

財團法人臺中市澄德科技教育基金會
2022 大專校院機電暨智慧創意實作競賽
作品企畫書

我要全心全意吃菇菇鍋

擴增實境眼鏡整合深度學習辨識演算法應用於百靈菇疏蕾決策

111 年 5 月 27 日

擴增實境眼鏡整合深度學習辨識演算法應用於百靈菇疏蕾決策

AR glasses integrated with deep learning recognition algorithm
for *Bailing* mushroom bud thinning decision

摘要

由於目前菇類的栽種策略多由老農民經驗判斷，沒有一定的準則。本計畫預期開發出一款百靈菇疏蕾模型，硬體方面整合了擴增實境眼鏡及運算設備，軟體方面使用YOLOv4 機器學習及影像處理技術。本研究將透過 YOLOv4 的權重檔與疏蕾決策演算法作為疏蕾模型，隨後將其存入運算端，因此菇農可藉由擴增實境眼鏡得知百靈菇訊息，以利菇農了解當前栽種、疏蕾策略是否適當。擴增實境眼鏡及疏蕾模型，不僅解決了在光照度低、空間狹長的百靈菇溫室內還要架設監控設備之問題，還能夠具現化老農的養菇及疏蕾經驗，以利青農快速接軌，減少農業人口流失。本研究將擴增實境技術應用於農業中，並期望此項技術搭配機器學習和嵌入式系統的運作，能夠整合經驗並歸納出具體的栽種決策，達到高效率的智慧農業。

關鍵字：擴增實境眼鏡(AR glasses)、百靈菇、疏蕾、深度學習、YOLOv4

1. 前言

1.1 智慧農業的發展

早期的智慧農業從依靠畜力演進至機械化耕種，僅僅是為了節省人力成本，不過台灣可耕地面積小且鄉村人口老化與少子化使得台灣難與農業大國競爭，於是自動化農業應運而生，解決當時缺工所帶來的影響。然而時至今日，氣候變遷時常帶來颱風及寒流等災害，這些天然災害肆虐將伴隨著鉅額損失，因此行政院農委會於 2016 年起推動強調無人與智能化的智慧農業 4.0，希望透過環控系統與感測器的大數據分析，整合農業資訊與知識達成數位化農業。

1.2 菇類產業發展及瓶頸

臺灣菇類產業最早發展源自於日治時期，豐富的林木資源作為菇類栽培之資財，並自日本引進香菇菌種，展開了台灣菇種栽培的百年篇章。1970 年台灣菇類產業引進塑膠瓶栽培與機械自動裝瓶技術，經過不斷改良及發展，演變出現今廣泛採用的太空包栽培方式[1,2]。與此同時環控技術隨著之發展，在 1980 年前菇類栽培以傳統菇舍為主，大多由鐵皮或遮光網搭建，並使用木製層板作為菇包層架，不過此種方式一直面臨病蟲害及環境氣候影響，因此 1980 年後菇農陸續將菇舍改建為擁有二氧化碳濃度、光照度、濕度及空調等環控設備之養菇場，使產量更加穩定[3]。目前菇農所面臨的瓶頸已不再是菇舍環控系統運作而是人工疏蕾，如圖 1 所示，此過程是為了確保菇類生長品質，然而人工疏蕾衍生出許多問題，包含疏蕾策略因菇農經驗差異與主觀而有所不同、因缺工使蕈菇錯過黃金疏蕾時程等，如何調適對於菇類產業相當關鍵。

近年來使用影像處理技術進行非破壞性量測成為了主流的自動化量測方法，將以往主觀的生長情形藉由影像處理數據化，並且在 2019 年也開始有結合影像處理於菇類產業的應用被提出並實現，如圖 2 所示，目的皆為提高生產蕈菇生產品質與節省人力，如 Lu 等人在 2019 年將影像辨識應用於評估並追蹤蕈菇生長情形[4]，Lu 等人也在 2020 年提出了一種創新的方法來計算蘑菇菌傘直徑[5]，他採用了 YOLOv3 進行圖像定位和自創的 SP 算法，實驗驗證該算法相較其他算法有較高的準確性，且不需要特定的參數即可克服圖像色彩偏差的問題，此方法獲得的數據可以追蹤蘑菇的生長情形與優化溫室控制。本實驗室的李盈萱學姊研究結合深度影像及可見光影像[6]，開發蕈菇生長情況監測系統，並且透過深度資訊計算百靈菇之數目、高度、菌傘半徑與生長趨勢。

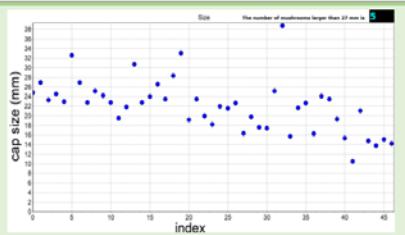


圖 1 以疏蕾方式去除間菇：(a)疏蕾前、(b)疏蕾後

2019 將影像辨識應用於評估蕈菇狀況

Development of a Mushroom Growth Measurement System Applying Deep Learning for Image Recognition

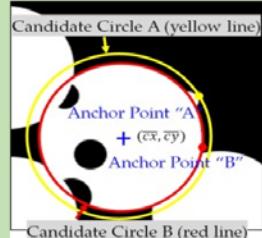
- 自動測量、記錄大小和生長速度



2020 自創SP算法計算蕈菇大小

A novel image measurement algorithm for common mushroom caps based on convolutional neural network

- Score-Punishment算法計算蕈菇直徑



2021 計算蕈菇之特徵參數

基於深度學習技術於蕈菇子實體成長
影像監測系統之研發

- 透過深度資訊計算百靈菇之數目、
高度、菌傘半徑與生長趨勢

菌傘直徑 (pixel)	33(pixel)	44 (pixel)	28 (pixel)
菌傘直徑 (cm)	2.5 (cm)	3.52 (cm)	2.21 (cm)
蕈菇高度 (cm)	2.54 (cm)	3.28 (cm)	2.52 (cm)

圖 2 應用於蕈菇相關之影像處理分析技術[4-6]

擴增實境眼鏡之相關發展與應用

智慧眼鏡的應用相當廣泛，如圖 3 所示。智慧眼鏡在醫學領域已投入許多年，由於新進的外科醫師需要大量的手術以獲取實習經驗，如何在有限的執刀機會下吸收足夠經驗是外科醫生面臨到的一大課題，又或是外科醫生在執刀的過程中，因人體其他組織遮蔽而無法正確判斷目標的絕對位置，就可以透過擴增實境(AR)眼鏡達成模擬體內實際構造，使外科醫師更有效率的吸取經驗與執行手術[7,8]。因應工業 4.0 的到來，強調自適應與人機輔助是現代工廠必備條件，因此維修部門導入擴增實境(AR)技術勢在必行，透過此技術可以具體化作業內容，使維修專家與現場操做員更有效的溝通[9,10]。在物流業，時常需要清點大量貨物，然而揀貨設備多為手持式，對於揀貨人員相當不便，如果以擴增實境(AR)眼鏡搭配 QR Code 盤貨，必然可以提升揀貨效率[11]。特殊教育若搭配擴增實境(AR)眼鏡的使用，與傳統的投影片放映相比，能夠跳脫課程既有框架，將單方指導改為互動式教學，更能提升身障人士和學童的專注度與吸收成效[12,13]。休閒娛樂部分，在博物館中可以運用擴增實境(AR)技術，每當參訪者進入特定區域時，擴增實境(AR)智慧眼鏡就會以圖像及語音的方式介紹這個區域所陳列的文物，實現博物館的貼身導覽服務[14]

醫學



2015 新進外科醫師需要大量手術以獲取經驗，透過擴增實境眼鏡能在有限的機會下模擬體內實際構造。



2020 外科醫生執刀過程中，可以模擬人體內部構造，使醫師更精確、有效率的執行手術。

工業與物流業



2017 透過擴增實境技術可以具體化作業內容，使維修專家與現場操作員更有效的溝通。



2017 目前揀貨設備多為手持式，擴增實境眼鏡搭配 QR Code 可以解放雙手提升揀貨的效率。

教育與休閒娛樂



2018 特殊教育上，使用活潑及互動的方式結合教材，提高學習效率。



2016 在博物館中運用擴增實境技術，實現貼身導覽服務。

圖 3 擴增實境(AR)眼鏡之相關發展與應用[7-14]

1.4 研究目標

虛擬影像技術發展至今，以虛擬實境(VR)及擴增實境(AR)穿戴式裝置為市場主流，加上元宇宙的興起，虛擬影像企業紛紛投入休閒娛樂市場及醫藥領域，然而在農業領域的發展極為稀少。再者，智慧農業 4.0 現階段仍以架設攝影監控系統搭配智慧型手機對農場、溫室環境進行數據收集及實時的監測為主。然而，為提高單位面積栽種密度，百靈菇場皆以垂直方式進行栽種，使得需要較大空間及光照度的可見光監控設備進駐溫室受到限制，如圖 4 所示。因此，使用以虛擬影像的穿戴式裝置加入農業領域，不僅解決監控設備架設的問題，還發展出更直接的方式給予農民作物即時生長資料及疏薦決策，並且相較於手持式裝置更方便存取，應用情境如圖 5 所示。



圖 4 菇場溫室實景：(a)中間道路狹窄，僅能容納一人通過、(b)上下層高度不足且內側菇包光照度低，限制設攝影器材的架設。

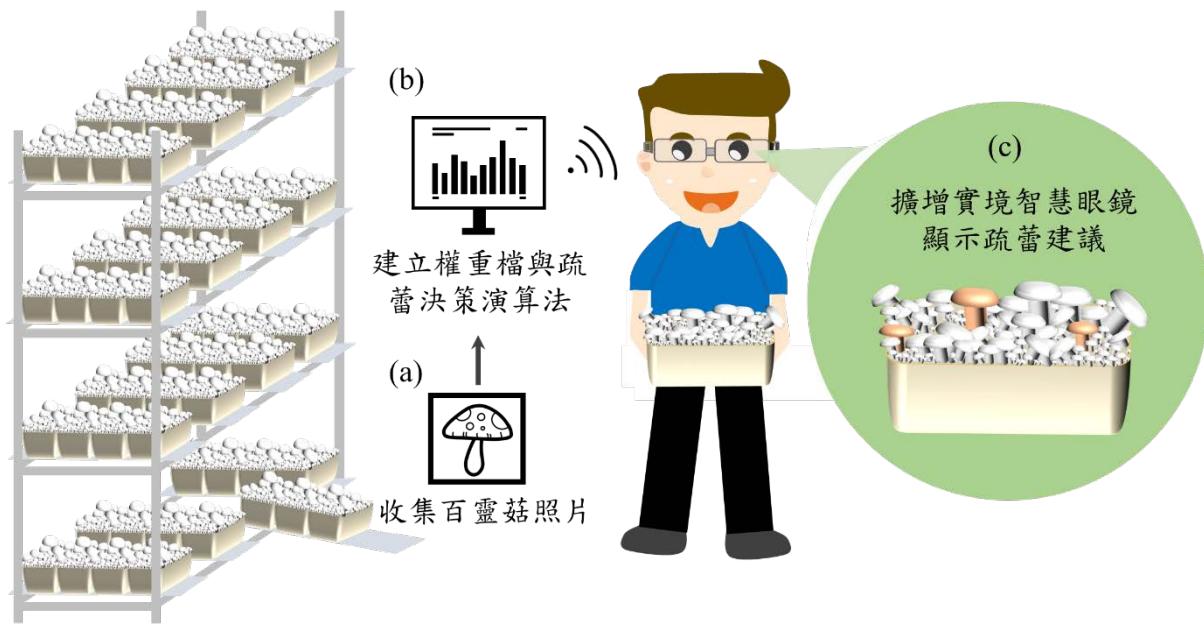


圖 5 研究示意圖：(a)收集百靈菇疏蕃前後照片並前處理及標註、(b)建立權重檔並搭配疏蕃決策演算法計算出最好的疏蕃策略、(c)顯示疏蕃建議於擴增實境智慧眼鏡上。

2. 材料與方法

2.1 應用情境與整體研究架構

本研究分為透過機器學習建立疏蕃決策與透過擴增實境眼鏡實際應用兩部分，流程圖如**圖 6** 所示。在透過機器學習建立疏蕃決策中，首先使用相機設備收集所需角度之百靈菇疏蕃前後照片，影像收集後接續進行多種方式的圖片分類、裁剪、標註等前處理，當準備就緒後執行 YOLOv4 的機器學習，待權重檔全部輸出即比較各組之間的優劣，並選出辨識率最高穩定度最好之權重檔作為辨識模型，如**圖 6(a)**所示。第二部分是擴增實境眼鏡實際應用，當相機鏡頭輸入百靈菇包影像時會藉由先前訓練的 YOLOv4 權重檔擷取每朵百靈菇位置，並經過二值化、真圓度計算等一系列疏蕃決策演算法算出各朵百靈菇特徵值排名，最後輸出該菇包的疏蕃建議，如**圖 6(b)**所示。因此，每當菇農戴上擴增實境(AR)智慧眼鏡進行疏蕃時，運算端就開始計算，並輸出該菇包的疏蕃建議，菇農即可參考此影像進行疏蕃。

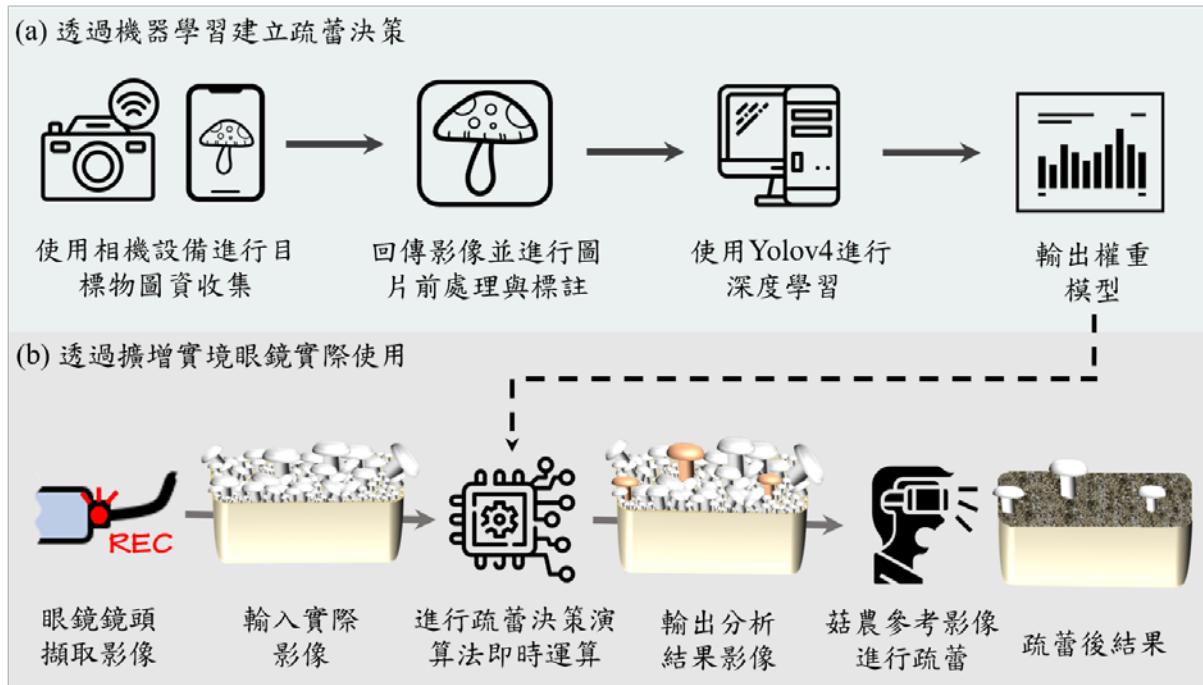


圖 6 研究架構：(a) 透過機器學習建立疏蕾決策、(b)擴增實境眼鏡實際應用

2.2 照片收集

拍攝過程中使用手機及 Intel D435i 相機如**圖 7(a)**進行取像，他們是分別擁有 4800 萬像素及 2000 萬像素的鏡頭，將 Intel D435i 相機放入防水接線盒內並倒置固定於鋁擠型上，以保持相同的向下拍攝角度，由於百靈菇溫室內光源不足，防水接線盒內會再放入兩條 DC-5V LED 燈條，如**圖 7(b)**，並由行動電源供給所需電力，如**圖 8**所示，手機鏡頭則是由菇包側面約 60 度拍攝，以獲取近似於人員疏蕾之方向照片。由於 Intel D435i 相機所拍攝出的可見光照片較為一致，所以目前規劃先使用此照片進行影像訓練及辨識，但是若僅使用俯視照片完成的訓練，容易在疏蕾時出現辨識誤差，因此往後會再將手機相機所拍攝的不同角度照片加入訓練。

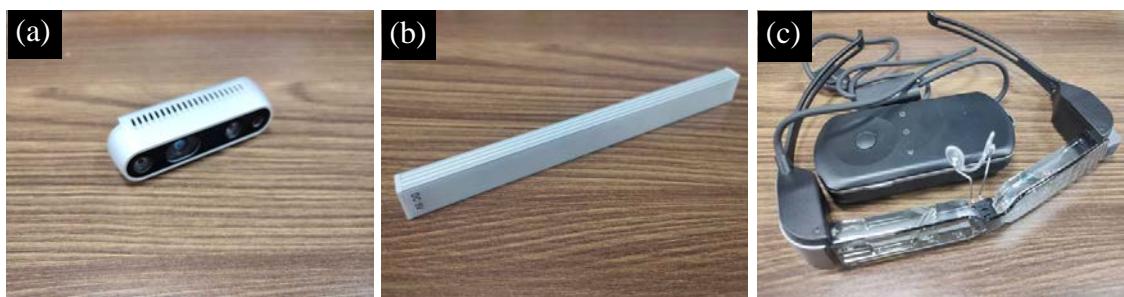


圖 7 實驗過程使用之器材：(a)深度相機(D435i, Intel, USA)、(b) DC-5V LED、(c)擴增
實境智慧型眼鏡(BT300, Epson, Japan)。

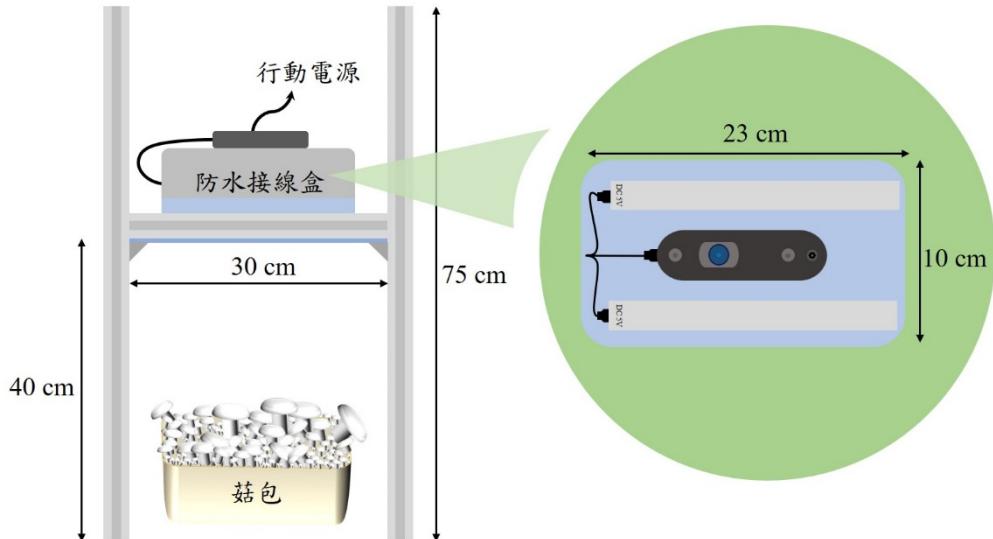


圖 8 攝影機架設與防水接線盒內部擺放方式

2.3 物件辨識

YOLOv4 為利用人工智慧執行即時物件偵測的深度學習技術，能夠偵測物件、追蹤及判斷，可應用於交通車流計算、自駕車研發、工廠瑕疵檢測、醫療影像分析、五官定位等，其藉由訓練標註過後的可見光影像，可獲得實時偵測且高精度的目標辨識模型。本研究將收集的可見光影像藉由 LabelImg 軟體標註百靈菇及菇包，在標註過程中，先設定辨識物件的種類，再對於每張可見光影像中的百靈菇及菇包進行標註。本研究標註的方法如下：由於外型具有優勢的百靈菇具有較高的經濟價值，因此菇農於疏蕾時會將外觀畸形的菇無條件去除，如表面具有坑洞、碰撞受傷的百靈菇，因此不框選重大畸形之百靈菇，並且盡可能貼近目標框選。

接著便可訓練 YOLOv4 模型，其中可自由設定訓練集與測試集的影像張數、迭代次數及 IoU 值等等。IoU 值為物體標記範圍與系統偵測範圍的聯集分之交集，如圖 9 所示，模型訓練中 IoU 值小於設定閾值時，會將該物件辨識為無，其閾值設定影響著模型的精確度。常見用來評估性能的指標有混淆矩陣、精確率及召回率，混淆矩陣是由預測和實際目標的有無所組成，TP 為實際為真、預測為有，FP 為實際無、預測為有，FN 為實際有、預測為無，TN 為實際無、預測為無。精確率為被預測為目標的有多少為真，召回率為實際為目標的有多少被預測為真，其計算方法如(1)、(2)所示。

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

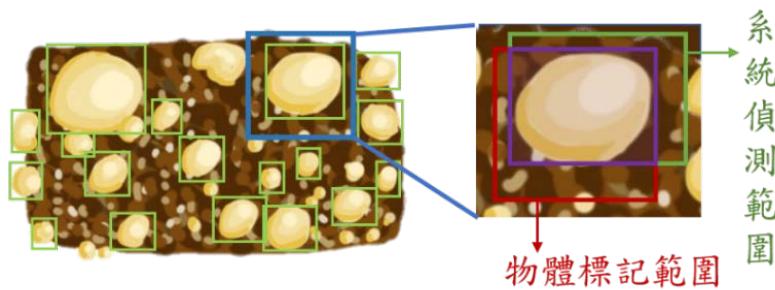


圖 9 IoU 值為物體標記範圍與系統偵測範圍的聯集分之交集

2.4 疏蕃決策演算法

輸入的影像藉由 YOLOv4 輸出的權重檔進行影像辨識後，可得百靈菇與菇包的位置資訊，利用位置資訊可將百靈菇及菇包個別裁切成新的圖像，即可對百靈菇圖像進行影像處理。首先，在影像處理中，先利用 OpenCV 函式庫將彩色的百靈菇圖像轉換為灰階圖像，再進行大津二值化取得感興趣的百靈菇黑白圖像，最後去除周圍噪點得到完整的百靈菇輪廓。再者，計算百靈菇特徵值，傘菌大小由像素面積計算，百靈菇真圓度由外切圓及內切圓半徑計算而得出。再將特徵值加權並進行排名，並依據菇包位置資訊剔除生長於菇包外緣的百靈菇。最後，依排名計算百靈菇之間距，得到最終輸出的疏蕃時需留下的三朵百靈菇，流程如圖 10 所示。

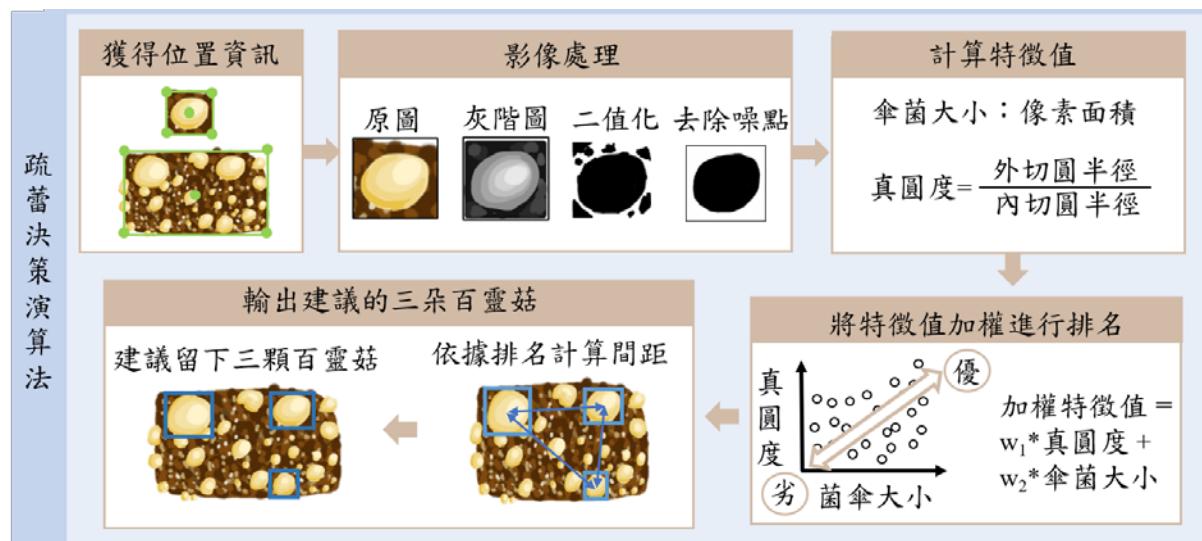


圖 10 疏蕃決策演算法流程圖

2.4.1 影像處理

利用 YOLOv4 取得影像中百靈菇的位置資訊，並個別裁切為新的圖像，接著使用 OpenCV 函式庫將彩色的百靈菇圖像轉換為灰階圖像，再對灰階圖像進行大津二值化。大津二值化為一種圖像二值化的方法，該算法能夠自動找出最佳閾值再進行圖像二值化，將灰階圖像轉換為黑白圖像。但是在二值化後的圖像中會出現一些無法避免的噪點，因此利用侵蝕與膨脹的方法將雜點去除。在侵蝕與膨脹中，可以任意設定捲積(kernel)的大

小與迭代次數，接著捲積會逐一遍歷整張圖像，當捲積中有像素為 0(在圖像中呈現黑色)，則將捲積下的像素都設成 0，此即為侵蝕；當捲積中有像素為 255(在圖像中呈現白色)，則將捲積下的像素都設成 255，此即為膨脹，如圖 11 所示。然而侵蝕膨脹並無法將圖像中像素面積較大、非百靈菇輪廓的區域去除，常見的去除方法為設定一閥值，將小於閥值得像素面積去除，但由於本研究中的百靈菇圖像尺寸非固定，因此較不適用，故開發了一種可保留中心傘菌區域面積而去除周圍面積的影像處理算法，最後再將得到的傘菌膨脹還原至原尺寸，便可得到影像處理後的圖像。

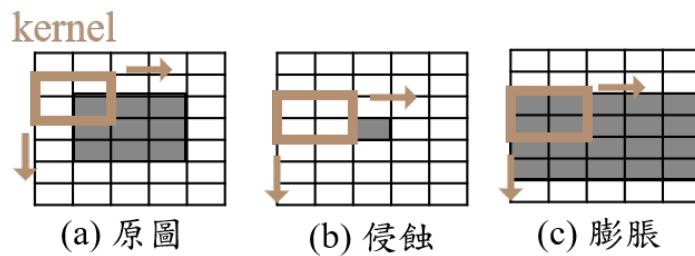


圖 11 影像處理之侵蝕膨脹與捲積之示意圖

2.4.2 計算特徵值

透過計算特徵值能夠將百靈菇生長情形量化，本研究將針對百靈菇的真圓度與傘菌大小進行量化。百靈菇的真圓度可依影像處理後的百靈菇輪廓計算內切圓和外切圓半徑的比率得出，傘菌的大小則可利用菇包統一的尺寸，去推算計算出的百靈菇像素大小應縮放的比例，而得到傘菌大小特徵值。

2.4.3 將特徵值加權進行排名、選擇間距優良的三朵百靈菇

先將特徵值進行正規化，使數據分布於 0 至 1，可避免特徵值結合時產生大幅差異。接著將設定特徵參數的權重，並加權進行排名，使得真圓度與傘菌大小接近 1、排名靠前者為優質的百靈菇，數值接近 0、排名靠後者為較劣質的百靈菇。

再藉菇包位置資訊，剔除排名中生長於菇包外緣的百靈菇，最後根據排名三朵百靈菇為一組，計算百靈菇兩兩間距，若間距均大於依菇包比例尺得出的三公分，則得出此三朵百靈菇為最終輸出一疏蕾應留下的百靈菇，反之則往下替換組別，過程如圖 12 所示。

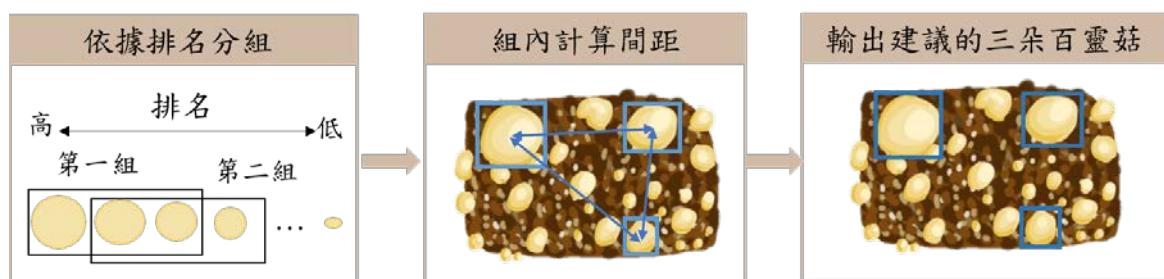


圖 12 組內計算間距並輸出間距優良的三朵百靈菇

2.5 擴增實境眼鏡之硬體整合

最後步驟為擴增實境眼鏡與硬體設備之間的整合，由於擴增實境眼鏡的計算能力不足且相容性不高，本研究將使用擴增實境眼鏡作為輸出端，其附有一具觸控遙控器，並具備有線、無線傳輸及攝影機功能，如圖 7(c)所示，並以筆記型電腦或嵌入式系統作為運算端再傳回擴增實境眼鏡上顯示。已測試的連線方式有 USB、MobaXterm(SSH)、Vysor、Splashtop、Miracast，目前使用筆記型電腦和擴增實眼鏡進行上述五種連線測試，結果如表 1 所示，USB 傳輸除了能夠雙向傳輸檔，在影像連接上也是相當穩定，不過會導致往後實際使用不便，因此本實驗會以無線連線方式為主。剩餘四種為無線傳輸，MobaXterm 因不相容於擴增實境眼鏡選擇淘汰；而原本以 Wi-Fi 無線傳輸畫面為主的 Vysor 也因為不相容只能夠選擇有線傳輸；Splashtop 可以下載於擴增實眼鏡上，然而目前官方釋出的版本為測試版，因此經常斷線，穩定性不足；因此最終選擇穩定性高且傳輸距離可達到 30 公尺以上的 Miracast 作為擴增實境眼鏡與硬體設備無線連接之方法。

表 1 五種連線方式之比較

結果影像輸入至擴增實境眼鏡					
連線方式	 USB	 MobaXterm	 Vysor	 Splashtop	 Miracast
筆記型 電腦					 穩定性高傳 輸距離遠。

3. 結果與討論

3.1 深度學習影像辨識結果

本研究使用 YOLOv4 深度學習模型對百靈菇與菇包進行辨識，並使用 labelImg 進行標註，訓練集與測試集分別有 80 張與 16 張的影像，最大迭代次數為 6000 次，IoU 閾值設為 0.5。表 2 為百靈菇與菇包的辨識精確率與召回率，百靈菇的精確率為 78%、召回率為 88%，菇包的精確率與召回率均為 100%，表 3 為混淆矩陣中 TP、FP、FN 和 TN 的數量，圖 13 為辨識單張影像的結果，成功辨識出各種尺寸的百靈菇以及菇包。

表 2 百靈菇與菇包的辨識精確率與召回率

	百靈菇	菇包
Precision	78%	100%
Recall	88%	100%

表 3 混淆矩陣

混淆矩陣	實際-有	實際-無
預測-有	TP=332	FP=96
預測-無	FN=44	TN=0

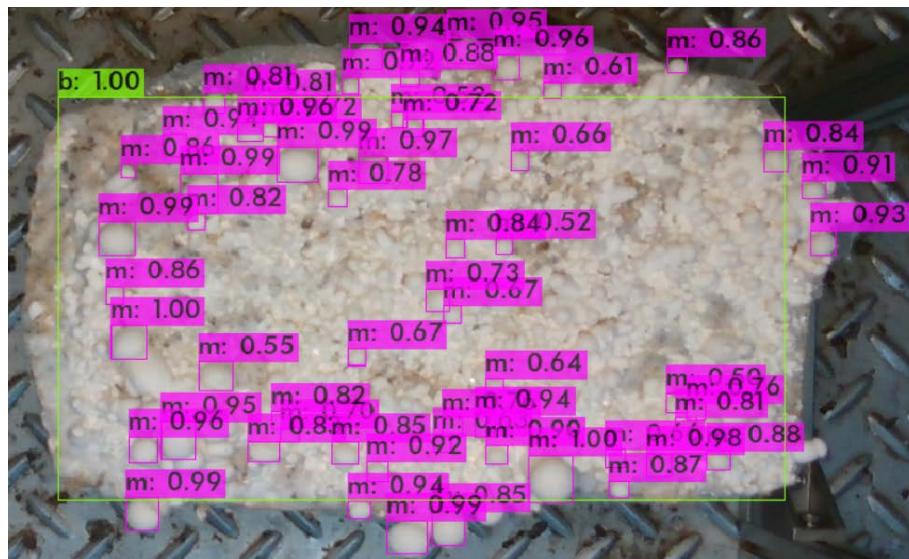


圖 13 YOLOv4 成功辨識出各種尺寸的百靈菇以及菇包

3.2 影像處理結果

本研究先將百靈菇可見光影像轉換為灰階圖像，再進行大津二值化和侵蝕膨脹，其中試驗了 6 種不同的侵蝕膨脹參數，分別為捲積邊長為 2 個像素、迭代次數各為 1、2、3，與捲積邊長為 3 個像素、迭代次數各為 1、2、3。再去除中心區域非傘菌區域的面積，最後將傘菌面積膨脹還原至原尺寸，並試驗了 16 種膨脹還原的不同參數，捲積邊長分別為 2、3、4、5 個像素、迭代次數各為 1、2、3、4、5。為了找出最合適的侵蝕膨脹與膨脹還原的參數，本研究對於共 96 種的參數設置，並以眾多的百靈菇圖像輸入進行評比。為此，須先建立影像處理後之對照組圖像，因此將百靈菇之原圖以手動的方式框選傘菌區域，取得對照組的百靈菇手動二值化圖像，再計算 144 種方法分別得出的最終輸出一膨脹還原尺寸圖，與手動二值化圖像的 IoU 平均值，IoU 平均值越接近 1 者為越佳的參數組合。

於圖 14 中可以得出當侵蝕與膨脹的捲積設為 3、迭代次數為 1，膨脹還原的捲積設為 5、迭代次數為 6 時，IoU 為最大平均值為 0.791；其次為侵蝕與膨脹的捲積設為 3、迭代次數為 3，膨脹還原的捲積設為 5、迭代次數為 6 時，IoU 的平均值為 0.789。圖 14 為使用 IoU 平均值最佳的影像處理參數之影像處理過程，圖像在大津二值化後轉換為最合適閾值的黑白圖像，在侵蝕膨脹後去除非傘菌面積以外的區域，最後膨脹還原尺寸。相較於圖 15(a)，圖 16(a)為輪廓較不清晰之百靈菇影像，但仍然能夠輸出良好的影像處理後圖像。

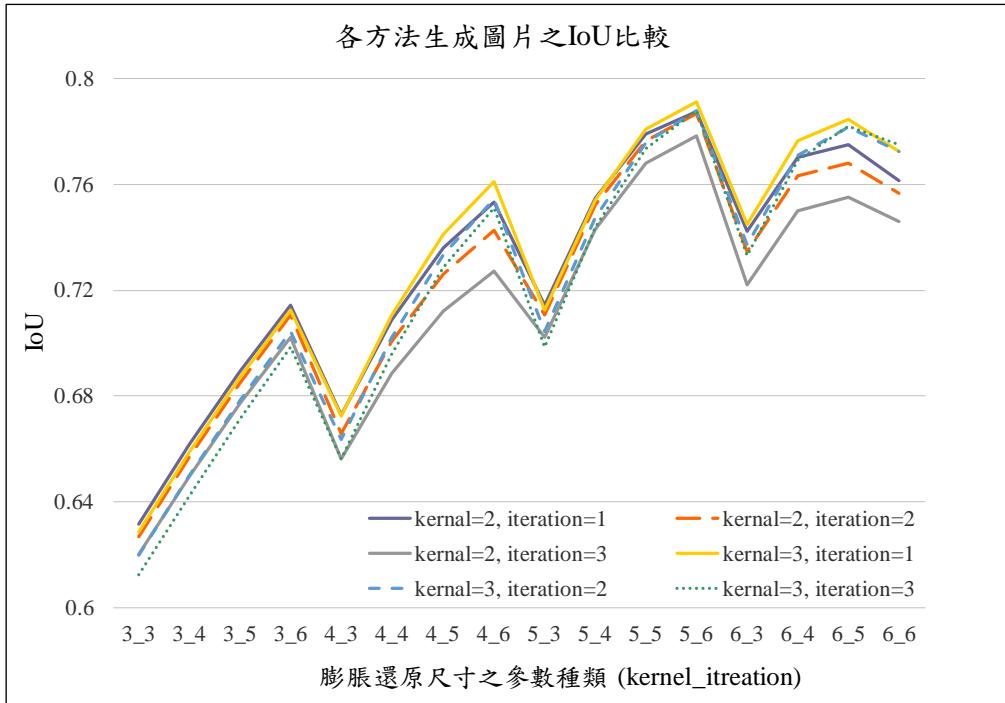


圖 14 各方法生成圖片之 IoU 比較折線圖

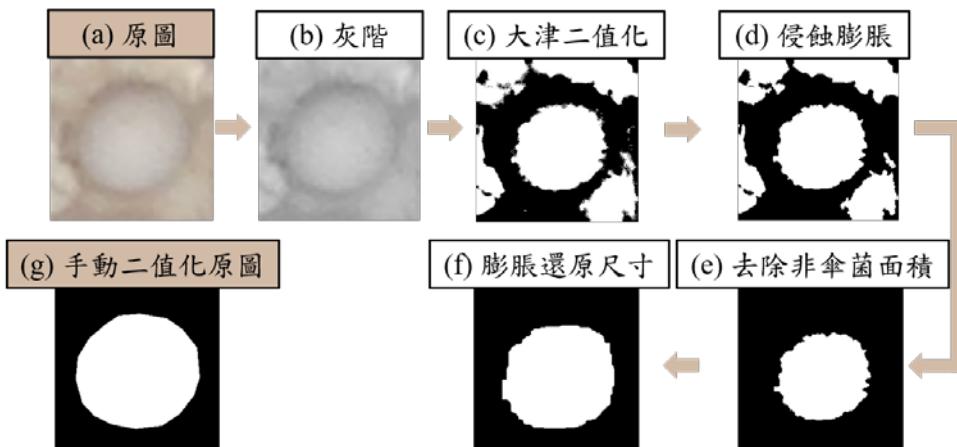


圖 15 輪廓較清晰之百靈菇影像處理過程，其中使用最佳的侵蝕膨脹參數

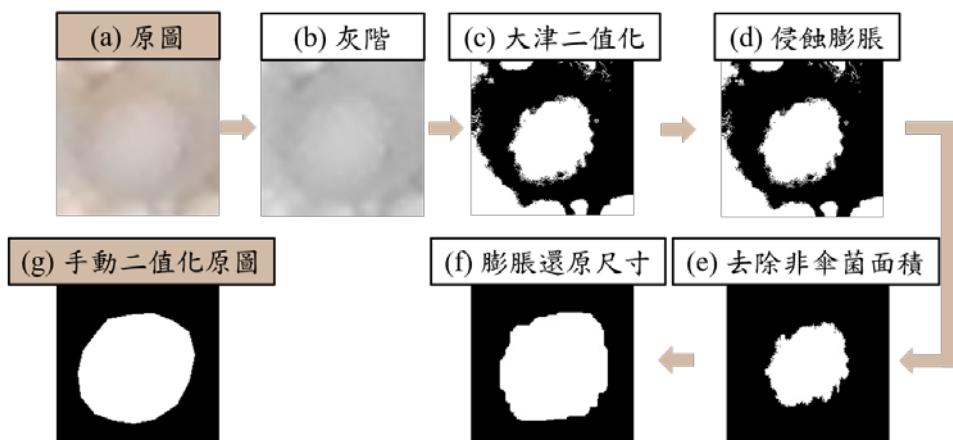


圖 16 輪廓較模糊之百靈菇影像處理過程，其中使用最佳的侵蝕膨脹參數

3.3 硬體整合測試

經過實驗測試後，選擇 Miracast 無線連接擴增實境眼鏡與硬體設備，除了解放雙手，不用額外拿著一台攝影機及螢幕就能得知百靈菇即時生長資料及疏蕾決策擁有方便性，還能讓使用者在菇舍內任意移動保有自由度，大大提升疏蕾一致性、精準度及速度，如圖 17 所示。

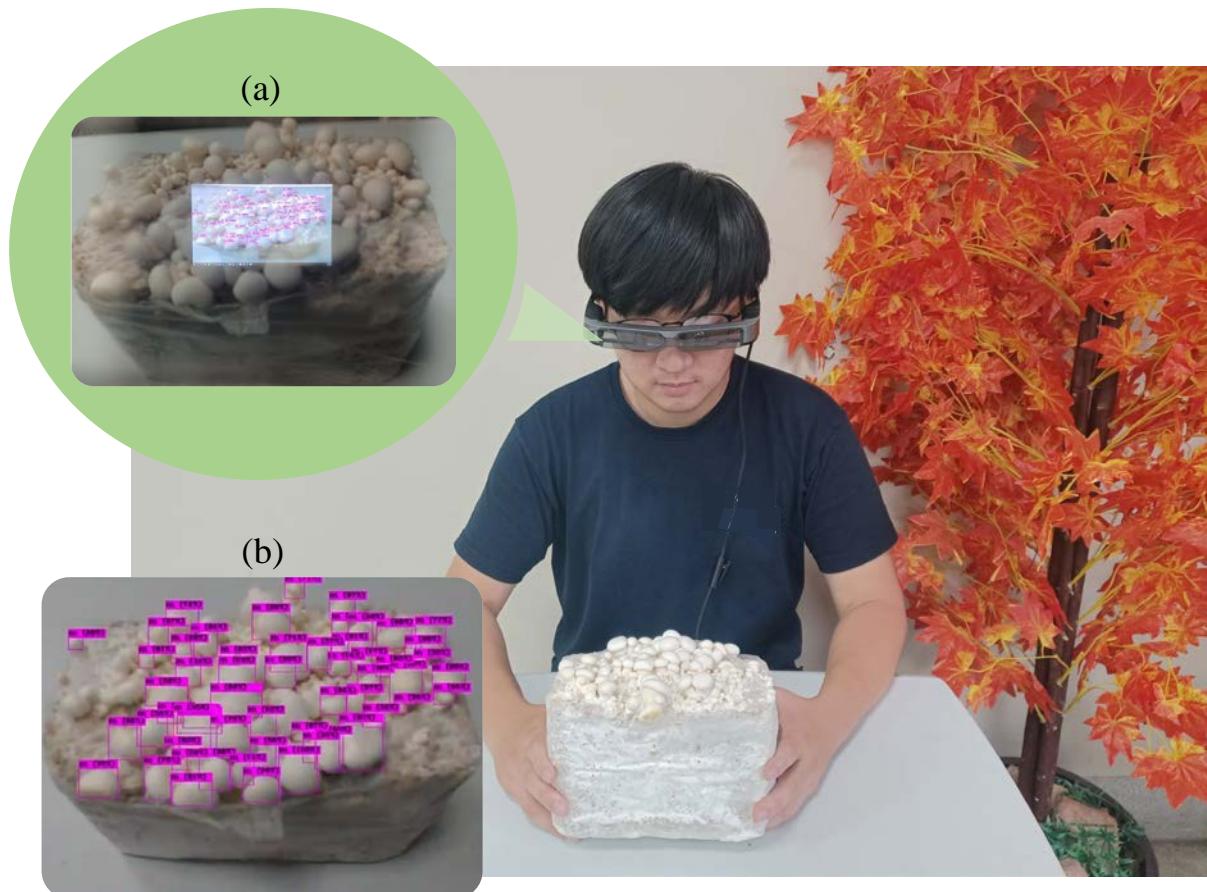


圖 17 硬體整合測試過程：(a)擴增實境眼鏡之實際讀取影像、(b)擴增實境眼鏡實際讀取之 YOLOv4 機器學習辨識結果影像

4. 結論與未來規劃

本研究透過 YOLOv4 深度學習與疏蕾決策驗算法結合擴增實境眼鏡，以得知百靈菇生長訊息，有利於菇農了解當前栽種與疏蕾策略是否得當，其為影響菇類產量及質量的重要因素。本研究於深度學習影像之辨識結果，百靈菇辨識精確率為 78%、召回率為 88%，菇包辨識精確率與召回率均為 100%，有著良好的辨識度。而於影像處理之結果，與手動框選之二值化圖像所計算出之 IoU 最高為 0.791，同時對於清晰與模糊的百靈菇圖像皆能優秀的萃取出其輪廓。未來將針對百靈菇之特徵值與疏蕾決策演算法整合擴增實境眼鏡進行研究，並比較疏蕾策略演算法之精確度，對疏蕾策略演算法更深入的探討。

參考文獻

- [1] 周榮源。2020。袋栽菇類太空包製包技術與菇類智慧化生產技術介紹。智慧化菇類生產技術成果觀摩會，台中，台灣。
- [2] 周榮源。2019。菇類太空包自動化系統發展現況。菇類智慧化生產與農場經營管理研討會專刊，pp. 39-52。
- [3] 石信德、呂昀陞、李瑋崧、陳錦桐、陳美杏和吳寬澤。2016。菇類智慧生產 4.0。菇類生技產業研討會專刊。pp. 35-44。
- [4] C. P. Lu, J. J. Liaw, T. C. Wu and T. F. Hung, “Development of a mushroom growth measurement system applying deep learning for image recognition,” *Agronomy*, vol. 9, pp. 32, 2019.
- [5] C. P. Lu and J. J. Liaw, “A novel image measurement algorithm for common mushroom caps based on convolutional neural network,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 171, pp. 105336, 2016 .
- [6] 李盈萱、陳膺介、徐武煥、戴郁峰、戴郁亮、蔡耀全。2021。基於深度學習技術於蕈菇子實體成長影像監測系統之研發。生機與農機學術研討會，屏東，台灣。
- [7] S. Mitrasinovic, E. Camacho, N. Trivedi, J. Logan, C. Campbell, R. Zilinyi, B. Lieber, E. Bruce, B. Taylor, D. Martineau, E. L.P. Dumont, G. Appelboom and E. S. Connolly Jr, “Clinical and surgical applications of smart glasses,” *Technology and Health Care*, vol. 23, pp. 381-401, 2015.
- [8] J. Cho, S. Rahimpour, A. Cutler, C. R. Goodwin, S. P. Lad and P. Codd, “Enhancing reality: a systematic review of augmented reality in neuronavigation and education,” *World neurosurgery*, vol. 139, pp.186-195, 2020.
- [9] J. Blattgerste, B. Strenge, P. Renner, T. Pfeiffer and K. Essig, “Comparing conventional and augmented reality instructions for manual assembly tasks,” In *Proceedings of the 10th international conference on pervasive technologies related to assistive environments*, pp. 75-82, June, 2017.
- [10] R. Masoni, F. Ferrise, M. Bordegoni, M. Gattullo, A. E. Uva, M. Fiorentino, E. Carrabba and M. D. Donato, “Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality,” *Procedia manufacturing*, vol. 11, pp. 1296-1302, 2017.
- [11] M. H. Stoltz, V. Giannikas, D. McFarlane, J. Strachan, J. Um, and R. Srinivasan, “Augmented reality in warehouse operations: opportunities and barriers,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, pp. 12979-12984, 2017.
- [12] N. M. Kumar, P. R. Krishna, P. K. Pagadala and N. S. Kumar, “Use of smart glasses in education-a study,” In *2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC) I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC), 2018 2nd International Conference on IEEE*, pp. 56-59, August, 2018.
- [13] A. Vahabzadeh, N. U. Keshav, R. Abdus-Sabur, K. Huey, R. Liu and N. T. Sahin, “Improved socio-emotional and behavioral functioning in students with autism following

- school-based smartglasses intervention: Multi-stage feasibility and controlled efficacy study,” *Behavioral Sciences*, vol. 8, pp. 85, 2018.
- [14] M. Mason, “The MIT museum glassware prototype: visitor experience exploration for designing smart glasses.” *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, vol. 9, pp. 1-28, 2016.