

出國報告（出國類別：進修）

植物表型體影像分析創新科技研習

服務機關：農業部花蓮區農業改良場

姓名職稱：張中行 助理研究員

派赴國家/地區：荷蘭

出國期間：114年06月21日至114年07月01日

報告日期：114年08月26日

摘要

本計畫赴荷蘭研習 11 天，針對植物表型體影像分析技術的農業應用為主題至瓦赫寧根大學暨研究中心參與「植物表型體影像分析」暑期課程，學習無人機影像、多光譜影像、3D 影像以及機器學習等相關分析技術，並參訪荷蘭植物環境表型體中心，了解先進的自動化、高通量表型體資料收集軟硬體相關技術。這些技術能夠精確且自動化監測作物生長過程中的各項生理特徵，減少傳統人工調查所需人力時間成本，加速品種選育及逆境調適相關基礎研究，在提升農業研究效率和氣候韌性上具相當潛力。透過本次研習，了解荷蘭植物表型體影像分析創新科技的理論、應用及發展趨勢，有助往後相關農業研究的長期規劃，期待這些技術能實際落地應用於我國農業研究，提升農業生產效率及氣候韌性，以實現智慧、韌性之政策目標。

目錄

摘要	1
研習目的	3
行程紀要	4
研習內容	5
一、荷蘭瓦赫寧恩大學暨研究中心植物表型體影像分析課程	5
二、荷蘭植物環境表型體中心	12
三、其他參訪行程	15
（一）瓦赫寧恩市集	15
（二）水上花市	16
研習心得及建議	18

研習目的

隨著近年硬體設備及機器學習等技術不斷更新，影像分析以非破壞性、環境友善、降低成本等優點在農業研究蓬勃發展，在自動化精準管理、病蟲害監測防治、作物表型體鑑定、採後分級處理、農產品質檢測等多元面向均累積相當豐碩成果。國內影像分析相關的農業研究主要集中於水稻、病蟲害辨識方面，但在其他作物及產業實際應用上則相對匱乏。為提升影像分析技術在農業之應用，本計畫擬赴荷蘭瓦赫寧恩大學暨研究中心參與植物表型體影像分析課程，研習先進的作物影像表型體分析技術。課程內容包含影像擷取、影像處理、無人機、高光譜、機器學習、3D 成像等全方位之農業影像分析技術理論及實作，期能將技術內化，以實際應用於田間調查，提升育種、生理研究效率，並更進一步將相關軟硬體及分析流程等知識移轉在臺灣落地，導入在地農產業，利用先進技術解決當前產業面臨的問題，以達到農業部智慧、韌性之政策目標。

行程紀要

日期	地點	行程內容
114/06/21	臺灣、荷蘭	19:50 桃園國際機場起飛
114/06/22	荷蘭 阿姆斯特丹、瓦赫寧恩	06:55 抵達荷蘭阿姆斯特丹史基浦機場 阿姆斯特丹至瓦赫寧恩路程
114/06/23	荷蘭 瓦赫寧恩	實體課程第 1 天 Introduction, Image Acquisition, and Noise Filtering
114/06/24	荷蘭 瓦赫寧恩	實體課程第 2 天 Aerial Phenotyping, Segmentation, and NPEC guided tour
114/06/25	荷蘭 瓦赫寧恩	實體課程第 3 天 Spectral Imaging, Machine Learning, and Neural Networks
114/06/26	荷蘭 瓦赫寧恩	實體課程第 4 天 Deep Learning and 3D vision
114/06/27	荷蘭 瓦赫寧恩	實體課程第 5 天 Experimental Design, Practical Session, and Closure
114/06/28	荷蘭 瓦赫寧恩	收集瓦赫寧恩市集農產品資訊 資料整理及報告撰寫
114/06/29	荷蘭 瓦赫寧恩、阿姆斯特丹	瓦赫寧恩至阿姆斯特丹路程 水上花市參訪
114/06/30	荷蘭 阿姆斯特丹	12:15 荷蘭阿姆斯特丹史基浦機場起飛
114/07/01	荷蘭、臺灣	09:55 抵達桃園國際機場

研習內容

一、荷蘭瓦赫寧恩大學暨研究中心植物表型體影像分析課程：

瓦赫寧恩大學暨研究中心(Wageningen Universiteit en Research centrum，WUR)為荷蘭農業研究的核心機構，被公認為歐洲生命科學的領航者，名列荷蘭高等教育指南及世界農業大學排名榜首，集研究、教學及培訓為一體，是農業、食品領域的頂尖學府。其近年研究方向除聚焦在氣候調適、循環經濟、生物多樣性、零飢餓等永續發展目標外，在農業領域導入影像分析及 AI 技術是其長期研究主軸之一。而除了學術研究之外，WUR 亦與產業密切接軌，範圍涵蓋種苗、畜牧、食品、精準農業、水資源及環境保護，利用公私協力、合作研究、共享研究設施的模式，制度化地讓學生、研究人員、私人企業在同一體系內緊密交流，實現從基礎研究到商品化的完整商業模式。WUR 內除了有專業團隊培育新創公司外，許多中大型農業、食品公司（如：KeyGene、Rijk Zwaan 等）亦利用 WUR 實驗設施建立研發據點，荷蘭最大的乳製品公司 FrieslandCampina 及全球最大消費品公司之一的 Unilever 等跨國大型企業甚至在校園內設立研發中心，持續與 WUR 合作，足見 WUR 學術研究與產業應用的緊密結合，因此其所開設的短期課程總是吸引來自世界各國農業產官學各界專業人士學習進修。

WUR 的短期課程獨立於大學及研究所學程之外，於夏、冬兩季開設，主題除了常設的溫室管理、動物科學、食品加工、農業生態外，亦隨著科

研演進及產業環境需求開設太空農業、農業韌性調適及本計畫所參與的植物表型體影像分析等創新領域課程。課程師資依據課程主題由 WUR、歐洲頂尖研究機構或產業界專家所組成，內容理論與實作緊密結合，每年都吸引來自世界各地不同背景的學員參與。本次參加 WUR 夏季為期 5 天的植物表型體影像分析（Image Analysis for Plant Phenotyping）課程，學習內容包含課前線上預備課程、實體課程、參訪行程三個部分。線上預備課程包含影像擷取原理、基礎影像處理及農用無人機影像分析三門理論課程；實體課程包含可見光、無人機、多光譜、3D 光達等不同來源影像處理及分析的理論與實作，影像分析更拆解為語意分割、實例分割、物件偵測及機器學習等多個單元探討及實作；此外，課程中也安排了先正達數位農業公司的研發經理分享產業界在電腦視覺農業應用上的觀點，並邀請統計學家及芬蘭農業部自然資源研究機構(Luke)的專家分享田間試驗資料分析統計模型及葉綠素螢光上的創新研究；參訪行程則包含設立在 WUR 內的荷蘭植物環境表型體中心(Netherlands Plant Ecophenotyping Centre，NPEC)表型體研究溫室以及大型生長箱設施。本屆學員組成來自 12 個國家，學員背景涵蓋學術機構、官方研究單位及園藝、種苗業私人公司，大家都懷抱著對植物表型體應用的想像甚至是正在進行的專案齊聚一堂，透過不同產業背景的觀點及專長互相交流學習，獲取各界實用的資訊與建議，建立與國外農業從業人員的聯絡管道，是這門課程除了扎實內容外的收穫。

在遺傳育種領域中我們經常使用 $P(\text{外表型})=G(\text{基因型})+E(\text{環境因子})+G \times E(\text{基因與環境交互作用})$ 來描述植物體呈現最終外表性狀的機制，在 2000 年代初期隨著基因定序技術的突破性發展，研究者能夠快速取得數以萬計的基因型資訊，然而傳統外表型性狀資料仰賴人工調查，蒐集方式緩慢、主觀且難以標準化，造成基因體學與表型體學發展上的差距，於是相同時期便有學者提出自動化、多尺度、高通量的技術是表型體學當前的需求，世界各國的農業學研機構便陸續開始投入高通量表型體技術(High-throughput phenotyping)的研究。2010 年代後隨著機器視覺、無人機及人工智慧(Artificial Intelligence, AI)軟體技術發展，田間影像研究應用興起，WUR 也在此時期開始投入研究量能發展出場域擴及實驗室、溫室到田間，技術涵蓋無人機、多光譜、3D 影像等的作物表型體影像分析與研究，更從 2018 年開始籌備設立 NPEC 並於 2023 年完全對外開放營運，而除了 NPEC 的大型儀器外，WUR 也依照產業不同需求發展出利用智慧型手機測量作物性狀的模組，在表型體影像分析的研究與應用上有豐富經驗。本次課程的負責人之一 Rick van de Zedde 是現任 NPEC 的技術總監，具有 NPEC 起造至營運的寶貴經驗，因此本次課程內容也充分與現實接軌，在理論課程分享許多過去相關研究結果與經驗，並在實作部分提供學員真實試驗資料學習不同影像的分析方法。

在無人機影像方面，課程提到 WUR 目前的無人機研究小組共有 30 位

合格無人機駕駛、20 套無人機系統以及 10 種以上負載式的相機系統，並已完成超過 25 項研究專案，主要為生態監測、農林業系統分析及作物性狀調查，例如其中一項研究便利用無人機搭載可見光、多光譜相機監測夏季綠肥輪作作物與土壤間的交互作用，以此預測綠肥氮的供給量分析最適當的輪作品種及模式。實作課程我們利用 Agisoft Metashape 軟體分析藜麥品種比較田間試驗的空拍影像，操作正射影像轉換及植被高度模型建立，學習如何透過無人機空拍影像估計出作物株高的方法。

作物株高、株幅、葉片數等結構外表型使用可見光影像即可分析，但在葉綠素、花青素、濕度等化學物質含量的變化則需仰賴多光譜影像方能辨識。多光譜影像分析課程內容除了基礎原理外，也提醒學員光源的重要性，人造光源建議選擇波長範圍較完整的鹵素燈，以免因為光源波長導致所收集的反射光譜資料偏斜。而在多光譜的實際應用上，由於植株葉片並非平整，與校正使用的平整標準板有所差異，經常造成反射光譜測量上的誤差，課程也提出可考慮以化學計量標準化(chemometric normalisation)過濾這些效應的創新校正方法。在實作部分我們則利用 Python 程式語言分析耐旱及水分敏感兩品種阿拉伯芥乾旱試驗的多光譜影像，學習提取多光譜影像資料特徵並應用於不同乾旱時間的分析上。

為了捕捉更精細複雜的作物性狀（例如：節間長度、花梗長度等）、避免平面影像遮蔽問題，並更完整了解作物形態上的結構與發育過程，

WUR 也在作物 3D 影像建模上投入量能，在光達(LIDAR)、三角定位(Triangulation)及多視立體(Multi-view)的 3D 重建技術都有研究及應用。作物 3D 影像由於資料量龐大，除同時能取得及運算的資料有限外，資料內部也經常因為作物先天結構的問題（葉片部份遠多於莖部、花朵）以致資料不平衡影響分析。為解決這些挑戰，WUR 利用生成式 AI 的策略擴大有限的資料集以及減緩資料不平衡的問題，更導入機器學習協助 3D 影像較難處理的影像標註工作，除建立高準確度且自動化的器官分類模型外，最近甚至朝向納入更多影像參數的 4D 影像分析進行研究當中。在實作部分我們則利用 Python 中的 Pytorch 模組分析番茄幼苗的 3D 影像並使用標註好的影像建立分辨葉片與莖部的 3D 影像語意分割模型。

除了前述不同影像擷取技術與應用外，課程也同時著重在影像擷取後的處理分析，內容涵蓋從傳統影像處理方法、監督式機器學習影像分析到當前熱門的深度學習模型，使學員能夠了解影像分析當中語意分割、實例分割及物件偵測等各項任務的訴求、原理及基礎分析流程，並嘗試利用 k-means、k-nearest neighbour、MLP、MaskRCNN、YOLOv8 等演算法及模型處理阿拉伯芥、番茄等作物影像，學習背景分割、影像特徵提取、影像分類、物件偵測等影像分析及模型建構流程。

在表型體影像分析技術的理論及實作之外，本課程更邀請了先正達數位農業公司電腦視覺部門的研發經理 Rob Lind 先生分享產業界對作物表型

體影像分析的觀點。Rob Lind 先生在報告中分享該公司影像擷取、預處理、建模、分析、應用的分工流程，也提到他們目前也大量利用生成式 AI 來產生影像資料，以增加模型的精確度。而在生成式模型當中，他強調逐步迭代生成影像的擴散網路(Diffusion Network)雖然需要更多運算成本，但其除能產生大量高品質有效的影像，也能生成標註完成的影像，對訓練影像處理模型提升精確度效果顯著，非常可能是未來生成式模型的主流，因此該公司也投入資本針對這部分進行研發。除了生成式 AI 外，由於該公司在農業資材開發上進行大量作物試驗，但相同植物材料經常由於季節、植株健康狀態等原因在不同試驗有所差異，病害程度分級等性狀又較為主觀，因此他們目前正在開發利用暹羅神經網路(Siamese Neural Network)綜合處理組作物影像、對照組作物影像及基礎資料，產生處理組與對照組的比較分數(Comparative score)，藉此消弭環境及人工對作物試驗數據造成的干擾。此外，他也分享了公司實際的案例，例如他們透過深度學習模型辨識並精準管理雜草，能夠降低 90 %的除草劑用量，顯示機器視覺及影像分析在農業場域中實際應用的潛力。

而在課程的最後，我們也透過「Bring your own images」的小組專題針對各自帶來的影像及希望透過影像解決的問題進行討論，學員們來自不同背景各有所長，因此在討論過程中可以了解到不同角度的觀點及處理策略。我所帶去討論的題目是希望可以透過青蔥植株影像取得蔥白長度、蔥

綠長度、分蘗數等重要園藝性狀，甚至透過機器學習的方式建立青蔥品種識別的模型。所幸組員們認為是一個有趣的題目，因此我們在討論後提出可能的工作流程並上臺發表，其他學員及講師也依據他們的經驗給予專業的建議，讓我們的工作構想能夠更加周全。本次參加 WUR 植物表型體影像分析暑期課程內容緊湊充實，密集地從各個影像技術及機器學習的角度切入植物表型體影像分析的主題，並透過真實案例及先進科技的導入，帶領學員從更多元、高維度的視角定義眼前的任務需求並掌握可能的處理策略，並從世界各國不同背景的學員交流中開拓研究人員的新視野與對未來科技發展的想像，期待能將所學習到的知識應用於國內農業研究需求上，利用植物表型體影像分析技術實現農業部智慧、韌性的政策目標。



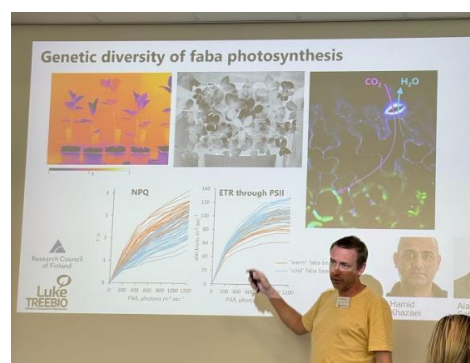
WUR 校園一景



本次課程學員大合照



課程講授情形



課程講授情形



二、荷蘭植物環境表型體中心(Netherlands Plant Eco-phenotyping Centre ,

NPEC) :

為因應農業永續與氣候變遷下作物改良的迫切需求，植物表型技術的創新與標準化有其必要性，因此 WUR 以及烏得勒支大學（Utrecht University）於 2017 年共同提出 NPEC 的構想，並於 2018 年在荷蘭科學研究組織（Netherlands Organization for Scientific Research, NWO）的大型科研基礎建設計畫（National Roadmap for Large-Scale Scientific Infrastructure）框架下取得資金支持開始建造，2020 年開始部分啟用，並在 2023 年完成七個植物表型體分析模組的建置並開始對外開放。NPEC 的七個植物表型體分析模組分別為中型生長箱模組（Ecotrons）、作物及微生物交互作用分析模組（Plant-Microbe Interaction Phenotyping）、人工氣候室模組（Multi-Environment Climate Chamber）、高通量表型體走入式生長箱模組（High-Throughput Phenotyping Growth Rooms）、溫室表型體分析模組（Greenhouse Phenotyping）、田間表型體分析模組（Open-Field

Phenotyping) 及表型體資料處理模組(Data)。本次課程參訪位於 WUR 校園內的溫室表型體分析模組、高通量表型體走入式生長箱模組以及田間表型體分析模組，以下分述：

荷蘭先進的溫室技術享譽國際，也是 WUR 長期的研究主軸，因此 NPEC 溫室表型體分析模組也是精密完全控制型溫室，並透過高度自動化、精準化管理減少人工操作的成本及風險。NPEC 溫室共可分為 4 個區域，每個區域皆完全密閉，且可獨立控制光照、溫度、濕度等環境參數，通風系統的空氣皆經過多次過濾，降低病害發生可能。溫室內皆以盆栽栽培，並透過滴灌系統自動化供給水分及營養，其中 2 個區域設置有 Phenospex 龍門式影像擷取系統，能夠自動化收集可見光、多光譜、3D、熱顯像等表型體影像資料；另外 2 個區域則是輸送帶式的影像擷取系統，盆栽栽培於輸送帶上，能夠自動化運輸至影像擷取裝置內收集可見光、高光譜、3D 及葉綠素螢光等表型體影像。參訪時 NPEC 溫室內的植株有草莓、大豆、藜麥等作物，據了解都是 NPEC 與其他國際組織合作試驗的材料。

高通量表型體走入式生長箱模組則由四個走入式生長箱及一個專門收集根部表型體影像的生長箱所組成，主要進行植物莖部及根部生育、逆境反應及光合作用相關試驗。四座走入式生長箱能夠自動化調控溫度、濕度、二氧化碳濃度以及光照，並由一個生長平台及一座龍門式影像擷取系統所組成，目前以栽培阿拉伯芥等低矮作物為主，能夠自動化收集葉綠素

螢光及可見光影像，並立即透過軟體分割影像及分析。根部表型體生長箱則是將兩片透明壓克力板重疊留下 4mm 距離後固定，在間隙中放入土壤供試驗材料生長，能清晰看見植物根系發育情形，並自動化收集根部表型體影像。

田間表型體分析模組則主要包含無人機應用及 NPEC 合作開發的 TraitSeeker 載具，透過搭配可見光、高光譜、3D、熱顯像鏡頭，能夠從空中或陸地透過非破壞性的方式，能夠標準化地收集到田間試驗現場植物體的表型體影像，並減少人工成本。

NPEC 透過高度自動化及精準化的生長管理及影像擷取模組，提供高通量及高解析度的植物表型體資料，能夠大幅縮短選育新品種的時間，並有效協助植物試驗，對於氣候調適及解決人力不足問題有所助益，其設備規劃及營運模式都值得學習。



NPEC 生長箱及辦公室建築



高通量表型體走入式生長箱模組



三、其他參訪行程：

(一) 瓦赫寧恩市集：

瓦赫寧恩固定於每週三及六在城鎮中心的 **Grote Kerk** 大教堂周圍廣場舉辦露天農夫市集，以販售蔬果、鮮花、海鮮、肉類、起司、麵包等農產品為主，也有少部分攤販販售熟食及生活用品。相較於臺灣傳統市場或農夫市集常由小農個體戶的小攤販所組成，瓦赫寧恩市集的攤販多以改裝的大型卡車或搭設大型宮廷帳為單位，資本較高，因此且不論金額皆能以信用卡等多元方式支付，消費便利。在瓦赫寧恩並非荷蘭旅遊

熱門地點，市集的客群主要為當地居民，因此所販售的農產品充分反映荷蘭消費習慣，除了有許多如韭蔥、朝鮮薊等在臺灣較少見的蔬菜外，鮮花攤販的規模也較臺灣大上許多，顯示荷蘭作為花卉生產大國對於日常用花習慣的消費教育成果。

（二）Singel Flower Market 水上花市：

本次研習在回程前往機場途中順道參訪位於阿姆斯特丹運河旁的 Singel Flower Market 水上花市，該花市位於阿姆斯特丹市中心的觀光區域，因此花市以觀光客為目標客群，除了鮮花、球根、球莖、種子及園藝用品外，亦販售荷蘭相關的紀念商品。由於本次研習時間已過了鬱金香花季，因此未能看到鬱金香鮮花販售，不過可以觀察到他們大量販售鬱金香、孤挺花、大麗花及波斯蔥等花卉的球根及球莖。球根及球莖相較於鮮花盆栽易於保存及運輸，以增加觀光客的消費拉力，是觀光花市有效的銷售策略，值得參考。



瓦赫寧恩市集起司販售情形



瓦赫寧恩市集蔬菜販售情形



瓦赫寧恩市集鮮花販售情形



水上花市花束販售情形



水上花市球莖等商品包裝便利



水上花市鬱金香球莖販售情形

研習心得及建議

隨著氣候變遷及極端氣候對農業的影響日益明顯，產地對於具氣候韌性的作物品種需求也逐漸提高，如何縮短品種選育過程所需時間因此成為當前農業重要課題。基於影像的表型體分析技術是目前國際農業研究的熱門趨勢，也是本次研習的主軸。透過課堂的演示及 NPEC 的參訪，目前 WUR 所建立的表型體分析模組其技術已臻成熟，能夠自動化收集作物影像資料，搭配可見光、高光譜、3D 等不同鏡頭的使用捕捉人類肉眼難以觀察的植物生理、結構等資訊，甚至透過後端模型及演算法轉換取得作物外表型資料，達到自動化分析的效果，搭配溫室、生長箱精準自動化管理，大幅降低性狀調查及栽培所需時間人力成本，能夠有效因應農業人力短缺的產業問題，除了縮短品種選育過程外，更提供作物耐候性相關試驗優良的硬體設備及平臺。然表型體影像分析技術雖有前述優點，相較於傳統育種操作仍具較高的技術及資本門檻，因此在課程當中講師反覆提醒釐清命題及跨域合作的重要性。釐清命題指的是大眾經常會誤以為先進技術一定會對當前正在執行的任務有所幫助，但在缺乏明確試驗目標的情況下往往收集了大量表型體資料卻無法分析造成損失。明確定義出具體試驗目標才能夠分辨出先進技術是否能有效達到目的，又或者傳統低成本的技術其實便能有效解決問題。表型體影像分析系統包含從作物的栽培管理、光學影像的擷取、影像資料的分析到生物資訊的統計判讀，最終才能產生具實用價值的資料，過程中需仰賴不同領域的知識相互溝通協調，因此跨域合作在作物表型體

影像分析的工作流程中具有相當的重要性，在 WUR 的相關研究中他們也是透過作物科學家定義命題設計試驗，栽培管理專家執行溫室及田間試驗，電腦科學家負責後端影像分析及模型建立，各個領域相互交流協調完成研究專案，值得我國進行相關研究時參考。本次赴荷蘭參與 WUR 課程，學習影像擷取、影像處理、無人機、高光譜、機器學習、3D 成像等全方位之植物表型體影像分析技術，並實地參訪表型體分析設施，有助掌握不同技術的適用性及分析策略，並透過與國外專家針對青蔥表型體影像分析的討論，提供未來規劃相關研究的重要參考資料。我國農業部在 113 年落成啟用國家植物表型體分析中心，並於 114 年針對數個重要農作物執行「推動重要作物及經濟動物數位育種技術實用化」計畫，期待未來能將赴荷所學實際應用相關的研究當中，將植物表型體影像分析實際落地在臺灣，縮短育種時間，以提升作物氣候韌性，達成智慧、韌性之政策目標。