

從植生指標到地面驗證：DJI Mavic 3 Multispectral 用於臺灣 稻作巡檢的最低可行方案、證據邊界與前瞻性驗證設計

From Vegetation Indices to Ground Validation: Evidence Boundaries and a Minimum Viable Prospective Validation Protocol for DJI Mavic 3 Multispectral Rice Scouting in Taiwan

周秉漢 / CHOU, BING-HAN

ORCID : 0009-0000-7018-5096 | handson0102@hotmail.com

公開日期：2026-08-03 | 未經外部同儕審查

DOI : 10.5281/zenodo.21775711

授權：CC BY 4.0（僅適用於作者有權授權的原創內容；第三方內容另依原權利條款）

研究摘要

農業無人機可以迅速取得整田影像，但「影像看見差異」與「知道作物發生什麼問題」是兩種不同的證據。本研究針對臺灣稻作巡檢建立一套可被否證、可重現且不把設備規格誤寫成田間成效的最低可行方案。研究整合截至2026年8月3日可取得的 DJI 官方產品資料、交通部民用航空局與農業部現行制度，以及稻作多光譜、地面真值、模型轉移與空間交叉驗證文獻。本文是公開證據綜整與前瞻性研究協定，尚未購機、實飛、採集農田影像、檢測植株或取得農戶交易資料，因此不提供準確率、增產、節肥、節藥、節省工時或投資報酬結果。

證據邊界

本版本是公開證據綜整與未來實飛協定，尚未採集田間資料；所有效能、重複性、成本與投資報酬均為待驗證。植生指標只用於相對異常排序與地面查核優先序，不構成病害、缺氮、缺水、農藥或施肥處方。

AI協助來源整理、程式、圖表、語言與版面；AI不列為作者。作者負責核對、解讀、公開與更正。

摘要

農業無人機可以迅速取得整田影像，但「影像看見差異」與「知道作物發生什麼問題」是兩種不同的證據。本研究針對臺灣稻作巡檢建立一套可被否認、可重現且不把設備規格誤寫成田間成效的最低可行方案。研究整合截至2026年8月3日可取得的 DJI 官方產品資料、交通部民用航空局與農業部現行制度，以及稻作多光譜、地面真值、模型轉移與空間交叉驗證文獻。本文是公開證據綜整與前瞻性研究協定，尚未購機、實飛、採集農田影像、檢測植株或取得農戶交易資料，因此不提供準確率、增產、節肥、節藥、節省工時或投資報酬結果。

在比較 DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M)、Matrice 4E 與 Matrice 4T 後，本文選擇 Mavic 3M 作為首輪驗證機型。理由不是品牌或產品排名，而是本研究的主要問題需要在同一任務中取得20 MP機械快門RGB影像，以及綠、紅、紅邊與近紅外四個5 MP多光譜波段；Matrice 4E較適合RGB測繪，Matrice 4T的熱影像可支援熱異常探索，但兩者沒有上述四波段作物反射率組合。Mavic 3M的官方理想飛行時間、RTK與官方面積宣稱不能直接轉換成臺灣田間產能、定位精度或商業效益；機體亦不得被當作兩天可操作設備。

前瞻性最低可行驗證包含4個獨立稻田、每田20個事前以空間平衡方式抽取的固定2×2公尺樣區，共80個獨立空間單位；於分蘗、幼穗分化或孕穗、抽穗3個時點同步航拍與地面量測。規劃12個主要田區航次及8個同日背靠背重飛航次，共20個田區航次；每個樣區時點量測15次SPAD後取中位數，預計形成240個樣區-日期重複觀測與3,600次葉片讀值。SPAD僅作葉綠素代理，不等同植株氮濃度。地面人員須在看見指標圖之前完成株高、冠層覆蓋、土壤含水率、近地照片、倒伏與可見異常紀錄；每田另設5個只用於查核、不參與正射優化的獨立幾何檢核點。

主要分析比較不使用影像的訓練田區同生育期平均基準、RGB-only、multispectral及combined四種預先固定模型，採留一田區外驗證及田內空間區塊驗證，禁止隨機切割像素。進入下一階段的必要門檻包括資料完整率至少95%、獨立檢核點水平RMSE不高於0.20公尺、同日重複主要植生指標ICC之95%信賴區間下限至少0.75、留出田區MAE較簡單基準改善至少10%，以及多光譜或組合模型較RGB-only之MAE改善至少10%。若正、負獨立樣區各不足30個，不計算疾病分類AUC，也不宣稱診斷效能。所有門檻都是研究者預先設定的決策規則，不是已通過的結果或 DJI 保證。

本研究把最低可行產品界定為「相對異常排序、地面查核優先順序、品質紀錄與停止條件」，而非自動病害確診、缺氮判定、灌溉處方或農藥施作。可信度必須由官方規格、可查文獻、事前方案、單季實測及跨季外部驗證逐層累積；目前版本只完成前三層。未來田間資料應以新版本公開，不得把本方案中的規劃數字改寫成實證結果。

關鍵詞：DJI Mavic 3 Multispectral、農業無人機、水稻巡檢、多光譜、NDVI、NDRE、SPAD、地面真值、空間交叉驗證、最低可行方案、臺灣遙控無人機法規

Abstract

Agricultural drones can rapidly image an entire field, but detecting spatial differences is not equivalent to diagnosing their agronomic causes. This working paper develops a falsifiable and reproducible minimum viable protocol for DJI-based rice scouting in Taiwan without presenting product specifications as field performance. It synthesizes DJI first-party documentation, current Taiwan Civil Aviation Administration and Ministry of Agriculture rules, and peer-reviewed research on rice multispectral sensing, ground truth, model transfer, and spatial cross-validation available through 3 August 2026. This is an evidence synthesis and prospective protocol. No aircraft has been purchased or flown for this study, and no field imagery, plants, farmers, transactions, accuracy outcomes, yield gains, input savings, labor savings, or return-on-investment observations are reported.

DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M) is selected for the first validation round after a task-specific comparison with Matrice 4E and Matrice 4T. The selection is not a brand endorsement or product ranking. The protocol requires co-registered 20 MP mechanical-shutter RGB imagery and four 5 MP green, red, red-edge, and near-infrared bands. Matrice 4E is better aligned with RGB mapping, while Matrice 4T can support exploratory thermal anomaly work, but neither provides the same dedicated four-band crop-reflectance configuration. Official ideal flight time, RTK capability, and area-per-flight claims are not treated as Taiwan field capacity, achieved positional accuracy, or economic performance. The aircraft is not assumed to be rainproof.

The prospective MVP includes four independent rice fields and 20 preselected, spatially balanced fixed 2 by 2 m plots per field, yielding 80 independent spatial units. UAV and ground observations are paired at tillering, panicle initiation or booting, and heading. The plan contains 12 primary field-flights and eight same-day back-to-back repeats, for 20 planned

field-flights. At every plot visit, 15 SPAD readings are summarized by the median, producing 240 plot-date repeated observations and 3,600 planned leaf readings. SPAD is explicitly treated as a chlorophyll proxy, not plant nitrogen concentration. Before viewing UAV index maps, a blinded ground team records plant height, canopy cover, three soil-moisture readings, close-range RGB images, lodging, and visible anomalies. Five independent geometric checkpoints per field are reserved for validation and cannot be used as ground control or reconstruction optimization.

Four prespecified approaches are compared: a field-stage mean baseline without imagery, RGB-only, multispectral, and combined models. Leave-one-field-out validation and within-field spatial block validation are required; random pixel splitting is prohibited. Go/no-go gates include at least 95% data completeness, horizontal RMSE no greater than 0.20 m at independent checkpoints, a lower 95% confidence bound of at least 0.75 for same-day vegetation-index repeatability, at least 10% lower held-out-field MAE than the naive baseline, and at least 10% lower held-out MAE for multispectral or combined models than RGB-only. Disease-classification metrics are not computed unless at least 30 independent positive and 30 independent negative units are available. These thresholds are investigator-defined prospective decision rules, not achieved results or DJI guarantees.

The minimum viable product is limited to relative anomaly ranking, ground-check prioritization, quality records, and explicit stop rules. It is not automated disease diagnosis, nitrogen assessment, irrigation prescription, or pesticide application. Credibility must accumulate from specifications and literature to preregistered design, single-season pilot evidence, and cross-season external validation. This version completes only the first three levels; any future field data must be released as a new version rather than retrofitted into the present design as if already observed.

1. 研究背景與問題定義

1.1 從「可以拍」到「值得相信」

DJI 官方規格可以回答相機有哪些波段、機體多重、理想條件下能飛多久，以及是否具備RTK；它不能回答臺灣稻田裡的植生指標是否可重複、是否比RGB增加資訊、異常熱點是否真的對應可處置問題，或服務是否節省成本。[1-6] 同樣地，文獻中的高相關或高準確率是在特定品種、生育期、田區、感測器、光線、標註與模型下取得，不能直接移植成另一個機型、地區與服務的保證。[14-27]

本文將農業巡檢拆成三個層次：第一層是觀測，亦即取得可追溯的RGB與反射率影像；第二層是篩檢，把田內相對異常排序並引導現勘；第三層才是診斷或處置，需要病原、營養、水分、管理與專業判讀等額外證據。首輪MVP只進入前兩層。低NDVI或低NDRE可能來自稀疏冠層、生育期、品種、陰影、積水、乾旱、營養、病蟲害、倒伏、土壤背景、反射率校正或拼接問題；不得只憑一張指標圖指定原因。

最低可行產品不是自動診斷，而是可停止、可追溯的巡檢—複核流程



任何一個品質、法規或地面驗證閘門失敗，該次輸出即不得升級為處置建議。

最低可行農業巡檢的五階段架構

1.2 四個研究問題

- 1 在限定使用 DJI 的條件下，哪一個機型最符合稻作多光譜巡檢的首輪驗證任務？
- 2 官方規格與既有研究能支持哪些主張，又有哪些主張必須由臺灣田間資料重新驗證？
- 3 在有限資源下，最少需要哪些獨立田區、固定樣區、地面真值、重複飛行與模型驗證，才能形成可信的工程性pilot？
- 4 哪些法規、安全、資料品質、統計、時效與成本門檻一旦未通過，就應停止輸出、停止收費或退回較低功能的RGB方案？

1.3 本文可以與不可以回答的事項

事項	本版本能回答	本版本不能回答
DJI機型選擇	依官方規格與研究任務做適配比較	產品可靠度、故障率或市場排名
稻作多光譜	文獻支持其作為研究與篩檢工具的可能性	臺灣田區已達何種準確率
MVP規模	提供4田、80樣區、3時點的可執行方案	宣稱此樣本代表全臺稻作
地面真值	預先界定SPAD、照片、株高與含水率流程	把SPAD當作植株氮濃度或病害確診
經濟性	提供空白成本欄位、公式與正規化敏感度	發布未取得報價與工時的價格或ROI
法規	整理公開制度供每次任務查核	對任何特定個案作合法性判定

2. 資料來源與證據綜整方法

2.1 資料範圍

本研究的來源擷取截止日為2026年8月3日。設備主張優先使用 DJI Enterprise 規格、產品、下載與軟體FAQ頁面；飛航與施藥制度優先使用交通部民用航空局、遙控無人機管理資訊系統與農業部法規資料；技術與驗證方法優先使用具DOI的同儕審查文獻及農業試驗所研究。[1-27] 搜尋摘要只用來定位來源，不作證據。本文未重新散布第三方手冊全文、學術文章、資料集、原始影像或網站內容。

每一項主張依下列層級處理：官方規格只支持設備能力；同儕審查文獻支持方法可能性與已知限制；本研究程式只產生方案工作量、機型任務適配編碼及無貨幣成本敏感度；真正的田間效能只能由未來依本協定蒐集的資料支持。產品頁的「最多200公頃／航次」等理想條件宣稱只登錄為廠商主張，不進入本研究的產能、成本或收益計算。[2]

2.2 文獻證據如何轉成方案

稻作研究顯示，飛行高度、輻射校正、照度、生育期與地面資料配對會改變反射率與模型表現；SPAD與影像配對可形成可重現的資料流程，但單一田區或單一時間的關係不能自動外推。[16-19] 產量模型研究顯示跨田、跨年、跨品種與跨感測器的轉移是核心問題，因此本研究把留一田區外驗證設為必要條件。[20-21,25] 2026年的Mavic 3M研究提供跨區產量預測與特定水稻白葉枯病研究案例，但這些任務、場域與標籤不等於臺灣一般田區的巡檢診斷器。[25-26] 葡萄園研究也提醒，地面真值的抽樣方法本身會改變UAV模型的表觀準確度。[27]

空間資料若把相鄰像素隨機切入訓練與測試集，會因空間自相關與同源影像洩漏而高估泛化能力；因此採田區留出與田內空間區塊驗證。[22] 若未來製作異常分類圖或面積估計，必須使用機率或可辯護抽樣、誤差矩陣與不確定性，而不是把分類像素面積直接當作真值。[23] 農業UAS的效用則應以scouting、monitoring與planning任務分開驗證，不能只以影像品質推論經濟價值。[24]

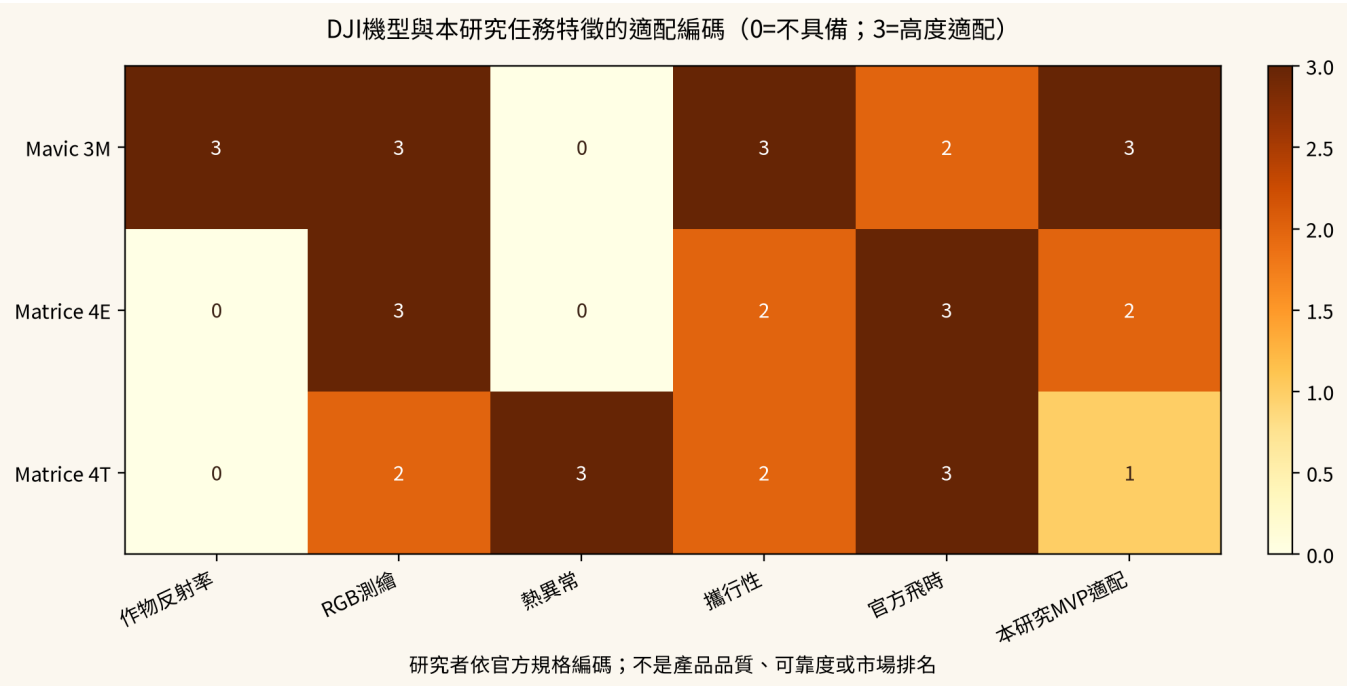
2.3 本版本的分析性輸出

本版本程式固定亂數種子與明示參數，產生六張原創圖、協定工作量表、任務適配矩陣與正規化成本敏感度。這些都是研究設計的算術推導，不是觀察資料。「4田」「80樣區」「3,600次SPAD讀值」是未來預計工作量；任何頁面、PDF或摘要均不得把它們寫成已完成樣本。

3. DJI機型比較與設備選擇

3.1 比較原則

比較只回答「哪個機型符合本研究的量測需求」，不評定耐用度、售後、總體品質或他人應購買哪一台。研究者依官方規格將作物反射率、RGB測繪、熱異常、攜行性、官方飛行時間與MVP適配度編碼為0至3；分數不是測試結果，也不是產品排名。



DJI機型與本研究任務特徵的適配矩陣

比較項目	Mavic 3M	Matrice 4E	Matrice 4T
標準重量	約951 g，含RTK模組	約1,219 g	約1,219 g
官方理想最長飛行時間	43分鐘	49分鐘	49分鐘
RGB核心	20 MP、4/3 CMOS、機械快門	20 MP、4/3 CMOS、機械快門，另有中長焦	可見光廣角、中長焦組合
作物多光譜	4個5 MP相機：G、R、RE、NIR	無專用G/R/RE/NIR四波段組合	無專用G/R/RE/NIR四波段組合
熱影像	無	無	640×512熱影像，可作探索性熱異常
RTK	有	有	有
首輪稻作反射率MVP	選用	不選；可作RGB對照或測繪	不選；較適合另立熱異常研究

資料來自 DJI 官方規格與FAQ，擷取於2026年8月3日。[1-5] 官方理想飛行時間是在指定測試條件下取得，不是有風、高溫、頻繁轉向、保留返航電量與多架次田間工作的實測續航。Mavic 3M官方最大起飛重量為1,050 g、官方抗風資訊為12 m/s，亦不能取代現場保守停飛規則。[1] Mavic 3M未提供可據以主張雨天作業的標準IP防護資訊；Matrice 4系列FAQ亦不支持把機體當作雨天可持續工作的設備。[3,5]

3.2 為何選擇Mavic 3M

Mavic 3M以同一平台取得20 MP 4/3 RGB及綠光560±16 nm、紅光650±16 nm、紅邊730±16 nm與近紅外860±26 nm四個5 MP波段，能建立RGB-only與multispectral的成對比較。[1] 這正好對應本研究的核心反事實：若多光譜沒有在留出田區顯著勝過RGB，就不應只因設備更複雜而把它列為必需品。

選擇Mavic 3M不代表Matrice 4E或4T較差。若任務改成高解析RGB測繪、設施盤點或長焦檢查，Matrice 4E可能更合適；若問題改成灌溉熱異常或冠層溫度探索，Matrice 4T的熱感測器才有直接價值。Matrice 4T所稱NIR輔助照明不是作物反射率用的四波段多光譜感測器，不應混稱。[4-5]

3.3 最低設備組合與採購前查核

最低研究組合包括Mavic 3M、至少三組可用飛行電池與充電設備、具已知反射率資訊的校正板、Network RTK或經確認相容的D-RTK 2方案、固定樣區標記、每田至少5個獨立檢核點、手持風速計、SPAD儀器、土壤含水量測工具、可版本化的儲存與處理環境。若使用DJI Terra，多光譜重建、校正板流程、電腦硬體、授權範圍與當日版本相容性必須在採購日重查。[6] 本文不提供供應商、折扣、未稅或含稅價格。

4. 指標、任務與主張邊界

4.1 預定影像指標

以反射率表示時， $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ ， $NDRE = (NIR - RE) / (NIR + RE)$ ， $GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G)$ 。RGB對照可使用VARI、ExG、冠層覆蓋與少量事前固定紋理特徵。指標計算前必須完成波段對齊、反射率校正、正射重建、有效冠層遮罩及品質檢查。高NDVI不等於高產，低NDRE不等於缺氮；在高冠層覆蓋時指標可能飽和，水面、陰影、土壤與葉角亦會影響值。[16-21]

4.2 首輪可交付與禁止交付

首輪MVP每一任務只允許五項交付：可追溯正射與品質摘要、田內相對指標圖、待地面查核熱點清單、查核完成狀態，以及限制與異常紀錄。熱點使用「相對偏離」「待查核」或「資料不足」，不得直接標示白葉枯病、褐飛蟲、缺氮、缺水或應施用何種藥肥。

農業試驗所的褐飛蟲研究顯示，在人工接種與特定生育期條件下，NDVI相對對照偏離可形成初步預警訊號；臺灣水稻倒伏研究亦顯示UAV影像可以輔助災損判釋。[14-15] 兩者支持「影像可協助縮小地面查核範圍」，不支持Mavic 3M已能對一般田區所有病蟲害或倒伏自動確診。

5. 臺灣法規與安全邊界

5.1 機體、操作人與一般操作

Mavic 3M標準重量約951 g。依交通部民用航空局公開資訊，自然人所有之250 g以上遙控無人機應辦理註冊；政府機關、學校或法人所有之遙控無人機不分重量均有註冊要求，註冊號碼須依規定標示。[7-9] 自然人操作未達2 kg機體的一般活動，操作證要求與法人活動不同；若由法人所有或執行，操作人、能力審查、操作手冊與活動申請可能適用更高要求。[8-9] 「商號」「工作室」或公司名稱本身不足以判定法律身分，實際作業前應把機體所有人、營業組織、操作人與活動方式提交民航局或專業人員確認。

一般作業仍須遵守日間、目視範圍、400呎以下、不在人群上空、一人同時一機、距人與建物之安全限制，以及禁限航區、地方政府公告與動態空域等規範。[10-11] 每一次任務起飛前均要查民航局遙控無人機管理資訊系統與正式公告；DJI地理圍籬或應用程式地圖不能取代主管機關圖資。[11] 夜間、視距外、禁限航區、投擲或其他限制活動若有需要，應在取得相應資格、能力審查、保險及個別活動核准後才執行。本研究的基準任務只在日間、目視範圍內做影像巡檢。

5.2 巡檢不是施藥

影像巡檢與農藥噴灑在目的、風險、證照、業者、藥劑、作業紀錄與責任上均不同。[12-13] 本方案不投擲、不噴灑，也不把熱點自動接成施藥處方。依2026年8月3日農業部現行法規頁面，無人多旋翼機施藥時，距地面1.5公尺處風速不得大於3 m/s，飛行高度不得超過植冠上方2公尺；非水稻作物苗期具有例外範圍，施藥後3日內並有填報及上傳飛行軌跡要求，機身識別碼相關要求自民國116年1月1日起適用。[13] 這些規範在本文只用來說明施藥與巡檢不可混同，不構成施藥操作指南或特定個案法律意見。

5.3 研究的保守停飛規則

法定上限不是研究的建議操作條件。任何任務在資料、資格、空域、土地進入同意、天候、視線、電線、道路、人群、機體狀態或返航餘裕不明時都不得起飛。降雨、有人或車進入安全區、連線異常、障礙風險或未達研究自訂保守風況門檻時立即中止。安全中止屬正確結果，不得為湊足樣本而忽略。

6. 前瞻性最低可行田間設計

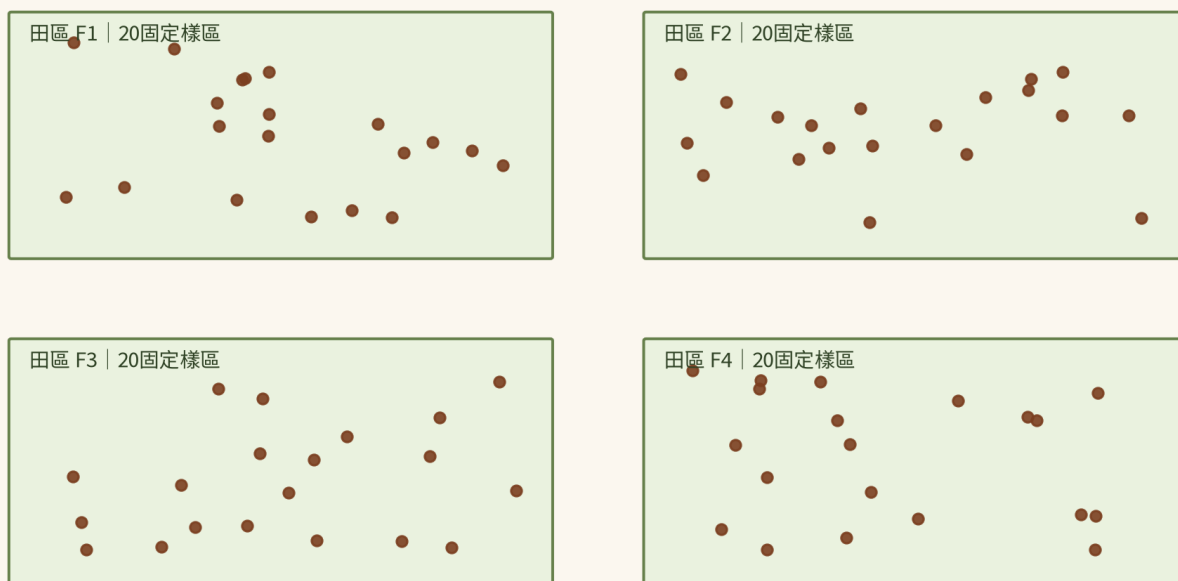
6.1 研究母體與納入方式

首輪pilot的目的不是估計全臺平均準確率，而是回答流程可否執行、量測能否重複、模型能否跨田，以及多光譜是否對RGB有增量。納入4個相互獨立稻田，優先選同一地區、同一期作與同一品種，以降低首輪不必要異質性；仍須記錄品種、播植日期、生育期、施肥、灌溉、植保、前作、倒伏與重大管理事件。田區必須在查看首輪NDVI、產量或異常狀況前納入，避免只挑「看起來有效」的案例。

每田以空間平衡隨機方式事前抽取20個固定2×2公尺樣區，合計80區。選點需涵蓋田內空間位置，但排除安全上無法到達、田界外與事前明定的非作物區；所有排除均保留原因。固定樣區不能因初次影像不好看而任意替換。

前瞻性MVP抽樣設計：4田、80固定樣區、3生育期

每點同步：15次SPAD+近地照片+株高+冠層+3點土壤水分



三期重複形成240個樣區-日期觀測，但推論與交叉驗證以田區／樣區群聚處理，絕不把像素當作獨立樣本。

四田、80個固定樣區與同步地面量測設計

6.2 三個生育期與航次

航拍與地測在分蘗、幼穗分化或孕穗、抽穗三期各進行一次。每田每期一個主要航次，共12個主要田區航次；至少兩個生育期在30分鐘內依同航線背靠背重飛每田一次，增加8個重複航次，總規劃20個田區航次。重飛只用於估計量測重複性，不增加獨立田區或獨立樣本數。若天候、資料完整或安全不合格，該航次依規則排除或重排，不以事後補值假裝完成。

正式航高、速度與太陽時間窗在場勘及不進入效能分析的校準任務後鎖定；全期保持同一設定，變更只能基於預先定義的安全或品質理由並另行標記。前向與旁向重疊初始均設80%，鏡頭採正下視角；每航次飛前及飛後拍攝同一校正板，記錄雲量、太陽、風況、曝光、RTK狀態、機體與軟體版本。研究不因RTK顯示FIX就假定成果達公分級。

6.3 地面量測與盲態

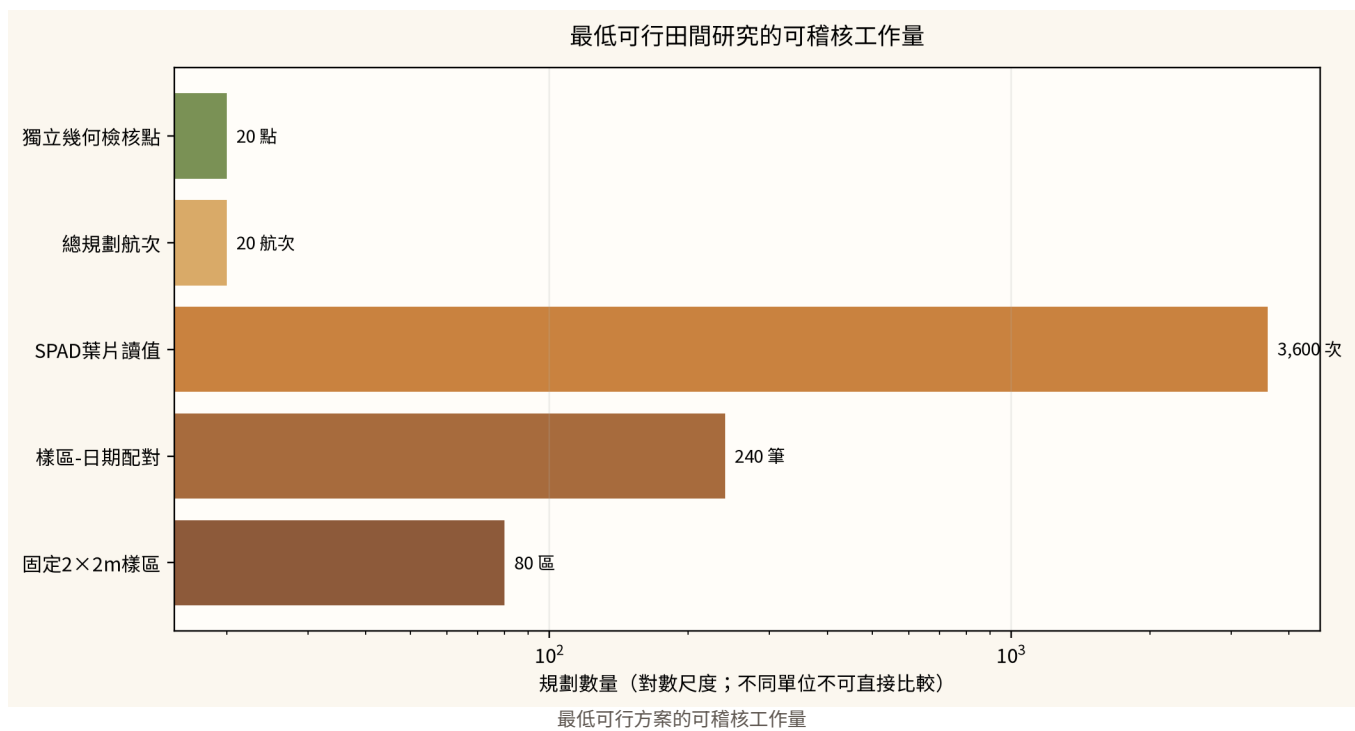
每個樣區時點在航拍前後60分鐘內完成：

- 1 SPAD：5株，每株上位完全展開葉3次，共15讀值，樣區以中位數表示。
- 2 株高：依固定量測規則記錄，保留儀器與操作員。
- 3 冠層覆蓋：以固定角度近地照片與事前版本化規則估計。
- 4 土壤含水：樣區3點，記錄儀器、深度與時間。
- 5 近地RGB照片：固定距離、角度、葉位與色卡／尺度資訊。
- 6 倒伏與可見異常：使用事前codebook，僅描述可見現象；病原名稱須另由專家或實驗室確認。

地面人員必須先完成表單才可看無人機指標圖，以降低確認偏誤。第二位編碼者盲評至少20%的近地照片，報告Cohen's kappa及不一致處理。若未來要主張植株氮濃度，必須另做破壞性植體氮分析；SPAD只能稱葉綠素代理。若要主張病害，須由具資格專家、實驗室或明確診斷標準建立標籤。

6.4 幾何檢核與樣本數解讀

每田設至少5個獨立測量點，共20點，只作checkpoint，不得同時作GCP、正射優化或模型特徵。水平與垂直誤差分開報告。80個固定樣區是獨立空間單位；三期形成240個樣區-日期重複觀測，不是240個獨立樣本；3,600是葉片儀器讀值，不是3,600株或3,600個獨立案例；影像像素更不是樣本。



四田只能支撐工程可行性與非常有限的外田檢驗。即使有30個獨立陽性案例，若真實敏感度約0.80，Wilson 95%信賴區間仍大致可能落在0.63至0.91，顯示首輪疾病指標只能是探索性。跨區、跨期作、跨品種與外部團隊驗證必須在後續版本完成。

7. 影像處理、品質控制與資料譜系

7.1 不可逆的原始資料層

每航次原始RGB、G、R、RE、NIR影像、XMP/EXIF、飛行紀錄、校正板影像與地面表單建立唯讀保存副本及SHA-256；檔名不包含農戶姓名。衍生流程另存軟體、韌體、座標系統、反射率校正、波段對齊、拼接、重採樣、冠層遮罩、品質排除與人工修改版本。禁止覆寫原始檔或只留下最後一張彩色指標圖。

7.2 任務品質閘門

每次任務核對五波段數量與時間對齊、EXIF、陽光感測、校正板、RTK狀態、重疊、模糊、曝光、缺口、checkpoint、地測時間差及人工改航。完整率不足95%即排除該任務；不得用缺波段、不同日期或不同田區的資料拼補。若陰影、雲變、積水或反射率不穩，結果標示不可比較，而非強制正規化到看似平順。

7.3 公開與非公開資料

公開資料包只包含匿名田區／樣區代碼、必要衍生數值、協定、codebook、排除紀錄、分析程式、原創圖表與結果摘要。精確座標、地籍、農戶姓名、地址、電話、email、完整航跡、可辨識住宅／車牌／人像、原始EXIF位置及未獲授權的原始影像不公開。研究保存這些資料時必須有任務必要性、權限、保存期限與刪除規則。

8. 預先分析計畫

8.1 主要與次要結果

主要結果是樣區層級SPAD中位數，明確標示為葉綠素代理。次要連續結果為冠層覆蓋、株高與土壤含水；次要任務結果為倒伏或可見異常的地面查核優先順序。疾病、缺氮、缺水與產量不是首輪確證結果。

8.2 四個比較模型

- 1 Naive baseline：不用影像，只以訓練田區的同生育期平均預測；不得讀取留出田區的SPAD或影像。
- 2 RGB-only：VARI、ExG、冠層覆蓋及少量事前固定紋理，不做大規模特徵搜尋。
- 3 Multispectral：NDVI、NDRE、GNDVI及原始反射率摘要。
- 4 Combined：合併RGB與多光譜，但特徵與正則化規則在測試田區解封前固定。

連續結果以簡單線性、含必要田區／生育期結構的模型或正則化模型為主；隨機森林只作次要敏感度分析。首輪樣本不得以深度學習宣稱泛化。所有同一樣區的日期、影像切片與像素必須留在同一fold。

8.3 驗證與統計量

主要驗證採leave-one-field-out，輪流以一田作完全未見測試田；另作田內空間區塊驗證以檢查局部轉移。禁止隨機像素切分或讓同一樣區不同日期跨越訓練與測試。連續結果報告MAE、RMSE、 R^2 、校準斜率與截距；田區層級bootstrap用於信賴區間，但只有4田時必須明示不確定性很大。

同日背靠背重飛以ICC、Bland-Altman及樣區中位數絕對指標差評估。若正、負獨立樣區各至少30個，才探索性報告sensitivity、specificity、precision、PR-AUC與精確信賴區間；類別不平衡時不以accuracy或ROC-AUC單獨作結論。若未達樣本門檻，只列匿名案例與查核流程，不計算診斷效能。

8.4 多重分析與偏誤控制

SPAD為唯一主要結果，NDRE為主要多光譜指標；其餘列為次要或探索，避免在大量指標中事後挑最高相關。缺失資料不以整體平均填補；報告每欄缺失、航次排除與原因。任何事後分析須標記exploratory，不改寫預先門檻。資料清理、特徵版本與模型選擇保留機器可讀紀錄。

9. 預先成敗門檻與停止規則

以下均為尚未測試的門檻。門檻未通過時，應縮小功能、修正方案或停止付費試營運，不能只換一個較有利指標。

關門	預先門檻	未通過時的決策
法規與安全	每任務註冊、資格、空域、土地同意與安全清單100%	不起飛
資料完整	五波段、EXIF、陽光、校正板與地測完整率至少95%	排除任務並分析缺失
幾何準確	獨立checkpoint水平RMSE不高於0.20 m	不輸出精確熱點導航
同日重複	主要VI之ICC 95%信賴區間下限至少0.75	不做跨日趨勢或決策熱點
指標差異	pilot後依分布鎖定NDVI/NDRE容忍值	v1.0只判斷流程可行，不虛構數字
外田預測	留出田MAE較訓練田區同生育期平均基準改善至少10%	不宣稱影像有預測增量
多光譜增量	多光譜或combined較RGB-only留出MAE改善至少10%	保留RGB低成本方案
異常分類	獨立正例與負例各至少30	不計AUC或診斷效能
交付時效	至少90%合格任務於24小時內完成QC與五項輸出	不進入付費試營運
人工增量	相同現勘工時下，確認異常優於W型或系統抽樣	不以熱點取代人工巡田
經濟門檻	三份同日含稅書面報價與實際工時填畢	不發布價格、ROI或正式報價

0.20 m幾何門檻是為2×2 m樣區重訪所設的研究品質規則，不是 DJI 或 RTK 的保證。10%改善是服務決策所需的最小增量假設，不是統計顯著性的替代品；仍須同時報告絕對誤差與信賴區間。

10. 無貨幣成本模型與服務決策

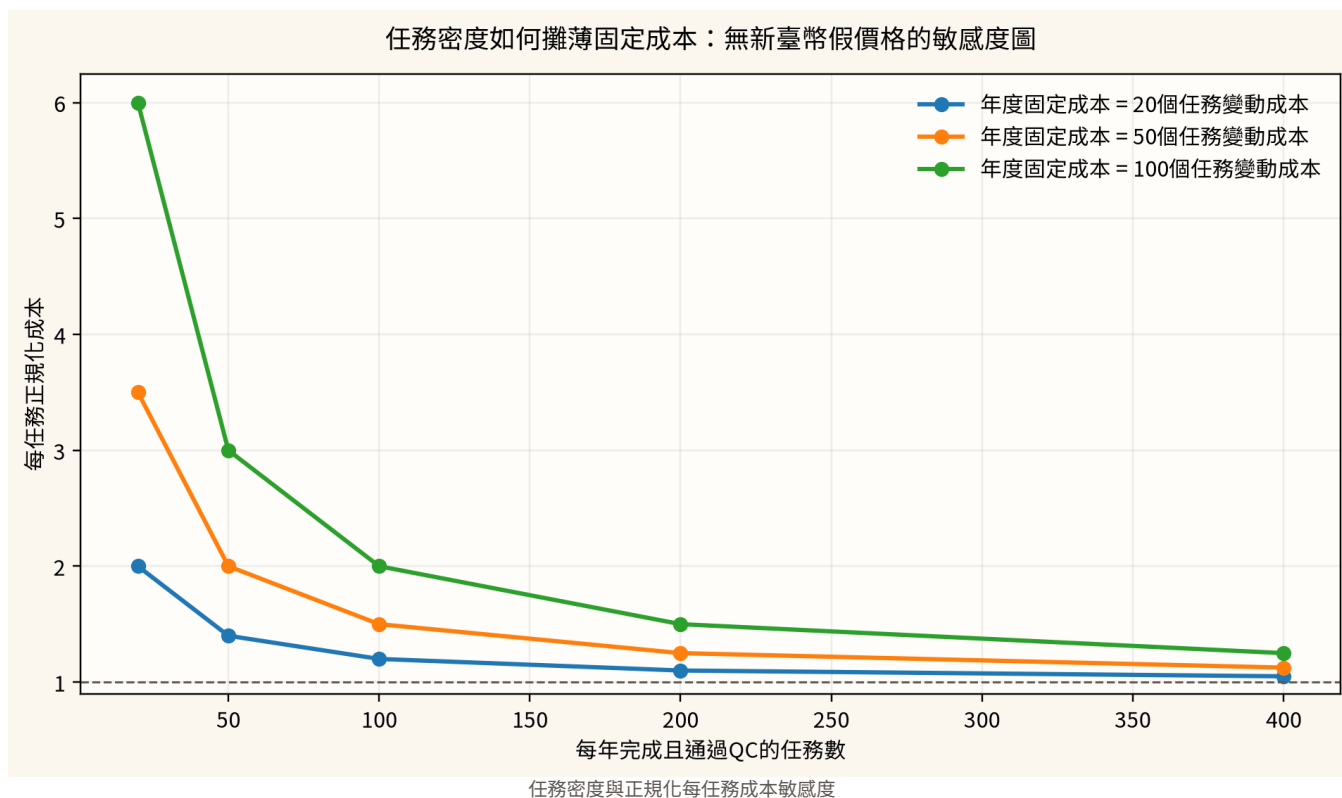
10.1 先量測成本，不先編價格

年度固定成本 F 包括設備折舊、電池與校正工具、RTK服務、運算儲存、軟體授權、訓練、註冊、保險與行政；每任務變動成本 V 包括飛行安全工時、地面SPAD與樣區調查、重建與QC工時、交通及儲存。年度完成且通過QC的任務數為 n ，則每任務成本為 $F/n + V$ ；若有實際完成公頃 H ，每公頃成本為 $(F + nV) / H$ 。

採購或報價前，設備至少取得三份同日、同規格、含稅書面報價；軟體、RTK、保險與儀器逐項記錄授權和期間；工時、交通、失敗重飛、資料保存及更正工時由pilot實測。未完成這些欄位前，不得以網路零售價、國外售價或廠商「每航次面積」推算本站正式報價。

10.2 正規化敏感度

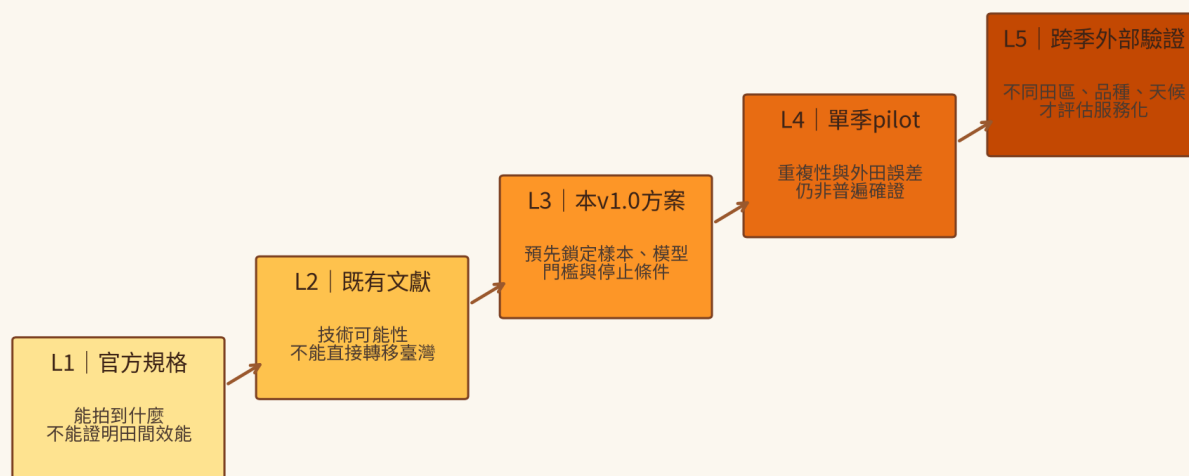
為避免捏造新臺幣金額，本研究把一次任務變動成本設為1，將年度固定成本表示成20、50或100個任務變動成本單位。正規化每任務成本為 $1 + (F/V)/n$ 。圖6顯示任務量從20提高到400時固定成本如何被攤薄；它只呈現密度效應，不包含需求、天候失敗、地理分散、稅、資本成本、設備殘值或服務價格。



即使模型通過技術門檻，也必須與既有人工巡田比較。若同樣工時下，熱點引導沒有增加地面確認異常、縮短回應或降低無效走訪，多光譜服務就沒有被證明具有營運價值。最小商業實驗應先用少數地理集中田區，不以全臺覆蓋或設備利用率假設掩蓋交通成本。

11. 可信度階梯與後續研究

可信度是逐層累積，不是購買設備後自動取得



本工作論文只完成L1-L3；L4與L5均為未來待驗證工作。

從官方規格到跨季外部驗證的可信度階梯

本研究把可信度分成五層：L1為官方規格，只證明設備聲稱的感測能力；L2為既有文獻，證明方法在特定條件下可行；L3為本版本的事前協定，固定樣本、指標、模型、門檻與停止規則；L4為單季pilot，估計本地重複性、外田誤差、資料失敗率與實際工時；L5為跨季、跨地、跨品種及外部團隊驗證，才可評估服務化。

本工作論文只完成L1至L3。未來依協定蒐集資料後，應在同一Zenodo概念紀錄下發布新版本，保留v1.0，不回頭修改事前門檻以配合結果。若pilot變更航高、樣區、指標、主要結果或門檻，須在看見主要結果前另立修訂紀錄；若在看見結果後變更，只能標記探索性。

後續v2至少應增加不同期作與獨立田區，事前估算所需陽性事件，並由未參與模型建立的人員重跑資料與分析。若進入疾病或養分主張，須另建立專家／實驗室標準；若進入產量或經濟效益，須加入收穫小區、實際投入、人工基準與成本憑證。DOI、下載次數或Google Scholar收錄只提升可發現性與版本可追溯性，不等於同儕審查或實證正確。

12. 研究限制

第一，所有設備規格來自廠商第一方資料，未經本研究獨立量測；Mavic 3M選擇只是任務適配結論。第二，本版本沒有田間資料，不能報告任何技術或商業成效。第三，4田、80樣區是最低工程pilot，群聚數極少，信賴區間與模型轉移判斷都會不穩。第四，同一區域與品種有助首輪控制，但會限制外推；跨期作、品種與環境仍待驗證。第五，SPAD受葉位、儀器、品種與生育期影響，只是葉綠素代理。第六，光譜異常具有多因一果問題，病害、營養與水分仍須獨立證據。第七，臺灣空域、地方公告、產品軟體、軟體授權與法規會更新，每次任務與採購均須重查。第八，成本模型沒有貨幣輸入，不能作採購、定價或投資依據。第九，本文只比較三個 DJI 機型，沒有證明 DJI 優於其他品牌。

13. 結論

在「選用 DJI 並以最小規模建立可信稻作巡檢」的條件下，Mavic 3M是合理的首輪研究機型，因為它能在同一平台提供機械快門 RGB及G、R、RE、NIR四波段，直接測試多光譜相對RGB是否有增量。但購買設備不會自動取得可信度。真正的最低可行方案是4個獨立田區、80個事前選定固定樣區、3個生育期、同日重飛、盲態地面SPAD與近照、獨立幾何檢核、跨田驗證、簡單基準、預先成敗門檻，以及所有失敗都可被留下的資料譜系。

首輪產品只能說「哪裡與同田參考區不同，應先到哪裡查看」。只要資料品質、重複性、外田誤差、多光譜增量、現勘增量或法規安全任一關門未通過，就應停止升級主張。疾病確診、缺氮、灌溉處方、施藥、增產、節省成本與ROI必須各自取得更高層級的田間證據。這種設計看似保守，卻讓未來每一項成效都能回答「相較什麼、在哪些田、用何種地面標準、對未見場域是否仍成立」，也讓一個小規模服務在尚未擴張前就具備被檢查、被更正與被否證的條件。

參考文獻與資料來源

1. DJI Enterprise (無日期)。DJI Mavic 3 Multispectral Specifications。擷取日期：2026-08-03。https://enterprise.dji.com/mavic-3-m/specs
2. DJI Enterprise (無日期)。DJI Mavic 3 Multispectral Product Page。擷取日期：2026-08-03。https://enterprise.dji.com/mavic-3-m
3. DJI Enterprise (無日期)。DJI Mavic 3 Multispectral Downloads and Image Processing Guide。擷取日期：2026-08-03。https://enterprise.dji.com/mavic-3-m/downloads
4. DJI Enterprise (無日期)。DJI Matrice 4 Series Specifications。擷取日期：2026-08-03。https://enterprise.dji.com/matrice-4-series/specs
5. DJI Enterprise (無日期)。DJI Matrice 4 Series FAQ。擷取日期：2026-08-03。https://enterprise.dji.com/matrice-4-series/faq
6. DJI Enterprise (無日期)。DJI Terra FAQ。擷取日期：2026-08-03。https://enterprise.dji.com/dji-terra/faq
7. 交通部民用航空局 (2024)。遙控無人機註冊業務。更新日期：2024-09-11；擷取日期：2026-08-03。https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3820&lang=1
8. 交通部民用航空局 (無日期)。政府機關 (構)、學校及法人常見問題。擷取日期：2026-08-03。https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3006&lang=1
9. 交通部民用航空局 (無日期)。一般民眾常見問題。擷取日期：2026-08-03。https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3005&lang=1
10. 交通部民用航空局 (2023)。民用航空法第99條之14遙控無人機操作規範說明。更新日期：2023-11-24；擷取日期：2026-08-03。https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=2430&lang=1
11. 交通部民用航空局 (無日期)。遙控無人機管理資訊系統與空域圖資。擷取日期：2026-08-03。https://drone.caa.gov.tw/
12. 交通部民用航空局 (無日期)。農用遙控無人機農噴常見問題。擷取日期：2026-08-03。https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3390&lang=1
13. 農業部 (2026)。農藥使用及農產品農藥殘留抽驗辦法。擷取日期：2026-08-03。https://law.moa.gov.tw/LawContent.aspx?id=FL014395
14. 曹懷文、黃玉舜、黃守宏、賴柏羽、賴明信 (2025)。多光譜影像技術用於早期檢測水稻蟲害之研究。農業部農業試驗所《台灣農業研究》。擷取日期：2026-08-03。來源
15. 周巧盈、巫思揚、陳琦玲 (2020)。無人飛行載具之航拍影像應用於水稻倒伏災損判釋。《台灣農業研究》，69(1)，25-45。https://doi.org/10.6156/JTAR.202003_69(1).0003.0003
16. Luo, S., Jiang, X., Yang, K., Li, Y., & Fang, S. (2022). Multispectral remote sensing for accurate acquisition of rice phenotypes: Impacts of radiometric calibration and unmanned aerial vehicle flying altitudes. *Frontiers in Plant Science, 13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.958106
17. Zheng, H., Cheng, T., Li, D., Yao, X., Tian, Y., Cao, W., & Zhu, Y. (2018). Combining unmanned aerial vehicle (UAV)-based multispectral imagery and ground-based hyperspectral data for plant nitrogen concentration estimation in rice. *Frontiers in Plant Science, 9*. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00936
18. Colorado, J. D., Cera-Bornacelli, N., Caldas, J. S., Petro, E., Rebolledo, M. C., Cuellar, D., Calderon, F., Mondragon, I. F., & Jaramillo-Botero, A. (2020). Estimation of nitrogen in rice crops from UAV-captured images. *Remote Sensing, 12*(20), 3396. https://doi.org/10.3390/rs12203396
19. Fonseka, C. L. I. S., Halloluwa, T., Hewagamage, K. P., Rathnayake, U., & Bandara, R. M. U. S. (2024). A dataset of unmanned aerial vehicle multispectral images acquired over a field to identify nitrogen requirements. *Data in Brief, 54*, 110479. https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110479
20. Wan, L., Cen, H., Zhu, J., Zhang, J., Zhu, Y., Sun, D., Du, X., Zhai, L., Weng, H., Li, Y., Li, X., Bao, Y., Shou, J., & He, Y. (2020). Grain yield prediction of rice using multi-temporal UAV-based RGB and multispectral images and model transfer: A case study of small farmlands in the South of China. *Agricultural and Forest Meteorology, 291*, 108096. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108096
21. Zheng, H., Ji, W., Wang, W., Lu, J., Li, D., Guo, C., Yao, X., Tian, Y., Cao, W., Zhu, Y., & Cheng, T. (2022). Transferability of models for predicting rice grain yield from unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral imagery across years, cultivars and sensors. *Drones, 6*(12), 423. https://doi.org/10.3390/drones6120423
22. Roberts, D. R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M. S., Elith, J., Guiller-Aroita, G., Hauenstein, S., Lahoz-Monfort, J. J., Schröder, B., Thuiller, W., Warton, D. I., Wintle, B. A., Hartig, F., & Dormann, C. F. (2017). Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography, 40*(8), 913-929. https://doi.org/10.1111/ecog.02881
23. Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment, 148*, 42-57. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015
24. Hunt, E. R., & Daughtry, C. S. T. (2018). What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? *International Journal of Remote Sensing, 39*(15-16), 5345-5376. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300
25. Huo, J., Wang, Q., Ji, C., Huang, S., Sun, B., Xiao, H., Yang, C., Yan, F., Zhang, Y., & Zhou, W. (2026). Rice yield prediction using UAV-based multispectral imagery and AutoGluon across regions and field scales. *Frontiers in Plant Science, 17*. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1866530
26. Ma, H., Gui, Z., Jing, Y., Chen, D., Li, D., Shen, D., & Zhang, J. (2026). Field-scale detection of rice bacterial leaf blight using UAV-based multispectral imagery: Via cross-scale sample-label transfer and spatial-spectral feature fusion. *Remote Sensing, 18*(6), 880. https://doi.org/10.3390/rs18060880
27. Canicattì, M., Catania, P., Roma, E., Amato, S., Ferro, M. V., Vallone, M., & Orlando, S. (2026). Ground truth sampling methods affect accuracy of UAV-based vineyard yield estimation: A case study. *Precision Agriculture, 27*(4). https://doi.org/10.1007/s11119-026-10391-0

研究揭露、版本、授權與更正

研究範圍與限制

本研究僅描述指定來源於標示擷取日期可觀察之公開資訊。「未觀察到」或「未揭露」不表示相關個人、企業或機構實際未提供該能力、未遵守法令、服務品質較差或存在違法情形。本文不構成企業或產品排名、法令遵循判定、飛行許可、農藥處方、投資、醫療、法律或交易建議。本研究沒有採集新田間資料，不證明 DJI 或作者所經營服務具有特定成效、優於其他服務或符合任何個別使用者需求。

AI使用聲明與作者責任

生成式AI（OpenAI Codex）協助來源線索整理、分析程式、語言起草、圖表與版面製作；AI不列為作者。周秉漢負責研究問題、來源核對、方法與門檻、主張邊界、公開決策及後續更正。CRedit：概念化、方法設計、資料查核、軟體、視覺化、寫作-原稿、寫作-審閱與編輯：周秉漢。

利益衝突

作者經營米糧與訂閱服務相關事業，可能因農業巡檢或供應鏈數位化觀點而間接受益；未接受 DJI、無人機經銷商、影像軟體商、政府機關或農業組織委託、贊助或認可。本文不代表 DJI、交通部民用航空局、農業部、文中期刊或任何被引用機構之意見，彼此不存在隸屬、合作、贊助或認可關係。

第三方權利及授權聲明

除另有標示外，CC BY 4.0僅適用於作者有權授權的原創分析、研究設計、研究程式、文字編排與原創圖表。DJI名稱與商標、產品規格、網址、手冊、政府資料、學術文獻、第三方資料、圖片、文字摘錄及其他內容，仍依各權利人或來源條款使用，不因收錄於本研究而改以CC BY 4.0授權。本文只提供必要引用與連結，未重新散布第三方原始資料或手冊全文。

倫理、個資與安全

未來實飛前須取得田區進入、影像與資料使用的明確同意，並建立撤回、保存及存取規則。公開版本使用匿名田區與樣區代碼；精確座標、地籍、農戶身分、聯絡方式、航跡、EXIF位置、人像、住宅與車牌不公開。若研究涉及可辨識個人訪談、行為或敏感資料，應在收集前另行評估倫理審查與知情同意。飛航安全與法規完整性優先於研究進度。

審查、版本與更正紀錄

本文為公開工作論文，未經外部同儕審查。版本1.0於2026年8月3日建立，完成 DJI 機型公開證據比較、臺灣法規盤點、最低可行田間驗證方案、預先成敗門檻、工作量與無貨幣成本模型；未使用虛構田間結果。未來實測不覆寫本版，應建立可追溯新版本並列出與預先方案的差異。

本研究依特定日期可取得的公開資訊製作。被提及之個人、企業或機構如認為資料有誤、已更新或缺乏必要脈絡，可提供具體來源向handson0102@hotmail.com申請更正。作者核實後將依版本政策修訂並保留修訂紀錄。