

基於 ROS2 和 Web 技術的農業機器人遠端監測和診斷系統

黃登淵^{1,*} 許景賢² 蘇勝朋¹

¹大葉大學電機工程學系

515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

²宏新科自動控制有限公司

528011 彰化縣芳苑鄉工區一路 45 巷 96 號

*kevin@mail.dyu.edu.tw

摘要

隨著自主移動機器人 (Autonomous Mobile Robot; AMR) 在農業領域中的應用發展，實現對這些機器人的有效監測和診斷變得尤為重要。本文提出了一種基於 ROS2 和 Web 技術的農業機器人遠端監測和診斷系統，旨在提升機器人的運維效率和預防性維護。本系統整合了現有的 RTAB-MAP (Real Time Appearance-Based Mapping) 和 3D 建圖技術，並通過數據處理和分析，實現對機器人導航系統和控制系統的即時監控。實驗結果顯示，該系統能夠有效地提高農業機器人的運行可靠性和維護效率，減少了因故障導致的停機時間。在未來工作方面，將持續探討如何進一步提升數據分析的深度和準確性，以及如何擴展系統以適應更多不同類型的農業機器人。

關鍵詞：農業機器人，ROS2，遠端監測，故障診斷，Web 技術

Agricultural Robot Remote Monitoring and Diagnostic System Based on ROS2 and Web Technology

DENG-YUAN HUANG^{1,*}, JING-MAU SHIU² and SHENG-PENG SU¹

¹Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University

No.168 University Rd., Dacun, Changhua 515006, Taiwan, R.O.C.

²Hong-Sin-Ke Automatic Co. Ltd.

No. 96, Ln. 45, Gongqu 1st Rd., Fangyuan Township, Changhua County 528011, Taiwan, R.O.C.

*kevin@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

Autonomous mobile robots (AMRs) are being increasingly applied in agriculture, and effectively monitoring these robots and diagnosing problems is becoming increasingly crucial. This paper presents a remote monitoring and diagnostic system for agricultural robots based on the Robot Operating System 2 and web-based technology with the goals of enhancing operational efficiency and improving preventive robot maintenance. The system integrates existing real-time appearance-based

mapping and 3D mapping technologies combined with data processing and analysis methods to achieve real-time monitoring of robot navigation and control systems. In evaluation experiments, the system effectively improved the operational reliability of agricultural robots and the efficiency of their maintenance, reducing downtime caused by malfunctions. In future work, the depth and accuracy of the data analysis could be enhanced, and the system could be expanded to accommodate more types of agricultural robots.

Key Words: Agricultural robot, ROS2, remote monitoring, fault diagnosis, Web technology

一、文獻探討

近年來，機器人技術和智慧物聯網（Artificial Intelligence of Things; AIoT）的快速進展，特別是在農業領域，隨著自動化技術的發展，如何有效地遠程監控和維護農業機器人成為了研究的熱點。本文將探討基於 ROS2 和 Web 技術的農業機器人遠端監測和診斷系統的設計與實現，並分析系統的主要功能和技術優勢及研究成果。

農業機器人結合先進的感測技術、機器手臂、和人工智慧，目標在提升農業生產效率及其品質。農業機器人具備自動導航能力，能夠在複雜多變的果園環境中準確移動。透過高精度的攝影機和各種感測器，農業機器人能夠即時監測作物生長狀況，並進行精準的施肥、灌溉與病蟲害防治。此外，這些機器人還能執行如水果採摘、除草和土壤分析等高勞動強度的任務，以減輕人力負擔。同時，數據記錄和分析功能使農業管理更加智慧化，有助於決策者根據即時數據調整農業策略，從而實現更高的產量和更好的農產品質。

近年來，由於機器人技術的突飛猛進，進一步推升其在農業應用中的影響力，同時成功解決從種植到收穫的諸多挑戰。農業機器人，包括空中、地面和專用系統，採用電腦視覺和人工智慧等技術，能夠執行農作物監測、雜草管理和自主收割等任務 [1, 3]。這些創新目標在提高生產力、優化資源利用並推動永續農業實踐 [11]。尤其在溫室環境中，機器人平台提供局部灌溉、化學應用和收穫等解決方案 [12]。儘管潛在的好處非常顯著，但挑戰依舊存在，包括高昂的初期成本、資料安全問題和監管挑戰。未來展望涵蓋數據分析、自動駕駛車輛和專用農作物機器人的進步，以上進展顯現研究人員、工程師和農民之間的合作，以充分發揮農業機器人的潛力 [11]。

在機器人遠端監控的研究中，如 [5, 10, 17] 提出針對雲平台的機器人遠端監控系統及工業遠端機器人的遠端監控與維護，這種系統利用了 ROS 的高度模組化和跨平台的

特點，整合了 Web 技術，實現對機器人的即時數據收集、處理和顯示，並根據歷史運行數據建立機器人的穩定運作標準值，將當前數據與運作標準值做比對，來評估機器人的運行狀況，並即時預警，方便維護人員採取應對措施，表 1 針對上述三篇機器人遠端監控相關文獻與本研究的優缺點比較說明。

綜合考慮機器人遠端監控文獻中的優勢，本研究提出一套基於 ROS Bridge 與 Flask 輕量級網頁框架的簡易監控服務；所提系統不僅保留 Web 技術的跨平台便利性，還可透

表 1. 機器人遠端監控研究優劣比較表

文獻摘要	優點	劣勢
[5]設計了一個基於 Web 和雲平台的機器人遠端監控系統，使用 Web 技術實現遠端資料傳輸和監控，並結合雲平台進行資料儲存和處理，主要應用於機器人的遠端操作和監控。	即時監控，提高系統交互性和可操作性。雲平台，提高資料管理效率和可靠性；多功能性，適應多種機器人的遠端監控。	透過 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) 技術實現數據通訊，開發和維護成本高，網路延遲可能會影響即時監控效果。
[10]提出一個基於 Web 的使用者界面，用於遠端控制和監控自主機器人系統，使用 HTML5、CSS3 和 JavaScript 等現代 Web 技術。	易用性：界面設計簡單直觀，易於使用和學習；跨平台性：Web 界面可在多種設備上使用；擴展性：系統設計靈活，易於擴展和升級。	透過客戶端-服務器架構實現，但在安全性，Web 應用的安全性需要特別注意，防止潛在網路攻擊。
[17]提出一個工業機器人的遠端監控和維護系統，利用 IoT 技術和感測器網路，實現工業機器人的狀態監測和預測性維護，主要應用於工業生產線中的機器人系統。	預測性維護，透過即時監測和資料分析，實現機器人預測性維護，減少停機時間。透過 IoT 技術，提高設備之間的互聯互通，資料蒐集和分析。	實現成本高，在設備資料分析維護上較為深入，但缺乏易用性及跨平台特性。

過現場區域網路進行連線查看，確保連線資料的安全性，當中只有經過處理的資料才會被傳送到雲端資料庫中。此外，系統在機器人本地端設置狀態機制，不僅可即時監控機器人運行狀態，亦可透過資料分析進行狀態預測，可大幅提升設備的監控效能和預警能力。

ROS 和 Web 技術在農業機器人的應用能顯著提升操作效率與管理智慧化。ROS 提供分散式系統架構，使得機器人的感測器、運動控制和導航模組可以協同工作，實現高效、穩定的任務執行。同時，ROS 的即時通信和模組化設計有助於快速開發和部署新功能。Web 技術則允許遠端監控和操作農業機器人，透過瀏覽器界面，使用者可以即時查看機器人的狀態和環境資料，並進行操作指令的下達。此外，資料分析和可視化工具能夠幫助農業管理者做出更明智的決策。整合這兩項技術，農業機器人不僅能夠高效執行各種農業任務，還能實現遠端監控與智慧管理，提升整體農業生產的效率和精準度。

ROS 機器人系統應用廣泛，其中常見的應用包括 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping；同步定位與建圖)，又可分為 Lidar SLAM 和 Visual SLAM、自動導航、機器人操作控制。在機器人技術領域，三維環境重建 [4, 9, 13, 14] 是 SLAM 技術的一個重要分支，利用各種感測器，如深度相機和光達，SLAM 技術能夠在未知環境中創建高精度的三維地圖。這些地圖不僅提供了空間位置資訊，還增強了機器人的導航和交互能力。

自主導航及避障技術 [2, 6, 8] 使機器人能夠在各種環境中自主行動，不僅限於熟悉的場所，也包括未知的地區。這項技術依靠先進的感測器、地圖建構、路徑規劃和動態障礙物避障等技術，來實現安全和高效的導航。機器人首先透過感測器如光達、雷射掃描儀或攝影機來收集周圍環境的數據，這些數據隨後被用來建構環境的數位模型或更新現有的地圖。在服務機器人領域，自動導航技術使得機器人可以在餐廳、醫院和機場等公共場所提供引導、運送物品等服務。

機器人操作 [7, 14-16] 通常涉及精確控制和任務執行，例如在製造業或醫療手術中的應用。近年來，開源的 ROS 平台促進了這些技術的發展，這些方法在靈活性和交互操作性方面取得了顯著進展，並且已經被廣泛應用於工業、醫療和消費領域。然而，ROS 機器人系統仍然面臨諸多挑戰，例如即時性能、可靠性、安全性以及更智慧的決策支持等問題，未來仍需開發更加高效和可靠的解決方案來應

對這些挑戰。

有關於農業機器人在採收水果上的應用，例如：位於以色列新創公司 Tevel Aerobotics Technologies (<https://www.tevel-tech.com/>) 所開發的自動化水果採收無人機系統 FAR (Flight Autonomous Robot)，與位於洛杉磯南灣的美國新創公司 Traptic (<https://www.traptic.com/>)，在 2018 年推出一款名為 Ceres 的自動化草莓採收機器人，該機器人結合 3D 視覺系統、機器手臂和客製化夾爪，能精準偵測並採收成熟的草莓，以解決農業勞動力短缺的問題。

二、研究方法

本文所提的農業機器人遠端監診系統架構如圖 1 所示，本文以自主導航機器人系統 (AMR) 和控制系統的即時監控為目標，系統可分為四個層級，核心始於實體層的自主移動機器人與各式感測器元件，通過 ROS2 平台的支援，整合模組化的任務執行單元和資源管理單元。感知層的建構是系統中至關重要的一環。在這一層中，AMR 裝備了 D435i 深度相機和 Lidar 雷射掃描器，這些感測器不僅可以捕獲 3D 視覺資訊，還能進行環境掃描，為機器人的導航和障礙物避障等提供數據支援。在網路層，透過 ROS 套件中的 ROS Bridge 建構數據通信的橋樑。通過 WebSocket 協定，實現了 AMR 和 Web 伺服器之間的無縫數據流通。這使得基於 Web 的客戶端能夠即時存取機器人的狀態和感測器數據，併發送操作命令，大大增強了系統的交互性和可控性。應用層的開發集中在構建一個全功能的 Web 伺服器。操作者能夠通過簡單的 Web 頁面即時監控機器人的各種狀態，數據分析和系統診斷任務。透過現代前端的 Web 技術的應用，如 HTML5、CSS3、JavaScript 以及後端的 Flask 框架，伺服器確保了系統的回應速度和數據處理能力。

在遠端監診系統中，對於環境感知尤為重要，本文在感測器硬體上安裝深度相機及光達，並透過 ROS2 系統來整合

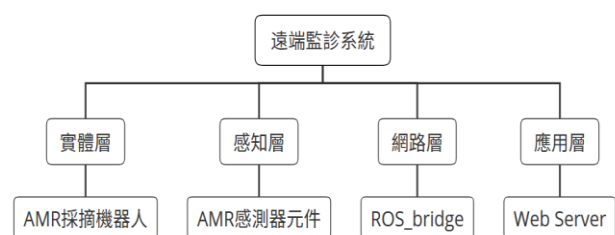


圖 1. 本文所提農業機器人遠端監診系統架構

環境數據的採集，在本文中深度相機選用 Intel RealSense D435i，其提供了顏色豐富的視覺影像以及深度資訊，這種影像捕捉了環境中的細節和表面質感，對於識別場景中的特定特徵和地標非常有幫助，同時搭配單線 Lidar 進行二維場景建置，Lidar 感測器透過發射雷射光束並測量其反射時間來繪製出環境的精確距離，藉以形成一個二維平面圖。

在自主導航機器人領域中，RTAB-MAP 結合視覺與光達的資訊，是目前相當流行的 SLAM 演算法，RTAB-MAP 是一種高效的 SLAM 技術，廣泛應用於自動導航與環境建模。本文旨在深入探討透過感測器提供 RTAB-MAP 演算法在 ROS 環境下針對果園的定位與環境建圖能力，其如圖 2 所示，透過這個方法，可以提升機器人在複雜環境中的感知能力與定位準確度。

為了使來自這兩種來源的數據能夠互補並提供一個統一的环境模型，首先需要進行數據的時間同步和空間校準。這一步驟確保了無論是 Lidar 還是 RGB-D 相機捕捉到的數據都能在同一時間點和空間座標系中得到正確的對應和表示。接著，透過數據融合技術將 Lidar 的結構資訊和 RGB-D 的細節資訊結合在一起，形成了一個既有深度又有細節的綜合地圖，其如圖 3 所示。

RTAB-MAP 的實現：首先對 Lidar 和 RGB-D 深度相機接收到的數據進行時間同步，以確保資訊的一致性，因為數據整合需要在相同的時間點上對周圍環境進行分析。隨後進行空間校準，這一步驟涉及確定不同傳感器之間的相對位置和方向，以保證數據在同一個空間座標系中被正確融合和解釋。

接著，系統從 RGB-D 相機產生的點雲和 Lidar 點雲中提取特徵。這些特徵通常包括邊緣與角點等顯著的幾何特徵。RTAB-MAP 使用快速最近鄰搜索 (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors; FLANN) 等演算法來匹配這些特徵，其如圖 4 所示，這一過程 (特徵匹配) 對於維持地圖的連續性和精確性非常關鍵。

透過這些匹配的特徵點，RTAB-MAP 進行數據融合，這包括將 Lidar 提供的結構資訊與 RGB-D 相機提供的顏色和深度資訊結合起來，形成一個統一且詳細的環境模型。這個融合的點雲地圖不僅有利於三維空間的理解，也可以被進一步處理成二維平面地圖，以適用不同的應用場景。

回環檢測 (Loop Closure Detection) 能力是 RTAB-MAP 演算法的核心，這個能力使得系統能夠識別先前已走過的地

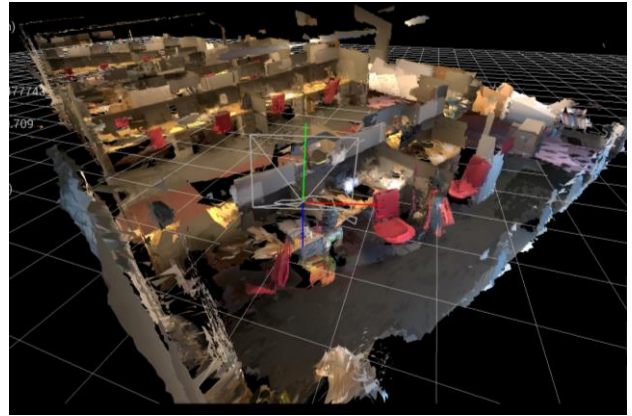


圖 2. RTAB-MAP 三維環境重建圖
(來源:<https://introlab.github.io/rtabmap/>)

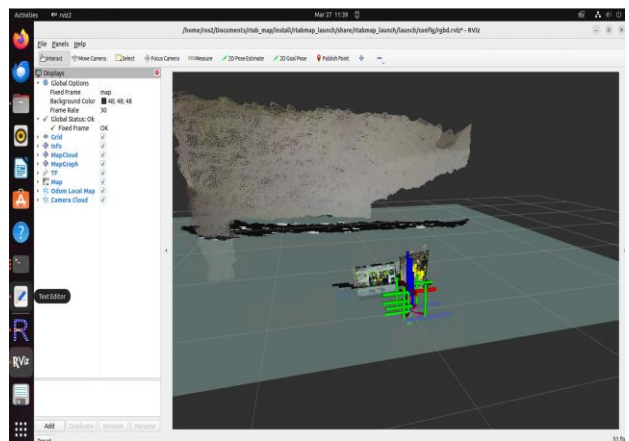


圖 3. 結合 Lidar 與 RGB-D 的 RTAB-MAP 建圖結果

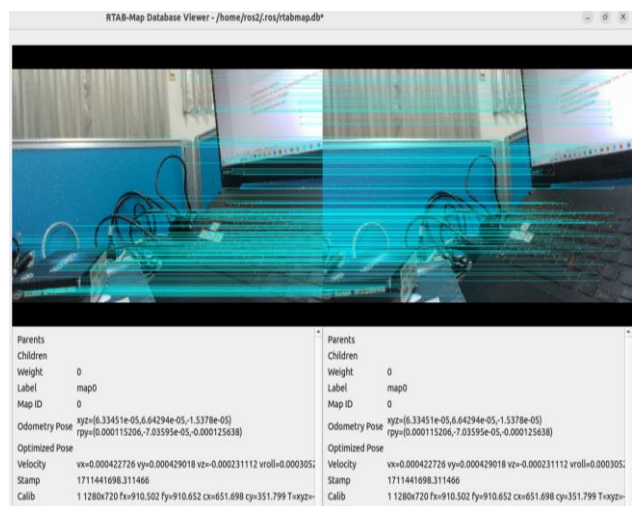


圖 4. RTAB-MAP 特徵匹配圖

方，透過這一個方法可糾正位置估計的漂移，從而提高長時間運行的精確性。RTAB-MAP 完成環境的定位與建圖後，所得到的地圖資料可以在多個方面被廣泛應用，生成的地圖

主要被用於提高機器人或自動駕駛車輛的導航能力。地圖上的每一個特徵點都能幫助機器人識別其所在位置，並計算到達目的地的最佳路徑。在農業機器人的應用中，基於精確地圖的導航可以幫助機器人避開障礙，如樹木和其他農業設施，從而在廣闊的農田中高效進行種植、澆水或收割等作業。

當 RTAB-MAP 完成環境建圖之後，將生成的地圖整合到 ROS2 中的 Nav(Navigation2) 框架以進行實際導航，Nav2 是 ROS2 中的一個內置導航框架，主要用於確保移動機器人能夠安全地從一個位置（例如點 A）移動到另一個位置（例如點 B）。除了基本的點對點導航外，Nav2 同樣適用於其他更複雜的機器人導航任務，比如動態點跟蹤。在執行這些任務時，Nav2 需要進行動態路徑規劃，計算合適的電機速度，並有效地避開障礙物，以確保機器人可進行平滑且安全的移動。

以下步驟說明如何將 RTAB-MAP 與 Nav2 框架結合並用於機器人即時導航。

1. 首先，RTAB-MAP 生成的地圖需要被保存成 ROS2 可以識別的格式。RTAB-MAP 通常會生成兩種類型的地圖：三維點雲地圖和二維占用網格地圖。對於使用 Nav2 進行導航，我們主要使用如圖 5 的二維網格地圖（Occupancy Grid Map）。使用 RTAB-MAP 的導出功能，將地圖保存為 ROS 兼容的格式，如 .pgm（Portable Gray Map）和 .yaml 文件。這些文件將包含地圖的尺寸、分辨率與原點等資訊。
2. 在將地圖整合到 Nav2 之後，需要配置 Nav2 以使用該地圖進行導航。在 ROS2 中，使用地圖服務器（Map Server）nav2_map_server 節點來加載地圖。在 Nav2 的配置文件中指定地圖文件的位置，以便於當機器人啟動時，map_server 可以自動加載地圖。導航配置：調整 Nav2 中的各種導航參數，包括代價地圖（Cost Maps）的配置、規劃器（Planner）設置和控制器（Controller）設置。代價地圖是指在機器人導航中用於表示環境中障礙物的成本，幫助機器人評估不同區域的通行難易程度，根據代價地圖來規避障礙。規劃器是計算從起點到目標點的最優或可行路徑，而控制器則是執行路徑規劃結果，控制機器人的實際運動，確保沿計劃路徑安全行駛。這些參數會根據機器人的實際運動特性和環境條件進行調整。
3. 使用 RTAB-MAP 進行即時定位，並通過 Nav2 執行導航任務。啟動定位：在機器人自主導航的領域中，整合

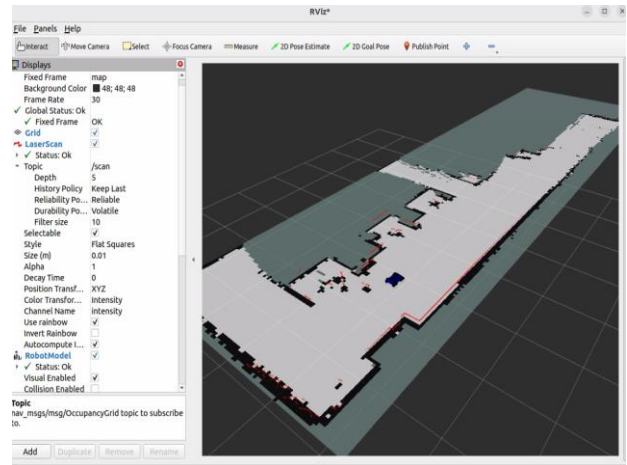


圖 5. PGM 網格地圖示意圖

RTAB-MAP 和 Nav2 框架為機器人提供精確的即時定位與高效的路徑規劃能力，使其能在多變的環境中安全穩定地運行。RTAB-MAP 專門用於機器人的即時定位和地圖構建，通過其定位模式，機器人能夠在已知的地圖上確定自己的位置，定位方式是通過 rtabmap_ros 套件中的 Localization 節點來實現的。一旦機器人的位置被確定，就可以進行路徑規劃和導航任務的啟動。

4. 接下來，利用 Nav2 的 nav2_bringup 包，機器人啟動導航系統，這包括地圖服務器、導航規劃器和控制器等核心組件的啟動。在這個基礎上，機器人可以接收到目標位置的指令，結合 RTAB-MAP 提供的定位資訊和 Nav2 的路徑規劃能力，有效地完成從當前位置到目標位置的移動。

透過以上的技術整合，機器人不僅能夠在複雜環境中進行有效的自主導航，還能夠即時更新其在環境中的位置，以確保導航的準確性和安全性。前述一系列的技術配置和步驟雖然複雜，但一旦設定妥當，就能顯著提高機器人在現實環境中的操作效率和適應性。

本文透過 Web 技術實現對自主移動機器人的遠端監控和診斷。結合了 ROS Bridge 套件，橋接了傳統機器人控制系統與現代網路應用之間的溝通。這一方法主要通過訂閱三個 ROS 主題：/odom、/cmd_vel 和 /camera/image_raw，分別用於機器人的定位與姿態數據、運動指令和原始視覺輸入的即時監控，其中 Web 視覺化介面呈現如圖 6 所示。

首先，/odom 主題提供了機器人的當前位置和速度資訊，這對於即時追蹤機器人的運動狀態至關重要。接著，

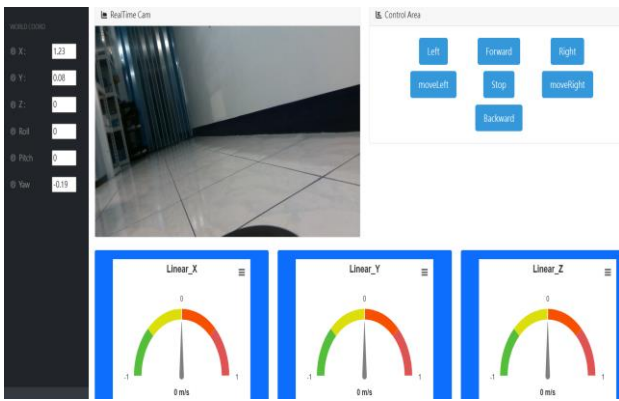


圖 6. ROS 系統 Web 監控

/cmd_vel 主題允許遠端使用者向機器人發送控制指令，這些指令直接影響機器人的運動軌跡和速度。最後，/camera/image_raw 主題則傳輸從機器人攝影機捕獲的未經處理的圖像數據，提供視覺反饋，這對於監控環境中的物體和障礙物識別至關重要。

透過 ROS Bridge，這些數據流可以無縫整合到網頁前端應用中，實現跨平台的數據可視化和交互操作。我們採用了 Flask 作為後端服務框架，負責接收來自 ROS Bridge 的數據並將其傳遞到前端應用。Flask 的輕量級和靈活性使我們能夠快速開發和部署後端服務，同時保持高效的數據處理和傳輸，使用者可透過行動裝置或個人電腦進入如圖 6 的 Web 監測頁面，獲取當前機器人狀態，同時可針對機器人做人為指令移動操作。該應用不僅擴展了 AMR 系統的適用場景，還提高了操作的靈活性和系統的可介入性。此外，這種方法使得機器人系統的遠端故障診斷和維護更加高效，從而降低了操作成本並提升了系統的可靠性。

在診斷部分，我們設計了一個狀態機制，該機制綜合利用機器人的輸出訊號如編碼器反饋、馬達電流、IMU 訊號、線速度及角速度等關鍵性能指標。透過對這些訊號的分析，判斷當前的設備狀態及其對應的問題，如表 2 所示。當識別到的問題超出機器人本地端狀態機制的自我修復能力時，系統會自動將詳細的診斷結果上傳到中央資料庫，並即時更新狀態，以此通知操作人員介入處理。

以上方法不僅提升系統的自主操作能力，同時也增強對異常狀況的即時響應，確保機器人系統的高效與穩定運行。本文的貢獻在於提出如何運用現有的 ROS 基礎架構和現代網頁技術，開發出一套功能全面完整的遠端監控與診斷解決方案，進一步推動機器人技術在工業和商業領域中的應用。

表 2. 設備狀態及對應問題

狀態指標	正常範圍	異常現象	可能問題	執行動作
編碼器反饋	指定的回轉範圍內	回轉異常大或小	馬達故障或驅動器問題	檢測馬達驅動器電流是否正常
馬達電流	按負載預期出力	出力不穩定或過高、過低	負載異常、馬達損壞或電力供應問題	檢查負載、馬達狀態和供電系統
IMU 訊號	預定路徑上的正確位置	位置偏差	導系統失準、感應器故障	校準導系統，檢查或更換感應器
線速度	預設速度範圍內	速度過快或過慢	馬達控制問題、輪胎磨損	調整速度設定，檢查馬達控制系統
角速度	預設角速度範圍內	角速度過快或過慢	導航錯誤、轉向系統損壞	檢查和校正導航系統

三、實驗結果

在實驗結果中，我們透過幾個不同的應用情境，來設計並實現農業機器人在果園上的遠端監測與診斷系統的實驗測試，在面對不同地形與情境時所記錄下來的參數狀態，同時透過狀態機制所接收到的診斷結果來驗證判定是否正確，表 3 為穩定的測試條件下所測得的結果，表 4 則為極端的測試條件下所測得的結果。

在本研究中，我們系統性評估了自走車在理想和極限操作條件下的結果。在我們設計的遠端監測與診斷系統結果表明，在表 2 的標準操作條件下，機器人的所有關鍵狀態指標均在預期範圍內，表現系統設計的有效性。然而，在表三極端條件下，許多狀態指標出現異常，揭示了當前系統在面對非預期環境和負荷時的局限性，當發生的異常狀態無法透過狀態機制自行排除時，即會發布當前狀態提醒人員發生的故障狀況需由人力介入排除。

表 3. 穩定測試條件下正常的診斷結果

測試條件	參數	正常範圍	實驗數據	診斷結果
在平整的農場道路上進行直線行駛，無任何障礙物。	編碼器反饋	0-360 度	360	正常
馬達在輸出適中負載下工作，運行平穩。	馬達電流	0-5 A	4.5	正常
機器人在平穩運行中，無顯著震動或傾斜。	IMU 訊號	±3g 加速度	2.8g	正常
機器人維持在預設的最大速度限制以下行駛。	線速度	0-1 m/s	0.9	正常
在平整地面上進行輕微的方向調整。	角速度	0-30 °/s	25	正常

表 4. 極端測試條件下異常的診斷結果

測試條件	參數	正常範圍	實驗數據	診斷結果
機器人在不平坦的土地上操作，導致編碼器讀數不穩定。	編碼器反饋	0-360 度	30	異常-位置偏差
機器人在攀爬斜坡時馬達承受過大負載。	馬達電流	0-5 A	5.5	異常-電流過高
在行駛過程中遇到突然的坑洞，導致 IMU 感應到超限加速度。	IMU 訊號	±3g 加速度	3.2g	異常-加速度超限
機器人下坡時速度失控，超出安全範圍。	線速度	0-1 m/s	1.2	異常-速度超限
在避讓地面障礙物時，角速度突然增加超過正常值。	角速度	0-30 °/s	35	異常-角速度超限

四、結論

在本研究中，我們透過綜合運用 ROS2 系統、RTAB-MAP 演算法、ROS Bridge 以及 Flask 網頁即時監控，設計並實現了一套針對農業機器人的自動導航狀態排查。這一狀態排查不僅能夠即時監測和排查機器人在農業操作中遇到的各種故障狀態，還能追蹤其移動軌跡，並在故障發生時嘗試自我排除與系統恢復。更重要的是，該系統具備有故障資訊記錄和學習功能，使機器人能夠從經驗中不斷優化故障處理流程和移動策略。

透過整合前述關鍵技術，我們的系統不僅提高了農業機器人的操作效率，也增強了其在複雜農業環境中的自主性和適應能力。即時數據的監控和分析確保了機器人操作的高效性，同時故障自我排除功能大大降低了人工介入系統恢復的成本，進而提升整個農業生產過程的自動化水準。此外，故障記錄和學習機制的設計，使得每一次的操作故障都轉化為機器人系統未來操作的寶貴經驗，如此可持續推動技術的更新。

綜上所述，本文不僅在技術層面展示了一種高效、智慧的農業機器人自動導航系統的設計方案，更在實際應用中驗證了其可行性和有效性。這些成果預示著智慧農業機器人在未來農業生產中的關鍵作用，為農業自動化技術的發展開闢了新的道路。

誌謝

本文承國科會產學合作計畫「應用於農業水果採摘機器

人 SLAM 視覺導航與遠端監診系統建立，NSTC 112-2622-E-212-005-」補助完成，在此表達十分感謝之意。

參考文獻

- Amin, A., X. Wang, Y. Zhang, T. Li, Y. Chen, J. Zheng, Y. Shi and M. A. Abdelhamid (2023) A comprehensive review of applications of robotics and artificial intelligence in agricultural operations. *Studies in Informatics and Control*, 32(4), 59-70.
- Borenstein, J. and Y. Koren (1991) The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3), 278-288.
- Botta, A., P. Cavallone, L. Baglieri, G. Colucci, L. Tagliavini and G. Quaglia (2022) A review of robots, perception, and tasks in precision agriculture. *Applied Mechanics*, 3(3), 830-854.
- Campos, C., R. Elvira, J. J. G. Rodríguez, J. M. Montiel and J. D. Tardós (2021) ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap slam. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6), 1874-1890.
- Chenxi, Z., M. ZhongHua, H. Changxin, and B. Yucen (2019) Remote monitoring system of four-wheel drive robot based on web and cloud platform. *IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chengdu, China.
- Dijkstra, E. W. (2022) A note on two problems in connexion with graphs. *Edsger Wybe Dijkstra: His Life, Work, and Legacy*, 287-290. Association for Computing Machinery, New York, NY.
- Fairchild, C. and T. L. Harman (2016) ROS robotics by example. Packt Publishing Ltd.
- Fox, D., W. Burgard and S. Thrun (1997) The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1), 23-33.
- Labbé, M. and F. Michaud (2019) RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation. *Journal of Field Robotics*, 36(2), 416-446.
- Perier, H., E. Matheson and M. Di Castro (2022) Web based user interface solution for remote robotic control and monitoring autonomous system. *Proceedings of the 19th International Conference on Informatics in Control*,

- Automation and Robotics (ICINCO 2022), Lisbon, Portugal.
11. Singh, S., R. Vaishnav, S. Gautam and S. Banerjee (2024) Agricultural robotics: a comprehensive review of applications, challenges and future prospects. IEEE 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Theme: Healthcare and Internet of Things (AIMLA), Tiruchengode, India.
 12. Tangarife, H. I. and A. E. Díaz (2017) Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review. IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), Cartagena, Colombia.
 13. Zhang, J. and S. Singh (2014) LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time. *Robotics: Science and Systems*, 2(9), 1-9.
 14. Zhang, G., Z. Li, F. Ni and H. Liu (2019) A real-time robot control framework using ROS control for 7-DoF light-weight robot. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Hong Kong, China.
 15. Zhao, J., S. Liu and J. Li (2022) Research and implementation of autonomous navigation for mobile robots based on SLAM algorithm under ROS. *Sensors*, 22(11), 4172.
 16. Zhi, L., and M. Xuesong (2018) Navigation and control system of mobile robot based on ROS. IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing Jinkaoyuan Conference Center, China.
 17. Zhou, J., X. J. Ding, L. J. Sun, Y. F. Yang, Y. H. Wang and W. W. Liu (2022) A remote monitoring and maintenance system for industrial robots. *Journal of Physics: Conference Series*, 2366(1), 012036, IOP Publishing.

收件：113.05.20 修正：113.06.21 接受：113.08.23