

DJI Mavic 3M 在一趟巡田任務中能可靠做到什麼？航線可行域、實測光譜響應、五檔資料契約與相對光譜低值篩檢之可重現工程研究

What Can DJI Mavic 3M Reliably Do in a Single Scouting Mission? A Reproducible Engineering Study of Mission Feasibility, Measured Spectral Response, Five-File Data Contracts, and Relative Spectral-Low Screening

周秉漢 / CHOU, BING-HAN

ORCID 0009-0000-7018-5096 · 2026-08-04 · DOI 10.5281/zenodo.21791470

研究摘要

本研究不把 DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M) 當成會自動診斷作物的黑盒子，而是回答一個可檢驗的工程問題：在沒有實飛與地面真值之前，官方相機規格、兩秒多光譜拍攝間隔、飛行高度、重疊率、檔案完整性及輻射處理順序，能把「巡田」約束到什麼程度？資料包括 2026-08-04 可取得的 DJI 規格頁、使用手冊 v1.8、FAQ、影像處理指南、開發者文件，以及 Atherton 等人以 CC BY 4.0 發布的四條 Mavic 3M 實測光譜響應曲線。[D01-D09, O01] 第三方曲線在執行時經 SHA-256 驗證，只發布衍生摘要與圖，不把原始檔改掛本站授權。

證據邊界

本版本處理了 Atherton 等人公開的 Mavic 3M 濾光器響應數值並完成合成航線與資料契約測試，但沒有起飛、沒有真實 Mavic 3M 影像、沒有真實農地與地面真值。光譜響應、航線試算與合成功能指標不能當成田間準確率、病害診斷、飛行許可或安全保證。

生成式 AI (OpenAI Codex) 協助官方與學術來源線索整理、程式與回歸測試、衍生分析、圖表、文字及 PDF 版面；AI 不列為作者。周秉漢負責研究問題、來源核對、方法選擇、結果解讀、公開決策與後續更正。

摘要

本研究不把 DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M) 當成會自動診斷作物的黑盒子，而是回答一個可檢驗的工程問題：在沒有實飛與地面真值之前，官方相機規格、兩秒多光譜拍攝間隔、飛行高度、重疊率、檔案完整性及輻射處理順序，能把「巡田」約束到什麼程度？資料包括 2026-08-04 可取得的 DJI 規格頁、使用手冊 v1.8、FAQ、影像處理指南、開發者文件，以及 Atherton 等人以 CC BY 4.0 發布的四條 Mavic 3M 實測光譜響應曲線。[D01-D09, O01] 第三方曲線在執行時經 SHA-256 驗證，只發布衍生摘要與圖，不把原始檔改掛本站授權。

研究先以實測響應曲線計算 response-weighted 有效波長與半高全寬。綠、紅、紅邊及近紅外的有效波長分別為 553.975、649.084、728.704 及 858.465 nm；半高全寬分別為 31.368、31.874、31.758 及 50.899 nm。這支持前三波段與官方 560±16、650±16、730±16 nm、近紅外 860±26 nm 大致相符，也顯示移植文獻指標時應考慮整條 bandpass，而非只比對中心波長。M3M 沒有藍光、短波紅外或熱紅外；本研究因此不計算標準 EVI、SWIR 水分指標或熱壓力指標。

第二部分建立 35 組高度 (30-120 m) 與前向重疊 (70%-90%) 的 deterministic 航線可行域，場景為不對應真實地號或精確座標的 400×300 m 虛擬稻田。核心情境為 60 m AGL、5.0 m/s、80%/70% 前旁向重疊：名目多光譜 GSD 為 2.765 cm/pixel，程式產生 12 條航帶、408 次觸發、2,040 個預期檔案及 17.978 分鐘任務估計。由兩秒間隔反推，該情境的幾何上限為 5.375 m/s；若維持 5.0 m/s 與 80% 前向重疊，最低幾何高度約 55.813 m。60 m 下把前向重疊提高到 90% 時，程式須把速度降至 2.663 m/s，估計任務時間增至 30.795 分鐘，超過本研究以官方 43 分鐘標稱值之 70% 建立的 30.1 分鐘規劃預算。這些是合成幾何與時間結果，不是安全航速、可用電量或法規結論。

第三部分驗證五檔資料契約與 fail-closed 邏輯：每次觸發預期一張 RGB 加四張多光譜檔案，並刻意注入 RTK 非固定解、模糊、飽和與真正缺少紅邊檔案等故障。通過品質閘門的事件才可進入 1 m² 合成分析格網。格網 DN 是由已知冠層陣列直接生成再反推相對反射率，沒有逐張真實 TIFF、XMP/EXIF parser、波段共註冊、SfM、DSM 或正射拼接；因此只能證明資料型別、拒收狀態與相對光譜低值排序的程式行為。系統輸出地面複查優先區，不指定病原、缺肥、缺水、施藥或產量結論。

本研究的貢獻是把 Mavic 3M 的規格、實測 bandpass、航線可行域、五檔完整性、品質拒收與可追溯輸出連成可重現測試；同時明確指出它尚缺真實 M3M 原始影像重播、反射板、獨立檢核點、跨日期重飛、地面量測與外部田區驗證。最低可信產品是「協助巡查人員決定先去哪裡看」，而不是「AI 已判斷作物生病」。

關鍵詞：DJI Mavic 3M、多光譜無人機、光譜響應函數、航線可行域、拍攝間隔、資料完整性、NDVI、NDRE、品質閘門、可重現工程

Abstract

This study treats DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M) as a constrained sensing system rather than an autonomous crop-diagnosis device. It asks how official camera specifications, the two-second multispectral interval, flight altitude, overlap, file completeness, and radiometric processing order constrain a scouting workflow before any field flight or ground truth exists. Evidence includes DJI first-party documents and developer references available on 4 August 2026, plus four measured Mavic 3M spectral-response curves published by Atherton et al. under CC BY 4.0. Third-party files were verified by SHA-256 at run time; only attributed derivative summaries and a figure are distributed.

Response-weighted effective wavelengths for green, red, red-edge, and near-infrared were 553.975, 649.084, 728.704, and 858.465 nm; corresponding full widths at half maximum were 31.368, 31.874, 31.758, and 50.899 nm. A deterministic envelope then evaluated 35 altitude/forward-overlap combinations over a non-identifying 400 by 300 m virtual rice field. At 60 m AGL, 5.0 m/s, 80% forward and 70% side overlap, nominal multispectral GSD was 2.765 cm/pixel; the planner returned 12 lines, 408 triggers, 2,040 expected files, and 17.978 minutes. The two-second interval implies a 5.375 m/s geometric cadence limit. Maintaining 5.0 m/s and 80% overlap requires approximately 55.813 m AGL under the FAQ geometry. At 60 m and 90% forward overlap, the planner reduced speed to 2.663 m/s and estimated 30.795 minutes, exceeding the study's 30.1-minute planning budget. These are synthetic geometry and timing results, not safe-flight speeds, usable battery life, or legal determinations.

The software also tests a five-file contract: one RGB plus four multispectral files per trigger, with injected RTK, blur, saturation, and genuinely missing-band faults. Only accepted events enter a 1 m² synthetic analysis grid. Digital numbers are generated directly from known grid-level canopy arrays and reversed with the same known parameters; no real TIFFs, XMP/EXIF parser, band registration, Structure-from-Motion, DSM, or orthomosaic is processed. Outputs are therefore

relative spectral-low review zones, not disease, nutrient, irrigation, treatment, yield, safety, or commercial-performance conclusions.

The contribution is a reproducible trace from Mavic 3M specifications and measured bandpasses to mission feasibility, file completeness, fail-closed quality states, and auditable review outputs. Real M3M image replay, calibration targets, independent checkpoints, repeat flights, ground measurements, and external-field validation remain required. The defensible minimum product is inspection prioritization, not autonomous diagnosis or treatment.

1. 研究問題與主張邊界

1.1 五個研究問題

1. DJI 標示的四個名目波段與公開實測 spectral response functions 是否一致，差異如何影響指標移植的解讀？
2. Mavic 3M 的 GSD、重疊率與 2 秒拍攝間隔，如何共同限制航線間距、速度、事件數、任務時間與單航次可行性？
3. 一次觸發預期的 RGB 加四波段資料，如何在真正缺檔、RTK 狀態不符、模糊或飽和時停止流入後續分析？
4. 在沒有真實農地影像的條件下，數位孿生究竟能驗證哪些 DN、相對反射率、指標、覆蓋與分區程式行為，又不能驗證哪些相機與田間效度？
5. 由軟體功能證據走向可信田間服務，最少還缺哪些實飛、校正、地面真值、跨航次再現性與外部驗證？

1.2 三層證據不能混用

證據層	本版本狀態	可以主張	不可以主張
官方文件與學術文獻	已查核	設備規格、資料欄位、操作概念、已知誤差來源	本個案已獲 DJI、期刊或主管機關認可
公開實測濾光器資料	已處理四條曲線	response-weighted 有效波長、FWHM 與名目規格比較	相機輻射準確度、作物或病害效度
數位孿生工程	已完成	程式可重現地計算航線可行域、檔案缺失拒收、合成指標與複查區	真實 M3M 影像已有相同準確率
臺灣田間效度	未執行	只能提出事前驗證協定	病害、缺肥、缺水、產量、ROI 或法規適法性

本研究沒有起飛、沒有連接飛機、沒有真實 Mavic 3M 影像、沒有真實田區、沒有地主或飛行許可，也沒有把任一光譜低值解釋成特定病因。研究程式在記憶體下載並驗證四個 CC BY 4.0 濾光器 CSV，發布物只含有明確歸屬的衍生統計與曲線圖，不重發原始 CSV。

1.3 為何不用「AI 已診斷」描述成果

植生指標會同時受到葉綠素、葉面積、含水、冠層結構、土壤、積水、陰影、雜草、倒伏、觀測角度與拼接縫影響。[A01-A04] 疾病相關研究能支持「影像可協助巡查」，不能把一般 NDVI/NDRE/GNDVI 低值直接轉成病原確診。[A10] 因此系統只輸出 REVIEW_REQUIRED 或 NO_FLAG；影像不合格時輸出 REJECTED_QC，未來模型遇到分布外資料時還應輸出 REJECTED_OOD。

病害研究還提供直接反例：小麥黃鏽病在潛伏期與初期不一定能被 UAV 多光譜可靠區分，加入缺氮、缺鐵與其他疾病等混淆壓力後，二分類的高準確率也可能顯著下降。[A11-A13] 因此「早於肉眼發現疾病」必須由接種時點、逐日影像、盲態病理或分子檢驗及外部田區共同證明，不能由本研究的合成低值遮罩推得。

1.4 與同系列研究的分工

SHWRP-2026-031 討論 DJI 農業巡檢的最低可行驗證，SHWRP-2026-032 展示合成航線與植生指標程式，SHWRP-2026-033 建立光學植物疾病模型的資料與驗證框架。本研究不另開近似模型，而把獨特貢獻收斂到 Mavic 3M 的設備可追溯性：實測 bandpass、兩秒拍攝間隔形成的航線可行域、五檔完整性、拒收狀態及可稽核輸出。病害分類器仍屬 SHWRP-2026-033 的未來實地驗證範圍。

2. Mavic 3M 從起飛前到分析後實際如何工作

2.1 飛行端的操作順序

依 DJI Pilot 2 與 Mavic 3M 手冊，實際任務通常先在 Flight Route Library 建立 Area Route 或匯入 KML/KMZ，再圈選田區、選擇機型與鏡頭、設定 Ortho Collection、高度、速度、航向、前向與旁向重疊、邊界外擴、拍照格式和任務完成動作。[D02-D04] 若需要地形追隨，可用 DSM 或受限條件下的即時地形功能；水田鏡面反射、低光、雨雪霧、電線、陡坡與突變地形不能假設會被可靠辨識。DJI Terra 在本研究中定位為離線多光譜重建工具，不把現行 Terra 5.x 寫成 M3M 的任務規劃器。[D06-D07]

真正起飛前仍要由操作人確認 RTK 是否固定、日照、風雨、電池、記憶卡、返航高度、障礙、人員與道路隔離、失聯處置、地圖及公告、地主同意與當日適用規則。官方 FAQ 並未把 M3M 列為防水機體，水田任務尤其要設定降雨取消條件與乾燥緊急降落點。[D03] 自動航線只是把重複飛行動作交給飛控，並沒有消除操作人監督與中止責任。

2.2 五相機如何形成一組資料

Mavic 3M 的目標資料組是同一觸發事件的一張 RGB 影像與四張多光譜 TIFF。官方處理指南記載可使用 CaptureUUID 作為一次拍攝的唯一標籤，並從 XMP/EXIF 讀取時間、位置、RTK flag、飛行與雲台姿態、曝光、增益、黑階、波段、日照感測器、暗角及幾何校正資訊。[D05] 這支持以 UUID 分組，但不能在沒有實機樣本時保證每個 UUID 必然正好存在五個有效檔案。本模擬以 SIM-CAP-0001 等代碼取代真實 UUID；正常事件列出五個檔名，缺紅邊故障事件則真的移除 MS_RE.TIF，使完整性檢查能以檔案集合而非單一旗標拒收。

2.3 影像離開飛機後不是直接算 NDVI

官方指南明確指出原始多光譜照片是 digital number (DN)，不是可以直接跨照片或跨日期比較的反射率。[D05] 生產流程至少需要完整性檢查、暗角與鏡頭畸變校正、曝光／增益／黑階正規化、日照補償、波段對齊、影像匹配與束平差、DSM／正射拼接、座標與 no-data 驗證，之後才適合計算指標。TIFF 位深可能隨設定或韌體而為 8 或 16 bit，真實 adapter 必須讀檔確認，不能把本模擬使用的 16-bit 陣列誤寫成所有實機檔案的保證。即使正射圖「看起來成功」，也不等於具有測量級絕對精度；RTK fixed 也不等於成圖精度，仍須以獨立 checkpoints 報告水平與垂直 RMSE。[A04-A05, A14-A15]

日照感測器可記錄入射光以協助補償，但不是絕對反射率保證。官方指南要求感測器保持清潔且不受遮蔽，並以 LS_status 等欄位確認有效；官方另警告行動網路模組可能遮擋感測器，不建議在多光譜採集時安裝。[D03-D05] 真實跨日研究仍應在航前與航後拍攝可追溯反射板，最好另保留未參與校正的驗證板。

2.4 自動化界面的真實邊界

DJI 開發者文件的 WPML 通用支援表包含 M3M，可用 template.kml 與 waylines.wpml 描述 mapping2d 等任務；但現行 Cloud API 的產品與相機枚舉沒有一致地列出 M3M，M3M FAQ 也標示不支援 FlightHub 2。[D08-D10] 因此本文只輸出本地合成座標的路線預覽與參數收據，不產生可飛行經緯度、不聲稱任意第三方 KMZ 可直接執行，也不把 Cloud API 當成已驗證的 M3M 遠端自動駕駛介面。真正任務必須在 Pilot 2 依當日機體、遙控器、Pilot 2、韌體與權限重新建立、預覽並由操作人確認。

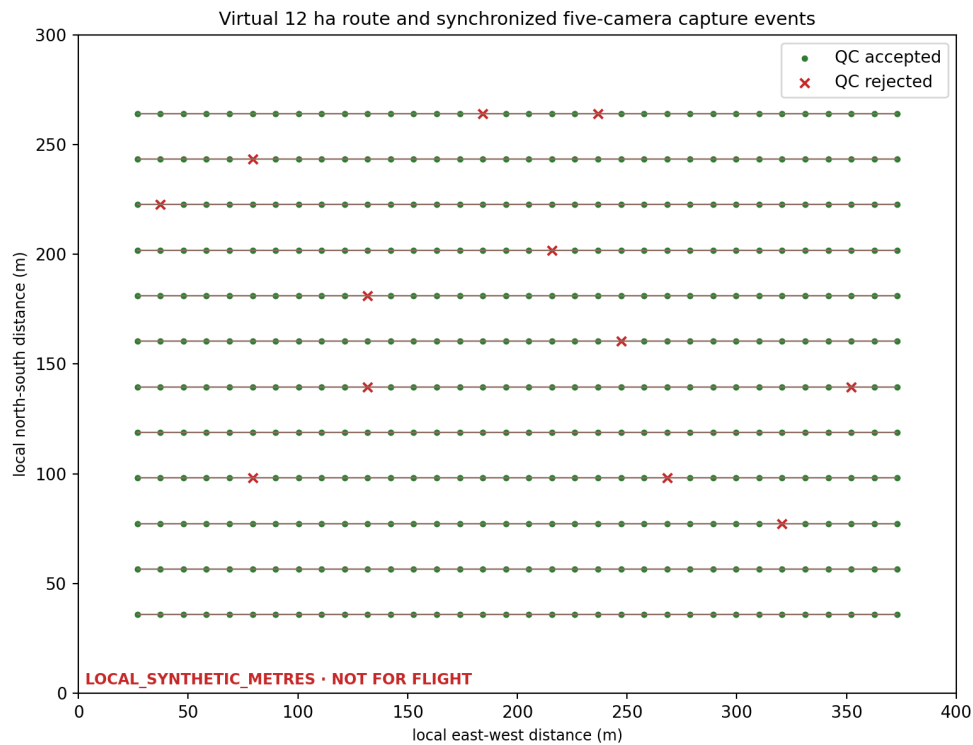


圖1 虛擬 12 公頃田區的往復航線、396 次接收與 12 次拒收事件。座標為本地合成公尺，禁止用於飛行。

3. 規格查核、來源衝突與參數推導

3.1 本研究使用的現行規格

項目	採用值	本研究如何使用	限制
RGB 相機	4/3 CMOS、20 MP、5280×3956、機械快門	RGB 檔案契約與 GSD 推導	RGB 與多光譜解析度／視場不同，仍需註冊
多光譜相機	4×5 MP、2592×1944	綠／紅／紅邊／近紅外四檔案	FAQ 某段仍寫 5.5 MP
波段	560±16、650±16、730±16、860±26 nm	指標公式與資料字典	通帶不是單一波長，精確模擬需實測 response function
TIFF 間隔	最短 2 秒	驗證觸發時間不短於 2 秒	JPEG+DNG 的限制不同
標稱飛行時間	43 分鐘	只用來建立 70% 情境預算	測試條件數字，不是實飛保證
重量	淨重 951 g；最大起飛重量 1,050 g	法規查核與任務紀錄欄位	淨重與最大起飛重量不可混寫
RTK	fixed：水平 1 cm+1 ppm、垂直 1.5 cm+1 ppm；指南以 flag 50 表 fixed	品質閘門拒收非 fixed 合成事件	定位規格不等於正射圖絕對精度
日照感測器	機頂整合	真實流程需檢查遮蔽、清潔與狀態欄位	不等於絕對反射率；行動模組可能遮蔽
可用光譜	綠、紅、紅邊、近紅外	NDVI、NDRE、GNDVI 與可由四波段忠實計算的指標	沒有藍光、SWIR 或熱紅外，不能泛化所有指標

規格頁及 v1.8 手冊的多光譜解析度與綠光中心為 5 MP／560 nm，FAQ 某段則為 5.5 MP／550 nm。[D01-D04] 本研究基於文件新舊與現行規格頁優先順序採前者；任何後續實機版本仍應把相機型號、韌體、手冊版本與實際影像 metadata 固定到航次紀錄。

官方 43 分鐘是海平面、無風、以 36 km/h 飛至電量 0% 的試驗數值；12 m/s 抗風規格則特別指起降階段。[D01] 兩者都不是田間任務門檻。2026-08-04 查得現行 M3E／M3T／M3M 飛行器韌體為 v17.01.05.08、RC Pro Enterprise 為 v02.01.08.04、Pilot 2 為 v17.1.5.15；任何 replay 或實飛都應記錄實際版本，因欄位、位深、匯入與相容性可能改變。[D07]

3.2 六十公尺下的幾何

DJI FAQ 提供 RGB $H/37.2 \text{ cm/pixel}$ 與多光譜 $H/21.7 \text{ cm/pixel}$ 的近似式，其中 H 是相對目標高度。[D03] 60 公尺時，多光譜 GSD 為 $2.764977 \text{ cm/pixel}$ ；乘上 2592×1944 像素後，單張名目足跡為 71.668×53.751 公尺。80% 前向與 70% 旁向重疊對應最多約 10.750 與 21.500 公尺間距。

為讓田界由半個影像足跡覆蓋，航帶中心均勻分布於 35.834 至 264.166 公尺，形成 12 條線；每線 34 次拍攝。實際拍攝間距 10.492 公尺，在 5 m/s 下相隔 2.098 秒，符合 2 秒下限。因均勻填滿可用寬度，實際重疊略高於目標。

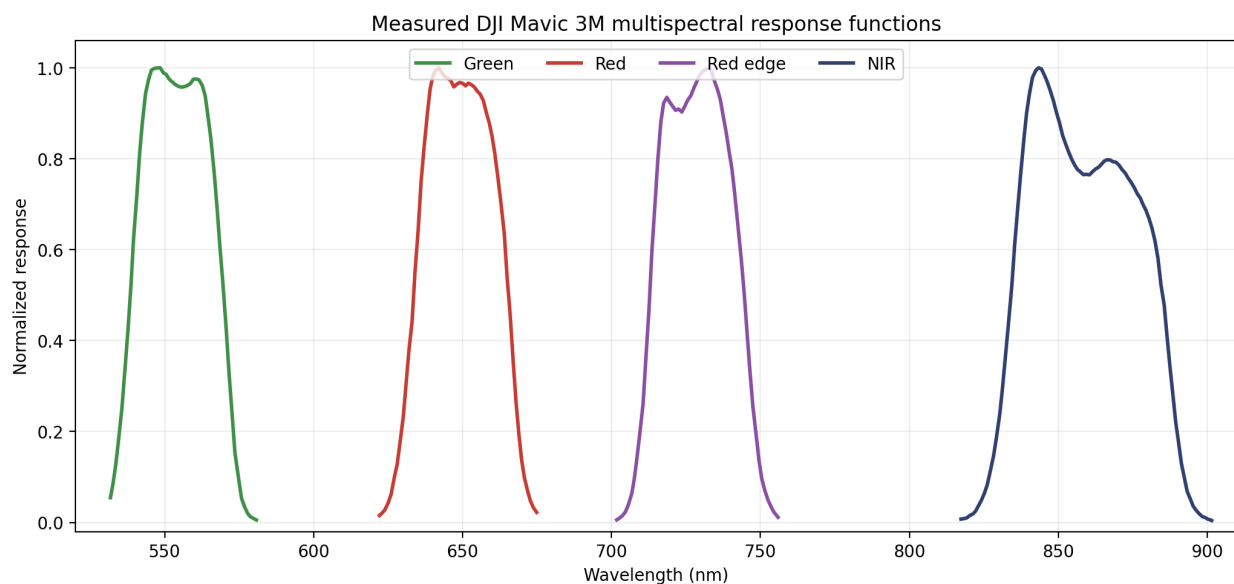
推導量	程式結果	性質
RGB GSD	1.612903 cm/pixel	DJI FAQ 公式推導
多光譜 GSD	2.764977 cm/pixel	DJI FAQ 公式推導
多光譜名目足跡	$71.668 \times 53.751 \text{ m}$	GSD $\times$ 像素數
航帶／觸發	12／408	虛擬矩形及重疊率推導
實際前向／旁向重疊	80.4797%／71.0368%	程式幾何結果
路線距離	4,383.318 m	含航帶與線間連接
任務估計	17.978 min	含 180 秒起降與每轉彎 2 秒
保守規劃預算／餘裕	30.1／12.122 min	研究者以 43 min $\times$ 70% 建立的情境

3.3 實測光譜響應不是四個單點

Atherton 等人公開 Mavic 3M 四個濾光器的 normalized spectral response functions。[O01] 程式每次從 Zenodo 取得四個 CSV，先比對預先登錄的 SHA-256，再以梯形積分計算 response-weighted 有效波長，並以線性插值求半高全寬。原始 CSV 不納入本站發布包；衍生圖屬依 CC BY 4.0 資料改作，圖說保留來源、授權與改作說明。

波段	DJI 名目中心／FWHM	實測有效波長	實測 FWHM	有效波長—名目中心
綠	560／32 nm	553.975 nm	31.368 nm	-6.025 nm
紅	650／32 nm	649.084 nm	31.874 nm	-0.916 nm
紅邊	730／32 nm	728.704 nm	31.758 nm	-1.296 nm
近紅外	860／52 nm	858.465 nm	50.899 nm	-1.535 nm

綠光曲線的 response-weighted 波長比名目中心低約 6.0 nm，但四個 FWHM 均接近官方帶寬。這不是對原廠規格作「錯誤判定」：名目中心、峰值與 response-weighted centroid 是不同統計量。其實務意義是，跨相機移植植生指標或模型時，必須確認 bandpass、輻射校正與訓練資料相容，不能因兩台相機都標示「red edge」就假設數值可互換。



Derived from Atherton et al., Zenodo 11102543 (CC BY 4.0); raw CSV files are not redistributed.

圖2 DJI Mavic 3M 四個濾光器的實測 normalized spectral response。依 Atherton 等人 Zenodo 11102543 (CC BY 4.0) 資料重新計算與繪圖；原始 CSV 未於本站重發。

3.4 兩秒間隔形成可計算的航線可行域

多光譜沿航向名目足跡為 $H \times 1944/2170$ 公尺；要求前向重疊率 α 時，可用拍攝間距為 $H \times 1944/2170 \times (1-\alpha)$ 。若 TIFF 最短間隔為 2 秒，純幾何 cadence 上限為：

$$v_{\text{cadence}} = H \times (1944 / 2170) \times (1 - \alpha) / 2$$

這個上限只回答「相鄰拍攝是否能達到目標重疊」，不回答風、轉彎、模糊、地形、障礙、法規或電池是否安全。以 5.0 m/s、80% 重疊反解，最低幾何高度為 55.813 m；30 m 時 cadence 上限只有 2.688 m/s。35 組可行域顯示，高解析度、較高重疊與較快任務互相衝突：60 m/90% 必須降至約 2.663 m/s，12 公頃任務估計 30.795 分鐘，略超過研究者設定的 30.1 分鐘規劃預算；同高度 80% 則為 5.0 m/s、17.978 分鐘。

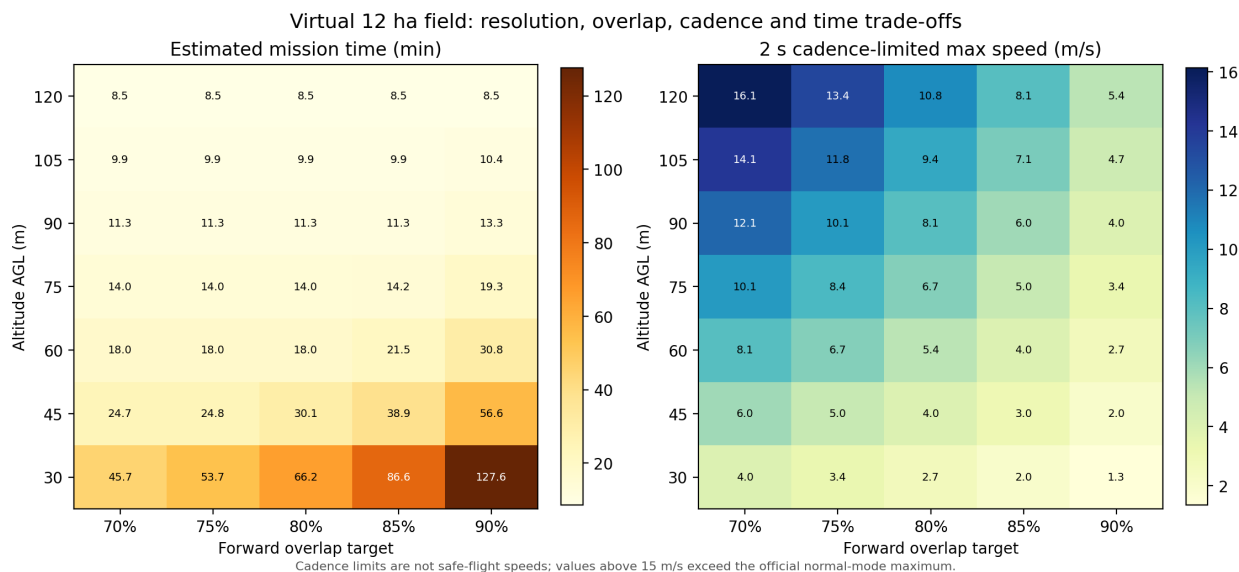


圖3 12 公頃虛擬田區在 30-120 m、70%-90% 前向重疊下的任務時間與兩秒 cadence 幾何速度上限。圖中速度不是安全航速；超過 15 m/s 的值亦高於官方 Normal mode 最大速度。

3.5 真正使用 Mavic 3M 的研究支持什麼

Ahn 等人以 Mavic 3M 實驗顯示，入射光、暗角與 BRDF／接縫修正會顯著影響多光譜拼接一致性；高重疊且完成全部修正的條件優於未修正流程，重疊下降時誤差可能明顯增加。[A04] 這支持本文把輻射與重疊列為品質條件，但不能把其場景的數值直接當成臺灣稻田門檻。

Jiang 等人的番荔枝葉氮研究、Karpiński 與 Kocira 的大豆生物刺激劑試驗，以及 Li 等人的玉米生長／氮素研究，都把 Mavic 3M 指標與地面葉氮、處理或生育期資料共同分析。[A17-A18, A22] 它們支持「M3M 可成為作物性狀研究的一個感測層」，不支持「四波段低值可單獨確診病原」。這也解釋本研究為何把輸出停在複查排序，並把地面量測列為升級證據的必要條件。

4. 規格約束的合成資料契約

4.1 虛擬場域

VIRTUAL-SX-12HA 是長 400 公尺、寬 300 公尺的本地座標矩形。名稱只提供宜蘭三星稻作情境，不包含經緯度、不對應地號、不指涉任何農民，也不代表已取得研究合作。這種設計讓航線、覆蓋與資料量可被重現，同時避免把未授權農地變成公開飛行目標。

4.2 合成冠層與已知異常

基準冠層由固定種子、行列週期紋理、緩慢空間變化與小幅隨機誤差組成。兩個橢圓區只被定義為「相對光譜低值」，程式在紅光增加訊號、在紅邊與近紅外降低訊號；另加入等比例降低全部波段的照明混淆區。這不是 PROSAIL 的完整輻射傳輸、真實疾病機制、真實生長速度或任何特定品種的參數估計。

分析陣列是涵蓋 400×300 m 田區的 300×400 格網，每格 1 m²，共 120,000 格。官方 60 m 多光譜名目 GSD 為約 2.765 cm/pixel，但本研究沒有配置或生成 2.765 cm 的 1.57 億像素正射產品；1 m 格網相當於下游彙整層，用來測試資料流、覆蓋與區塊化。因為沒有從原解析度逐張影像聚合到 1 m 的步驟，格網結果不能證明真實小尺度病斑可見度。

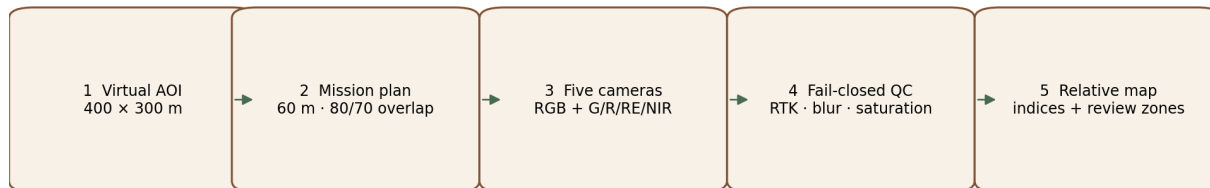
4.3 DN 與相對反射率

四個合成格網反射率陣列經黑階 64、輻射尺度、增益、曝光、日照、波段增益與徑向暗角轉成 16-bit 測試 DN，再用同一組已知參數反推相對反射率並加入微量噪聲。16-bit 是測試 fixture 的型別，不是所有 M3M TIFF 的位深主張。這項往返測試只證明程式遵守「DN 不能直接當反射率」的資料型別與處理順序；由同一參數生成與反推，沒有校正未知相機誤差，也沒有複製 DJI Terra 專有演算法或驗證跨日期絕對反射率。

4.4 位姿輔助合成拼接

每個拍攝點的名目矩形足跡只用來累加 1 m² 格網的「理論覆蓋次數」；DN 與相對反射率則直接由已知世界格網提供，並未切成 408 組原解析度影像再拼回。所謂 pose-assisted synthetic mosaic 因此只是 oracle-coordinate grid，不是 photogrammetric mosaic。本研究沒有 XMP／EXIF parser、CaptureUUID 真實分組、波段共註冊、特徵匹配、bundle adjustment、DSM 或 orthomosaic。它能隔離狀態機與後處理邏輯，不能證明真實影像在重複稻株紋理、水面反光、風動冠層、曝光差異或少量控制點下仍能穩定拼接。

End-to-end digital-twin demo (no aircraft connection, no field flight)



Every stage emits a machine-readable receipt; rejected captures cannot enter the mosaic.

圖4 從虛擬 AOI、航線、五相機資料、品質閘門到複查區的工程資料流。

5. 品質閘門與可拒判決策

5.1 拍攝事件故障注入

408 次觸發各自帶有 RTK flag、日照相對值、曝光、ISO、模糊分數、飽和比例與實際檔名集合。正常事件有五個檔名；每第 173 次故障事件只保留四檔且真的沒有 `_MS_RE.TIF`。另以固定規則注入每第 97 次 RTK float、每第 131 次低清晰度、每第 113 次高飽和比例。這些頻率只為測試所有分支，不是 Mavic 3M 真實故障率。

品質邏輯採 fail closed：任一必要條件失敗，事件不得進入理論覆蓋與下游分析。12 次被拒事件包含 RTK 非 fixed 4 次、模糊 3 次、飽和 3 次及缺波段 2 次；沒有重疊故障。其餘 396 次接收，接受率為 97.0588%。「接收」只表示符合本合成資料契約，不表示真實影像已經拼接或具有農藝效度。

5.2 真實系統還要增加的閘門

真實 M3M adapter 應再檢查檔案雜湊、`CaptureUUID` 五檔分組、時間連續性、影像尺寸、sensor index、曝光與黑階解析、日照感測器遺漏、定位不確定度、共註冊誤差、重投影誤差、DSM/DOM no-data、接縫與反射板合理範圍。任何欄位無法確認時，結果應降級成品質報告，不應偷偷以預設值完成漂亮地圖。

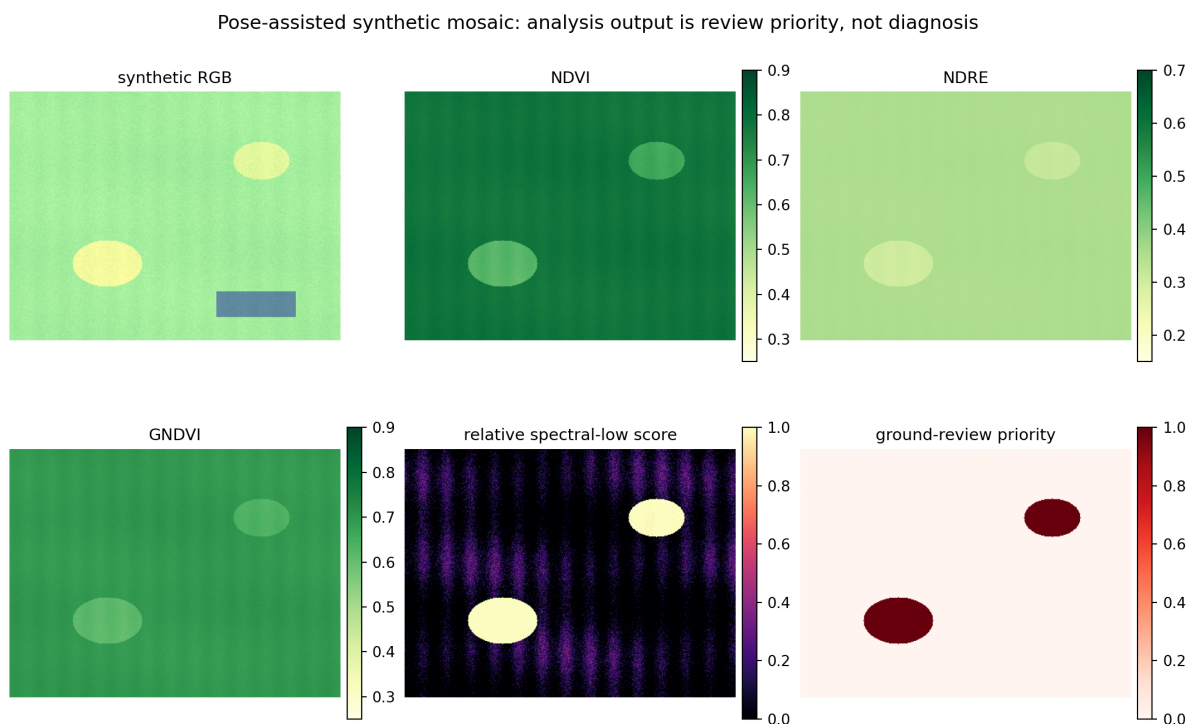


圖5 合成 RGB、三個植生指標、相對光譜低值分數與地面複查優先區。

6. 指標、相對異常與輸出狀態

6.1 三個植生指標

程式在相同格網與有效遮罩上計算：

- $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$
- $NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$
- $GNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Green)$

分母接近零時輸出 no-data。NDVI 的紅／近紅外正規化組合可追溯至 Tucker，綠光組合則有 Gitelson 等人的基礎。[A06-A07] M3M 四波段也足以計算 Cired-edge、Cigreen、OSAVI 與不需藍光的 EVI2；標準 EVI 需要藍光，SWIR 水分指標需要短波紅外，熱壓力分析需要熱感測器，均不應以 M3M 四波段冒充。使用公式不等於取得生長量或病害真值；指標的絕對與跨日可比性仍取決於 bandpass、輻射、幾何、照明、冠層及地面校正。[A16-A18]

6.2 田內相對低值分數

每個指標先以全田有效格網的中位數建立中心，再以 $1.4826 \times MAD$ 建立穩健尺度。低於田內中心的程度被截斷至 0-6 個尺度並除以 6，三個分數取平均。閾值取 0.36 或有效區第 93 百分位中的較高者，再以四鄰域連通並移除小於 100 m^2 的碎片。這是一個可解釋的排序器，不是從病理標籤學得的模型。

```
geometry = mapping_geometry(60.0, 80.0, 70.0)
mission = plan_virtual_mission()
records, qc = simulate_capture_qc(mission["captureEvents"])
coverage = coverage_grid(records, field, footprint_along, footprint_cross)
raw_dn, reflectance, receipt = simulate_dn_and_calibrate(bands)
indices = compute_indices(reflectance)
score = robust_low_score(indices, coverage &gt; 0)
```

6.3 允許的決策語言

狀態	意義	系統接下來可做什麼
REJECTED_QC	檔案、定位、曝光、清晰度、校正或拼接未通過	回報原因、補拍或停止
REJECTED_OOD	未來模型遇到訓練分布之外的資料	不給機率，要求人工與新資料
NO_FLAG	在本閾值下未標記優先區	仍可依例行抽樣檢查
REVIEW_REQUIRED	某區相對指標較低	產生地面巡查任務，不指定病因或處置

系統禁止直接輸出「白葉枯病」「缺氮」「該施藥」「污染」「產量會下降」等確定性結論。真實病原需由地面症狀、農藝專家與適當實驗室方法確認；營養、水分與產量也各需獨立參考測量。

7. 工程結果

7.1 任務、資料量與覆蓋

單次虛擬任務產生 408 次五相機觸發，因此預期 2,040 個檔案。若只按像素未壓縮估算，四張 16-bit 多光譜約 15.317 GiB，RGB 24-bit 像素約 23.811 GiB；這不是 DJI 的實際 TIFF/JPEG 檔案大小，僅用來提醒工作站、記憶卡、傳輸與備份容量不能以圖片張數直覺估算。

品質閘門移除 12 次事件後，合成足跡仍覆蓋 100% 格網，接受影像覆蓋中位數為每格 14 張。覆蓋高不等於正射品質高：真實場景仍可能因重複稻株紋理、水面、風動、曝光與邊緣視角造成註冊或接縫失敗。[A03-A05]

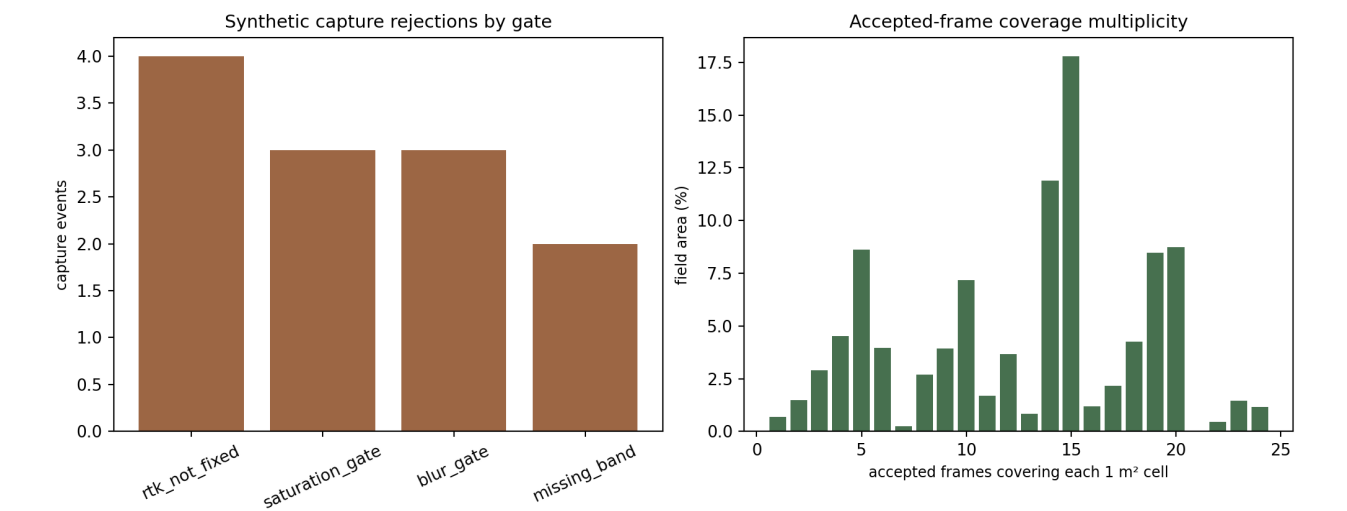


圖6 合成品質拒收原因與接收影像的格網覆蓋次數。故障數是刻意注入，並非設備故障率。

7.2 指標與兩個複查區

指標	P10	中位數	P90
NDVI	0.764458	0.778270	0.789934
NDRE	0.349774	0.353734	0.357043
GNDVI	0.682018	0.693607	0.703359

閾值 0.36 先產生候選像素，再以四鄰域連通並移除小於 100 m² 的碎片，形成兩個最終複查區。面積分別為 3,681 與 2,443 m²，中心在本地格網約 (118.5, 92.5) 與 (304.5, 216.5) 公尺；最終遮罩、區塊面積加總與輸出總複查面積一致，均為 6,124 m²。座標只存在於虛擬矩形，不能轉換成真實農地位置。

7.3 合成遮罩功能測試

兩個預先植入的相對光譜低值遮罩總面積 6,124 m²。經相同 100 m² 最小區塊規則後，最終輸出與合成遮罩比較得到 precision 1.000、recall 1.000、IoU 1.000。三者為 1 是因場景、效應、閾值與後處理均由同一個簡化模擬器設計；這是程式 fixture 的理想功能測試，不是獨立預測，更不是 M3M、稻田或病害的準確率。真正研究必須把感測器、田區、日期、品種與標記者分離，並以前參與調參的資料測試。[A08, A20]

7.4 自動驗證

45 項 pytest 覆蓋現行波段值、GSD、足跡、輸入範圍、航帶與觸發數、兩秒 cadence、35 組可行域、保守餘裕、非飛行座標、故障拒收、真正缺檔、五檔契約、覆蓋、16-bit 測試 DN、相對反射率回復、最終遮罩一致性、兩個連通區、SRF 解析、禁止診斷欄位與重複執行陣列相等。engineering-demo-receipt.json 排除自身後為輸出檔案建立 SHA-256 清單，連續重跑保持位元一致；requirements-traceability-v1.1.csv 另把官方要求、程式、測試與輸出逐項連結。測試證明的是程式契約，不是飛行安全、農業成效或第三方獨立審查。

7.5 可稽核的衍生資料

m3m-spectral-response-receipt.json 記錄四個第三方 CSV 的 DOI、檔名、CC BY 4.0、SHA-256、計算方法與未重發狀態；來源任一位元改變就 fail closed。mission-feasibility-envelope.csv 保留 35 組高度、重疊、cadence 上限、實際規劃速度、GSD、航帶、觸發、檔案數、時間、餘裕與單航次 gate。focused-analysis-receipt.json 再對所有衍生檔與兩張新圖建立 SHA-256。這使讀者能區分官方值、第三方實測資料、研究者公式、合成結果與尚未取得的田間證據。

8. 與公開真實 Mavic 3M 資料的關係

本版本已實際處理 Atherton 等人的 Mavic 3M spectral response functions (CC BY 4.0)，但只計算濾光器曲線的衍生統計與圖，不是影像 replay。[O01] 另查得 Fonseka 等人的斯里蘭卡稻田原始 M3M 影像（資料集標示 CC BY 4.0）與 Zhao、Zheng 的 1.43 GB 冬小麥 M3M 原始時序壓縮檔 (CC BY 4.0)。[O02-O03] WeedyRice-RGBMS-DB 提供對齊後的 M3M RGB／四波段及專家遮罩，但標的是雜草稻，不是疾病。[O04]

本版本仍沒有下載或處理上述 M3M 原始影像，因此不能主張完成 public-data replay。下一個獨立實驗應把同一 pipeline 分成三種模式：synthetic、open_data_replay 與 future_field。公開重播可評估五檔分組、metadata 解析、註冊、拼接、no-data、飽和、接縫、執行時間與指標有效率；若資料沒有病原、地面真值或外部田區，就不能計算疾病準確率或泛化效能。

第三方資料應由使用者直接依 DOI 取得、保留原始授權與雜湊，不應被包進本站資料包。本文沒有用 CC 授權重新定義 DJI 文件、學術文章或資料集的權利。

9. 最低可行的真實田間驗證

9.1 最小場域與航次

第一階段只需一塊取得書面同意的 0.5-1.0 公頃連續稻田，不必一開始就追求 12 公頃。選擇至少 3 個生育期日期，每日以相同參數背靠背飛 2 次；每次飛行前後拍攝可追溯的多階反射板，並保留一塊不參與校正的驗證板。使用至少 24 個事前固定的 2×2 m 樣區，位置在觀看指標圖之前確定，避免只去「看起來有問題」的地方。這是工程 pilot 的可行下限，不是部署級效能的通用樣本數；正式樣本量要依 pilot 變異、區塊內相關與主要終點做 power analysis。

地面紀錄至少包含品種、日期、生育期、施肥與灌溉摘要、SPAD 或等價葉綠素代理、株高、冠層覆蓋、土壤含水、倒伏、雜草、可見病徵與定位照片。統計獨立單位是植株、樣方、小區、田區或航次，不是數百萬像素；同一樣方內的像素不能被當成額外生物樣本。[A08, A19] 若只做生長巡查，主要結果可預先設定為同日重飛一致性、反射板保留誤差及前 20% 複查區相對隨機巡查的命中增益。

若研究疾病，應鎖定一個作物、一個病原、一個預先指定生育期與主要終點，至少包含健康、目標病害、水分或營養壓力及另一常見病蟲害等混淆類。pilot 可由至少 4 個空間區塊、每類每區塊至少 3 個獨立小區起步；目標病原需以適當的病理、培養、PCR／qPCR 或主管專業方法確認，並抽驗症狀陰性與混淆類。模型切分必須按小區、田區、日期或季節分組；從同一正射圖隨機切像素會造成空間洩漏並高估泛化。[A08, A20]

9.2 事前工程門檻

門檻	建議事前規則	失敗處置
五檔完整率	每航次至少 95% 觸發組完整	低於門檻不得做田區指標結論
品質閘門	缺欄、未對齊、非反射率處理層均 100% 阻擋	修正或補拍，不以預設值略過
輻射保留誤差	以未參與校正的驗證板預先設定各波段容許誤差與 CI	超標則不得跨航次比較
幾何精度	以獨立 checkpoints 報告水平／垂直 RMSE 與波段配準誤差	不以 RTK fixed 取代成果精度
重複性	樣區 NDRE 同日重飛 ICC 的 95% CI 下限至少 0.75	降級為影像品質報告
地面查核效用	前 20% 複查區的盲態地面異常比例比隨機基準至少高 0.15	不宣稱能改善巡查排序
空間外部效度	切分單位為小區／田區／日期／航次／感測器	不以相鄰 patch 或像素隨機切分

這些是前瞻性決策門檻，不是本研究已達成的結果。樣本量與信賴區間應在知道 pilot 變異後重新估計，並保留失敗結果。

9.3 法規與現場責任

截至 2026-08-04，臺灣實飛至少要重新查核交通部遙控無人機管理規則、民航局圖資與地方公告；Mavic 3M 約 951 g，涉及註冊等要求，且 400 ft、日夜、目視、人物與特定區域限制不能由本論文替個案作成法律結論。[T01-T02] 公司、法人、學校或政府機關操作還可能適用額外資格與申請。民航局 2026 年修法資料仍有草案內容，不能提前當成生效規則。

10. 從 Demo 到可部署系統的工程架構

生產系統可拆成六個不可互相越權的服務：

- 1. Mission service：輸入經核准 AOI 與操作參數，輸出 Pilot 2 複核所需設定，不直接控制飛機。
- 2. Ingest service：唯讀匯入記憶卡，依 CaptureUUID 分組、雜湊並保留原檔。
- 3. Quality service：驗證 metadata、RTK、曝光、清晰度、完整性、共註冊與拼接，產生 fail-closed 收據。
- 4. Photogrammetry service：在隔離容器執行 Terra 或具授權相容的工具，輸出版本化 DSM／DOM；專有處理與本站原創碼分開。
- 5. Analysis service：只接受已核准的相對／表面反射率產品，計算指標、相對分數與不確定性。
- 6. Review service：把區塊、來源影像、鄰近航點與原因交給人員，記錄現勘結果；沒有人工或實驗室真值，不回寫「確診」。

每次執行都應有不可變的 mission ID、flight ID、capture ID、處理版本、參數、來源雜湊、模型雜湊、狀態、失敗原因與人工修正紀錄。這讓「看起來一樣的綠色圖」可以被追問：來自哪次飛行、哪組檔案、哪套校正、哪些影像被拒收、哪個版本產生。

介面／工具	官方資料可支持的定位	本研究的處理
DJI Pilot 2	在 RC Pro Enterprise 建立與執行 Area Route，匯入 KML／KMZ 並由操作人監督	真實採集的首選入口；本研究未連線
DJI Terra	2D 多光譜重建、植生指標、校正板與處方圖等離線處理	可作 photogrammetry adapter；未執行專有流程
MSDK V5	官方產品表列出 Mavic 3M	只列未來 adapter 選項；未驗證版本、API 或命令
DJI WPML	通用支援表含 M3M 的 mapping 任務描述	只作 schema 研究；不輸出可飛行座標或聲稱 Pilot 2 必然接受
Cloud API／FlightHub 2	現行文件對 M3M 的列舉不一致；FAQ 標示不支援 FlightHub 2	不宣稱已支援遠端航線或無人值守飛行

11. 限制與風險

- 12 公頃矩形、冠層、照明混淆與兩個低值區都是合成，不代表三星、宜蘭或臺灣任一真實田區。
- 分析是在 1 m 格網直接生成 DN，不是 408 組、2,040 個 M3M 原解析度檔案；沒有真實 XMP/EXIF、UUID 分組或檔案 I/O 壓力。
- 理論足跡只累加覆蓋次數；沒有驗證波段共註冊、SfM、束平差、DSM、DOM、地面控制、checkpoints 或絕對定位。
- DN 回復使用生成時的同一組已知參數，不能代替反射板、保留驗證板、日照感測器品質、實機暗角、曝光、BRDF 與跨日校正。
- 35 組航線是矩形、平地、固定速度與簡化轉彎模型；沒有風場、地形、雨霧、電線、水面反光、動態返航電量或操作人中止行為。
- 43 分鐘的 70% 預算、故障頻率、模糊／飽和閾值與 100 m² 區塊門檻都是研究者 fixture，不是 DJI 保證、真實故障率或最佳作業標準。
- 實測 SRF 來自一個公開研究資料集；response-weighted centroid 與 FWHM 描述濾光器曲線，不證明每台相機、每個韌體或每次航拍的輻射準確度。
- 合成功能指標不是獨立測試；兩個低值區與偵測規則高度同源，即使數值接近 1 也不能稱為田間模型效能。
- 植生指標非病因專屬。輸出不能作為農藥、施肥、灌溉、採收、食安、保險或產量決策的唯一依據。
- M3M 沒有藍光、SWIR 或熱紅外，不能忠實產生需要這些感測器的指標或推論所有疾病。
- DJI 文件間存在 5 MP/5.5 MP 與 560/550 nm 差異；WPML、Cloud API 與產品列舉亦不完全一致。後續應隨韌體、手冊與實機 metadata 更新。
- 規則與空域會變動。本文只提供查核入口，不保證特定日期、地點、組織、飛行或自動化方式合法。
- 本研究未經外部工程、農藝、測量、法律或同儕審查；公開 M3M 原始影像重播與臺灣田間驗證尚未完成。

12. 結論

Mavic 3M 的價值不是按下 NDVI 按鈕，而是能否把 bandpass、航線幾何、兩秒 cadence、五檔完整性、metadata、校正、拼接、品質拒收、相對指標、複查與地面回饋連成可稽核系統。本研究把其中可在未購機前驗證的部分定量化：四個公開實測濾光器曲線與官方帶寬大致相符；60 m、80% 前向重疊時，5.0 m/s 位於 5.375 m/s cadence 幾何上限內；提高到 90% 則須明顯降速並使 12 公頃單航次超出本研究的保守時間預算。五檔資料契約也能在真正缺少紅邊檔、定位、模糊或飽和故障時 fail closed。

這些結果證明的是規格追溯、數值推導與軟體狀態，不是飛行、影像、病害或農藝效度。格網 DN 由同一模擬器生成與反推，不能被稱為 M3M 輻射校正；低值遮罩也不能被稱為植物生長或病原診斷。最可信的下一步不是把合成準確率寫得更高，而是先用一組授權明確的真實 M3M 原始資料完成 CaptureUUID、XMP/EXIF、註冊、SfM、DSM/DOM、反射率與效能 replay，再在獲准的小田做至少三日期、背靠背重飛、前後反射板、保留驗證板、固定樣區、獨立 checkpoints 與盲態地面查核。只有這兩道證據都通過，才適合把「規格約束的工程研究」升級成「田間服務效度」。

研究揭露、版本與更正資訊

研究範圍與非隸屬聲明

本研究僅描述指定來源於 2026-08-04 可觀察之公開資訊，以一組 CC BY 4.0 實測濾光器資料作衍生分析，並以合成資料驗證工程流程。未觀察到或未驗證不表示任何設備、個人、企業或機構實際沒有能力、品質較差、未遵守法令或存在違法情形。本研究與 DJI 及文中第三方不存在隸屬、合作、贊助、認可或書背關係；DJI 與 Mavic 名稱只用於辨識研究設備。本文不構成法規遵循、農藝診斷、農藥、食安、投資、醫療、法律或交易建議。

版本紀錄

目前版本為 v1.1，日期 2026-08-04，狀態為公開研究工作論文，永久識別碼為 DOI：10.5281/zenodo.21791470，並沿用 Concept DOI：10.5281/zenodo.21789963。v0.1（2026-08-04）是未公開草稿；v1.0（2026-08-04）仍以 DOI：10.5281/zenodo.21789964 保留且可獨立引用。v1.1 修訂項目包括：修正工程收據羈等性、真正移除缺波段檔案、統一最終複查遮罩與評估範圍、補齊第三方字型授權、加入實測 SRF 衍生分析、35 組航線可行域、軟體介面限制、獨立驗證設計及用語收斂。本次公開採 Zenodo 新版本機制，不靜默覆寫既有紀錄。

AI 使用與作者責任

生成式 AI（OpenAI Codex）協助官方與學術來源線索整理、研究設計、程式、測試、圖表、文字及 PDF 版面；AI 不列為作者。周秉漢負責研究問題、來源核對、方法選擇、結果解讀、公開決策與後續更正。

利益衝突

作者未接受 DJI、資料集作者、無人機服務業者、農藥或農業科技業者委託或資助。作者可能因本研究展示的網站、AI 或農業科技工程能力而間接受益。

第三方權利

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、文字編排、研究程式及原創圖表。第三方名稱、商標、網址、規格、資料、圖片、文件、文字摘錄、字型及其他內容仍依原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。本套件沒有重新散布 DJI 文件、學術文章或第三方原始資料；內含 Noto Sans TC 字型時依 SIL Open Font License 1.1 另行標示，SRF 圖與統計則依 Atherton 等人 CC BY 4.0 資料衍生並保留歸屬。

更正申請

如認為來源、規格、授權、方法或結果有誤、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。作者核實後應以新版本修訂並保留紀錄。

參考文獻與資料來源

- [D01] DJI. Mavic 3M Specifications. Accessed 2026-08-04. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-m/specs>
- [D02] DJI. Mavic 3M Product Page. Accessed 2026-08-04. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-m>
- [D03] DJI. Mavic 3M FAQ. Accessed 2026-08-04. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-m/faq>
- [D04] DJI. DJI Mavic 3M User Manual v1.8. 2024-08-14. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20240814/DJI_Mavic_3M_User_Manual_EN.pdf
- [D05] DJI. DJI Mavic 3M Image Processing Guide. 2023. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20230829/Mavic_3M_Image_Processing_Guide_EN.pdf
- [D06] DJI. DJI Terra FAQ. Accessed 2026-08-04. <https://enterprise.dji.com/dji-terra/faq>
- [D07] DJI. DJI Mavic 3 Enterprise Series Release Notes, aircraft firmware v17.01.05.08, RC v02.01.08.04 and Pilot 2 v17.1.5.15. 2026-05-07. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20260507/DJI_Mavic_3_Enterprise_Series_Release_Notes_EN.pdf
- [D08] DJI Developer. Mobile SDK V5 Introduction and supported-product table. Accessed 2026-08-04. <https://developer.dji.com/doc/mobile-sdk-tutorial/en/basic-introduction/msdk-introduction.html>
- [D09] DJI Developer. DJI WPML Overview, template.kml and waylines.wpml references. Accessed 2026-08-04. <https://developer.dji.com/doc/cloud-api-tutorial/en/api-reference/dji-wpml/overview.html>
- [D10] DJI Developer. Cloud API Product Support. Accessed 2026-08-04. <https://developer.dji.com/doc/cloud-api-tutorial/en/overview/product-support.html>
- [T01] 交通部。遙控無人機管理規則。Accessed 2026-08-04. <https://motclaw.motc.gov.tw/webMotcLaw2018/Law/ArticleContent?LawID=J0167004&type=1>
- [T02] 交通部民用航空局。遙控無人機管理資訊系統。Accessed 2026-08-04. <https://drone.caa.gov.tw/>
- [O01] Atherton et al. Spectral response functions for DJI Mavic 3 Multispectral. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.11102543.
- [O02] Fonseca et al. Multispectral Images on Paddy-Sri Lanka. Mendeley Data. DOI: 10.17632/h8s5mn52j6.1.
- [O03] Zhao & Zheng. Raw multispectral winter-wheat time series. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.18778904.
- [O04] WeedyRice-RGBMS-DB. Mendeley Data. DOI: 10.17632/vt4s83pxx6.1.

- [A01] Aasen H, Honkavaara E, Lucieer A, Zarco-Tejada PJ. Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review. *Remote Sensing*. 2018;10:1091. DOI: 10.3390/rs10071091.
- [A02] Mamaghani B, Salvaggio C. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing. *Sensors*. 2019;19:4453. DOI: 10.3390/s19204453.
- [A03] Cao S et al. Radiometric calibration assessments for UAS-borne multispectral cameras: Laboratory and field protocols. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.01.016.
- [A04] Ahn H et al. Minimizing Seam Lines in UAV Multispectral Image Mosaics Utilizing Irradiance, Vignette, and BRDF. *Remote Sensing*. 2025;17:151. DOI: 10.3390/rs17010151.
- [A05] Westoby MJ et al. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 2012;179:300-314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- [A06] Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979;8:127-150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- [A07] Gitelson AA, Kaufman YJ, Merzlyak MN. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1996;58:289-298. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
- [A08] Roberts DR et al. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*. 2017;40:913-929. DOI: 10.1111/ecog.02881.
- [A09] Logavito B et al. Deep learning-based detection of bacterial leaf blight from UAV multispectral imagery. *PLOS ONE*. 2025. DOI: 10.1371/journal.pone.0314535.
- [A10] Zhang D et al. Detection of rice sheath blight using an unmanned aerial system with high-resolution color and multispectral imaging. *PLOS ONE*. 2018;13:e0187470. DOI: 10.1371/journal.pone.0187470.
- [A11] Su J et al. Spatio-temporal monitoring of wheat yellow rust using UAV multispectral imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;167:105035. DOI: 10.1016/j.compag.2019.105035.
- [A12] Abdulridha J et al. A remote sensing technique for detecting laurel wilt disease in avocado in presence of other biotic and abiotic stresses. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;156:549-558. DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.018.
- [A13] Albetis J et al. Detection of Flavescence dorée Grapevine Disease Using Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery. *Remote Sensing*. 2017;9:308. DOI: 10.3390/rs9040308.
- [A14] Garcia M V Y, Oliveira H C. The influence of ground control points configuration and camera calibration for DTM and orthomosaic generation using imagery obtained from a low-cost UAV. *ISPRS Annals*. 2020. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-239-2020.
- [A15] Hugenholtz C et al. Spatial Accuracy of UAV-Derived Orthoimagery and Topography: Comparing Photogrammetric Models Processed with Direct Geo-Referencing and Ground Control Points. *Geomatica*. 2016. DOI: 10.5623/cig2016-102.
- [A16] Gitelson AA et al. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*. 2003;30. DOI: 10.1029/2002GL016450.
- [A17] Jiang X et al. Combining UAV Remote Sensing with Ensemble Learning to Monitor Leaf Nitrogen Content in Custard Apple. *Agronomy*. 2025;15:38. DOI: 10.3390/agronomy15010038.
- [A18] Karpiński P, Kocira S. Possibilities of Using a Multispectral Camera to Assess the Effects of Biostimulant Application in Soybean Cultivation. *Sensors*. 2025;25:3464. DOI: 10.3390/s25113464.
- [A19] Yamaguchi T et al. Improving efficiency of ground-truth data collection for UAV-based rice growth estimation models: investigating the effect of sampling size on model accuracy. *Plant Production Science*. 2024. DOI: 10.1080/1343943X.2023.2299641.
- [A20] Ploton P et al. Spatial validation reveals poor predictive performance of large-scale ecological mapping models. *Nature Communications*. 2020;11:4540. DOI: 10.1038/s41467-020-18321-y.
- [A21] Daniels L et al. Identifying the Optimal Radiometric Calibration Method for UAV-Based Multispectral Imaging. *Remote Sensing*. 2023;15:2909. DOI: 10.3390/rs15112909.
- [A22] Li Z et al. Monitoring of Summer Maize Growth Status and Nitrogen Based on Field Characteristic Data and UAV Multispectral Technology. *Agriculture*. 2026;16:392. DOI: 10.3390/agriculture16040392.