

國防部 113 年度「補助軍事院校教師(官)從事學術研究」

研究計畫名稱：運用設計實作遠距評估建物立面缺陷

委 託 單 位：國防部

研 究 單 位：空軍航空技術學院

研究計畫主持人：葉崇偉 副教授

共 同 主 持 人：江志煌 助理教授

國防部編印

中華民國 113 年 12 月 31 日

摘 要

本研究主要針對無人飛行載具搭載可攜式紅外線鏡頭於瓷磚檢測之可行性進行探討，先以手持式紅外線熱顯像儀進行非飛行模式之瓷磚有/無缺陷之試驗，確認紅外線熱顯像辨識度佳。氣溫升高時，有缺陷的瓷磚溫度上升高於沒有缺陷的瓷磚；當氣溫降低時，有缺陷的瓷磚溫度下降較快，溫度會低於沒有缺陷的瓷磚。後續若能夠確保無人飛行載具的飛行穩定及滯空性能，可進一步在無人飛行載具上搭載紅外線熱顯像儀，能夠有效取代現階段的磁磚檢驗方式，以提升檢驗效率及降低人員安全疑慮。

目錄

摘 要	i
目 錄	ii
圖表目錄	iv
第一章 緒論	1
1-1 建築物外牆檢測	1
1-1-1 紅外線檢測技術	2
1-1-2 無人飛行載具輔助檢測	4
1-2 繫留無人飛行載具	5
1-3. 研究目的與動機	7
第二章 研究設備與方法	8
2-1 搭載紅外線熱像儀之無人飛行載具系統	8
2-2 纜線供電系統	11
2-3 紅外線熱影像牆面監測實驗	12
第三章 結果與討論	14
3-1 無人飛行載具	14
3-2 紅外線熱影像牆面監測	16
3-2-1 紅外線熱顯像儀檢測磁磚缺陷之可行性	16
3-2-2 自製混凝土磁磚牆面室內測試	17

3-2-3 建築物外牆戶外測試.....	19
第四章 結論	22
參考文獻	23

圖表目錄

表 1-1 牆面瓷磚診斷方法的適用性[1].....	2
表 2-1 Pixhawk 基本規格 [28].....	9
表 2-2 FLIR ONE Pro 紅外線攝影機基本規格[32]	11
圖 1-1 繫留無人飛行載具系統[13].....	6
圖 2-1 任務剖面圖.....	8
圖 2-2 多旋翼無人飛行載具硬體架構[30].....	10
圖 2-2 自動 PoT 系統架構.....	12
圖 2-3 牆面樣本之製作(左)與陽光曝曬測試(右).....	13
圖 3-1 四旋翼無人飛行載具.....	15
圖 3-2 攝影機與環架安裝.....	15
圖 3-3 確立紅外線熱顯像儀顯影情況.....	16
圖 3-4 紅外線熱顯像儀顯影結果.....	17
圖 3-5 測試用磁磚牆面製作.....	18
圖 3-6 測試牆面之磁磚貼合狀態配置.....	18
圖 3-7 以燈泡照射自製磁磚牆面之溫度變化過程	19
圖 3-8 實測傳道樓牆面.....	20
圖 3-9 建築物外牆磁磚溫度實測結果.....	21

第一章 緒論

紅外線熱影像檢測已證實是牆面缺陷檢測的可行方法，但是必須依照正確的檢測方式與程序。長時間紀錄外牆溫度分佈變化，可以較準確判斷缺陷的位置及範圍。搭配繫留無人飛行載具，不僅可以將紅外線熱像儀攜帶到指定位置，而且可以持續監測溫度變化過程，對於建築物安全檢測是十分有用的工具。

1-1 建築物外牆檢測

建築物因氣候、環境、老化或施工品質等因素，導致外牆劣化，可能產生白華、裂縫、鼓脹等變異，嚴重甚至會剝落，不僅降低建築物外觀品質，也可能掉落而傷害週邊行人與車輛，是不可忽視的公共安全議題。為避免導致人身傷害或財產損失的問題，老化建築及高層建築應定期檢查外牆，尋找可能鬆動掉落的磚石。

傳統的建築物外牆非破壞檢測方法為目視檢測及打診法(Hammer Tapping)，近年更發展出影像處理、紅外線熱顯像、超音波等檢查技術。在研究中也有使用透地雷達等設備進行檢測，但在實務上並不普遍。常用各類檢測方法及其適用性如表 1-1。

打診法是以打診棒、硬幣或鐵鎚等物品敲擊磁磚表面，依據敲擊聲音的頻率高低，判斷牆面及磁磚是否有空鼓現象，是高精度度的檢測方法。因為使用工具簡便，且短時間訓練後即可運用，是技術人員廣泛會採用的方法。由於打診法及目視檢測需要近距離接觸待測牆面，常需搭配鷹架、吊籠或高空繩索，讓檢測人員可以接近外牆，工作效率低且成本高，人員登高檢測的安全風險也較大。

紅外線檢測或熱顯像技術是根據外牆瓷磚表面的溫度差異來辨識缺陷。當外牆有空鼓現象發生時，因空氣夾層使牆壁的熱傳導性質改變，在相同的日照及環境溫度條件下，表面溫度會有不同。根據紅外線熱顯像結果，即可找出發生缺陷的位置。然而，紅外線儀器角度及外在環境等不確定因素，都會造成檢測判定上的誤差，需要依循標準化診斷程序及善用統計分析方法來減少誤判。為滿足檢測要求，傳統上仍需要由人員攜帶紅外線儀器從鷹架、吊籠等適當的

高空位置來實施檢測，仍有人員安全風險。若可使用的紅外線熱顯像設備解析度不高，通常將其作為外牆初步篩檢的工具，先從較大範圍區域找出可能有缺陷的位置，再搭設鷹架或吊籠，讓檢測人員以打診法進一步確認有缺陷的範圍。可以省去大範圍搭設鷹架的成本。

表 1-1 牆面瓷磚診斷方法的適用性[1]

診斷方法	適用 限 度
外觀目測法	1. 可發現外觀上的異常，但無法發現外觀上有無異常浮起。 2. 雖可發現外觀上的異常，但有可能因光線或遮蔽物而漏掉。
打診法	1. 無法以客觀的數字來表示其測定的結果。 2. 有時無法測出厚度約 40 mm 以上的部位之浮起。
紅外線熱影像法	1. 儀器會受季節、天候、時間、氣溫、牆面的方位、距離、裝修材料的色調、建築物冷暖機具發熱等影響。 2. 在強風或強雨時難以測定。 3. 若牆面與儀器間有樹木等障礙物時，無法測定。 4. 不同儀器機型畫面處理方法會造成結果有很大的差異。 5. 若有陽台或雨庇等突起物時，難以測定。
反應法	1. 有時無法測出厚度約 40mm 以上部位的突起。 2. 調查牆面的後測狀況不同時，可能會造成誤診。 3. 採用機器人時，有時無法探知窗戶周圍與凹凸部的周邊。 4. 採用機器人時，可適用高度有所限制。 5. 採用機器人時，可能會因為風等因素產生測定的誤差。
超音波法	1. 對於較寬廣的面，難以檢查出浮起。 2. 不適用於表面粗糙的瓷磚。 3. 難以檢查出較深層處的浮起。
黏著強度試驗	1. 試驗用瓷磚需要進行修補。 2. 不適用於表面有較大凹凸的瓷磚。 3. 僅能測定部份的瓷磚。

1-1-1 紅外線檢測技術

英國天文學家 William Herschel 於 1800 年探討光譜的熱效應時，發現了紅外線(Infrared)。1917 年，開發出以硫化亞鉍(Tl₂S)製成的光電導體來測量光之波長，成為紅外線熱像偵測器的開端。在第二次世界大戰期間，發展出「光學影像轉換器」，用紅外線照射於物體而顯其形像於螢光幕上，可用於夜間作戰。紅外線熱影像法(Infrared Thermography, IRT)自 1948 年開始應用於醫學，輔助乳房、血管和皮膚方面的病變檢查。紅外線攝溫儀能提供高解析度影像及高準確

溫度測量，操作簡單且安全方便。近年來由於紅外線技術發展及成本降低，紅外線熱影像儀器能有效檢測熱分佈，因此廣泛應用於醫學、工業、土木、航太及軍事等領域上。近兩年因應新冠肺炎疫情，在車站、機場等公共場所，也可見到紅外線攝溫儀大量運用來檢測民眾體溫。針對建築物紅外線熱影像檢測技術，有許多專家學者進行研究，包括基本理論、操作原則及實際檢測探討。

林維明等人[2]利用紅外線影像系統與熱失重分析法，偵斷海砂屋的鋼筋混凝土劣化現象，並探討技術的實用性。混凝土若摻有海砂，內含過量的氯化物會導致鋼筋鏽蝕而膨脹，結構體因而破壞剝離，形成很薄的空氣層，不利於熱傳導。在一定日照條件下，破壞處表面的溫度會較高，可藉由紅外線熱影像來判別。

Vavilov & Demin [3] 利用紅外線熱影像法檢測煙囪之結構安全。當鍋爐廢氣自煙囪排出時，內部溫度較高，完整的結構可將熱量傳導至外部表面；有裂縫或缺陷位置，熱傳導量較低，紅外線熱影像會呈現低溫。

陳俊菁[4]探討紅外線熱影像法應用於面磚黏貼之檢驗。以鹵素燈加熱，再使用紅外線熱影像儀拍攝瓷磚表面溫度熱影像圖，根據溫度分佈差異來辨識黏貼缺陷範圍及位置，其判斷結果準確且快速。相較之下，打診法較仰賴主觀認定黏貼缺陷的位置，缺陷範圍較難判定，尤其當範圍較小，判斷更為困難。紅外線熱影像圖能客觀、明確呈現黏貼缺陷位置及範圍，檢測人員有明確的判斷準則及論證。

林宏義[5]比較紅外線熱影像法、敲擊回音及打診法等三種方法，進行瓷磚黏貼品質檢測的研究。其中以紅外線熱影像法較容易快速及大範圍檢測出瓷磚缺陷；敲擊回音法需有正確參數才能準確預估缺陷範圍；打診法使用器具較簡便，可用錢幣及鐵鎚等即可進行檢測。研究建議紅外線熱影像拍攝角度應在 45 度以內，估算面積誤差可低於 10%。

連韋慶[6]研究建築物表面裂縫、內部裂縫、外飾面磚脫層等現象的以非破壞檢測技術比較。探討的檢測方法包括透地雷達、紅外線熱影像及超音波檢測，比較三種方法對於檢測不同缺陷類別的可行性及適用性。研究結果顯示紅外線熱影像儀可應用於細微裂縫、外飾面磚脫層及磚牆破壞範圍之檢測，不過須注意檢測環境之日曬條件。運用紅外線熱影像於面磚脫層檢測，可採用兩種方法。

一為長時間拍攝，將不同時間測量的影像相減，以溫度變化圖像判定；另一為拍攝單張影像，以不同位置的相對溫度差異來判定。前者耗費時間較長，後者在沒有基準溫度分布參考下，可能產生誤判。實際應用於成功大學博物館北向立面檢測，兩種分析方法所得結果相近；與打診法結果比對，判定面磚脫層範圍結果亦相近。

林谷陶[7]應用紅外線熱影像於水泥砂漿材料之劣化檢測分析。已劣化及未劣化之水泥砂漿試體加熱後，拍攝紅外線熱像圖，期望建立熱影像與劣化現象的關聯性。

林谷陶[8, 9]應用紅外線熱影像檢測一般外牆瓷磚，判定面層瓷磚、黏結層與底層混凝土間之脫層現象。運用實驗設計方法，探討瓷磚黏結系統脫層及未脫層現象之檢測特徵分析。以紅外線燈箱加熱 2 分鐘後，於熱影像圖即可觀察出預埋之脫層缺陷位置；加熱 37~69 分鐘，熱影像圖中可觀察到缺陷與正常區域顏色對比最大。溫度達到最高點附近及溫度衰減階段，則無法觀察出脫層缺陷位置。研究結果建議，實際進行建築物外牆瓷磚檢測時，若欲偵測脫層缺陷，最好選擇早上建築物受太陽照射之溫度上升階段。除了缺陷檢測，混凝土層及黏結層的老化程度可以藉由溫度衰減階段的特性加以判別。

1-1-2 無人飛行載具輔助檢測

近年因小型無人飛行載具逐漸普及，加上攝影與遙測裝置技術不斷進步，體積與重量均大幅降低，可以輕易裝設於小型無人飛行載具上，進行遙測作業。雖然目前尚有許多技術與法規問題待解決，市場上已經有不少結合小型無人飛行載具的遙測系統可供選擇。檢測性能仍然無法和高成本的專業設備比擬，但是低成本有助於擴大應用範圍，也讓小型企業有能力投入開發，加速了創新與發展[10]。除了一般攝影裝置，紅外線熱像儀與小型 UAV 結合是目前遙測應用的常見裝置，在農業、工業及建築業均有需求。

Krawczyk 等人[11]以無人飛行載具檢測建築物的能源消耗。小型 UAV 可以在較小的區域內，或是從難以抵達的位置來進行拍照，相對沒有時間和空間的限制，操作成本較低，可以在最短的時間和成本內獲得大範圍區域的視圖。普

遍已具有 GPS 定位能力，加上易於使用的操作軟體，有利於一般非航空專業人員運用。

陳瑞鈴等人[12]研究以小型無人飛行載具掛載智慧型手機及紅外線鏡頭系統，進行高層建築物外牆瓷磚剝落損傷的非破壞性檢測。檢測數據由雲端進行瓷磚剝落損傷擷取與評估。建立可靠度高、成本較低及全面性高層建築物外牆瓷磚損傷檢測方法，降低檢測成本及減少人員垂吊風險。研究中採用搭配智慧型手機之小型紅外線攝影機，利用手機 4G 網路及雲端資料庫等功能，實現遠端控制攝影與影像擷取等操作。在實驗室之樣本測試結果顯示，小型紅外線攝影機在降溫過程中的適當條件下，缺陷可辨識率為 94%，無缺陷可辨識率為 90%。在實際大樓牆面之試驗，在太陽照射面的溫度上升階段及溫度下降階段均進行檢測，擷取外牆瓷磚缺陷處的溫度變化特徵。與高規格紅外線攝影機檢測結果比較，證實經適當的實驗設計與數據處理，低成本的小型紅外線攝影機也可以獲得大致符合的結果。

1-2 繫留無人飛行載具

無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是目前重要的發展領域。不論在民間或軍事用途上，UAV 可以取代載人飛機執行長時間、高污染及高危險的監測與監視工作，即所謂的 3D 任務：單調(dull)、骯髒(dirty)及危險(dangerous)。除此之外，也可用於通訊、大氣探測、地理資訊蒐集等方面。近二十年來，世界上各先進國家莫不投注大量的研發經費開發相關技術。UAV 之功能及用途，與其他週邊設備，如地面控制站、通訊系統、起降輔助設備等均有關係，因此在發展上必須以整體無人飛機系統(Unmanned Aircraft Systems, UAS)之觀點來考量。

不論是載人飛機或是無人飛行載具，電力驅動技術是目前發展的主要方向之一。以近年快速普及的多旋翼機而言，旋翼必須採用電力驅動才能同時產生必要的升力與姿態操作。為了提高續航能力並獲得良好的性能，除了改善儲電及充電技術，混合供電系統架構是解決方案之一。混合電源架構可以結合多種電源，例如燃料電池、太陽能電池和超級電容器等。空中充電(inflight recharging)以及纜線供電(power over tether)是另外不同類型的解決方案[13]。配合現有已成

熟的多旋翼機技術，纜線供電系統或稱為繫留無人飛行載具(Tethered Unmanned Aerial Vehicle, TUAV)系統是可以立即解決電力需求問題的方案。簡易的 TUAV 系統如圖 1-1。

TUAV 系統的飛行載具本體與一般無人飛行載具相似，增加了與地面站連接的電纜。地面站除了原有的命令與通訊相關設備，另有電源供應裝置，可以經由電纜持續提供飛行載具電力。控制命令與飛行資訊也能經由電纜傳輸。TUAV 的飛行範圍受到纜線的限制，而且纜線的張力也會影響飛行動態，多應用於侷限區域或定點停懸的操作場合，例如通訊中繼站、定點監視、大氣探測等應用。



圖 1-1 繫留無人飛行載具系統[13]

當地震、水災或風災等事件發生後，受災地區通常會出現基礎建設受損，導致無法正常通訊。為了讓救災或重建人員具備必要的通訊能力，必須先行設置臨時通訊設備。因行動電話普及率高，設置臨時基地台可以讓大多數人的行動電話恢復通訊，不必再額外準備個人通訊裝置，有較高效益。因為基地台位置不必隨時移動，而且其運作需要持續供電，適合採用 TUAV 系統攜帶基地台設備到適當高度[14-17]。在海事災變場域中，救援船隻可以配置 TUAV 系統，作為海上通訊網路的節點，協助救援船隻通訊[18]。

除了通訊中繼，可以連續供電、長時間飛行的 TUAV 已開始發展不同用途。纜線除了作為供應 UAV 電源的媒介，也可以當作放置感測器陣列的架構。Rico 等人[19]將多個大氣感測裝置安裝在纜線上，升空後分佈在不同高度，連續執行數小時測量，可以獲得不同時間與空間位置的大氣狀況與氣溫梯度。實際已驗證了攜帶包含 6 個感測器組成的陣列，上升至 50 呎、連續 6 小時的大氣測量。

Kown & Lee [20]考量纜線可連續高功率供電的特性，規劃發展高樓救災用的繫留旋翼機。Xiao 等人[21-23]將 TUAV 與地面機器人結合，由 TUAV 提供不同方向的視覺資訊，輔助地面機器人遠端操控。國內警政署與經濟部技術處委託工研院開發了一套機動監視系統，包括繫留飛行平台，可搭載高解析度監視設備，曾實際運用於 107 年「臺中世界花卉博覽會」的開幕活動維安工作[24]。

1-3. 研究目的與動機

建築物外牆劣化可能會導致瓷磚或混凝土剝落，造成週邊人車的安全風險。為避免導致人身傷害或財產損失的問題，建立簡便及有效的檢查裝置與方法，有助於推動老化建築及高層建築的定期檢查，減少意外發生。

不論是在實驗室或實際建築物上測試，紅外線熱影像法已經證實是效率高且有相當準確度的檢測方法，但在執行上需依循標準流程，並有足夠的資訊才能得到正確的判斷結果。由於紅外線熱像儀應盡量正向於牆面，以減少誤差，無人飛行載具是非常適合的載台，可以省去搭建鷹架或使用吊籠，兼顧效率與安全性。目前實際應用案例，大多採用多旋翼機作為載台，主要優點是可以在侷限空間中操作，並可以停懸來取得穩定的影像，其結構比單旋翼機(直升機)簡單、易維護。缺點是機載電池通常只能維持約 30 分鐘左右的飛行時間，如果再加上任務酬載，飛行時間將更短。如果檢測範圍較大，所需時間較長，則必須不斷更換電池。

為改善長時間檢測的電源問題，本計畫將以紅外線熱影像檢測為任務需求，發展可持續供電的繫留無人飛行載具系統(Tethered Unmanned Aerial Vehicle System)，並實際測試長時間外牆檢測的效果。

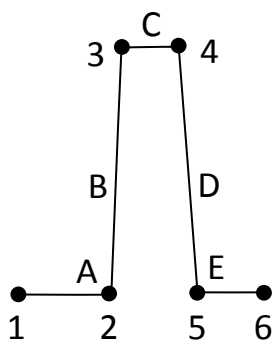
第二章 研究設備與方法

本計劃主要研究項目為 (1)搭載紅外線熱影像儀的旋翼型無人飛行載具；(2)由地面持續供應電源且可自動收放纜線的纜線供電系統(Power-over-Tether System)；(3)紅外線熱影像監測牆面之長時間測試與分析。

2-1 搭載紅外線熱像儀之無人飛行載具系統

規劃製作的無人飛行載具系統是以空中攝影為主要任務。依據任務需要，並考量技術難易程度與實務操作的可行性，訂定系統功能需求如下：

1. 無人飛行載具必須可以自動保持穩定飛行，除了起飛與降落過程，不需要人為即時控制。起飛及降落由地面的操作人員控制。
2. 無人飛行載具可以依照 GPS 定位座標及氣壓高度計來維持定點停懸。
3. 搭載紅外線熱像儀設備，拍攝建築物外牆狀態。拍攝的熱影像可即時傳遞至地面控制站，進行儲存與影像判別。



轉換點	任務內容
1	啟動
2	起飛離地
3	維持高度
4	開始下降
5	開始降落
6	停機

階段	任務內容
A	起飛
B	爬升
C	停懸
D	下降
E	降落

圖 2-1 任務剖面圖

為了取得建築物牆面溫度的變化過程，無人飛行載具的飛行時間以持續 1 小時為基本目標。任務剖面圖規劃如圖 2-1。階段 C 的停懸飛行為主要檢測任務階段，B 和 D 階段為從起飛點到檢測高度的升降過程。

任務酬載包括可見光攝影機與紅外線熱像儀，包括周邊設備合併重量應在 1 公斤以下；需搭載電源變壓及穩壓模組，但不需要高容量電池，估計使用的多旋翼載具軸距在 1 公尺以下，最大起飛重量不超過 5 公斤。

多旋翼飛行載具的飛行控制器硬體採用目前市面上容易取得的 Pixhawk 控制器，其基本規格如表 2-1。Pixhawk 使用 32 位元 ARM 微處理器為核心，整合慣性感測器(IMU)、大氣壓力感測器等元件在單一電路板上，並能外接數種週邊裝置，包括無線數據傳輸模組、GPS 接收機、外部電子羅盤及電壓/電流感測器等。Pixhawk 可安裝多種飛行控制用韌體，例如 Ardupilot、PX4 等。Ardupilot 韌體是目前最多人使用的開源飛行控制程式，最初是以 8 位元的 Arduino 控制板為基礎所發展的飛行控制韌體，後來擴展至可以安裝於多種通用型的飛行控制器。其 32 位元版本對應的硬體以 Pixhawk 為主，並且可以用於固定翼飛機、直升機、多旋翼機、車輛及船舶等[28]。以 Pixhawk 硬體、ArduCopter 韌體建構的多旋翼機系統架構如圖 2-2。

表 2-1 Pixhawk 基本規格 [28]

處理器	32-bit ARM Cortex M4 core with FPU
	168 Mhz/256 KB RAM/2 MB Flash
	32-bit failsafe co-processor
感測器	MPU6000 as main accel and gyro
	ST Micro 16-bit gyroscope
	ST Micro 14-bit accelerometer/compass (magnetometer)
	MEAS barometer
電源	Ideal diode controller with automatic failover
	Servo rail high-power (7 V) and high-current ready
	All peripheral outputs over-current protected, all inputs ESD protected
通訊介面	5x UART serial ports, 1 high-power capable, 2 with HW flow control
	Spektrum DSM/DSM2/DSM-X Satellite input
	Futaba S.BUS input (output not yet implemented)
	PPM sum signal
	RSSI (PWM or voltage) input
	I2C, SPI, 2x CAN, USB
	3.3V and 6.6V ADC inputs

由於使用 ArduPilot 系列的 ArduPlane 及 ArduCopter 韌體在無人飛行載具的控制器上，必須能透過 MAVLink 通訊協定來進行飛行任務的設定與控制。目前可自由使用的地面站控制界面軟體 Mission Planner [29]是最基本的開源軟體之一。除此之外，另有 APM Planner [30]、QGroundControl [31]等，均可取得原始碼。

無人飛行載具之機載設備，除了維持飛行及導航控制用的硬體設備，任務所需的主要設備為可見光攝影機、紅外線熱像儀及影像傳輸設備。初步規劃使用搭配智慧型手機或平板電腦使用的 FLIR ONE Pro 紅外線熱像儀[32]。其規格如表 2-2。在相同系統架構下，若需要更精細影像，只需變更攝影機規格即可。

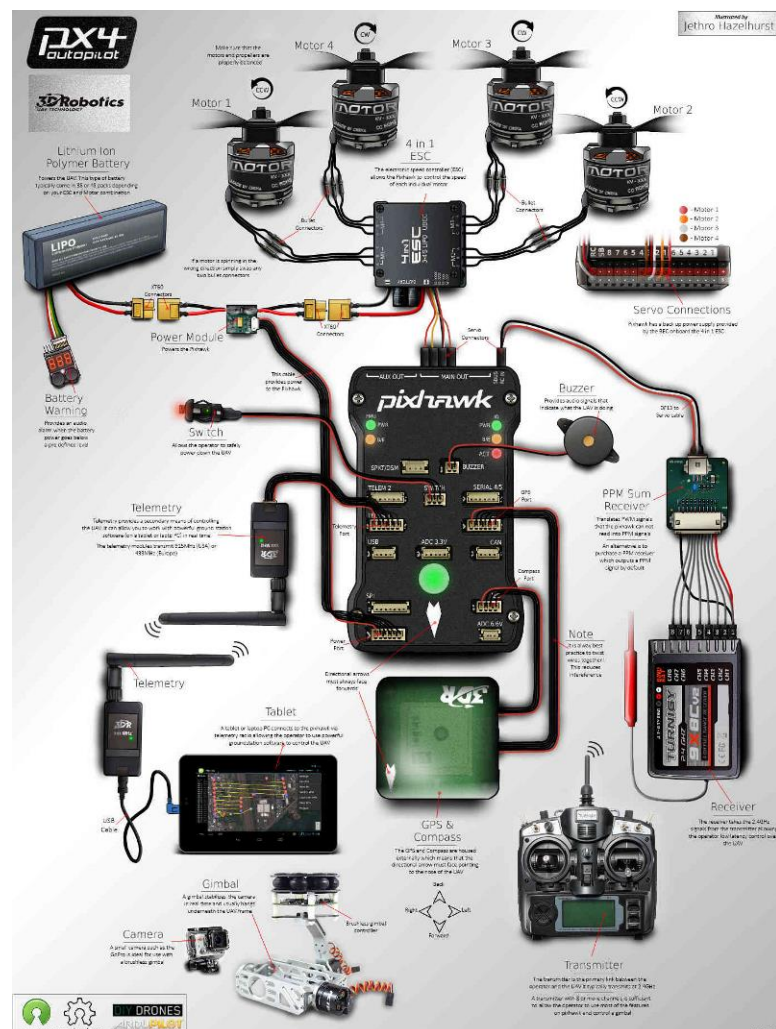


圖 2-2 多旋翼無人飛行載具硬體架構[30]

表 2-2 FLIR ONE Pro 紅外線攝影機基本規格[32]

項目	規 格
熱像解析度	160 × 120
紅外線波長範圍	8 ~ 14 μm
電池供電時間	約 1 小時
物體溫度範圍	-20°C ~ 120°C 及 0°C ~ 400°C
準確度	周邊與檢測物件溫度差之 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 5\%$
可用性	裝置溫度 15 ~ 35°C 且檢視物件溫度 5 ~ 120°C，開機 60 秒後可使用
焦距	固定 15 cm ~ 無窮遠
視角(水平/垂直)	50° $\pm 1^{\circ}$ / 43° $\pm 1^{\circ}$
重量	36.5 g

2-2 纜線供電系統

纜線供電(Power-over-Tether, PoT)系統架構如圖 2-2，包括供電裝置與自動絞盤裝置兩大部分。供電裝置包括地面的電源(市電、發電機或儲電站等)、地面電源轉換器及傳輸電纜；機載裝置為降壓電路、備援電池及並聯電路。自動絞盤裝置包括電動絞盤、張力控制器及編碼器。

為了降低電纜的電流負載，並考慮纜線電阻會造成電壓下降，因此傳輸電壓必須高於飛行載具動力所需的電壓值。電壓越高，傳輸電流越小，越有利於長距離傳輸。不過機載降壓電路必須能夠配合負擔大幅度電壓變化，且維持良好的轉換效率。同時衡量傳輸與轉換效率，以決定適當的傳輸電壓。在初期實驗階段，地面電源將採用一般最容易取得且不易損壞的鉛酸電池模組，以 24 V 或 48 V 為基礎，直接由電纜傳輸至飛行載具，由機載電路降至常用的鋰電池標稱電壓，以符合多數市售 ESC 規格。第二階段再導入昇壓模組，提升輸電電壓，以滿足未來更長距離傳輸的需求。同時選用適當的電源轉換器搭配市電，與鉛酸電池模組並聯，構成地面供電站。

機載的供電裝置除了接收地面電力，尚需要一組備援電池，作為纜線供電故障時之電力供應。原則上降壓電路會將傳輸電力調降到與備援電池的電壓相

同，以變兩者並聯。為保護備援電池，並聯電路中需有適當的保護迴路。備援電池僅供緊急時候使用，其容量只要足夠讓飛行載具緊急降落即可。

為了減少對飛行載具及周邊環境的干擾，纜線長度應該依照飛行高度作適當的調整，使其張力不會過大而影響飛行，也不會過長而掃掠或拉扯到週邊建物或人員。規劃的自動絞盤裝置可收納未伸展的纜線，也能依飛行載具移動需求而自動放出纜線。絞盤轉動方向由張力控制器來決定。張力控制器包括張力感測器、控制電路及馬達驅動電路。張力感測器用來測量纜線末端的張力。若張力超過臨界值，表示飛行載具需要較長的纜線，則自動絞盤放出纜線；若張力降到臨界值以下，表示纜線過長，則自動收回纜線。收放纜線操作不能影響飛行，因此其控制方式、轉動速度及張力臨界值的選擇，將經依照實驗結果進行調整。編碼器用來測量纜線收放的長度，讓操作人員可以即時瞭解纜線放出的長度。

供電系統與自動絞盤裝置所需組件及規格資料在文獻[19, 33, 34]中有詳細的敘述，可作為本計畫執行之參考。

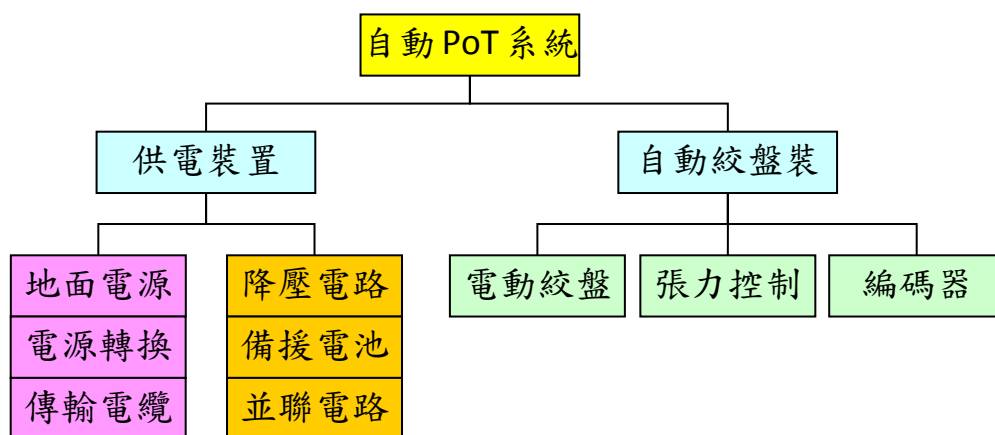


圖 2-2 自動 PoT 系統架構

2-3 紅外線熱影像牆面監測實驗

為了驗證使用 TUAV 搭配紅外線熱影像儀之檢測效用，規劃之實驗分為三階段：

1. 紅外線熱影像儀測試

本研究團隊先前已有使用手持式熱顯像儀進行牆面缺陷檢測之實驗。實驗對象包括自行製作的測試用牆面樣本(圖 2-3)及校內建築物有明顯缺陷的外牆。

預備機載之紅外線熱影像儀，在裝置於 TUAV 之前，將先在實驗室內及戶外進行測試，並且與先前實驗結果比較，以瞭解儀器之操作特性與測試準確度。



圖 2-3 牆面樣本之製作(左)與陽光曝曬測試(右)

2. TUAV 續航測試

飛行載具及自動絞盤裝置完成後，將先進行靜態續航測試。在室內無自然風干擾的情況下，進行以鉛酸電池組供電的續航時間測試。測試過程中，測量及紀錄電力消耗情形，作為後續估算飛行時間與電量儲備的依據。

完成室內測試後，進行戶外實地測試，以瞭解在自然風干擾情況下，纜線對於飛行穩定性與可控性的影響。

3. 建築物外牆長時間溫度變化測試

選擇校內建築物有明顯缺陷的外牆，進行全系統的檢測實驗。參照文獻中相關測試結果，分別在有日照天氣情況下，於上午及下午分別進行連續測試至少 1 小時，以觀察升溫及降溫過程中的牆面溫度差異變化。另外在夜間或晨間之背光面進行測試，觀察在無外部熱源情況下的溫度分佈特性。在實際長時間測試過程中，同時紀錄飛行載具與電力系統運作情形，作為改進之依據。

第三章 結果與討論

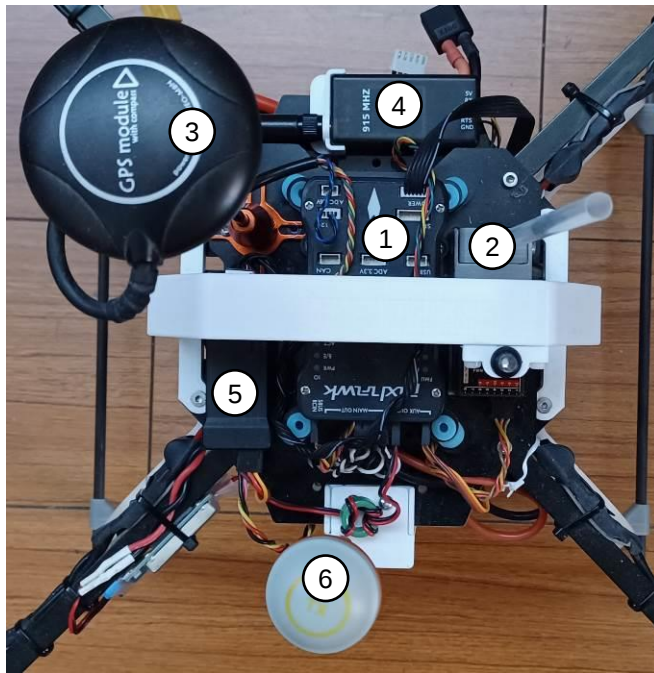
3-1 無人飛行載具

本計畫完成之四旋翼無人飛行載具整體外觀如圖 3-1(a)。其軸距為 450 mm，螺旋槳直徑為 300 mm。所使用的無刷馬達最大個別操作電流為 15A。機體主要結構為碳纖維板及方型管。使用 Pixhawk 飛行控制器，安裝於中央平台，如圖 3-1(b)。外部 GPS 接收器與電子羅盤合併於一獨立模組，以碳纖維桿架高於中央平台上，盡量遠離無刷馬達、電子變速器及其他電子設備，以降低電子羅盤的磁場干擾。

空拍用攝影機安裝於機體正下方，如圖 3-2(a)。攝影機搭配單軸可遠端控制之環架裝置，可以透過遙控系統改變拍攝方向。圖中顯示攝影機正向下(左圖)與朝向前方(右圖)之狀態。環架結構如圖 3-2(b)。為了降低飛行時高頻震動對影像穩定度的影響，環架與機體之間以四個減震橡膠球連接。由於攝影機與環架之重量只有 100 克，四個減震球可支撐其重量而不至於過度變型或損壞，因此未設計其他連接結構。環架轉動角度完全由遙控訊號設定，沒有自動調整功能。轉動角度由伺服馬達控制。



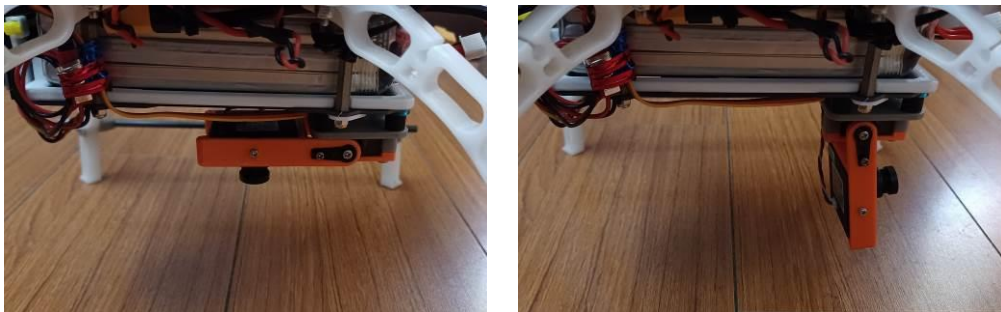
(a) 全機外觀 (螺旋槳未安裝)



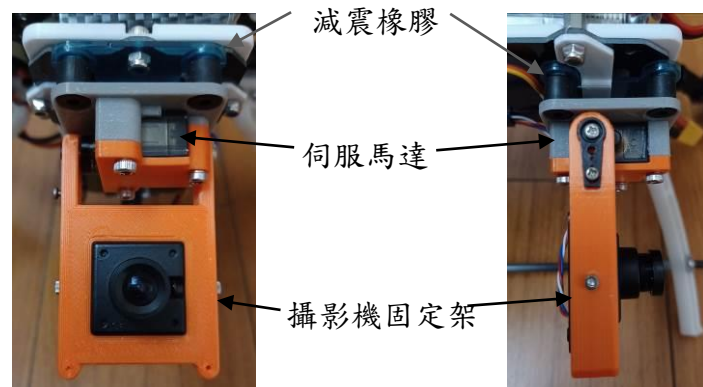
1. Pixhawk 飛行控制器
2. 遙控接收機
3. GPS 接收機與電子羅盤
4. 無線數據收發模組
5. OSD 模組
6. 無線視訊發射機

(b) 機載電子設備安裝

圖 3-1 四旋翼無人飛行載具



(a) 攝影機安裝及角度變化：(左)向下；(右)向前



(b) 單軸環架機構

圖 3-2 攝影機與環架安裝

3-2 紅外線熱影像牆面監測

使用無人機搭載紅外線熱影像儀進行測試之前，先在地面以手持或懸掛方式，以紅外線熱影像儀檢視實際磁磚牆面，以了解實測結果的樣態和可能遭遇的問題。實驗分為分為三階段：

1. 確認紅外線熱顯像儀檢測磁磚缺陷之可行性
2. 以自製混凝土磁磚牆面於實驗室內進行測試
3. 以校內建築物外牆進行戶外測試

3-2-1 紅外線熱顯像儀檢測磁磚缺陷之可行性

在現有建築物上，挑選具有明顯缺陷及完整貼合磁磚的外牆，以手持紅外線熱顯像儀進行檢測。確認可辨識缺陷的位置、範圍等基本辨識效能，並測試不同溫度下之實際顯像情況。經尋找相同構造且同時有磁磚完整貼合及缺陷狀況之建築物，以手持紅外線熱顯像儀進行檢測，操作情況如圖 3-3。此處外牆磁磚包含有明顯缺陷處(圖 3-3 左側)及完整貼合處(圖 3-3 右側)，所得到的實驗數據如圖 3-4，可看出缺陷處溫度都相較高於完整貼合處。



圖 3-3 確立紅外線熱顯像儀顯影情況

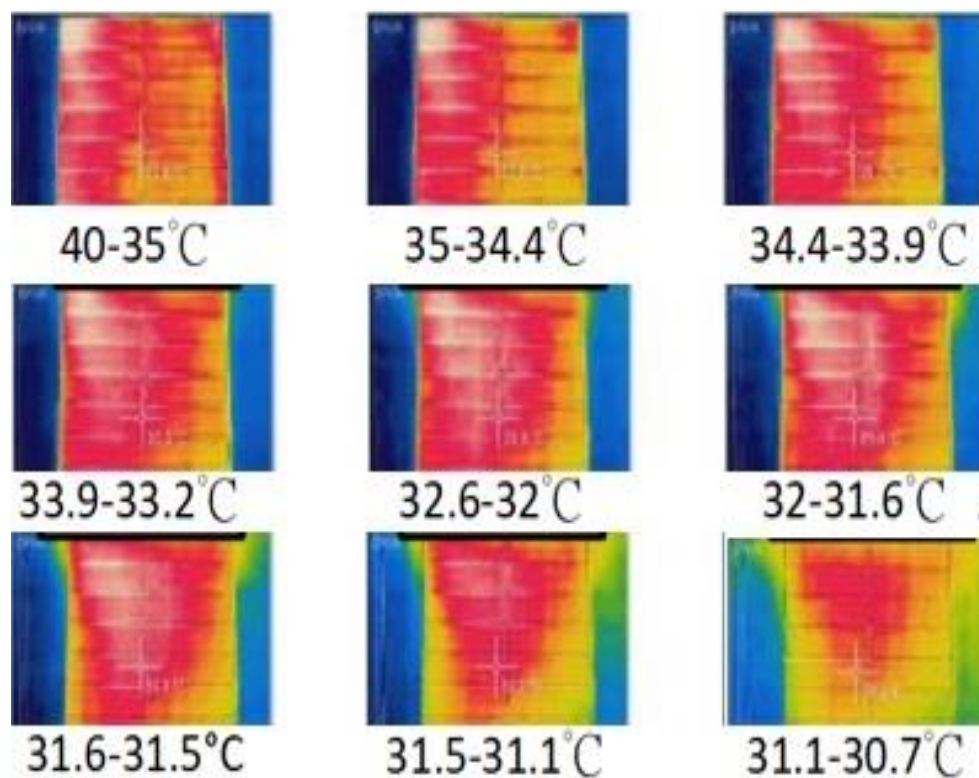


圖 3-4 紅外線熱顯像儀顯影結果

3-2-2 自製混凝土磁磚牆面室內測試

使用水泥、細沙自製混凝土牆面，貼上 10 片磁磚，並刻意將部分磁磚浮貼，以模擬一般外牆磁磚缺陷狀況。磁磚貼過程如圖 3-5。10 片磁磚分為兩組，一組為正常貼合於底部之混凝土牆，另一組則刻意保留部分位置沒有與混凝土牆密合，模擬一般牆面磁磚脫落前之狀態。配置方式如圖 3-6。

在室內以高功率燈泡照射，仿照戶外陽光照射，使牆面溫度上升，以紅外線熱顯像儀測量磁磚表面溫度的變化過程，如圖 3-7。圖中所示溫度為各組 5 片磁磚中心溫度之平均值。由於溫度上升速度不快，實驗設定為每分鐘記錄一次溫度。開始以燈泡照射前，牆面溫度與室溫相同，有缺陷與無缺陷磁磚的溫度分別為 31.8°C 及 31.5°C ，相差只有 0.3°C 。照射後溫度逐漸上升，溫度差也逐漸增加。在開始照射後 8 分鐘，兩種磁磚的溫度差達到最大值。有缺陷的磁磚溫度較高，比無缺陷磁磚高出 3.6°C 。後續兩者的溫差雖然略有增減，但不再繼續擴大差異，可以視為已達到穩定的情況。由此實驗結果可知，必須有明顯的輻射熱源對磁磚表面加溫，才能夠以溫差來區分牆面磁磚有無缺陷。如果沒有

熱源，兩種磁磚的溫度均接近室溫，無法分辨。有輻射熱源加熱後，需等待適當時間，才能分辨出明顯的溫差。而且有足夠長的加熱時間後，溫差將趨於穩定，不會再擴大差異。此特性可以作為實際檢測時的操作參考。



圖 3-5 測試用磁磚牆面製作

有缺陷磁磚	無缺陷磁磚
有缺陷磁磚	無缺陷磁磚
有缺陷磁磚	無缺陷磁磚
有缺陷磁磚	無缺陷磁磚
有缺陷磁磚	無缺陷磁磚
有缺陷磁磚	無缺陷磁磚

圖 3-6 測試牆面之磁磚貼合狀態配置

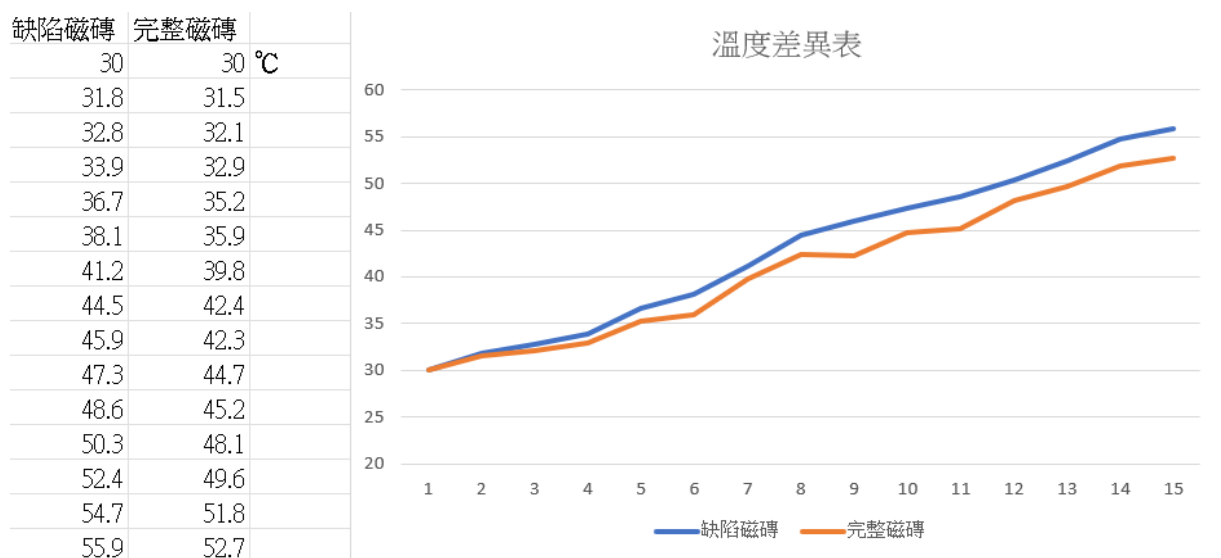


圖 3-7 以燈泡照射自製磁磚牆面之溫度變化過程

3-2-3 建築物外牆戶外測試

選擇校內建築物具有明顯磁磚缺陷的外牆，在晴天有陽光直接照射的位置，以紅外線熱顯像儀進行測試。由於無人載具尚無法在接近建築物位置穩定飛行，因此利用簡易懸掛設備固定紅外線熱顯像儀，由屋頂以垂降方式測量整個牆面上的磁磚溫度。測量情況如圖 3-8。

在同一牆面上的六個測量點，自上午 08:00 至下午 16:00 持續測量表面溫度之結果如圖 3-9。圖中磁磚 1 為損壞情況最嚴重，磁磚 6 為外觀最為完整的磁磚。自上午至下午的溫度變化與戶外的室溫較無關聯，主要與日照的輻射熱傳有關。因此在測量當日，中午氣溫並非最高，但所有測量的磁磚表面溫度在上午時段均持續上升，直到下午 14:40 以後才開始下降。所有測量的磁磚表面溫度均有此種變化趨勢。磁磚的損壞狀況可由溫度上升及下降的速度來判斷。磁磚 1 的溫度上升速度最快，在上午 10:00 左右即達到最高溫度；在下午 14:40 開始降溫，在 15:30 即降到所有測量磁磚的最低溫。



圖 3-8 實測傳道樓牆面

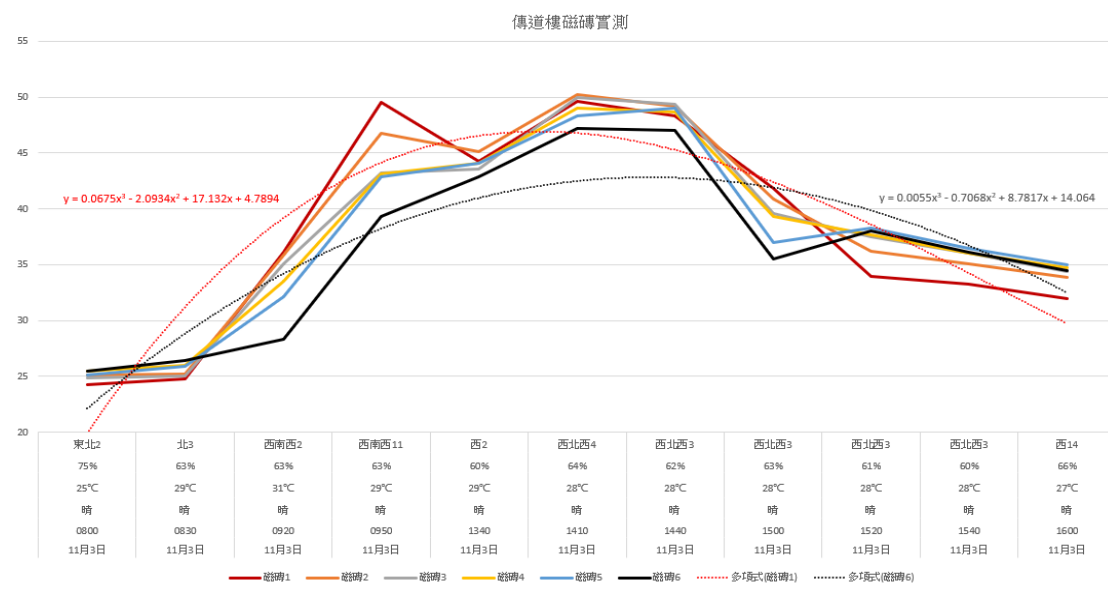


圖 3-9 建築物外牆磁磚溫度實測結果

第四章 結論

本研究主要針對無人飛行載具搭載可攜式紅外線鏡頭於瓷磚檢測之可行性進行探討，先以手持式紅外線熱顯像儀實驗確定方法可行，並建立相關研究基礎。目前結果如下：

- 1、以手持式紅外線熱像儀，進行非飛行模式之瓷磚有/無缺陷之試驗，紅外線辨識度佳。
- 2、檢測自製瓷磚有/無缺陷試驗時顯示，以燈泡模擬溫度上升繩鑑測結果顯示辨識率佳。
- 3、進行傳道樓長時間之數據統計時，發現當磁磚溫度處於上升階段時，溫度落差相較於下降階段明顯，且於 28°C 到 40°C 左右有明顯差異。
- 4、當瓷磚不能完全貼在牆上時，縫隙中的空氣會隨著環境溫度的變化而變化。當氣溫高時有缺陷的瓷磚溫度高於沒有缺陷的瓷磚；當氣溫低時有缺陷的瓷磚溫度則低於沒有缺陷的瓷磚。
- 5、紅外線熱成像系統在進行磁磚缺陷檢測，可區分缺陷脫層的大致範圍。
- 6、紅外線熱成像系統受風速、天氣、障礙物等環境因素的影響。
- 7、顯示本研究在靜止狀態可以辨視出瓷磚是否有剝落、脫層及損傷等可行性。

依據本研究獲得的實驗結果，顯示出以紅外線檢測磁磚溫度落差之可行性及未來展望性。後續若能夠確保無人飛行載具的飛行穩定性及足夠的滯空時間性能，可進一步在無人飛行載具上搭載紅外線熱顯像儀，執行無法容易到達的高樓層外牆檢測。此非破壞性檢驗方法一定能夠有效取代現階段的磁磚檢驗方式，以提升檢驗效率及降低人員安全疑慮。

參考文獻

4. 戴佩宜，「以打音法從事建築外牆瓷磚非破壞檢測之研究」，國立高雄大學，碩士論文，2008。
5. 林維明、黃兆龍、彭耀南、吳鶯榮，「海砂屋調查及分析」，防蝕工程，10卷2期，92-108頁，1996。
6. Vavilov, V. and Demin, V., "Infrared thermographic inspection of operating smokestacks," *Infrared Physics & Technology*, Vol. 43, pp. 229-232, 2002.
7. 陳俊菁，「應用紅外線攝溫影像術檢測磁磚黏貼完整性」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程學系，2004。
8. 林宏義，「建築物外飾材施工品質之非破壞檢測」，朝陽科技大學營建工程系碩士班，碩士論文，2005。
9. 連韋慶，「非破壞檢測技術於建築物缺陷檢測之應用研究」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，2008。
10. 林谷陶，「紅外線熱影像法於水泥砂漿材料老化溫度特性之檢測研究」，內政部建築研究所研究報告，2010。
11. 林谷陶，「紅外線熱影像法於外牆磁磚表面溫度檢測特性之實驗研究」，內政部建築研究所研究報告，2011。
12. 林谷陶，「紅外線熱像技術檢測外牆磁磚系統界面缺陷之可行性研究」，海洋大學材料工程，碩士論文，2014。
13. Colomina, I. and Molina, P., "Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, pp.79-97, 2014.
14. Krawczyk, J. M., Mazur, A. M, Sasin, T., and Stoklosa, A. W., "Infrared Building Inspection with Unmanned Aerial Vehicles," *Transactions of the Institute of Aviation*, No. 3(240), pp.32-48, 2015.
15. 陳瑞鈴、張奇偉、林鎮華、張竣堯、周楷峻、厲妮妮，「建築外牆瓷磚非破壞性檢測之研究以紅外線熱顯像技術結合無人飛行載具為例」，內政部建築

研究所協同研究報告，2017。

16. Boukoberine, M. N., Zhou, Z., and Benbouzid, M., “A Critical Review on Unmanned Aerial Vehicles Power Supply and Energy Management: Solutions, Stragies, and Prospects,” *Applied Energy*, Vol. 255, 113823, 2019.
17. Kishk, M.A., Bader, A., & Alouini, M., “Capacity and Coverage Enhancement Using Long-Endurance Tethered Airborne Base Stations,”. *ArXiv*, abs/1906.11559, 2019.
18. Kishk, M. A., Bader, A., and Alouini, M., “On the 3-D Placement of Airborne Base Stations Using Tethered UAVs,” *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 68, issue 8, Aug. 2020.
19. Bushnaq, O. M., Kishk, M. A., cCelik, A., Alouini, M., and Al-Naffouri, T. Y., “Cellular Traffic Offloading Through Tethered-UAV Deployment and User Association,” *ArXiv*, abs/2003.00713, 2020.
20. Saif, A., Dimyati, K., Noordin, K. A., MohdShah, N. S., Alsamhi, S. H., and Abdullah, Q. “Energy-Efficient Tethered UAV Deployment in B5G for Smart Environments and Disaster Recovery,” 2021 1st International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA), 1-5, 2021.
21. Xu, Z., “Application Research of Tethered UAV Platform in Marine Emergency Communication Network,” *Journal of Web Engineering*, Vol. 20-2, pp. 491-512, 2021.
22. Rico, D. A., Detweiler, C., Munoz-Arriola, F., “Power-over-Tether UAS Leveraged for Nearly-Infinite Meteorological Data Acquisition,” 2020 ASABE Annual International Meeting, 2020.
23. Kown, H. M. and Lee, D. K., “Modeling and Simulation of Heavy-Lift Tethered Multicopter Considering Mechanical Properties of Electric Power Cable,” *Aerospace*, vol. 8, no.208, 2021.
24. Xiao, X., Dufek, J., and Murphy, R., “Visual Servoing for Teleoperation Using a Tethered UAV,” *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2017.

25. Xiao, X., Dufek, J., and Murphy, R., “Benchmarking Tether-Based UAV Motion Primitive,” IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2019.
26. Xiao, X., Dufek, J., and Murphy, R., “Autonomous Visual Assistance for Robot Operation Using a Tethered UAV,” 12th Conference on Field and Service Robotics, 2019.
27. 林建宏、黃家揚，「創新科技應用-警用無人機系統」，政府機關資訊通報，第 360 期，2019。
28. Ardupilot Dev. Team, Ardupilot – Copter Home. Available:
<https://ardupilot.org/copter/>
29. Ardupilot Dev. Team, Mission Planner Home, <https://ardupilot.org/planner/>
30. Ardupilot Dev. Team, APM Planner 2 Home, <https://ardupilot.org/planner2/>
31. Dronecode Project, Inc., QGC - QGroundControl - Dronecode,
<https://qgroundcontrol.com/>
32. Teledyne FLIR, “FLIR ONE Pro-Series,”
21-0568-INS-MOBILE-FLIR-ONE-Pro-Datasheet- A4, 2021.
33. Zikou, L. and Papachristos, C., “Power-over-Tether: A Remote Powering System for Small Unmanned Aerial Vehicles,” 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation, pp.681-687, 2015.
34. Chang, K. H. and Huang, S. K., “Design and Implementation of a Tether-Powered Hexacopter for Long Endurance Missions,” Applied Science, Vol. 11, 11887, 2021.