

從自動航線到可稽核生長異常圖：DJI Mavic 3M於嘉義鹿草候選稻田的多光譜巡檢工程原型、程式實作與現地驗證方案

From Supervised Route Automation to Auditable Crop-Anomaly Maps: A DJI Mavic 3M Multispectral Scouting Prototype and Prospective Field-Validation Protocol for a Candidate Rice Field in Lucao, Chiayi, Taiwan

周秉漢 / CHOU, BING-HAN

ORCID : 0009-0000-7018-5096

公開日期：2026-08-04 | 修訂日期：2026-08-04

DOI : 10.5281/zenodo.21782959

授權：CC BY 4.0 僅適用作者有權授權之內容

研究摘要

本研究回答一個比「無人機能不能拍稻田」更嚴格的工程問題：能否把操作人監督下的航線規劃、四波段資料品質、植生指標、相對異常分區、地面查核與版本紀錄串成一條可執行、可測試、可追溯，而且在證據不足時會停止的工作流。研究選用 DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M) 作為目標機型，因其官方規格同時提供20 MP、4/3 CMOS機械快門RGB相機，以及綠、紅、紅邊與近紅外四個5 MP多光譜波段。[D01-D02] 本文不把產品規格、即時NDVI顯示或理想飛行時間當成臺灣田間準確率與產業效益。

工程與證據邊界

本版本實作並測試航線規劃、飛前閘門、四波段品質檢查、光譜指標與相對異常分區；示範輸入為合成資料，尚未在真實農地執行飛行或蒐集作物地面真值。輸出只表示人工複查優先序，不構成病害、養分、水分、污染或處置診斷。

生成式 AI 協助來源線索整理、程式起草、測試與版面製作；AI 不列為作者。作者負責來源核對、工程邊界、解讀、發布決策與後續更正。

1. 研究問題、範圍與貢獻

1.1 研究問題

本文設定五個可被驗證的問題：

1. 如何把0.8至1.0公頃稻田邊界轉成保留田界緩衝、可供操作人複核的往復航線？
2. 如何在任何植生指標計算之前，阻擋缺波段、未對齊、非反射率範圍或缺乏譜系的輸入？
3. 如何把NDVI、NDRE與GNDVI整合成田內相對異常優先區，而不把相關訊號誤稱為病因？
4. 如何用合成fixture、自動測試、雜湊與結構化輸出，證明軟體功能確實存在且可重現？
5. 如何以最小的單田前瞻性pilot確認重複性與查核效用，並為失敗預先設定降級或停止規則？

1.2 本版本的三層證據

本文把證據分成三層，避免把不同成熟度混成一個「可行」結論。

證據層	本版本狀態	可以主張	不可以主張
文件層	已完成	Mavic 3M公開規格、WPML資料結構、臺灣一般操作與空域查核入口、既有文獻支持的風險	個案已合法、官方認可本方案
工程層	已完成合成測試	程式能規劃預覽航線、阻擋錯誤輸入、計算指標、產生優先區與譜系	真實影像能穩定反映生長、病害或產量
田間層	尚未開始	僅能公開事前協定與門檻	準確率、重複性、節省工時、增產或ROI

1.3 工程貢獻

原型不是一段只在簡報中存在的概念碼。公開套件具有Python package、CLI、設定檔、合成四波段TIFF、測試、結構化輸出、欄位字典、安全清單與重現說明。工程能力的判準不是程式碼行數，而是輸入契約、錯誤處理、測試證據、資料譜系與現地責任邊界能否共同被第三方檢查。

2. 場域選擇：LC-01只是候選研究單元

2.1 為何選鹿草

農業部臺南區農業改良場官方頁面記載，鹿草分場位於嘉義縣鹿草鄉，主要業務包括水稻品種及栽培技術改良，並有可供試驗的田區。[T08] 中央氣象署農業氣象站站況資料列出72M700南改鹿草分場站，讓未來可把現地風、雨、溫度及輻射條件納入航次紀錄；該站資料可用性與品質仍須依實際研究日期查核。[T11] 因此鹿草是具備作物、研究支援與氣象脈絡的候選地域，而非已取得的研究基地。

2.2 LC-01的操作性定義

LC-01不是既有地號，也不指涉公開網站上的任一特定田塊。只有同時符合下列條件後，才會成為真正研究單元：

- 面積在0.8至1.0公頃、連續且以稻作為主，田界可被管理者確認。
- 土地管理者、耕作者與研究執行者完成書面同意，清楚界定進場、飛航、照片與資料公開範圍。
- 起降區、道路、電線、建物、人群、鳥類活動與返航高度經現勘。
- 民航局動態空域與正式公告於任務前重新查核，操作人、機體及活動符合當日適用要求。[T01-T06]
- 稻作品種、移植／直播日期、灌溉、施肥與植保管理可以被最少限度地記錄。
- 對外資料只保留模糊位置與研究代碼；地號、精確座標、農戶姓名及聯絡方式不進入公開套件。

若鹿草分場未同意合作，不得使用其名稱暗示研究曾在該場執行；可在鹿草鄉另尋符合條件的自願合作田，並在新版本更正場域描述。

2.3 公開幾何不是飛航資料

config/engineering-aoi.geojson是約1.024公頃的合成矩形fixture，位置故意與候選場域分離，屬notForFlight。它的用途只是在公開環境驗證航線演算法。任何人都不能將該GeoJSON、衍生航點或KMZ載入飛機；真實田界只能在取得同意後於隔離環境重建。

3. 機型、資料與軟體介面

3.1 Mavic 3M能提供什麼

DJI官方規格列出Mavic 3M標準重量約951公克、RGB相機為20 MP 4/3 CMOS且具機械快門；多光譜相機為四個5 MP感測器，中心波段與帶寬為綠560±16 nm、紅650±16 nm、紅邊730±16 nm及近紅外860±26 nm，靜態多光譜影像格式為TIFF。[D01] 官方亦列出無風海平面條件下最長飛行時間43分鐘，但註腳指出測試飛至0%電量；實務任務必須保留返航、轉向、風與電池老化餘裕，不能直接用43分鐘除以田區面積。[D01-D02]

DJI WPML文件描述以template.kml與waylines.wpml封裝KMZ任務的資料結構，且文件列出Mavic 3M支援相關航線類型。[D04-D06] 然而本原型沒有在可查的一手文件中確認Mavic 3M的所有機型與負載列舉值，也未以真機和Pilot 2驗證輸出的WPML。因此程式刻意只輸出一個KML預覽，不產生waylines.wpml，不聲稱KMZ可執飛。這是安全設計，不是功能缺漏的掩飾。

3.2 輸入資料契約

分析端只接受四張已完成反射率定標、正射重建與像素共註冊的二維TIFF，以及下列metadata：

- dataProvenance：只能是synthetic或field。
- captureId：不可重複的航次／fixture代碼。
- scaleFactor：TIFF整數值轉反射率的比例。
- pixelSizeM：公尺單位的地面像元尺寸。
- orthomosaicCoRegistered與bandMapValidated：四波段是否完成共註冊且波段對應已核對。
- processingLevel與measurementScale：必須明示為反射率正射產品及相對／地表反射率，raw DN會fail closed。
- calibrationMethod、crs與gridTransform：保留校正方式、座標參考與像元網格轉換。

本程式不直接把Mavic 3M原始照片轉成正射反射率成果。真實研究必須另行記錄校正板、日照感測、曝光、XMP/EXIF、RTK、重建軟體及版本、座標系統、重採樣與品質報告。若只拿到未校正DN、JPEG、螢幕截圖或彼此錯位的波段，應停止分析。

3.3 系統邊界

資料流為：候選田界與參數 → 規劃用路線 → 操作人於Pilot 2重建與最終複核 → Mavic 3M採集 → 受控影像處理 → 四波段品質閘門 → 植生指標 → 相對異常分數 → 最小面積連通區 → 地面查核清單 → 查核結果與版本紀錄。

軟體不控制起飛、不繞過登入、空域、軟體或安全限制、不自動上傳航線至飛機、不辨識病原、不產生施肥／灌溉／用藥處方。任何人在場外仍須承擔最終起飛、中止與返航判斷。

4. 航線規劃與飛前閘門

4.1 小田區往復式路線

規劃器將WGS84小田區在質心附近轉成局部公尺平面，依使用者航向旋轉、向內縮田界緩衝，再以固定間距切割平行掃描線，交替串成往復路線。局部等距近似只適用於本研究尺度；較大範圍或跨UTM區域必須改用正式投影與誤差檢查。

以下程式可在研究目錄執行，會讀取合成AOI並建立規劃摘要；它不會控制無人機：

程式碼 | python

```
from pathlib import Path

from m3m_scout.mission import (
    MissionParameters,
    load_field_polygon,
    plan_lawnmower_route,
    write_planning_bundle,
)

root = Path(".")
field = load_field_polygon(root / "config" / "engineering-aoi.geojson")
params = MissionParameters(
    altitude_agl_m=30.0,
    flight_speed_m_s=2.0,
    line_spacing_m=7.2,
    edge_buffer_m=5.0,
    front_overlap_pct=85,
    side_overlap_pct=80,
    rth_height_m=45.0,
)
route = plan_lawnmower_route(field, params)
assert route["planningOnly"] is True
assert route["executionAuthorized"] is False
write_planning_bundle(route, root / "outputs" / "paper-route-demo")
print(len(route["waypoints"]), route["routeDistanceM"])
```

預設30公尺、2 m/s、7.2公尺線距、85%前向重疊、80%旁向重疊與5公尺內縮只是工程fixture參數，不是LC-01核准參數，也不是對所有稻田的飛行建議。依DJI規格頁與影像處理指南公開的多光譜影像尺寸、像元與鏡頭名目幾何，[D01,D03] 程式在30公尺推導名目GSD約1.382公分／像元、80%旁向重疊的線距約7.167公尺、85%前向重疊的曝光間距約4.031公尺；若最短拍攝間隔為2秒，對應名目速度上限約2.016 m/s。這些是幾何算式，不含模糊、風、滾快門以外的機體動態、曝光或重建品質，仍須由Pilot 2重新計算並由操作人現場驗證。返航高度也須依障礙現勘設定。

4.2 fail-closed閘門

飛前閘門要求土地同意參考、操作人資格參考、機體註冊參考、24小時內空域查核時間、日間與目視範圍、道路與人群排除、天候、Pilot 2任務預覽等欄位。任何欄位缺漏或空域查核逾時即輸出NO_GO。即使所有欄位通過，輸出也只有ELIGIBLE_FOR_OPERATOR_FINAL_REVIEW，不是法規核准或起飛命令。

民航局公開資料說明250公克以上自然人機體的註冊要求、法人作業的額外責任，以及日間、目視範圍、400呎以下、人群與距離等一般限制；每次仍須查看無人機管理資訊系統與正式公告。[T01-T06] 本文不作LC-01個案法律判定。

5. 光譜計算、品質閘門與異常分區

5.1 指標不是診斷

在反射率尺度，三個指標定義為：

- $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$
- $NDRE = (NIR - RE) / (NIR + RE)$
- $GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G)$

實作使用帶有where條件的除法，在分母接近零時輸出NaN，不偷偷填成零。以下最小範例可以直接執行：

程式碼 | python

```
import numpy as np

from m3m_scout.spectral import compute_indices

green = np.array([[0.18, 0.20], [0.17, 0.19]], dtype=np.float32)
red = np.array([[0.11, 0.16], [0.10, 0.14]], dtype=np.float32)
red_edge = np.array([[0.34, 0.31], [0.36, 0.32]], dtype=np.float32)
nir = np.array([[0.72, 0.55], [0.75, 0.59]], dtype=np.float32)

indices = compute_indices(green, red, red_edge, nir)
for name, values in indices.items():
    print(name, np.round(values, 4))
```

NDVI、NDRE與GNDVI對冠層、生育期、葉面積、背景、水分、營養、病蟲害、光照、觀測幾何、飛行高度及校正均可能敏感。[A01-A06,A10-A11] 因此低值只能表示「相對值得查核」，不能單獨說明缺氮、白葉枯病、積水或其他原因。臺灣既有褐飛蟲與倒伏研究支持遙測作為初步警示與判釋輔助，但不等同本原型在一般鹿草稻田可自動確診。[T09-T10]

5.2 品質閘門

程式要求波段集合恰為green/red/red_edge/nir、四張陣列形狀完全一致且為二維、有限值比例至少0.995、反射率超出0至1的比例不超過0.001、接近飽和值的比例不超過0.01，並要求譜系、波段對應、反射率處理層級、校正方法、CRS、grid transform與共註冊metadata。通用CLI必須由使用者逐一指定--green、--red、--red-edge、--nir、--metadata及輸出目錄；缺任何必要receipt或宣稱raw DN都會fail closed。這些是研究者的工程門檻，不是DJI官方規格。

5.3 相對異常分數

每個指標在有效田區內以中位數與 $1.4826 \times \text{MAD}$ 估計robust尺度，計算低於田內中心的正向偏離，裁切到0至6後，將三個指標平均並除以6，使分數落在0至1附近。這是一個可解釋的相對排序器：同一田、同一航次內分數較高的像元優先現勘；不同日期的絕對分數不應直接比較。

接著用四鄰域連通區找出分數至少0.38且面積至少2平方公尺的區域，依平均分數與面積排序。以下程式建立合成fixture、先過品質閘門，再輸出優先區；若品質不合格便立即停止：

程式碼 | python (1/2)

```
import json
from pathlib import Path

from m3m_scout.demo import generate_synthetic_capture
from m3m_scout.io import load_reflectance_tiff
from m3m_scout.spectral import (
    anomaly_score,
    compute_indices,
    find_priority_zones,
    quality_check,
)

capture = Path("outputs/paper-synthetic-capture")
generate_synthetic_capture(capture)
metadata = json.loads((capture / "capture-metadata.json").read_text())
bands = {
    name: load_reflectance_tiff(
        capture / f"demo_{name}.tif", metadata["scaleFactor"]
    )
    for name in ("green", "red", "red_edge", "nir")
}
qc = quality_check(bands, metadata)
if not qc["passed"]:
    raise RuntimeError(qc["failures"])

indices = compute_indices(
    bands["green"], bands["red"], bands["red_edge"], bands["nir"]
)
score = anomaly_score(indices)
zones = find_priority_zones(
    score,
    pixel_size_m=metadata["pixelSizeM"],
```

程式碼 | python (2/2)

```
threshold=0.38,
minimum_area_m2=2.0,
)
print([(zone.zone_id, zone.area_m2) for zone in zones])
```

0.38與2平方公尺只用於工程測試；正式田間門檻必須在揭露LC-01地面結果前鎖定，並做敏感度分析。若從同一影像看完結果後再調參數，該結果只能標成探索性。

6. 可重現工程測試結果

6.1 測試環境與命令

2026年8月4日於本研究目錄執行：

程式碼 | bash

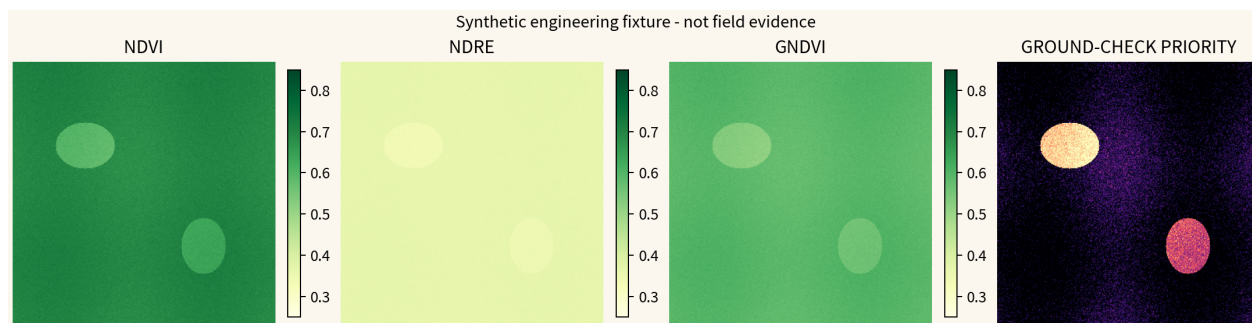
```
python -m pytest -q
python run_demo.py
```

pytest回報22項測試通過。測試涵蓋已知指標值、零分母、形狀錯誤、raw DN與缺少處理receipt時fail closed、反射率TIFF輸入、異常區排序、航點位於安全內縮區、過時空域查核fail closed、規劃bundle不含waylines.wpml、M3M名目幾何、通用CLI、metadata schema、端到端可重現，以及輸出不宣稱田間結果或飛行授權。這是特定版本、特定環境的測試結果；尚未進行獨立程式碼審查、資安滲透測試、真機SITL/HIL或Pilot 2互通驗證。

6.2 合成fixture結果

固定亂數種子20260804建立320×320像元、每像元0.10公尺的四波段反射率fixture，人工植入兩個橢圓低NIR／高紅光區。它不是機載影像，也不模擬所有感測器噪聲、鏡頭、BRDF、日照、拼接或田間異質性。

品質閘門結果：有限值比例1.000、超出反射率範圍比例0、飽和比例0、四波段形狀一致，故允許進入指標計算。指標中位數為NDVI 0.69609、NDRE 0.36287、GNDVI 0.59157。演算法產生P01與P02兩區，面積分別31.62與27.11平方公尺；這只是重建預先植入的兩個訊號，不能稱為病斑、缺氮區或田間準確率。



合成四波段fixture的三個植生指標與相對查核優先分數

6.3 航線fixture結果

合成AOI面積10,240.71平方公尺，5公尺內縮後安全區8,311.25平方公尺。使用30公尺AGL、2 m/s、7.2公尺線距、85%前向與80%旁向重疊的預設參數，產生12條掃描線、24個航點與1,261.68公尺路線；以2 m/s加上每條轉向2秒的簡化公式估計654.8秒，不含起降、定位、實際拍照節奏、風、電量、操作等待或異常處置。因土地、資格、註冊、空域時間、現場隔離、天候與Pilot 2預覽都未具備，示範飛前閘門正確輸出NO_GO。因此這不是LC-01任務時間，也不能用作投標產能。

6.4 可稽核性

outputs/engineering-demo-manifest.json列出所有示範檔案的相對路徑、位元組數與SHA-256。JSON分別明示dataProvenance=synthetic、fieldFlightExecuted=false、planningOnly=true、executionAuthorized=false及containsFieldResult=false。結果可由固定種子重跑；若程式、依賴或輸出改變，雜湊亦會改變。

7. LC-01前瞻性田間驗證

7.1 設計目的

單田pilot不是建立全臺模型，而是測試四件事：任務是否可安全重複、影像品質是否穩定、相對指標是否在同日重飛下可重現、優先區是否比隨機巡查更有效地找到盲態地面可見異常。只有通過後，才值得擴至跨田、跨季與病因標註。

7.2 研究單位與時間

在取得同意後，LC-01內事前以空間平衡方式抽取24個固定2×2公尺樣區；以樣區而非像素為主要空間單位。於分蘗、幼穗分化／孕穗與抽穗各執行一個主要任務，並在30分鐘內以同航線與設定重飛一次，共6個候選田區航次。三期×24區形成72個樣區日期重複觀測，不是72個獨立田區；所有像素不得當作獨立樣本。

7.3 航拍與地面資料

每次航拍保留原始RGB、G、R、RE、NIR照片、XMP/EXIF、飛行記錄、校正板、軟體與韌體版本、天候、日照、RTK狀態、操作員、異常與中止紀錄。地面小組在查看任何指標圖前完成：

1. 每樣區5株、每株3次SPAD，取15值中位數；SPAD只稱葉綠素代理。
2. 固定規則株高與冠層覆蓋。
3. 三點土壤含水、近地RGB照片與可見現象codebook。
4. 倒伏、缺株、積水、葉色不均、咬痕、斑點等描述性標記；未知即標未知。
5. 品種、生育期、移植日期、灌溉、施肥、植保及重大管理事件的最少必要紀錄。

疾病名稱只能由具資格專家、可查診斷準則或實驗室檢測建立；本原型不以光譜圖自行命名病害。農業遙測模型常受生育期、場域、年度、品種、感測器與抽樣方法影響，故單田結果即使通過也只能稱技術pilot。[A01-A07,A12]

7.4 主要分析與預先門檻

主要可重複性指標為同日兩次航拍的樣區NDRE中位數ICC及95%信賴區間。主要查核效用為：依第一次航拍分數排序的前20%樣區中，盲態地面表單記錄任一事前定義可見異常的比例；與同日全部24區異常率形成隨機基準，報告絕對提升。不得用第二次重飛挑較好影像取代第一次主要分析。

必要門檻：

- 三期任務與地面表單的預定欄位完整率至少95%。
- 所有不合格波段或缺譜系輸入100%被品質閘門阻擋。
- NDRE同日重飛ICC的95%信賴區間下限至少0.75。
- 前20%優先區的地面可見異常率較全田基準至少提高0.15。
- 所有人工排除、修正、重飛與參數變更有時間、人員、原因與前後版本。
- 至少兩位人員對20%近地照片盲態複編，Cohen's kappa至少0.70；未達則修訂codebook，不宜稱標註可靠。

24區對效度估計仍很小。未達門檻不代表Mavic 3M或農田「失敗」，只代表本設定與樣本不足以支持下一階段主張。若陽性／陰性獨立樣區不足，不計算AUC或敏感度。任何模型訓練必須等擴充至至少4個獨立田區後採留一田外驗證；禁止相鄰像素隨機分割。[A05-A08]

8. 安全、法規與操作責任

8.1 受監督自動化

本文的「自動航線」只指軟體協助產生規劃與Pilot 2內的任務執行，且全程有具責任操作人維持目視、環境監控與接管能力。它不等於無人值守、視距外、自主判斷法規、雲端自動派飛或AI自行起降。

8.2 每航次重新查核

自然人250公克以上機體註冊、法人活動、操作證、能力審查與活動申請的適用方式取決於機體所有人、組織與操作型態。
[T01-T03] 一般操作仍涉及400呎、日間、目視、人群及距離等限制。[T04] 動態空域圖只供查詢，正式公告與當日狀態優先；需保留查核時間與畫面／公告參考，但不公開可能暴露精確田區的截圖。[T05]

本研究只做影像巡檢，不投擲或施藥。農噴涉及額外資格、藥劑與紀錄責任，不能把巡檢原型直接串成自動噴灑。[T06-T07] 若未來另立施藥研究，應由新協定重新審查。

8.3 停止條件

未取得土地與耕作者同意、資格或註冊不明、空域資料過期、現場有人車進入、電線／建物／鳥群未控制、降雨、能見度不良、風況超出操作手冊或研究較嚴門檻、GNSS／RTK／連線異常、電池與返航餘裕不足時，一律停止。安全中止是正確輸出，不得為湊足資料而繼續。

9. 資料治理與研究誠信

9.1 分級與最小化

原始研究環境可保存經同意取得的精確田界、原始影像、飛行記錄、校正板與地面表單，但須與公開網站隔離、控制存取、加密備份並保留雜湊。公開版只包含程式、合成fixture、聚合品質數字、模糊場域、匿名樣區ID及不含個人的衍生資料。農戶姓名、電話、電子郵件、地址、地號、精確座標、臉、車牌及非必要住宅影像不得公開。

9.2 版本與可追溯性

每個航次由capture_id串接原始檔雜湊、處理參數、軟體commit、環境、QC、指標、優先區與地面查核。原始檔不可覆寫；修正以新版本儲存。任何手動畫遮罩、刪除區域或改標籤都記錄操作者、時間、理由與前後雜湊。

9.3 不利結果

未飛成、影像拼接失敗、指標不穩、異常區沒有查核提升、多光譜不優於RGB，都是研究結果。版本政策禁止只公開成功航次、事後更換主要指標、把合成數字改稱現地結果，或把品質閘門通過寫成農藝正確。

10. 工程能力展示的判準

本研究具體展示下列能力：

能力	可查證成果	尚待驗證
需求拆解	把航線、資料品質、光譜、異常與現勘分層	真實使用者需求與工作流適配
幾何運算	田界內縮、旋轉掃描線、航點序列、距離估算	不規則田形、正式投影、障礙與地形跟隨
安全設計	fail-closed飛前欄位；不產生未驗證WPML	Pilot 2互通、真機模擬與操作人可用性
光譜計算	NDVI／NDRE／GNDVI及零分母處理	真實反射率校正與跨期一致性
資料品質	波段、形狀、有限值、範圍、飽和與metadata閘門	正射幾何、輻射與模糊品質的完整自動檢測
異常分區	robust相對分數、面積門檻、連通區、CSV	田間查核提升與病因可解釋性
軟體驗證	22項自動測試、固定fixture、SHA-256 manifest	獨立審查、負載、資安、SITL/HIL
研究治理	協定、門檻、資料字典、權利與更正聲明	外部同儕審查與跨團隊重現

工程展示不應被包裝成「產品已商用」。最低可部署服務仍需加入登入與角色權限、任務與資料隔離、金鑰管理、日誌、備份還原、異常通知、隱私刪除流程、真機互通與現場SOP。

11. 限制與威脅

1. 無田間資料。所有數值測試來自合成fixture，無法估計真實稻田效度。
2. 無場地與飛航權。LC-01尚未成為實際田區，鹿草分場未委託、贊助或認可本研究。
3. 影像處理缺口。原型從已完成反射率正射與共註冊TIFF開始，沒有驗證原始M3M照片到正射產品的完整鏈。
4. 公開路線不可執飛。KML/KMZ只有預覽，不含經確認的DJI WPML負載與機型列舉。
5. 演算法是相對排序。中位數／MAD方法可能把大面積、均勻性壓力當成新常態，亦可能被田界、陰影與水面影響。
6. 單田外推有限。即使LC-01通過，也不能推論其他地區、品種、季節、感測器或病害。
7. 法規與軟體會變。民航局空域、DJI韌體、Pilot 2、WPML與第三方處理軟體須在每次實作時重查。
8. 缺乏外部審查。程式與論文尚未經外部工程審查、農藝同儕審查或法律審查。

12. 結論與階段決策

本版本完成了從合成田界到規劃預覽、從四波段反射率到可稽核相對優先區的工程閉環。22項自動測試與固定fixture顯示，原型能在已知輸入下依規則運作，也能在缺乏必要安全或資料欄位時停止。這足以證明「有一個可執行、可測試的工程原型」，不足以證明「Mavic 3M已在鹿草準確辨識作物生長狀態」。

下一個正確步驟不是加入更複雜AI模型，而是先取得LC-01書面同意、完成法規與障礙現勘、用Pilot 2建立經操作人核准的任務、完成三期同日重飛與盲態地面表單，再依事前門檻判定是否有查核價值。若指標重複性或優先區提升未通過，產品應退回「影像與品質報告」或停止；若通過，才進入多田、跨季與外部團隊驗證。

研究揭露、版本與更正資訊

AI使用聲明與作者責任

生成式AI（OpenAI Codex）協助來源線索整理、程式實作、測試、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、主張邊界、公開決策與後續更正。

利益衝突

作者經營米糧與訂閱服務相關事業，未來可能因農業巡檢、軟體開發或供應鏈數位化服務而間接受益。本研究未接受DJI、無人機經銷商、影像軟體商、鹿草分場、政府機關或農業組織委託、贊助或認可。

研究範圍聲明

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。本文不構成企業排名、法令遵循判定、投資、醫療、法律或交易建議。

本版本未採集或分析真實農田影像、植株、土壤、農民或交易資料，未執行無人機飛行。合成資料與規劃數字不代表特定田區、農產品安全、作物健康、服務準確率或經濟效益。

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、文字編排、研究程式及原創圖表。第三方名稱、商標、網址、資料、圖片、文字摘錄及其他內容，仍依原權利人或來源授權條款使用，不因收錄於本研究而改以CC BY 4.0授權。

本研究與DJI、交通部民用航空局、農業部、中央氣象署、臺南區農業改良場及文中機構不存在隸屬、合作、贊助或認可關係。名稱與商標僅用於辨識研究對象或來源。

更正申請聲明

本研究依特定日期可取得的公開資訊及版本化程式製作。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，可提供具體來源申請更正。作者核實後將依版本政策修訂並保留修訂紀錄。

更正申請：handson0102@hotmail.com

版本紀錄

- v1.0 • 2026-08-04 • 初版：工程原型、合成測試、候選場域與前瞻性現地驗證協定。

建議引用

周秉漢（2026）。〈從自動航線到可稽核生長異常圖：DJI Mavic 3M於嘉義鹿草候選稻田的多光譜巡檢工程原型、程式實作與現地驗證方案〉。《上好味研究工作論文系列》，SHWRP-2026-032，版本 1.0。https://doi.org/10.5281/zenodo.21782959

參考資料

DJI與技術文件

- [D01] DJI Enterprise. DJI Mavic 3M Specs. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-m/specs> (擷取2026-08-04)。
- [D02] DJI Enterprise. DJI Mavic 3M. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-m> (擷取2026-08-04)。
- [D03] DJI Enterprise. DJI Mavic 3M Downloads. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-m/downloads> (擷取2026-08-04)。
- [D04] DJI Developer. DJI WPML Overview. <https://developer.dji.com/doc/cloud-api-tutorial/en/api-reference/dji-wpml/overview.html> (擷取2026-08-04)。
- [D05] DJI Developer. DJI WPML Template KML. <https://developer.dji.com/doc/cloud-api-tutorial/en/api-reference/dji-wpml/template-kml.html> (擷取2026-08-04)。
- [D06] DJI Developer. DJI WPML Waylines WPML. <https://developer.dji.com/doc/cloud-api-tutorial/en/api-reference/dji-wpml/waylines-wpml.html> (擷取2026-08-04)。

臺灣官方與在地研究

- [T01] 交通部民用航空局。〈遙控無人機註冊業務〉。 <https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3820&lang=1> (擷取2026-08-04)。
- [T02] 交通部民用航空局。〈政府機關、學校及法人常見問題〉。 <https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3006&lang=1> (擷取2026-08-04)。
- [T03] 交通部民用航空局。〈一般民眾常見問題〉。 <https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3005&lang=1> (擷取2026-08-04)。
- [T04] 交通部民用航空局。〈民用航空法第99條之14操作規範說明〉。 <https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=2430&lang=1> (擷取2026-08-04)。
- [T05] 交通部民用航空局。〈遙控無人機管理資訊系統〉。 <https://drone.caa.gov.tw/> (擷取2026-08-04)。
- [T06] 交通部民用航空局。〈農用遙控無人機農噴常見問題〉。 <https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=3390&lang=1> (擷取2026-08-04)。
- [T07] 農業部。〈農藥使用及農產品農藥殘留抽驗辦法〉。 <https://law.moa.gov.tw/LawContent.aspx?id=FL014395> (擷取2026-08-04)。
- [T08] 農業部臺南區農業改良場。〈鹿草分場〉。 <https://www.tndais.gov.tw/ws.php?id=267> (擷取2026-08-04)。
- [T09] 農業部農業試驗所。〈多光譜影像技術用於早期檢測水稻蟲害之研究〉。 <https://www.tari.gov.tw/publication2/index-2.asp?Parser=99%2C9%2C52%2C%2C%2C%2C3745%2C%2C%2C%2C111> (擷取2026-08-04)。
- [T10] 無人飛行載具航拍影像應用於水稻倒伏災損判釋。《台灣農業研究》。 [https://doi.org/10.6156/JTAR.202003_69\(1\).0003](https://doi.org/10.6156/JTAR.202003_69(1).0003)
- [T11] 交通部中央氣象署。〈農業氣象站站況資訊〉，含T2M700南改鹿草分場。 <https://agr.cwa.gov.tw/pages/history/agrStationInfo.pdf> (擷取2026-08-04)。
- [T12] 交通部中央氣象署。〈氣象資料開放平台：現存測站資料〉。 <https://opendata.cwa.gov.tw/dataset/all/C-B0074-002> (擷取2026-08-04)。

同儕審查文獻

- [A01] Luo et al. Rice multispectral calibration and flight altitude. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.958106>
- [A02] Zheng et al. Rice plant nitrogen concentration from UAV imagery. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00936>
- [A03] Colorado et al. UAV and SPAD open rice protocol. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs12203396>
- [A04] Fonseka et al. Rice multispectral dataset with SPAD ground truth. *Data in Brief*. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110479>
- [A05] Wan et al. Rice yield model transfer across fields. *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108096>
- [A06] Zheng et al. Rice model transfer across years, cultivars, and sensors. *Drones*. <https://doi.org/10.3390/drones6120423>
- [A07] Roberts et al. Spatial cross-validation for structured ecological data. *Ecography*. <https://doi.org/10.1111/ecog.02881>
- [A08] Olofsson et al. Map accuracy and area estimation good practices. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- [A09] Hunt and Daughtry. What good are UAS for agricultural remote sensing? *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>
- [A10] Huo et al. Rice yield prediction across regions with Mavic 3M. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1866530>
- [A11] Field-scale rice bacterial leaf blight detection with Mavic 3M. *Remote Sensing*, 18(6), 880. <https://doi.org/10.3390/rs18060880>
- [A12] Ground truth sampling affects UAV yield accuracy. *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11119-026-10391-0>