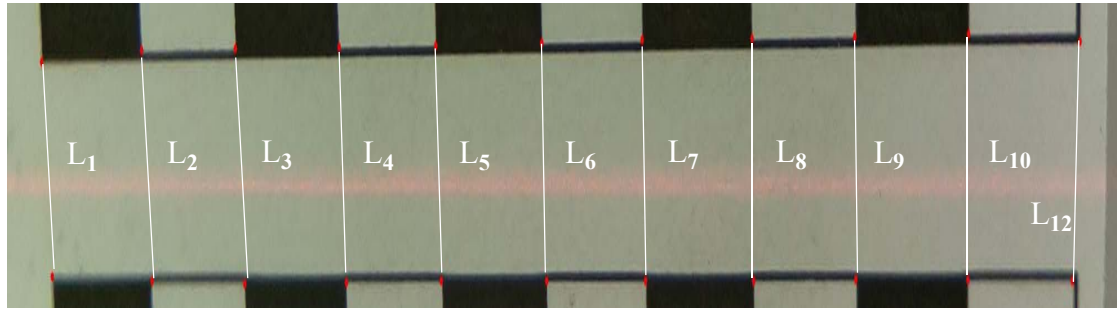
National Chung Hsing University

### 3.2.10 交點、角點位置與影像、全域座標關係建立

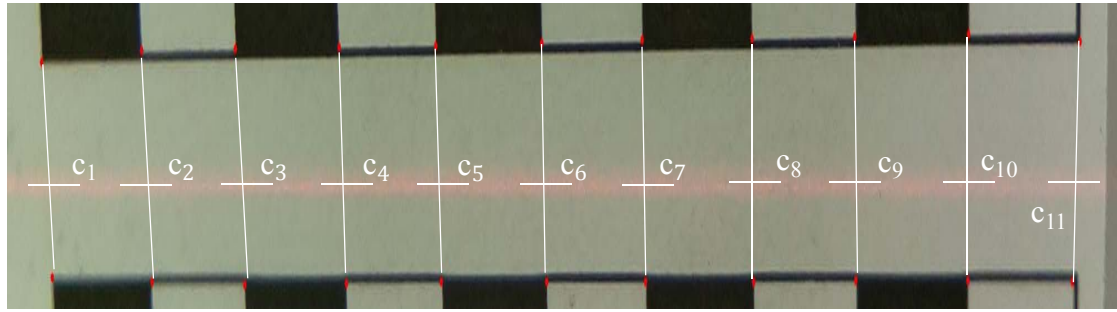
求二個直線的交點部份，在 3.2.8 節感興趣區域及角點偵測中，共得到 22 角點座標位置如圖 3-11 所示，在這裡將  $p_i$  和  $q_i$  ( $i=1\sim11$ ) 二點成對將其連成一條直線可以得到 11 條直線 ( $L_1$ )  $\sim$  ( $L_{11}$ )，如圖 3-15(a) 所示。

在 3.2.9 節中對影像每 1 行做曲線擬合並求出曲線峰值，即可得到紅光雷射線上每 1 點強度峰值的座標位置，接下來在 ( $L_1$ )  $\sim$  ( $L_{11}$ ) 直線周圍各取得 1 條紅光雷射線強度峰值的直線，可得到共 11 條直條 ( $c_1$ )  $\sim$  ( $c_{11}$ )，如圖 3-15 (b) 所示。

本研究再使用 MATLAB<sup>®</sup> 來計算出二條直線交點影像座標位置 ( $u, v$ )，而交點座標位置中的 ( $u$ )，目的是用來建立在 3.2.8 節中全域座標角點位置 ( $X$ ) 相對應關係。



(a)



(b)

圖 3-15 二條直線交點

### 3.2.11 影像與空間座標位置關係方程式

2.6.5.1 節中說明了攝影機外部參數，所描述的是攝影機在全域座標的方向及位置，因此整理 2.6.4.3 節透視投影的(2.8)、(2.9)式及 2.6.4.4 節影像、螢幕座標轉換的(2.14)、(2.15)式與 2.6.4.5 節空間座標與全域座標轉換的(2.16)式之間的關係展開：

$$u = f_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} + c_x \quad (3.1)$$

$$v = f_y \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} + c_y \quad (3.2)$$

本研究主要目的在獲取  $u, v, X, Y, Z$  之間的關係，依 4.3 節所述  $Y=0$ ，因此簡化(3.1)及(3.2)式，獲得(3.3)與(3.4)式：

$$u = \frac{a_1X + a_2Z + a_3}{a_7X + a_8Z + a_9} \quad (3.3)$$

$$v = \frac{a_4X + a_5Z + a_6}{a_7X + a_8Z + a_9} \quad (3.4)$$

其中 $a_1=c_x r_{31}+f_x r_{11}$ 、 $a_2=c_x r_{33}+f_x r_{13}$ 、 $a_3=c_x t_z+f_x t_x$ 、 $a_4=c_y r_{31}+f_y r_{21}$ 、 $a_5=c_y r_{33}+f_y r_{23}$ 、 $a_6=c_y t_z+f_y t_y$ 、 $a_7=r_{31}$ 、 $a_8=r_{33}$ 及 $a_9=t_z$ 。

到目前為止每張影像有 11 個校正點位，每次位移 L 型鋁板 0.5mm，共位移 10 次取得 11 張不同位移的暗影像( $Z=0\text{mm} \sim 5\text{mm}$ )，所以可以獲得  $2 \times (11 \times 11)$  組獨立方程式。將(3.3)及(3.4)展開將 121 點代入可得  $2 \times 121$  個方程式，令 $a_9=1$  由 242 個方程式運用 MATLAB<sup>®</sup> 的最小平方法解聯立方程式，求得 $a_1 \sim a_8$ 係數，再將(3.3)及(3.4)分別改寫如下(3.5)和(3.6)式：

$$X = \frac{1}{(a_1 - a_7 u)} (a_8 u - a_2) Z + u - a_3 \quad (3.5)$$

$$Z = \frac{1}{(a_5 - a_8 u)} (a_7 u - a_4) Z + u - a_6 \quad (3.6)$$

將(3.5)式再代入(3.6)式得到如下(3.7)式：

$$Z = \frac{1}{(a_5 - a_8 v)} \left( v - a_6 + \left( \frac{(a_4 - a_7 v)((a_3 - u) + Z(a_2 - a_8 u))}{(a_1 - a_7 u)} \right) \right) \quad (3.7)$$

後續只須從影像得到的紅光雷射線強度最大的座標位置( $u, v$ )代入(3.7)式，即可得到全域座標  $Z$  方向相對的位置。

### 3.2.12 驗證雷射光平面 $Z$ 軸方向方程式

本研究目的在研究量測走行輪磨耗量及表面狀況，利用 L 型鋁板位移量代表走行輪磨耗量，主要驗證方程式以  $Z$  方向為主，即驗證(3.7)式方程式。依照 3.2.10 節中利用自撰的 C++ 程式及 OpenCV2.4.6 提供的影像處理函式庫，取得共 121 組校正點的紅光雷射線影像強度峰值座標( $u, v$ )位置，並將這 121 組的資料代入(3.7)式，求得 121 組全域座標  $Z$  方向的位置，並驗證 L 型鋁板的移動量與藉由(3.7)式所得到  $Z$  值是否滿足需求。

## 第四章實驗結果與分析

無人搬運車主動輪磨耗檢測系統，主要探討以數位影像法進行無人搬運車主動輪磨耗的量測，以下將針對影像擷取與分析基本測試，L 型鋁板位置變化模擬量測及全域座標跟攝影機座標轉換的檢測結果比較分析與討論。

### 4.1 攝影機校正結果與分析

本章節對三種不同寬和高的棋盤進行實驗與分析，其目的用來比較不同棋盤格子取得的校正參數，運用在紅光雷射線校正後的直線性差異。圖 4-1(a)為  $6\times 6$  棋盤格子、(b)為  $10\times 11$  棋盤格子及(c)為  $16\times 15$  棋盤格子，實驗對這 3 個棋盤格子分別取 5 張、10 張、15 張及 20 張等不同位置的影像，進行攝影機校正並取得攝影機內部參數及失真參數，如表 4-1 所示。另外，對於不對稱的棋盤格子，在擷取影像時需特別注意其方向，避免擷取不當影像而影響後續的影像校正；本研究在棋盤格子的右下角會特別標註記號，確保每次棋盤格子在移動時，取像的方向都能一致。

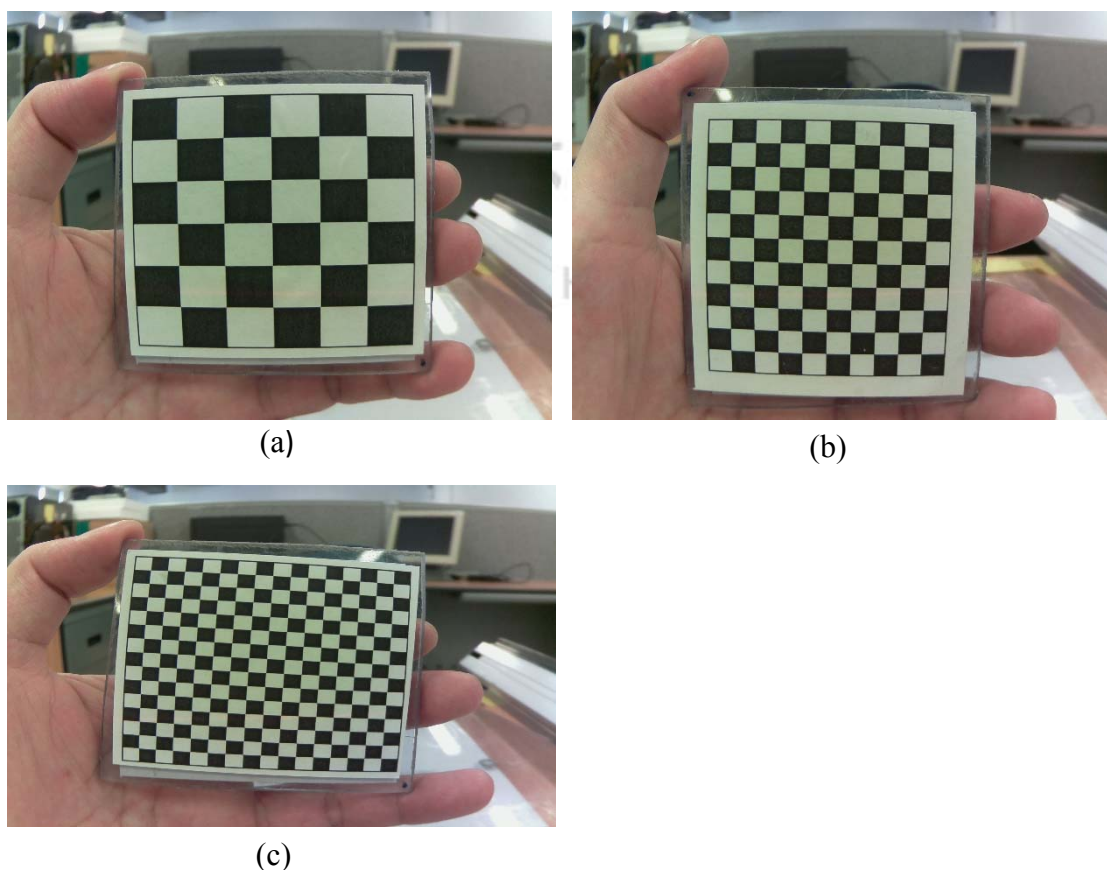


圖 4-1 攝影機校正用棋盤格子(a)  $6\times 6$  棋盤格子 (b)  $10\times 11$  棋盤格子  
(c)  $16\times 15$  棋盤格子

表 4-1 3 個棋盤格子校正後取得參數

棋盤格子 大小(mm)	校正影 像張數	攝影機內部參數			
		$f_x$	$c_x$	$f_y$	$c_y$
w 11 × h 10	5	2901.767	1192.723	2609.981	962.699
	10	4202.600	1350.311	3772.311	888.480
	15	2996.913	1374.589	2687.816	971.898
	20	3097.832	1379.021	2778.072	992.297
w 6 × h 6	5	1555.158	1351.212	1492.986	955.485
	10	1823.541	1344.613	1749.951	939.340
	15	1587.439	1327.408	1523.525	926.080
	20	1762.381	1275.789	1691.590	876.939
w 4 × h 4	5	3885.532	1579.073	3677.855	1113.089
	10	2977.703	1446.649	2806.874	1054.334
	15	2914.188	1439.493	2747.191	1058.021
	20	2971.191	1476.943	2801.568	1066.262

攝影機失真參數				
$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$k_3$
-0.397	-0.131	-0.005	0.023	0.607
-0.742	-1.746	0.007	0.001	16.028
-0.403	-0.078	-0.007	0.001	0.780
-0.446	0.035	-0.010	0.002	0.639
-0.132	0.042	-0.003	0.001	-0.014
-0.179	0.064	-0.001	0.002	-0.018
-0.134	0.036	-0.001	0.003	-0.009
-0.171	0.069	0.002	0.008	-0.037
-0.695	0.309	-0.019	-0.036	-0.008
-0.450	0.321	-0.014	-0.005	-0.293
-0.431	0.294	-0.015	-0.004	-0.252
-0.457	0.325	-0.016	-0.009	-0.296



圖 4-2 校正用影像

圖 4-3(a)~(d)為分別使用 5 張、10 張、15 張及 20 張的 6×6 棋盤格子影像經攝影機校正所取得的內部參數及失真參數，再對圖 4-2 影像進行校正，為降低雜訊干擾，只提取感興趣區域內三原色(RGB)中的 R 影像強度進行二值化處理，所以圖 4-3(a)~(d)中白色部份即為紅光雷射經校正後的影像，為確認紅光雷射線校正後水平情形，在圖 4-3(a)~(d)的白色區域內後製一條紅色虛水平線，用來確認雷射線水平狀態。

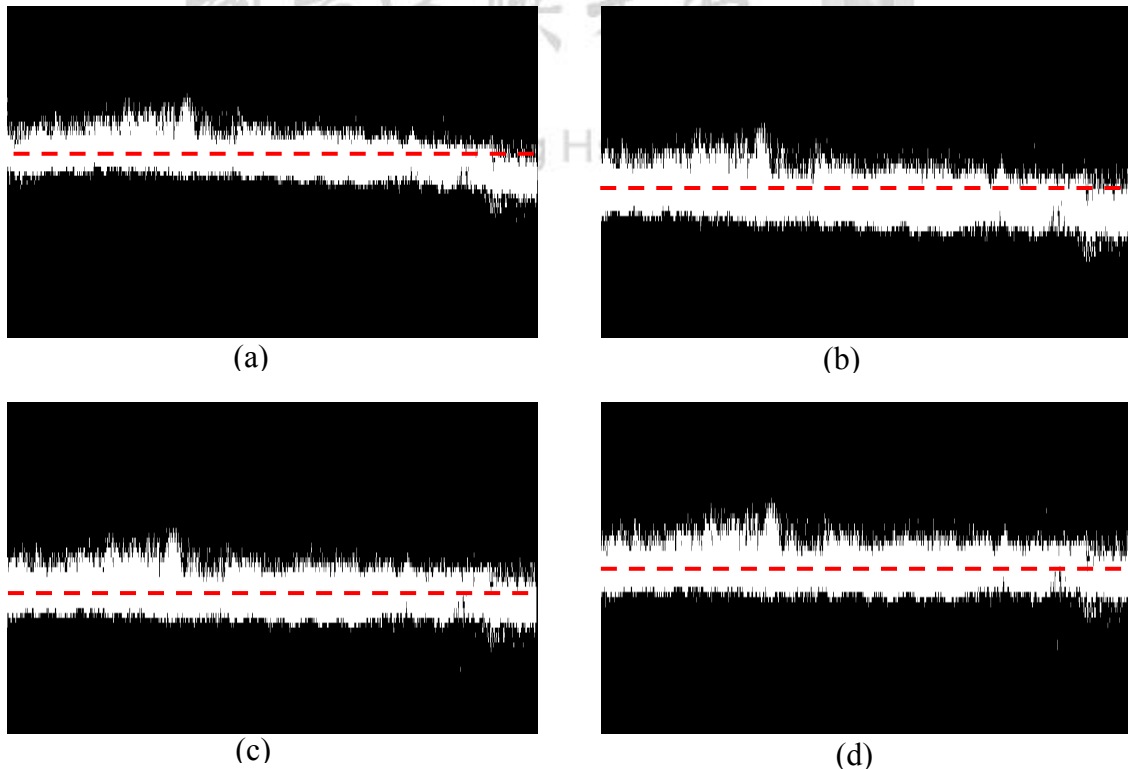


圖 4-3 6×6 棋盤格子參數校正後影像(a)使用 5 張的校正影像 (b)使用 10 張的校正影像 (c)使用 15 張的校正影像 (d) 使用 20 張的校正影像

圖 4-4 與圖 4-5 的實驗方式與圖 4-3 相同，由三組實驗比較結果，用 5 張棋盤格子得到的攝影機內部參數及失真參數，進行影像校正的效果最差，如圖 4-3 (a)、圖 4-4(a)及圖 4-5(a)；而以 10 張以上  $15 \times 14$  棋盤格子得到的攝影機內部參數及失真參數，進行影像校正的效果最佳，如圖 4-5(b)~(d)；其次為 20 張  $9 \times 10$  棋盤格子的攝影機內部參數及失真參數，如圖 4-4(d)。

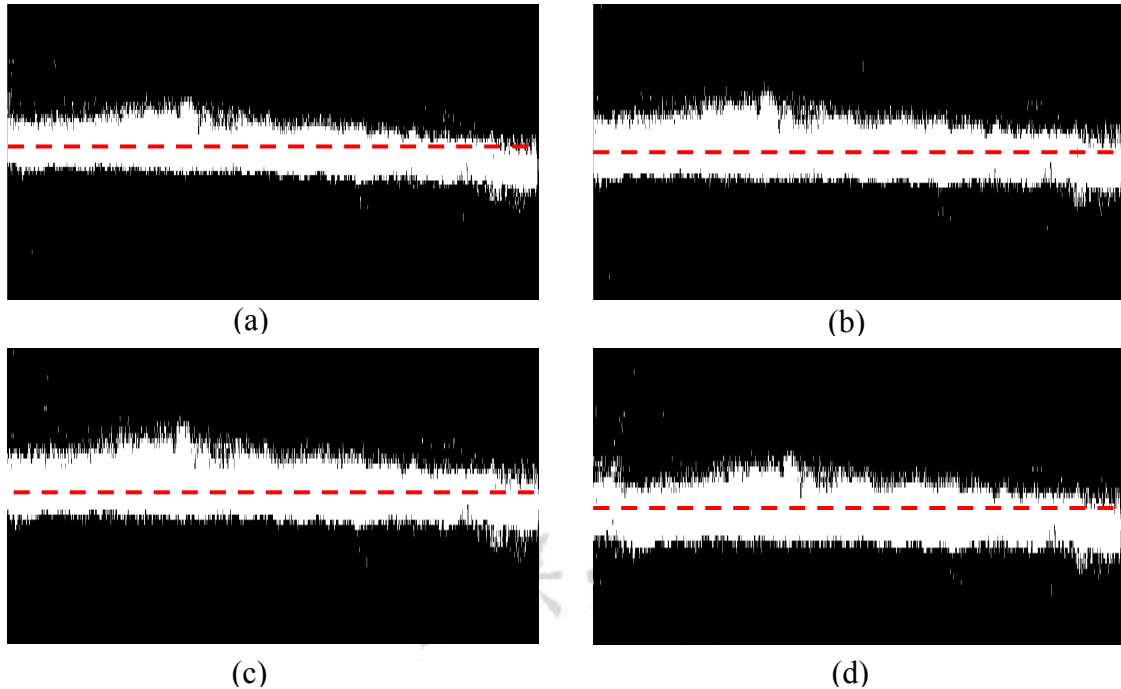


圖 4-4  $10 \times 11$  棋盤格子參數校正後影像(a)使用 5 張的校正影像 (b)使用 10 張的校正影像 (c)使用 15 張的校正影像 (d) 使用 20 張的校正影像



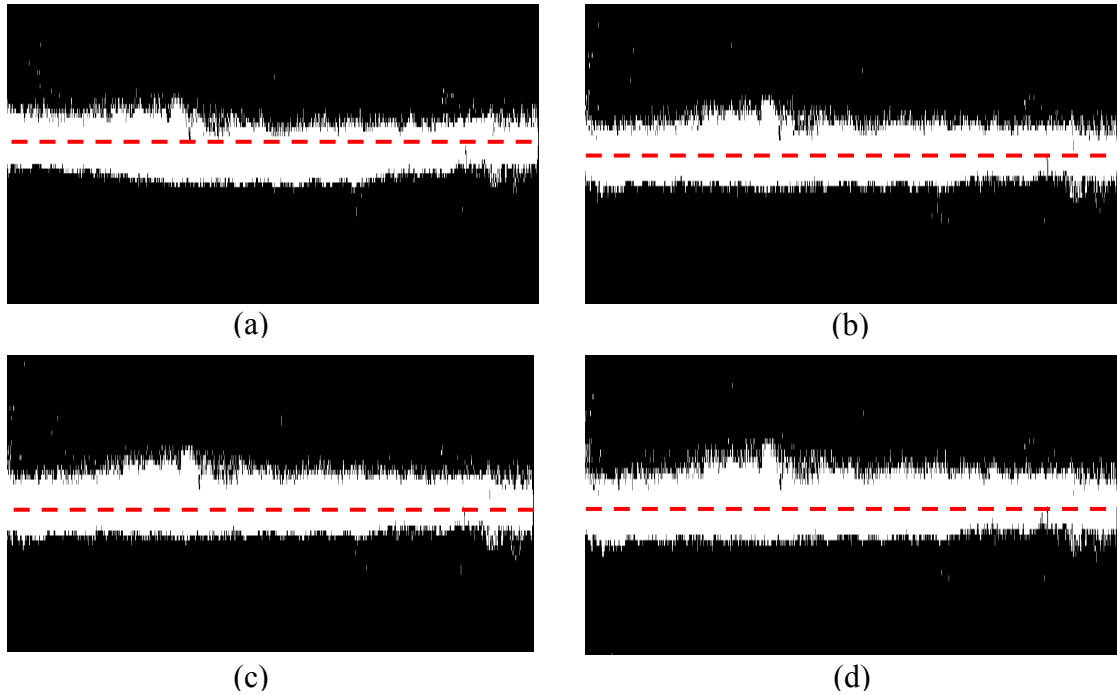


圖 4-5 16×15 棋盤格子參數校正後影像(a)使用 5 張的校正影像  
(b)使用 10 張的校正影像 (c)使用 15 張的校正影像 (d) 使用 20  
張的校正影像

#### 4.2 紅光雷射強度調整結果與分析

由於雷射通過受激輻射產生光放大，讓雷射的強度值達到很高，但雷射強度值太高，卻造成影像控制 RGB 中的 R 影像數值範圍，全部的像素值都是 255，以致於無法獲得任何資訊，圖 4-6(a)即為紅光雷射投射在 L 型鋁板上情形。為讓雷射線投射在 L 型鋁板上的強度值不超過 255，本研究在雷射發光源前加將一小片偏光片，來達到雷射線強度值衰減的效果，圖 4-6(b)為雷射線強度值衰減的情形。

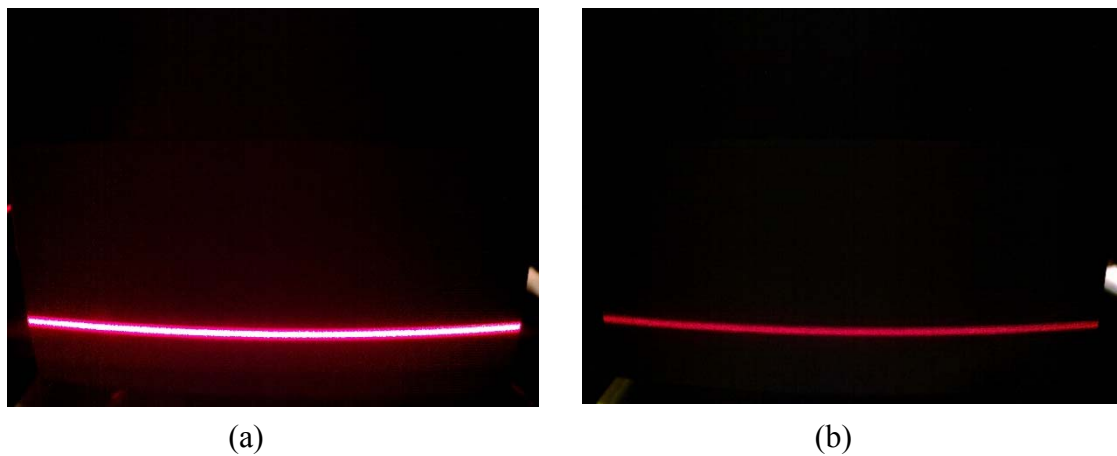
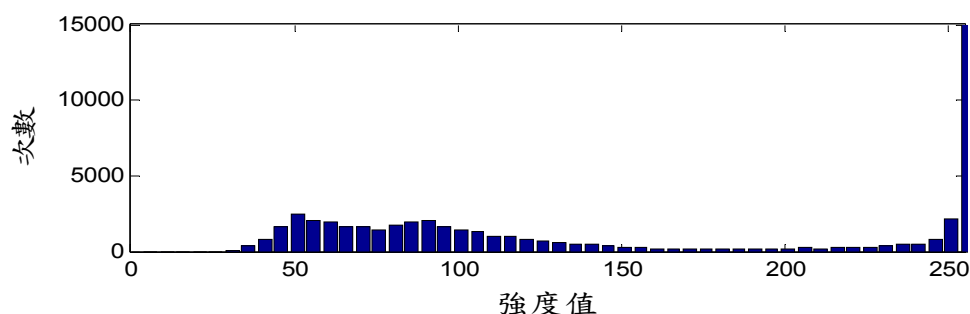


圖 4-6 紅光雷射(a)衰減前(b)衰減後

圖 4-7 (a) 為擷取紅光雷射線感興趣區域，進行 RGB 影像中的 R 影像直方圖分析圖 4-7 (b)，從直方圖中看到 R 影像強度值約有  $1.5 \times 10^4$  個像素值超過 255，就如同上所述若不衰減紅光雷射強度值，是無法獲得有用的資訊。圖 4-7 (d) 為紅光雷射衰減後 R 影像直方圖，其中 R 影像強度值已沒有任何 1 點超過 250，這樣的結果有利於後續影像處理。



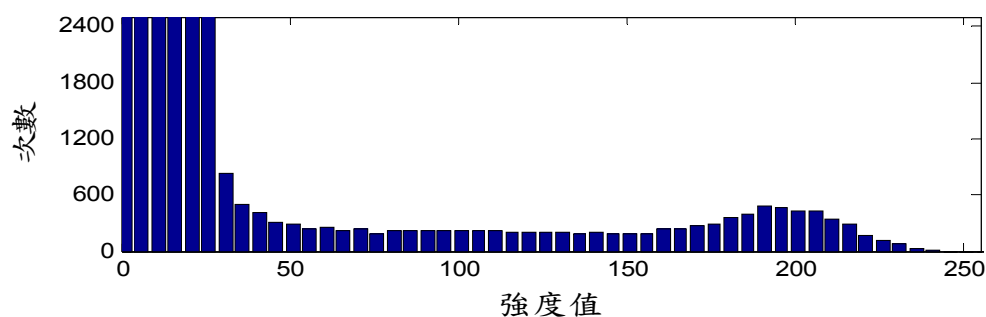
(a) 雷射強度衰減前影像



(b) 雷射強度衰減前直方圖



(c) 雷射強度衰減後影像



(d) 雷射強度衰減後直方圖

圖 4-7 RGB 影像 R 影像直方圖

### 4.3 紅光雷射垂直投射 L 型鋁板結果與分析

本節探討紅光雷射水平與垂直投射在 L 型鋁板對後續影像處理的影響及調整的結果。在 3.2.11 的(3.1)及(3.2)式子中得到影像座標與全域座標的關係，為了能簡化到(3.3)及(3.4)式子，在紅光雷射投射在 L 型鋁板的位置時，就必需讓紅光雷射垂直投射在 L 型鋁板上，圖 4-8 (a),(c)紅光雷射投影太高或太低時，當 L 型鋁板移動時，紅光雷射投影的位置也會跟著上或下移動，如圖 4-8(b),(d)所示。而圖 4-8(e),(f) 因為紅光雷射投影垂直於 L 型鋁板上，當 L 型鋁板移動時，紅光雷射並不會跟著移動，即全域座標的 Y 軸座標等於零。

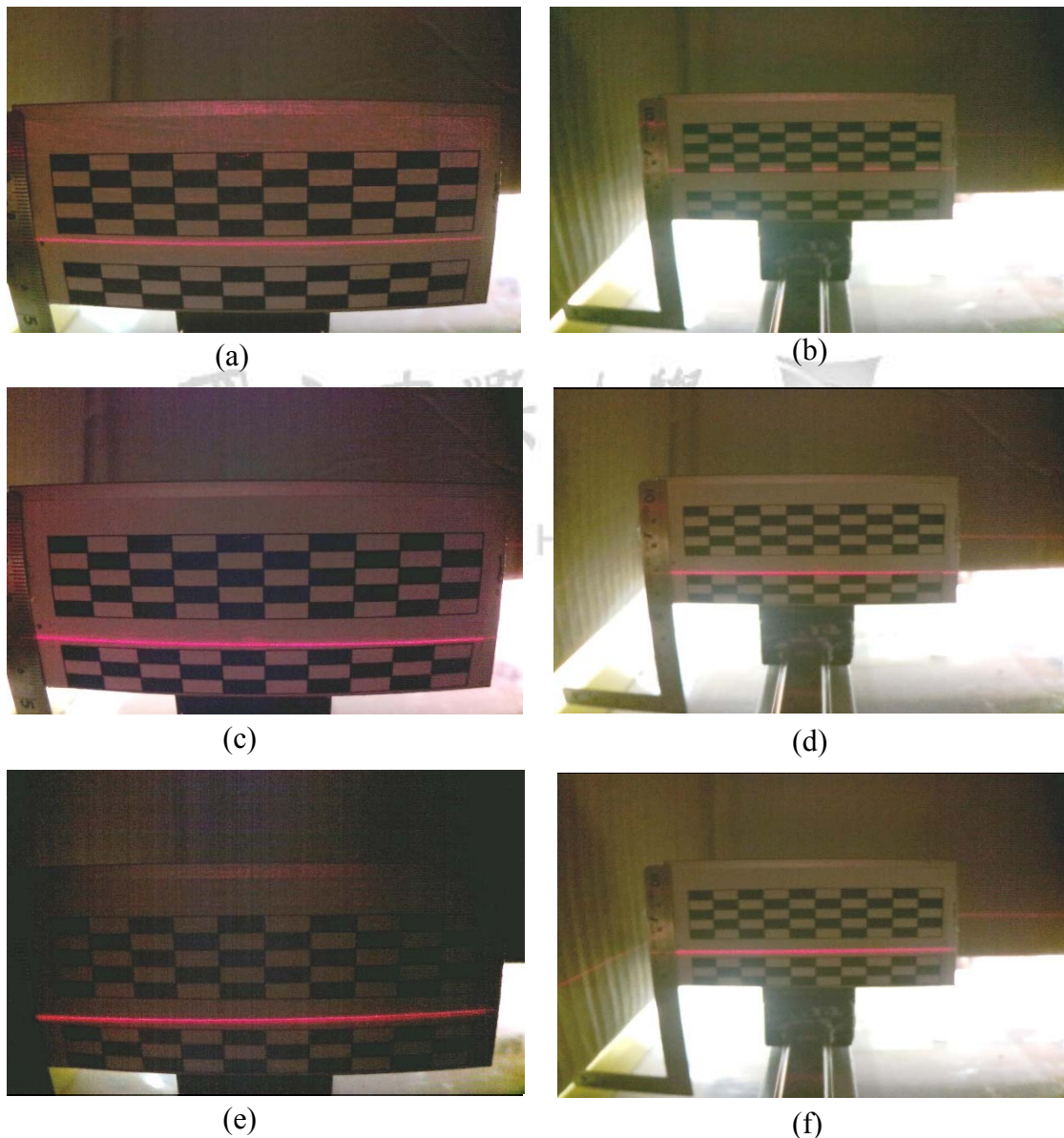
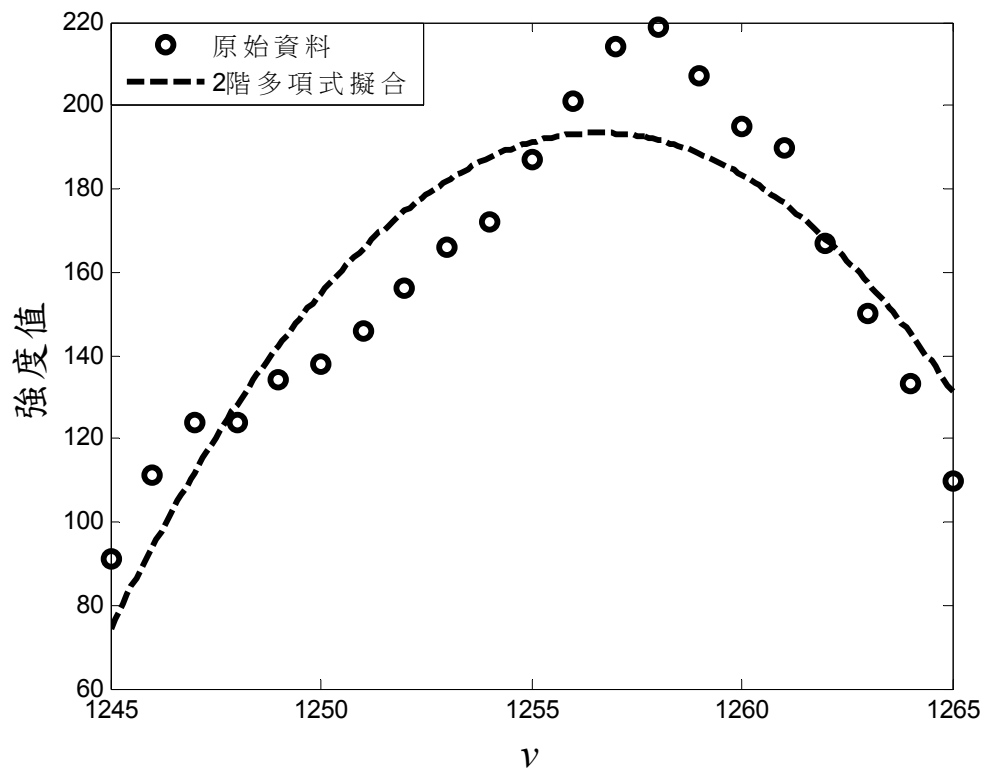


圖 4-8 紅光雷射垂直投射影像(a)投射位置偏高，位移後(b)雷射位置往上跑(c)投射位置偏低，位移後(d)雷射位置往下跑(e)垂直投影，位移後(f)雷射位置不變

#### 4.4 紅光雷射線投射區間結果與分析

本章節探討紅光雷射線投射範圍中不同區間的選擇對多項式擬合求其峰值位置的影響。本研究採用二種方式進行說明，圖 4-9(a)為某行影像紅光雷射投射約三分之二範圍強度進行多項式擬合的結果，另一種方式以相同的影像及不相同的影像強度區間進行測試，圖 4-9(b)是以紅光雷射投射的峰值附近的影像點進行多項式擬合的結果；圖 4-9(a)多項式擬合後的峰值與原始的峰值偏移太大，而圖 4-9(b)的方法其多項式擬合後的峰值比較貼近原始的料資。



(a)

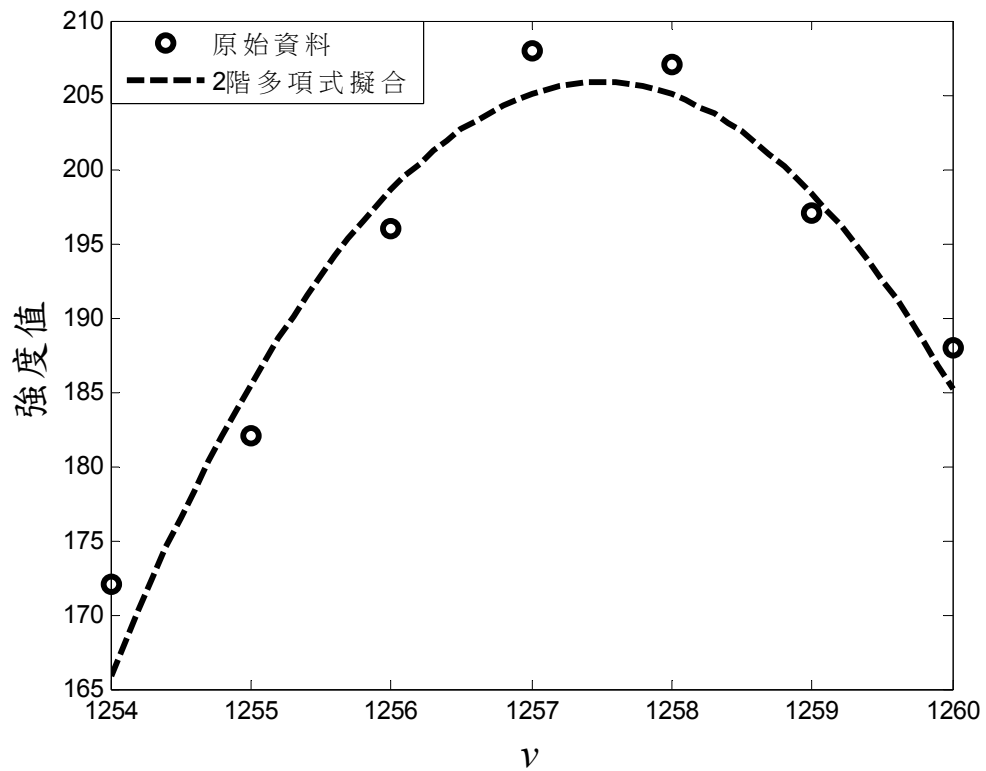


圖 4-9 紅光雷射投射影像區間多項式擬合(a)紅光雷射線三分之二區域影像強度值(b)紅光雷射線影像峰值附近影像強度值

另外，運用紅光雷射投射峰值周圍的強度進行多項式擬合，不會受到紅光雷射投射水平位置的影響，例如：圖 4-10(b)的影像在經過影像校正後，其紅光雷射線的影像左高右低的情形，此時若以上述的方式一進行多項擬合時，為了得到所有紅光雷射線的峰值，勢必將區間放的更大，如圖 4-11 所示。

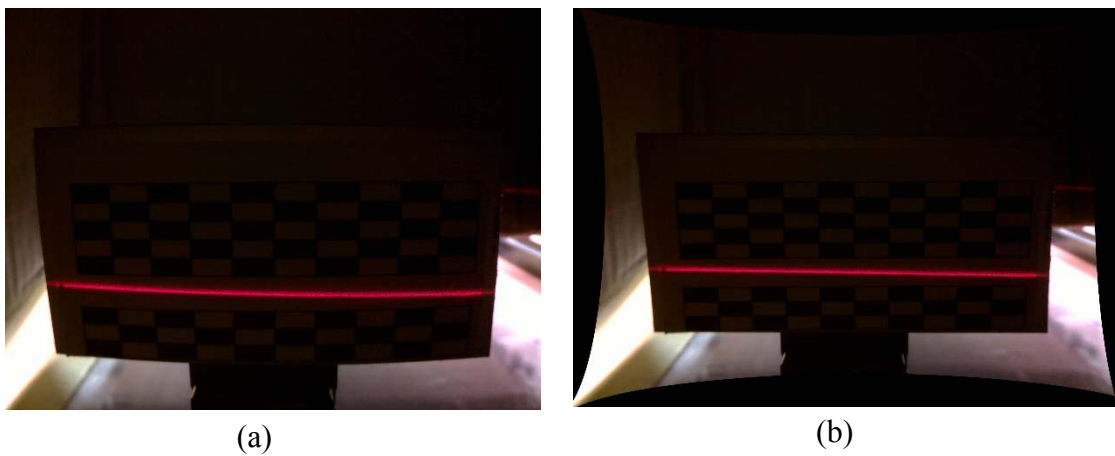
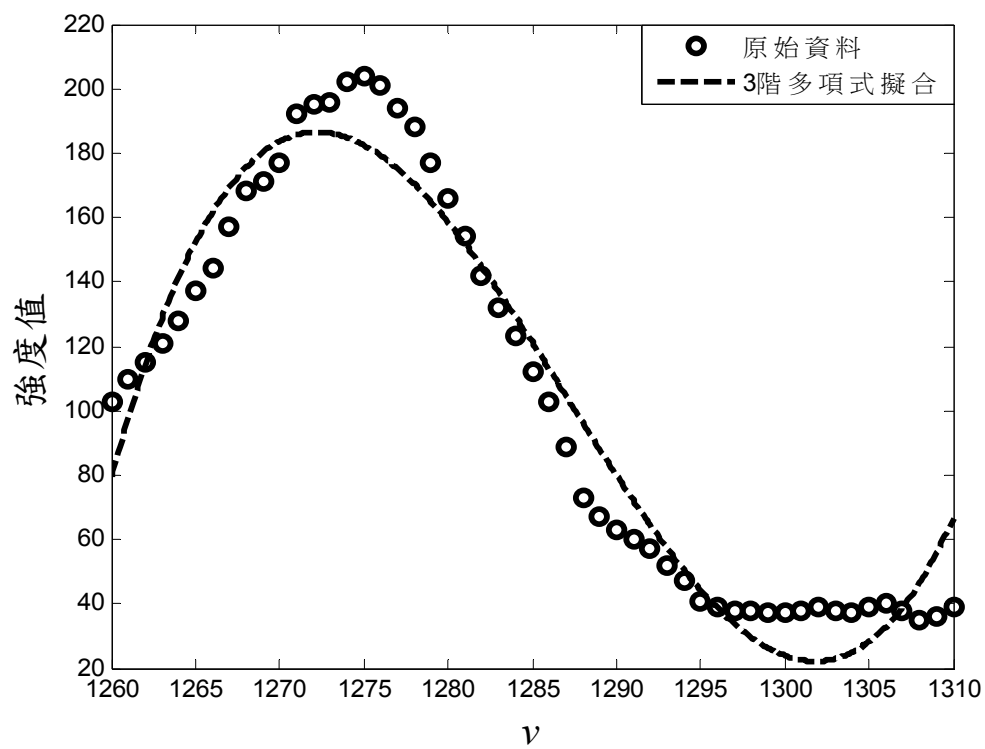
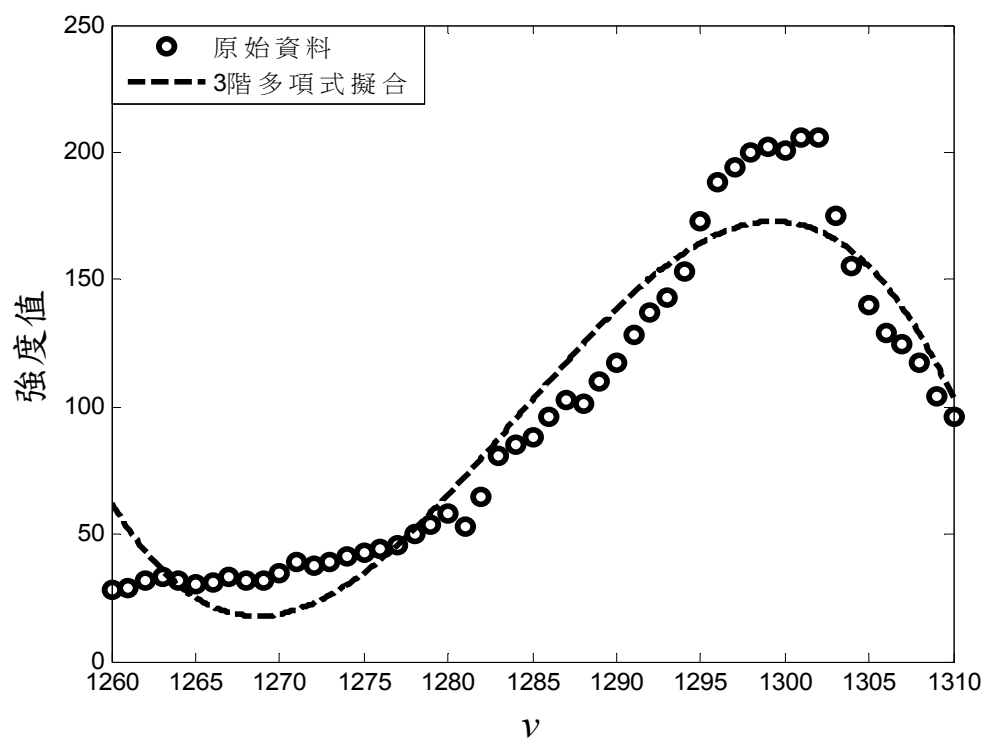


圖 4-10 紅光雷射傾斜線影像(a)校正前影像 (b)校正後呈現左高右低的情形



(a) 傾斜線影像第 500 行畫素位置



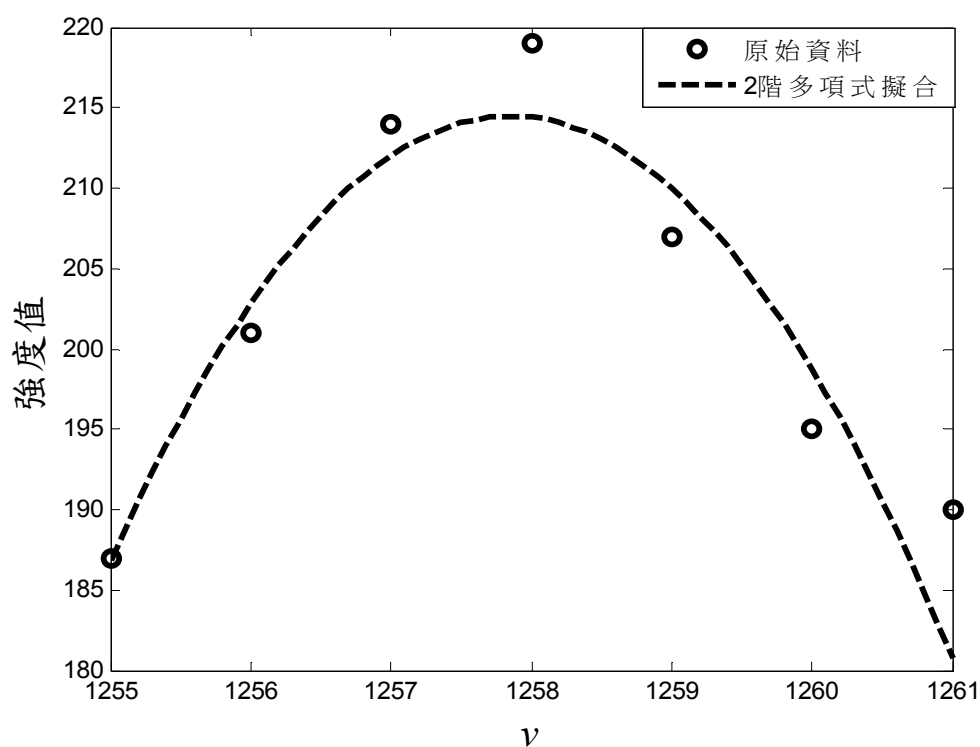
(b) 傾斜線影像第 2000 行畫素位置

圖 4-11 紅光雷射傾斜線局部曲線擬合

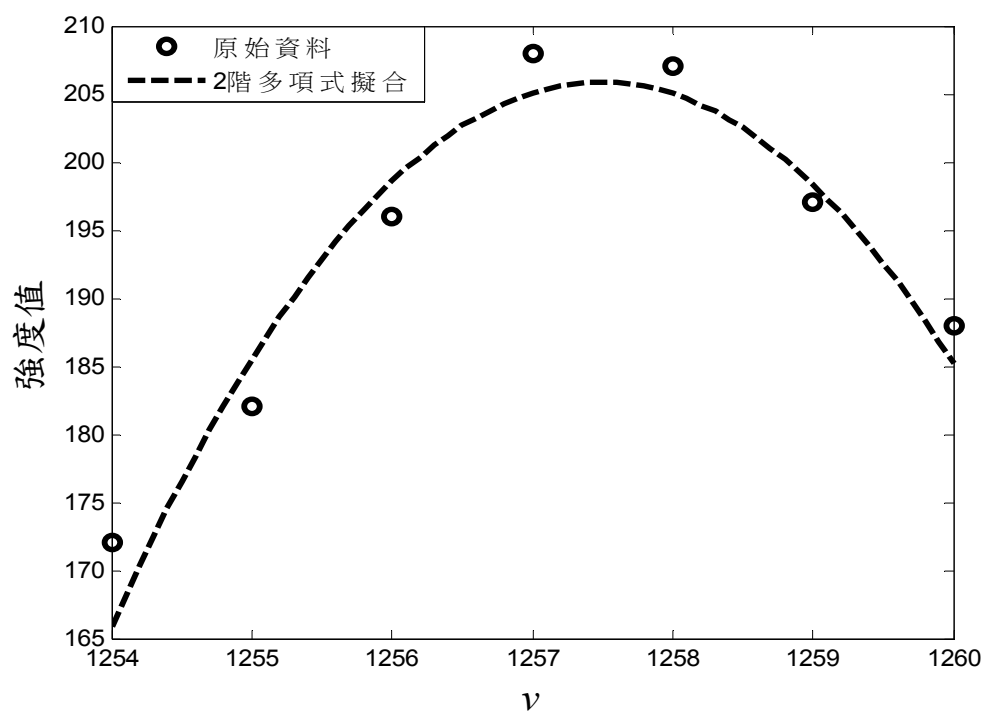
圖 4-11 中為了取得全部的紅光雷射峰值，將其區間由方式一的 20 加到至 50，但從圖 4-11(a)可以看出，由於範圍太大造成曲線擬合所找到的強度最大值已失真。

#### 4.5 紅光雷射線影像平滑處理與多項式曲線擬合結果與分析

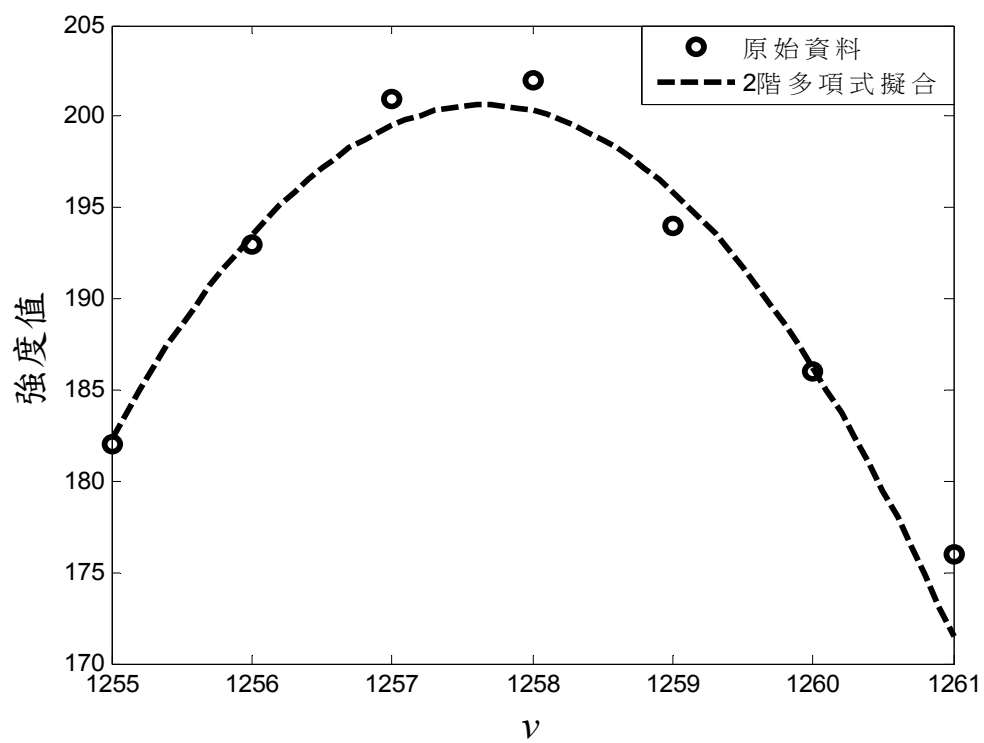
本章節將探討紅光雷射線曲線擬合多項式階數測試與分析，為了排除影像中雜訊的干擾，首先本研究對要分析的影像進行影像平滑化處理，而平滑化處理所使用的標準差參數：本研究對同一位置連續擷取 100 張的影像，觀察任一行某一點強度在每一張影像之間的變化，並計算平均的標準差作為影像平滑化的參數，圖 4-12(a)為  $Z=0.5\text{mm}$  第 1200 行資料進行多項式擬合結果，圖 4-12(b)為  $3\times 3$  高斯濾波平滑化影像結果，圖 4-12(c)為  $5\times 5$  高斯濾波平滑化影像結果。



(a)  $Z=0.5\text{mm}$  第 1500 行多項式擬合結果



(b) 3×3 高斯濾波平滑化影像結果



(c) 5×5 高斯濾波平滑化影像結果

圖 4-12 紅光雷射投射影像平滑處理



表 4-2 為比較影像在平滑化處理前與處理後，使用不同階數多項式擬合的結果，由表中可比較出影像進行平滑化處理後多項式擬合得到座標(v)位置的結果比影像沒有平滑化處理來的好。

表 4-2 紅光雷射線多項式階數實驗結果表

單位：pixel

		原始資料	多項式階數		
			2 階	3 階	4 階
影像平滑化處理前	強度峰值	191	187.4	187.3	189.8
	座標(v)	1253	1253.4	1252.7	1252.8
影像平滑化處理後	強度峰值	183	181.2	180.9	183.1
	座標(v)	1253	1253.4	1253.1	1253.1

#### 4.6 定義交點座標與全域座標的結果

經由 4.1~4.4 的實驗將量測系統調整到最佳化結果，本研究在攝影機校正部份的實驗採用 16×15 棋盤格子，並擷取 10 張影像作為攝影機校正並取得攝影機內部及失真參數。接下來進行待量測影像的擷取，首先移動固定在線性滑塊組的 L 型鋁板，每次位移 0.5mm 取得明影像及暗影像，暗影像部份藉由 OPENCV 取得影像矩陣資料，再由 MATLAB® 透過多項式擬合運算取得紅光雷射強度峰值及影像座標位置，圖 4-13 為影像每行強度峰值分佈情形。

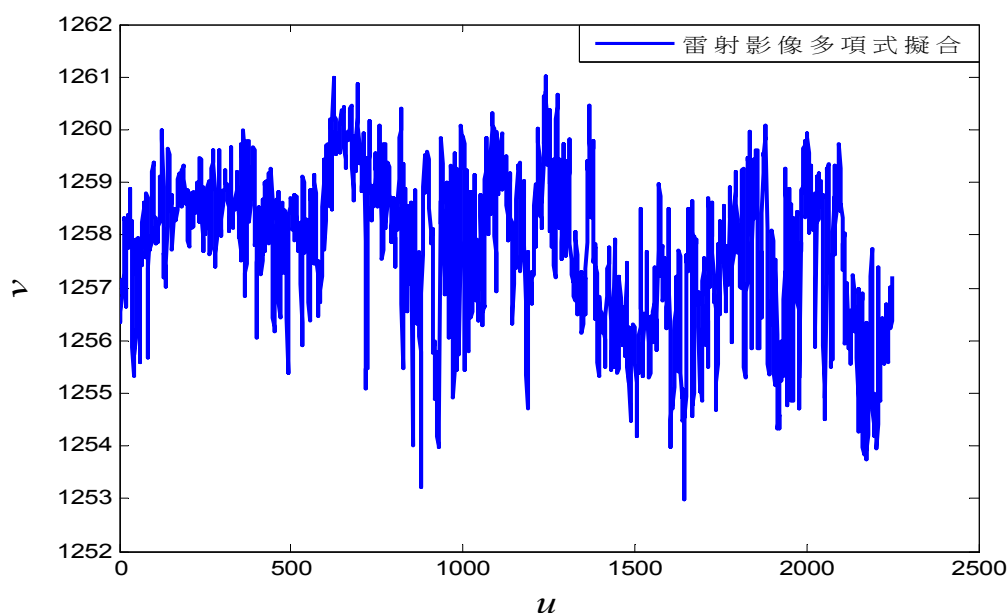


圖 4-13 雷射影像多項式擬合後峰值分佈

為了改善雷射線強度峰值曲線的量測標準差，本研究對雷射強度峰值再 1 次進行 2 階多項式擬合得到一條 2 次曲線的雷射強度峰值，如圖 4-14 所示。

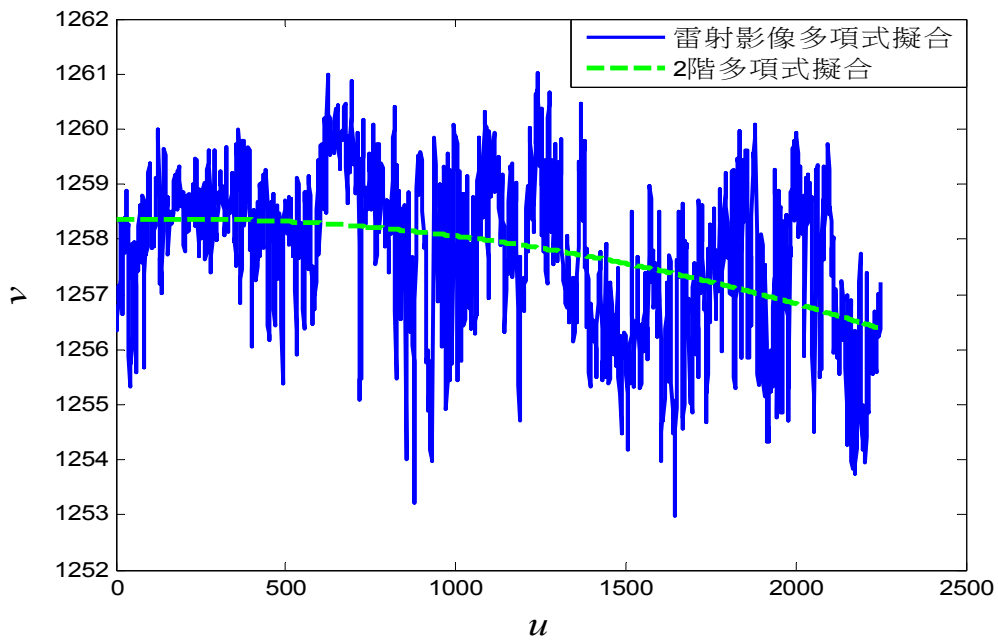


圖 4-14 雷射影像 2 階多項式擬合後峰值

本研究以此 2 次曲線的雷射線強度峰值作為雷射線校正使用；另外，在實際量測中，本研究將雷射強度峰值以分段的方式進行 3 階多項式擬合取得一條 3 次曲線的雷射強度峰值作做量測使用，如圖 4-15 所示。

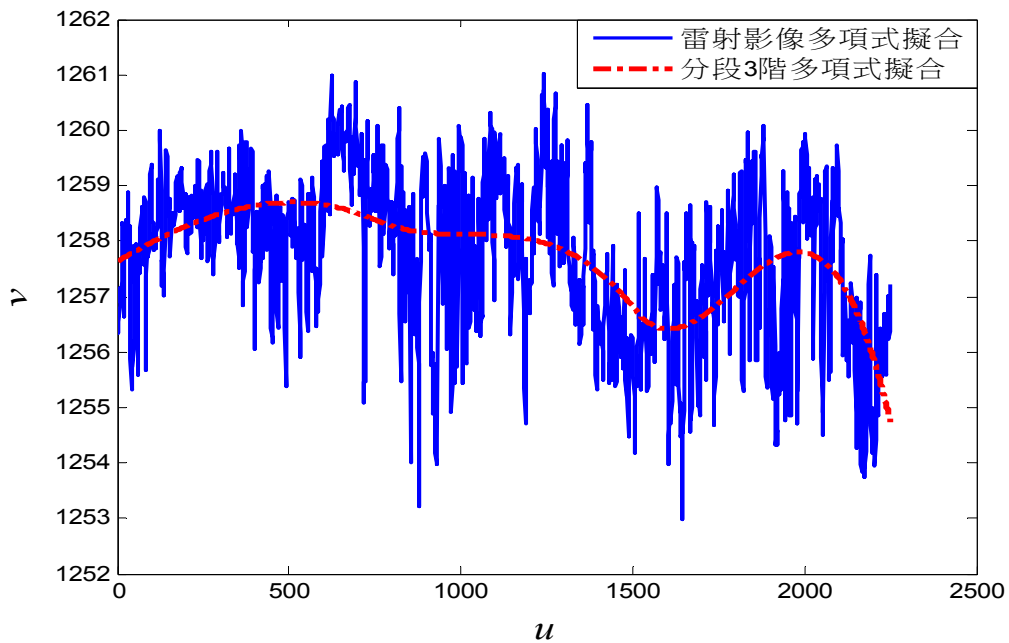


圖 4-15 雷射影像分段 3 階多項式擬合後峰值

附表(一)為每張暗影像中紅光雷射強度峰值座標位置( $u$ -axis, $v$ -axis)。明影像部份藉由 OPENCV 對影像進行感興趣區域及角點偵測處理，附表(二)為每張影像角點座標位置。由附表(一)及附表(二)的資料，依據 3.2.10 章節所敘述的方法經由 MATLAB<sup>®</sup> 計算取得二條直線交點座標位置，附表(三)為交點座標與全域座標相對應關係。

#### 4.7 取得雷射光平面 $Z$ 方程式與驗證方程式結果與分析

將附表(三)資料中第二欄與第三欄的影像座標位置代入(3-3)和(3-4)式中，取得總共 242 組方程式，運用 MATLAB<sup>®</sup>以最小平方解聯立方程式，得到方程式  $a_1 \sim a_8$  係數後，接著再將  $a_1 \sim a_8$  係數代入(3-7)式，若後續量測系統設備的位置沒有變化，只需將攝影機取得的影像畫素( $u,v$ )代入方程式，即可得到全域座標  $Z$  的位置。附表(四)驗證結果是利用附表(三)第二欄與第三欄的( $u,v$ )的影像座標資料代入方程式得到  $Z$  的結果，量測標準差 0.05mm 之間。

#### 4.8 量測系統應用：無人搬運車從動輪量測

在本實驗中是將量測系統應用在無人搬運車從動輪磨耗量測上如圖 4-16 所示，根據 3.2.6 節影像取得的方法，取得量測所需影像。由於全新的從動輪表面為不規則平面，因此在輪子表面上標註記號如圖 4-17 所示，再根據 3.2.8 節取得角點的座標位置，目的用來對應每張量測影像雷射光強度峰值  $u$  座標；最後根據 3.2.9 節來取得線型雷射光投射於從動輪輪面強度峰值的座標位置後，根據 4.7 節可求出本系統量測的結果，量測標準差 0.04mm。

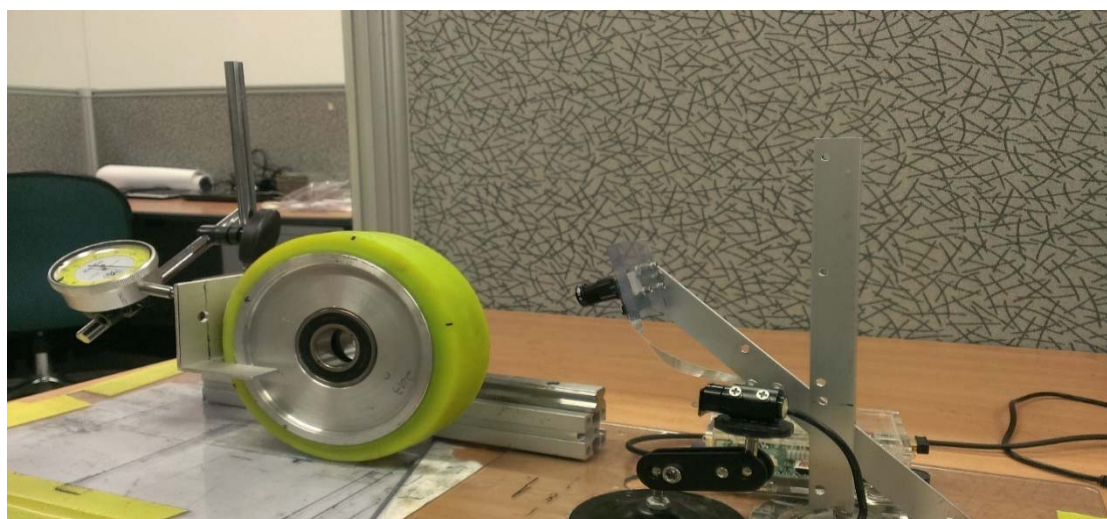


圖 4-16 無人搬運車從動輪磨耗量測

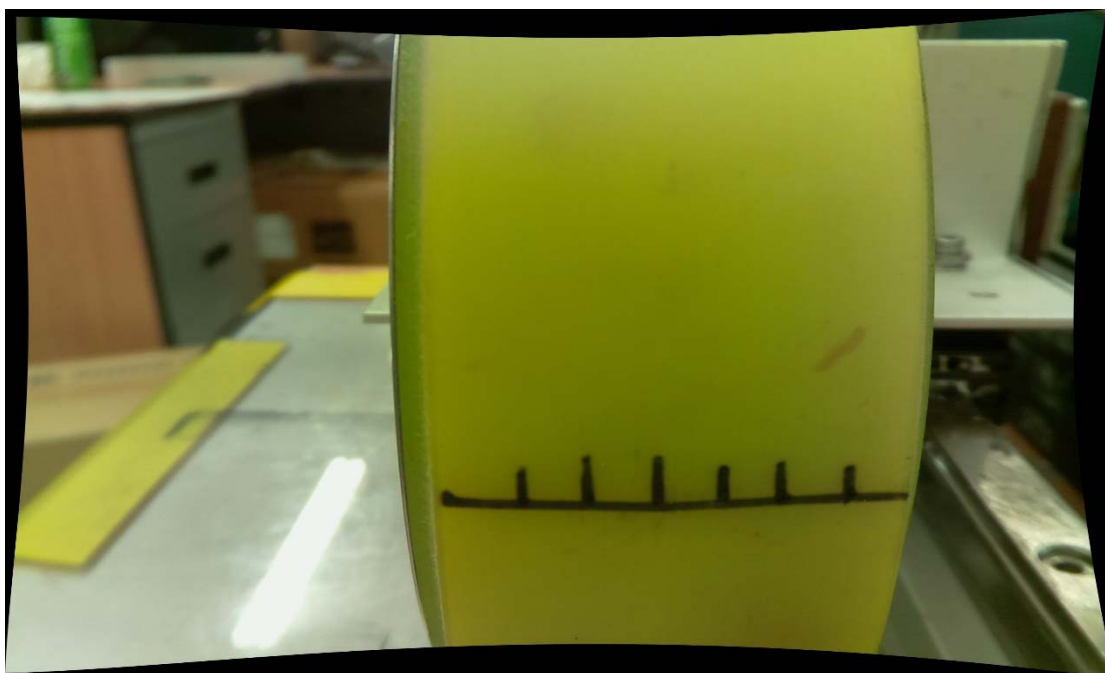


圖 4-17 從動輪輪面標註

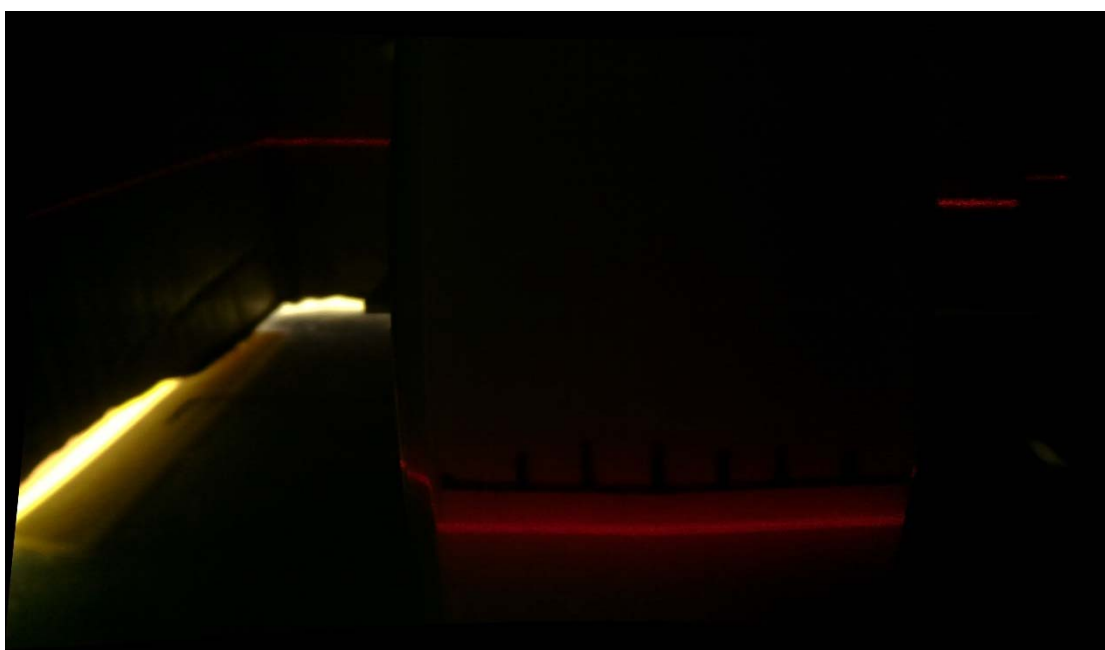
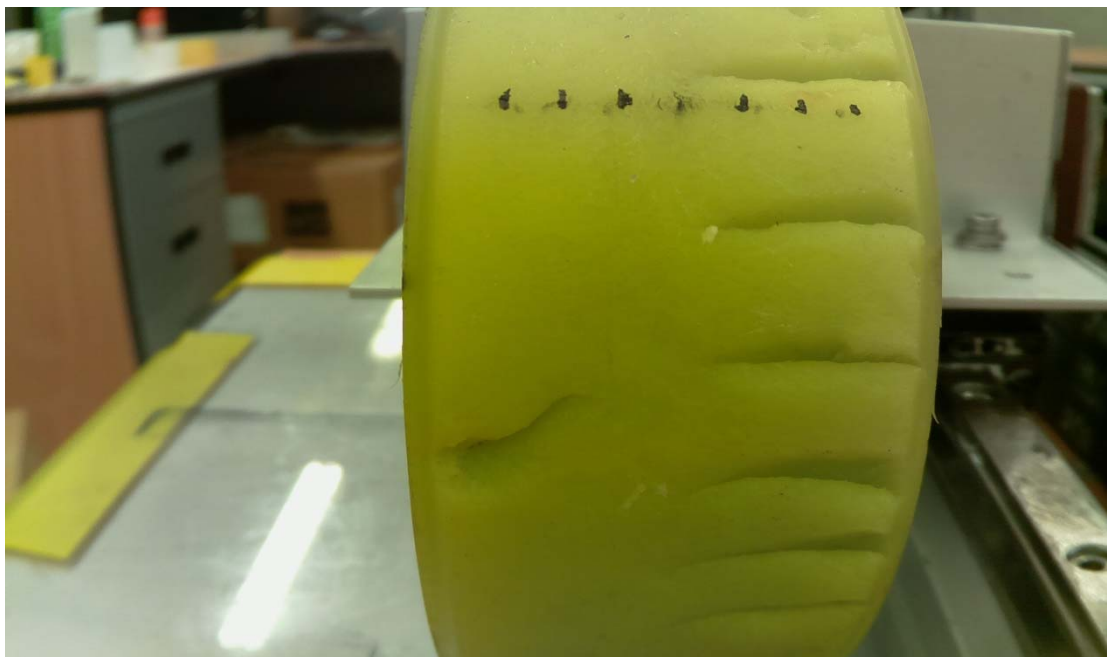
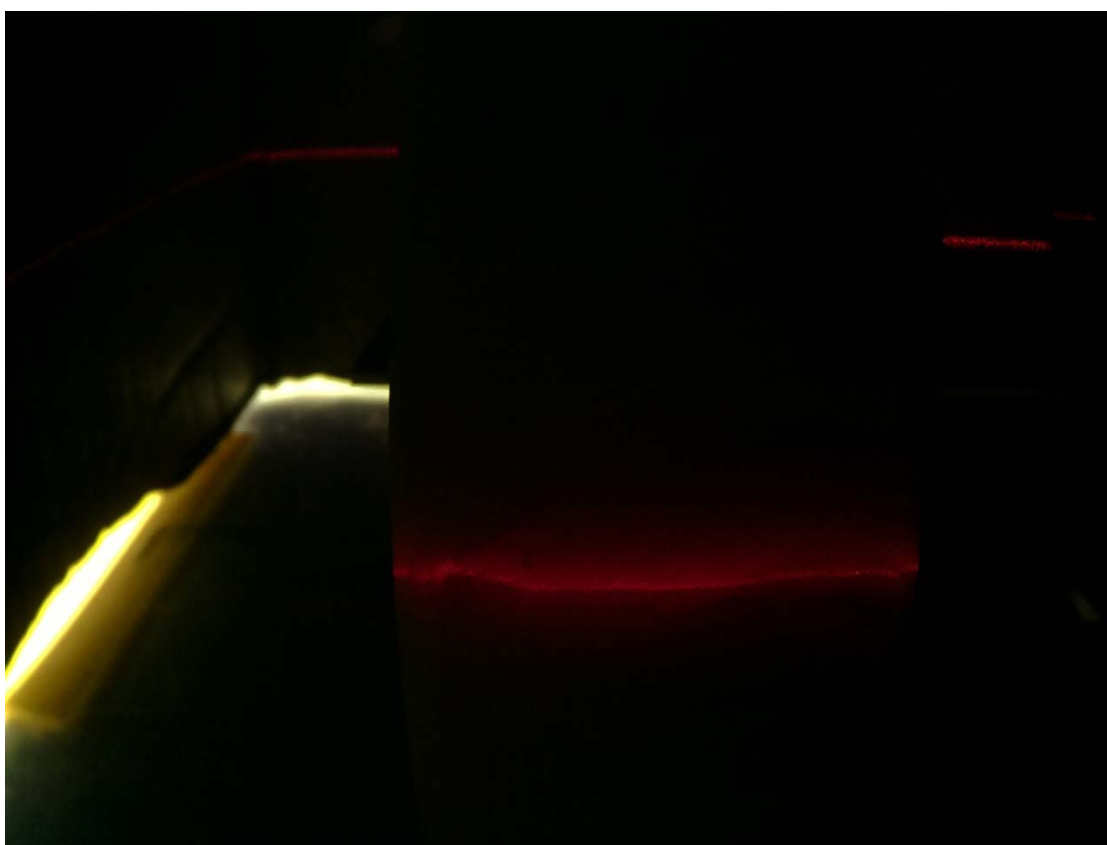


圖 4-18 線型雷射投射從動輪輪面情形

另外，在從動輪輪面的破損量測部份如圖 4-19 所示，在圖 4-19(b)線型雷射光投射從動輪表面情形，圖 4-20 波峰的位置即為輪面破損的地方，故藉由線型雷射光強度峰值的影像座標  $v$  軸中，即可求得輪子表面的變化量，圖 4-21 為從動輪輪面磨耗情形。



(a)



(b)

圖 4-19 從動輪輪面破損檢測(a) 從動輪輪面受損情形  
(b)線性雷射光投射在輪面情形

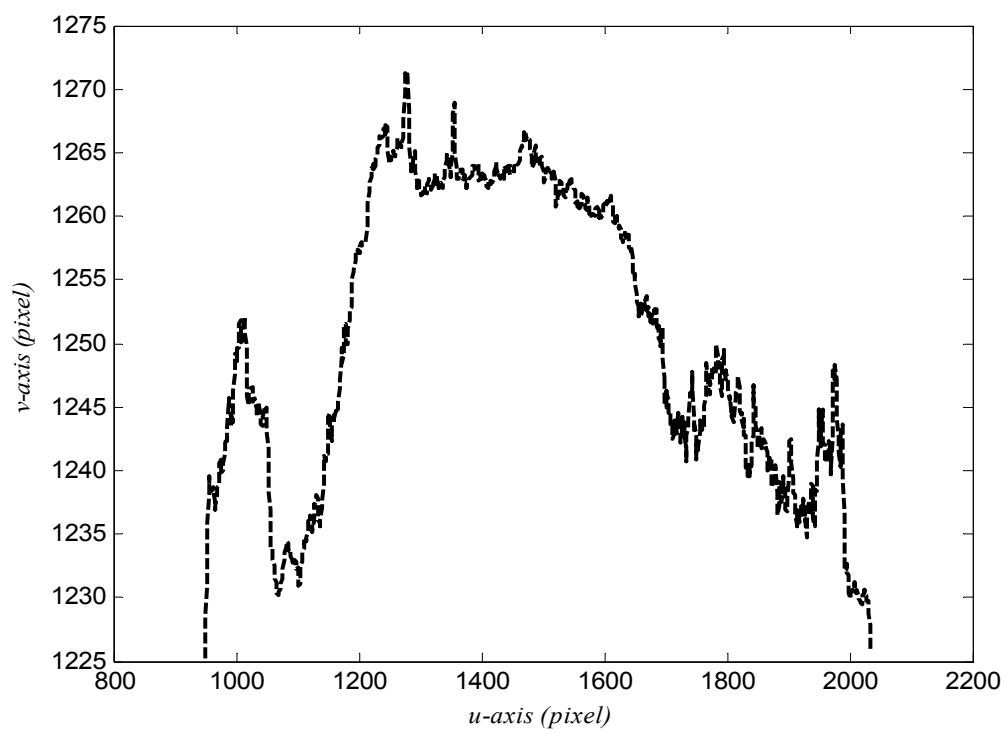


圖 4-20 線型雷射光強度峰值影像座標位置

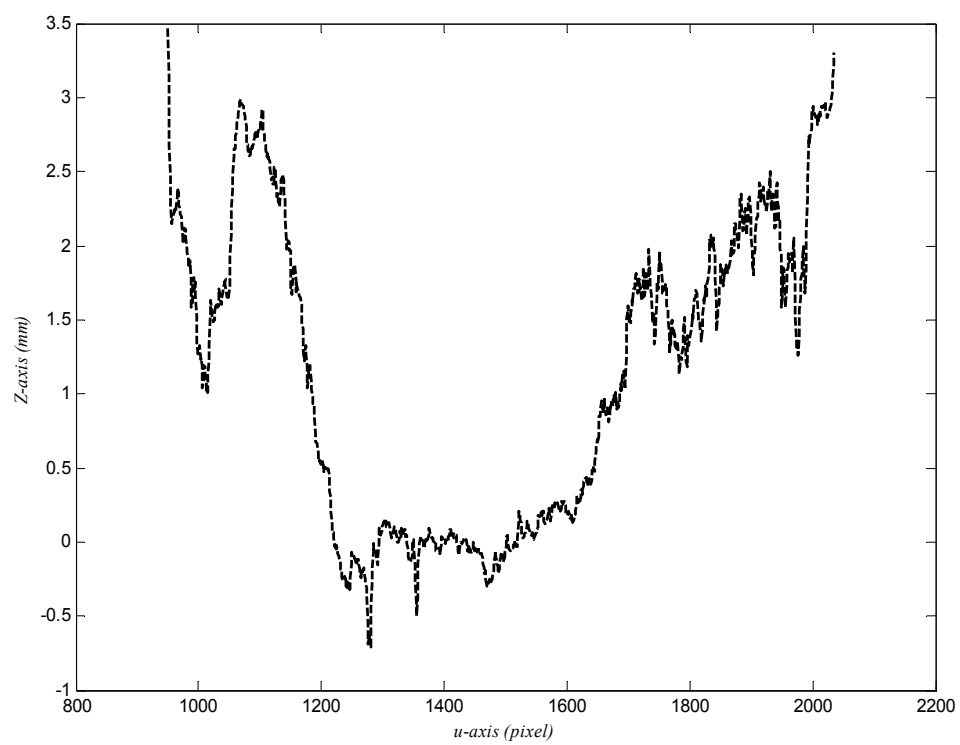


圖 4-21 從動輪輪面磨耗情形

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

在系統上本研究以雷射線結構光來量測物體表面，並以針孔透視投影的方法來準確的計算出物體表面位移量進而換算高度變化，提高其解析度與保有最佳的精準度，並以簡單的儀器架設與低廉的設備成本，來達到有效率與利益優勢。

程式以多項式擬合方法計算雷射線結構光每行強度最大的位置，運用針孔透視投影座標系轉換，藉由影像座標及空間座標之間的關係式，完成雷射線結構光的量測，此線上每行的高度變化均可得到。多次量測不同高度雷射線的變化，得到雷射線的高度位置，其量測的標準差為0.05mm，可見其量測成效良好，在實例的應用上也獲得不錯成效。

### 5.2 建議

後續研究尚可藉由設備的改良，提升數位影像量測數據的準確度，由本研究的經驗與結果提供以下幾點建議：

1. 本研究模擬輪徑磨耗量所使用的線性滑軌的部份，主要以機械式的百分表做為待測物位移量的依據，可以利用線性伺服馬達來驅動線性滑軌，提升待測物移動量的準確性有效提高精度量測。
2. 線性雷射結構光源為一般市售二極體雷射，其量測精度有限；若須提升影像量測精度，可選用等級更高的雷射發光源。
3. 本研究尚未將量測系統安裝在無人搬運車設備上，未來仍需進行實際測試，以了解本系統於走行輪量測的準確度與穩定度，以及環境變異影響的程度。



## 第六章參考文獻

- [1.] Tang, C. W., Liang, X. C., Zou, C. P., “Analysis on Modern Measuring Methods of Curved Surfaces”, *SPIE*, Vol. 2101, pp. 122-124, 1993.
- [2.] Tai, W. C., Chang Ming, “Noncontact Profilometric Measurement of Large-Form Parts”, *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 9, pp. 2730-2735, 1996.
- [3.] Huyhn, D. Q., Owens, R. A., “Line Labelling and Region Segmentation in Stereo Image Pairs”, *Image and Vision Computing*, Vol. 12, No. 4, pp.213-225, 1994.
- [4.] Luo, P. F., Chao, Y. J., Sutton, M. A., “Application of Stereo Vision to Three-Dimensional Deformation Analysis in Fracture Experiments”, *Opt. Eng.*, Vol. 33, No. 3, pp. 981-990, 1994.
- [5.] 林高輝, ”映射函數三維空間影像量測技術研究”, 中原大學碩士論文(2001).
- [6.] Perrin, J.C., and Thomas, A., ”Electronic Processing of MoireFringes Application to Moire Topography and Comparison with Photogrametry”, *Applied Optics*, Vol.18, 1979.
- [7.] Scrinivasan, V. H.C. Liu, and Halioua, M. ”Automated Phase Measuring Profilometry of 3-D Diffuse Objects”, *Applied Optics*, Vol. 23, 15 Sep,1984.
- [8.] 陳昭元, ” 正弦及三角條紋結構光投影法的三維量測分析”, 國立中央大學碩士論文(2008)
- [9.] Kafri and Glatt, I., “The physics of Moire Metrology”, *New York, Wiley*, c1990.
- [10.] Daniel Post , Bongtae Han , Ifju, Peter G., “Moiré Methods for Engineering and Science - Moiré Interferometry and Shadow Moiré”, *Topics in Applied Physics*, Volume 77, p.151, 2000.
- [11.] Han, B., Post, D., “Moiré interferometry for engineering mechanics: current practices and future developments” , *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol.36. p.101-117(2001)



- [12.] 李元裕, "投射疊紋掃描量測技術研究", 中原大學碩士論文(2000)
- [13.] 顏守志, "磁控式導航系統", 逢甲大學碩士論文 (2009).
- [14.] Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. "Digital Image Processing (2 ed.)", *Prentice Hall*, (2002)
- [15.] 繆紹綱, "數位影像處理", 普林斯頓國際有限公司(2003)
- [16.] opencv dev team., (2012, Mar 30). Miscellaneous Image Transformations cvtColor, Retrieved from [http://www.opencv.org.cn/opencvdoc/2.3.2/html/doc/tutorials/calib3d/camera\\_calibration/camera\\_calibration.html?highlight=camera\\_calibration](http://www.opencv.org.cn/opencvdoc/2.3.2/html/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html?highlight=camera_calibration)
- [17.] Harris, C., and Stephens(1998), M., "A Combined corner and edge detector," *The 4th Alvey vision Conference.*, pp147-151.
- [18.] Tomasi, C., and shi, J., "Good features to track," in *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, Seattle, USA, 1994, pp. 593-600.
- [19.] Zhang, Z., "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations", in *proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, vol.1, pp. 666-673, 20-27 Sept. 1999.
- [20.] opencv dev team., (2012, Apr 06). Camera Calibration and 3D Reconstruction, Retrieved from [http://www.opencv.org.cn/opencvdoc/2.3.2/html/doc/tutorials/calib3d/camera\\_calibration/camera\\_calibration.html?highlight=camera\\_calibration](http://www.opencv.org.cn/opencvdoc/2.3.2/html/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html?highlight=camera_calibration)
- [21.] Richard's blog, (2012, Oct 23). 攝像頭校正 camera calibration - part 2 calibration, Retrieved from <http://wycwang.blogspot.tw/2012/10/camera-calibration-part-2-calibration.html>

# 附錄一

附表一 部份暗影像紅光雷射強度最大值

	Z - axis						
	0mm	0.5mm	1mm	1.5mm	2mm	2.5mm	3mm
u-axis	v - axis						
201	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
202	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
203	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
204	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
205	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
206	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
207	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
208	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
209	1262.78	1258.35	1252.68	1247.29	1242.02	1236.30	1230.53
210	1262.79	1258.35	1252.68	1247.29	1242.01	1236.29	1230.53
211	1262.79	1258.35	1252.68	1247.29	1242.01	1236.29	1230.53
212	1262.79	1258.35	1252.68	1247.29	1242.01	1236.29	1230.53
213	1262.79	1258.35	1252.68	1247.29	1242.01	1236.29	1230.53
214	1262.79	1258.35	1252.68	1247.29	1242.01	1236.29	1230.53
215	1262.79	1258.35	1252.68	1247.29	1242.01	1236.29	1230.53

3.5mm	4mm	4.5mm	5mm
1225.79	1220.17	1214.78	1208.72
1225.79	1220.17	1214.78	1208.72
1225.79	1220.17	1214.78	1208.72
1225.79	1220.17	1214.78	1208.72
1225.79	1220.17	1214.78	1208.72
1225.79	1220.17	1214.78	1208.72
1225.79	1220.17	1214.78	1208.73
1225.79	1220.17	1214.78	1208.73
1225.79	1220.17	1214.78	1208.73
1225.79	1220.17	1214.78	1208.73
1225.79	1220.16	1214.78	1208.73
1225.79	1220.16	1214.77	1208.73
1225.78	1220.16	1214.77	1208.73
1225.78	1220.16	1214.77	1208.73

附表二 明影像感興趣區域角點位置座標

Z-axis	$u_1$	$v_1$	$u_2$	$v_2$	Z-axis	$u_1$	$v_1$	$u_2$	$v_2$
0mm	248.56	1114.26	282.75	1299.4	0.5mm	256.05	1110.03	288.7	1294.47
	470.03	1108.45	495.49	1308.81		475.75	1103.47	501.92	1304.19
	677.68	1108.71	698.02	1309.31		683.92	1104.36	703.84	1304.24
	903.78	1110.2	917.14	1310.04		908.5	1105.45	922.37	1304.64
	1112.22	1111.77	1118.68	1310.9		1116.76	1107.21	1123.14	1305.63
	1338.7	1112.49	1338.84	1311.4		1341.49	1107.18	1341.81	1306.17
	1546.52	1113.01	1539.69	1311.84		1549.02	1108.03	1541.99	1306.3
	1772.82	1112.56	1759.12	1311.62		1773.61	1107.46	1760.58	1305.8
	1979.78	1112.33	1959.42	1311.62		1980.16	1107.34	1959.87	1306.32
	2204.19	1111.8	2178.22	1311.43		2203.39	1107.02	2177.23	1305.59
	2421.21	1121.21	2387	1308		2419.31	1115.97	2387.31	1299.06
1.0mm	261.33	1105.31	294.26	1288.63	1.5mm	269.75	1099.58	302.73	1283.59
	481.12	1098.68	506.67	1297.86		491	1094	514.39	1291.67
	687.94	1098.12	706.8	1298.14		695.2	1093.02	714.05	1292.79
	910.44	1100.02	924.09	1298.84		916.98	1095.14	929.97	1293.08
	1117.51	1102.34	1124.27	1299.7		1122.82	1097.19	1129.17	1293.71
	1342.29	1102.71	1341.75	1300.35		1346.38	1097.38	1346.25	1293.88
	1548.16	1102.93	1541.05	1300.29		1551.62	1097.35	1544.13	1294.2
	1771.72	1102.36	1758.41	1300.33		1773.82	1096.94	1759.97	1294.02
	1976.93	1102.35	1956.82	1299.98		1977.86	1096.97	1957.63	1293.67
	2199.59	1101.94	2173.51	1299.6		2198.97	1096.12	2173.26	1293.37
	2414.13	1111.1	2382.64	1293.67		2412.66	1105.3	2380.93	1287.18

2.0mm	278.1	1095.47	313	1283	2.5mm	278.63	1090.03	312	1275
	495.43	1087.83	521.45	1286.2		495.43	1083.77	520.39	1280.84
	701.5	1088.22	720.21	1286.68		699.94	1083.21	718.2	1280.79
	922.4	1089.9	935.28	1287.04		919.45	1085.33	932.73	1281.61
	1127.61	1091.56	1133.69	1287.84		1123.97	1086.97	1129.86	1282.51
	1349.35	1091.63	1349.56	1288.01		1343.52	1086.22	1344.28	1283.19
	1554.21	1091.98	1546.61	1288.15		1547.78	1088.08	1540.65	1282.87
	1774.75	1091.2	1761.53	1287.96		1768.4	1087.28	1754.8	1283.12
	1978.19	1091.26	1957.91	1287.26		1970.31	1087.41	1950.64	1282.69
	2198.16	1091.07	2171.45	1287.68		2189.66	1086.81	2165.38	1282.23
	2410.38	1099.5	2375	1291		2401.65	1095.83	2368.92	1287.7
3.0mm	281.28	1085.18	311.88	1266.39	3.5mm	289.62	1080.14	322	1264
	496.85	1078.79	521.65	1274.91		505.16	1073.99	528.67	1269.67
	697	1079	718.84	1275.48		706.71	1073.5	725.3	1269.49
	918.63	1080.22	931.75	1275.7		924.65	1075.31	937.22	1270.42
	1121.68	1082.05	1128.2	1276.72		1126.83	1077.33	1132.95	1270.78
	1341.43	1081.86	1341.63	1277.26		1345.73	1077.25	1345.71	1271.33
	1544.31	1082.65	1537.39	1277.39		1547.67	1077.5	1540.4	1271.36
	1763.82	1082.34	1750.8	1276.96		1765.28	1076.6	1752.72	1271.27
	1964.61	1082.49	1945.47	1276.87		1965.33	1077.35	1946.14	1270.84
	2183.24	1081.88	2158.33	1276.36		2183.04	1076.27	2158.07	1270.69
	2393.14	1090.97	2359	1281		2392.59	1085.61	2358	1275

4.0mm	295.36	1075.62	325.86	1254.46	4.5mm	300.28	1070.58	331.65	1248.97
	509.38	1069.15	532.87	1263.94		512.99	1063.98	536.5	1258.93
	710.02	1068.93	728.39	1264.02		713.42	1063.47	731.28	1257.86
	927.33	1070.69	939.56	1264.58		928.84	1065.07	941.96	1258.68
	1128.27	1072.08	1134.22	1265.43		1129.42	1067.38	1135.42	1259.77
	1345.57	1071.93	1345.83	1265.77		1346.58	1067.6	1346.27	1260.16
	1546.79	1072.67	1539.7	1265.79		1545.64	1068.09	1539.34	1260.45
	1763.43	1071.97	1750.69	1265.72		1761.88	1067.21	1748.83	1260.35
	1963.35	1071.96	1943.81	1265.42		1960.05	1067.65	1941.42	1259.72
	2179.42	1071.85	2154.43	1264.91		2174.94	1066.17	2151.31	1259.35
	2387.37	1080.67	2347.55	1265.99		2383.01	1075.6	2352.37	1252.72
5.0mm	298.74	1065.39	328.49	1244.39					
	510.45	1059.13	534.43	1252.34					
	709.12	1059.35	727.72	1252.96					
	924.34	1060.92	937.36	1253.25					
	1123.76	1062.18	1129.65	1254.33					
	1339.71	1063.23	1339.3	1255.25					
	1538.32	1063.5	1531.77	1255.36					
	1753.28	1062.76	1740.46	1255.66					
	1951.26	1063.41	1932.73	1255.18					
	2165.34	1062.67	2141.91	1254.89					
	2371.9	1071.97	2341.46	1248.67					

附表三 交點座標與全域座標位置

Z-axis	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>X</i>	<i>Z</i>	Z-axis	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>X</i>	<i>Z</i>
0mm	276	1262.84	0.0	0.0	0.5mm	282.31	1258.36	0.0	0.5
	489.66	1262.96	9.0	0.0		495.94	1258.36	9.0	0.5
	693.33	1263.06	17.5	0.0		699.26	1258.32	17.5	0.5
	914	1263.12	26.5	0.0		919.14	1258.24	26.5	0.5
	1117.13	1263.15	35.0	0.0		1121.61	1258.12	35.0	0.5
	1338.81	1263.13	44.0	0.0		1341.73	1257.94	44.0	0.5
	1541.36	1263.09	52.5	0.0		1543.71	1257.75	52.5	0.5
	1762.47	1263.01	61.5	0.0		1763.75	1257.49	61.5	0.5
	1964.4	1262.89	70.0	0.0		1964.88	1257.21	70.0	0.5
	2184.56	1262.73	79.0	0.0		2183.65	1256.86	79.0	0.5
	2395.33	1262.54	87.5	0.0		2394.75	1256.49	87.5	0.5
1.0mm	287.8	1252.68	0.0	1.0	1.5mm	296.22	1247.28	0.0	1.5
	500.87	1252.64	9.0	1.0		509.13	1247.2	9.0	1.5
	702.51	1252.59	17.5	1.0		709.74	1247.1	17.5	1.5
	920.91	1252.52	26.5	1.0		926.94	1246.95	26.5	1.5
	1122.65	1252.43	35.0	1.0		1127.65	1246.78	35.0	1.5
	1341.88	1252.31	44.0	1.0		1346.28	1246.55	44.0	1.5
	1542.78	1252.18	52.5	1.0		1545.95	1246.32	52.5	1.5
	1761.66	1252.02	61.5	1.0		1763.34	1246.03	61.5	1.5
	1961.72	1251.86	70.0	1.0		1962.56	1245.71	70.0	1.5
	2179.84	1251.65	79.0	1.0		2179.52	1245.34	79.0	1.5
	2389.92	1251.44	87.5	1.0		2388.3	1244.96	87.5	1.5

2.0mm	305.36	1241.95	0.0	2.0	2.5mm	305.01	1236.26	0.0	2.5
	515.62	1241.78	9.0	2.0		514.73	1236.15	9.0	2.5
	715.96	1241.58	17.5	2.0		714.06	1236.01	17.5	2.5
	932.29	1241.32	26.5	2.0		929.63	1235.84	26.5	2.5
	1132.24	1241.05	35.0	2.0		1128.45	1235.65	35.0	2.5
	1349.51	1240.71	44.0	2.0		1344.1	1235.41	44.0	2.5
	1548.46	1240.38	52.5	2.0		1542.4	1235.16	52.5	2.5
	1764.76	1239.95	61.5	2.0		1758.15	1234.86	61.5	2.5
	1962.85	1239.55	70.0	2.0		1955.49	1234.55	70.0	2.5
	2178.06	1239.05	79.0	2.0		2171.35	1234.18	79.0	2.5
	2384.69	1238.56	87.5	2.0		2378.12	1233.79	87.5	2.5
3.0mm	305.83	1230.54	0.0	3.0	3.5mm	315.26	1225.74	0.0	3.5
	516.04	1230.53	9.0	3.0		523.38	1225.62	9.0	3.5
	713.84	1230.49	17.5	3.0		721.13	1225.48	17.5	3.5
	928.71	1230.42	26.5	3.0		934.31	1225.3	26.5	3.5
	1126.65	1230.33	35.0	3.0		1131.5	1225.1	35.0	3.5
	1341.58	1230.2	44.0	3.0		1345.71	1224.86	44.0	3.5
	1539.07	1230.07	52.5	3.0		1542.15	1224.61	52.5	3.5
	1753.95	1229.88	61.5	3.0		1755.75	1224.3	61.5	3.5
	1950.12	1229.68	70.0	3.0		1950.79	1223.99	70.0	3.5
	2164.34	1229.44	79.0	3.0		2164.12	1223.61	79.0	3.5
	2368.31	1229.18	87.5	3.0		2367.45	1223.24	87.5	3.5



4.0mm	319.99	1220.07	0.0	4.0	4.5mm	325.62	1214.69	0.0	4.5
	527.56	1219.87	9.0	4.0		531.14	1214.52	9.0	4.5
	724.21	1219.67	17.5	4.0		727.28	1214.35	17.5	4.5
	936.71	1219.45	26.5	4.0		938.94	1214.15	26.5	4.5
	1132.8	1219.24	35.0	4.0		1133.99	1213.96	35.0	4.5
	1345.77	1219.01	44.0	4.0		1346.34	1213.73	44.0	4.5
	1541.43	1218.79	52.5	4.0		1540.88	1213.52	52.5	4.5
	1753.79	1218.54	61.5	4.0		1752.01	1213.27	61.5	4.5
	1948.57	1218.31	70.0	4.0		1945.95	1213.03	70.0	4.5
	2160.5	1218.05	79.0	4.0		2157.01	1212.76	79.0	4.5
	2357.9	1217.81	87.5	4.0		2359.33	1212.5	87.5	4.5
5.0mm	322.57	1208.78	0.0	5.0					
	529.03	1208.86	9.0	5.0					
	723.49	1208.9	17.5	5.0					
	934.36	1208.9	26.5	5.0					
	1128.26	1208.86	35.0	5.0					
	1339.4	1208.79	44.0	5.0					
	1533.36	1208.68	52.5	5.0					
	1743.59	1208.53	61.5	5.0					
	1937.26	1208.35	70.0	5.0					
	2147.61	1208.13	79.0	5.0					
	2348.49	1207.88	87.5	5.0					

附表四 驗證方程式結果與分析

$Z$	$u$	$v$	方程式驗證誤差( $Z$ )	平均誤差值( $Z$ )	標準差( $\sigma$ )
0mm	276.00	1262.84	- 0.13	0.03	0.05
	489.66	1262.96	- 0.10		
	693.33	1263.06	- 0.07		
	914.00	1263.12	- 0.05		
	1117.13	1263.15	- 0.03		
	1338.81	1263.13	- 0.01		
	1541.36	1263.09	0.00		
	1762.47	1263.01	0.01		
	1964.40	1262.89	0.02		
	2184.56	1262.73	0.02		
	2395.33	1262.54	0.02		
0.5mm	282.31	1258.36	- 0.02	-0.01	0.02
	495.94	1258.36	0.00		
	699.26	1258.32	0.01		
	919.14	1258.24	0.02		
	1121.61	1258.12	0.03		
	1341.73	1257.94	0.03		
	1543.71	1257.75	0.03		
	1763.75	1257.49	0.03		
	1964.88	1257.21	0.02		
	2183.65	1256.86	0.00		
	2394.75	1256.49	- 0.01		

1.0mm	287.80	1252.68	- 0.02	-0.02	0.02
	500.87	1252.64	- 0.01		
	702.51	1252.59	0.01		
	920.91	1252.52	0.02		
	1122.65	1252.43	0.03		
	1341.88	1252.31	0.03		
	1542.78	1252.18	0.04		
	1761.66	1252.02	0.04		
	1961.72	1251.86	0.04		
	2179.84	1251.65	0.04		
	2389.92	1251.44	0.04		
1.5mm	296.22	1247.28	0.00	0.00	0.02
	509.13	1247.20	0.01		
	709.74	1247.10	0.02		
	926.94	1246.95	0.02		
	1127.65	1246.78	0.02		
	1346.28	1246.55	0.02		
	1545.95	1246.32	0.02		
	1763.34	1246.03	0.01		
	1962.56	1245.71	0.00		
	2179.52	1245.34	- 0.02		
	2388.3	1244.96	- 0.04		
2.0mm	305.36	1241.95	0.02		
	515.62	1241.78	0.02		
	715.96	1241.58	0.02		

	932.29	1241.32	0.01	0.02	0.05
	1132.24	1241.05	0.01		
	1349.51	1240.71	- 0.01		
	1548.46	1240.38	- 0.02		
	1764.76	1239.95	- 0.04		
	1962.85	1239.55	- 0.06		
	2178.06	1239.05	- 0.09		
	2384.69	1238.56	- 0.12		
2.5mm	305.01	1236.26	0.00	0.00	0.02
	514.73	1236.15	0.01		
	714.06	1236.01	0.01		
	929.63	1235.84	0.02		
	1128.45	1235.65	0.01		
	1344.1	1235.41	0.01		
	1542.4	1235.16	0.00		
	1758.15	1234.86	- 0.01		
	1955.49	1234.55	- 0.02		
	2171.35	1234.18	- 0.03		
	2378.12	1233.79	- 0.05		
3.0mm	305.83	1230.54	- 0.02	-0.02	0.02
	516.04	1230.53	- 0.01		
	713.84	1230.49	0.01		
	928.71	1230.42	0.02		
	1126.65	1230.33	0.03		
	1341.58	1230.2	0.03		

	1539.07	1230.07	0.04		
	1753.95	1229.88	0.04		
	1950.12	1229.68	0.03		
	2164.34	1229.44	0.03		
	2368.31	1229.18	0.02		
3.5mm	315.26	1225.74	0.03	-0.02	0.02
	523.38	1225.62	0.04		
	721.13	1225.48	0.04		
	934.31	1225.30	0.04		
	1131.50	1225.10	0.04		
	1345.71	1224.86	0.04		
	1542.15	1224.61	0.03		
	1755.75	1224.30	0.02		
	1950.79	1223.99	0.01		
	2164.12	1223.61	- 0.01		
	2367.45	1223.24	- 0.03		
4.0mm	319.99	1220.07	0.00	0.01	0.01
	527.56	1219.87	0.00		
	724.21	1219.67	0.00		
	936.71	1219.45	0.00		
	1132.80	1219.24	- 0.01		
	1345.77	1219.01	- 0.01		
	1541.43	1218.79	- 0.01		
	1753.79	1218.54	- 0.02		
	1948.57	1218.31	- 0.02		

	2160.50	1218.05	- 0.03		
	2357.90	1217.81	- 0.04		
4.5mm	325.62	1214.69	- 0.01	0.02	0.01
	531.14	1214.52	- 0.01		
	727.28	1214.35	0.00		
	938.94	1214.15	- 0.01		
	1133.99	1213.96	- 0.01		
	1346.34	1213.73	- 0.01		
	1540.88	1213.52	- 0.01		
	1752.01	1213.27	- 0.02		
	1945.95	1213.03	- 0.02		
	2157.01	1212.76	- 0.03		
	2359.33	1212.5	- 0.04		
5mm	322.57	1208.78	- 0.07	0.00	0.03
	529.03	1208.86	- 0.05		
	723.49	1208.90	- 0.02		
	934.36	1208.90	- 0.01		
	1128.26	1208.86	0.01		
	1339.40	1208.79	0.02		
	1533.36	1208.68	0.02		
	1743.59	1208.53	0.03		
	1937.26	1208.35	0.03		
	2147.61	1208.13	0.03		
	2348.49	1207.88	0.02		