

穴盤苗株篩選機之研發應用¹

張佳偉^{2*}、張金元²、李東霖²

摘 要

為解決臺灣育苗產業人力短缺與苗株品質不均問題，本研究開發一套具自動辨識與剔除功能之穴盤苗株篩選機，提升育苗作業之自動化與標準化。本系統以我國新型專利「植物篩選裝置」(M659147)為基礎，歷經桌上型雛型機與二代試驗機開發，整合輸送、影像辨識、氣動剔除與中央控制等模組，針對缺株與過小株進行即時篩選。雛型機採開源單晶片微控制器(Arduino, Open-source Microcontroller Development Platform)開發板，配合間歇式輸送，處理一盤128穴約90秒；二代機優化為可程式邏輯控制器(Programmable Logic Controller, PLC)控制核心連續輸送，處理時間縮短為30秒，效率提升三倍。影像辨識應用色相、飽和度、明度色彩模型(Hue-Saturation-Value Color Model, HSV)進行色彩轉換與綠色面積比例結合形態學分析，剔除模組以八組電磁閥控制單列噴氣。試驗選用兩種國產128穴機耕專用穴盤，種植青花菜「42號」品種，分別取13日與16日苗齡進行測試，辨識準確率達97.52%，13日齡準確率略高，不具顯著差異；篩選成功率平均92.4%，受苗齡與穴盤形式影響。綜合實測結果，本系統具模組化、高效率、低誤差與可擴充性，適用於臺灣中小型育苗場，可有效減少人力投入，提升苗株整齊度與育苗效能。

關鍵字：穴盤苗、影像辨識、淘汰株篩選、自動化育苗設備

前 言

穴盤育苗為臺灣蔬菜與花卉栽培體系中最普及的育苗技術，因穴盤規格化、自動播種機、介質攪拌填充機及自動排箱積箱系統等自動化設備便利，使其成為現代育苗場之主流。然而在實際作業中，受限於種子品質、生長環境與管理條件等影響，時常出現穴盤苗株有未發芽、過小苗或發育異常情形，若未及早剔除，將造成後續

¹ 農業部臺中區農業改良場研究報告第 1108 號。

² 農業部臺中區農業改良場助理研究員、副研究員、研究助理。

*通訊作者：張佳偉，Email: changcw@tcdares.gov.tw

出貨品質不穩定及自動移植作業效率降低，進而影響田間定植發育整齊度與產量穩定性。目前多數苗場仍以人工進行苗株篩選，作業過程仰賴目視判斷與手動挑除，也因人員經驗差異與疲勞度累積，容易導致挑選標準不一致，不僅耗費人力、效率低下，且成為育苗標準化的主要瓶頸。查「110 年臺灣地區蔬菜育苗業者現況調查與分析」(陳與李，2022)，育苗場栽培管理約佔總人力66%，退休人力比大於新進人力，致經驗無法傳承。隨著高齡化與人力不足問題日益嚴峻，導入自動化篩選設備，成為育苗產業升級轉型之關鍵。

歐美等國之商業化育苗場已導入機械視覺、深度學習與機械手臂為核心的自動化分級與剔除系統(Wen *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2023)，能針對苗株之形態、顏色或生長指標進行分類處理。荷蘭 TTA 公司已推出多款應用於育苗場穴盤苗管理檢查之商業化設備，例如 Mobile Blow Out(MBO)機型，具備手動放盤後以影像系統辨識缺陷植株並以氣動方式剔除之功能。MBO 號稱每小時可處理多達600盤，並具備可更換吹氣條模組以支援多種穴盤。然而此類系統多為大型商業用途，體積龐大，參數調整與模組更換需仰賴技術人員，亦有高導入與高維護成本等限制，較難以導入臺灣以中小型育苗栽培環境及應用於蔬菜類作物，對在地苗場使用效益有限。為填補此技術斷層，本研究團隊依據本場獲准之中華民國新型專利「植物篩選裝置」(M659147)核心設計，研製可普及於中小型苗場之自動化「穴盤苗株篩選機」，開發過程分「桌上型雛型機」與「二代試驗機」兩階段，如圖一。



圖一、(A)桌上型雛型機與(B)二代試驗機。

Fig. 1. (A)Desktop Prototype and (B) Second-Generation Experimental Machine.

本研究目標在建立符合我國育苗場環境，具擴充性的模組化苗株篩選平台，可支援多種穴盤規格與作物品項，透過即時影像辨識技術，自動判別缺株與過小株，提升篩選標準化與準確率(蔡等人，2020；Slaughter *et al.*, 2008；Xu. *et al.*, 2023)。透過篩選機構高速穩定的輸送與噴氣剔除模組，提高作業效率與每日處理量。最後驗證本試驗機實際操作之篩選成功率與穩定性，進行量化效益分析。藉由此研究開發成果，期能為國內育苗產業提供一具成本效益、自動化、可量產之篩選解決方案，減輕人力負擔、提升育苗品質與生產一致性，並為後續智慧農業系統整合打下基礎。

材料與方法

一、機構設計與系統構成

本研究所研發之穴盤苗株篩選機，設計歷經兩階段發展：首先為具驗證性質之「桌上型雛型機」，進而導入速度優化與穩定強化之「二代試驗機」，前者使用Arduino單晶片微控制器，進行機構作動流程規劃與影像辨識邏輯驗證。設計重點包括：(1)傾斜式穴盤傳送結構，強化穩定度與速度控制；(2)整合穴列定位與影像擷取裝置；(3)影像分類模組採用參數閥值辨識缺株與過小株；(4)開發電磁閥氣動剔除模組，實現即時同步剔除；整體機構可依育苗盤規格與需求進行調整，如圖二。因Arduino功能、穩定性及通訊方式較受侷限，辨識與篩選利用輸送帶間些走停模式供資料傳輸及控制噴除模組動作；待雛型機功能驗證完成，實際可進行辨識與挑苗作業後，針對其實用性、速度與穩定性進行優化，開發出二代試驗機。二代試驗機結合工業影像處理、PLC模組化編程設計與人機控制介面，具備結構簡潔、成本合理與高適應性之特性。完成自動辨識、即時剔除與高速處理能力之驗證與優化，可針對國內各育苗場之作業流程進行適配微調。模組設計與硬體對照如表一所示。



圖二、穴盤苗株篩選機設計重點：(A)傾斜式穴盤傳送結構；(B)穴列定位與驅動控制；(C)影像擷取分類模組；(D)氣動剔除模組。

Fig. 2. Key design elements of the plug seedling selection machine: (A) Inclined tray conveying mechanism; (B) Row positioning and drive control; (C) Image acquisition and classification system; (D) Pneumatic rejection system.

表一、桌上型雛型機與二代試驗機構造與功能比較

Table 1. Comparison of structure and function between the desktop prototype and the second-generation experimental machine

Item	Desktop Prototype	Second-Generation Experimental Machine
Control System	Arduino MEGA 2560	KEYENCE KV-8000 (PLC)
Human-Machine Interface	None (PC-based serial control)	KEYENCE VT5-W10 touch panel HMI
Transmission Drive	Stepper motor + DM542 driver	YASKAWA SGM7J servo motor + SGD7S driver
Image Recognition System	Logitech C922 PRO + Python + OpenCV module	KEYENCE IV3-G500CA vision module
Trigger & Illumination	Software delay trigger + white LED	IV3-G120 amplifier + IV3-G600C stable illumination module
Seedling Removal Actuator	MVDA-120 high-speed solenoid valve (8 units)	FESTO MHJ10-S-2.5-QS-6-HF solenoid valve (8 units)
Screening Speed	1 tray in 90 seconds	1 tray in 30 seconds
Screening Accuracy & Efficiency	90–95% accuracy, affected by optical sensor stability	Industrial-grade sensing and pneumatic control with higher accuracy; suitable for large-scale processing
Machine Dimensions (L×W×H)	2000 × 400 × 450 mm (desktop type)	2000±200 × 800±200 × 1400±200 mm (including rollers and main unit)
Conveyor Dimensions & Design	Dual parallel belts, approx. 350 mm width, 1500 mm total length; intermittent motion with bottom rollers	Front section: 1200 × 400 mm; rear section: 720 × 400 mm; continuous motion with bottom rollers
Conveyor Angle & Mode	Inclination approx. 60°; stepper-controlled single-step/intermittent conveying	Inclination approx. 65°; servo-driven with support for continuous and inching modes
Expandability & Industrialization	Prototype design with high flexibility but limited stability	Modular industrial design suitable for full-line automation and mass production

二、影像辨識流程與分類邏輯：桌上型雛型機的影像處理流程如下：

- (一) 影像預處理：將相機影像從RGB轉換為HSV色彩空間，擷取植株典型綠色區間(Roy et al., 2021；Zhang et al., 2019)。
- (二) 二值化與去雜訊：採用形態學侵蝕與擴張等處理濾除背景雜訊。
- (三) 輪廓偵測與分區對應：單列8穴格進行分割，計算綠色像素面積。
- (四) 分類判斷邏輯：綠色面積 = 0 → 缺株； $(\text{綠色面積}/\text{穴格框選面積}) \times 100\% < \text{閾值}$ → 過小株；其餘 → 正常株

參數為變數，以利程式碼修改套用，依據作物種類、苗齡進行靈活設定。經過雛型機驗證測試後，預設以穴格框選面積之7%作為閾值，及葉面積綠色面積為0或是小於整體面積之7%，認定為缺株或是過小株，標記為應淘汰株，套用於二代試驗機的影像軟體設定。

三、氣動篩選模組設計：

使用高速電磁閥，控制8個對應噴嘴，單一噴嘴對應穴格下方洩水孔，倘判定為應汰除之穴格經過氣動篩選模組上方，即進行噴氣汰除(龍，2001；呂等人，2003)。雛型機構為達精準對位，採用走停模式，藉以評估穴盤移動速度、噴氣持續時間等影響，經雛型機驗證，於二代試驗機優化為連續輸送型，亦可達成該排穴格移動到篩選模組噴嘴正上方時進行噴氣汰除，具快速反應與低擾動特性。

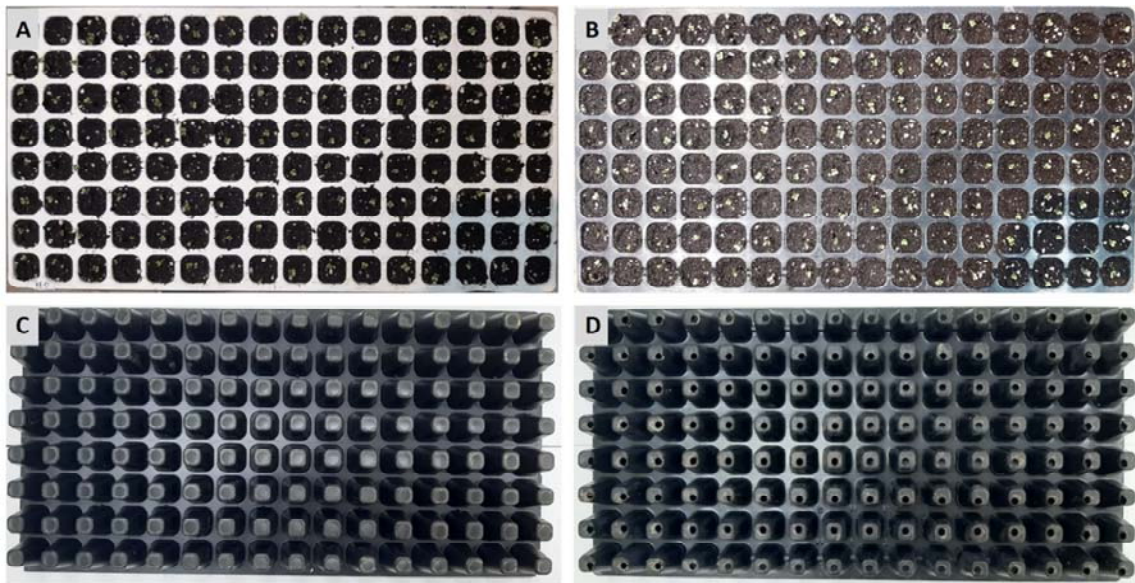
四、試驗材料：

- (一) 作物種類：國內主要商業生產之青花菜「42號」品種，購自綠誼股份有限公司。
- (二) 穴盤種類：國內2家育苗業者自行開模生產之蔬菜機械耕作專用128格穴盤，分A、B兩型，外觀尺寸皆為長：588 mm、寬：300 mm，穴格為正方形圓角穴孔，邊長30 mm，深度40 mm，排列為每列8格，共16列。A型穴格底洩水孔徑11.5mm，開孔位置整齊，B型穴格底洩水孔徑7mm，開孔位置不一，如圖三。
- (三) 苗齡處理：蔬菜育苗場依其慣行作業，苗株篩選時間點各有不同，經訪談中部地區育苗場，一般於苗株7-20日齡間進行挑苗，亦有於25-28日齡出貨前再次進行篩選者；十字花科作物苗株7日齡後子葉完全展開，9-10日齡後本葉開始生長，根系亦逐漸旺盛，因此許多育苗場會選擇10-14日齡進行挑苗，方便將淘汰株連同介質一併清除。15-16日齡後，因本葉持續生長，鄰近穴格間葉

片開始交疊，需翻動葉片方能清楚辨認，逐漸影響人工目視或影像辨識篩選作業。基於上述苗株生長趨勢，本試驗以A、B兩型穴盤各6盤進行播種，並分別於苗株第13日齡與第16日齡時各取3盤試驗。共4種處理：A-13、A-16、B-13及B-16，總數12盤，共計1,536格播種穴格。

五、試驗設計與處理組合：

為評估穴盤苗株篩選機於不同栽培條件下之辨識與篩選效能，以不同廠牌穴盤及不同苗齡處理設計四種處理組合，每組處理皆設置3盤重複，共計12盤，所有穴格依實際苗況進行人工標註，分成缺株(Missing seedlings)、過小株(Undersized seedlings)、正常株(Normal seedlings)及歪斜株(Tilted seedlings)4類，其中缺株、過小株屬淘汰株，餘為健康株，如表二及圖四。



圖三、A、B兩種穴盤正視與底部圖照：(A)填充介質之A型穴盤正面；(B)填充介質之B型穴盤正面；(C)A型穴盤背面，洩水孔徑11.5mm；(D)B型穴盤背面，洩水孔徑7mm。

Fig 3. Front views of plug tray types A and B:(A) front view of plug tray type A with medium;(B) front view of plug tray type B with medium;(C) bottom view of plug tray type A, featuring 11.5 mm drainage holes;(D) bottom view of plug tray type B, featuring 7 mm drainage holes.

表二、苗株型態分類代號對照表

Table 2. Coding scheme for seedling type classification

Seedling Type Description	Handling Methods
Missing seedlings;	should be identified and rejected
Undersized seedlings;	should be identified and rejected
Normal seedlings	Healthy, should be retained
Tilted seedlings	Healthy, should be retained

六、統計方法與效能指標

辨識準確度測試：在不同穴盤及苗齡條件下，記錄篩選機對健康株與淘汰株兩類的影像判別結果，與人工標記比對，計算準確率(accuracy)、精確率(precision)、召回率(recall)等評估指標。

(一)針對影像辨識結果，進行以下統計指標計算與分析：TP(True Positive)：淘汰株標記應刪除；TN(True Negative)：健康株認定健康；FP(False Positive)：健康株被誤認應刪除；FN(False Negative)：淘汰株被誤認健康株。

(二)依據上述混淆矩陣，計算以下指標：

1. 準確率(Accuracy) = $(TP + TN) / \text{總數}$
2. 精確率(Precision) = $TP / (TP + FP)$ 。
3. 召回率(Recall) = $TP / (TP + FN)$ 。
4. F1 分數 = $2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall)$

篩選成功率：篩選機影像處理後標記應刪除的位置，實際於氣動篩選模組處被成功剔除的比例，其計算方式為(實際被剔除的格數 / 所有被辨識成應剔除格數)×100%。



圖四、苗株分類：(A)缺株；(B)過小株；(C)正常株；(D)歪斜株。

Fig. 4. Seedling classification: (A) Missing seedlings; (B) Undersized seedlings; (C) Normal seedlings; (D) Tilted seedlings.

結果與討論

一、桌上型雛型機與二代試驗機性能比較

本系統開發採兩階段設計：桌上型雛型機為初步驗證機構整合與邏輯運作之雛形平台，重點在於驗證輸送、影像辨識與氣動剔除流程是否能同步作動；而二代試驗機則於此基礎上進行全面優化，強化其運作穩定性、處理速度與自動化程度，以符合實際場域需求。性能比較如表三。各模組優化重點如下：

- (一)輸送模組：兩代機型皆採用傾斜式履帶設計(角度約60–65度)與滾輪導軌，確保穴盤穩定前進、不偏移。雛型機採步進馬達驅動與間歇式前進模式，藉由感測器控制走停節奏，以利攝影與噴氣同步作業。而二代試驗機優化為伺服馬達驅動並結合PLC精準控制速度與作動時間，實現連續式輸送作業，提升篩選效率並降低同步誤差，整體處理時間由90秒縮短為30秒。
- (二)位置偵測模組：雛型機使用反射式光電感測器監控穴盤邊緣位置，以觸發影像擷取與噴氣動作；二代機升級為對射型光電感測器，其偵測精度更高，並可同步將對位資訊即時傳遞至PLC與影像模組，確保作動準確性，提升整體運作穩定度。
- (三)影像擷取模組：雛型機採用商用網路攝影機(Logitech C922 PRO)與LED光源，成像品質受限於環境光源與焦距調整。二代試驗機升級為KEYENCE IV3-G500CA工業視覺模組，搭配高穩定性輔助照明，安裝位置垂直於穴盤輸送中心軸上方，確保成像穩定性與一致性，利於影像演算法後續處理。
- (四)影像辨識與控制單元：兩代機型皆可依不同作物種類進行調整，惟雛型機運用Python與OpenCV開源模組開發，採色彩空間轉換(RGB→HSV)、二值化、

輪廓分析與綠色面積比判斷方式進行分類，參數須進入程式碼內馬中手動調整，無法普及應用。二代試驗機控制介面優化為鏡頭視覺模組內建演算法之套裝軟體，分類門檻值可透過軟體視窗調整，直接於工業鏡頭中完成色彩篩選與苗株分類，實現高度自動化與彈性設定。

表三、桌上型雛型機與二代試驗機性能比較表
Table 3. Performance comparison between the desktop prototype and the second-generation experimental machine

Item		Desktop Prototype	Second-Generation Experimental Machine
Conveying Method		Stepwise conveying	Continuous conveying with real-time decision-making
Control Core		Arduino + Python script	PLC
Image Capture		Webcam with center alignment	Industrial camera with synchronized timing control
Processing Time per Plug tray		90 seconds per tray (128 cells)	30 seconds per tray (128 cells)
Processing Time per Row		1.8 second	0.25 seconds
Operational Stability		Slight misdetection or deviation in tray sensing	Stable and accurate during testing, no false actions
Human-Machine Interface		None	10-inch HMI control panel
Air Jet Module		Arduino-controlled switches	PLC-controlled 8-valve air jet with synchronous removal
Operation Mode		Trial-based single-row analysis with manual intervention	Fully automated continuous operation with standardized process

- (五)篩選模組：兩代均配置8組電磁閥對應每列8穴格，控制氣壓噴嘴完成剔除動作。雛型機經由Python程式將分類結果傳送至Arduino控制剔除，以走停模式實現對位並提供噴除時間；二代試驗機則由PLC直接接收演算法判定結果並控制噴氣閥門，實現即時同步反應，大幅提升處理穩定度與可控性。
- (六)控制系統架構：雛型機核心為Arduino開發板搭配Python程式控制，功能驗證後需手動介入調整參數與作業。二代試驗機則升級為KEYENCE KV-8000

PLC控制系統，配合10吋觸控式人機介面(HMI)，除可即時顯示篩選結果與統計資訊外，亦可於操作端直接進行參數設定、流程控制與異常停止操作，強化使用者體驗與實用性。

雛型機為系統整合測試之基礎版本，驗證模組運作可行性；而二代試驗機則針對各項模組精度、穩定性與作業效率進行強化與優化設計，已具備實際場域導入與連續作業之條件。依據測試結果，二代試驗機不僅在辨識與剔除效率上表現優異，其運作過程穩定、控制邏輯明確，可做為國內中小型苗場自動化篩選之標準平台。特別是輸送作動從「間歇性」轉為「連續性」，處理效率提升3倍，大幅縮短處理時間並減少控制誤差。

二、整體影像辨識與篩選效能表現(二代試驗機)

本研究針對影像辨識與自動剔除機構所構成之穴盤苗篩選系統，進行不同穴盤型式與苗齡處理條件下之性能分析。處理組合包含A型穴盤13日齡(A-13)、A型16日齡(A-16)、B型13日齡(B-13)與B型16日齡(B-16)，每組均有三重複樣本進行統計分析。主要評估指標為影像辨識準確率(Accuracy)與篩選成功率(Sorting Success Rate)。

(一)影像辨識準確率分析(表四)：準確率用以評估試驗機對應篩選苗株與健康苗株分類之正確性。由實驗資料計算得知，四處理組準確率平均值分布介於0.945-1.000 之間(圖五)，變異範圍雖小，但仍可觀察到兩型穴盤準確率皆以13日齡較16日齡略高。惟經由單因子變異數分析(One-way ANOVA)檢定，各處理組間之辨識準確率差異不具統計顯著性($F = 1.310$ ， $p = 0.337$)，說明在不同穴盤型式與苗齡條件下，辨識模組仍能維持一致的穩定性與適應性(表五-1)。再利用二因子變異數分析(表五-2)，影像辨識準確率是否受 TrayType(穴盤型式)、Age(苗齡)與兩者交互作用影響，其結果仍不具統計顯著性($p > 0.05$)。此結果顯示影像辨識模組在不同穴盤型式與苗齡條件下仍具良好穩定性與一致性，辨識效能未因外部物理條件變化而受到干擾。由於本系統採用標準化的影像擷取流程與形態學綠色面積判斷邏輯，並透過預先設定的參數閾值進行分類，因此可推論其辨識結果主要受控於演算法內部參數與光照環境之穩定性，較不受穴盤結構與苗齡變異所影響。本研究結果支持該影像辨識系統具有良好之泛用性與適應性，適用於不同規格穴盤與栽培條件之辨識任務，對外部處理條件如穴盤規格與苗齡具有良好兼容性。

表四-1、各處理平均值統計分析

Table 4-1. Statistical analysis of mean values for each treatment

Treatment	TP	FN	FP	TN	recall	precision	Accuracy	F1	Sorting Success Rate
A-13	6.3333	1.6667	0.6667	119.3333	0.7762	0.9111	0.9818	0.8342	1.0000
A-16	9.3333	1.6667	1.0000	116.0000	0.8641	0.9061	0.9792	0.8799	1.0000
B-13	3.6667	2.3333	0.0000	122.0000	0.6095	1.0000	0.9818	0.7238	1.0000
B-16	34.0000	5.3333	0.0000	88.6667	0.8491	1.0000	0.9583	0.9162	0.6960

表四-2、各處理標準差統計分析

Table 4-2. Statistical analysis of standard deviations for each treatment

Treatment	TP	FN	FP	TN	recall	precision	Accuracy	F1	Sorting Success Rate
A-13	2.3094	0.5774	0.5774	2.0817	0.1072	0.0839	0.0045	0.0654	0.0000
A-16	0.5774	2.0817	1.0000	2.0000	0.1570	0.0911	0.0197	0.1105	0.0000
B-13	2.0817	2.0817	0.0000	1.0000	0.3385	0.0000	0.0163	0.2396	0.0000
B-16	11.7898	2.8868	0.0000	9.8658	0.1035	0.0000	0.0226	0.0604	0.0670

表五-1、準確率及篩選成功率單因子變異數分析(One-way ANOVA)

Table 5-1. One-way ANOVA for accuracy and sorting success rate

Metric	F	p-value
Recall	1.011629515	0.436564046
F1	1.079219906	0.411227781
Accuracy	1.310344828	0.336515214
Sorting Success Rate	61.67571158	7.13942E-06 ¹

¹ Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$

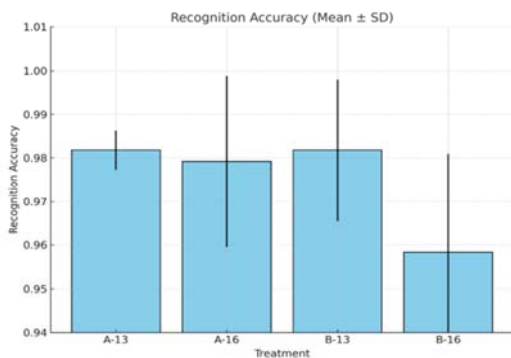
表五-2、準確率二因子變異數分析(plugin tray type × age)

Table 5-2. Two-way ANOVA for accuracy (plugin tray type × age)

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(plugin tray type)	0.000325521	1	1.103448276	0.324204184
C(age)	0.000508626	1	1.724137931	0.225571974
C(plugin tray type):C(Age)	0.000325521	1	1.103448276	0.324204184
Residual	0.002360026	8		

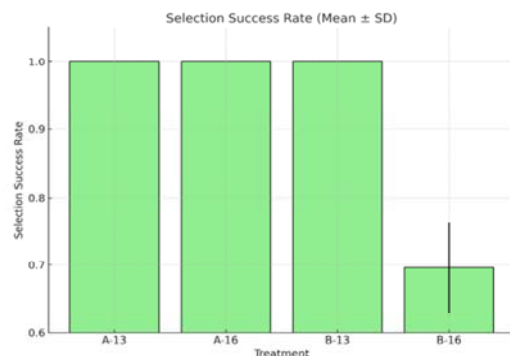
(二)篩選成功率分析：篩選成功率為評估系統實際完成剔除淘汰苗(缺株或過小株)之能力指標。三重複試驗結果顯示，A-13、A-16 與 B-13處理組均達成100%篩選成功率，而B-16組僅平均為69.6%，且變異性高(標準差 $\approx 6\%$)(圖六)，顯示此處理條件無法穩定剔除所有應汰除苗株。

(三)篩選成功率探討：針對篩選成功率進行單因子變異數分析(One-way ANOVA)後結果顯示(表五-1)，各處理組間存在極顯著差異($F = 61.68$, $p = 0.000007$)。此結果與觀察一致。進行二因子變異數分析(表六)，顯示穴盤型式(TrayType)與苗齡(Age)皆為顯著影響因子($p < 0.01$)，且兩者之間交互作用亦達統計顯著水準($p < 0.05$)，即篩選成功率並非單一因素所決定，而是由穴盤型式與苗株日齡之組合會共同影響。再進行 Tukey HSD 事後檢定分析(表七)，結果顯示 B-16 組與其餘三組處理間皆存在顯著性差異($p < 0.001$)，而 A-13、A-16 與 B-13 三組間則無顯著差異，再次驗證 B-16 為本研究中唯一篩選成功率顯著偏低的處理組。



圖五、各處理組別之辨識準確率
(平均值±標準差)

Fig. 5. Recognition accuracy (Mean $\pm$ SD) for each treatment group



圖六、各處理組別之篩選成功率
(平均值±標準差)

Fig. 6. Selection success rate (Mean $\pm$ SD) across treatment groups

表六、篩選成功率二因子變異數分析(Plug tray type $\times$ Age)

Table 6. Two-way ANOVA for sorting success rate (Plug tray type $\times$ Age)

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Plug tray type)	0.069305527	1	61.67571158	4.9875E-05
C(Age)	0.069305527	1	61.67571158	4.9875E-05
C(Plug tray type):C(Age)	0.069305527	1	61.67571158	4.9875E-05
Residual	0.008989669	8		

表七、Tukey HSD 事後檢定(針對篩選成功率)

Table 7. Tukey HSD post hoc test (for sorting success rate)

group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
A-13	A-16	0	1	-0.0876	0.0876	FALSE
A-13	B-13	0	1	-0.0876	0.0876	FALSE
A-13	B-16	-0.304	0	-0.3916	-0.2163	TRUE
A-16	B-13	0	1	-0.0876	0.0876	FALSE
A-16	B-16	-0.304	0	-0.3916	-0.2163	TRUE
B-13	B-16	-0.304	0	-0.3916	-0.2163	TRUE

(四)交叉分析與討論：

1. 穴盤型式：A型穴盤植株排列規律性與洩水孔對位精準性較佳，其辨識表現穩定、篩選成功率高。實驗中A-13與A-16處理均達到100% 篩選成功率 ($\text{SuccessRate} = 1.000 \pm 0.000$)，顯示系統在A型穴盤結構下運作穩定。B型穴盤精確率佳，表示其健康株被誤刪比例少，但B-13召回率平均60.95%，顯示仍有應淘汰株漏判現象，可能與介質殘留及影像遮蔽有關。
2. 苗齡影響：本次試驗數據以13日齡組別準確率較佳，16日齡組別之召回率、F1值則略優於13日齡，但皆無顯著影響。可能與葉片展開完整、綠色面積更穩定有關。而B-16雖有極高的辨識能力($\text{Recall} = 0.849$ 、 $\text{F1} = 0.916$)，惟其篩選成功率僅 $69.6\% \pm 6.7\%$ ，顯示有辨識正確而剔除失敗之情形。推測其主因為洩水孔未設於穴格正下方，氣流偏移導致噴嘴作用力不足。
3. 歪斜株具有誤判與誤刪風險。在12個處理盤中，共觀察到11株歪斜株，其中有3株被誤判為淘汰株，遭氣動裝置剔除，歪斜株誤刪率達27.3%。進一步以 Pearson 相關性檢定歪株數與誤刪數之關聯，結果顯示具有中高度正相關($r = 0.76$)，顯示歪斜株越多，誤刪風險越高。推測原因可能為苗株葉片傾斜或重心偏移，葉片移出辨識畫面，導致影像辨識邏輯將其判定為缺株或過小株。此結果顯示現行系統雖能正確分辨多數健康與淘汰株，但對部分非典型生長姿態辨識能力不足。

(五)穩定性與應用潛力評估：根據12組處理之三重複辨識與篩選數據分析，各組辨識準確率與篩選成功率均未出現極端值，標準差介於 ± 0.06 - ± 0.16 間，屬合理範圍內，顯示系統具良好之穩定性與重複性操作能力。在連續作業下具備穩定辨識與執行性能。本二代篩選機系統採用模組化設計與工業級PLC控

制架構，適合中小型育苗業者導入自動篩選流程，未來亦可透過圖形介面設定選盤規格與作物參數，實現多樣化操作並整合數據回饋至育苗管理平台，進一步提升智慧農業作業效率與標準化程度。

三、洩水孔結構對篩選效率之影響推論

實體測量結果本試驗使用之A型與B型穴盤，其在洩水孔設計上存在明顯差異，A型穴盤之洩水孔直徑約為11.5 mm，孔位規則對稱，精確設於每個穴格的幾何中心，與氣動剔除膜組織噴氣孔對位高度符合。而B型穴盤之洩水孔直徑僅約7mm，且孔位位置在部分穴格中出現偏移、不對稱或非居中情形，造成篩選作業過程噴嘴與洩水孔中心無法完全對準。

由於本系統氣動剔除模組使用噴嘴孔徑為3.8 mm，若精準對應穴格下方洩水孔，可使氣流穿透介質將苗株連根噴出。惟當洩水孔孔位偏移或面積不足時，氣流通道受阻，將導致兩種現象：(1)多數氣流未進入穴格內，無法順利推送介質，形成氣流失焦現象；(2)氣流偏向或被孔壁遮擋，僅推動苗株而非將其完整噴出，導致苗株晃動但未脫落，無法完成剔除任務。

此現象在B型穴盤第16日齡處理中尤為明顯。該組在影像辨識方面表現良好，精確率與F1分數分別達1.0及0.916，顯示演算法成功鎖定所有應剔除對象，但實際篩選成功率卻僅有69.8%。進一步觀察，倘洩水孔孔位不正，即便氣嘴已觸發噴氣，也可能僅造成植株晃動、傾斜，而非實質性排除，進而產生「噴氣但未剔除」的篩選失敗現象。

此外，孔徑大小亦為關鍵因子。A型穴盤因洩水孔較大，即便對位誤差略大，氣流仍有空間導引與穿透；B型則因孔徑小，對氣流對準精度要求更高，稍有偏差即導致氣流打偏或衰減。由此可知，穴盤孔位的幾何中心性與孔徑尺度，皆為影響氣動篩選效率之潛在關鍵因子。

綜上觀察，考量未來自動化與機耕一貫化趨勢，建議穴盤設計除考量育苗功能外，亦可將洩水孔精確設於穴格幾何中心，則可同時適應篩選機構，與固定位置噴嘴對位。透過上述設計優化，將有助於提升自動化篩選系統整體穩定性與汰除效率，降低因硬體結構不符所導致之機構失效或剔除誤差，進而促進整體自動化育苗流程之標準化與產業化應用。

結論與建議

本研究聚焦於解決穴盤苗株育苗流程中「缺株」與「過小株」挑選困難之瓶頸，研發一套具備影像辨識與氣動剔除功能的自動化篩選系統。整體研究由雛型機試作起步，至二代試驗機完成模組優化與性能測試，系統整合感測定位、影像擷取、分類演算法與噴氣控制模組，每盤平均處理時間30秒、辨識準確率達97.5%，已展現實用化與擴充潛力。以下分別就研究成果進行深入結論整理，並提出後續技術應用與改善方向。

本研究成功整合輸送模組、影像辨識與氣動篩選技術，建構可模組化、封閉型之自動篩選平台，系統以標準 128 格穴盤為設計核心，搭配模組化導軌與感測器觸發邏輯，可支援多種穴盤規格並具可擴展性。相較傳統手動挑苗作業，具備可程控、自動化、高一致性之明顯優勢。依據實際試驗數據顯示，二代試驗機整體辨識準確率高達97.5%，精確率達95.2%，F1 分數平均為85.13%。此結果證明該系統已可穩定辨識出需剔除之淘汰株(缺株或過小株)，足夠應對常見穴盤育苗條件。作業速度方面，單盤處理時間為30秒，適用於中小型苗場之連續作業需求。從12盤試驗結果來看，所有盤次辨識與篩選指標皆集中穩定，無顯著離群點，顯示系統可長時間穩定操作，重複性佳。分析中未觀察到明顯的系統性誤差或硬體失效情形，代表此系統已達實場導入的技術成熟度門檻。

除B型×16日齡處理外，其餘處理皆達100%篩選成功率。結果顯示氣動剔除模組控制精準，在大多數情境下皆可穩定辨識與剔除缺陷苗株，然而在葉片交錯、植株傾斜等非典型生長姿態條件下，仍可能出現誤判與誤噴動作。尤其是歪株造成的誤刪現象，實驗結果顯示其誤刪率達27.3%，且與誤噴行為具高度相關性($r = 0.76$)，顯示此樣態仍為系統辨識邏輯中的潛在挑戰。未來應用於自動化播種的育苗場域，種子播於穴格中央，可降低苗株歪斜樣態，進一步提升場域操作的準確性與適應性。

國外商品化機型多應用於高經濟價值之花卉作物及硬式穴盤，而本系統設計之初，即為可開發出可應用我國中小型育苗場自動化轉型之核心設備，以舒緩育苗場人力缺乏困境。本機構適用大宗蔬菜、瓜果類作物育苗用之104、128孔軟性穴盤，且其零組件皆可於在地取得與更換，大幅降低維修門檻與依賴性，體積精巧適合我國育苗場作業空間。建議作為播種後7~16日內之篩選作業平台使用。經建立不同穴盤、作物與苗齡對應之參數資料庫，以利人員快速設定，可大幅提升辨識精度並減少誤剔或漏剔。結合輸送與分級，可進一步整合至播種線或自動移植線，強化整

體育苗流程效率。未來可導入進階之機械學習或深度學習模型，增強模型對苗株非典型姿態、邊界葉片或遮蔽情況的容忍性。亦可將苗株輪廓形狀、傾斜角度、對稱性等幾何特徵納入判別依據，提升辨識邏輯的彈性與普適性。

致 謝

本研究承蒙農業部科技計畫項下補助經費，感謝中興大學生物產業機電工程學系黃國益教授、宜蘭大學生物機電工程學系陳柏中教授斧正，以及農機研究室徐迺晴、洪榆宸、茆聰銘、劉志聰、李安心及賴碧琴同仁鼎力配合協助，方得以順利完成，謹此一併誌謝。

參考文獻

1. 呂英石、李新濤、陳昱全、鄭經偉。2003。可調整式花卉穴盤苗假植機構之研究。農業機械學刊，12：11-24。
2. 陳乃華、李思慧。2022。110年臺灣地區蔬菜育苗業者現況調查與分析。頁10-21。2022種苗業者名錄。
3. 張佳偉、張金元。2023。植物篩選裝置。中華民國新型專利M659147號。
4. 蔡瑜卿、薛佑光、張定霖。2020。蔬菜育苗產銷智慧聯網體系建構現況。種苗科技專訊，111：13-16。
5. 龍國維。2001。菊花穴盤苗自動插苗機之研究。臺中區農業改良場研究彙報 72:1-27。
6. Roy, A. M., Bose, R., Bhaduri, J. 2022. A fast accurate fine-grain object detection model based on YOLOv4 deep neural network. Neural Comput. Appl. 34: 3895–3921.
7. Slaughter, D. C., Giles, D. K., Downey, D. 2008. Autonomous robotic weed control systems: A review. Comput. Electron. Agric. 61(1): 63–78.
8. Wen, Y., Zhang, L., Huang, X., Yuan, T., Zhang, J., Tan, Y., Feng, Z. 2021. Design of and experiment with seedling selection system for automatic transplanter for vegetable plug seedlings. Agronomy 11(10): 2031.
9. Xu, S., Zhang, Y., Dong, W., Bie, Z., Peng, C., Huang, Y. 2023. Early identification and localization algorithm for weak seedlings based on phenotype detection and machine learning. Agriculture 13(1): 212.
10. Zhang, X., Yu, T., Liu, X., Yang, S. 2019. Classification method of plug seedlings based on transfer learning. Appl. Sci. 9(13): 2725.

Development and Testing of a Plug Tray Seedling Screening Machine¹

Chia-Wei Chang^{2*}, Chin-Yuan Chang², Tung-Lin Lee²

ABSTRACT

To address labor shortages and uneven seedling quality in Taiwan's nursery industry, this study developed an automated screening machine capable of identifying and removing defective seedlings from plug trays. Based on Taiwan Utility Patent M659147, the system was developed in two phases: a desktop prototype and a second-generation model. It integrates conveying, image recognition, pneumatic rejection, and centralized control. The prototype, using Arduino and intermittent conveying, processed a 128-cell tray in 90 seconds. The second-generation version, upgraded to PLC control and continuous conveying, reduced processing time to 30 seconds-tripling efficiency.

The image module used HSV color space conversion and green area ratio analysis with morphological processing, while eight solenoid valves enabled real-time row-based ejection. Trials were conducted using two domestic 128-cell plug trays to grow broccoli cultivar 'No. 42' at 13 and 16 days of age. The recognition accuracy reached 97.52%, with slightly better results at day 13, though not statistically significant. The average sorting success rate was 92.4%, influenced by seedling age and tray type. The system's modular, efficient, and scalable design makes it suitable for small- to medium-scale nurseries, reducing labor and improving seedling uniformity.

Key words: Plug tray seedlings, Image recognition, Missing seedling detection, Automated seedling nursery equipment

¹ Contribution No.1108 from Taichung DARES, MOA.

² Assistant Researcher ,Associate Researcher and Project Assistant of Taichung DARES, MOA.

* Corresponding Author: Chia-Wei Chang, Email: changcw@tcdares.gov.tw