

國立臺灣師範大學
資訊工程研究所碩士論文

指導教授：方瓊瑤 博士



使用無人空中載具之空拍影像
估計森林資訊—以茶園為例
Using an Unmanned Aerial Vehicle Imagery for
Estimation of Forest Information

研究生：何思漢 撰

中華民國 一百零五年 六月

摘要

近年來農村的勞動力流失已成為國內產業結構的嚴重問題。而糧食的自給率影響到一個國家的經濟結構穩定性。過去十年，在全球氣候快速變遷導致農作欠收的現況下，我國僅剩下三成的糧食自給率顯得岌岌可危。基於預防勝於治療的道理，積極的培養國內的農業發展並且提倡農業自動化的升級，透過農業生長監控的自動化等先進的農耕技術，都可以有效提升農業的產量，進而促進國內農業就業環境的健康發展。準確的測量生物量不僅有助於統計長期的收穫量，還能從生物量的評估中了解到如何調整農地的經營策略，如植物的含水量與灌溉的次數是否達到平衡、施肥肥力及除蟲除草藥劑劑量是否足夠。

本研究所提出的生物量自動監測系統主要是透過 training sample extraction、image segmentation、noise removing、image stitching 與 growth rate estimation 五個步驟來偵測覆蓋率。首先系統偵測影像中的混亂程度，接著利用 SLIC (simple linear iterative cluster) 演算法建立超像素，並利用混亂程度計算出變異閾值以篩選內部像點一致性高的超像素作為訓練集，接著使用 K-means 演算法將影像分割為茶樹與土壤兩類，再使用 SLIC (simple linear iterative cluster) 演算法建構更密集的超像素以投票的方式進行影像去雜訊，最後利用 GoPro 公司開發的 Kolor Autopano Giga 3.7 影像縫合軟體將茶園內不同區域的分割結果縫合成完整的茶園分割結果，並且經過比對不同時間點之茶園分割結果來估計茶園的成長率。

本研究不同於常見的衛星影像與航拍影像監測，改善了過去監測方式的缺點，使用無人飛行載具之空拍影像監測茶樹覆蓋率，得以少量的人力進行大範圍的監控。另外，針對不同的影像複雜程度使用的分割參數也不相同，自動的選擇分割參數讓系統在測量生物量時能更加準確。本研究設計了不同分割參數正確率分析、與自動選擇參數效率分析的實驗。實驗結果證實本系統可實現自動提供準確之良好分割參數且提供可靠且正確的生物量估計結果。在未來，長期記錄農業收穫量並建立常模，可以幫助耕作者與經營者快速判農地生長的情形，以便實施正確的農地經營策略。

關鍵字：生物量監測系統、無人空中載具、SLIC、K-means、影像處理。

Abstract

In recent years, the loss of rural labor has become a serious problem of domestic industrial structure. The self-sufficiency rate of food affect the structural stability of a country's economy. based on Prevention is better than treatment, actively cultivate and promote the development of domestic agricultural agriculture automated upgrade is very important. agricultural growth through automated monitoring and other advanced farming techniques, can effectively enhance the promotion of agricultural production, thus contributing to domestic agricultural employment environment healthy growth.

The system can be divided into five steps: training sample extraction, image segmentation, noise removing, image stitching and growth rate estimation. First, the system measure the impurity degree in the image, and then use SLIC (simple linear iterative cluster) algorithms to build superpixel, and using the impurity degree of confusion threshold to filter the internal consistency of superpixel as the training set, then using the K-means algorithm to segment tea and soil. And then use SLIC (simple linear iterative cluster) algorithm to construct more intensive super pixels to denoising by voting. Finally, system using GoPro developed image stitching software Kolor Autopano Giga 3.7 stitching segmentation results of different regions within the tea into a complete tea segmentation results, and after match tea at different points of time division results to estimate the growth rate of tea.

In this study, different from the common satellite image and aerial surveillance images, monitoring methods to improve the shortcomings of the past, system using unmanned aerial vehicle to shot images of tea garden. In addition, each image has different impurity degree. system need to using different parameters to segment image. system automatically selects parameters when measuring biomass can be more accurate. This study was designed experiment to analyze different partition parameter accuracy and efficiency of automatic selection parameter analysis of experiments. The experimental results show the system can automatically provide accurate segmentation parameters of good and provides reliable and accurate estimates of biomass. In the future, long-term record agricultural harvest and the establishment of norms that can help farmer and agriculturists to find the best policy.

Keywords: Biomass surveillance systems, UAV, SLIC, K-means, image processing.

誌謝

一本論文的完成，需要花費許多心血及時間，而本論文得以完成，首先要感謝我的指導教授方瓊瑤老師，甘冒極大的風險收留一隻誤闖森林的小綿羊(!)本著有教無類的精神孜孜不倦的教導在資訊領域中有如白紙的我。並在兩年的研究生涯中不厭其煩的耐心教導並給予建議，指出研究上不足之處並細心修改。老師除了教導我做研究的方法更教導我做人處事的道理，讓我學習到一些書本學習不到的觀念，兩年來雖然不敢說達到老師對我的期許，但在未來的日子裡我會加倍的努力，希望有一天老師也能以我為榮。接著感謝侯文娟老師及黃仲誼老師抽空審查我的論文並在口試時給予許多建議，讓我了解我的研究成果有何缺失並加以改進。

另外也非常感謝我的學長姊良謙、仲文、亦鈞及雯婷，感謝他們在忙碌的碩二生活中，仍花時間給予我許多學業上的建議及教導，讓我能安穩的走過徬徨的碩一生活。感謝我的研究室夥伴璩瑄、宇珊及士賢，謝謝你們與我一起辛苦奮鬥並與我相互討論，解決我許多生活及研究上的問題。感謝研究室的學弟妹雯琳及崇儒，謝謝你們協助我的研究並放鬆我的心情。另外特別感謝研究夥伴逸禮、冠宇及映文等人，謝謝你們陪我一起吃喝玩樂並在研究上給予許多寶貴的建議，少了你們的陪伴，我可能連走到一半的力氣都沒有，你們的關心與愛滋潤了我乾涸的心房，積極轉變態度認真向上。最後感謝桓僕和孟哲襯托出我羽球生涯的巔峰。

最後，感謝我的家人，在我煩悶時給我關心及鼓勵，讓我在研究過程中能無憂無慮並堅持下去，讓我的論文得以完成。謹以此論文獻給每位給予我幫助及鼓勵的人，那些打不倒我的，都使我更堅強，要謝的人太多了，就謝欣紘吧。

何思漢謹致

國立臺灣師範大學資訊工程研究所

中華民國 105 年 7 月

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
第 1 章 緒論.....	1
第一節 研究動機.....	1
第二節 空拍系統與應用領域之評估.....	6
第三節 研究困難.....	7
第四節 論文架構.....	8
第 2 章 文獻探討.....	9
第一節 生物量測量方法分析.....	9
第二節 影像分割技術的方法.....	11
第 3 章 生物量監測系統.....	14
第一節 系統目的.....	14
第二節 研究環境與設備.....	14
第三節 系統流程.....	16
第 4 章 茶樹偵測與分割參數決定.....	20
第一節 訓練集的篩選.....	20
第二節 影像分割.....	24
第三節 去除雜訊.....	31
第四節 影像縫合.....	31
第五節 成長率估計.....	32
第 5 章 實驗結果.....	34
第一節 參數選擇分析.....	35
第二節 參數準確度分析.....	36

第三節	不同尺寸影像之覆蓋率分析.....	43
第 6 章	結論與未來工作.....	45
第一節	結論.....	45
第二節	未來工作.....	45
參考文獻.....		47
附錄 A	DJI Phantom 4 規格.....	50



圖目錄

圖 1-1 台灣各地區農業就業人數變動趨勢圖	1
圖 1-2 農業人口分齡增減直方圖	3
圖 1-3 不同寬窄植栽距離對淨生長量之影響	4
圖 1-4 青心大有近拍與鳥瞰圖	5
圖 3-1 實驗環境示意圖	14
圖 3-2 實驗設備示意圖	15
圖 3-3 貓空茶園高空拍攝影像圖	15
圖 3-4 貓空茶園低空拍攝影像圖	15
圖 3-5 視覺式生物量監測系統之流程圖	16
圖 3-6 HSV 色彩空間分群結果	17
圖 4-1 排列位置示意圖	21
圖 4-2 不同場景中土壤與茶樹的影像	25
圖 4-3 茶樹與土壤影像之像點於四個色彩空間分布結果	27
圖 4-4 HSL 色彩空間與 HSV 色彩空間在值為 1 時之色彩分布圖	27
圖 4-5 HSV 色彩空間分群結果	28
圖 4-6 City block distance	29
圖 4-7 相同 Euclidean distance 不同 city block distance 之範例	29
圖 4-8 HSV 色彩空間分群結果	30
圖 4-9 輸入影像去除雜訊結果	31
圖 4-10 茶園低空拍攝飛行路線	32
圖 4-11 茶園定位點	33
圖 5-1 茶園空拍影片	35
圖 5-2 小圖 1 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖	35
圖 5-3 小圖 2 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖	36
圖 5-4 小圖 3 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖	36
圖 5-5 茶園空拍影片	39

圖 5-6 Video 1 縫合結果.....	44
圖 5-5 Video 5 縫合結果.....	44
圖 5-5 Video 10 縫合結果.....	44
圖 5-5 Video 11 縫合結果.....	44



表目錄

表 1-1 全球農業就業人口百分比(按地區佔總就業人口的比重).....	2
表 1-2 國內就業者之行業分配結構.....	2
表 1-3 茶葉品種成績列表.....	5
表 1-4 空拍系統應用分類表.....	6
表 4-1 不同參數組合之 superpixels 刪除率.....	24
表 5-1 電腦之硬體配備規格.....	34
表 5-2 空拍影像飛行高度.....	34
表 5-3 分群數量 K 窮舉錯誤像點量表.....	37
表 5-4 中圖 1 刪除率.....	38
表 5-5 中圖 1 錯誤像點數.....	38
表 5-6 中圖 1 正確率.....	39
表 5-7 中圖 2 刪除率.....	40
表 5-8 中圖 2 錯誤像點數.....	40
表 5-9 中圖 2 正確率.....	41
表 5-10 中圖 3 刪除率.....	41
表 5-11 中圖 3 錯誤像點數.....	41
表 5-12 中圖 3 正確率.....	42
表 5-13 不同尺寸影像覆蓋率.....	43
表 5-14 縫合結果覆蓋率正確率.....	43

第1章 緒論

第一節 研究動機

近年來農村的勞動力流失已成為國內產業結構的嚴重問題。觀察台灣各地區農業就業人數如圖 1-1。2002 年以來台灣各地區農業就業人數均呈現減少趨勢，直到 2006 年左右才趨於穩定。尤其在 2002 年 1 月 1 日加入 WTO 世界貿易組織以來，僅有 70 萬人左右的務農就業人口數平均每年減少兩萬九千人，目前務農就業人口數約為 55 萬人左右。務農就業人口數不斷萎縮的主因是海關開放後，國內脆弱的農業環境禁不起世界農業大國的競爭，少了關稅的制約，國外同等品質的進口農產品加上運費後售價可能還遠低於國內自產的農產品。隨著國外農產品挾帶規模經濟的優勢與精良農業技術叩關，多元的農產品稀釋了我國主要經濟作物的市場，並改變國人飲食習慣。另外，原本就與我國重疊的農產品低價傾銷無疑是對國內的農業環境雪上加霜。

依國際勞工組織(International Labour Organization)1991 年至 2013 年統計資料如表 1-1，已開發國家和歐盟等先進國家農業就業人口約佔 3.6%，而根據行政院農委會公布結果 [1]，近年來國內農業就業人口所佔比重持續下降，由表 1-2 顯示國內 104 年農業就業人口約佔 4.43%，使台灣越來越接近先進國家比例，達已開發國家之水準。另查鄰近東亞國家平均之農業勞動力比重，也由 1991 年之 56.8 %下降至 2013 年的 30.3%，同樣處於下降的趨勢。

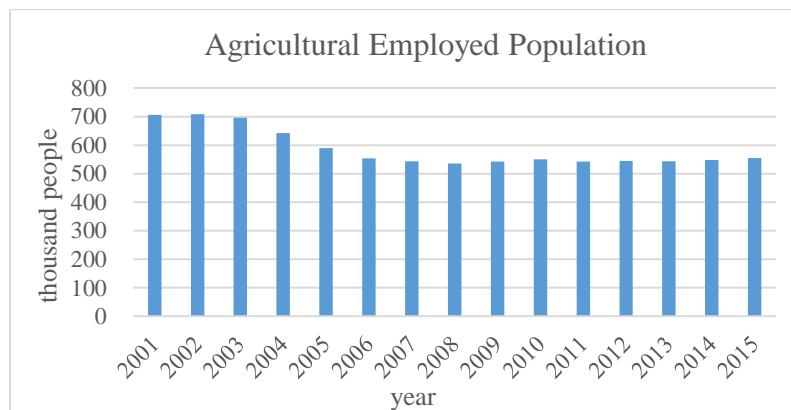


圖 1-1 台灣各地區農業就業人數變動趨勢圖 [1]

表 1-1 全球農業就業人口百分比(按地區佔總就業人口的比重) [2]

Region	1991	2013	% Change
World	44.5	31.3	-29.7
Development Economies & EU	6.9	3.6	-47.8
Central & SE Europe (non-EU) & CIS	28.8	17.7	-38.5
East Asia	56.8	30.3	-46.7
South-East Asia & the Pacific	58.9	39.3	33.3
South Asia	62.1	46.3	-25.4
Latin America & the Caribbean	24.7	14.8	-40.1
Middle East	24.5	14.3	-41.6
North Africa	34.9	28	-19.8
Sub-Saharan Africa	65.9	62	-5.9

表 1-2 國內就業者之行業分配結構 [3]

	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年
民代及主管人員	4.06	3.89	3.69	3.56	3.46
專業人員	11.16	11.46	11.73	12.03	12.23
技術人員	18.27	17.96	17.89	17.96	18.03
事務支援人員	11.09	11.25	11.23	11.23	11.15
服務及銷售工作人員	19.48	19.51	19.66	19.55	19.48
農事生產人員	4.63	4.55	4.49	4.45	4.43
生產操作及勞力工	31.3	31.38	31.32	31.22	31.22

除了農業就業結構所佔比重持續下降之外，從事農業人口的老化也是一大隱憂。如圖 1-2 所示，壯年的務農人口持續下滑，而 60 歲以上的老農人口卻持續攀升。由圖 1-2 可知農村勞動力不斷的流失，與農民收入不穩定的環境形成一種惡性循環，導致國內糧食自給率的萎縮，這無異敲響了國內農業體質衰弱的警鐘。

不同於我國面臨農業人口老化的窘境，先進國家在同樣的危機下農業產量與收入不減反增的根本原因在於政府主動提倡透過農業技術的改良來提升農產品附加價值及勞動生產力，重視農產品技術研發及行銷，這些政策都十分值得效法。以地廣人稀的美國為例，工業化啟動以前，農業勞動力占社會總勞力的比重在 70% 以上，而到了 19 世紀末，該比重已降至 40% 以下。從 1910 年開始，美國的農業勞動力供給出現相對減少(占國內就業者之行業分配結構比例下滑)和絕對減少(國內農業就業人口數減少)並存的現象。20 世紀 70 年代以後，美國農業勞動力減少速度顯著減慢，這顯示美國農業勞動力在完成大規模轉移後，進入緩慢穩定的轉移階段。

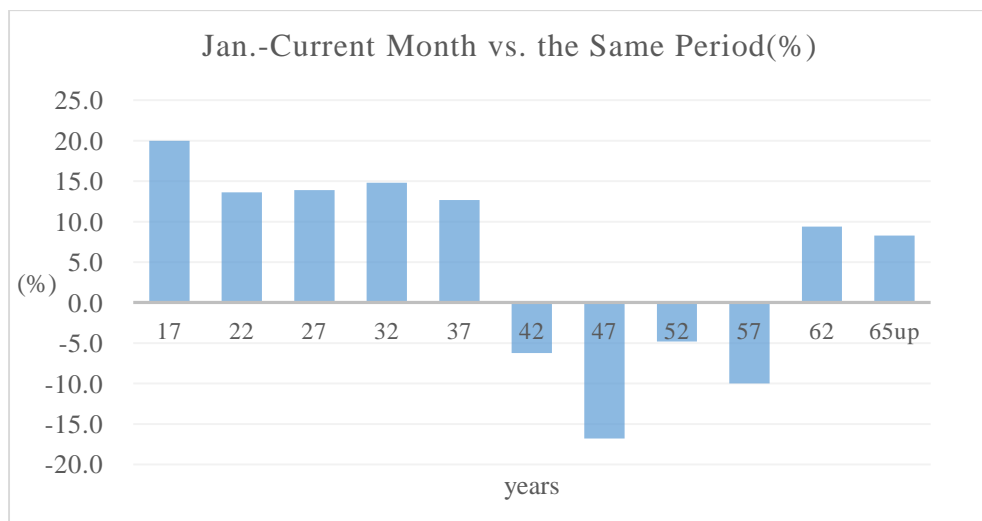


圖 1-2 農業人口分齡增減直方圖(%)

為因應農業勞動力大幅減少的現狀，農事生產者紛紛大量採用機器以降低成本，提高競爭能力，配合現代工業革命利用先進的科學技術和生產要素強化農業發展力。從根本的生物技術(生物製劑、生物農藥、生物肥料等)，促進農業的機械技術(感測機械、耕作機械、包裝機械、預冷機械、運輸機械等)，提升工程技術(工程構架材料、工程塑料、覆蓋材料、節水工程等)，結合自動控制與感測技術(光、溫、水、氣自動監控，機械自動化控制等)，加入現代資訊技術(技術資訊、產品資訊、市場訊息、生產資訊)，改良從上游生產到中間的運輸倉儲，最後整合市場的企劃行銷，這些農業相關面向的配合與改善無一不是農業競爭力之所以提升的主要原因。

在國內糧食作物難以抗衡國外農產品低價傾銷的情況下，部分本國的農事生產者轉而種植高單價、高技術門檻的經濟作物，如農業產值排行前三的檳榔與茶葉。其中檳榔又以內銷為主，所以茶葉就成為國內農產品出口的大宗。在 102 年調查報告中顯示，國內茶葉每年生產 14,000 公噸，茶葉總產值共約 1,500 億以上，罐裝飲料業約 250 億，餐飲業、泡沫飲料約 1,000 億，外銷約 13 億，內銷禮品及小三通 180 到 250 億，儼然成為國內不可或缺的農業經濟主要收入來源。

因此，本研究認為茶園生長監控的自動化可以提升茶葉的產量，亦可以降低農事生產者的工作負擔，是一個值得研發的議題。其中農事生產者需要監控茶園內的鬱閉度(cover rate)、生長量與枯損量(volume growth)，這些植生指數是反映林分密度(單位面積上林木疏密之程度)以及提供建立生長與收穫模式的指標。

農事生產者希望能建立生長與收穫模式的理想資料，需要有數個基於相同或類似環境條件且具有由建造到收穫伐採的完整年度的林分記載資料，稱之為真實生長序列(real growth series)。然而因為長時間的收集工作相當困難，當可供利用的永久樣區資料不足時，則使用涵蓋區域、林齡較廣範圍的臨時樣區，以空間換取時間的資料，這樣的林分資料稱為抽象生長序列 (abstract growth series)。

鬱閉度直接影響了平均的栽植距離。以茶園為例，在其他條件相同的情況下，不同的茶樹栽植距離會擁有不同的(淨)生長量與(淨)枯損量如圖 1-3。以茶園經營的角度而言，透過已知的生長序列可以精算出最佳的累計生長量，也就是圖 1-3 中曲線與橫軸所截面積。根據不同的採收時間點與茶樹樹種，會有不同的最佳策略；比如短作期的茶樹就適合較窄的栽植距離。因為在茶樹間過分影響彼此受光面積、養分競爭與根系空間之前，就已經完成收穫，故較窄栽植距離可確保單位面積產出最大生產量。反之，若是長作期的茶樹就適合較寬的栽植距離，給予茶樹足夠的生長空間才能保持最佳的生長速率，也省下需要不斷移植擁擠的茶樹的人力且避免移植過程中茶樹死亡的風險。

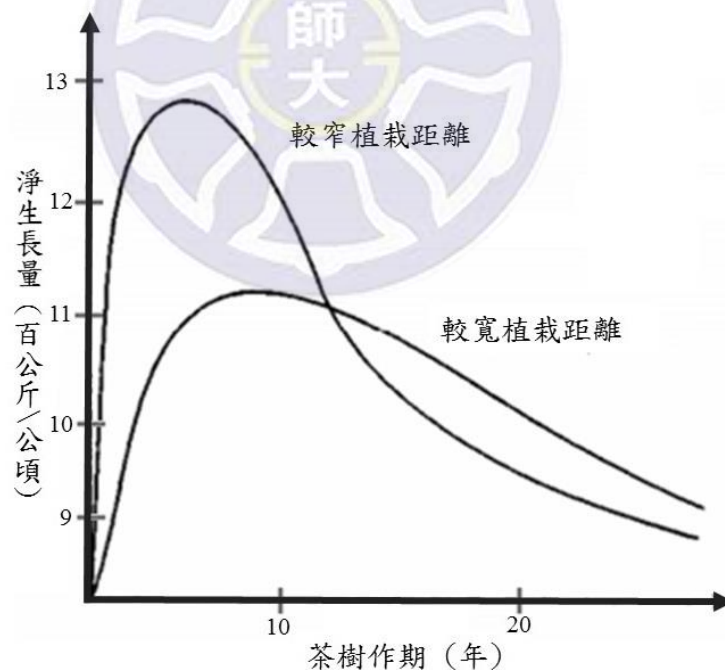


圖 1-3 不同寬窄植栽距離對淨生長量之影響 [4]

本研究提出的空拍影像分析系統便是針對農業技術的改良與更有效率的人力資源運用來做改善的目標，結合了現代化的運輸機械與資訊技術達到遠端監控的自動控制，並自動調整適合目標樣區的分類群數(K-means)、超像素個數

(superpixel- N)以及對於超像素內部變異數的篩選閾值(Variance- Var)，透過遙感探測的技術利用無人飛行載具蒐集農地資料，以線下(off-line)運算的方式估計出農地的鬱閉度(覆蓋率)、生長量與枯損量，以供農事生產者即時針對農地現況做相應的調整，規劃出適合不同樣區的灌溉方式與理想的栽植疏密程度。

然而這些精緻化的農業管理所需空拍影像常受限於複雜地形或是高海拔地區的雲霧遮蔽。傳統衛星與載人空載所拍攝的影像，容易受到天候條件、攝影週期與人員安全性等多種條件限制，無法即時取得樣區影像資料，進而延誤茶園經營管理所需的一些即時資訊。故如何在特殊環境及氣候條件下，發展一套可安全可靠取得樣區資訊的空拍系統確實有其必要性。

因此本研究實驗的茶園以青心大有作為主要的實驗對象，根據台大種子研究室 [5]提供的資料，台灣的茶樹品種以青心大有、大葉烏龍與青心烏龍最適合製造綠茶，其中又以青心大有最佳。如表 1-3 所示，單一評分項目的滿分為 15 分，總分最高為 75 分。在色澤、水色、香氣與滋味的分數評比下，可以看出青心大有的確是台灣重要的茶葉品種之一。

圖 1-4 為青心大有外觀。青心大有學名為 *Camellia sinensis*，樹形中等，葉長橢圓形，葉鋸齒緣，葉厚稍硬呈暗綠色，中肋明顯，幼葉紫紅色密生絨毛。

表 1-3 茶葉品種成績列表 [5]

品種名稱	形狀	色澤	水色	香氣	滋味	總分	位次
青心大有	14.9	14.4	13.8	13.6	14.3	71.0	1
大葉烏龍	14.4	14.2	14.5	13.3	14.0	70.4	2
青心烏龍	14.4	14.1	14.2	13.4	13.9	70.0	3



圖 1-4 青心大有近拍與鳥瞰圖

青心大有身為我國重要的茶葉品種之一，對於國內茶園的經營具有一定的代表性，且在台北近郊的貓空也有青心大有的茶園，使得實驗過程中能夠頻繁上山拍攝連續時間下茶園生長變化的實驗影片。貓空的茶園空間開闊、光線充足，很適合無人飛行載具進行拍攝工作而不會受到周圍林木的遮蔽拍攝視角或阻礙飛行路線。因此，本研究選擇貓空的青心大有茶園做為主要的實驗對象。

第二節 空拍系統與應用領域之評估

空拍系統是近年來遙感探測技術發展出的一個主要應用。遙感探測(remote sensing, RS)指在不與某物體、某區域或某現象做直接接觸之狀況下，透過如空中載具(aircraft)或太空承載(spacecraft)等類型之感測器自一段觀測距離外，蒐集地球表面上或接近地球表面的各種環境資料。空拍系統則是以空中載具作為主要的拍攝工具。

經由空拍系統所獲得的資料經過整理與分析處理後，可進而將其轉換成有用的資訊。如提供國土規劃、土地利用調查、救災防災、環境與污染監控、資源探勘、地質分析等，應用範疇十分廣泛。

表 1-4 空拍系統應用分類表

	Categorical value	Example of activity
1	Area of mobility	Air Ground Water
2	Area of application	Military Industry Surveying Agriculture Aquaculture Forestry
3	Application	Mapping Monitoring Scouting Applying
4	Processing	
5	Data analysis	Online Offline
6	Level of data fusion	Regression Classification Data mining (Low Intermediate High)
7	Software architect	Modular Blackboard Control Multi-agent Component Dataflow Redundant Complementary Cooperative
8	Sensors set	Active Passive
9	Sensing activity	
10	Method	Optical Thermal Electrical Magnetic Acoustic Mechanical Chemical (Small / Light Medium Large / Heavy)
11	Platform size	
12	Propulsion	
13	Automation degree	Electric Combustion Manual Automated Autonomous

空拍系統中所使用的空中載具又可分為一般空中載具(直升機、偵察機等)與無人飛行載具(unmanned aerial vehicles, UAV)。本研究使用無人飛行載具開發的系統在國際民用航空組織(ICAO)中又被廣泛定義為遙控無人駕駛飛機系統

(remotely-piloted aircraft systems, RPAS)。空拍系統目前常用的領域可劃分如表 1-4。空拍系統的應用區域可分為陸、海、空三類；產業類別則可分為軍工測量、農業、水產養殖業與林業等；應用方式則分為測繪、偵察、監控與其他應用；資料的分析方式可分為即時分析與線下分析兩類；傳感器則可以分為主動與被動兩類；飛行器的動力可分為燃燒馬達與電動馬達兩類；影像的種類又分為光學影像、熱影像、電磁影像與化學影像等。

空拍系統的應用最初被認為是用來克服汙染、枯燥和危險的技術。例如，在受汙染的情況下，以無人飛行載具探勘放射性污染的災情(例如已實際應用飛行勘災的福島反應爐損毀事件)。或者將無人機應用在枯燥重複的行為上，包括國界邊境的巡航和數位地形模型(DEM)的建構。近年來無人飛行載具的成本不斷下降，無人飛行載具也開始擁有更長的飛行時數，藉著無人飛行載具可在低空飛行提供較高的解析度的特性，使得研究者能夠針對更細部的特徵作分析。

目前我國已經將空拍系統應用在颱風，森林野火等天然災害的災後第一時間災情探勘。相對於衛星監控、航空拍攝以及人力調查等其他替代方案，無人飛行載具的使用大幅的降低成本，不論是作為一種可行的替代方案或是用來結合補強目前所使用的調查方式都是很好的解決方案，因此本研究採用無人飛行載具的空拍影像來進行生物量的自動監測。

第三節 研究困難

傳統衛星影像與載人空載拍攝影像相對於無人飛行載具而言較不容易受風速所影響，飛行高度十分穩定。但是無人飛行載具在風速較大的飛行環境下難以穩定的保持相同飛行高度，導致無人飛行載具的空拍影像解析度不穩定，在影像拼接的過程中會造成影像模糊。

不同的天氣也會對拍攝造成影響，受到機體本身的限制，在沒有防水的設計下只能在晴天進行拍攝任務，而不同季節不同程度的光照也會造成影像亮度值的改變。不同角度的日照則會改變周遭景物的陰影遮蔽目標區域的分布情況，有無陰影遮蔽會造成影像分割上的混淆。

另外，無人飛行載具機體所產生的陰影也會對偵測結果造成干擾。拍攝無人飛行載具空拍影像時所設定的飛行路徑與路徑間重疊的比率都會直接影響到最

終的拼接成果，如何去找到適當的飛行路徑就成為值得研究的課題。

在計算鬱閉度的過程中，本研究發現針對不同的拍攝場景下亮度的變化、土壤表面濕度的顏色深淺，會造成影像在擁有不同的尺寸、複雜程度下需要使用不同的分割參數才能有較佳的分割結果；如何針對不同拍攝場景自動獲得較佳的分割參數就成為本研究的主軸之一。

第四節 論文架構

本論文共分為七章，第一章說明本研究的動機與研究困難；接著第二章為文獻探討，此章將比較各種測量工具的優劣，以及採用視覺系統分析常見生物量可能使用到的技術與基礎理論；後續會在第三章說明本研究的目的與研究環境以及設備使用限制，並包含系統流程之概述；第四章則詳細解說本系統如何從畫面中找出目標樹種區塊來建立背景模型。繼而細述系統如何計算兩個時間點之間的植物生長量與枯損量；而第五章將分別闡述本研究所使用的特徵。第六章則是實驗結果展示，探討系統流程中每一個重要步驟的必要性與正確率；最後，第七章為結論和未來工作。



第2章 文獻探討

在生物量的自動監測系統開發之前，必須先了解目前主流的偵測方法並分析可行性。本研究文獻探討部分分為生物量的偵測方法分析與樹種特徵擷取兩節進行討論。第一節針對目前各研究單位所使用的生物量測量方法進行分析，並說明各種測量方式的優缺點。第二節將詳細探討影像分割技術的發展與應用。

第一節 生物量測量方法分析

森林生物量可通過直接測量和間接估算兩種途徑得到 [6]：前者為收獲法，該方法雖然準確度最高，但對生態系統的破壞性大且耗時費力；後者則是利用生物量模型(包括相對生長關係和生物量蓄積量轉換模型)、生物量估算參數及 3S 技術(遙感技術 remote sensing, RS)、地理信息系統(geography information systems, GIS)和全球定位系統(global positioning systems, GPS)的統稱等方式進行估算，其中生物量蓄積量轉換模型(volume-biomass model)和生物量估算參數在大尺度森林生物量的估算中得到廣泛的應用 [7]。

(A) 相對生長關係

相對生長關係為植被結構和功能特徵指標(如：材積、生物量等)與一些可直接測量的植株型態學變量(如：胸徑、樹高等)之間數量關係的統稱。在森林生態系統的生物量和生產力估算中，相對生長關係是最常見的方法 [8]。

相對生長關係的建構通常採用平均標準木法或徑級標準木法，先以破壞性收獲法測量有限數量的標準木，然後建立全部或部分生物量與可直接測量的植株形態學變量(如：胸徑、樹高等)間的數量關係 [9]。

可直接測量的自變量除了胸徑、樹高以外，還包括樹齡、材積等測量因子。雖然增加自變量種類可以讓生物量的估計更加準確，但是也會大幅增加野外調查時取得調查數據的難度，進而降低生長模型的實用性。

目前生物量模型的研究大致分為兩種方向。首先是針對特定樹種與相似環境條件下利用實驗數據歸納出相對生長關係的方程式 [10][11]；或者是基於生物能量學、分類幾何學等理論嘗試著去解釋整個生物界的相對生長規律，最終推斷出相對生長現象的本質 [12]。

(B) 生物量蓄積量轉換模型(volume-biomass model)

在森林的生物量組成中，樹幹生物量(如：葉綠素濃度)所佔比例因不同樹種和環境條件而有所不同 [13]。蓄積量則是指森林面積上生長著的林木樹幹材積總量。由於樹幹的生物量和蓄積量存在很強的相關性 [14]，也奠定了生物量與蓄積量的相關性與生物量估算參數的理論基礎。

起初研究者普遍認為能夠找到生物量與蓄積量的一個常數的比值 [15]，後來發現以一個恆定的常數來代表生物量與蓄積量的比值不甚恰當 [16]，於是建立了一種與樹齡無關的生物量蓄積量線性關係。

但是有許多的森林類型並不具有足夠的樣本數量來建立與樹齡無關的生物量蓄積量線性關係。於是有些研究者嘗試改進原有的線性模型或建立新的關係模型來重新建構生物量與蓄積量之間的關係。

Pan 等人 [17]提出一種基於齡級的生物量蓄積量線性轉換模型，改進了與樹齡無關的生物量蓄積量線性轉換模型，明顯的改善了生物量估計的準確性。該模型的方程式如下：

$$B_1 = a + bV \quad (2.1)$$

其中 B_1 為生物量(biomass)， V 為蓄積量(volume)， a 、 b 為常數。Zhou [18]則重新建立了一種生物量蓄積量雙曲線轉換模型來從森林資源調查估計生物量與植物淨初級生產力。該模型的方程式如下：

$$B_2 = V / (a + bV) \quad (2.2)$$

其中 B_2 為生物量(biomass)， V 為蓄積量(volume)， a 、 b 為常數。另外，Smith [19]提出了一種生物量蓄積量指數轉換模型來估計樹冠的存活率。該模型的方程式如下：

$$B_3 = a - be^{-cV} \quad (2.3)$$

其中 B_3 為生物量(biomass)， V 為蓄積量(volume)， a 、 b 和 c 為常數， e 為 Euler's number。Huang [20]則提出了另一種生物量蓄積量冪函數轉換模型來估計四川的森林碳含量變化趨勢。該模型的方程式如下：

$$B_4 = aV^b \quad (2.4)$$

其中 B_4 為生物量(biomass)， V 為蓄積量(volume)， a 、 b 為常數。

Zhou 與 Zhao [21] 等人建立了下列五種森林類型的生物量蓄積量雙曲線轉換模型：落葉松(*Larix spp.*)天然林、油松(*Pinus tabulaeformis*)人造林、馬尾松(*Pinus massoniana*)人造林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*) 人造林和楊樹(*Populus spp.*)人造林；其他森林類型是否適用於該生物量蓄積量雙曲線轉換模型仍需要再經由更多實驗來驗證。

(C) 生物量轉換參數

生物量轉換參數主要包括下列四種：生物量轉擴因子(biomass conversion and expansion factor, BCEF)、生物擴展因子(biomass expansion factor, BEF)、根莖比(root-shoot ratio, RPS) 和木材密度(wood density, WD) [22]。

生物量轉換參數的發展可分為平均生物量轉換參數與連續生物量轉換參數兩個階段。平均生物量轉換參數是利用相同森林類型的生物量轉換參數的平均值或一區間來估計森林生物量 [23]。然而研究顯示生物量轉換參數不僅隨著森林類型變化，即便在相同森林類型中生物量轉換參數也會隨著齡級、林分密度等條件而變化 [24]。

於是 Fang [25] 等人建構了連續生物量轉換參數。所謂連續生物量轉換參數即是以齡級、蓄積量、器官生物量(即根據不同器官如根、莖、葉作為統計標的)等指標為變數計算生物量轉換參數的連續函數關係。這種連續函數關係讓研究者可以利用材積來估算各種生物量，使得材積數據的取得具一定的重要性。

總而言之，基於生態永續發展的概念下盡量避免破壞性的直接收穫法一直是所有生態學者的共識，然而如何利用最少的人力獲取大量的資料，利用轉換的方式將容易取得的生物量轉換成各種樣區經營所需要的資訊就是本研究欲達成之目標。由於目前研究者更傾向於利用生物量蓄積量轉換模型將材積轉換為各種樣區經營所需的生物量，而材積數據則可以利用鬱閉度進行換算，於是本研究著重於利用無人飛行載具取代人力的方式來獲得鬱閉度的資訊。

第二節 影像分割技術的方法

影像分割的目的是將具有類似特徵的區域擷取出來，藉此減少原始影像的數

據量使其更容易分析與計算。主要的方法可以分成三類：(A)邊緣分割法、(B)像素分割法和(C)區域分割法。

(A) 邊緣分割法

邊緣分割法即是使用邊緣偵測的方式來確定物體的邊界，並將邊界分析與修改後形成的封閉區域來作為影像的分割結果。在 Canny [26]提出的邊緣偵測方法中，將輸入影像根據水平、垂直以及兩個對角線四個方向計算每個像點的亮度梯度值。假設具有較高的亮度梯度值的像點比較有可能成為影像中物件的邊緣，且影像中重要的邊緣都是連續的，為了盡量避免將非邊緣的雜訊當作邊緣，需要使用兩個高低不同的閾值來確認物件的邊緣。首先利用高閾值標示出一些可信度較高的邊緣，接著做邊緣跟蹤(Edge tracking)，從已知的邊緣出發利用低閾值跟蹤較模糊的邊緣，直到回到該邊緣的起點。這種邊緣偵測方法的優點是可以有效的偵測影像中的邊緣，雜訊少，且不易有座標偏移的問題；缺點是當物件的邊緣出現銳利的夾角時，容易出現邊緣斷裂的情形，且由於該方法結合了四個不同方向的偵測結果，針對不同的影像類型做邊緣偵測時，會需要不同的結合比例才能夠達到最佳的分割效果。

(B) 像點分割法

像點分割法則是針對輸入影像中的每個像點直接做分群，最後再將分群結果輸出成為分割影像，以 *K*-means 演算法和天津演算法(Otsu's method)為例。

M. Sezgin [27]使用天津演算法將灰階影像退化為二值化的影像，首先將輸入影像的每個像點根據亮度值建構成直方圖，接著窮舉所有將影像分成前景與背景兩類的閾值，並且取出使得前景、背景兩群像點中群內變異數最小的閾值作為輸出閾值。由於窮舉了所有的分割閾值，所以天津演算法可以在未知前景與背景在影像中所佔比例的情況下做出最佳的分割，但是缺點是容易受到雜訊的影響，且需要窮舉所有可能閾值，時間複雜度較高。

Zhao [28]使用 *K*-means 演算法來分割彩色影像。在使用 *K*-means 演算法分割影像時，必須先指定群的數量並且給定初始的群中心(cluster centers)。然後計算每個群中心的位置，接著計算每個資料點與這些群中心的距離，並根據最小距離重新對資料點進行分群，再重新計算群中心位置，反覆上述步驟直到每個群中心位置不再發生變化為止。

K -means 演算法其主要目標是要在大量資料點中找出具有代表性的資料點，這些資料點就是群中心，然後再根據這些群中心進行資料分類。此演算法的優點是計算時間少，且分割精確可避免雜訊的不良影響。缺點則是分割結果破碎且分散，不具空間上的相關性，而且需要事先知道分群數量，且分群數量的多寡會直接影響最後輸出分割結果準確性。

(C)區域分割法

像點經由事先定義的相似性條件由初始的種子點向四周擴張，使相似的區域互相結合，最終形成數塊群內具有高度相似性的影像分割。目前普遍使用的是 SLIC 演算法(simple linear iterative cluster)。

Achanta [29]提出的 SLIC 演算法主要用來生成超像素(superpixel)。首先定義相似度函數為影像中的色彩特徵與距離的差異，並在影像中給定 N 個距離均勻的種子點，然後在每個種子點的周圍空間搜索相似值高的像點，將它們與該種子點歸為同類，直到所有像點都歸類完成。然後計算這 N 個超像素裡所有像點位置平均向量值，重新得到 N 個聚類中心，然後再以這 N 個中心去搜索其周圍與其最相似的像點，所有像點都分類完成重新得到 N 個超像素，更新聚類中心，再次迭代，如此反覆直到收斂。SLIC 演算法的優點在於參數簡單，只需要一個參數 N ，且生成超像素大小一致，整齊緊湊且分割效果佳；缺點是超像素個數 N 需要人為給定，很大程度上依賴實際經驗，且超像素個數 N 的選擇會直接影響到影像分割的效果。

綜合上述探討，本研究利用 K -means 演算法與 SLIC 演算法結合成的 SLIC- K -means 演算法進行影像的分割。首先利用 SLIC 演算法將影像畫分成 N 個超像素，根據影像的混亂程度(entropy)可以自動計算出適合的變異數閾值 T_{var} 篩選 N 個超像素。經過篩選後保留變異數較小的區域接著進行 K -means 演算法運算，最後利用分群的結果將影像分為前景跟背景兩類。優點是在進行 K -means 演算法運算之前刪除了介於前景與背景之間的模糊區塊，利用性質較一致(變異數較低)的前景與背景的區塊進行分類，將使得分類結果更加準確。

第3章 生物量監測系統

第一節 系統目的

本論文所提出之視覺式生物量監測系統，目的在於針對高經濟價值的精緻農業提供即時且準確的資訊，利用無人空中載具的空拍影像，長期觀察樣區生物量變化趨勢，監控目標物種的生長情況。藉此得知目標物種產量的多寡、灌溉量是否充足與其他天然災害的災損，幫助經營者在管理產區的過程更加有效且安全。

第二節 研究環境與設備

本系統實驗環境如圖 3-1 實驗環境示意圖所示，該地區為台北市郊山區的茶園，圖中淺藍色區域即為待監控的樣區範圍，相當於樣區的面積大小。橘色的區域則為返航點與定位點。本研究所需要的設備(包含停機坪與筆電)架設在橘色區域，位於淺藍色待監控的樣區範圍右側。起飛後，若無人空中載具剩餘電量低於30%或者是失去遙控信號時，將會自動返回停機坪的返航點。圖 3-2 為實驗設備示意圖，而實際拍攝影像如圖 3-3、圖 3-4 所示。圖 3-25 中的實驗設備包含了



圖 3-1 實驗環境示意圖



圖 3-2 實驗設備示意圖



圖 3-3 貓空茶園高空拍攝影像圖



圖 3-4 貓空茶園低空拍攝影像圖

搖桿一支、無人飛行載具一架與智能電池兩枚，搖桿以 USB 外接傳輸線連結手機或平板電腦作為即時的影像傳輸，並以兩支天線遙控無人飛行載具，天線有效訊號接收距離約為五千公尺。無人飛行載具包括四支旋翼，一座操控相機的雲台，由雲台連結著高解析度運動相機，拍攝影像存於雲台左側 SD 卡內，並附上兩枚智能電池替換使用，每枚智能電池一次可飛行約二十分鐘。

圖 3-3 所示為貓空茶園高空拍攝影像圖，圖 3-3 (a)為貓空茶園採收前高空拍

攝結果圖，圖 3-3 (b)為貓空茶園採收後高空拍攝結果圖。圖 3-4 則為不同位置的貓空茶園近拍結果圖，圖 3-4 (a)為貓空茶園左下部分，圖 3-4 (b)則為貓空茶園右下部分。

第三節 系統流程

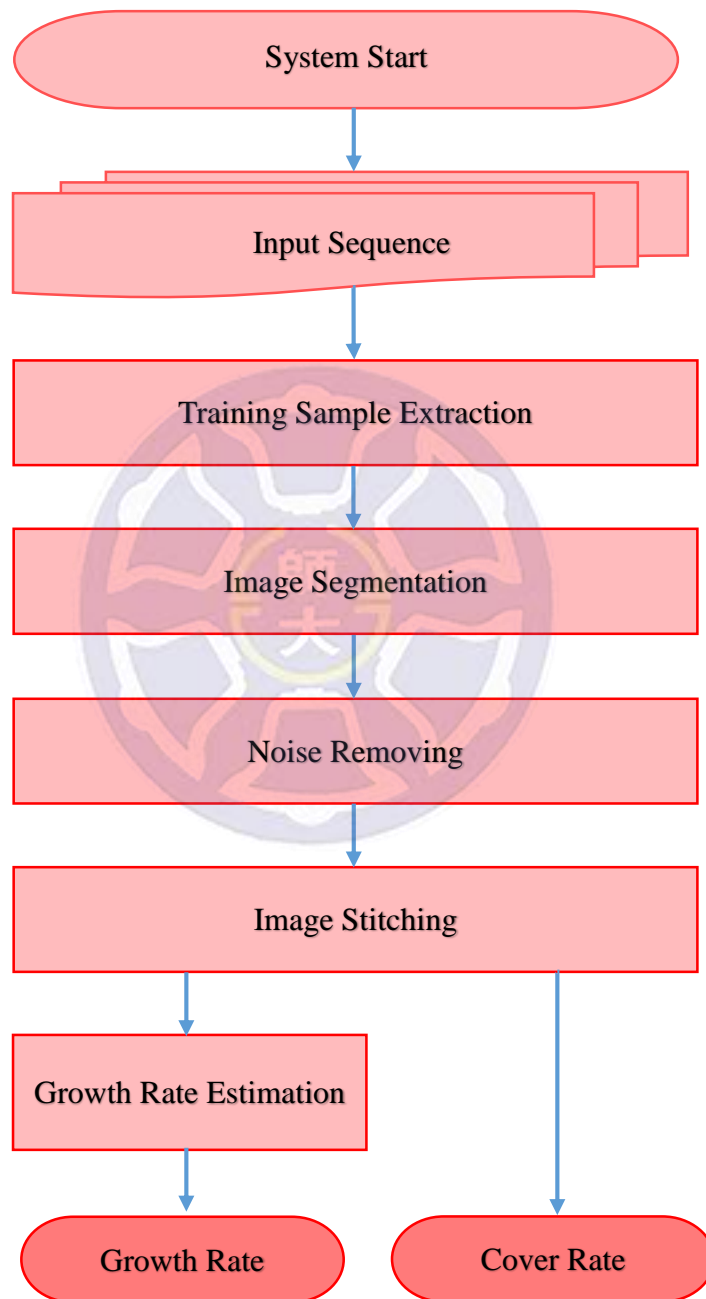


圖 3-5 視覺式生物量監測系統之流程圖

視覺式生物量監測系統之流程如圖所示，主要分為五個主要的步驟，分別為 training sample extraction、image segmentation、noise removing、image stitching 與 growth rate estimation。每一個步驟又可細分為若干個子步驟，詳細的流程內容會在後面章節做進一步的介紹。

系統啟動後會先進入流程圖中 training sample extraction 部分，本步驟的主要目的是將輸入影像中具有代表性的區域保留下來，並且刪除影像中一致性較低(變異數大)的區域。本步驟首先在輸入影像中擷取本研究定義的取自灰階值之亂度特徵，並且利用 SLIC 演算法將輸入影像分割為 N 個 superpixels 所組成的分割影像。接著使用根據輸入影像灰階值亂度特徵決定出的 RGB 變異數閾值 T_{var} 對 N 個 superpixels 進行篩選。保留篩選後變異數較小的 superpixels 並且決定輸入影像中 superpixels 的刪除比例。

Training sample extraction 之後，系統接著進入 image segmentation 的部分。本步驟的主要目的是建立準確的前景物件特徵模型，以擷取出完整的前景區域。系統首先將 training sample extraction 之後保留下來的 superpixels 由 RGB 色彩空間轉換為 HSV 色彩空間，接著使用 K -means 演算法找到 K 個群中心。由於系統偵測之茶樹主體為綠色，故系統將落在綠色範圍內之群中心視為前景物件的群中心，落在綠色範圍外的群中心則視為背景物件的群中心。有了前景物件與背景物件的群中心後，系統便能夠針對輸入影像的每一個像點進行像點與 K 個群中心的距離計算，並且找出距離該像點最近的群中心。如圖 3-6 所示，圖 3-6(a) 為輸入影像，圖 3-6(b) 為 HSV 色彩空間中 K -means 演算法的分群結果。若像點的最近群

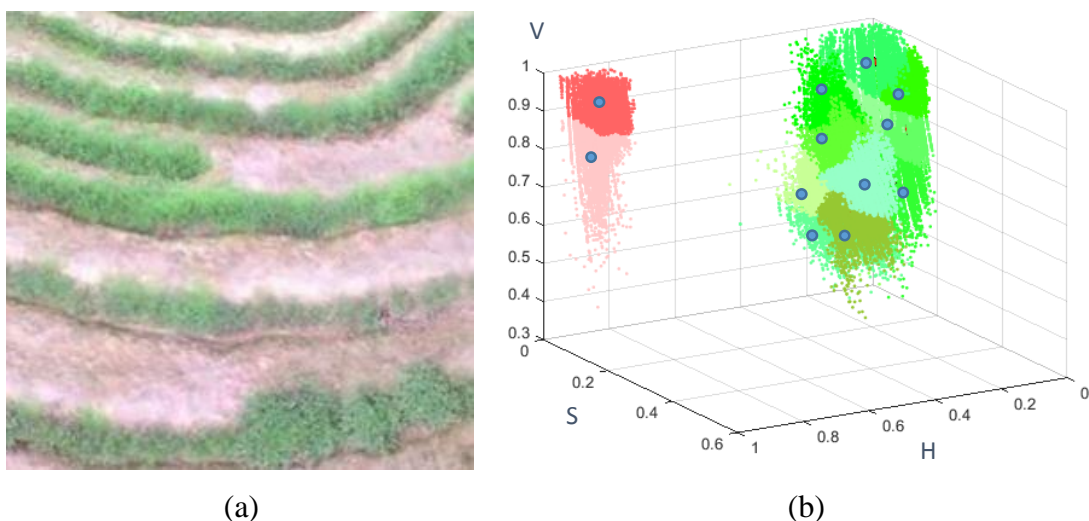


圖 3-6 HSV 色彩空間分群結果(a)input image (b) K -means clustering 之結果

中心為前景物件群中心即圖中綠色區域處標示的群中心，則該像點則屬於前景物件。反之，若像點的最近群中心為背景物件群中心即圖中紅色區域處標示的群中心，則該像點則屬於背景物件。

透過 *K-means* 演算法擷取出前景物件之後，影像的分割結果破碎且分散，於是系統需要透過 *noise removing* 步驟來去除影像中的雜訊。首先系統會針對不同的影像大小計算出適合的 *superpixel* 數量 N ，並且使用 *SLIC* 演算法將影像分為 N 個 *superpixels*。接著系統針對每個 *superpixel* 進行投票，若某一 *superpixel* 中屬於前景物件的像點較多，則整個 *superpixel* 視為前景物件。反之，若某一 *superpixel* 中屬於背景物件的像點較多，則整個 *superpixel* 歸類為背景。

系統擷取出個別輸入影像二值化分割結果後就能夠透過 *image stitching* 將這些二值化分割結果整合成一張由連續影像組成的完整分割結果。前面曾提到，空拍機拍攝的影像為連續影像，因此，本研究將連續輸入影像二值化分割結果接合成完整分割結果，此一作法可以較準確的估計整個茶園的茶樹鬱閉度。另外，由於每張輸入影像具有不同的亂度特徵，也需要不同的 *RGB* 變異數閾值 T_{var} 與不同的 *superpixels* 個數 N 來做影像分割。所以系統將每張影像分割為二值化影像後才將數張二值化分割影像整合成一張完整的二值化分割結果圖。

首先系統會根據飛行的方向將影像縫合的程序分為水平縫合與垂直縫合兩個步驟。系統先沿著拍攝的主要飛行方向將輸入影像縫合成長條狀，接著再將數段長條狀的影像縫合成一張完整的二值化分割結果圖，最後計算分割結果圖中前景物件所佔的比例作為輸入影像拍攝區域的鬱閉度輸出結果。

接著系統透過 *growth rate estimation* 計算出不同時間點所擷取出的二值化分割結果圖之間的茶樹成長率。首先系統需要將一張時間較早的分割結果圖與一張時間較晚的分割結果圖做重疊，於是本研究採人工的方式將圖中固定在茶園裡的長方形藍色水箱與長方形白色水箱的八個頂點作為兩張圖的對應點，因為兩長方形水箱固定在地上不會移動，也不會改變形狀，故可作為影像中的對應點。

由於兩張影像的 *superpixels* 的分割結果可能不盡相同，所以雖然經過 *noise removing* 的步驟後同一個 *superpixel* 內的每個像點結果都一樣，但是系統還是必須透過對應像點的相減才能夠更準確的計算出兩張影像間的成長率。系統將一張時間較早的分割結果圖與一張時間較晚的分割結果圖之對應像點位置的值相減

得到差異結果。相減結果分為正、為負、為零三種，若相減結果為正則視該像點為枯損點，若為負則視該像點為生長點，若為零則視該像點為無變化，接著利用該差異結果與原先時間較早的分割結果圖合併計算出兩個時間點之間的茶樹成長率與枯損率作為輸出。



第4章 茶樹偵測與分割參數決定

本章介紹茶樹偵測及決定分割參數的方法，主要分為五個步驟，分別為訓練集的篩選(training sample extraction)、影像分割(image segmentation)、去除雜訊(noise removing)、影像縫合(image sititching)與成長率估計(growth rate estimation)。各步驟的詳細過程將在本章分別討論。因此，本章第一節介紹訓練集的篩選(training sample extraction)細部流程，第二節介紹影像分割(image segmentation)細部流程，第三節介紹去除雜訊(noise removing)細部流程。第四節介紹影像縫合(image sititching)細部流程。第五節介紹成長率估計(growth rate estimation)細部流程。

第一節 訓練集的篩選(training sample extraction)

訓練集的篩選主要步驟為(1)混亂程度評估(impurity degree measurement)、(2)超像素建構(superpixel construction)、(3)均值化超像素選擇(homogenized superpixel selection)、(4)參數決定(parameter decision)。本節依照執行步驟的順序，分為(A)影像之混亂程度評估、(B)超像素建構與均值化超像素選擇及(C)參數決定來說明。

(A)影像之混亂程度評估

為了針對每張不同的輸入影像給予合適的超像素內部變異數的篩選閾值 T_{var} ，系統需要分辨每張不同輸入影像中材質的混亂程度，本研究自行研發一種亂度評估方式來評估輸入影像的混亂程度。

本研究經過反覆測試發現透過灰階值評估出的混亂程度 E 比單獨使用 R 、 G 、 B 三個 channels 的像點值分別計算出的混亂程度更具有代表性，使得系統在各種不同的顏色比例下仍能很好的預測下一階段用來篩選超像素的篩選閾值 T_{var} 。因此，本研究決定採用灰階值來評估不同輸入影像中材質的混亂程度，計算公式如下：

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^8 |p_n^{(i,j)} - I(i,j)|}{NOP} \quad (4.1)$$

其中 M 、 N 分別為輸入影像的長寬， $I(i, j)$ 則為影像中第 i 行第 j 列的像點之灰階值， $p_n^{(i,j)}$ 則為左上方為首順時針圍繞影像中第 i 行第 j 列的像點周圍八個像點之灰階值， $n=1\sim 8$ 如圖 4-1 所示， NOP 則為輸入影像中像點個數。

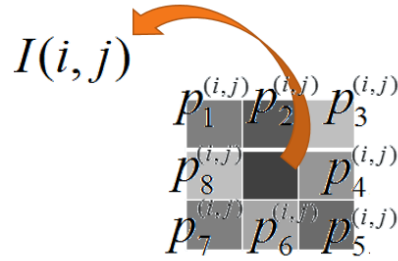


圖 4-1 $p_n^{(i,j)}$ 排列位置示意圖

(B) 超像素建構與均值化超像素選擇

本研究超像素建構的步驟中採用 SLIC(simple linear iterative cluster)演算法將輸入影像畫分為顏色，亮度，材質相近的小區域，並稱之為 superpixel。SLIC 演算法的執行方式如下：系統將每個像點的 R 、 G 、 B channel 亮度值與影像上的 (x, y) 座標值組合成一個五維向量 $V=[R,G,B,x,y]^T$ 。如此一來系統便可以藉由向量間的距離來衡量兩像點之間的相似度，距離越大者，相似度越低，距離越小者，相似度越高。若 V_1 和 V_2 為代表影像中兩像點之向量， Sim 為 V_1 和 V_2 之相似度，則相似度 Sim 計算方式如下：

$$Sim = \|V_1 - V_2\| = \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4.2)$$

其中 R_1 和 R_2 分別代表兩像點的 R channel 亮度值， G_1 和 G_2 分別代表兩像點的 G channel 亮度值， B_1 和 B_2 分別代表兩像點的 B channel 亮度值， x_1 和 x_2 分別代表兩像點的 x 座標值， y_1 和 y_2 分別代表兩像點的 y 座標值。

接著在影像中給定 N 個距離均勻的種子點，從種子點為中心向四周搜尋相似度高的像點，並且將這些相似度高的像點歸類為同一個超像素，也就是說每個像點會有 N 個相似度 Sim ，分別代表著該像點與第 N 個種子點的相似度，最後該像點會與相似度最大的種子點歸為同一個超像素。當所有像點歸類完成後，將 N 塊超像素內的所有向量各自平均後獲得 N 個向量代表 N 個新的種子點，再以這 N 個新的種子點向四周搜尋相似度高的像點，如此反覆迭代直到種子點的位置不再變化時輸出 N 個超像素作為分割結果。

建構完 N 個超像素的分割結果後，為了更好的分類茶樹與土壤，系統會從影

像中選取較具有代表性的 superpixel 區域作為後面 K -mean 分群演算法的訓練樣本集合，以避免訓練樣本落在主要群中心之間的模糊地帶，導致最後 K 個群中心的位置出現偏差。

經過觀察後發現，這些位於模糊地帶的訓練樣本大部分都落在影像中短距離發生大幅度顏色變化的地方，因此可以利用 N 個超像素各自的像點顏色特徵值變異數來進行訓練集的篩選。顏色特徵值變異數小的 superpixel 內部顏色變化幅度小，一致性較高，在顏色特徵的分群上較具有代表性；顏色特徵值變異數大的 superpixel 內部顏色變化幅度大，一致性較低，在顏色特徵的分群上也較不具有代表性。第 k 個 superpixel 內顏色特徵值變異數具體的計算方式如下：

$$Var_k = \frac{\sum_{i=1}^{NOP_k} \frac{1}{3} ((I_r^k - \mu_r^k)^2 + (I_g^k - \mu_g^k)^2 + (I_b^k - \mu_b^k)^2)}{NOP_k} \quad (4.3)$$

其中以此 Var_k 為 superpixel k 之顏色特徵值變異數。其中 I_r^k 為 superpixel k 中第 i 個像點之 R channel 亮度值， I_g^k 為 superpixel k 中第 i 個像點之 G channel 亮度值， I_b^k 為 superpixel k 中第 i 個像點之 B channel 亮度值， μ_r^k 為 superpixel k 內 R channel 所有像點亮度值平均數， μ_g^k 為 superpixel k 內 G channel 所有像點亮度值平均數， μ_b^k 為 superpixel k 內 B channel 所有像點亮度值平均數， NOP_k 則為 superpixel k 內像點個數。

上述計算變異數的方法因將 R 、 G 、 B 三個 channels 合併考慮，會有將變異程度稀釋的缺點。以輸入影像中某一 superpixel 之某一像點為例，若 R 、 G 、 B 三個 channels 中僅有其中一個 channel 的亮度值與該 channel 所有像點亮度值平均數有很大的差異，則該差異特徵會被其餘兩個 channels 的計算結果所稀釋，導致許多 superpixels 的變異程度被低估，使得訓練集的篩選過程中某些變異程度較大的 superpixels 難以刪除。為了解決這個問題，本研究將變異數 Var 值計算公式修改如下：

$$Var'_k = \frac{\sum_{i=1}^{NOP_k} \max((I_r^k - \mu_r^k)^2, (I_g^k - \mu_g^k)^2, (I_b^k - \mu_b^k)^2)}{NOP_k} \quad (4.4)$$

本研究以此 Var'_k 代表 superpixel k 之顏色特徵值變化量。其中 I_r^k 為 superpixel

k 中第 i 個像點之 R channel 亮度值， Ig_i^k 為 superpixel k 中第 i 個像點之 G channel 亮度值， Ib_i^k 為 superpixel k 中第 i 個像點之 B channel 亮度值， μ_r^k 為 superpixel k 內 R channel 所有像點亮度值平均數， μ_g^k 為 superpixel k 內 G channel 所有像點亮度值平均數， μ_b^k 為 superpixel k 內 B channel 所有像點亮度值平均數， NOP_k 則為 superpixel k 內像點個數。

修改後的公式(4.3)與原先的公式(4.2)最大的區別在於，計算過程中直接取出 R、G、B 三個 channels 中與該 channel 中某一 superpixel 內所有像點亮度值平均數差異平方最大的結果，最後再將同 superpixel 內每個像點的計算結果加總後除以該 superpixel 所包含像點個數，其結果以代表該 superpixel 之變化量。

計算完影像中所有 superpixels 之變化量後，給定一變異閾值 T_{var} 後系統便可以得知針對該輸入影像使用 T_{var} 會刪除多少的 superpixels，並且計算出影像中 superpixels 的刪除率， $deleteRate$ 的計算公式如下：

$$deleteRate = \frac{NOP_{Unselected}}{NOP_{Selected} + NOP_{Unselected}} \times 100\% \quad (4.5)$$

其中 $deleteRate$ 表示影像中 superpixels 的刪除率， $NOP_{Unselected}$ 表示被刪除的 superpixels 個數， $NOP_{Selected}$ 則表示未被刪除的 superpixels 個數。刪除率的計算即是將被刪除的 superpixels 個數除以影像中被刪除的 superpixels 個數 $NOP_{Unselected}$ 和未被刪除的 superpixels 個數 $NOP_{Selected}$ 的總和，再乘上 100%。

(C) 參數決定

由前面步驟(A)影像之混亂程度評估(impurity degree measurement)計算出的 E 值可代表輸入影像的混亂程度，於是系統便可以利用此一特性預測出刪除率為 50% 的變異數閾值 T_{var} 會出現在哪個參數區間，其預測公式如下：

$$T_{var50\%} = E \times \frac{1}{C} \pm \varepsilon \quad (4.6)$$

其中 $T_{var50\%}$ 為將預測刪除率為 50% 的變異閾值， E 為輸入影像混亂程度， C 、 ε 為常數。本研究在實驗中給定 $C = 25$ 、 $\varepsilon = 10$ ，其中 ε 的取決於。

有了預測刪除率為 50% 的變異閾值 T_{var} 的參數區間後，再配合實驗觀察出的 superpixels 個數 N 的最佳參數區間(2000~2800)，系統就可以預測出錯誤率較低的

分割參數區間。在此區間內實際做完步驟(B)超像素建構與均值化超像素選擇後，每一組參數(T_{var} , N)會對應到一個刪除率，於是系統會在預測的參數區間中取出刪除率最接近 50% 的參數組合作為系統篩選訓練集的最佳參數組合。

以表 4-1 為例，預測刪除率為 50% 的變異閾值 T_{var} 的參數區間為 33~99，superpixels 個數 N 的最佳參數區間為 2000~2800，這些參數組合中以(33, 2800) 的參數組合之 superpixels 刪除率最接近 50%，於是系統將變異閾值 T_{var} 設為 33 且 superpixels 個數 N 設為 2800 之篩選結果做為影像分割步驟中 K -means 演算法的訓練集合。

表 4-1 不同參數組合之 superpixels 刪除率

T_{var} \ N	2000	2200	2400	2600	2800
33	83%	82%	79%	78%	76%
66	57%	55%	54%	52%	50%
99	38%	36%	35%	33%	31%

第二節 影像分割(image segmentation)

影像分割主要步驟為(1) HSV 色彩空間轉換(HSV color space transformation)、(2) K -means 分群(K -means clustering)、(3)建立顏色特徵模型(color feature modeling)及(4)物件擷取(object extraction)。本節依照執行步驟的順序，分為：(A) HSV 色彩空間轉換、(B) K -means 分群及(C)建立顏色特徵模型和物件擷取來說明。

(A) HSV 色彩空間轉換

為了瞭解哪種色彩空間比較適合用於茶園的影像分割，本研究將不同地點、亮度和解析度的茶園部分區域作了三種不同的色彩空間轉換，分別將 RGB 色彩空間上的點轉換至 HSV 色彩空間、 HSL 色彩空間和 $YCrCb$ 色彩空間。

首先本研究分別蒐集不同場景中土壤與茶樹的影像如圖 4-2，其中圖 4-2 (a) 為土壤影像，圖 4-2 (b) 為茶樹影像。接著將影像中的每個像點顏色特徵顯示在 RGB 色彩空間中，接著將 RGB 色彩空間中代表土壤影像的特徵點著上咖啡色，代表茶樹影像的特徵點著上綠色。然後將 RGB 色彩空間的特徵點分別轉換至 HSV 色彩空間、 HSL 色彩空間和 $YCrCb$ 色彩空間。給定 RGB 色彩空間中，R channel，G channel，B channel 的亮度值(R , G , B)，則 RGB 色彩空間轉至 $YCrCb$ 色彩空間轉換公式如下：

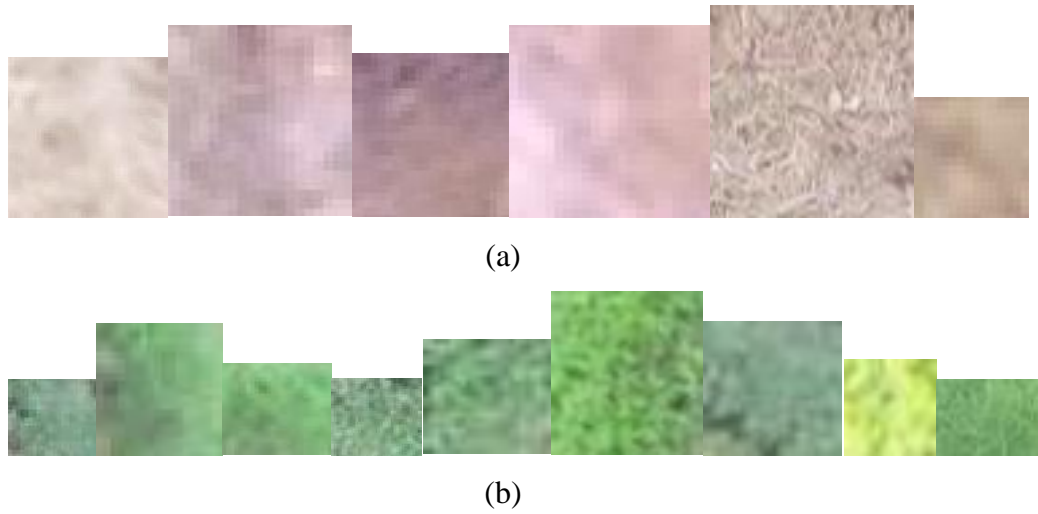


圖 4-2 不同場景中土壤與茶樹的影像

(a)為土壤影像(b)為茶樹影像

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (4.7)$$

$$Cr = 0.713(R - Y) + \delta \quad (4.8)$$

$$Cb = 0.564(B - Y) + \delta \quad (4.9)$$

其中， δ 在 8-bit 影像時設為 128，16-bit 影像時設為 32768，而若為浮點數影像則為 0.5。RGB 色彩空間轉至 HSL 色彩空間轉換公式如下：

$$H = \begin{cases} \theta & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} \quad (4.11)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (4.12)$$

$$L = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (4.13)$$

其中 H (Hue) 為色相， S (Saturation) 為飽和度， L (Lightness) 為亮度，同理，令 $MAX = \max(R, G, B)$ ， $MIN = \min(R, G, B)$ ，則 RGB 色彩空間轉到 HSV 色彩空間轉換公式如下：

$$H = \begin{cases} \frac{(G-B)}{MAX-MIN} \times 60 & \text{if } R = MAX \\ (2 + \frac{(B-R)}{MAX-MIN}) \times 60 & \text{if } G = MAX \\ (4 + \frac{(R-G)}{MAX-MIN}) \times 60 & \text{if } B = MAX \end{cases}, \text{ if } H < 0, H = H + 360 \quad (4.14)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (4.15)$$

$$V = \max(R, G, B) \quad (4.16)$$

其中 H (Hue)為色相， S (Saturation)為飽和度， V (Value)為明度。

經過以上 HSV 色彩空間、 HSL 色彩空間和 $YCrCb$ 色彩空間的轉換之後，本研究得到茶樹與土壤影像之所有像點於四個色彩空間分布結果如圖 4-3 所示，其中圖 4-3(a)(b)(c)(d)分別為茶樹與土壤影像中的像點 RGB 、 HSV 、 HSL 以及 $YCrCb$ 之色彩空間分布結果。觀察發現茶樹影像與土壤影像之像點在 RGB 色彩空間中同種類的點多為長柱狀分布，但不同種類的像點間距離較近，在進行步驟(B)K-means 分群時容易把兩個不同種類的像點混淆。而在 $YCrCb$ 色彩空間中雖然兩個不同種類的像點距離較遠，但是兩類各自的分布情況比較鬆散，在空間中分布的範圍比較廣，可能會造成分群時的誤判。

在 HSL 色彩空間與 HSV 色彩空間中，茶樹影像與土壤影像之像點分布情況較緊密，在空間中分布的範圍也比較小，但是由於亮度 L 之公式(4.13)與明度 V 之公式(4.16)特性不同，圖 4-4 為色彩空間與 HSV 色彩空間在 S channel 亮度值為 1 時之色彩分布圖，圖 4-4(a)顯示當 HSL 色彩空間飽和度 S 值為 1 時， L channel 亮度值為 0 時顯示為黑色， L channel 亮度值為 1 時顯示為白色，而如圖 4-4(b)顯示當 HSV 色彩空間 S channel 亮度值為 1， V channel 亮度值為 0 時顯示為黑色，而 V channel 亮度值為 1 時卻顯示為最飽和的顏色值。所以茶樹影像與土壤影像之像點在 HSL 色彩空間中 L 軸方向的像點分布較廣，且 L channel 亮度值接近 0 與 1 時分布範圍較不穩定，相對而言茶樹影像與土壤影像之像點在 HSV 色彩空間中 V 軸方向的像點分布則較為緊密，且只有 V channel 亮度值接近 0 時才会有分布範圍不穩定的情況，所以綜合以上觀察結果，本研究選擇 HSV 色彩空間作為步驟(B)K-means 分群時使用的色彩空間。

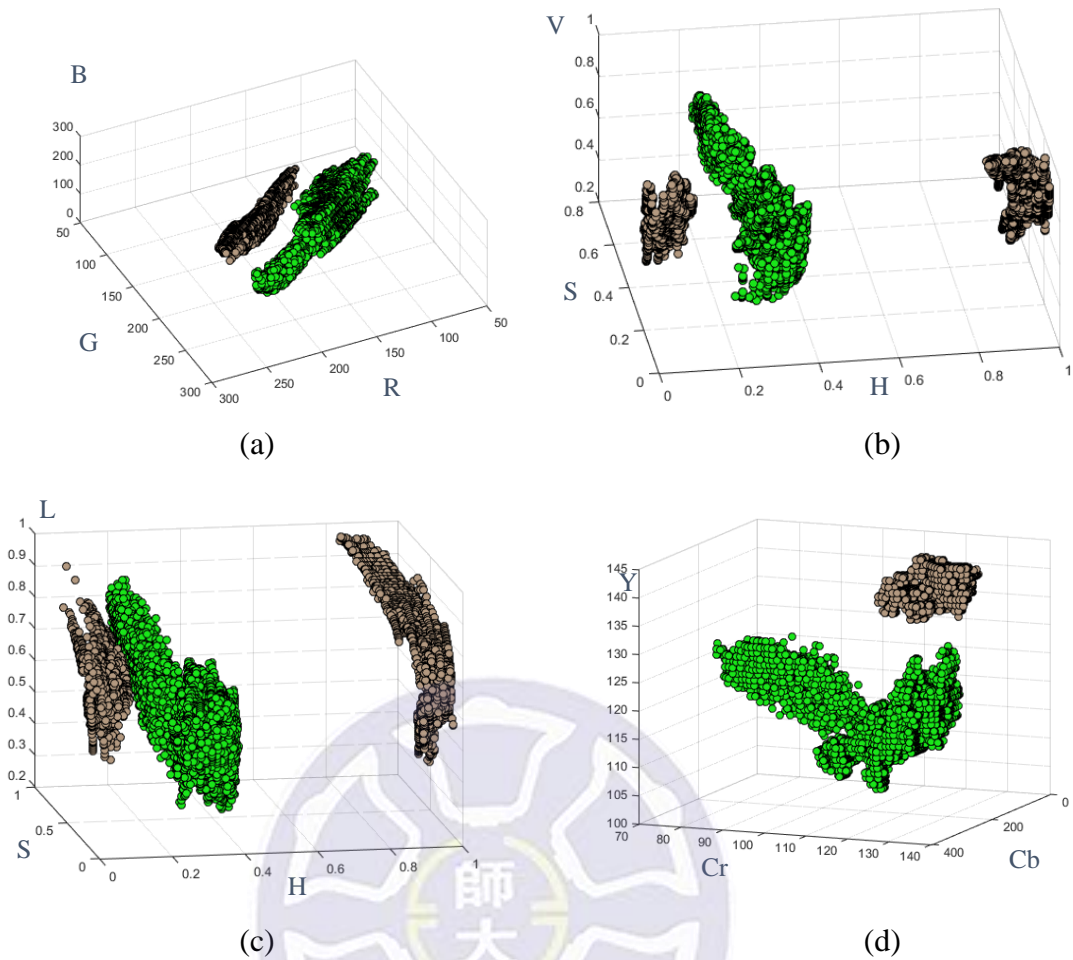


圖 4-3 茶樹與土壤影像之像點於四個色彩空間分布結果

(a) RGB 色彩空間分布結果 (b) HSV 色彩空間分布結果 (c) HSL 色彩空間分布結果

(d) YCrCb 色彩空間分布結果

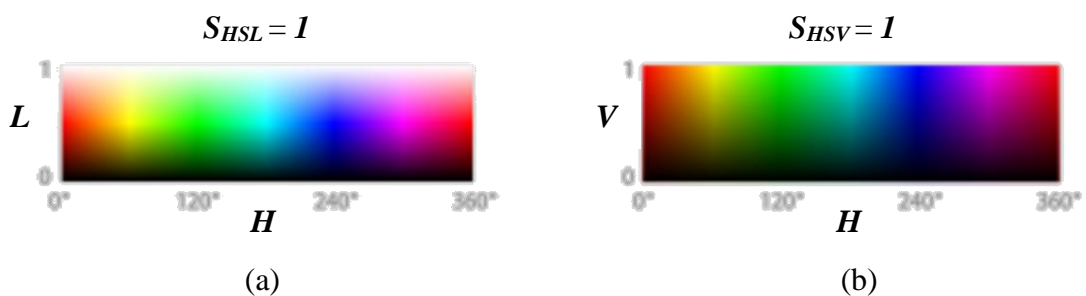


圖 4-4 HSL 色彩空間與 HSV 色彩空間在值為 1 時之色彩分布圖 (a) HSL 色彩空間 (b) HSV 色彩空間

(B) K-means 分群

經過步驟(A) HSV 色彩空間轉換將篩選過的訓練集轉換到 HSV 色彩空間後，系統採用 K-means 演算法將篩選過的訓練集在 HSV 色彩空間中分成 K 群。K-

means 演算法的執行方式如下：系統在 *HSV* 色彩空間中的訓練集裡隨機選出 K 個點作為初始的群中心，接著計算每個資料點與 K 個群中心的距離，並且將每個資料點與距離最近的群中心歸為一類。於是所有的資料點被分為 K 群後，系統會重新計算 K 群資料點的群中心。接著反覆執行上述步驟直到 K 群中心點不再移動或者到達系統預設的迭代次數上限為止。 K -means 分群結果如圖 4-5 所示，圖 4-5 (a)為輸入影像，圖 4-5 (b)為 *HSV* 色彩空間中 K -means 演算法的分群結果，本系統的 K 預設為 10 群，迭代的次數預設為 10 次。

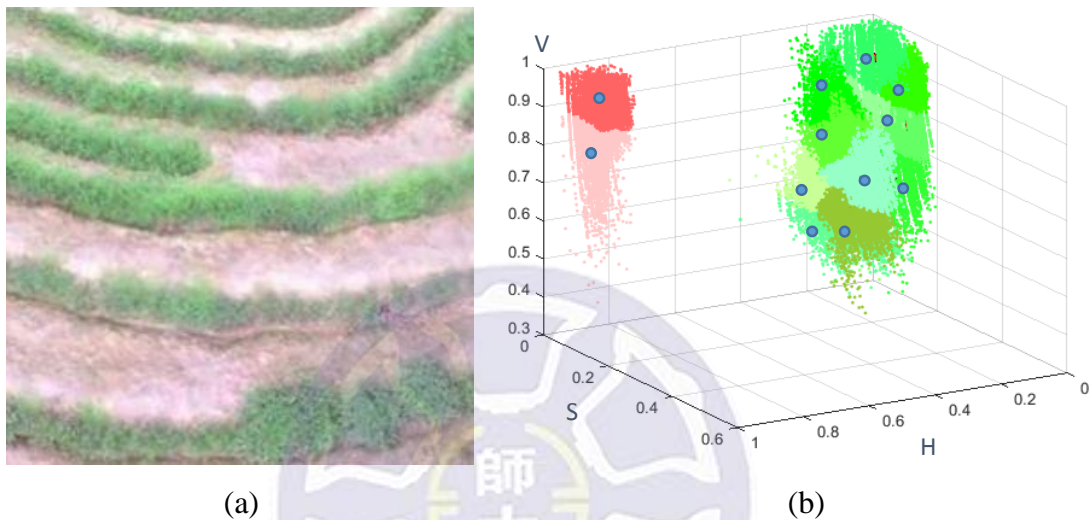


圖 4-5 *HSV* 色彩空間分群結果(a)input image (b) K -means clustering 之結果

在計算資料點與群中心的距離時，系統最先使用的距離計算方式為 city block distance，又稱為曼哈頓距離，如圖 4-6 所示在方形建築區塊裡行走的時候無法穿過街區中的大樓，所以兩點間的距離定義為所走過的街道距離。若其中 p_1 與 p_2 為空間中的兩點， D_{12} 為 p_1 與 p_2 間的 city block distance 則 city block distance 計算公式如下：

$$D_{12} = |h_1 - h_2| + |s_1 - s_2| + |v_1 - v_2| \quad (4.17)$$

其中 h_1 為 p_1 之 H channel 亮度值， h_2 為 p_2 之 H channel 亮度值， s_1 為 p_1 之 S channel 亮度值， s_2 為 p_2 之 S channel 亮度值， v_1 為 p_1 之 V channel 亮度值， v_2 為 p_2 之 V channel 亮度值。

City block distance 的好處在於計算簡單，但在某些例子中可能會使得兩組不同距離的點經過 city block distance 的運算後視為相同的距離，以圖 4-7 為例，黑點至灰點與黑點至白點的 Euclidean distance 距離分別為 $\sqrt{2}$ 與 2，但如果使用 city

block distance 作計算則黑點至灰點與黑點至白點的距離都是 2。這樣的特性使得很多資料點與群中心的距離被高估，可能導致資料點尋找最小距離群中心時被分到錯誤的類別。

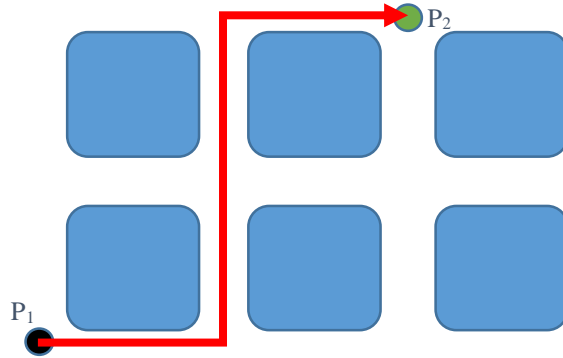


圖 4-6 City block distance

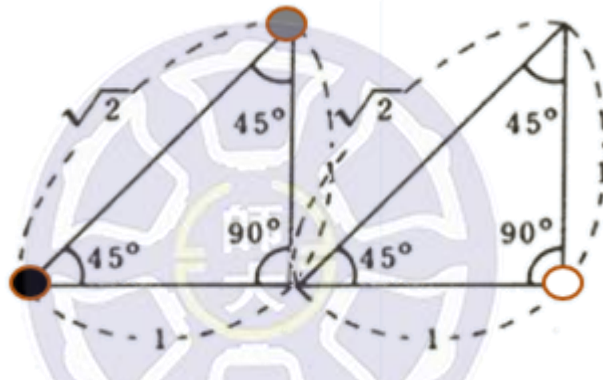


圖 4-7 相同 Euclidean distance 不同 city block distance 之範例

為了解決這個問題本系統還是選擇計算複雜度較高的 Euclidean distance 來取代原本的 city block distance。若 p_1 與 p_2 為空間中的兩點， D_{12} 為 p_1 與 p_2 間的 Euclidean distance，則 Euclidean distance 的計算公式如下：

$$D_{12} = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + (s_1 - s_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \quad (4.18)$$

其中 h_1 為 p_1 之 H channel 亮度值， h_2 為 p_2 之 H channel 亮度值， s_1 為 p_1 之 S channel 亮度值， s_2 為 p_2 之 S channel 亮度值， v_1 為 p_1 之 V channel 亮度值， v_2 為 p_2 之 V channel 亮度值。

在實驗的過程中發現由於初始的 K 個群中心是從訓練集裡的資料點中隨機選出，有時候初始值隨機得不夠均勻，會導致需要更多的迭代次數才能夠收斂，並且影響最後分群結果的準確度。而且不穩定的分群結果可能導致實驗時因隨機

初始化產生的雜訊大於參數改變對分群結果所造成的影響，降低分析結果的可信程度。於是本研究透過已知 ground truth 的分群結果，從一百組 K -means 分群結果裡挑選出一組結果正確率最高的 K 個群中心，將這 K 個群中心記錄下來作為系統初始化的 K 個群中心，系統便可以用更少的迭代次數找到更準確且穩定的分群結果，達成減少運算時間、增加系統準確度之目的。

(C) 建立顏色特徵模型和物件擷取

接著系統利用步驟(B) K -means 分群所決定出的 K 個群中心在 HSV 色彩空間中建立顏色特徵模型。由於系統偵測之茶樹主體為綠色，故系統原參考維基百科中的 HSV color table [30]，將 HSV 色彩空間中的綠色範圍訂為 $H \in [0.2, 0.45]$ ， $S \in [0.25, 1]$ ， $V \in [0.25, 1]$ 之間，但是經過實際實驗後發現，為了將稍微枯黃的葉子與青綠的嫩葉包含在 HSV 色彩空間的綠色範圍中， HSV 色彩空間的綠色範圍應調整至 $H \in [0.2, 0.65]$ ， $S \in [0, 1]$ ， $V \in [0.2, 1]$ 之間為宜。

有了 HSV 色彩空間中的綠色範圍系統便可以将 K 個群中心分作兩類，一類是落在 HSV 色彩空間中綠色範圍內的群中心，這些群中心被視為代表茶葉。另一類則是落在綠色範圍外的群中心，這些群中心被視為代表背景。

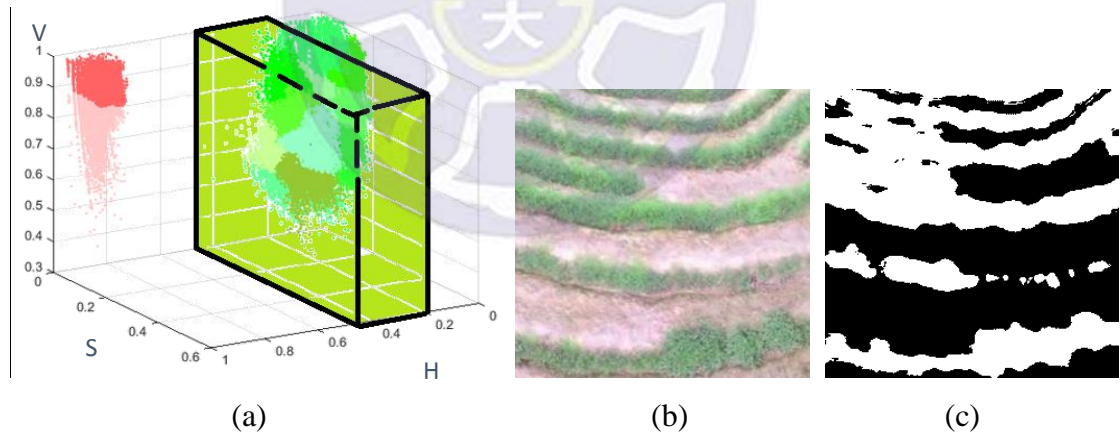


圖 4-8 HSV 色彩空間分群結果

(a) HSV 色彩空間中綠色範圍(b)輸入影像(c)輸入影像二值化結果

最後系統使用 K 個被分成兩類的群中心對未被篩選過的完整的輸入影像進行分群。首先將完整輸入影像中每個像點的顏色特徵轉換到 HSV 色彩空間後，每個資料點與 K 個群中心作 Euclidean distance 的計算，然後將該資料點與歸類至與它距離最近的群中心那一類。最後，所有屬於代表茶葉群中心的資料點之顏色特徵被給定為 255，所有屬於代表背景群中心的資料點之顏色特徵被給定為 0。圖

4-8 為 HSV 色彩空間分群結果，其中圖 4-8(a)為 HSV 色彩空間中綠色範圍，圖 4-8(b)為輸入影像，圖 4-8(c)為輸入影像二值化結果。

第三節 去除雜訊(noise removing)

因本研究使用的 K-means 演算法是以像點為單位進行計算，所以輸入影像的分割結果會呈現許多點狀的雜訊分布在影像中，為了除去這些雜訊本系統再次使用 SKIC(simple linear iterative cluster)演算法將輸入影像劃分為更小的區域，系統估計 superpixels 的個數 N 公式如下：

$$N = NOP \times \frac{1}{q} \quad (4.19)$$

其中 NOP 為影像中像點個數， q 為常數。本研究在實驗中給定 $q=10$ 。接著系統針對超像素內的所有像點亮度值進行投票，若是該超像素內像點亮度值為 255 之像點數量超出該像素內總像點數的一半，則該超像素內每個像點的亮度值被更新為 255；反之，若是該超像素內像點亮度值為 0 之像點數量超出該像素內總像點數的一半，則該超像素內每個像點的亮度值被更新為 0。圖 4-9 為輸入影像去除雜訊結果，圖 4-9(a)為輸入影像，圖 4-9(b)為 SLIC 結果，圖 4-9(c)為分割結果，圖 4-9(d)為投票後去雜訊結果。

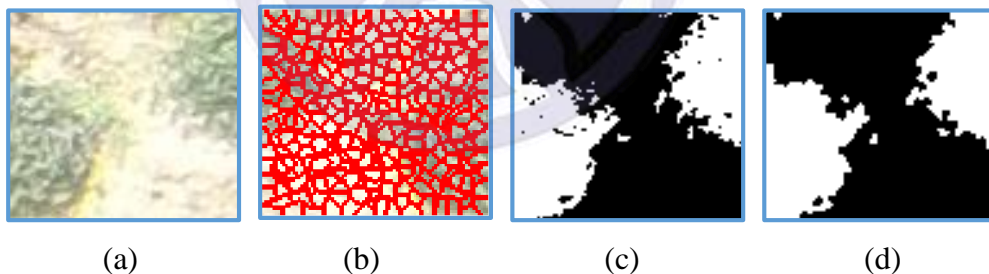


圖 4-9 輸入影像去除雜訊結果(a)輸入影像(b)SLIC 結果(c)分割結果(d)投票後去雜訊結果

第四節 影像縫合(image stitching)

本研究利用 GoPro 公司開發的 Kolor Autopano Giga 3.7 [31]來進行影像的縫合，其中 Kolor Autopano Giga 3.7 使用了 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)來縫合輸入的影像。SIFT 演算法從不同的影像中找出大量不易受到高斯模糊尺度所影響的關鍵點，並且利用這些關鍵點作為縫合過程中的參考座標，將不同影像中

的相似關鍵點視為空間中相同的位置，進而將相鄰的影像進行縫合。

為了提供更清晰的實驗影像，本研究使用低空飛行的方式來拍攝實驗影片，飛行路線如圖 4-10 所示。從圖 4-10 中可以看出拍攝過程中無人飛行載具有兩個主要的飛行方向，但是縫合的過程中難以對超過一個以上的移動方向作縫合，於是本研究以人工的方式將影片截為數段單一飛行方向的影片，分別為將單一飛行方向的影片縫合成長條狀的影像，接著將長條狀的影像縫合成一張完整的茶園空拍影像。

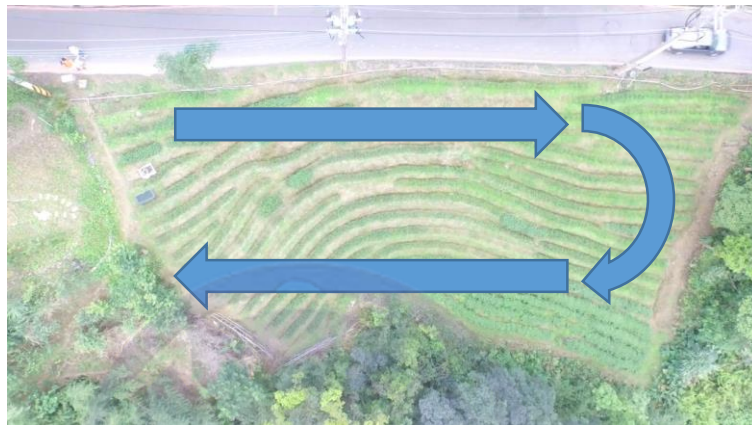


圖 4-10 茶園低空拍攝飛行路線

第五節 成長率估計(growth rate estimation)

為了估計茶園在一段時間內的成長率，本研究對台北市郊山區的茶園進行九個月的監測，期間每個月進行一次茶園的空拍，並且獲得不同時間相同地點的茶園二值化分割結果後，系統需要將兩張不同時間的茶園二值化分割結果重疊。

原先實驗設計了一張尺寸約為 63×89cm 類似西洋棋盤黑白相間的定位圖，但後來發現只要飛行高度超過 0.5 公尺，該定位圖便難以在空拍影像中清晰的辨識，且相比於固定在茶園中的物體，移動式的定位圖每次架設的位置可能有些微的差異導致重疊結果有所偏差。

經過觀察後發現，由於茶園入口處擺放著兩座藍色與白色的長方形水箱不會被移動，也不會改變形狀，所以能夠滿足本研究的空拍影像中對應點的要求。於是本研究改以茶園中的固定物體作為定位點。

本研究採人工的方式將圖中固定在茶園裡的長方形藍色水箱與長方形白色水箱的八個頂點作為重疊時兩張茶園二值化分割結果的定位點如圖 4-11 所示，

其中圖 4-11(a)為 8/28 茶園定位點，圖 4-11 為 4/27 茶園定位點。



圖 4-11 茶園定位點(a)8/28 茶園定位點(b)4/27 茶園定位點

因兩張不同拍攝時間的茶園二值化分割結果在去除雜訊(noise removing)的步驟中建構超像素的結果可能不盡相同，所以雖然同一超像素內的亮度值均相同，但系統還是必須以像點為單位做對應像點的變化計量，方能準確的計算出不同拍攝時間之間的成長率。若 I_1 、 I_2 為兩張不同拍攝時間的茶園二值化分割結果，則枯損率 Mr 與成長率 Gr 的計算公式如下：

$$Mr = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |MAX(I_1(i, j) - I_2(i, j), 0)|}{NOG} \quad (4.20)$$

$$Gr = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |MIN(I_1(i, j) - I_2(i, j), 0)|}{NOG} \quad (4.21)$$

其中 M 、 N 分別為輸入影像的長寬， $I(i, j)$ 則為影像中第 i 行第 j 列的像點之灰階值， NOG 則為 I_1 中代表茶樹之像點個數。

第5章 實驗結果

本系統使用 Microsoft Visual Studio 2010 編譯器及 Matlab 2014b 開發軟體，而電腦之硬體配備如表 5-1 所示。影像的輸入為 DJI Phantom 4 所拍攝的彩色影像，其影像大小為 640×360(pixels)，輸出影像大小為 1800×1200(pixels)。

本研究將輸入影像分作三種不同的大小，分別為小圖 50×50，中圖 250×250，大圖 640×360 三種。實驗影片共有 10 段，每段影片約三分鐘左右，合計約 30 分鐘，影像輸入頻率為 30FPS，故實驗影像張數共約 54000 張 frames。

表 5-1 電腦之硬體配備規格

桌上型電腦	項目	型號
	CPU	Intel Core i7-4770 3.40GHz
	主機板	ASUS B85M-G
	記憶體	Kingston DDR3 8G-1600
	顯示卡	NVIDIA GTX650

飛行載具拍攝時離地面約 2~3 公尺，輸出影像縫合的影像張數隨著不同的影片長度變化，空拍實際飛行高度如表 5-2 所示，其中第一行表示飛行高度，第二行表示海拔高度，第三行表示影像張數，輸出影像大小為 1800×1200(pixels)。

表 5-2 空拍影像飛行高度

No. video	Flight altitude	Above mean sea level	Number of frames
1	3.1m	78.1m	1073
2	3.0m	78.0m	1018
3	2.8m	77.8m	1125
4	2.8m	77.8m	973
5	3.2m	78.2m	1228
6	3.0m	78.0m	1033
7	3.1m	78.1m	1152
8	2.9m	77.9m	973
9	3.2m	78.2m	1107
10	2.7m	77.7m	998

第一節 參數選擇分析

進行茶園影像分割之前，首先需要選擇出合適的三種分割參數，包含分群數量 K 、超像素個數 N 及變異閾值 T_{var} 。首先本研究針對分群數量 K 作分析，從已知 ground truth 實驗結果中挑出正確率較高的一組參數 $K=7$ 、 $N=32$ 及 $T_{var}=2000$ 。接著固定參數 N 與 T_{var} 然後窮舉各種不同的 K 值，並以不同的圖重複三次實驗，實驗結果如表 5-3 所示。圖 5-1 為茶園空拍影片圖 5-1(a)為小圖 1，圖 5-1(b)為小圖 2，圖 5-1(c) 為小圖 3。圖 5-2 為小圖 1 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖，圖 5-3 為小圖 2 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖，圖 5-4 為小圖 3 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖。

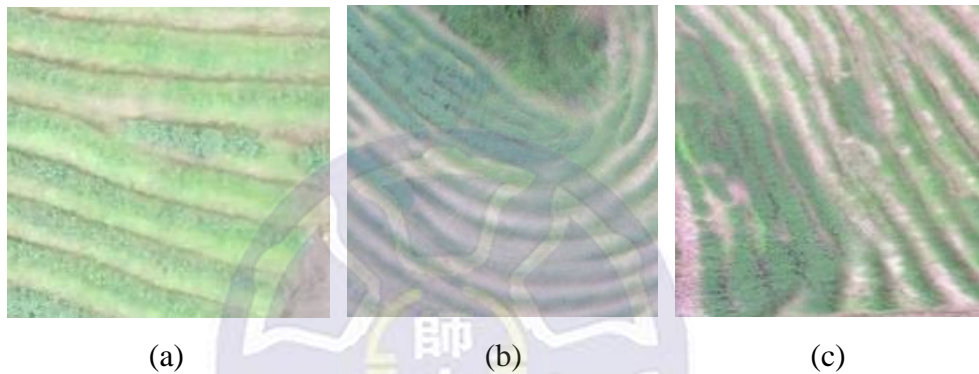


圖 5-1 茶園空拍影片(a)小圖 1(b)小圖 2(c)小圖 3

本實驗將表 5-3 實驗結果表現成波型圖方式(圖 5-2、圖 5-3、圖 5-4)。發現錯誤的像點數量隨著分群數量 K 的增加，主要可以分為兩段趨勢，首先是由 $K=2$ 至 $K=10$ 的遞減趨勢。接著在 $K=10$ 至 $K=80$ 的區間中，錯誤的像點數量會隨著分群數量 K 的增加在大幅震盪中緩緩上升，由此可知當 $K=10$ 時可視為全域最低點，故本研究將分群數量 K 定為 10。

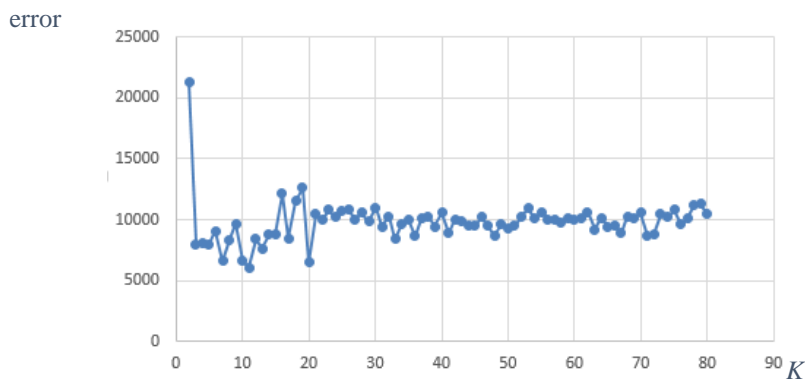


圖 5-2 小圖 1 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖

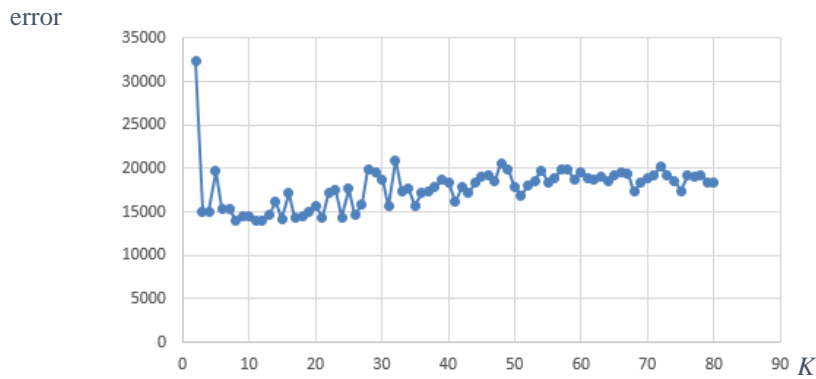


圖 5-3 小圖 2 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖

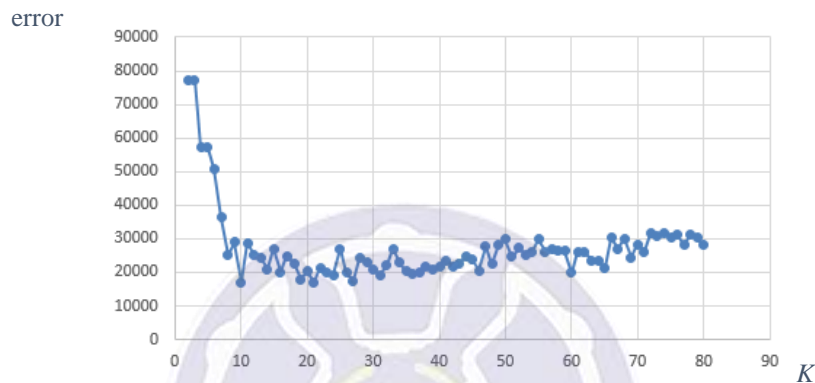


圖 5-4 小圖 3 窮舉分群數量 K 錯誤量波型圖

第二節 參數準確度分析

接著給定分群數量 K 為 10 後，本實驗以圖 5-5 茶園空拍影片為樣本進行分析，其中圖 5-5(a)為中圖 1，圖 5-5 (b)為中圖 2，圖 5-5 (c)為中圖 3。系統窮舉出分割中圖 1 的 T_{var} 與 N 的參數組合，並設 T_{var} 範圍為 33 至 491， N 範圍為 1000 至 3000，總共 154 張分割結果。各自計算該參數組合下篩選掉不具代表性之超像素個數佔全部超像素之比例，並將該比例視為參數組合的刪除率如表 5-4。然後將 154 張分割結果與 ground truth 對應位置的像點相減後得到錯誤像點數如表 5-5，再將錯誤像點數換算為 154 個參數組合的正確率如表 5-6。

中圖 2 如圖 5-5(b)所示之參數組合的刪除率如表 5-7。154 張分割結果與 ground truth 對應位置的像點相減後得到錯誤像點數如表 5-8，再將錯誤像點數換算為 154 個參數組合的正確率如表 5-9。

中圖 3 如圖 5-5 (c)所示之參數組合的刪除率如表 5-10，154 張分割結果與 ground truth 對應位置的像點相減後得到錯誤像點數如表 5-11，再將錯誤像點數

表 5-3 分群數量 K 窮舉錯誤像點量表

no. K	小圖 1	小圖 2	小圖 3	no. K	小圖 1	小圖 2	小圖 3
1				31	9420	15656	19115
2	21376	32415	77227	32	10295	20942	22040
3	7994	15071	77227	33	8392	17410	26969
4	8080	15078	57227	34	9696	17682	22970
5	7997	19728	57227	35	10033	15717	20305
6	9042	15385	50904	36	8635	17164	19438
7	6623	15273	36302	37	10098	17455	19929
8	8359	14054	25126	38	10245	17858	21870
9	9693	14555	28880	39	9436	18652	20869
10	6623	14555	17069	40	10558	18419	21771
11	6068	14045	28735	41	8887	16143	23492
12	8433	14048	25131	42	10051	17826	21784
13	7634	14657	24384	43	9938	17137	22676
14	8781	16175	20944	44	9566	18331	24690
15	8760	14183	27019	45	9491	19038	23667
16	12130	17172	20005	46	10242	19163	20467
17	8480	14274	24858	47	9516	18635	27728
18	11512	14530	22778	48	8655	20634	22482
19	12598	15040	17990	49	9669	19950	28310
20	6492	15730	20401	50	9266	17956	29852
21	10449	14402	17142	51	9507	16953	24669
22	9943	17133	21460	52	10271	18117	27321
23	10819	17540	20124	53	10912	18607	25369
24	10223	14422	19314	54	10079	19794	26079
25	10712	17685	27108	55	10634	18421	29786
26	10786	14620	19910	56	10022	18815	26140
27	10044	15915	17487	57	9997	19928	27116
28	10577	19935	24296	58	9766	19976	26443
29	9829	19634	23130	59	10130	18661	26411
30	10999	18804	20709	60	9952	19571	19868

換算為 154 個參數組合的正確率如表 5-12。圖 5-5 為茶園空拍影片，其中圖 5-5 (a)為中圖 1，圖 5-5 (b)為中圖 2，圖 5-5 (c)為中圖 3。

表 5-4 中圖 1 刪除率

$T_{var} \backslash N$	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	93%	90%	88%	86%	84%	83%	82%	79%	78%	76%	75%
66	71%	69%	65%	62%	59%	57%	55%	54%	52%	50%	48%
98	51%	48%	44%	42%	40%	38%	36%	35%	33%	31%	30%
131	36%	31%	30%	29%	28%	25%	23%	22%	21%	20%	19%
164	25%	23%	20%	19%	18%	17%	15%	15%	14%	13%	13%
197	18%	16%	14%	13%	12%	11%	10%	10%	9%	9%	8%
229	12%	11%	10%	9%	8%	8%	7%	7%	7%	6%	6%
262	9%	8%	7%	6%	6%	6%	5%	5%	4%	5%	4%
295	7%	6%	5%	5%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%
328	5%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%
360	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
393	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	1%
426	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
459	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
491	1%	1%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	0%

表 5-5 中圖 1 錯誤像點數

$N \backslash T_{var}$	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	11375	9110	10616	11200	11839	8529	9347	12970	12873	11041	10926
66	9338	10856	9501	9659	9428	9368	9351	9376	9478	9672	9365
98	9534	9429	9433	9334	9460	9340	10315	9347	9379	9416	10294
131	9439	10406	10426	9345	9405	9362	10321	10319	10324	10193	10280
164	9428	9390	10490	10318	10289	11779	10318	10183	9382	10283	10175
197	9424	9411	12006	11757	11738	10285	11729	9375	9406	10289	10138
229	11961	10321	10304	11731	10304	11929	10161	10297	10302	10177	10305
262	10299	10307	10299	10287	10298	11691	11694	11456	10140	10137	9842
295	10302	10298	10297	10160	10145	11638	10165	12039	12025	12036	12037
328	10095	10298	10136	10129	11741	11866	10302	12034	12037	12048	12037
360	11944	10125	10119	10106	11905	11913	11789	12034	12964	12050	12038
393	11833	9628	9643	11907	11684	11902	10128	12045	12044	12042	12038
426	11685	11815	11828	11779	11828	11911	11800	12037	12039	12040	12040

表 5-6 中圖 1 正確率

$T_{var} \backslash N$	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	83%	87%	84%	83%	83%	87%	86%	81%	81%	84%	84%
66	86%	84%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%
98	86%	86%	86%	86%	86%	86%	85%	86%	86%	86%	85%
131	86%	85%	85%	86%	86%	86%	85%	85%	85%	85%	85%
164	86%	86%	85%	85%	85%	83%	85%	85%	86%	85%	85%
197	86%	86%	82%	83%	83%	85%	83%	86%	86%	85%	85%
229	82%	85%	85%	83%	85%	82%	85%	85%	85%	85%	85%
262	85%	85%	85%	85%	85%	83%	83%	83%	85%	85%	85%
295	85%	85%	85%	85%	85%	83%	85%	82%	82%	82%	82%
328	85%	85%	85%	85%	83%	83%	85%	82%	82%	82%	82%
360	82%	85%	85%	85%	82%	82%	83%	82%	81%	82%	82%
393	83%	86%	86%	82%	83%	82%	85%	82%	82%	82%	82%
426	83%	83%	83%	83%	83%	82%	83%	82%	82%	82%	82%
459	82%	82%	82%	83%	83%	83%	82%	82%	82%	82%	82%
491	82%	82%	82%	83%	83%	83%	83%	82%	82%	82%	82%

由實驗結果可知，為了自動化的選出適合各種不同情況的影像之參數，系統會選出的最佳參數組合 $[T_{var}, N]$ 為最適合的參數範圍中 superpixels 刪除率最接近 50%之參數組合，但系統選出的最佳參數組合不一定是 ground truth 中茶樹土壤分割結果的正確率最高的參數組合，但是相較於整體的平均正確率而言，系統選出的參數組合仍然遠高於茶樹土壤分割結果的平均的正確率。實驗結果顯示，茶樹土壤分割結果的平均正確率約為 83%，而系統選擇的最佳參數組合平均正確率約為 86%，而實驗結果的 ground truth 最高正確率則落在 87%左右。由此可知本系統具有選擇較佳分割參數之效果。

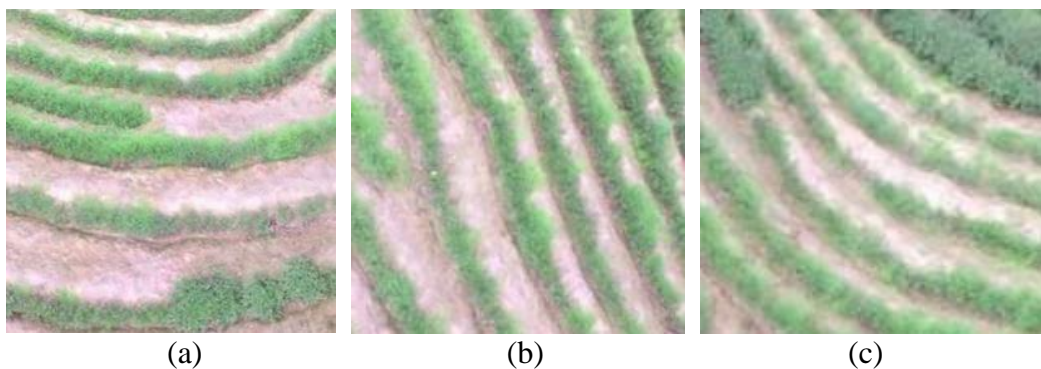


圖 5-5 茶園空拍影片(a)中圖 1(b)中圖 2(c)中圖 3

表 5-7 中圖 2 刪除率

$T_{var} \backslash N$	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	92%	90%	89%	86%	84%	83%	82%	79%	78%	77%	75%
66	71%	69%	66%	62%	59%	57%	56%	53%	52%	50%	49%
98	52%	49%	44%	42%	41%	38%	36%	35%	33%	31%	30%
131	36%	31%	30%	28%	28%	26%	23%	21%	21%	20%	19%
164	25%	21%	20%	19%	18%	17%	15%	15%	14%	13%	13%
197	18%	16%	14%	13%	12%	11%	10%	10%	9%	9%	8%
229	12%	11%	10%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	6%
262	9%	8%	7%	6%	6%	6%	5%	5%	4%	5%	4%
295	7%	6%	6%	5%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%
328	5%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%
360	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
393	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	1%
426	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
459	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
491	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%

表 5-8 中圖 2 錯誤像點數

$N \backslash T_{var}$	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	11575	9110	10615	11230	11839	8559	9337	12970	12873	11041	10922
66	9328	10856	9561	9359	9428	9368	9352	9386	9478	9672	9365
98	9535	9229	9432	9334	9460	9340	10315	9344	9379	9416	10291
131	9339	10426	10436	9343	9405	9962	10321	10316	10354	10193	10282
164	9418	9390	10490	10368	10289	11779	10318	10183	9382	10283	10175
197	9524	9413	12003	11757	11538	10285	11729	9375	9406	10229	10134
229	11941	10321	10306	11731	10304	11929	10161	10297	10302	10179	10305
262	10699	10207	10299	10287	10298	11691	11694	11453	10140	10137	9892
295	10362	10228	10299	10160	10145	11638	10165	12039	12095	12036	12037
328	10055	10291	10138	10129	11741	11866	10302	12036	12035	12048	12037
360	11944	10125	10119	10306	11906	11913	11783	12034	12966	12050	12038
393	11853	9622	9646	11907	11685	11902	10128	12045	12044	12042	12032
426	11185	11813	11858	11779	11868	11911	11800	12036	12039	12040	12043
459	12025	12027	12625	11819	11782	11723	11910	12045	12040	12038	12051
491	12089	12031	16036	11824	11741	11817	11593	12082	12041	12035	12091

表 5-9 中圖 2 正確率

T_{var} \ N	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	84%	86%	85%	84%	83%	87%	86%	82%	81%	85%	84%
66	85%	84%	86%	86%	85%	86%	86%	86%	86%	86%	85%
98	85%	86%	86%	86%	86%	86%	85%	86%	86%	86%	84%
131	85%	85%	85%	86%	86%	86%	85%	84%	85%	85%	85%
164	85%	85%	85%	85%	84%	83%	85%	85%	86%	85%	84%
197	85%	86%	82%	83%	83%	85%	83%	85%	86%	85%	85%
229	81%	85%	85%	83%	85%	81%	84%	84%	85%	85%	85%
262	84%	85%	85%	85%	85%	83%	83%	83%	85%	85%	85%
295	85%	85%	85%	85%	85%	83%	85%	82%	82%	82%	81%
328	85%	84%	85%	85%	83%	83%	85%	82%	82%	82%	82%
360	83%	85%	85%	85%	82%	82%	83%	82%	81%	82%	81%
393	82%	85%	86%	82%	83%	82%	85%	82%	81%	82%	82%
426	83%	83%	83%	83%	83%	82%	83%	82%	82%	82%	82%
459	82%	83%	82%	83%	83%	83%	82%	81%	82%	81%	81%
491	83%	82%	82%	83%	83%	83%	83%	82%	82%	82%	82%

表 5-10 中圖 3 刪除率

T_{var} \ N	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	93%	90%	88%	86%	84%	83%	82%	79%	78%	76%	75%
66	72%	69%	65%	62%	59%	57%	54%	54%	52%	51%	50%
98	52%	49%	44%	42%	40%	38%	36%	35%	33%	31%	30%
131	36%	31%	30%	29%	28%	25%	23%	22%	21%	20%	19%
164	25%	23%	20%	19%	18%	18%	15%	15%	14%	13%	13%
197	18%	16%	14%	13%	12%	11%	10%	10%	9%	9%	8%
229	12%	12%	10%	9%	8%	8%	7%	7%	6%	6%	6%
262	9%	8%	7%	6%	6%	6%	5%	4%	4%	5%	4%
295	7%	6%	6%	5%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	2%
328	5%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%
360	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	1%
393	3%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%
426	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
459	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%
491	1%	1%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	0%

表 5-11 中圖 3 錯誤像點數

N T_{var}	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	11372	9110	10616	11200	11839	8529	9347	12970	12873	11041	10925
66	9338	10856	9501	9659	9428	9368	9351	9374	9474	9672	9355
98	9534	9429	9432	9334	9460	9340	10315	9347	9379	9456	10294
131	9439	10406	10426	9345	9405	9362	10341	10349	10354	10193	10280
164	9428	9390	10496	10318	10289	11779	10318	10185	9384	10283	10175
197	9424	9412	12046	11757	11745	10255	11729	9375	9486	10289	10138
229	11961	10321	10304	11731	10304	11929	10161	10297	10302	10177	10305
262	10299	10305	10299	10247	10298	11691	11692	11456	10140	10137	9842
295	10302	10298	10297	10140	10145	11648	10165	12039	12025	12036	12037
328	10095	10298	10136	10129	11741	11846	10302	12034	12237	12048	12037
360	11945	10155	10159	10106	11905	11913	11789	12034	12964	12050	12038
393	11833	9628	9653	11907	11584	11902	10128	12045	12044	12022	12038
426	11685	11815	11828	11779	11858	11911	11800	12037	12039	12040	12044
459	12027	12027	12025	11819	11782	11793	11915	12040	12042	12038	12042
491	12024	12030	12036	11844	11741	11847	11793	12042	12045	12049	12031

表 5-12 中圖 3 正確率

T_{var} N	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
33	83%	87%	84%	84%	83%	87%	86%	81%	81%	84%	84%
66	85%	85%	85%	86%	85%	86%	86%	86%	86%	85%	85%
98	86%	86%	86%	86%	86%	86%	85%	86%	86%	86%	85%
131	86%	85%	85%	85%	86%	86%	85%	85%	85%	85%	85%
164	85%	86%	85%	85%	84%	83%	85%	85%	85%	85%	84%
197	86%	86%	84%	84%	83%	85%	83%	86%	85%	85%	84%
229	83%	85%	85%	83%	84%	82%	84%	85%	85%	84%	85%
262	84%	86%	84%	85%	85%	83%	83%	83%	85%	84%	85%
295	84%	85%	85%	85%	85%	84%	85%	82%	82%	82%	82%
328	83%	85%	85%	85%	83%	83%	85%	82%	82%	82%	82%
360	82%	86%	84%	85%	82%	82%	84%	82%	81%	82%	82%
393	82%	86%	85%	82%	83%	82%	85%	82%	82%	82%	82%
426	83%	85%	84%	83%	83%	82%	83%	82%	82%	82%	82%
459	83%	84%	82%	83%	83%	83%	82%	82%	82%	82%	82%
491	82%	82%	82%	83%	83%	83%	83%	82%	82%	82%	82%

第三節 不同尺寸影像之覆蓋率分析

不同尺寸的影像會有不同的生長率與覆蓋率，故本實驗針對不同尺寸的覆蓋率進行測試，測試結果如下表 5-13。其中 result 表示系統偵測之影像覆蓋率，ground truth 表示實際茶園覆蓋率，accuracy rate 為系統偵測之影像覆蓋率正確率。由表 5-13 中的 total accuracy rate 可見，輸入影像尺寸越小，覆蓋率估計越準確。故本研究先進行 640×480 的影像分割，再將數張 640×480 的分割結果縫合成一張 1800×1200 的完整茶園影像。

表 5-13 不同尺寸影像覆蓋率

Size No. image	50×50			100×100			640×480		
	Result	Ground truth	Accuracy rate	Result	Ground truth	Accuracy rate	Result	Ground truth	Accuracy rate
1	83%	77%	94%	65%	57%	92%	87%	74%	87%
2	75%	70%	95%	90%	83%	93%	55%	45%	90%
3	46%	42%	96%	81%	76%	95%	86%	76%	90%
4	86%	82%	96%	83%	75%	92%	85%	73%	92%
5	65%	60%	95%	66%	56%	90%	86%	74%	88%
6	56%	52%	96%	72%	64%	92%	87%	78%	91%
7	73%	66%	93%	52%	45%	93%	73%	65%	92%
8	84%	78%	94%	84%	76%	92%	74%	64%	90%
9	74%	68%	94%	64%	55%	91%	86%	75%	89%
10	83%	76%	93%	73%	63%	90%	85%	75%	90%
Total			95%			92%			91%

表 5-14 縫合結果覆蓋率正確率

No. video \ Size	1800×1200	Ground truth	Accuracy	Total
1 (1073 frames)	73%	62%	89%	90%
5 (1228 frames)	70%	61%	91%	
10(998 frames)	66%	55%	90%	
11(990 frames)	67%	87%	80%	

由表 5-14 可知系統縫合結果的覆蓋率與 ground truth 比較後得到的正確率為 90%，另取 video 11 的青心烏龍作為對照。圖 5-6 為 video 1 之縫合結果，圖 5-7

為 video 5 之縫合結果，圖 5-8 為 video 10 之縫合結果，圖 5-9 為 video 11 之縫合結果。

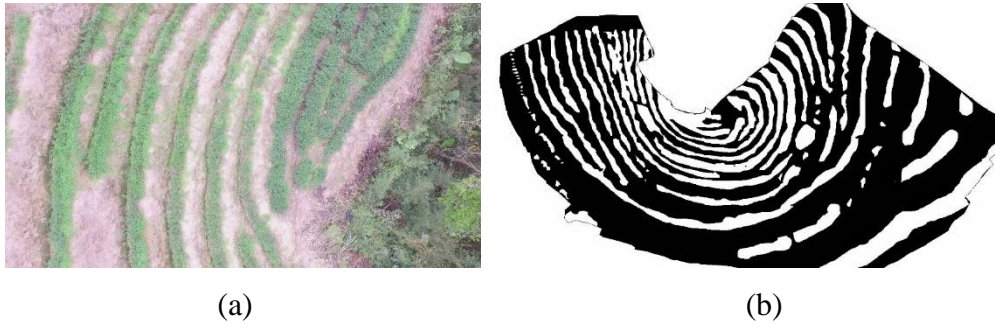


圖 5-6 Video 1 縫合結果(a)其中一張實例圖(b)縫合結果



圖 5-7 Video 5 縫合結果(a)其中一張實例圖(b)縫合結果

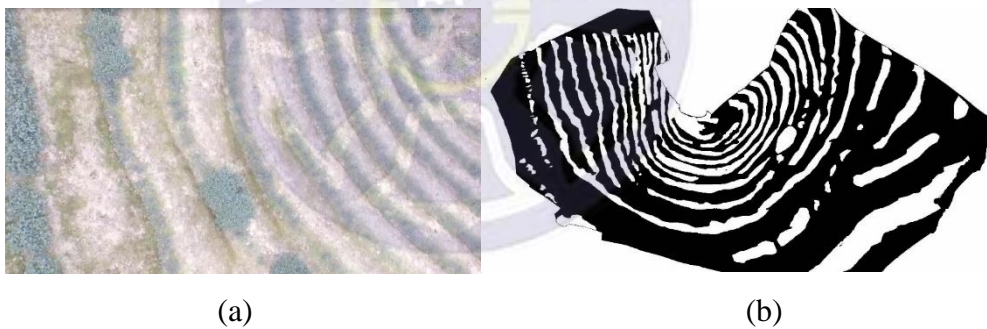


圖 5-8 Video 10 縫合結果(a)其中一張實例圖(b)縫合結果



圖 5-9 Video 11 縫合結果(a)其中一張實例圖(b)縫合結果

第6章 結論與未來工作

第一節 結論

本研究使用無人飛行載具拍攝之空拍影像估計茶園的覆蓋率與成長率等資訊，其目的在藉由監測設備的進步來提升茶園產量，以彌補農村人口老化與農業勞動力流失造成農業生產力下降的問題。本系統主要分為訓練集篩選、影像分割、去除雜訊、影像縫合與成長率估計等五個步驟。

將無人飛行載具拍攝之空拍影像以本研究自行研發的一種亂度評估方式來評估輸入影像的混亂程度後，以 SLIC 演算法將輸入影像分割為 N 個 superpixels 所組成的分割影像，並且利用系統評估的混亂程度估計亂度篩選閾值 T_{var} ，再根據篩選後分割影像中 superpixels 之刪除率來決定最適合的參數組合 $[N, T_{var}]$ 。找出合適的訓練集後本研究將影像轉至 HSV 色彩空間，並利用 K-means 演算法將影像作茶樹與土壤的分割，再重新利用 SLIC 演算法分割影像中建立更小的 superpixels，並經過 superpixel 內的像點投票結果來達到去除雜訊的效果。最後利用 GoPro 公司開發的 Kolor Autopano Giga 3.7 影像縫合軟體將茶園內不同區域的分割結果縫合成完整的茶園分割結果，並且經過比對不同時間點獲得之茶園分割結果來估計茶園的成長率。

實驗影片共有 10 段，均為為台北市近郊貓空茶園不同時段的低空拍攝影像，合計影片長度約為 30 分鐘。透過實驗結果可得知，茶樹土壤分割之平均正確率約為 86.3%，若未來考慮加入更多特徵並深入考慮光線與風速對影像造成的影響，則本系統的辨識效果會更加良好。

第二節 未來工作

本系統未來還有些許地方需要改進，在影像分割及特徵擷取方面，未來希望將系統加速並加入其他特徵使得茶園土壤分類能更加準確。在生物量偵測方面，本系統僅偵測茶園的覆蓋率與成長率，但實際上在農業經營的範疇中還有其他許多需求的生物量，未來希望能增加偵測的生物量類別，使得偵測結果能更多樣化。

本系統的影像分割依賴對綠色的分類，但綠色中還具有很多不同的層次，目前本系統尚不具辨識各種綠色之間差異的功能，未來希望能夠加入不同狀態的茶樹(如病害和蟲害)的偵測，以及綠色茶樹以外其他偵測標的(如果實和土壤含水率)的辨識，並且以現有的系統為基礎分別針對其他的樹種或各種天然資源進行偵測。

本研究目前由手動操縱無人飛行載具拍攝茶園影像，雖然取代了人工進行田野調查的工作量，但是還是需要經過專業訓練的飛行駕駛去操縱無人飛行載具。並且仍有許多地方尚未完全自動化，影像間的重疊需要人工將事先選定的定位物體做重疊，所以未來希望能與自動起降尋航系統整合，並且加入自動選擇定位點的功能，使得影像縫合的過程能夠達到完全的自動化，然後在系統中加入風速測量的環節，使得系統能夠針對不同的環境設定適合的飛行路線與飛行速度，並且自動連網擷取當日天氣狀況評估是否符合不同地區監測任務的執行，發展成全方位的自動化生物量監控系統。



參考文獻

- [1] "Council of agriculture, Executive Yuan" [Online]. Available: <http://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/common/CommonStatistics.aspx>.
- [2] "The international labour organization (ILO)," [Online]. Available: <http://www.ilo.org/global/industries-and-sectors/agriculture-plantations-other-rural-sectors/lang--en/index.htm>.
- [3] "General of budget, accounting & statistics (DGBAS)," [Online]. Available: <http://www.stat.gov.tw/ct.asp?xItem=39451&ctNode=516&mp=4>.
- [4] Vin, "Forest mensuration and practice," 2004.
- [5] N. T. U. S. Laboratory, [Online]. Available:<http://seed.agron.ntu.edu.tw/>.
- [6] P. West, "Tree and forest measurement," Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [7] Z. Somogyi and E. Cienciala, "Indirect methods of large scale," *European Journal of Forest Research*, vol. 126, pp. 197-207, 2007.
- [8] S. Gower, C. Kucharik, and J. Norman, "Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems," *Remote Sensing of Environment*, vol. 70, pp. 29-51, 1999.
- [9] S. Salis, M. Assis, and P. Mattos, "Estimating the aboveground biomass and wood volume of savanna woodlands in Brazil's Pantanal wetlands based on allometric correlations," *Forest Ecology and Management*, vol. 228, pp. 61-68, 2006.
- [10] R. Pilli, T. Anfodillo, and M. Carrer, "Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass," *Forest Ecology and Management*, vol. 237, pp. 583-593, 2006.
- [11] P. Muukkonen, "Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe," *European Journal of Forest Research*, vol. 126, pp. 157-166, 2007.
- [12] G. West, J. Brown, and B. Enquist, "A general model for the origin of allometric scaling laws in biology," *Science*, vol. 276, pp. 122-126, 1997.

- [13] S. Brown and A. Lugo, "Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes," *Science*, vol. 233, pp. 1290-1293, 1984.
- [14] R. Whittaker and G. Likens, "Methods of assessing terrestria productivity," New York: Springer-Verlag, pp. 305-328, 1975.
- [15] S. Brown and A. Lugo, "Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes," *Science*, vol. 233, pp. 1290-1293, 1984.
- [16] J. Fang, G. Wang, and G. Liu, "Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship," *Ecological Applications*, vol. 8, pp. 1084-1091, 1998.
- [17] Y. Pan and T. Luo, "New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation," *Climatic Change*, vol. 67, pp. 211-236, 2004.
- [18] G. Zhou, Y. Wang, and Y. Jiang, "Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's Larix forests," *Forest Ecology and Management*, vol. 169, pp. 149-157, 2002.
- [19] J. Smith, L. Heath, and J. Jenkins, "Forest volume-to-biomass models and estimates of mass for live and standing dead trees of U. S. forests," pp. 1-62, 2003.
- [20] C. Huang and J. Zhang, "Spatio-temporal changes of forest carbon reserves in Sichuan province," *Applied Ecology*, vol. 18, pp. 2687-2692, 2007.
- [21] M. Zhao and G. Zhou, "Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data," *Forest Ecology and Management*, vol. 207, pp. 295-313, 2005.
- [22] "Guidelines for national greenhouse gas inventory," IPCC, [Online]. Available: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>.
- [23] D. Turner, G. Koepper, and M. Harmon, "A carbon budget fo forests of the conterminous United States," *Ecological Applications*, vol. 5, pp. 421-436, 1995.
- [24] H. LÊewe, G. Seufert, and F. Raes, "Comparison of methods used within Member States for estimating CO2 UNFCCC and EU Monitoring Mechanism: forest and other wooded land," *Biotechnologie Agronomie*

- Societe et Environnement*, vol. 4, pp. 315-319, 2000.
- [25] J. Fang, A. Chen, and C. Peng, "Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998," *Science*, vol. 291, pp. 2320-2322, 2001.
- [26] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 679-714, 1986.
- [27] M. Sezgin and B. Sankur, "Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation," *Electronic Imaging*, vol. 13, pp. 146-165, 2004.
- [28] M. Cohen, S. Elder, C. Musco, C. Musco, and M. Persu, "Dimensionality reduction for k-means clustering and low rank approximation," *ArXiv*, 2014.
- [29] A. Radhakrishna, S. Appu, S. Kevin, L. Aurelien, F. Pascal, and S. Sabine, "SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods," *Latex Class Files*, vol. 6, pp. 1-8, 2011.
- [30] "Wiki HSL and HSV," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/HSL_and_HSV.
- [31] "Kolor autopano giga 3.7, " GoPro, [Online]. Available: <http://www.kolor.com/2014/10/20/panorama-software-autopano-pro-giga-3-7-final/>.

附錄 A DJI Phantom 4 規格

飛行器		遙控器	
重量(含電池及槳)	1280 克	最大信號有效距離	5000 米 (無干擾、無遮擋, FCC 模式) 3500 米 (無干擾、無遮擋, CE 模式)
對角線距離(含槳)	590 毫米	視頻輸出接口	USB
最大上升速度	5 米/秒	工作環境溫度	0°C- 40°C
最大下降速度	3 米/秒	電池	6000 mAh 鋰充電電池 2S
懸停精度	垂直: +/- 0.1 米(超聲波工作範圍內); +/- 0.5 米 水平: +/- 1.5 米	移動設備支架	適用於平板電腦或手機
最大水平飛行速度	16 米/秒 (ATTI 模式下, 海平面附近無風環境)	接收靈敏度 (1%PER)	-101dBm ±2dBm
最大飛行海拔高度	6000 米	等效全向輻射功率 (EIRP)	FCC: 20 dBm CE: 16 dBm
工作環境溫度	0°C 至 40°C	工作電流/電壓	1.2 A / 7.4 V
智能飛行電池		雲台	
電池整體重量	365 克	可控轉動範圍	俯仰 -90° 至 +30°
飛行時間	約 23 分鐘	穩定系統	3 軸 (俯仰, 橫滾, 偏航)
充電環境溫度	-10°C to 40°C	工作頻率	2.400 GHz- 2.483 GHz
電池整體重量	365 克		

相機			
影像傳感器	1/2.3 英寸 CMOS 有效像素 1240 萬 (總像素 1276 萬)	錄像分辨率	HD:1280x720p 24/25/30/48/50/60
鏡頭	FOV 94° 20 mm (35 mm 格式等效) f/2.8 對焦點 無窮遠	支持存儲卡類型	Micro-SD 卡最大 支持 64GB 容 量，傳輸速度為 Class 10 及以上 或達到 UHS-1 評 級的 MicroSD 卡
ISO 範圍	100-3200 (視頻) 100-1600 (照片)	視頻存儲最大碼 流	40 Mbps
電子快門速度	8 秒至 1/8000 秒	支持文件存儲格 式	文件系統: FAT32/exFAT 圖片格式: JPEG, DNG 視頻格式: MP4,MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
照片最大分辨率	4000 x 3000 單張拍攝 多張連拍 (BURST):3/5/7 張	工作環境溫度	0°C 至 40°C
照片拍攝模式	自動包圍曝光 (AEB): 3/5 張 0.7EV 步長定時 拍攝	影像傳感器	1/2.3 英寸 CMOS 有效像素 1240 萬 (總像素 1276 萬)