

從空中巡田到眼前決策：無人飛行載具、智慧眼鏡與植物病害 AI 如何形成可驗證的農業經濟服務？——以臺灣稻作、茶園與果園為應用情境

From Aerial Scouting to In-Field Decisions: Building a Verifiable Agricultural-Economic Service with Uncrewed Aircraft, Smart Glasses, and Plant-Disease AI in Taiwan's Rice, Tea, and Orchard Systems

周秉漢 / CHOU, BING-HAN

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

公開日期：2026-07-23 | 未經外部同儕審查

DOI : 10.5281/zenodo.21510234

CC BY 4.0 (僅適用於作者有權授權內容)

研究結論摘要

可行產品不是「AI自動確診」，而是空中找異常、現地標準化複核、AI分流、專業確認與經濟決策紀錄的可停止服務。本文所有金額、機率與風險分數均為研究者情境假設，不代表市場平均、正式報價、診斷結果或保證投報。

研究定位：公開、可重現、可更正的技術—經濟情境分析工作論文。沒有採集田間影像、植株、病原、農民或交易資料；結果不作疾病確診、農藥處方、飛航合規、投資或交易判定。

摘要

農業影像人工智慧的創業敘事常從「辨識病害」開始，卻忽略農民真正購買的不是分類準確率，而是較早發現、較少無效巡查、較低錯誤處置與可追責的決策。本研究整合臺灣遙控無人機與農藥代噴制度、官方農業勞動統計、植物病害影像與跨域調適文獻，提出一個由空中異常偵測、眼前標準化複核、AI風險分流、專業確認與農業經濟決策組成的服務架構。研究不是田間試驗，沒有採集農田影像、植株、病原、農民資料或實際交易資料，也不宣稱任何病害已能在臺灣三類作物中達到可商用準確率。

本文建立稻作、茶園與果園三組透明技術—經濟情境。每組的巡檢次數、服務費、變動成本、作物價值、事件機率、條件損失、可偵測且可處置比例、處置效果與省工價值均由研究者設定，只用於檢驗商業結構。在基準假設下，稻作每公頃年情境價值1,580元，低於3,900元服務費；茶園為13,750元，高於8,800元；果園為13,796元，高於8,000元。這些差異不代表作物真實投報，也不構成正式報價，而是指出低單位價值、面積分散的稻作較需要農會、合作社、契作或代耕組織聚合；較高價值作物則較有機會用避免損失與省工支持單位服務費。

服務提供者模型假設年固定營運成本420萬元，三類作物面積占比40%、25%與35%，加權每公頃年貢獻2,660元。若沒有組織平台費，損益兩平約需1,579公頃；若有六個錨定組織、每個年費36萬元，所需面積降至767公頃。模型顯示「賣硬體給單一農戶」不是唯一也未必是最好的起點；較可行的是B2B2F服務，先向農會、合作社、契作集團、產銷班或專業農業服務業者提供跨農戶排程、驗證與治理功能。

研究提出四個進入付費擴張的必要證據：跨季節與場域的分層驗證、未知類別與轉介能力、相較既有巡查的增量決策價值，以及可被農戶與專業人員接受的責任流程。無人機在第一階段只負責異常區定位；智慧眼鏡是免手持工作介面而非診斷權威；AI輸出必須保留信心值、模型版本與人工複核；任何農藥施作皆須與影像巡檢分離，交由符合臺灣規範的業者與人員。結論不是「三項技術越多越好」，而是只有在每一層都能被驗證、拒答、追溯與停止時，技術組合才可能形成可信的農業經濟服務。

關鍵詞：農業無人機、智慧眼鏡、植物病害AI、農業經濟、稻作、茶園、果園、技術經濟分析、可驗證服務、創業模式

Abstract

Agricultural imaging ventures often begin with disease classification, but farmers do not purchase accuracy in isolation. They purchase earlier detection, less unproductive scouting, fewer harmful actions, and accountable decisions. This study integrates Taiwan's rules for uncrewed-aircraft operations and pesticide application, official agricultural-labor statistics, and research on plant-disease imaging and domain adaptation. It proposes a service architecture linking aerial anomaly scouting, standardized close-range inspection, AI triage, expert verification, and economic decision records. No field images, plants, pathogens, farmer records, or transactions were collected. The study does not claim that any disease model is commercially validated for Taiwan's rice, tea, or orchard systems.

Three transparent techno-economic scenarios are constructed. All scan frequencies, prices, costs, crop values, event probabilities, loss shares, actionable-detection shares, mitigation effects, and labor savings are researcher-defined assumptions. Under the baseline assumptions, annual value per hectare is TWD 1,580 for rice, TWD 13,750 for tea, and TWD 13,796 for orchards, compared with annual service fees of TWD 3,900, TWD 8,800, and TWD 8,000. These are neither market estimates nor quotations. They show that low-margin rice scouting may require aggregation through cooperatives, farmers' associations, contract-farming groups, or service organizations, while higher-value crops may be more capable of supporting per-hectare fees.

A provider scenario assumes TWD 4.2 million in annual fixed cost and a crop-area mix of 40% rice, 25% tea, and 35% orchard. Weighted annual contribution is TWD 2,660 per hectare, implying a break-even portfolio of about 1,579 hectares without organization-level fees and 767 hectares with six anchor organizations paying TWD 360,000 per year each. The preferred initial model is therefore B2B2F rather than direct hardware sales to individual farms. Paid scale should require cross-domain validation, calibrated abstention and referral, demonstrated incremental decision value, and an accepted accountability workflow. UAVs identify anomalies, smart glasses support hands-free inspection, AI triages rather than diagnoses, and regulated pesticide operations remain outside the initial imaging

1. 研究問題、範圍與主張邊界

1.1 問題不是能不能辨識，而是誰因此做出更好的決定

田間病害AI若只提供病名，尚未完成經濟服務。農民必須判斷哪一區先看、是否需要採樣、要不要請專家、何時處置、處置後是否有效，以及錯誤判斷由誰負責。空中影像適合大面積找異常，近距離影像適合看葉片與病徵，智慧眼鏡適合在雙手忙碌時呈現步驟，植保專業人員負責把影像、環境與田間脈絡連成可行處置。四者不能互相取代。

本研究因此把可驗證服務定義為：每筆警示都能追溯到資料來源、模型版本與信心；系統可以輸出「未知／證據不足」；高風險決定要有人工作出或確認；處置後結果能回流；技術失效、法規文件不全或績效低於門檻時能停止。經濟價值不是以「辨識一次」計算，而是以避免損失、減少巡查、縮短回應與降低不必要處置的增量價值衡量。

1.2 四個研究問題

- 1 無人飛行載具、智慧眼鏡與植物病害AI各自應承擔哪一段任務，才不會形成不透明的自動決策？
- 2 稻作、茶園與果園在作物價值、地形、冠層、面積與服務密度不同時，單位經濟可能如何改變？
- 3 服務提供者應採個別農戶硬體銷售、按面積巡檢，或由組織聚合的B2B2F模式？
- 4 在尚無臺灣田間結果之前，哪些證據門檻、停止條件與責任界線必須先建立？

1.3 研究限制

本研究是規範性技術—經濟情境分析，不是田間試驗、疾病盛行率調查、醫療或農藥處方研究。情境金額不是市場平均、政府建議、正式報價或財務預測；風險分數不是事故機率；文獻中的準確率不直接移植到臺灣作物。本文不證明作者所經營商品或服務具有特定成效，也不構成農藥、飛航、投資、法律或交易建議。

2. 臺灣需求與制度背景

2.1 勞動退出使巡查效率成為經濟問題

行政院主計總處109年農林漁牧業普查初步分析顯示，2020年底農林漁牧業經營管理者平均年齡64.1歲，65歲以上占48.8%；其中農牧業平均64.4歲。農業部統計則顯示2023年農林漁牧業就業人口約50.9萬人，較2019年下降8.9%。這些數字不能證明無人機或智慧眼鏡一定被採用，但說明「把有限人的注意力用在最需要確認的位置」具有制度與經濟意義。

AI服務不應把高齡化簡化為「農民不會用科技」。真正障礙可能是訊號不穩、介面步驟過多、設備重量、配戴不適、警示太多、責任不明或沒有可用處置。智慧眼鏡只有在能比手機或紙本更快完成同一任務時才有價值；否則它只是增加一層硬體維護。

2.2 飛航與農藥施作必須分層

民用航空局公開問答指出，法人從事遙控無人機活動須經能力審查並建立操作手冊；從事農業噴灑涉及專業操作證及特定資格，夜間或其他受管制活動另有申請要求。農業部相關辦法亦要求無人機農藥施作由符合規定的農藥代噴技術人員與業者執行，並涉及作業高度、通報與紀錄。

因此初創服務的最低風險路徑是先做影像巡檢與決策支援，不把「看見疑似病害」直接接成自動施藥。若未來整合施作，應由合法業者、合格人員與獨立契約承作，並保留藥劑、作物、面積、氣象、航跡、批次及責任紀錄。本文不判定任何特定飛行或施作是否合規。

3. 技術證據：三種視角各自看見什麼

3.1 空中影像適合異常定位，不等於病原確診

RGB無人機成本與操作門檻通常低於多光譜或高光譜系統，適合建立覆蓋面與時序變化；但葉片尺度病徵、冠層遮蔽、光線、土壤背景與水分壓力可能使不同原因呈現相似訊號。高光譜研究顯示，部分作物病害在症狀前可能出現光譜變化，但重要波段與特徵會隨病害、品種、生育期、設備及場域改變。文獻證明的是技術可能性，不是通用診斷能力。

稻作面積連續、冠層較整齊，適合用空中影像找水分、倒伏、長勢或病斑異常區；茶園條帶、坡地與陰影增加航線及影像一致性難度；果園樹冠立體、葉片遮蔽且單株價值較高，可能需要斜視、地面或近距離補拍。三類作物不能共享同一個無條件閾值。

3.2 智慧眼鏡的核心是工作流程，不是把答案放到眼前

智慧眼鏡可以顯示巡查路徑、指定拍攝角度、葉片位置、樣本編號、注意事項與遠端專家畫面，並用語音或按鍵減少手持操作。它也可能受限於續航、亮度、視野、重量、粉塵、雨水、網路與暈眩。創業驗證應先用手機完成任務，再測試眼鏡是否降低每案時間、錯拍率或遺漏；若沒有增量效果，眼鏡不應成為必要成本。

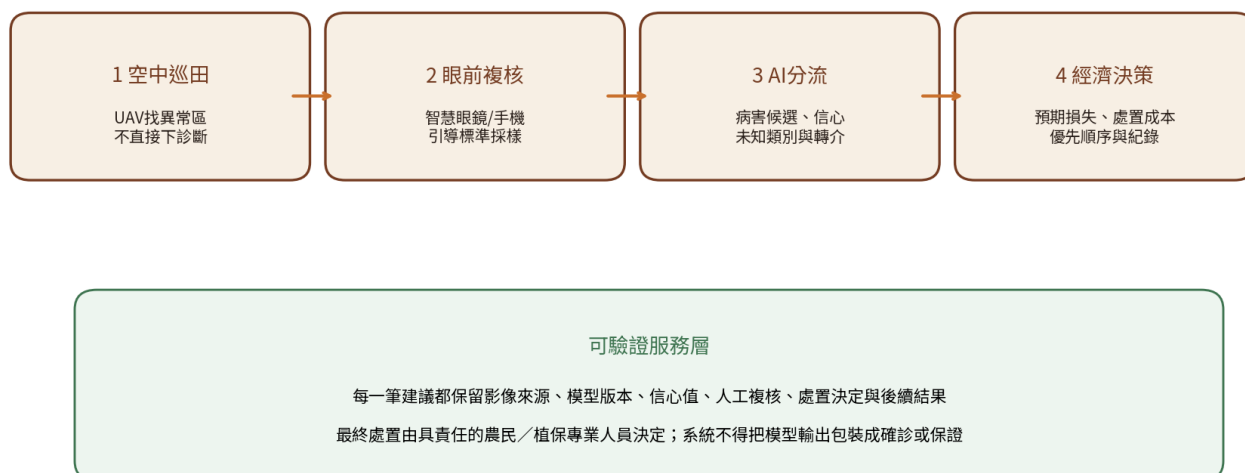
3.3 AI必須具備拒答與跨域驗證

實驗室影像通常背景單純、標籤清楚，田間影像則有光照、遮蔽、生育期、品種、手機與飛行高度差異。跨域調適研究持續顯示，模型離開訓練分布後可能明顯退化。只報整體準確率會掩蓋少數病害漏報、未知病害誤判及不同場域差異。

可商用的最低報表至少要分作物、品種、期作、場域、裝置與病害類別呈現靈敏度、陽性預測值、校準、未知轉介率與人工作業量；重大病害的漏報成本若高，決策閾值也不能只追求最高平均準確率。

4. 可驗證服務架構

圖1 從異常偵測到可追溯決策的服務架構



從異常偵測到可追溯決策的服務架構

4.1 四層流程

- 1 無人機依事前航線取得影像，輸出的是異常熱區與優先巡查點，不是病名。
- 2 農民或服務人員以手機或智慧眼鏡到點，依固定距離、角度、葉位與環境欄位補拍。
- 3 AI提供候選類別、信心區間、未知判定與轉介建議；低信心、高損失或新場域必須人工複核。
- 4 經濟引擎把可能損失、處置成本、等待成本與驗證成本放在同一張決策紀錄，讓使用者決定是否採樣、諮詢或處置。

4.2 最小事件紀錄

每次服務至少保留匿名場域代碼、時間、作物與生育期、影像來源、裝置、模型版本、輸出與信心、未知原因、人工複核者角色、最終處置、後續觀察及更正紀錄。精確座標只在任務需要且獲授權時保存；公開資料包不得包含農戶身分、地籍、地址、可反查航跡或原始影像。

5. 方法、公式與透明假設

5.1 顧客年價值

每公頃期望避免損失定義為：作物風險價值乘事件機率、事件發生時損失比例、服務可偵測且可處置比例與處置效果。顧客年價值再加上省工價值；顧客淨價值為年價值減年服務費。這不是預測模型，而是把「為什麼值得付費」拆成可被田間資料替換的五個項目。

5.2 服務提供者貢獻

每公頃每次巡檢的變動成本由飛行、專業複核與雲端報告組成；每公頃年貢獻等於單次服務費減變動成本，再乘年巡檢次數。此處的貢獻不是淨利，尚未扣除固定人事、保險、設備折舊、軟體開發、法務、行銷、稅務、資本與機會成本。

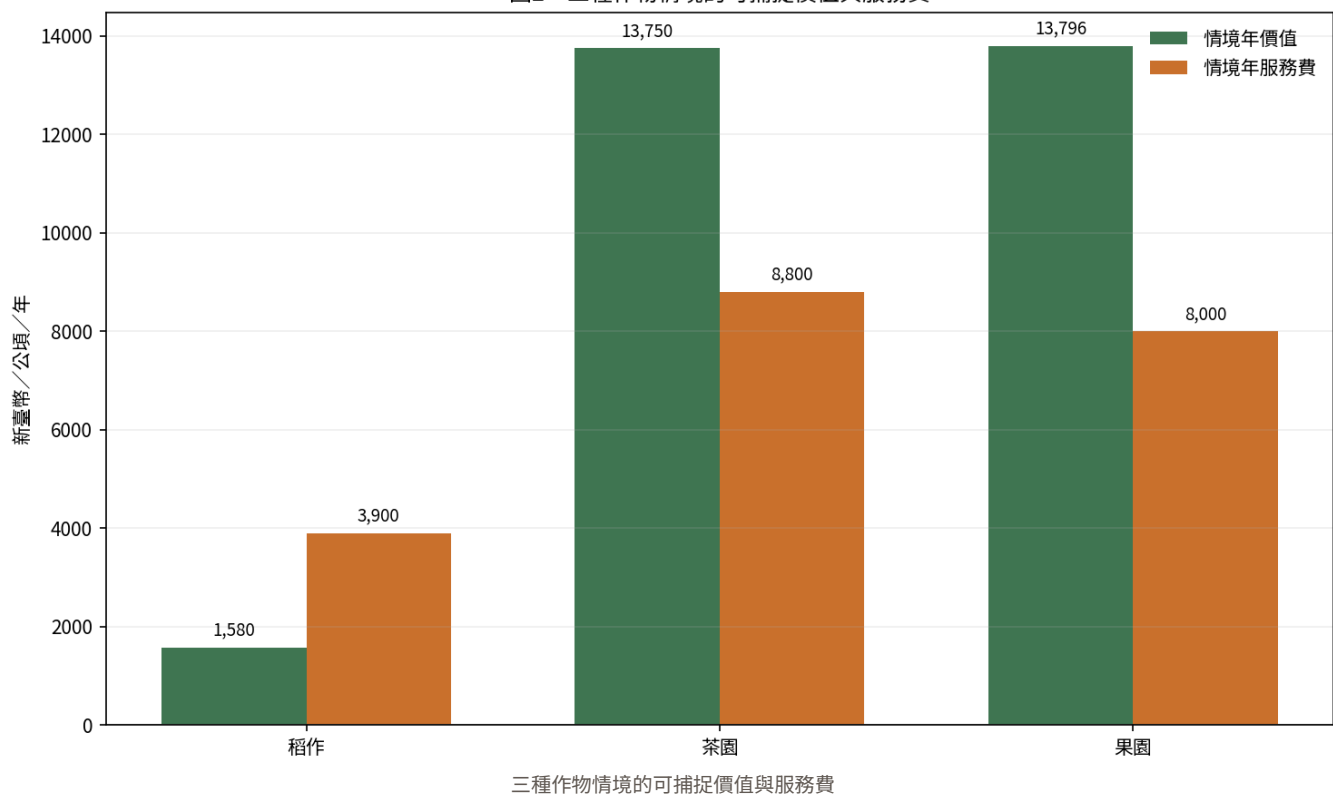
5.3 基準情境

作物	年巡檢	單次服務費	年服務費	情境年價值	顧客淨價值
稻作	6次	650元/公頃	3,900元	1,580元	-2,320元
茶園	8次	1,100元/公頃	8,800元	13,750元	4,950元
果園	8次	1,000元/公頃	8,000元	13,796元	5,796元

所有數字均為研究者設定。負值不表示稻作不適用，只表示在這組價格、頻率與可捕捉價值下不成立；可透過降低巡檢頻率、擴大連片排程、組織固定費、與其他巡田任務共用飛行，或證明更高省工與避免損失來改變。

6. 三類作物的顧客價值結果

圖2 三種作物情境的可捕捉價值與服務費



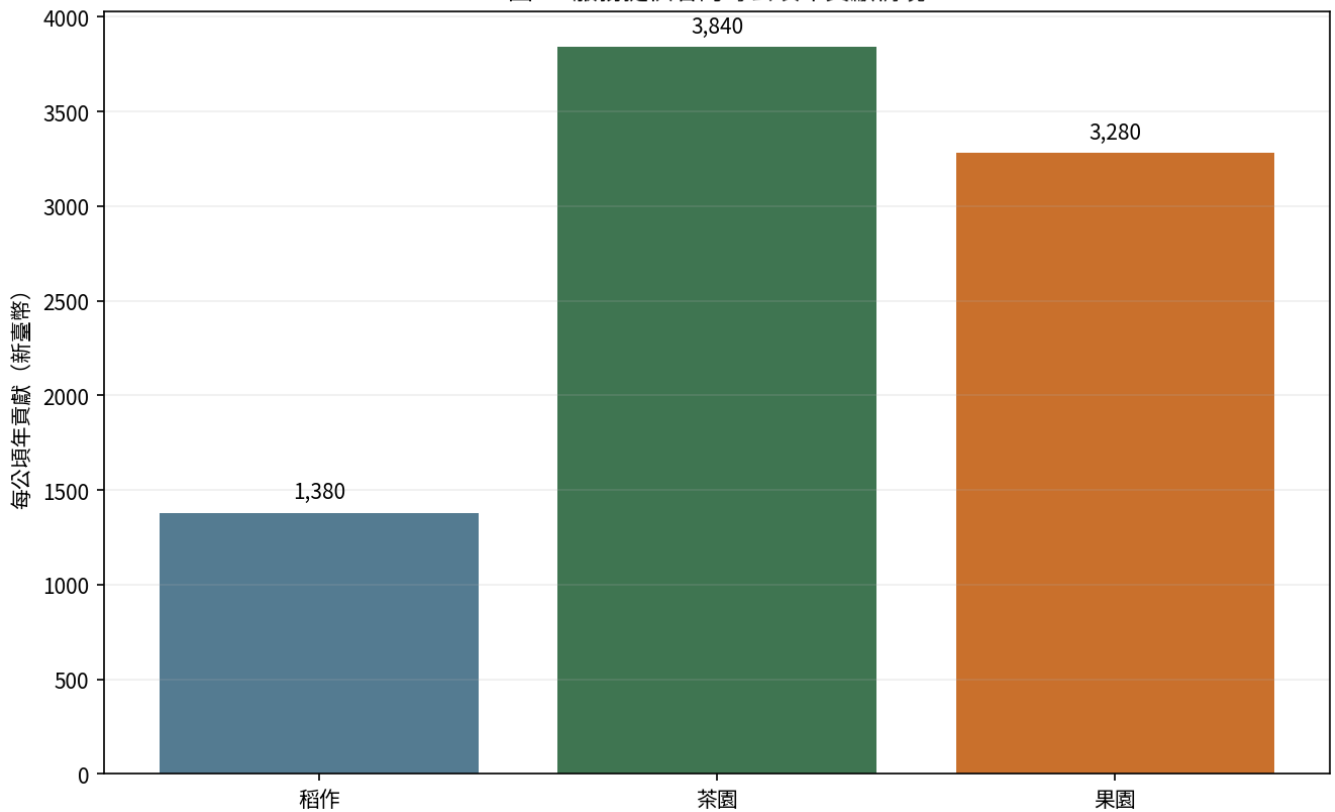
稻作情境的價值費用比約0.41，表示若只賣病害巡檢，服務費高於情境價值。稻作較可行的商品不是單田、單病害、單次辨識，而是把巡田、長勢、灌溉、倒伏、缺株與病蟲異常共用同一航次，再由組織聚合面積。試驗的付款人也可能是契作或服務組織，而不是每一位農民。

茶園情境的價值費用比約1.56。坡地、條帶與葉面病徵增加技術難度，但較高單位產值與品質風險可能支持更密集的近距離複核。服務必須把日照、坡向、品種與採摘週期納入驗證，否則模型可能把生理、管理或陰影差異誤判成病害。

果園情境的價值費用比約1.72。單株資產與多年生作物特性使早期發現的潛在價值提高，但立體樹冠與遮蔽也使空拍較難直接看到內層病徵。適合的流程是空中找樹冠異常，地面以眼鏡或手機完成單株複核與標記，而非只用俯視影像分類。

7. 服務提供者單位經濟與商業模式

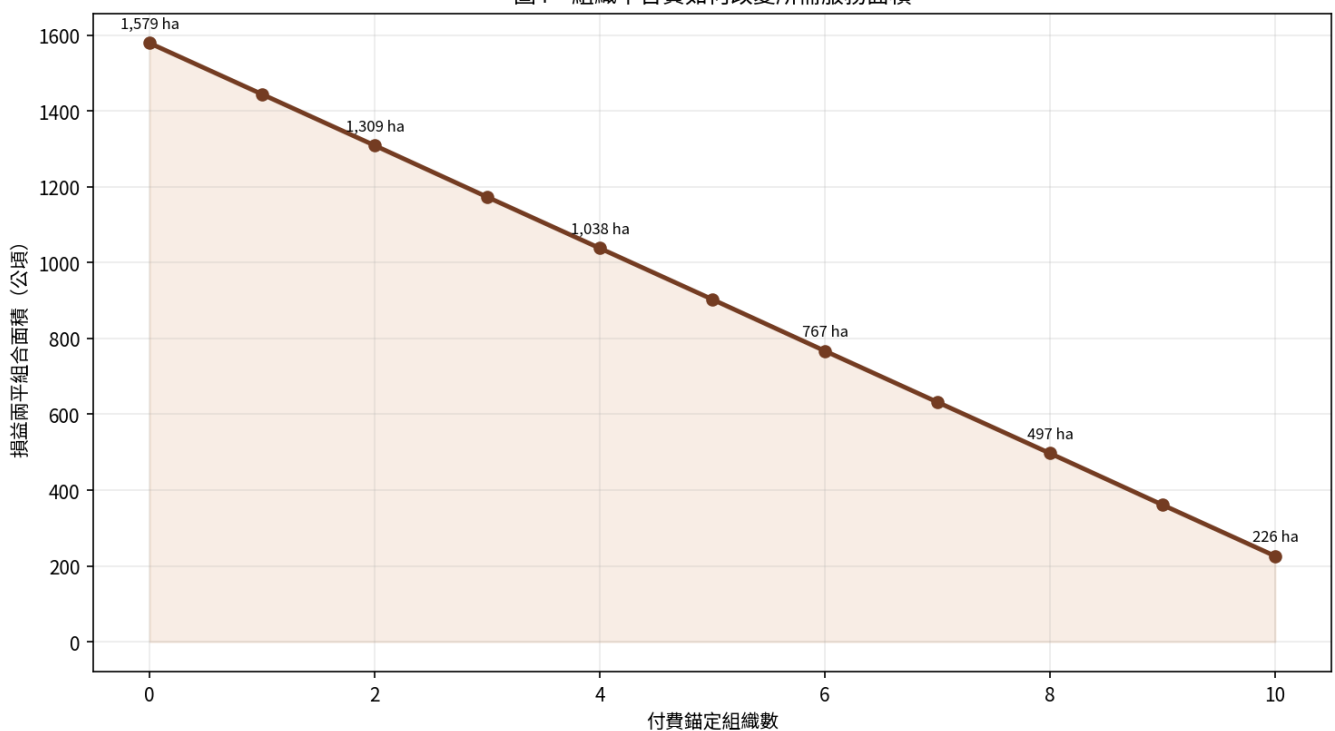
圖3 服務提供者的每公頃年貢獻情境



服務提供者的每公頃年貢獻情境

基準情境中，稻作、茶園與果園的每公頃年貢獻分別為1,380、3,840與3,280元。以40%、25%及35%的面積組合加權後為2,660元。若年固定營運成本420萬元，沒有組織平台費時需約1,579公頃才能覆蓋固定成本。

圖4 組織平台費如何改變所需服務面積



組織平台費如何改變所需服務面積

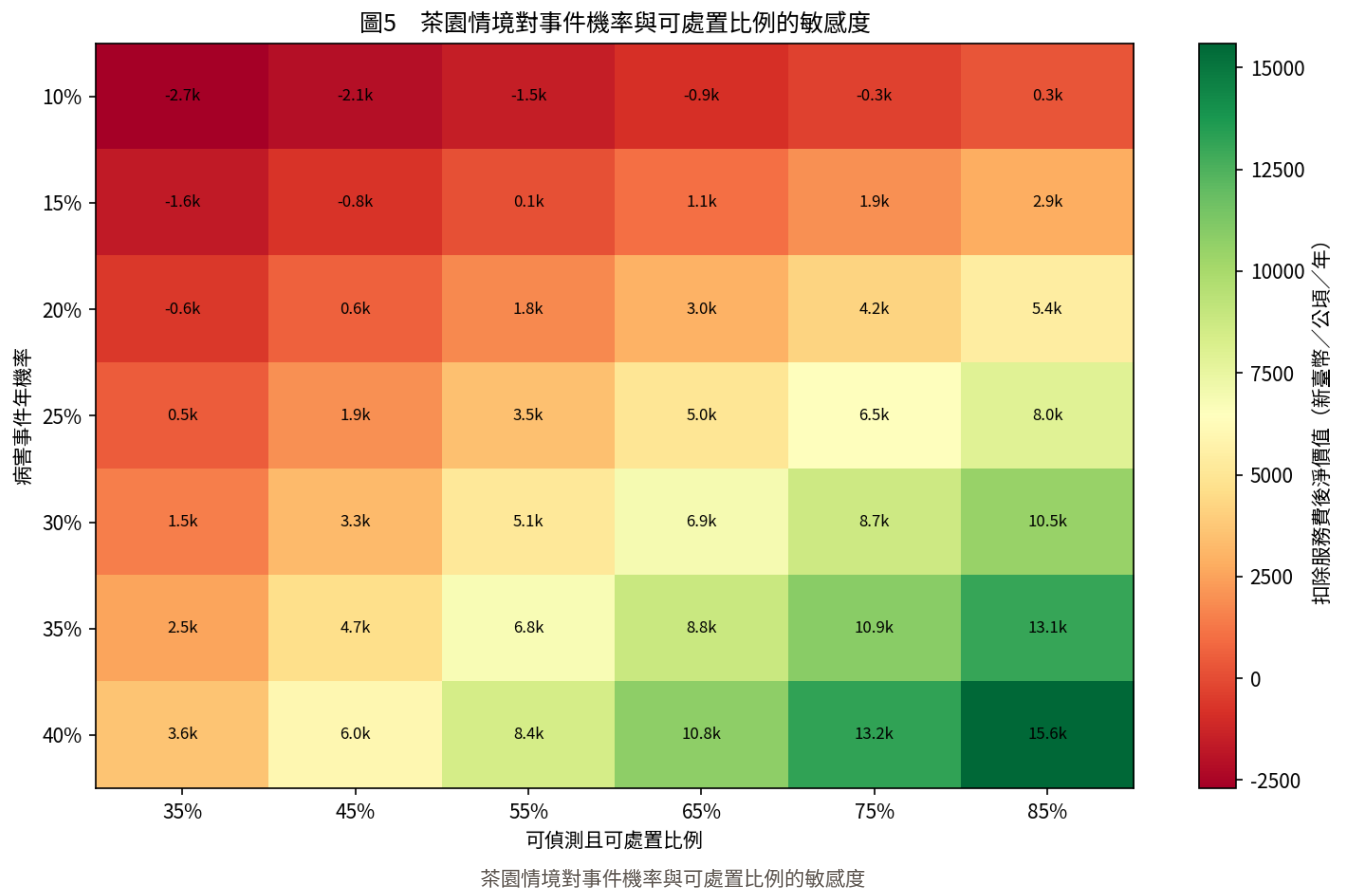
若錨定組織為帳號治理、跨農戶排程、資料保留、專家工作台與年度報表支付每年36萬元，六個組織可提供216萬元固定收入，剩餘固定成本由約767公頃服務面積覆蓋。這個結果支持B2B2F起點：服務商面向農會、合作社、產銷班、代耕或契作組織建立排程與品質系統，再服務多個農戶。它不代表36萬元是市場可接受價格，實際意願必須用採購與付費試驗驗證。

7.1 三種收入層

- 1 組織平台費：帳號、權限、排程、資料治理、專家工作台與報表。
- 2 按面積或任務費：飛行、影像處理、現地複核與異常報告。
- 3 驗證與專業服務費：模型跨域驗證、植保複核與專案調查；不得與農藥銷售綁成不透明誘因。

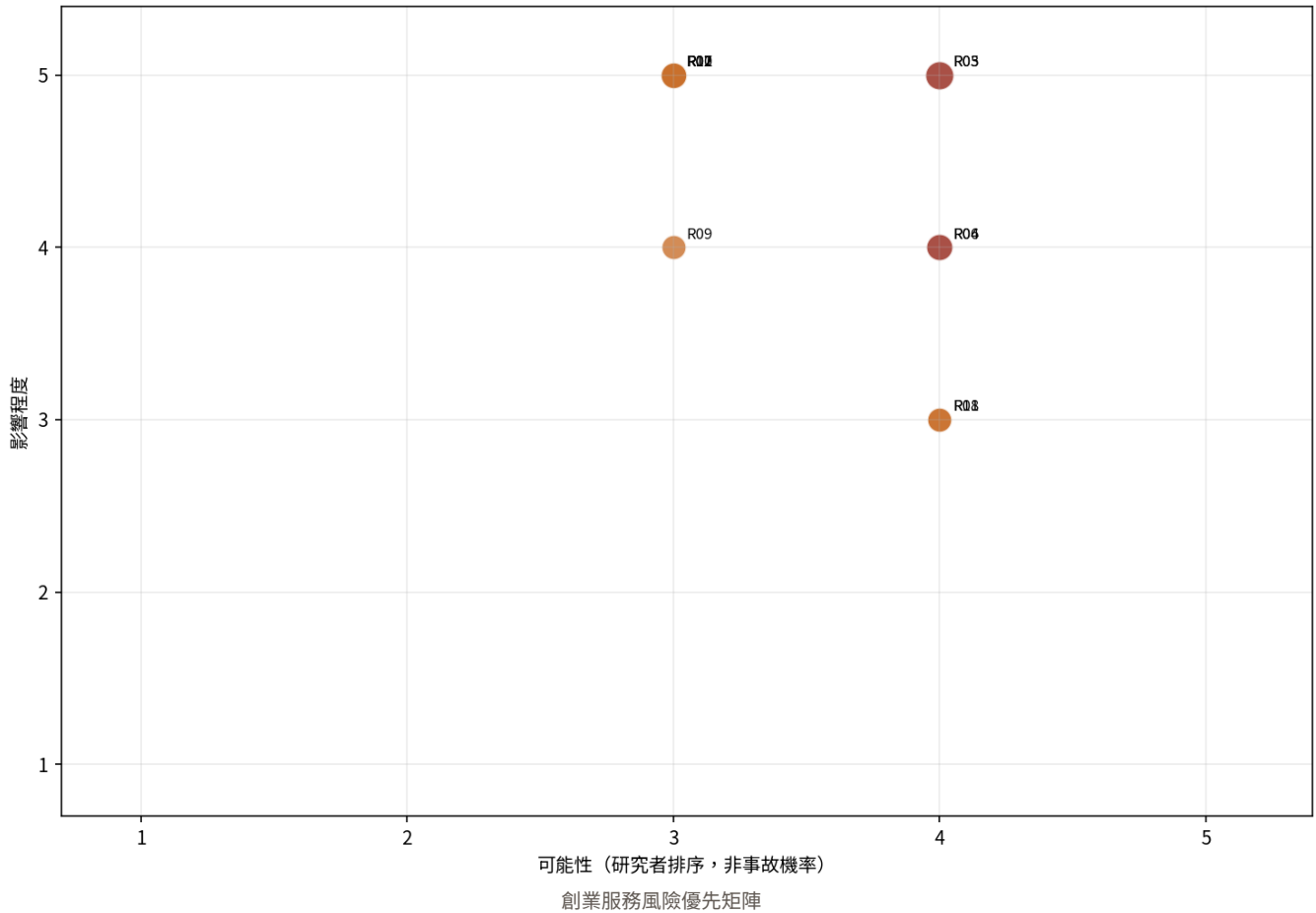
硬體應優先租用或由合格合作夥伴提供。若初創公司同時購置無人機、智慧眼鏡、開發模型、聘用植保與經營全臺履約，會把技術、法規、資本與密度風險同時拉高。

8. 敏感度、風險與停止條件



茶園敏感度顯示，淨價值高度依賴病害事件機率與可偵測且可處置比例。若事件少或模型只能發現無法有效處置的異常，服務費就失去經濟基礎。這說明創業驗證不能只問模型看得準不準，也要問「提早看到之後是否真的改變決策」。

圖6 創業服務風險優先矩陣



十二項風險中，高優先項目集中於病害漏報、資料漂移、飛航與施作邊界、個資地理資料與責任界線。分數是研究者排序，不是官方風險評等。每項均設定停止條件：文件不足就不飛、未由合格業者承作就不施藥、新域未驗證就不輸出確定結論、漏報或誤報超標就停止擴張、行銷移除限制語就停止發布績效宣稱。

8.1 不能被平均準確率取代的指標

- 高損失病害的召回率與95%信賴區間。
- 未知／低信心樣本的正确轉介率。
- 每百公頃人工複核量與回應時間。
- 每次警示造成的必要與不必要現勘比例。
- 相較既有巡查提早的時間、避免損失與省工。
- 按作物、季節、場域、品種、裝置與操作員分層的表现。

9. 三階段創業試驗

9.1 第零階段：先證明資料與責任流程

用既有手機而非智慧眼鏡，在三類作物各四個匿名場域建立標準採樣、專家標註、未知類別與更正流程。每一作物至少累積50個經獨立確認的目標或對照案例前，不進入自動警示銷售。此50例只是流程門檻，不足以保證統計精度；正式樣本數應依病害盛行率、目標靈敏度與允許誤差另行估算。

9.2 第一階段：比較「既有巡查」與「AI輔助巡查」

採前瞻性、配對或隨機化任務設計，比較每公頃巡查時間、異常發現、誤報、漏報、專家工時、處置延遲與使用者負擔。AI組不可剝奪農民原有安全流程。研究應預先註冊主要指標、排除規則、停止條件與分析計畫，避免只挑有利案例展示。

9.3 第二階段：驗證付款與組織模式

同時測試按面積費與組織平台費，不用免費試用的使用率代替付費意願。合格門檻包括：至少兩個期作或季節、三個以上獨立場域、外部植保複核、未知轉介可用、單位經濟為正、農戶持續使用，以及組織願意簽訂包含責任與資料治理的契約。

9.4 智慧眼鏡的進場條件

只有當手機流程已證明價值，而且眼鏡在任務時間、拍攝一致性、錯誤率或遠端協作至少一項有顯著改善，才將眼鏡列為標準設備。否則保留為選配。這可避免把「未驗證的介面」誤當成創業護城河。

10. 結論與營運建議

這個創業計畫最有價值的部分不是同時擁有無人機、眼鏡與AI，而是把三種工具編成可拒答、可複核、可追溯、可停止的決策服務。無人機縮小搜索範圍，智慧眼鏡降低現地紀錄摩擦，AI分配注意力，專業人員負責脈絡與最終判斷，經濟模型則檢驗一次警示是否值得。

在本文情境中，最可行的起點是「組織聚合＋影像巡檢＋人工複核」：先服務一個地理集中、願意共同驗證的茶園或果園組織，同時以稻作作為面積密度與多任務共飛的成本試驗。第一年不自建農藥施作、不承諾確診、不賣永久硬體、不全臺擴張；以少數場域取得跨季節證據、付費意願與停止規則。

真正的競爭優勢會來自經過時間累積的場域資料治理、病害未知類別、專家更正、作物分層效能、決策結果與責任紀錄，而不是單一模型或設備。若服務無法證明比既有巡查更早、更省、更少錯誤，應停止擴張；若能證明，才有資格把「看到」轉成「可被信任的農業經濟決策」。

參考文獻與資料來源

- 1 交通部民用航空局。農業相關遙控無人機操作證、活動與噴灑問答。來源
- 2 交通部民用航空局。法人辦理遙控無人機能力審查與活動申請問答。來源
- 3 農業部。農藥代噴技術人員訓練及管理辦法。來源
- 4 農業部。農業科技產學合作商機媒合會技術資料：作物病害辨識、無人機精準施作與茶園病蟲害處方等技術。來源
- 5 行政院主計總處（2022）。109年農林漁牧業普查初步報告分析。來源
- 6 農業部。農業就業人口統計。來源
- 7 Scientific Reports（2024）。番茄病害之高光譜早期偵測研究。來源
- 8 Scientific Reports（2024）。無人機RGB影像之作物病害監測研究。來源
- 9 Biosystems Engineering（2024）。植物病害辨識的跨域調適研究。來源
- 10 Heliyon（2024）。深度學習植物病害偵測與分類之系統性回顧。來源
- 11 IIETA。IoT與擴增實境植物病害偵測框架。來源

研究揭露、授權與更正

生成式AI（OpenAI Codex）協助來源線索整理、程式、圖表、文字起草與網站製作；AI不列為作者。周秉漢負責研究問題、假設設定、來源核對、分析解讀、公開決策與後續更正。作者經營米糧與訂閱服務相關事業，可能因本文提出的農業技術服務、平台或供應鏈觀點而間接受益；未接受無人機、智慧眼鏡、農藥、AI模型、政府機關或農業組織委託。

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、農藥或交易建議。

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。

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。