

國立政治大學地政學系 碩士論文
私立中國地政研究所

論文題目：

面陣列熱影像特性之研究

Research on Characteristic of Area-Based
Thermal Infrared Images

研 究 生： 那至中

指 導 教 授： 黃灝雄

中 華 民 國 九 十 九 年 六 月

國立政治大學地政學系
私立中國地政研究所

那至中

君所撰之碩士學位論文

面陣列熱影像特性之研究

業經本委員會審議通過

論文考試委員會主席

吳究

委員

黃金聰

詹進發

黃顯雄

指導教授

黃顯雄

政治大學地政系系主任

徐世榮

中國地政研究所所長

林英彰

中華民國 99 年 6 月 25 日

謝誌

回想大學畢業前夕，決定進修研究所的動機之一，是希望在繼續學習之餘，能幫上曾多次給予我啟發的黃灝雄老師一些忙。經過了這些日子，回過頭來看，沒想到忙不但沒幫到，欠老師的恩情，恐怕這輩子也無法償還了。非常感謝老師這六年來的耐心教導，老師不僅在課堂上指導我專業學問；也在課餘之時，提點我許多為人處世的道理，兩者皆令我獲益良多。

除了指導教授，也感謝此論文口試委員吳究老師、黃金聰老師與詹進發老師，對論文的整體架構與不足之處，提供許多的寶貴建議。同時也感謝系上的何維信老師、林老生老師、邱式鴻老師與林士淵老師，在撰寫論文的過程中，給予我創新的想法，以及糾正我一些初學者常犯的錯誤。

而在這段學習的過程中，感謝林永錚學長、張元璋學長、黃炳瑜學長、謝幸宜學姐以及黃國瑛學姐的指點與鼓勵，也感謝同窗彥廷、郁晴、安勤、豐毓以及清智的互相提攜與包容。同樣感謝差點同窗的建志、傑筌，帶給我在黑夜中追尋一線曙光的不懈精神。

感謝在背後全力支持的父母與家人們，讓我能心無旁騖的完成學業；也感謝您們的信賴，願意讓我隻身離家求學，以拓展視野。另外，感謝在臺北的叔叔嬸嬸時常噓寒問暖，以及家中長輩們的殷切叮嚀與祝福，非常感謝。

還有一群人，是我想要感謝，卻無法在這盡列你們的名字、曾經默默幫助我，卻同樣不求回報的偉大人們。一份關心，一聲問候；一句鼓勵，一張笑容，我從不敢忘記自己何其有幸能遇見你們，因此，在最後，請至少讓我致上最深的感謝。謝謝你們，願我某天也能幫助你們。

摘要

熱紅外波段在遙感探測中佔有相當重要的地位，因其不受日夜條件限制，且因溫度變化時常具有與自然環境相關的特殊意義，使熱紅外影像可應用於測量、環境監控、都市開發、災害防治等領域。

在判釋遙測影像之前，通常必先確定各波段影像的幾何性質一致，若想將熱紅外影像與可見光影像套疊，須先率定蒐集熱影像之儀器，使影像受儀器本身的影響減到最低。本研究以 FLIR-T360 紅外線熱像儀為研究對象，探討熱像儀的成像特性，且嘗試率定與改正蒐集之熱影像。

率定熱像儀的實驗可分為幾何與輻射兩方面，幾何方面使用改良型的實地率定法，以求取熱像儀的內方位參數；輻射方面則使用實地調查法，求得控制點溫度，利用拍攝控制點蒐集多筆資料，擬合出輻射改正模型；本文亦展示熱影像幾何以及輻射改正後的成果。

關鍵詞：面陣列熱像儀、熱紅外影像、率定

Abstract

Thermal infrared data is important when conducting remote sensing investigation, for it could be acquired both in day and night. The change of temperature has characteristic significance of representing. So the thermal infrared images are used not only in the domain of surveying, but also in the environment monitoring, the urban development, and the disaster prevention.

Before interpreting the remote sensing data, one would make sure that each image of bands has similar image geometry. Calibrating such geometry could prove that the effect from the lens distortion had been minimized. In such case, calibrated thermal images are necessary to guarantee that the image coordinates will correspond with the space coordinates as other bands.

A thermal sensor, FLIR-T360 has been calibrated in this research. Two aspects of calibration executed are geometric and radiometric. A conventional calibrated template has been improved for using in the geometric aspect. The thermal sensor's interior orientation elements were then found by using a field method. In the radiometric aspect, in situ method has been employed to determine temperatures of the chosen control points. The result of correction in geometric and radiometric aspect are also shown and discussed in this study.

Keywords: Area-Based Thermal Sensor, Thermal Infrared Image, Calibration

目錄

第一章 緒論.....	1
第一節 研究動機與目的.....	1
一、研究動機.....	1
二、研究目的.....	3
第二節 研究背景與內容.....	4
一、研究背景.....	4
二、研究內容.....	6
第三節 研究方法與流程.....	7
一、研究方法.....	7
二、研究流程.....	11
第四節 章節架構.....	12
第二章 理論基礎與文獻回顧.....	13
第一節 紅外線相關理論.....	13
一、黑體輻射.....	15
二、普朗克定律.....	15
三、斯提凡波茲曼定律.....	16
四、維恩位移定律.....	17
第二節 紅外線熱影像相關理論.....	19
第三節 熱像儀幾何相關理論.....	21
一、量度型相機.....	21
二、非量度型相機.....	21
第四節 熱像儀輻射相關理論.....	23
一、熱像儀輻射率定.....	23
二、熱影.....	26
第三章 熱像儀幾何率定.....	29
第一節 實驗儀器.....	29
第二節 熱像儀幾何率定流程.....	31
第三節 熱像儀幾何率定實驗結果.....	36
第四章 熱像儀輻射率定.....	43
第一節 熱像儀輻射率定流程.....	43
第二節 熱像儀輻射率定實驗結果.....	45
第五章 熱影像的綜合特性探討.....	50
第一節 高差位移.....	50
第二節 熱影效應.....	53
第三節 放射率.....	59
第六章 結論與建議.....	62

參考文獻.....64



圖目錄

圖 1-1	面陣列熱像儀蒐集之夜間影像	8
圖 1-2	面陣列熱像儀蒐集之日出後影像	8
圖 1-3	數位相機攝取之可見光影像	9
圖 1-4	傳統數位相機率定用拍攝目標	9
圖 1-5	研究流程圖	11
圖 2-1	不同電磁光譜的大氣窗	14
圖 2-2	不同溫度下的黑體輻射曲線圖	17
圖 2-3	不同波長的放射、透射與反射率	26
圖 2-4	熱紅外影像中的熱影	27
圖 3-1	FLIR-T360 紅外線熱像儀	29
圖 3-2	幾何率定模板範例	31
圖 3-3	一般環境下拍攝率定模板之熱影像	32
圖 3-4	不均勻熱源下拍攝率定模板之熱影像	33
圖 3-5	提供熱源後所拍攝之率定模板熱影像	34
圖 3-6	經過對比增強處理後之率定模板熱影像	35
圖 3-7	熱像儀之輻射畸變差曲線圖	37
圖 3-8	熱像儀之輻射畸變差與離心畸變差示意圖	38
圖 3-9	幾何改正前之熱影像	40
圖 3-10	幾何改正後之熱影像	41
圖 3-11	完成幾何改正之熱影像	42
圖 4-1	熱像儀輻射率定示意圖	44
圖 4-2	熱像儀感測溫度示意圖	46
圖 4-3	感測溫度與真實溫度差異折線圖	47
圖 4-4	改正前後輻射誤差折線圖	49
圖 5-1	垂直影像的高差位移	50
圖 5-2	一維高差位移	51
圖 5-3	熱影像之高差位移	52
圖 5-4	陰影與熱影示意圖	53
圖 5-5	不同物體所展現之熱影	54
圖 5-6	熱影與反射面溫度關係示意圖	55
圖 5-7	溫度高於物體本身之熱影	56
圖 5-8	熱影溫度折線圖	58

表目錄

表 2-1	涵蓋熱紅外波段之感測器與載臺.....	24
表 3-1	FLIR-T360 紅外線熱像儀產品規格.....	30
表 3-2	熱像儀與內建數位相機之透鏡畸變差比較.....	39
表 3-3	熱像儀與一般數位相機之透鏡畸變差比較.....	39
表 4-1	熱像儀感測溫度值與誤差.....	45
表 4-2	輻射改正前後之熱影像溫度值.....	48
表 5-1	以不同俯角拍攝之熱影溫度.....	57
表 5-2	物質在 8-14 μm 之放射率.....	59



第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

一、研究動機

遙感探測經常使用多波段的影像來判釋地表地物，藉由感測地物表面來獲得地物的光譜資訊，並使用這些資訊來解釋分析特定的自然或社會現象。一般而言，遙測影像大多含有可見光的三個波段（藍、綠、紅）與近紅外波段，有些衛星搭載的感測器含有更多波段，如美國太空總署的 Landsat-7 衛星含有七種波段，包含三種可見光波段、一種近紅外波段、兩種中紅外波段以及熱紅外波段。

由於地物對不同光譜波段的反應曲線各不相同，反映出地物的特性也不盡相同，因此在感測地表地物時若能增加一個光譜波段，對於往後的判釋分析將有許多助益。此外，在多光譜影像中增添熱紅外波段，對於遙測影像的判釋還有額外的優勢，其優勢源於熱紅外波段具有其他波段所沒有的特性，即感測時段不受環境日夜的限制。因為無論是在蒐集可見光、近紅外或是中紅外波段的影像，都是藉由感測地表地物反射太陽光中的能量以成像，所以即便某些衛星在夜間經過感測區上空（如福爾摩沙衛星二號，在一天當中會通過同樣的地區兩次），卻無法在夜間感測，只能利用這段時間傳輸資料，反之，含有熱紅外波段的衛星，在夜間經過感測區上空時也能感測地表。而在夜間所獲取的熱影像，會因為日夜溫差的關係，與同地區在日間所感測到的熱影像有極大的差異，這些差異來自於不同的地物，對熱輻射吸收與放射程度的不同所致，這種溫度上的差異也可以代表地物的特性，進而作為判釋地物的依據。

熱紅外影像除了可以彌補上述遙測影像在夜間的不足外，亦可以連結地表地物與溫度之間的關係，這層關係不僅可以應用在遙感探測的領域，

也能應用在其他更貼近一般大眾的生活當中，例如透過觀察地表溫度的變化，能夠讓人們進一步關心自身周遭的環境。尤其近年來因為全球暖化，全世界對地表溫度的關注也日益提高，熱紅外影像能提供不同時段的地表溫度分佈，對於地區性的短、中、長期監控，可提供有效的資料數據，幫助判釋全球溫度變化的趨勢。然而若是想在多光譜影像中加入熱紅外影像，勢必先瞭解熱紅外影像的幾何品質，以確保熱影像與其他波段影像間的幾何關係一致，避免物點在各個波段影像上的位置不一致，因此在使用熱影像之前，必須事先率定拍攝用的熱像儀。

以往熱紅外影像的取得，因為技術與經濟因素受限，來源大多侷限在僱請熱紅外航空攝影的公司以及衛星熱紅外影像。直到最近，市面上才逐漸出現手持式的面陣列紅外線熱像儀，有別於以往放置在飛機載臺或衛星載臺上的點掃描式熱感測器，面陣列式熱像儀在焦平面上，設置排列規則的多個微型感測器，這些感測器可同時曝光感測，因此能同時增加熱像儀的空間解析度與輻射解析度。使用面陣列感測器的熱像儀，其感測器的配置與一般使用電荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD)的數位相機相似，因此若能從既有的率定方法中，找出適合熱像儀的率定方法，則不但能瞭解紅外熱影像的幾何與輻射特性，日後應用在多光譜影像上時，也可以避免因為幾何扭曲造成判釋上的錯誤，因此本研究以 FLIR-T360 紅外線熱像儀為研究對象，探討熱紅外影像的特性並率定紅外線熱像儀。

二、研究目的

依據上述研究動機，研究目的有以下三點：

- (一) 完成熱像儀的幾何率定，探討熱像儀的幾何特性。
- (二) 探討熱像儀的輻射特性，建立熱像儀的輻射改正模型。
- (三) 探討熱像儀的幾何與輻射之綜合特性。



第二節 研究背景與內容

一、研究背景

紅外線熱像儀可藉由偵測物體輻射出的微弱電磁能量，求得物體的表面溫度；一般而言，任何溫度大於絕對零度的物體，都會向外輻射電磁能量，在這些電磁能量當中，波長 $3\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 的電磁能量被發現其放射量與地表溫度呈現高度相關(Jensen, 2007)。對於這些肉眼不可見的電磁能量，紅外線熱像儀可以感測，並計算物體溫度。傳統熱紅外波段之遙測影像，絕大部份取自於空載或衛載的點掃瞄式感測器，此種感測器通常以垂直於航線之方向，藉由載臺上反射鏡的旋轉，來回掃瞄而蒐集該區域的熱紅外影像，因此這種點掃瞄式感測器必須搭配可穩定行進的載具，如飛機或衛星(Jensen, 2007)。這些載具的費用非一般大眾所能負擔，故以往蒐集熱紅外影像，幾乎都是向特定機構或公司預訂後購買，直到近年來技術上的突破，面陣列熱像儀亦已解除機密等級，並已商業上市(Jensen, 2007)。面陣列感測器讓許多感測元件同時感測一個區域，因此增加每個地面解析元素之感測時間，故可提高熱像儀的輻射解析度，增加熱像儀分辨更細微溫度差異的能力；另一方面也讓熱像儀不必再透過固定載具拍攝，因此各種應用層面的熱像儀產品逐漸推出(FLIR, 2009)，這些熱像儀也不再侷限於高空俯視，而可直接近景拍攝物體。

熱像儀在國內已廣泛地應用在各種領域，如土木(鄭子揚，2005；李人豪，2006；李洲亘，2006；林雅萍，2006)、醫療(楊謹慎，2001；孫丕昌，2003；李進桂，2004)、電機(李線白，1998；李意誠，2003)等，在土木工程的研究中，利用加熱法並使用熱像儀拍攝建物表面，由於當建物結構均勻時，熱量的傳播也會呈現均勻的擴散，因此當熱影像上的熱量分佈不均時，很有可能是建材內部出現龜裂或變形的徵兆(鄭子揚，2005)。在醫療領域中利用類似的原理，正常的人體透過血液循環，在溫度上會有固定的

分佈模式，當利用熱像儀拍攝到人體的溫度出現異常時，通常也代表人體中的某些器官出現異常。在電機工程領域中，則有研究利用熱影像偵測電力設備是否異常，由於電子設備的故障大部分都有一段潛伏期，藉由偵測熱點可以檢測分析出故障發生的位置與成因(李意誠，2003)，同樣是藉由監控溫度是否異常之原理。

在上述的研究中，熱像儀所拍攝的紅外熱影像多數是直接使用在判釋結果與數值分析上，例如比較不同物體的溫度差異，或是比較物體在不同時間的溫度變化，並分析溫度變化的原因等，目前研究中較少述及面陣列熱像儀所取得影像之特性與其率定方面之探討，因此本研究將探討熱像儀的影像特性，藉由率定熱像儀以瞭解熱影像在幾何以及輻射方面的特性。



二、研究內容

面陣列熱像儀取像方式類似相機，惟其成像與一般相機取得之可見光影像相異甚大，研究內容可分為幾何、輻射二方面來探討。

以幾何方面而言，傳統點掃描之熱影像常呈現一維高差位移、扭曲(潘國樑，2006)等變形；一般相機攝取之可見光影像則有因相機內方位引致之變形，如透鏡畸變差、焦面平坦度等，此外，可見光影像另有因相機外方位引致之變形，如傾斜位移、二維高差位移等。因為面陣列熱像儀取像方式與一般相機類似，故在幾何方面，理應同樣具有上述因儀器內、外方位引致之變形，其中因相機內方位所導致的變形，在應用熱影像前應先行校正。

以輻射方面而言，熱影像與一般可見光影像具有下列特性之差異：

- 一、可見光影像紀錄為景物之反射電磁能量，為人眼所熟悉；熱像紀錄則為溫度區間、最小溫差等資訊，無法以傳統目視印象判釋。
- 二、熱影像上出現之熱影，與一般可見光影像上之陰影截然不同。
- 三、對相同之地物，熱像儀於日、夜間蒐集之影像亦因景物本身之熱容量而有不同之呈現。
- 四、傳統空載或衛載蒐集之熱影像為自高空向地面掃描，熱影效應不易顯見，若利用面陣列熱像儀於地面蒐集近景熱影像，熱影常因緊鄰地物之地表材質而呈現不相同之效應。

如上所述，若應用熱影像，尤其是面陣列感測器蒐集之熱影像，應深入探討其幾何與輻射成像之特性。本研究因此以此為首要目的，以實驗方式設計面陣列熱像儀在幾何與輻射兩方面之率定，藉此確定熱影像中物體的位置對應實體物件在空間中的位置，且設法瞭解熱影像上顯示的溫度是否真實反映物體的表面溫度，另探討相關之熱影效應，與不同時段熱像之呈現。

第三節 研究方法與流程

一、研究方法

傳統框幅式相機率定的方法有：1.實驗室法(Laboratory Methods)：由廠商或研究機構為之，利用較精密的瞄準儀等設備完成。2.實地率定法(Field Methods)：佈置已知精確相對位置的目標，拍攝目標後精密量測出目標影像上坐標，並與假設相機在理想狀態時目標的坐標互相比較，求得內方位元素。3.星體率定法(Stellar Methods)：類似實地率定法，但攝影目標改為可精確預知位置的星體，藉由比較影像上星體坐標與預知星體坐標，以求得內方位元素。

本研究採用之面陣列熱像儀，初步檢視其夜間、日出後成像(如圖 1-1、圖 1-2 所示)，並與同地之可見光影像(如圖 1-3 所示)比較，決定採取類似一般數位相機之實地率定法，探測熱像儀的幾何變形與及輻射變形；在幾何變形方面，則使用熱像儀對已知相對位置的目標拍攝，再比較其理想坐標與影像上坐標，以求取熱像儀的內方位參數；在輻射變形方面，則透過同步測量影像上物體表面溫度的方式，統計所有觀測資料後，列出熱像儀對不同位置溫度的偏差幅度，並將之繪製成圖。

幾何率定的重點在於將一般相機率定方式轉換用來率定熱像儀，普通用來率定相機所使用的目標有如圖 1-4 所示，為一幅規則分佈的點圖，在不同位置拍攝這幅點陣圖，可由程式解出內方位參數；然而在幾何率定熱像儀時，並無法直接使用此圖，因為熱影像所感測的是物體之表面溫度，在一般溫度環境下，即使拍攝該點陣圖，由於整張圖幅處於相同溫度條件，因此率定圖在熱影像中無法分辨各點位置，程式也無法解算其內方位元素。為了讓圖中控制點在熱影像中也能被凸顯，必須讓圖中控制點部份與其他區域在溫度呈現上有顯著差異，本研究因此將選用加熱的方式，藉由不同顏色對熱的吸收速率不同，令控制點與其他區域產生溫度的對比差

異，進而使熱像儀能拍攝出類似圖 1-4 的點圖。若能成功拍攝出該圖，則能從幾何率定的結果中，求得熱像儀的內方位參數。透過內方位參數，即可得知熱像儀在幾何方面的變形程度，同時也可以藉由所求出之參數，改正所拍攝的熱影像。



圖 1-1 面陣列熱像儀蒐集之夜間影像

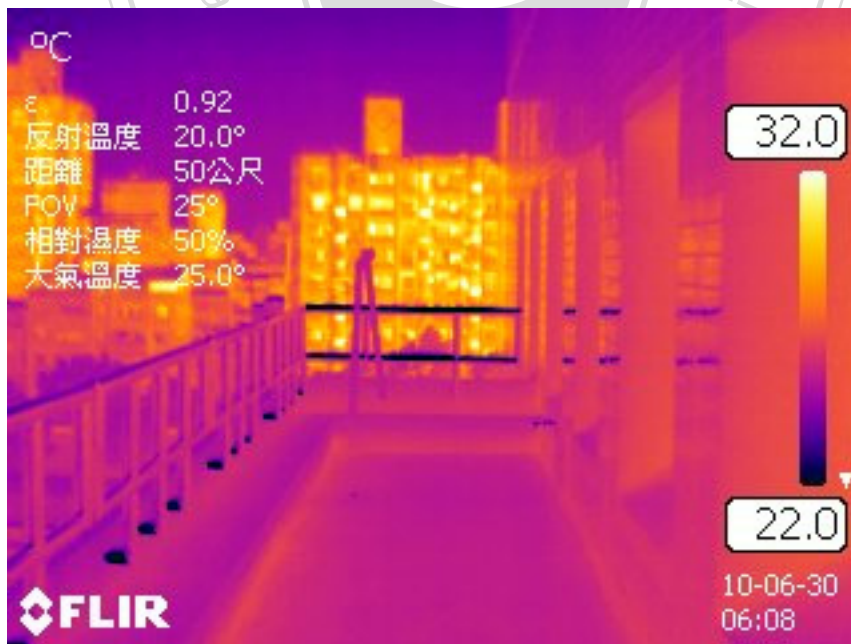


圖 1-2 面陣列熱像儀蒐集之日出後影像



圖 1-3 數位相機攝取之可見光影像

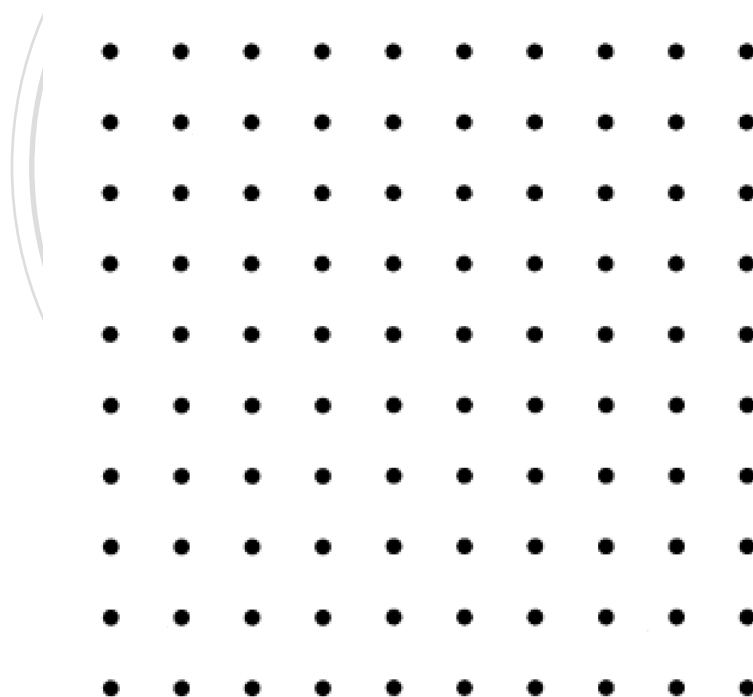


圖 1-4 傳統數位相機率定用拍攝目標

輻射率定的方法著重在實地調查(In Situ)，藉由比較熱像儀顯示之物體溫度與實際測量所得之溫度，另分別實驗物體的取像距離與在影像中位置對於溫差的分布是否一致。為了確定溫差來自於上述原因的影響，在實

驗過程中，待測物體(溫度控制點)的表面溫度儘可能保持固定，因此除了尋找溫度不易變化的材質作為溫度控制點之外，另額外供給穩定的熱源使其不受週遭環境之影響。對不同距離位置的溫度改正確立後，則可模式化輻射改正的參數，建立一個適用於熱像儀的輻射修正公式，實驗最後測試公式可否套用在大多數的情況，另評估此公式的精度。



二、研究流程

本研究之流程如圖 1-5 所示：

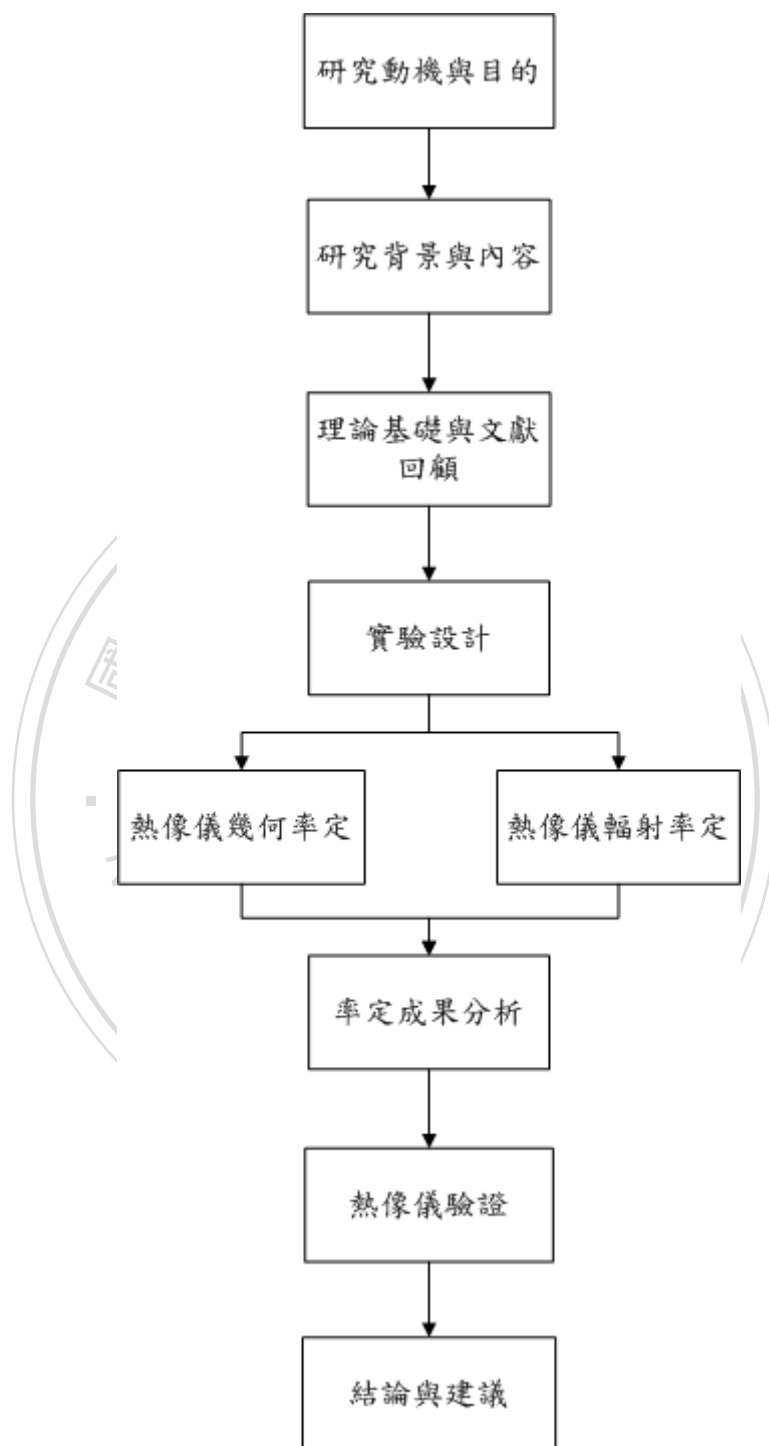


圖 1-5 研究流程圖

第四節 章節架構

本文的章節架構如下：

- 一、第一章為緒論，首先描述研究動機與研究目的，次說明研究背景與內容，並說明研究方法、流程與章節架構。
- 二、第二章為理論基礎與文獻回顧，說明關於紅外線相關理論、熱影像相關理論、熱像儀幾何方面以及輻射方面率定的相關理論，並列出相關文獻，以為後續實驗與分析的基礎。
- 三、第三章為熱像儀幾何率定與實驗流程，包含實驗使用的儀器、幾何率定方法以及流程等說明，另包含幾何率定結果與熱影像之幾何改正。
- 四、第四章為熱像儀輻射率定與實驗流程，說明熱像儀在輻射方面率定的方法與流程，並展示輻射率定成果和熱影像在輻射方面之驗證。
- 五、第五章為熱影像的綜合特性探討，包含高差位移，熱影以及放射率等。
- 六、第六章為結論與建議，藉由前述實驗結果說明面陣列熱影像的特性，並提供建議作為後續研究的參考。

第二章 理論基礎與文獻回顧

本研究的主要內容為熱像儀的幾何率定以及輻射率定，因此本章介紹紅外線熱像儀的相關理論，以及熱像儀在幾何率定與輻射率定所涉及的相關理論，同時蒐集並列出相關的文獻回顧。

第一節 紅外線相關理論

物理學家在十七世紀發現一般的光線包含多種顏色的光，透過三稜鏡可將光線折射分解為紅、橙、黃、綠、青、藍、紫等色光。其後藉由實驗，天文學家赫胥爾(F. W. Herschel)發現在人體眼睛所能辨識的光線外，也存在其他的光線，因此命名比紫色光波長較短的光線為紫外線；而比紅色光波長較長的光線，則命名為紅外線。紅外線屬於電磁波的一種，其波長約在 $0.75\mu\text{m}$ ~ $1000\mu\text{m}$ 之間，介於一般可見光(Visible Light)與微波(Microwave)之間，紅外線本身則根據領域與用途的不同而細分為近紅外、中紅外、遠紅外等各種波段。在遙感探測的領域，一般將波長 $0.75\mu\text{m}$ ~ $1.3\mu\text{m}$ 的電磁波稱為近紅外線(Near Infrared)；將波長 $1.3\mu\text{m}$ ~ $3\mu\text{m}$ 的電磁波稱為中紅外線(Middle Infrared)；將波長 $3\mu\text{m}$ ~ $14\mu\text{m}$ 的電磁波稱為遠紅外線(Far Infrared)或熱紅外線(Thermal Infrared)，其中波長 $3\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ 波段常用來監控高溫現象，例如森林火災或是火山活動；而波長 $8\mu\text{m}$ ~ $14\mu\text{m}$ 波段則常用來感測地表地物如植被、水體、岩石等(Jensen, 2007)。

當紅外線在大氣中行進時，如同其他波長的電磁波一樣，會受到大氣分子的影響，部份波段的紅外線會在大氣傳播的過程中，完全被吸收殆盡。對熱紅外線而言，大氣中主要會吸收輻射的成份為：水蒸氣(H_2O)、二氧化碳(CO_2)以及臭氧(O_3)，不同成份的氣體對電磁波的吸收率隨著波長而異，因此部份紅外線在大氣中幾乎完全無法傳播，形成有如對部份波段開啟，即大氣窗(Atmosphere Windows)，部份波段關閉的窗口，如圖 2-1 所示。

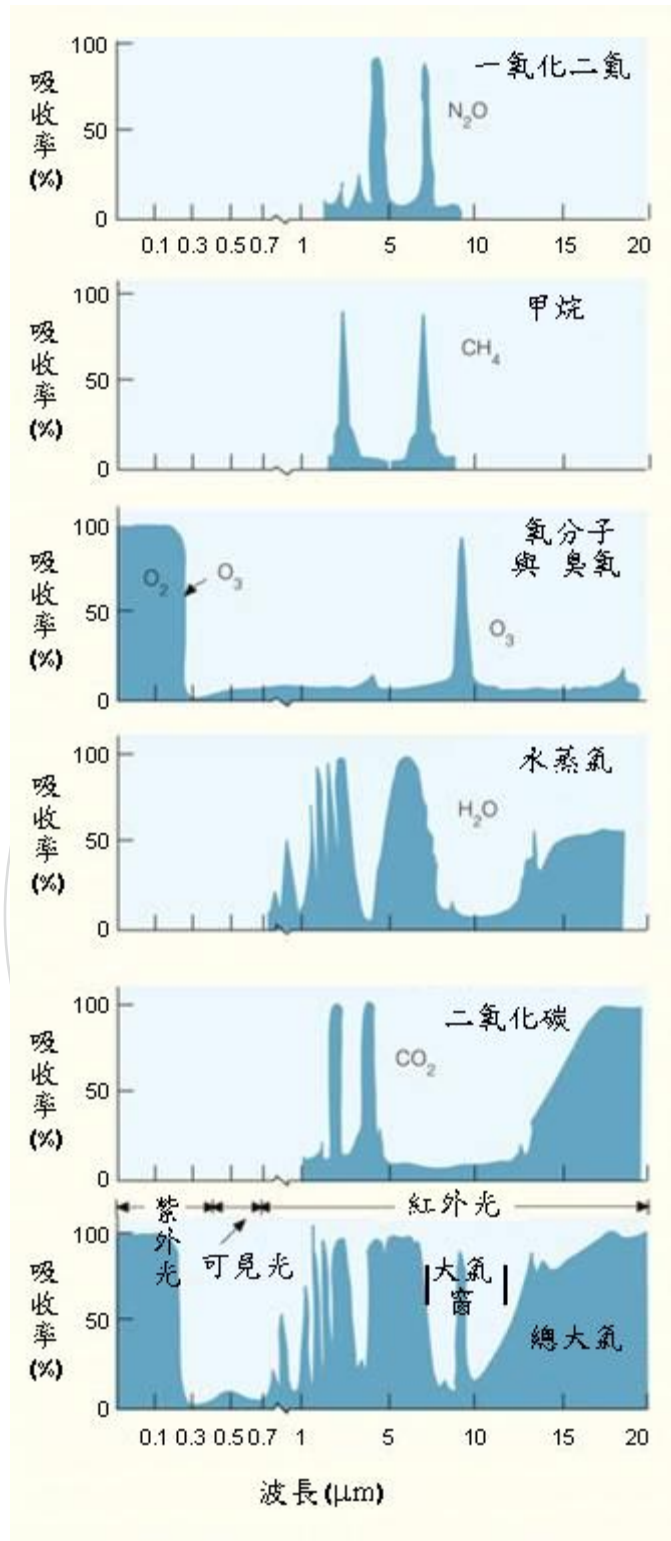


圖 2-1 不同電磁光譜的大氣窗(Atkins, 2010)

圖中依序為大氣中較常見的成份對電磁光譜的大氣窗示意圖，最底部為總和大氣窗示意圖，各示意圖內較深色部份代表大氣對光譜的吸收率，

縱軸為吸收百分比，百分比越高代表吸收程度越大；橫軸為電磁光譜波長，涵蓋範圍包括 0.4 μm ~0.7 μm 的可見光、0.7 μm 以上的紅外線(IR)以及 0.4 μm 以下的紫外線(UV)。從圖中可以發現，熱紅外波段受到大氣吸收的程度明顯比可見光劇烈，部份波段無法穿透大氣層，如 9 μm ~10 μm 幾乎全為臭氧所吸收；也因此，使用衛星載具的熱紅外感測器在設計上，會刻意避開這些波段(Jensen, 2007)，然而不經過臭氧層的感測器，如使用航空載具的感測器，或一般手持式熱像儀，受大氣吸收的影響則相對較小。

一、黑體輻射

電磁波輻射至物體時，物體表面會產生三種反應，即反射、透射與吸收。假如物體的質量保持不變且輻射的波長不變，則該電磁波入射後的反射、透射、吸收量的總和應等於入射量，也就是反射率(γ)、透射率(τ)與吸收率(α)總和應等於 1：(Jensen, 2007)

$$\gamma + \alpha + \tau = 1 \quad (1)$$

假如吸收率 $\alpha = 1$ ， $\gamma + \tau = 0$ ，則該物體稱為完全黑體；假如透射率 $\tau = 1$ ， $\alpha + \gamma = 0$ ，則該物體稱為絕對透明體；假如反射率 $\gamma = 1$ ， $\alpha + \tau = 0$ ，且為鏡面反射，則該物體稱為理想鏡體；若為漫反射，則稱為完全白體(劉華嶽, 2009)。

無論溫度高低與入射的電磁波波長為何，完全黑體會吸收所有入射的輻射能量。若是物體對任意波長的電磁波保持固定的吸收率，且吸收率介於 1 與 0 之間，則稱為灰體(Graybody)。然而自然界中幾乎不存在完全黑體，大多數的物體通常擁有獨特的吸收率曲線，根據入射電磁波的波長改變而起伏，這種物體則稱為選擇體(Selective Radiator)。

二、普朗克定律

普朗克定律(Planck's Law)描述黑體在任意溫度下，輻射各種波長的電磁波其輻射強度：

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1} \quad (2)$$

式中 M_{λ} 為輻射強度，單位為 $\text{W}/\text{cm}^2\mu\text{m}$ (W 為瓦特，國際單位制的功率單位，等同於1焦耳/秒)； c_1 為第一輻射常數，其值為 $3.7418 \times 10^4 (\text{W}/\text{cm}^2\mu\text{m})$ ； c_2 為第二輻射常數，其值為 $1.4388 \times 10^4 (\text{W}/\text{cm}^2\mu\text{m})$ ； λ 為黑體輻射之波長，單位為 μm ； T 為黑體之絕對溫度，單位為 $^{\circ}\text{K}$ ； e 為自然對數。

三、斯提凡波茲曼定律

若將普朗克定律中各個溫度的輻射能量函數對輻射波的所有波長積分，可得到黑體在單位時間內輻射的總能量，斯提凡波茲曼定律(Stefan-Boltzmann Law)描述黑體所放射出的總能量與其溫度的四次方成正比，其數學示為：

$$M_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

式中 M_b 為黑體在單位時間輻射的總能量； σ 為斯提凡波茲曼常數，其值為 $5.6697 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ； T 為絕對溫度，單位為 $^{\circ}\text{K}$ 。斯提凡波茲曼定律證實黑體的溫度越高，則其輻射出的總能量就越多，如圖 2-2 所示。

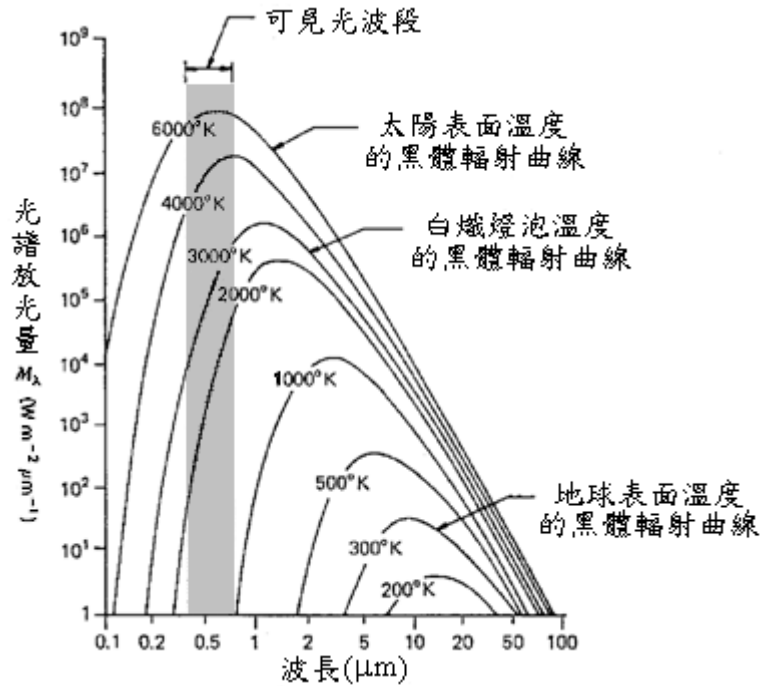


圖 2-2 不同溫度下的黑體輻射曲線圖(Lillesand et al., 2008)

圖 2-2 中，各個曲線代表不同溫度下黑體輻射出的能量曲線。黑體的溫度越高，曲線與橫軸所涵蓋的總面積就越大，代表黑體所輻射出所有波長的總能量就越大。另外從圖中也可以發現，當黑體的溫度越高，其所輻射出能量的頂峰波長也不相同，這個位在頂峰位置的波長稱為黑體輻射的主要波長(Dominant Wavelength)，而至於輻射出能量當中的主要波長為何，則需要利用維恩位移定律來計算，如次節所述。

四、維恩位移定律

維恩位移定律(Wien's Displacement Law)描述黑體輻射的電磁能量當中，位於波峰位置的主要波長為何，其數學表示為：

$$\lambda_{\max} = \frac{k}{T} \quad (4)$$

式中 λ_{\max} 表示黑體輻射中的主要波長；k 為常數，其值約為 $2898 \mu\text{m}^\circ\text{K}$ ；T 為絕對溫度，單位為 $^\circ\text{K}$ 。維恩位移定律顯示在能量分佈圖中，黑體放射出最強的輻射能量波長與絕對溫度成反比，溫度越高的物體，所放射出的主要輻射波波長越短；溫度越低，所放射出的波長越長。因此若將太陽表

面溫度以 6000°K 計算，所輻射出的最強輻射能量波長約為 $0.498\ \mu\text{m}$ ，位在可見光波段中，而若以地球的平均溫度 300°K 計算，地表物體放射出的最強輻射能量波長大約為 $9.66\ \mu\text{m}$ ，位在熱紅外波段中(Jensen, 2005)。因為這個緣故，使得遙感探測主要使用波長 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的熱紅外波段作為探測地表物體溫度的指標。



第二節 紅外線熱影像相關理論

任何物體溫度大於絕對零度(0°K)者，其分子間的振動將使物體輻射出電磁能量，物體的溫度越高，其分子間的振動越劇烈，其所輻射出的主要能量頻率就越高，意即波長就越短。對於地表而言，地物輻射出能量的主要波長位在熱紅外波段，若要將這些能代表地表物體溫度的電磁能量，以影像的方式呈現，則必須使用紅外線熱像儀。紅外線熱像儀可粗淺分類為：(1)使用點掃描式感測器，與(2)使用線陣列或面陣列感測器。

早期的熱像儀大多採用點掃描式感測器，至今仍然有部份載具使用這種掃描系統，點掃描式感測器使用單個感測元件搭配一組反射鏡，在掃描時藉由反覆旋轉反射鏡，改變感測器對地面掃描的位置，配合載具本身的移動，一列接一列地掃描，並紀錄地表輻射能量。點掃描式感測器在地表上掃描到的區域直徑可以藉由感測器本身的瞬間視場角(Instantaneous Field of View, IFOV)以及其與地表的距離來計算：

$$D = H \times \beta \quad (5)$$

式中 D 為感測器掃描區域的直徑；H 為感測器本身與地表的距離； β 為感測器的瞬間視場角。若將 H 視為載具的海拔高度，則計算所得之 D 則為感測器地底點(Nadir)位置的直徑。而當感測器的瞬間視場角逐漸遠離地底點時，感測器的地面解析像元(Ground Resolution Cell)也會從圓形逐漸變為橢圓形，假如瞬間視場角偏離地底點的角度為 ϕ ，則地面解析像元會依照沿航線方向與垂直航線方向分別改變，因為感測器與地表的距離變為：

$$H_{\phi} = H \cdot \sec \phi \quad (6)$$

因此沿航線方向的地面解析像元長度變為：

$$D_{\phi} = (H \cdot \sec \phi) \cdot \beta \quad (7)$$

而垂直航線方線的地面解析像元長度變為：

$$D_{\phi} = (H \cdot \sec^2 \phi) \cdot \beta \quad (8)$$

越偏離地底點的位置，在掃瞄時受到此變量影響的程度越大，因此在使用點掃瞄式紅外線熱影像時，會盡量避免使用影像邊緣的資料，作為量化分析的對象(Lillesand et al., 2008)。

以往遙感探測鮮少使用電荷耦合元件作為中紅外線與熱紅外線的感測元件，大多使用前述所提之單個感測器搭配掃瞄鏡來蒐集影像，直到近年來的突破，線陣列與面陣列感測器才逐漸成為主流。相較於傳統點掃瞄式的熱紅外感測器，線陣列與面陣列感測器擁有的優點(FLIR, 2009)：

- (1)使用的固態微電子感測器比以往的感測器更小更輕，也更節省電力。
- (2)陣列中的多個感測器，能在感測時比點感測器擁有更多的駐留時間(Dwell Time)，提高每個感測器平均接收到的能量，從而提高輻射解析度。
- (3)面陣列感測器之間的位置彼此互相約制，相對於橫掃式的感測系統，大幅改善面陣列熱影像的影像幾何。
- (4)以往所有熱像儀都需要冷卻系統，確保感測器所接收的輻射能量來自感測物體而非儀器本身。過去的感測器使用壓縮氬氣或液態氮來冷卻儀器，而現在手持式面陣列熱像儀使用非制冷型感測器，已無以往因為考量冷卻所產生的其他問題。

除了上述的優點外，各方面技術的進步已經使得面陣列式熱像儀更加普及，且由於熱紅外影像的應用領域在近幾年擴展得十分快速，為了方便讓各個領域的使用者皆能迅速上手，在熱像儀的操作上設計得與一般數位相機幾無二致，影像的儲存格式也多使用一般常見的 JPEG 檔案交換格式(JPEG File Interchange Format, JFIF)。然而熱紅外影像的幾何特性是否與一般數位影像相同，以及是否具有可見光影像所沒有的特性，仍值得探討。

第三節 熱像儀幾何相關理論

面陣列熱像儀在取像原理上與傳統框幅式相機(Frame Camera)相似，兩者取像，皆為一次曝光擷取整張影像，讓焦面(Focal Plane)的感光元件在短暫的曝光時間中感測完畢。差異僅在於面陣列熱像儀在焦面上，設置陣列式的電荷耦合元件感測器，而非傳統框幅式相機的底片，因此在探討熱像儀的幾何特性上，可以參考框幅式相機的幾何特性以及率定方法。

一、量度型相機

相機有量度型相機(Metric Camera)與非量度型相機(Non-Metric Camera)之分，量度型相機是專門設計作攝影測量之用，因此結構特殊，精密度也比一般相機高得多。由於量度型相機的用途為攝影測量，所以相機規格以及率定的要求自然也較嚴格，一般量度型相機的率定都在實驗室中進行，因此稱為實驗室法(Laboratory Method)。實驗室法使用高精度的相機率定器(Camera Calibrator)與 xy 坐標儀(xy Comparator)來率定量度型相機，率定器包含多瞄準儀率定器(Multicollimator Calibrator)與測角儀(Goniometer)等高價儀器，這項工作大多由製造廠商或政府機關進行，一般機關與民眾難以使用此方法(Wolf and Dewitt, 2000)。

二、非量度型相機

非量度型相機主要功能為拍攝判讀用影像，也可用作精度要求較差的量測，一般使用不同品質的手持相機與數位相機都屬於非量度型相機，熱像儀亦屬於非量度型相機。通常非量度型相機的透鏡畸變差會比量度型相機大，因此在應用前都需要經過幾何率定。理論及實驗上已證明，非量度性影像若經過適當的率定，仍然可以得到相當高的相對精度(Wolf and Dewitt, 2000)。熱像儀的幾何率定即是率定熱像儀的內方位參數，包含：
(1)焦距：透鏡與感測器之間的距離。(2)輻射與正切畸變差：因透鏡曲面不

均勻引起的光線偏移量，分對稱與不對稱兩種。(3)像主點位置：相機光軸中心與焦面交會點，理想上應位於電荷耦合元件中心，但實際上可能存在一偏移量。

一般非量度型相機率定內方位參數使用下列兩種方法：實地率定法或自率光束法(Wolf and Dewitt, 2000)。實地率定法利用拍攝空間中實地佈設，且已知相對位置的控制點，使用附加參數的共線式條件解算相機的內方位參數。自率光束法利用重疊影像間互相約制的原理，以多張重疊影像量測分佈均勻的多重點，利用共線條件式同時求解內、外方位參數以及物空間坐標。在這兩種方法中，本研究決定採用實地率定法作為幾何率定之方法，利用佈設已知控制點坐標的率定模板，再藉由率定軟體求得熱像儀之內方位參數，以瞭解熱影像的幾何特性。



第四節 熱像儀輻射相關理論

相對於上一節的幾何特性，面陣列熱像儀的輻射特性與傳統的框幅式相機以及數位相機不同，框幅式相機與數位相機所採用的波段是一般的可見光，所涵蓋的範圍介於 $0.4\mu\text{m}\sim 0.7\mu\text{m}$ 之間，面陣列熱像儀所感測的波段是熱紅外波段，涵蓋的波長介於 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 之間，因此在熱像儀的輻射率定上，參考過去所使用過的感測器與其輻射率定方法。

一、熱像儀輻射率定

早期的熱像儀大多設置在航空載臺或衛星載臺上，較為人所知的衛星載臺如美國太空總署所發射 Landsat-3 衛星上搭載的多光譜掃描儀 (Multispectral Scanner, MSS) 第八波段 ($10.4\mu\text{m}\sim 12.6\mu\text{m}$)；Landsat-4、Landsat-5 衛星上搭載的主題製圖儀 (Thematic Mapper, TM)，其第六波段 ($10.4\mu\text{m}\sim 12.5\mu\text{m}$)；Landsat-7 衛星上搭載的強化主題製圖儀 (Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+) 的第六波段 ($10.4\mu\text{m}\sim 12.5\mu\text{m}$) 都涵蓋熱紅外波段。另外由美國與日本共同研發的 Terra-ASTER 衛星中的第十到第十四波段 (10： $8.125\mu\text{m}\sim 8.475\mu\text{m}$ ；11： $8.475\mu\text{m}\sim 8.825\mu\text{m}$ ；12： $8.925\mu\text{m}\sim 9.275\mu\text{m}$ ；13： $10.25\mu\text{m}\sim 10.95\mu\text{m}$ ；14： $10.95\mu\text{m}\sim 11.65\mu\text{m}$) 同樣也涵蓋熱紅外波段 (Jensen, 2007)，整理如表 2-1 所示。

表 2-1 涵蓋熱紅外波段之感測器與載臺

感測器	搭載衛星	波段範圍
Multispectral Scanner, MSS	Landsat-3	第八波段 (10.4 μm ~12.6 μm)
Thematic Mapper, TM	Landsat-4、Landsat-5	第六波段 (10.4 μm ~12.5 μm)
Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+	Landsat-7	第六波段 (10.4 μm ~12.5 μm)
TIR Subsystem	Terra-ASTER	第十到第十四波段 (10 : 8.125 μm ~8.475 μm ; 11 : 8.475 μm ~8.825 μm ; 12 : 8.925 μm ~9.275 μm ; 13 : 10.25 μm ~10.95 μm ; 14 : 10.95 μm ~11.65 μm)

在衛星載臺上的感測器，其輻射率定的方法分為在地面上進行的實驗室法以及在載臺上進行的載臺法(On-board Method)，載臺法又細分為使用陽光反射波段來率定的陽光法與使用燈光率定的燈光法。陽光法與燈光法的差異僅在於率定的光源不同，陽光法使用陽光作為輻射源，而燈光法使用鎢絲燈泡作為輻射源。在使用這兩種方法時，會搭配一個附有濾波鏡(Filter)的快門輪，當快門輪旋轉時可以提供不同程度的輻射量，藉以輻射率定載臺上的感測器。使用載臺法的優點是極高的時間解析度，在每次取像甚至每次掃描，即進行一次輻射率定。然而因為在載臺飛行期間的率定都是根據實驗室法的成果作基礎，所以載臺法的率定成果必無法優於實驗室法，此外感測器也可能因為漫長的飛行時間造成精度衰退的現象，而這種因為時間衰退的精度，也難以用其他率定方法求得(Thome, 2001)。

其後的研究提出許多方法來克服絕對輻射率定的問題，所提出的方法大致上分為使用實地調查的方法(Hovis et al., 1985)，與不使用實地調查的方法(Kaufman and Holben, 1993)、(Vermote et al., 1992)。整理各種方法後發現，不使用實地調查的方法雖然擁有高時間解析度，能夠不受制於時間與地點的選擇，但是精度上仍然存在很大的不確定性，若是在精度要求較高的情況，仍須使用實地調查法(Thome, 2001)。

反射法(Reflectance-based Approach)是實地調查法的一種，其方法是在地表選取一塊足夠大的測站，在測站四周圍出數塊網格形的取樣區，取樣區的大小設計成與所要率定感測器的地面解析像元一致。在率定時使用光譜儀(Spectrometer)在取樣區各處實地蒐集地表的輻射量，取各處的輻射量平均值，作為這塊取樣區的光譜反射值，再比對衛星影像中該取樣區的輻射資料與反射值，以實地調查所蒐集的資料作為輻射率定的參照(Thome, 2001)。

雖然可見光波段的輻射源幾乎完全來自太陽光的反射，而熱紅外波段除了反射外，還包含物體本身輻射出的電磁波，但是由於使用實地調查法的精度普遍優於不使用實地調查法，若能在實驗中排除出自反射的熱紅外線，則能確實反映物體的溫度，在此種條件下，使用實地調查法仍然是個值得作為輻射率定熱像儀的方法。因此本研究採取類似反射法的方式，藉由比對熱像儀感測到之輻射資料與實地調查得到的量測資料，將較精準的量測資料作為輻射率定的參照，建立熱像儀之輻射改正模型，透過此改正模型，在往後感測相同物體時，以此模型消除系統誤差，提高輻射精度。

二、熱影

與上述黑體輻射理論類似，所有電磁能量遵守輻射平衡等式(Radiant Budget Equation)，即入射輻射通量等於反射通量加上吸收通量再加上透射通量，數學式表示為：

$$\Phi_{i\lambda} = \Phi_{\gamma\lambda} + \Phi_{\alpha\lambda} + \Phi_{\tau\lambda} \quad (9)$$

式中，對特定的波長(λ)而言， $\Phi_{i\lambda}$ 為入射輻射通量、 $\Phi_{\gamma\lambda}$ 為反射通量、 $\Phi_{\alpha\lambda}$ 為吸收通量、 $\Phi_{\tau\lambda}$ 為透射通量，若將式(9)同除以入射輻射通量 $\Phi_{i\lambda}$ 可得：

$$1 = \gamma_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} \quad (10)$$

式中 γ_{λ} 為光譜反射率， α_{λ} 為光譜吸收率， τ_{λ} 為光譜透射率，說明輻射能量可以改變形式，但總能量會保持固定，遵守能量守恆定律。

除了輻射平衡等式外，由於現實世界的物體大多為選擇體，選擇體與黑體之間的差異，通常使用放射率 ϵ 表示，放射率即代表物體輻射能量與同溫度下黑體輻射能量的比值，一般物體的放射率介於0與1之間，但都小於1。物理學家克希荷夫(Kirchoff)發現對於熱紅外波段，物體的放射率幾乎等同於其吸收率，即 $\alpha_{\lambda} = \epsilon_{\lambda}$ ，此外，在真實世界中，對熱紅外波段而言，幾乎沒有物質是可傳導的，如圖 2-3 所示。

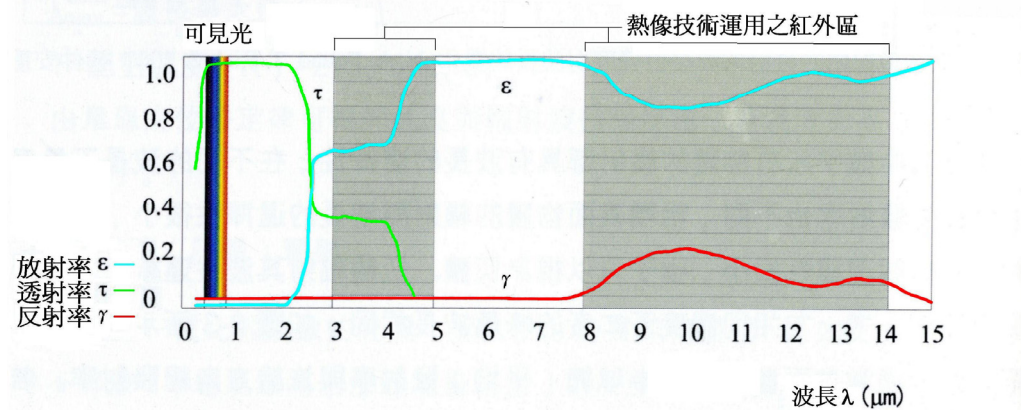


圖 2-3 不同波長的放射、透射與反射率(劉華嶽，2009)

因此對於熱紅外波段，可以將透射率視為零($\tau_\lambda=0$)，且將放射率視為等於吸收率($\alpha_\lambda=\varepsilon_\lambda$)而得到下式：

$$1 = \gamma_\lambda + \varepsilon_\lambda \quad (11)$$

此式說明對於熱紅外波段來說，反射率與放射率之和為定值，放射率越大的物體反射率越小；相反的，放射率越小的物體反射率越大，也就是熱紅外光譜能量的良好反射體(Jensen, 2007)。

由於熱紅外波段具有上述性質，因此在拍攝熱紅外影像時，因為拍攝物體周遭材質的放射率不同，而出現不同程度的熱影，如圖 2-4 所示。

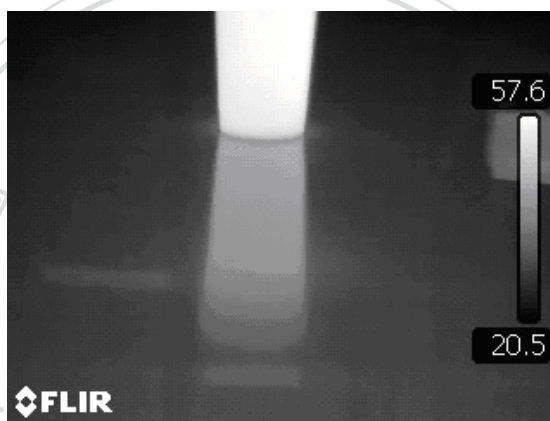


圖 2-4 熱紅外影像中的熱影

圖中上方亮度值較高處為一熱源，而在影像中與熱源形狀一致但上下顛倒的為熱源的熱影，熱影的出現是因為位於其前側放射率小的物質，又為熱紅外波段的良好反射體，在拍攝時，反射了熱源的熱紅外能量至熱像儀，而在影像中呈現出物體的鏡像。一般而言，反射體的放射率越小，影像上所呈現的熱影輪廓越清晰、所反映的溫度也越接近熱源本身，而實驗數據顯示：在拍攝時，熱像儀拍攝的俯角也會影響影像上熱影的明亮度，但使用不同材質作為反射體時，這種隨著俯角不同而改變的反射曲線不一定類似(Huang, 2009)。

熱影的出現表示熱紅外能量是經過反射後被熱像儀所紀錄，並不完整表示反射體當時的表面溫度，因此在輻射率定熱像儀的過程中，應盡量避

免拍攝到熱影，以免熱影之干擾，降低輻射率定精度。



第三章 熱像儀幾何率定

經由上一章之文獻整理，本研究決定藉由率定熱像儀來探討熱影像的幾何特性與輻射特性。在幾何率定的部份，採用實地率定法，透過拍攝實地佈設，已知相對坐標的控制點，使用附加參數的共線條件式解算相機的內方位參數。藉由所解算之內方位參數，探討熱像儀本身對熱影像造成的幾何變形程度。

第一節 實驗儀器

本研究使用之熱影像採用 FLIR 公司的 T360 熱像儀作為取像儀器，FLIR-T360 儀器的外觀如圖 3-1。



圖 3-1 FLIR-T360 紅外線熱像儀

FLIR-T360 紅外線熱像儀內部的面陣列熱紅外感測器含有 320×240 個感測元件。儀器內部另有一部解析度為 1280×1024 像元的數位相機，在拍攝熱紅外影像時，可同時蒐集相同地區的可見光影像。FLIR-T360 的視場角為 $25^\circ \times 19^\circ$ ，光譜解析度涵蓋 $7.5 \mu\text{m} \sim 13.0 \mu\text{m}$ ，一般模式下，溫

度的感測範圍介於零下 20°C 與 120°C 之間，精度範圍為±2°C 或溫度讀數的±2%之內，兩者取其較高值。詳細的產品規格可參考表 3-1。

表 3-1 FLIR-T360 紅外線熱像儀產品規格(FLIR, 2009)

視場角	25°×19°
最小焦距	0.4 m
熱靈敏度	0.06°C
感測器類型	焦面陣列
紅外線空間解析度	320 × 240
光譜解析度	7.5 到 13.0 μm
影像縮放大小	1 至 4 倍
調焦模式	自動/手動調焦
瞬間視場角	1.36 mRad
拍攝模式	熱紅外/可見光/融合影像
可見光數位相機空間解析度	1280 × 1024
涵蓋溫度範圍	-20°C 到 120°C/0°C 到 350°C
精度	±2°C 或讀數的±2%取較高值
顯示模式	黑白(黑熱、白熱)/彩色/鐵
儲存模式	JPEG 影像檔(可同步儲存可見光與熱紅外)
電池種類	可充電式鋰電池
電池運作時間	4 小時
重量	0.88 kg
體積	106 × 201 × 125 mm

第二節 熱像儀幾何率定流程

幾何率定的部份，本研究使用實地率定法，並參考以往率定框幅式相機，以及目前率定一般數位相機的步驟。實地率定法通常在實地佈設坐標已知且明顯的控制點，這些控制點通常位於規律點、線、面之圖形中，這些規律的圖形除便於計算控制點坐標外，亦方便使用者在所拍攝之影像上，找到這些控制點。其後一些影像處理軟體也針對這項特性，設計了特殊的率定模板，如 PhotoModeler，使用者只需要拍攝數張率定模板影像，就能透過其軟體計算求得相機的內方位參數，這些率定模板的外觀如圖 3-2。

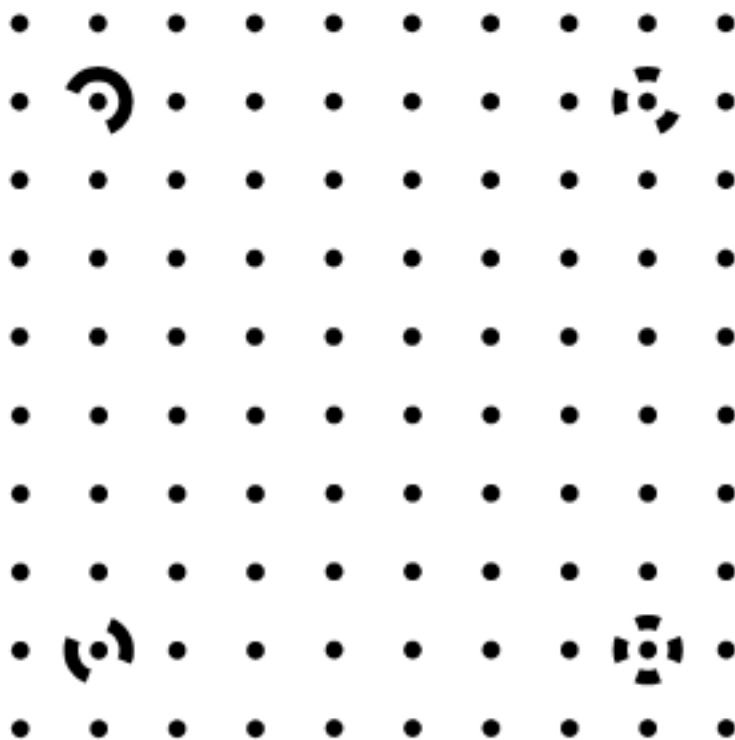


圖 3-2 幾何率定模板範例

圖中各個點的相對位置為已知，因此軟體中的程式可以藉由共線條件式求解相機的內方位參數，當相片的數量大於需求個數時，則會有多餘觀

測量列入平差計算中。

因為幾何特性相似，熱像儀的幾何率定方法與上述率定一般數位相機的方法類似，然而直接使用熱像儀拍攝率定模板的方式，實際測試過後，發現並不可行。由於整個率定模板使用的是同一種材質，因此在一般環境下，整個模板會處在相同的溫度條件，結果就是：紅外線熱影像無法呈現類似圖 3-2 之控制點，而如圖 3-3 所示，無法辨識控制點，亦即無法求解熱像儀的內方位參數。



圖 3-3 一般環境下拍攝率定模板之熱影像

為解決如此問題，必須使率定模板上的控制點與其背景有所區隔，又保持各個控制點間的相對位置不變，達到這些條件的方法即是在率定模板旁提供熱源，使模板上不同放射率之材質，放射相異之溫度。透過熱像儀本身的黑熱模式(溫度較高者顯示為黑色)，可讓控制點在熱影像上顯示為黑點。但若光僅提供熱源，在實際率定時仍然會遭遇到困難，圖 3-4 即為一例，在使用不均勻的熱源時，所拍攝到之熱影像。

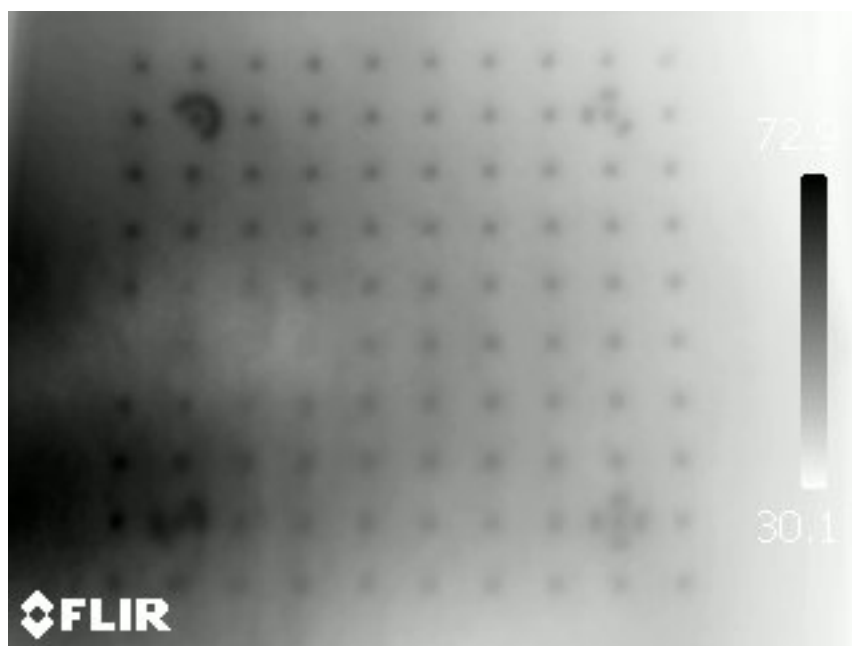


圖 3-4 不均勻熱源下拍攝率定模板之熱影像

圖中熱源的位置在模板的左方，由圖 3-4，可以明顯看出率定模板在不均勻受熱下，產生的溫度差異，而使模板左方溫度過高，同時讓模板右方溫度過低，其所造成的結果是不論是模板的左方或是右方，控制點都無法清晰呈現，自然無法以此影像率定熱像儀之內方位。而若想在模板旁提供穩定均勻的熱源，則必須確保熱源能平均來自各個方向，並且能持續以穩定的溫度輸出熱能，因此最理想的熱源應該是太陽光。

當使用太陽光作為穩定熱源，將率定模板平整放置在陽光下，再用熱像儀拍攝率定模板時，率定模板上的控制點因為色調與背景不同，熱吸收率相對應亦不同，在熱影像上凸顯出其溫度較高。藉由此方法區隔出控制點與背景間的差異，方能進行幾何率定，然而即便是使用此方法所得到的率定熱影像，大部分仍舊無法即作幾何率定，圖 3-5 為使用提供熱源之後，熱像儀拍攝到之率定模板影像。

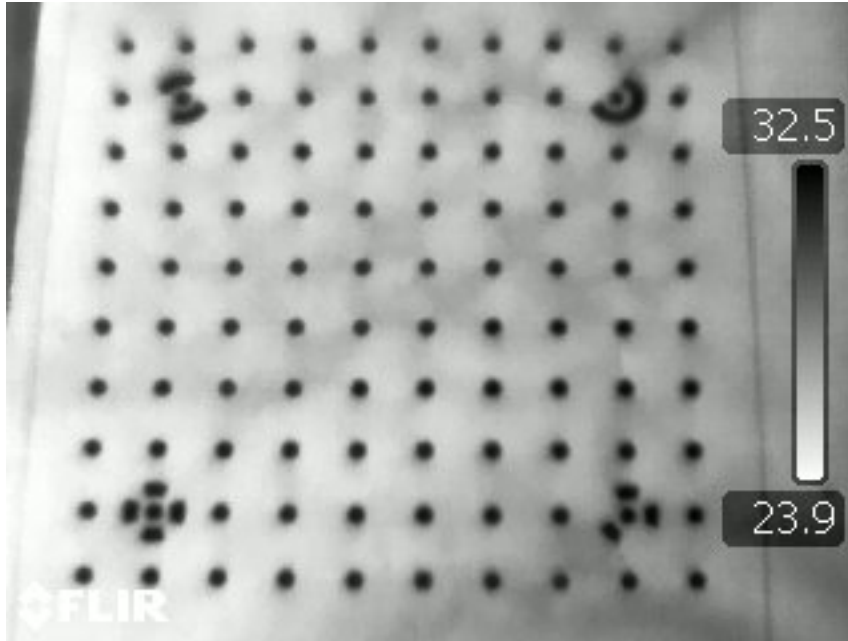


圖 3-5 提供日光熱源後所拍攝之率定模板熱影像

圖中之紅外線熱影像，黑色部份代表各個控制點，控制點的溫度比模板上的其他部份高。以此熱影像無法成功使用軟體率定熱像儀的幾何，其原因主要有兩個，第一個原因是因為影像的幾何解析度不夠大，雖以肉眼足以辨識各個控制點的位置，但是經由軟體內部的程式，計算各個控制點的影像坐標時，經常會出現無法辨識控制點或是誤判的情況。第二個原因是由於控制點與模板背景之間的對比不夠強烈，影像中灰色區域有時會干擾控制點的辨識，且控制點邊緣的模糊地帶也會增加幾何率定時點位計算的難度。

上面提到的第一個原因是影像的空間解析度不足，這部份屬於儀器本身的限制，無法使用其他方式直接改善，僅能藉由增加取像數量來彌補辨識成功率。本研究所使用的 PhotoModeler 軟體，其內部的率定程式會要求至少 6 到 8 張的影像，提供程式辨識各個控制點，以及解算相機的內方位參數，多餘的影像則利用平差解算，作為整個率定的誤差評定基準。由於熱影像的空間解析度不足，使得影像上控制點的辨識率降低，經過測試後發現，每次使用熱像儀拍攝率定模板，拍攝大於 16 張以上，可有較佳的機

會成功率定，若有更多張數，更能確保成功率定。

第二個造成率定失敗的主要原因是影像的對比不足，這個部份可以藉由影像處理來改善。透過適當的對比增強，可消除上述灰色區域造成的辨識干擾，也能減少部份控制點邊緣的模糊現象，經過對比增強以後的影像如圖 3-6 所示。

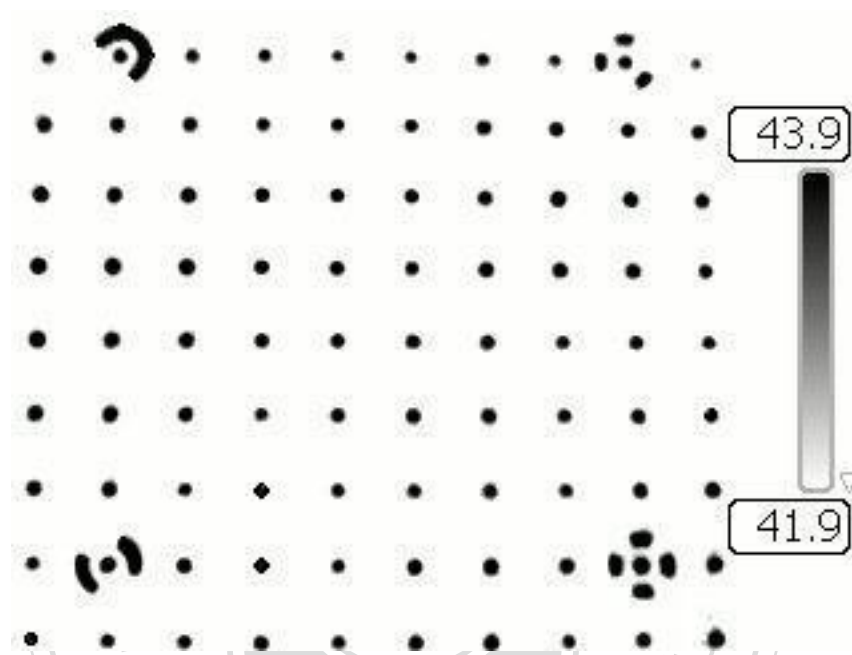


圖 3-6 經過對比增強處理後之率定模板熱影像

由圖 3-6，可以看出比原影像更能清楚判釋各控制點的位置與形狀，且原本影像上大部分的灰色區域都被消除，經過對比增強處理後之模板影像，在軟體內部率定程式的自動辨識成果，也比未經過對比增強處理的模板影像好，所能找到的控制點也比未經處理的影像多。

第三節 熱像儀幾何率定實驗結果

透過軟體內部程式率定熱像儀所拍攝的率定模板，可求得熱像儀的各個內方位參數，在率定報告中內方位參數包含焦距、像主點位置、透鏡畸變差等參數，利用這些參數可以解算影像幾何坐標的系統誤差改正量，並求得改正後坐標 (x_c, y_c) ，所使用到的公式如下：

$$\bar{x} = x - x_p \quad (12)$$

$$\bar{y} = y - y_p \quad (13)$$

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (14)$$

$$\delta x = \bar{x}(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (15)$$

$$\delta y = \bar{y}(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (16)$$

$$\Delta x = p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y} \quad (17)$$

$$\Delta y = 2p_1\bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) \quad (18)$$

$$x_c = \bar{x} + \delta x + \Delta x \quad (19)$$

$$y_c = \bar{y} + \delta y + \Delta y \quad (20)$$

在式(12)與式(13)中， (x_p, y_p) 為幾何率定報告中所求得的像主點位置，而在式(14)到式(20)中的 \bar{x} 與 \bar{y} 則分別為根據像主點位置所計算出的影像坐標，式(14)中的 r 為距離像主點的輻射距離。式(15)與式(16)中的 k_0, k_1, k_2 為率定報告中的輻射透鏡畸變差(Symmetric Radial Lens Distortion)係數，式(17)與式(18)中的 p_1, p_2 為率定報告中的離心透鏡畸變差(Decentering Lens Distortion)係數。 δx 與 δy 分別是對 \bar{x} 與 \bar{y} 的輻射畸變差改正量，而 Δx 與 Δy 則分別是對 \bar{x} 與 \bar{y} 的離心畸變差改正量。

圖 3-7 為本實驗使用熱像儀的輻射畸變差曲線，橫軸為熱影像上與像主點之距離，單位為 mm；縱軸為輻射畸變差的值，單位為 μm 。而經由幾何率定所計算得出之每像元的大小為 $18\ \mu\text{m}$ ，故輻射畸變差對熱影像邊緣的影響量約在一個像元。

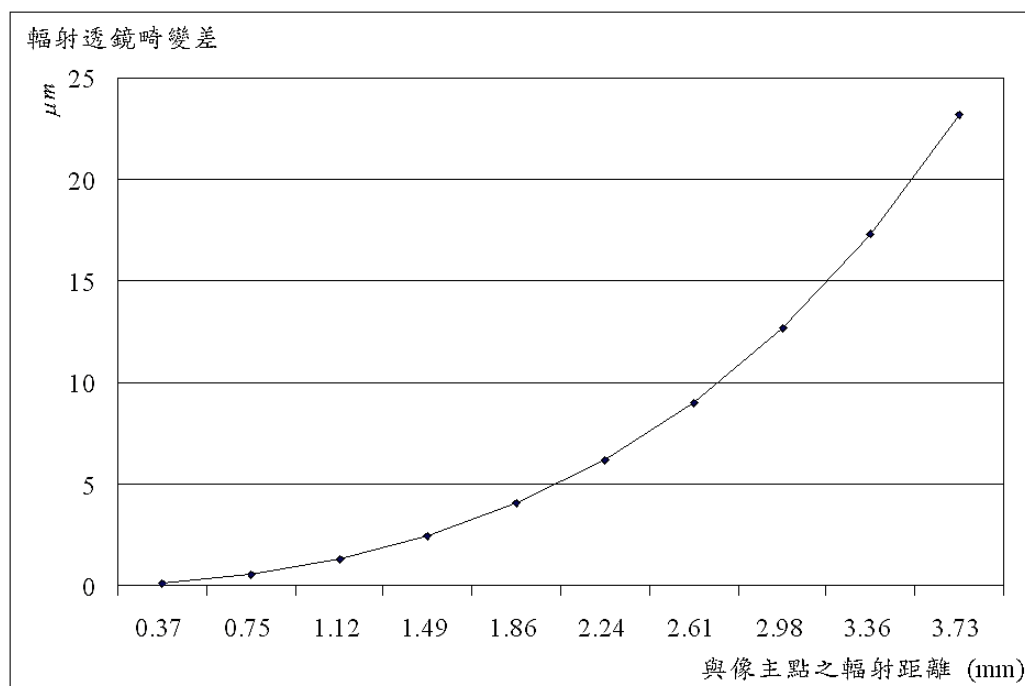


圖 3-7 熱像儀之輻射畸變差曲線圖

而由計算所得到的輻射畸變差與離心畸變差係數，也可以藉由係數與輻射距離以圖形與向量來表示，圖 3-8 為幾何率定熱像儀後，畸變差之示意圖。

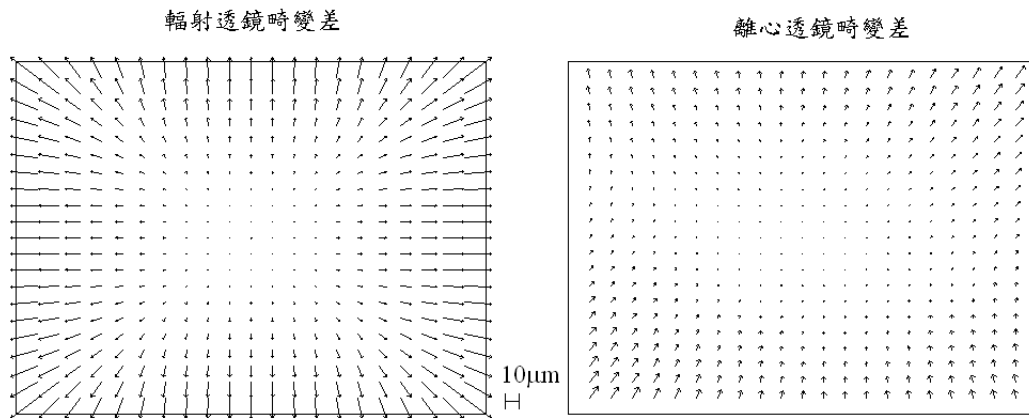


圖 3-8 熱像儀之輻射畸變差與離心畸變差示意圖

圖 3-8 中，左方為熱像儀之輻射畸變差，右方為熱像儀之離心畸變差，各個箭號的長度代表畸變差的量，單位可以參考圖中央的比例尺，各個箭號起點的位置表示在影像中，該點位置含有對應箭號長度的畸變差量。由圖 3-8 可以發現熱像儀的畸變差與一般數位相機類似，輻射畸變差隨著距離而增加，而離心畸變差的量相對於輻射畸變差量來說較小，但可能會因為不同的率定環境而異。

熱像儀本身提供一個具有簡易功能的數位相機，以此數位相機提供可見光波段影像以及融合(Fusion)影像。表 3-2 列出使用熱像儀與其內建數位相機，分別對相同率定模板施行幾何率定，所得到的畸變差係數與標準差。從表中的數值可以看出，熱像儀與其內建數位相機的輻射畸變差在 k_1 項相差一個負號，代表熱像儀所拍攝的熱影像，與其內建數位相機所拍攝的可見光影像在影像邊緣的偏移方向不一致，因此若要套疊熱影像與可見光影像，需要分別幾何改正此兩種影像。

表 3-2 熱像儀與內建數位相機之透鏡畸變差比較

畸變差係數	熱像儀	內建數位相機
k_0 , 值/標準差	$9.962 \times 10^{-4}/4.1 \times 10^{-4}$	$1.985 \times 10^{-4}/2.9 \times 10^{-5}$
k_1 , 值/標準差	$4.823 \times 10^{-5}/3.6 \times 10^{-5}$	$-3.119 \times 10^{-5}/1.9 \times 10^{-6}$
k_2 , 值/標準差	0/0	0/0
p_1 , 值/標準差	$-7.438 \times 10^{-5}/6.8 \times 10^{-5}$	$-3.205 \times 10^{-4}/1.2 \times 10^{-5}$
p_2 , 值/標準差	$-2.794 \times 10^{-4}/6.1 \times 10^{-5}$	$3.268 \times 10^{-5}/1.7 \times 10^{-5}$

由於熱像儀內建之數位相機功能較為簡易，除了無法調整曝光時間外，也無法透過濾光鏡等設備拍攝近紅外光影像，假如使用一般數位相機，則可以利用濾光鏡與增加曝光時間的方式得到近紅外光影像，為便於熱影像與後續數位相機取得近紅外影像之應用，本研究因此也比較熱像儀與一般數位相機的幾何變形程度，表 3-3 列出分別使用熱像儀與一般數位相機，對相同的率定模板施行幾何率定，其計算所得出的畸變差係數與標準差。由數值可以看出，熱像儀的畸變差係數不論在輻射畸變差或是離心畸變差上都比數位相機來得大，代表熱影像的幾何品質仍比不上目前的數位相機，若要套疊一般數位相機之可見光影像與熱像儀之熱影像，作為多波段的影像時，必須考慮到兩者影像幾何間的差異程度。

表 3-3 熱像儀與一般數位相機之透鏡畸變差比較

畸變差係數	熱像儀	數位相機
k_0 , 值/標準差	$9.962 \times 10^{-4}/4.1 \times 10^{-4}$	$3.842 \times 10^{-5}/4.0 \times 10^{-7}$
k_1 , 值/標準差	$4.823 \times 10^{-5}/3.6 \times 10^{-5}$	$2.853 \times 10^{-5}/1.5 \times 10^{-9}$
k_2 , 值/標準差	0/0	0/0
p_1 , 值/標準差	$-7.438 \times 10^{-5}/6.8 \times 10^{-5}$	$1.813 \times 10^{-6}/1.8 \times 10^{-6}$
p_2 , 值/標準差	$-2.794 \times 10^{-4}/6.1 \times 10^{-5}$	$-3.899 \times 10^{-6}/1.5 \times 10^{-6}$

在求得熱像儀的透鏡畸變差之後，即可幾何改正熱像儀拍攝的熱影

像，圖 3-9 是使用熱像儀拍攝一規則的方格紙，在拍攝時同樣將其平整放置在陽光下，由圖可見熱影像在影像邊緣的幾何變形(紅圈所涵蓋之格線)，此即為透鏡畸變差造成方格線的扭曲。

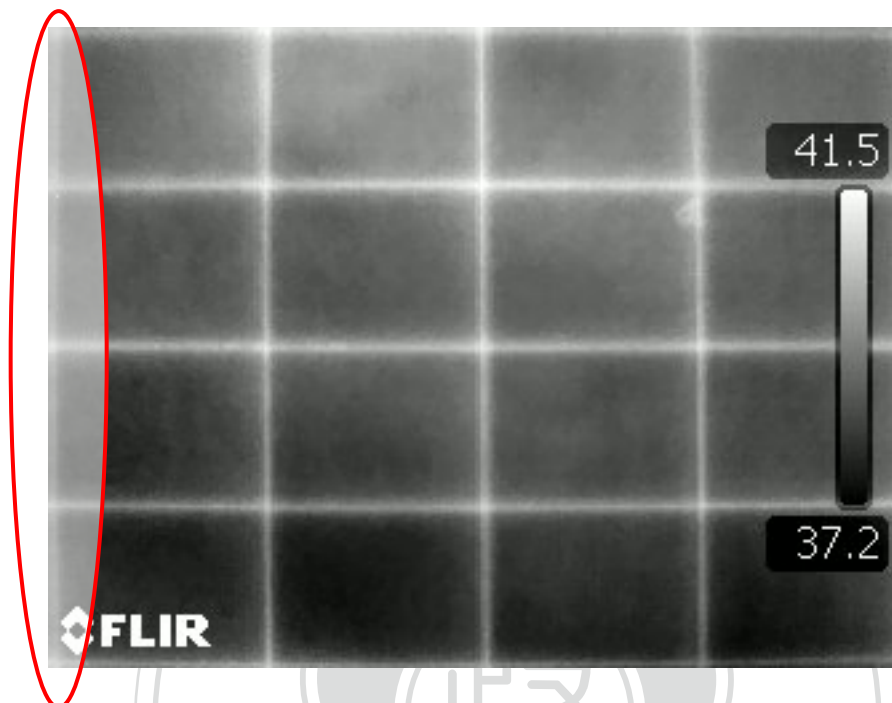


圖 3-9 幾何改正前之熱影像

而利用先前求得的輻射畸變差與離心畸變差，可算出各像元在受到透鏡畸變差影響前的位置，因此在使用 Matlab 程式計算出各像元的原始位置後，將像元在計算前後位置相差 0.5 個像元以上者轉移到新位置，即能重新取樣原本的熱影像，成為幾何改正後之熱影像，如圖 3-10 所示。

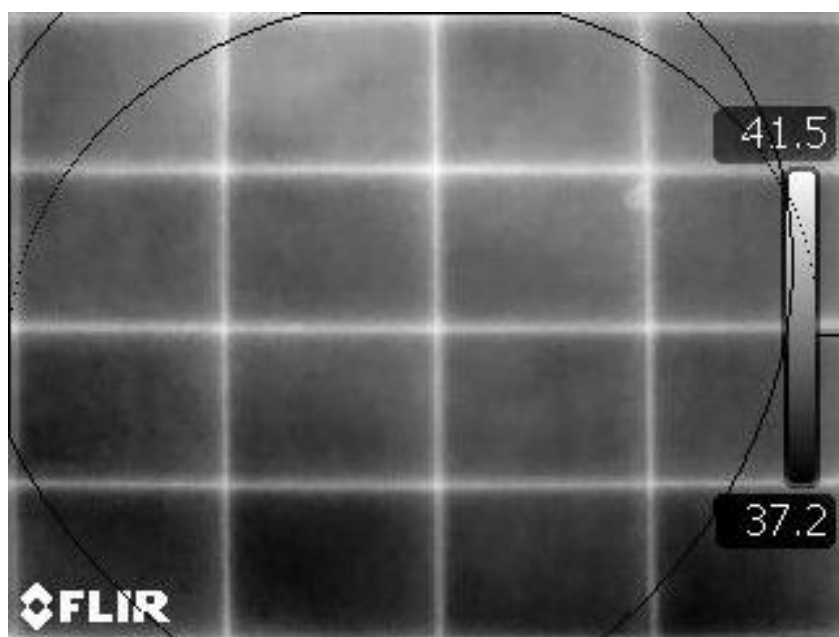


圖 3-10 幾何改正後之熱影像

圖中的黑線皆代表像元因為重新取樣的閾值(0.5 個像元)所造成的空隙，影像中內側的黑線以內表示像元在改正前後位置相同，即受透鏡畸變差所造成的位置偏差在 0.5 個像元以內者；黑線外(靠近影像邊緣者)代表其所受透鏡畸變差的影響量較大，在重新取樣後位置有所變動。從圖上可以發現在原熱影像中(圖 3-9)受扭曲的方格線，在改正後已經呈現出更接近原物體(方格線)之相對位置，同時從這兩張圖也可以看出幾何改正的成效，最後將這些因為重新取樣所造成的空隙補上其應有值，完成幾何改正，完成之影像如圖 3-11 所示。

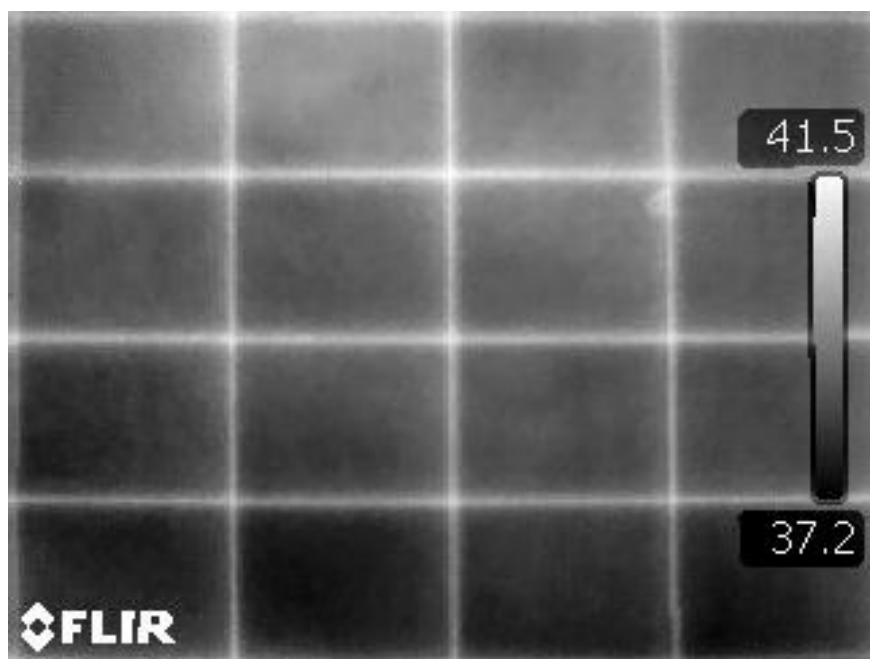


圖 3-11 完成幾何改正之熱影像



第四章 熱像儀輻射率定

在輻射率定的部份，考慮到精度上的影響，決定採用實地調查的方法，利用對照分析物體在影像上的溫度與物體的實際溫度，完成輻射率定的同時，分析紅外線熱影像的輻射特性。本章將討論熱像儀輻射率定之實驗流程與實驗成果，並分析實驗後的數據。

第一節 熱像儀輻射率定流程

對一般框幅式相機或數位相機而言，輻射率定意味著確認影像上的亮度或灰階值，能否反映物體的真實色彩。可見光影像是由藍、綠、紅三個波段的影像組合而成，因此數位影像在這三個波段的灰階值，有無真實反映物體的色彩則是輻射率定的重點。對熱紅外影像而言，不同的影像亮度代表受感測物體的溫度，因此輻射率定的重點則是確認影像能否反映真實溫度。所以在熱像儀的輻射率定上，須檢驗影像上顯示之溫度與真實溫度的差異。

輻射率定的重點為如何求得物體的真實表面溫度。前一章曾經提過在熱紅外波段中，自然界幾乎沒有物體是可以透射的，所以熱像儀拍攝到的影像，其影像上顯示的溫度，代表物體的表面輻射溫度。一般儀器公司或實驗室在率定熱像儀時，會使用像黑體爐等可精密控制溫度的儀器，這些儀器價格較高昂且不易維護。因此另一個求取表面溫度的方法就是使用精度較差，但是仍然優於熱像儀精度的表面溫度計，以量測物體之實際溫度。FLIR-T360 熱像儀在產品規格中列出其精度為 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 或讀數的 $\pm 2\%$ ，兩者取其較高值，所以正常情況下(溫度小於 100°C)只要找到精度小於 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的量測方式，應可作為真實溫度的參考。

坊間販售的表面溫度計，其量測精度大約介於 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 之間，

精度大小依照使用目的不同而異。但是由於是直接對物體的表面量測，量測到的表面溫度仍然比使用非接觸式量測的熱像儀精度高，故本研究使用表面溫度計量測物體之實際溫度，藉由率定熱影像的溫度差異探討熱像儀在輻射方面的特性。

熱像儀輻射率定的簡易示意圖如圖 4-1 所示，首先藉由表面溫度計，量測樣本物體上某特定點，一般使用表面溫度計量測溫度約需十秒左右，量測的溫度值可紀錄到 0.1°C ，並將此溫度值視為該物體該點之真實溫度值。

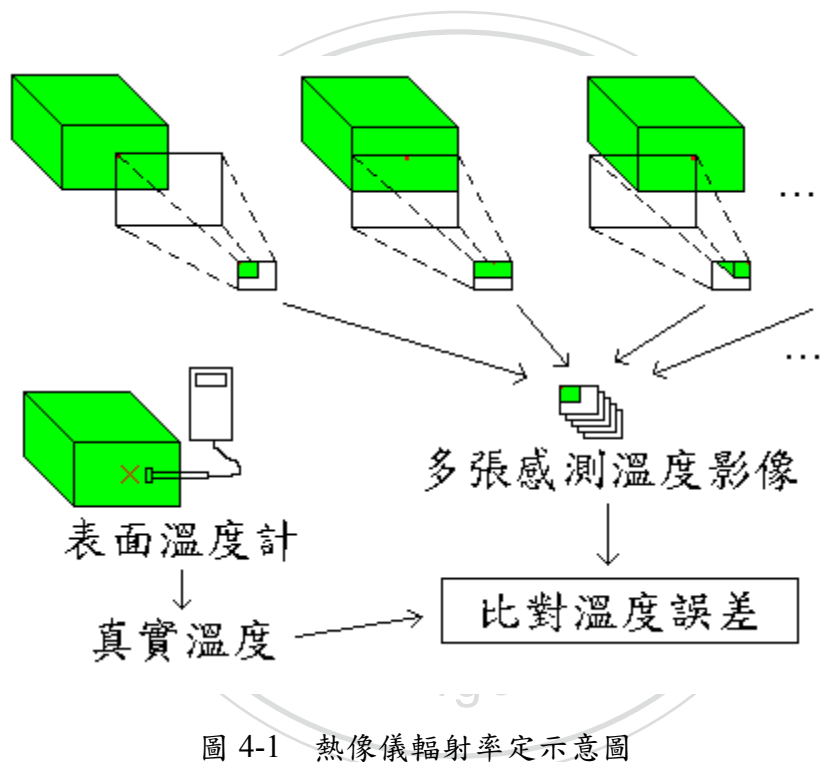


圖 4-1 熱像儀輻射率定示意圖

在求得物體表面溫度的同時，使用熱像儀反覆拍攝該物體，並平移熱像儀，對物體同一點，取像於感測器上的各不同位置，蒐集的各張影像即含有該點在不同位置的感測元件上的感測溫度值。取得真實溫度以及感測溫度後，即可對照熱像儀在不同方位的感測元件，其感測到的溫度與實際溫度之差值。

第二節 熱像儀輻射率定實驗結果

在輻射率定的實驗中，為了避免因為熱影造成的影像溫度誤差，因此實驗物體選用放射率較大，也就是反射率較小的木製材質。實驗過程中，利用表面溫度計求得的物體溫度為 22.5°C ，將此溫度視為物體的真實溫度。而利用熱像儀所感測到的溫度，依照其在熱像儀感測器上位置的不同，各個位置的量測溫度如表 4-1 所示。

表 4-1 熱像儀感測溫度值與誤差

x	y	t	dt
-160	120	23.4	0.9
-80	120	23.4	0.9
0	120	23.4	0.9
80	120	23.4	0.9
160	120	23.5	1
-160	60	23.4	0.9
-80	60	23.4	0.9
0	60	23.6	1.1
80	60	23.4	0.9
160	60	23.4	0.9
-160	0	23.4	0.9
-80	0	23.4	0.9
0	0	23.3	0.8
80	0	23.4	0.9
160	0	23.4	0.9
-160	-60	23.4	0.9
-80	-60	23.4	0.9
0	-60	23.4	0.9
80	-60	23.5	1
160	-60	23.4	0.9
-160	-120	23.3	0.8
-80	-120	23.3	0.8
0	-120	23.4	0.9
80	-120	23.4	0.9
160	-120	23.6	1.1

x 與 y 分別為量測位置的橫坐標與縱坐標，以中心點為 $(0, 0)$ ，單位為像元。 t 與 dt 分別為感測到的量測溫度，及其與真實溫度的差值，單位為 $^{\circ}\text{C}$ 。熱像儀上不同位置感測元件之感測溫度如圖 4-2 所示。

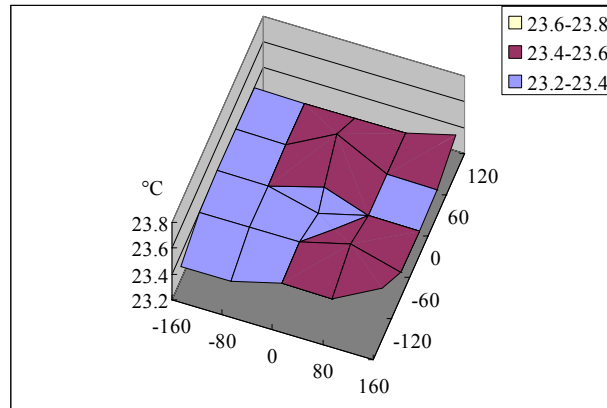


圖 4-2 熱像儀感測溫度示意圖

圖 4-2 以 x 軸與 y 軸分別代表熱影像的寬與高，單位為像元，以 z 軸表示各個取樣位置的感測溫度值。由圖可見，感測溫度涵蓋範圍介於 23.3°C 到 23.6°C 之間，平均值為 23.41°C ，標準差為 $\pm 0.07^{\circ}\text{C}$ 。比對真實溫度後可以發現，最大差距為 1.1°C ，在熱像儀的精度誤差範圍 ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) 之內。若視熱像儀之各取樣位置為隨機點，其對應之感測溫度與真實溫度的差值以折線圖表示，如圖 4-3 所示，圖中縱軸表示感測溫度與真實溫度之間的差，由圖上可以看出感測溫度的整體差異幅度為 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以內，同時說明實驗中，熱影像的輻射品質很穩定。

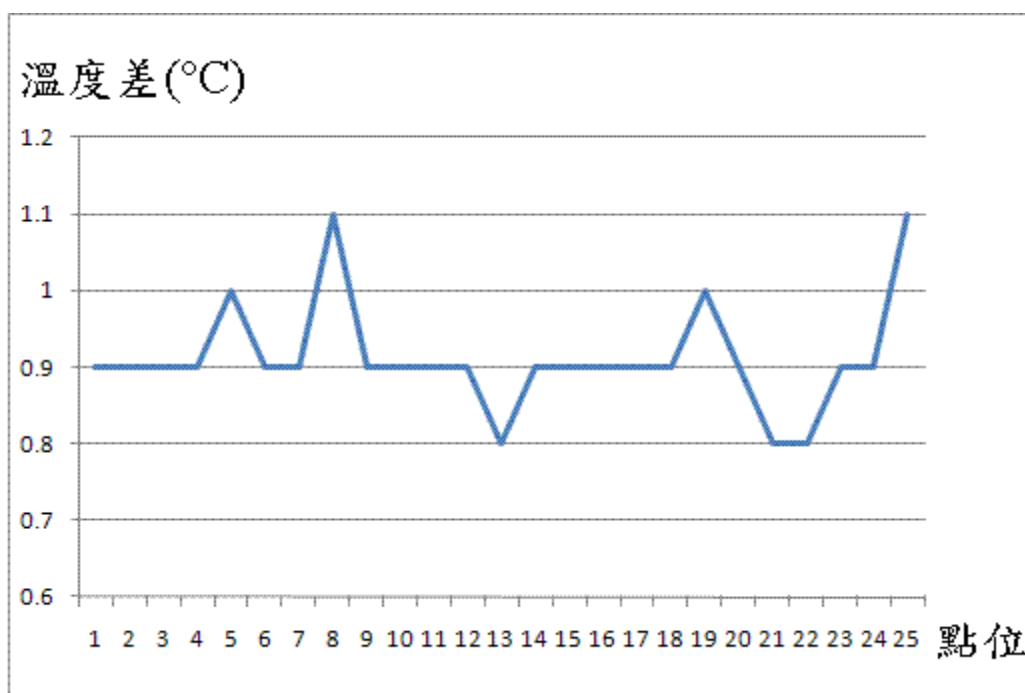


圖 4-3 感測溫度與真實溫度差異折線圖

上述溫度差異可視作輻射改正模型，因此可設定熱像儀各位置對應之改正值。為驗證輻射改正模型，本研究曾在不同的環境下，拍攝相同的實驗物體(木板)，蒐集所得之感測溫度，直接使用輻射改正模型改正其溫度值，並比對表面溫度計量測之溫度，使用輻射改正模型之前後，溫度如表 4-2 所示。

表 4-2 輻射改正前後之熱影像溫度值

x	y	改正前 t	改正前 dt	改正後 t	改正後 dt
-160	120	27.8	1.1	26.9	0.2
-80	120	27.9	1.2	27	0.3
0	120	27.9	1.2	27	0.3
80	120	28	1.3	27.1	0.4
160	120	27.7	1	26.7	0
-160	60	27.7	1	26.8	0.1
-80	60	27.9	1.2	27	0.3
0	60	27.8	1.1	26.7	0
80	60	27.8	1.1	26.9	0.2
160	60	27.8	1.1	26.9	0.2
-160	0	27.9	1.2	27	0.3
-80	0	27.9	1.2	27	0.3
0	0	27.9	1.2	27.1	0.4
80	0	27.9	1.2	27	0.3
160	0	28	1.3	27.1	0.4
-160	-60	27.9	1.2	27	0.3
-80	-60	27.9	1.2	27	0.3
0	-60	28.1	1.4	27.2	0.5
80	-60	28	1.3	27	0.3
160	-60	28	1.3	27.1	0.4
-160	-120	28	1.3	27.2	0.5
-80	-120	28	1.3	27.2	0.5
0	-120	28.1	1.4	27.2	0.5
80	-120	27.9	1.2	27	0.3
160	-120	28	1.3	26.9	0.2

實驗中，物體經由表面溫度計所量測到的真實溫度為 26.7°C 。由表 4-2 可見，改正之後的感測溫度值，與量測溫度之間的差距 dt 明顯變小，輻射改正模型確能消除掉部份系統誤差，比較改正溫度差值之前後，可如圖 4-4 所示。

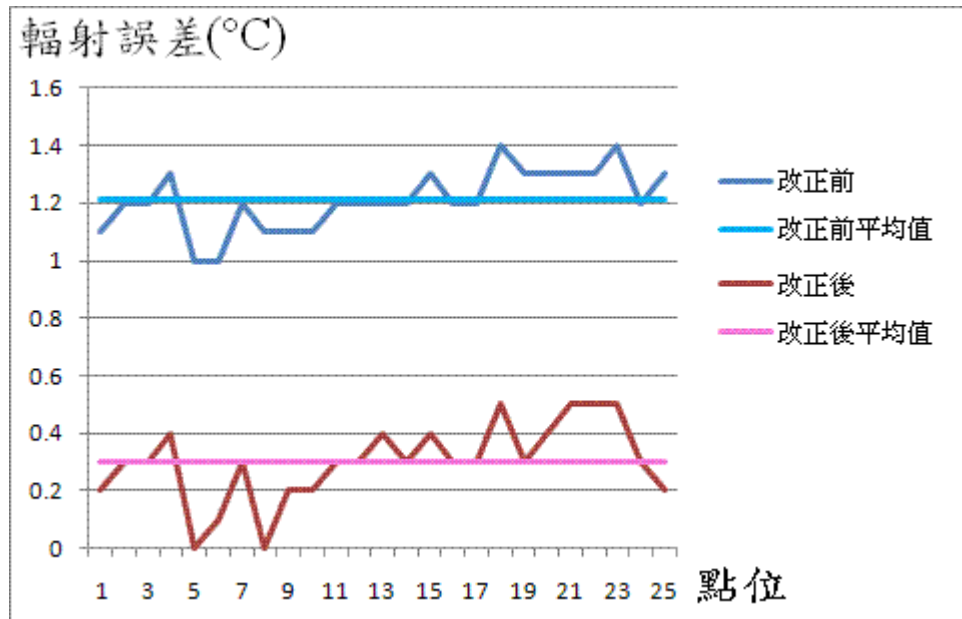


圖 4-4 改正前後輻射誤差折線圖

圖 4-4 中，藍色折線代表熱影像在輻射改正前，熱像儀感測溫度與真實溫度之差值，青色線為其平均值；紅色折線代表熱影像在輻射改正後，熱像儀感測溫度與真實溫度之差值，粉紅色線為其平均值。在輻射改正前，熱像儀所感測之溫度與使用表面溫度計量測到之真實溫度差異平均值為 1.21°C ，經過輻射模型的改正後，兩者差異的平均值降為 0.3°C ，圖 4-4 中青色線與粉紅色線的間距，即為輻射模型所改善之系統誤差部份，在改正前後的均方根誤差(Root-Mean-Square Error, RMSE)則由 ± 4.57 下降為 ± 1.65 ，經由這項輻射改正，確能降低熱像儀在輻射方面之誤差，本實驗所降低之誤差幅度為 $(4.57-1.65)/4.57 \doteq 64\%$ 。

第五章 熱影像的綜合特性探討

本章說明在使用熱影像時，熱影像所展現的綜合特性，包含在使用面陣列熱像儀拍攝近景熱影像時，可能出現之高差位移與熱影效應。在熱影像上，這些現象可展現熱影像的幾何與輻射特性，因此本章列示拍攝到之熱影像，並說明這些熱影像所展現的綜合特性。

第一節 高差位移

在地物上空，垂直拍攝地表時，地物在高程上的差異，會讓其在影像上的位置移動，這種影像位移稱作高差位移(Relief Displacement)，如圖 5-1 所示(Wolf and Dewitt, 2000)。高差位移會影響物體在影像上的幾何，在判釋遙測影像時，需要考量高差位移造成的影響。

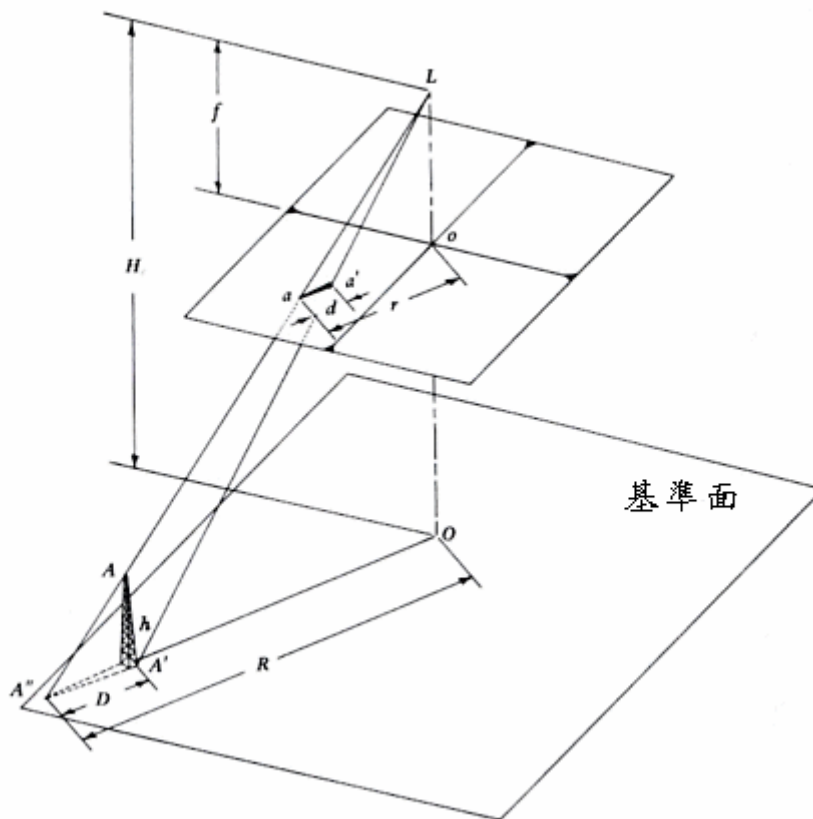


圖 5-1 垂直影像的高差位移(Lillesand et al., 2008)

圖 5-1 中，高差位移量可由下式求得：

$$d = \frac{r \times h}{H} \quad (21)$$

式中 d 為高差位移量， r 為移位像點自像主點起算之距離， h 為由基準面起算之地物點高程， H 為由基準面起算之感測器高程(Wolf and Dewitt, 2000)。

以往衛星載臺使用點式橫掃瞄的熱像儀，拍攝到的熱影像上會呈現一維的高差位移，其在影像上位移的距離與物體的高度有關。此外，高差位移同時也受到感測器在取像時，物體與感測器地底點(Nadir)位置的距離影響。而由於在感測器掃瞄的過程中，載臺也同時在移動，因此高差位移會隨著感測器中心線(Nadir Line)的垂直方向，向外延伸，如圖 5-2。

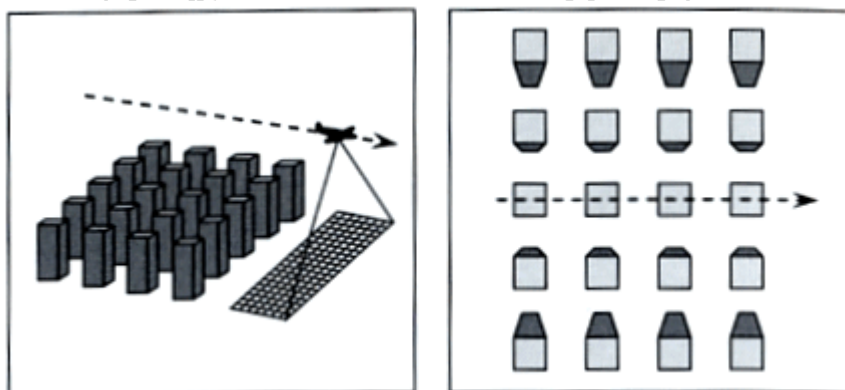


圖 5-2 一維高差位移(Lillesand et al., 2008)

圖 5-2 中，箭號方向表示載具的飛行方向，感測器掃瞄後的影像，將呈現如圖右方的高差位移。圖 5-2 中，雖然地表建物高度一致，但在影像上卻隨著建物位置，而有不同程度的高差位移；此外，圖中，由於飛行方向是朝著橫軸的方向飛行，影像上的高差位移即沿著縱軸分佈。

面陣列熱像儀所拍攝之熱影像，其在影像上所呈現的高差位移，與傳統點掃瞄式熱像儀以及線陣列式熱像儀不同，乃是二維的高差位移。二維的高差位移同樣受物體高度、及其與地底點的距離影響，與一維高差位移的差異在於，二維的高差位移以像主點為中心，向外呈現放射狀分佈，如圖 5-3 所示。

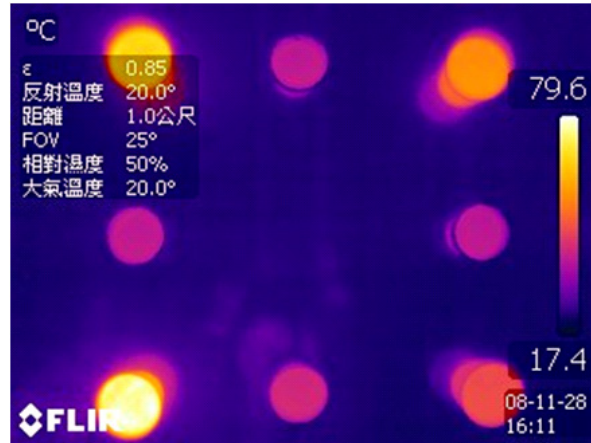


圖 5-3 熱影像之高差位移

圖 5-3 是使用面陣列熱像儀，垂直拍攝數個盛有熱水的水杯所得到的熱影像。由圖上可以看出水杯在各個方向所呈現出的高差位移，是以像主點為中心的二維放射狀高差位移。

在圖 5-3 中，幾個溫度較高的水杯(右上、右下、左下)在地面產生了熱影，除了水杯本身有高差位移之外，熱影同樣呈現出二維的高差位移，然而其高差位移的方向與水杯本身高差位移的方向相反，呈現出朝向像主點分佈。假如依照式(21)計算，則熱影的高程將小於基準面，也就是低於影像中地面的高程，此現象與熱影本身之特性有關，如次節所討論。

第二節 熱影效應

在遙感探測領域中，判釋遙測資料時，難免有地物陰影而造成遮蔽，陰影會減少遮蔽地區的反射光線，妨礙影像的判釋；陰影有時也會在地面投射出物體的外型，幫助使用者，瞭解地物在垂直影像上所無法看出的形狀(Lillesand et al., 2008)。衛星或航空搭載的感測器拍攝之熱影像上，也常發現類似的陰影，其成因為地物遮蔽太陽光，使得地表在陽光照射區域與地物遮蔽區域的明顯溫度差異所致(Lillesand et al., 2008)。使用手持式熱像儀拍攝近景熱影像時，尚有一種可能會干擾判釋的熱影，以下分別說明熱影與一般陰影的差異、熱影的成因與其特性。

一般常見之陰影如圖 5-4(a)所示，由於物體阻擋部份光源，因此在影像中的特定區域留下物體的陰影。圖中深色區域即為物體遮蔽所形成的陰影，在非點光源的情況下，在陰影的邊緣會有部份遮蔽的半影，即淺色區域。圖 5-4(b)為熱影的示意圖，熱影的成因來自於物體(熱源)所放射出的輻射能量受到反射，而在反射面映出物體的倒影。

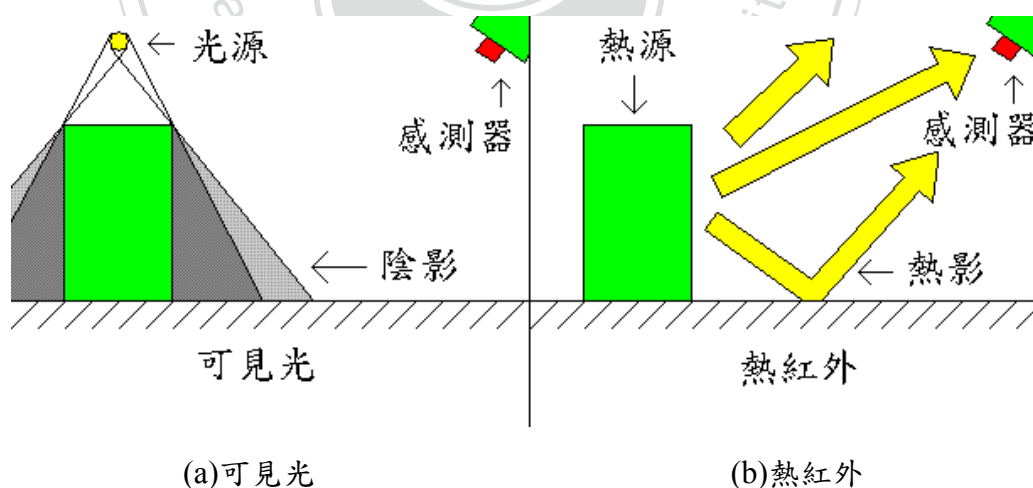


圖 5-4 陰影與熱影示意圖。(a)可見光波段陰影，陰影成因為光源受物體遮蔽所致。(b)熱紅外波段熱影，熱影成因為熱源之輻射受到反射所致。

熱影的成因是物體的輻射能量受到反射，在反射面上留下物體的倒影，但因任何溫度大於絕對零度之物體，或多或少都會輻射出自身的能量，

故在地表上，熱影效應並不需要特定溫度閾值，也不侷限在特定溫度區間的環境內。圖 5-5 展示幾張不同對象的熱影效應。

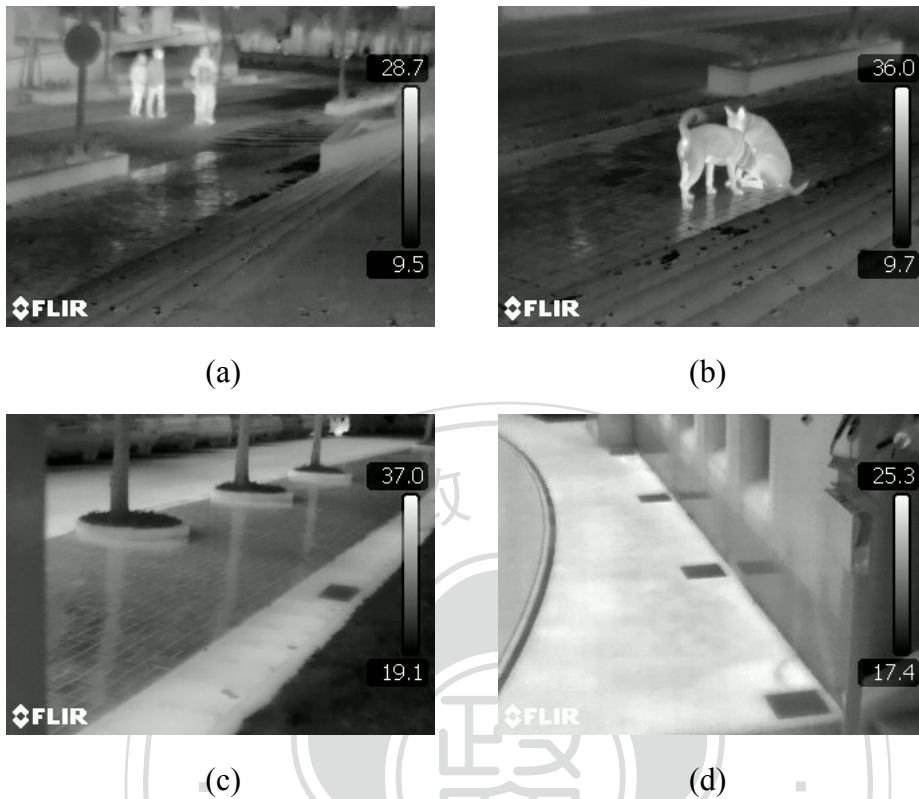


圖 5-5 不同物體所展現之熱影。(a)行人在路面上留下熱影，在不同類型的路面上分別留下了明顯程度不同之熱影。(b)動物的熱影。(c)植物的熱影。(d)金屬製的水溝蓋在牆面上留下熱影。

由圖 5-5，可以看出熱影的一些特性，首先是熱影的形狀與原物體大致保持一樣，但如反射面粗糙程度較大，如圖 5-5(a)中，行人站在柏油路面上，柏油路面上之熱影呈現模糊不清的情況，反而不如距離較遠的紅磚路面上之熱影清晰。其次是熱影所顯現出的溫度數值受多種因素影響，多數熱影所顯示的溫度略低於物體本身，如圖 5-5(a)與 5-5(b)；但也有熱影本身顯示溫度高於物體的例子，如圖 5-5(c)中樹木的熱影在影像上的顯示溫度即比樹木本身高；其他也有熱影溫度與物體溫度類似的情況，如圖 5-5(d)，水溝蓋的熱影與本身的顯示溫度差異不大。

圖 5-6 可以說明物體溫度與熱影溫度高低關係的原因，在一般情況

下，由於反射面會吸收部份輻射能量，使得熱影在熱影像上的亮度值低於物體本身的亮度值，但在特殊情況下，例如反射面本身處在高溫狀態時，受反射的輻射能量加上反射面本身放射出的能量，會使熱影在熱影像上的亮度值高過物體本身，例如圖 5-7 為使用熱像儀拍攝中午時刻位於金屬車蓋上的手掌與其熱影，由於金屬車蓋已長時間曝曬在陽光下導致其本身的高溫，因此在金屬車蓋上反射手掌的輻射能量，加上自身輻射的能量令熱影在影像顯現最高的亮度值。

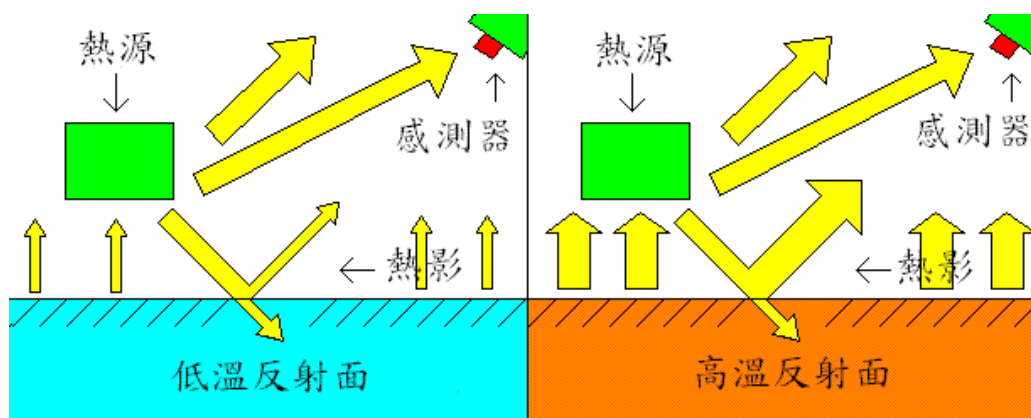


圖 5-6 熱影與反射面溫度關係示意圖



圖 5-7 溫度高於物體本身之熱影

以往在衛載熱影像上，熱影不易顯見，可能原因為：(1)地表面的放射率較大，使得地物放射的輻射能量大部分為地表所吸收，而較少反射。(2)衛載影像大多為近垂直拍攝，導致地物放射的輻射能量，經過地表反射至感測器的角度太小，使得熱影極不明顯。(3)衛載感測器與地表之距離，較手持式熱像儀拍攝近景影像遠甚多，使得熱影效應更加不明顯，此外，由於衛載感測器上熱波段的空間解析度較差，也使得熱影在影像上難以辨識。

根據熱影是物體的輻射能量受到反射所致，因此熱影在熱影像上的亮度受下列因素影響：(1)物體本身的溫度：物體本身溫度越高，其所放射的輻射能量也越強，自然受到反射的能量也會增強，使熱影像上熱影的亮度增加。(2)反射面的溫度及放射率：反射面本身亦會輻射能量，這些能量加上反射外部的輻射能量成為熱影，因此作為反射面物體的溫度越高，熱影的亮度亦會提高；此外反射面的材質也會影響熱影的變化，不同的材質意味著不同的放射率，而由前述文獻提到在熱紅外波段中，放射率與反射率呈現此消彼長的關係，放射率越低的物體，反射輻射能量越高，使其在影像上顯示的熱影有較高的亮度。(3)拍攝角度：經過實驗後發現，使用熱像

儀在不同的俯角拍攝時，物體的熱影會顯示出不同的溫度。

為瞭解放射率與拍攝角度對熱影的影響，本研究分別在不同材質的反射體上放置熱源，並以不同的俯角，拍攝熱源在反射面上的熱影，得如表 5-1 的數值。

表 5-1 以不同俯角拍攝之熱影溫度

拍攝俯角(°) 反射面 材質(放射率)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
鋁(0.05)	40.6	48.7	49.5	52.6	53.2	53.5	53.3	52.9	49.3
木板(0.91)	21.9	21.5	21.4	21.3	21.1	21.3	22.2	23.3	22.7
玻璃(0.92)	27.4	28	28	28.2	29	30.2	32.9	38.4	45.3
紙(0.93)	23.1	22.8	22.8	23.2	23.5	24.8	26.8	32.2	32.6
不鏽鋼(0.075)	42.1	44.8	45.7	45.3	45.3	44	42.8	40.6	39.1
瓷磚(0.92)	25.9	26.8	26.9	27.4	27.7	28.8	30.9	37.3	46.4

表 5-1 中，第一列為拍攝俯角，單位為度；縱欄為不同的反射面材質，括號內為該材質的放射率。由於垂直拍攝時，輻射能量反射的角度太小，使得所有熱影像上都僅能看到物體本身放射的熱能，因此在俯角上不納入 90°，而從 80° 開始紀錄。依序填入所拍攝到的熱影溫度之後，若將表 5-1 轉繪為折線圖，如圖 5-8 所示。

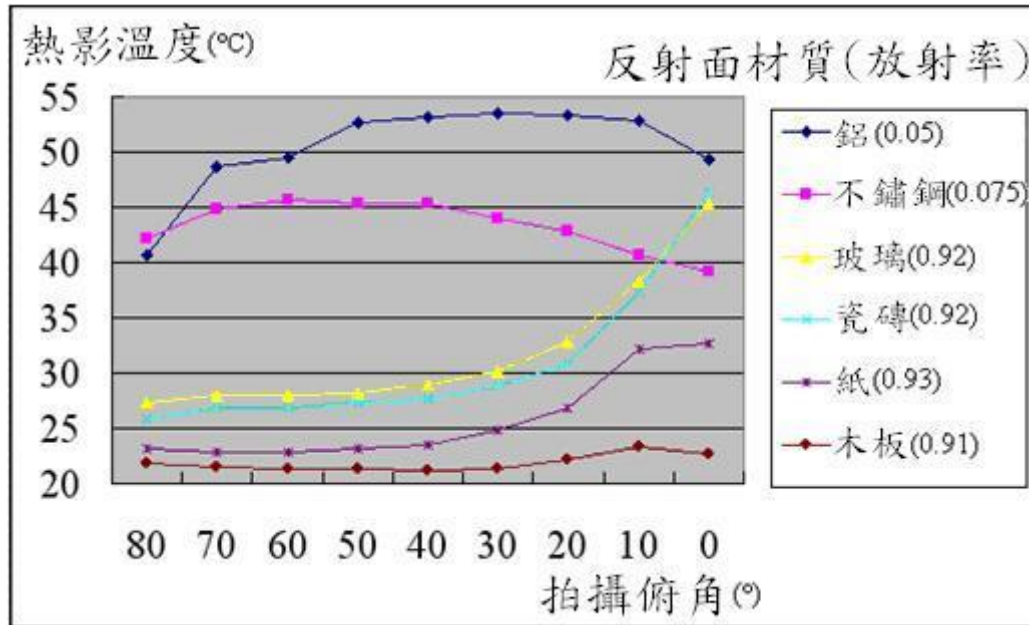


圖 5-8 熱影溫度折線圖

圖中的折線依照反射面材質排列，由上而下依序為鋁板、不鏽鋼板、玻璃、瓷磚、紙以及木板，從圖上的數值變化，可得到以下兩個推論：(1) 扣除掉 0° 較極端的情況，非金屬材質反射面上的溫度曲線隨著俯角的降低而提高，當俯角越接近 0°，即熱像儀越接近地面時，溫度曲線上升的程度也變得較大，經過分析後發現，非金屬反射面上熱影的溫度與俯角的 $\csc \theta$ 有高度相關。(2) 使用金屬材質的反射面與非金屬材質的反射面，對熱影的溫度變化有相當重大的影響，代表放射率對於熱影的形成也有重要的關係。

第三節 放射率

物質的放射率對熱影的產生有十分重要的影響，前述文獻曾提到在熱波段中，放射率幾乎等同於吸收率，各種物質在熱波段的穿透率也幾乎為零，因此物體的放射率越大，則其反射率就越小，在熱影像上即不易產生熱影；反之，放射率小的物體即為熱的良好反射體，容易在熱影像上產生其他熱源的熱影。

表 5-2 列出常見物質在 8-14 μm 波段間的放射率，一般物質的放射率都介於 0 與 1 之間。由表 5-2 可見，同一種物質的放射率可能在一定範圍內浮動(Water:0.92-0.98)，此外，同一種物質在不同的環境狀態下可能有非常大的差異(Aluminum, foil: 0.05; Aluminum, polished: 0.08; Aluminum, paint: 0.55)。

表 5-2 物質在波長為 8-14 μm 之放射率(Jensen, 2007)

Surface Material	Emissivity, ϵ
Water, distilled	0.99
Water	0.92-0.98
Water with petroleum film	0.972
Concrete	0.71-0.90
Asphalt	0.95
Tar/stone	0.97
Loamy soil, wet	0.95
Soil, sandy	0.90
Brick, red and rough	0.93
Vegetation, open canopy	0.96
Grass	0.97
Wood, planed oak	0.90

Deciduous forest	0.97-0.98
Coniferous forest	0.97-0.99
Stainless steel	0.16
Aluminum, foil	0.05
Aluminum, polished	0.08
Aluminum, paint	0.55
Polished, metals	0.16-0.21
Oxidized steel	0.70
Granite	0.86
Dunite	0.78
Basalt, rough	0.95
Snow	0.83-0.85
Paint	0.90-0.96
Human skin	0.98

影響物體放射率的因素有很多種，包含(1)物體表面的粗糙度，(2)物體的氧化程度，(3)物體的含水量與(4)物體的溫度等等(Danov et al., 2007)。另外也有文獻說明放射率還受到其他因素影響，包含顏色、化學成份、緊密度(Compaction)以及感測器視角等(Schmugge et al., 2002; Weng et al., 2004)。由於影響放射率的因素很多，這些因素且大多難以控制，因此物質的放射率，經常如前段所提及的介於特定範圍內，或是註明其環境條件，也因此不同文獻所載的放射率通常也不盡相同。

而如果需要在現實環境中求得物體的放射率，可以藉由實地調查的方式計算求取。依照斯提凡波茲曼定律，黑體放射出的總能量依照式(3)為： $M_b = \sigma T^4$ ，而對於真實世界中的物體，可以將此式改為(Jensen, 2007)：

$$M_r = \varepsilon \sigma T_{kin}^4 \quad (22)$$

式中， M_r 為真實物體所放射出的總能量， σ 為斯提凡波茲曼常數， ε 為物體的放射率， T_{kin} 為物體的真实動態溫度(True Kinetic Temperature)。假設 $M_b = \sigma T_{rad}^4$ ，以及 $M_r = M_b$ ，則可推導得出：

$$\sigma T_{rad}^4 = \varepsilon \sigma T_{kin}^4 \quad (23)$$

化簡可得到下列真實動態溫度、輻射溫度與放射率的關係式(Sabins, 1996)：

$$T_{rad} = \varepsilon^{1/4} T_{kin} \quad (24)$$

而放射率則可表示為：

$$\varepsilon = \left(\frac{T_{rad}}{T_{kin}} \right)^4 \quad (25)$$

因此，可藉由熱像儀感測物體的輻射溫度，以及表面溫度計量測物體的真实動態溫度來計算物體的放射率。假設熱像儀所感測到物體的輻射溫度為 26.85°C (300°K)，表面溫度計所量測到物體的真实動態溫度為 28.85°C (302°K)，熱像儀的精度為 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，表面溫度計的精度為 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，則：

$$\text{物體的放射率 } \varepsilon = (300/302)^4 = 0.974$$

經過誤差傳播後的精度，

$$S_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{4T_{rad}^3}{T_{kin}^4} \right)^2 \sigma T_{rad}^2 + \left(\frac{-4T_{rad}^4}{T_{kin}^5} \right)^2 \sigma T_{kin}^2} \approx \pm 0.026 \quad (26)$$

式(26)可用以計算現實環境中各種物體的放射率。

第六章 結論與建議

根據前述文獻回顧與實驗分析，可推得以下結論：

- 一、面陣列熱像儀所拍攝得到之熱影像，具有和可見光影像套疊，以增加對地表判釋解讀程度之潛力，但若要確保所使用之熱影像在與可見光影像套疊後的影像品質，宜於套疊前，幾何率定拍攝用之熱像儀。
- 二、本文所用面陣列熱像儀的幾何與一般光學或數位相機類似，故其率定可以參用一般率定此類相機之方法；但在輻射方面，熱像儀的特性與一般相機差異太大，因此必須使用其他率定方式。
- 三、在幾何率定中，本研究使用實地率定法，藉由拍攝既有之率定模板，由影像上控制點位置解算熱像儀的內方位參數。經過實驗發現，須先處理拍攝之熱影像，消除部份控制點模糊與增強影像對比後，方能成功率定。而在實驗結果的數據中，熱像儀的畸變差比一般數位相機稍大，說明 FLIR-T360 熱像儀所拍攝之熱影像的影像幾何較可見光之影像者差，然而透過內方位參數的求取，可以藉由計算出透鏡畸變差，再經過重新取樣，予以改正其幾何變形。
- 四、在輻射率定中，本研究使用實地調查方式，透過實地量測物體表面取得真實溫度，再對比熱影像上各位置所量測到之感測溫度，其與真實溫度之間的差距。實驗結果顯示，在一般室溫情況下，熱像儀所感測到之物體表面溫度與實際溫度間的誤差平均值為 $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ，小於儀器本身之先驗精度規範， $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。而經由實驗後所得各個位置的溫度誤差，即能建立出該物體的輻射改正模型，以此模型改正其他熱影像之輻射；在實驗過程中，使用輻射改正模型能夠降低熱像儀的輻射誤差，效果約為 64%。
- 五、除藉由率定熱像儀探討面陣列熱影像的特性外，率定亦可偵測熱像儀本身，是否會因為儀器長時間的使用，而出現幾何與輻射方面的衰退

現象。本研究提出面陣列熱像儀在幾何方面與輻射方面的簡易率定方式，供後續研究參考。

在後續研究方面，建議如下所述：

- 一、在幾何率定部份，本研究使用實地率定法率定面陣列熱像儀，以求取熱像儀之各項內方位參數，尚未使用自率光束法來率定熱像儀之幾何，若使用自率光束法求取熱像儀之內方位參數，其結果是否會與使用實地率定法之結果一致，仍有待後續研究探討。
- 二、在輻射率定方面，本研究因為環境之限制，僅測試在一般環境溫度下，面陣列熱像儀所感測溫度與實際溫度之差異；理論上，環境的溫度越極端，熱像儀所感測的溫度誤差也會隨之提高；實際上，是否存在一環境溫度閾值，使得超過此環境溫度下，導致熱影像的輻射誤差大於其先驗精度，仍須後續實驗。
- 三、在實際應用上，面陣列熱影像已證實有效凸顯地表地物在日夜間的溫度差異，若能搭配更多波段的影像，如可見光影像以及近紅外光影像，則可藉由這些影像間的光譜關係，判釋出更多地表地物資訊。以往這種多波段影像來源大多受到載臺的限制，且多為俯視影像，如今近景熱影像可以藉由熱像儀取得，因此近景的多波段影像與以往空載、衛載之多波段影像，是否會受到尺度大小而有特性上之不同，也值得研究。

參考文獻

一、中文部份

- 李人豪，2006，「紅外線熱影像與數值模擬於孔洞檢測之研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，臺南。
- 李洲亘，2006，「紅外線熱影像法參數設定與表層混凝土火害受損區域檢測」，朝陽科技大學營建工程研究所碩士論文，臺中。
- 李進桂，2004，「以紅外線影像方法作精神狀態評估：初步探討」，國立成功大學工程科學研究所碩士論文，臺南。
- 李意誠，2003，「應用紅外線熱影像技術於電力設備異常診斷之研究」，國立臺北科技大學電機工程研究所碩士論文，臺北。
- 李皞白，1998，「雙波段(3-5 微米與 8-12 微米)紅外線熱影像之研究」，私立元智大學電機暨資訊工程研究所碩士論文，桃園。
- 林雅萍，2006，「紅外線熱影像法在混凝土結構 CFRP 修補品質之評估」，國立中興大學土木工程研究所碩士論文，臺中。
- 孫丕昌，2003，「紅外線熱像攝影及神經生理學檢查運用在高危險糖尿病足篩檢之臨床相關性」，國立陽明大學復健科技輔具研究所碩士論文，臺北。
- 楊謹慎，2001，「紅外線熱影像分析在糖尿病足診斷應用」，國立成功大學醫學工程研究所碩士論文，臺南。
- 劉華嶽，2009，『紅外線熱像儀在建築節能減碳上之應用理論、應用層面、實務案例』，臺北：詹氏書局。
- 潘國樑，2006，「遙測學大綱」，科技圖書股份有限公司，臺北。
- 鄭子揚，2005，「建築物之紅外線熱影像法檢測」，朝陽科技大學營建工程

研究所碩士論文，臺中。

二、英文部份

- Hovis, W. A., J. S. Knoll, and G. R. Smith, 1985, "Aircraft measurements for calibration of an orbiting spacecraft sensor", *Applied Optics*, 24: 407-410.
- Huang H. H, 2009, *Shadow Effects of Close Range Image Acquired by Area-Based Thermal Detectors*, Paper presented at the 30th Asia Conference on Remote Sensing, Beijing, October 18-23.
- Jensen, J. R., 2005, *Introductory digital image processing*, 3rd Edition, U.S.A.: Pearson Education, Inc.
- Jensen, J. R., 2007, *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*, 2nd Edition, U.S.A.: Pearson Education, Inc.
- Kaufman, Y. J., and B. N. Holben, 1993, "Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint, and desert reflection", *International Journal of Remote Sensing*, 14: 21-52.
- Lillesand, T. M., R. W. Kiefer, and J. W. Chipman, 2008, *Remote Sensing and Image Interpretation*, 6th Edition, N. Y.: John Wiley.
- Sabins, F. F. Jr., 1996, *Remote Sensing Principles and Interpretation*, 3rd Edition, N. Y.: Freeman.
- Schmugge, T., A. French, J. C. Ritchie, A. Rango, H. Pelgrum, 2002, "Temperature and Emissivity Separation from Multispectral Thermal Infrared Operations," *Remote Sensing of Environment*, 79:189-198.
- Thome, K. J., 2001, "Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method," *Remote Sensing of Environment*, 78: 27-38.
- Vermote, E., R. P. Santer, P. Y. Deschamps, and M. Herman, 1992, "In-flight

- calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering”, *International Journal of Remote Sensing*, 13: 3409-3429.
- Weng, Q., L. Dengsheng, and J. Schubring, 2004, “Estimation of Land Surface Temperature – Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies,” *Remote Sensing of Environment*, 89:467-483.
- Wolf, P. R., and B. A. Dewitt, 2000, *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*, 3rd Edition, U.S.A.: McGRAW-HILL Book Co.

三、網頁部份

- Atkins, N., 2010, *Chapter 2 – Energy: Warming the Earth and the Atmosphere - Greenhouse Effect and Global Warming*, Retrieved May 26, 2010 from Lyndon State College Survey of Meteorology on the World Wide Web: http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter2/spectrum_interactive.html
- Danov, M., V. Tsanev, and D. Stoyanov, 2007, *Measuring the spectral emissivity of rocks and the minerals that form them*, Retrieved June 14, 2010 from SPIE Newsroom on the World Wide Web: <http://spie.org/x14996.xml?highlight=x2420&ArticleID=x14996>
- FLIR Systems(2009, September 8). *Infrared Imaging Systems*, Retrieved September 8, 2009 from FLIR Systems on the World Wide Web: <http://www.FLIR.com>