

災害應變：基於人工智慧之群體陸海空及水下機器人

Disaster Response: Artificial Intelligence in Swarm Ground, Surface, Aerial and Underwater Robot

李敏凡、楊禮榮、孔維義

Min-Fan Ricky Lee, Li-Jung Yang, Wei-Yi Kong

在福島核災及汶川地震後，各國政府有關單位意識到災害應變機器人的迫切性。台灣有許多的天然或人為災害，通常無法在第一時間即時派遣相關人員去搜救或探勘。本文提出以陸海空及水下機器人協同應用於災害應變，異構群體機器人到現場去採集環境大數據，再經過雲端人工智慧分析，做出應變之最佳決策，相關任務包括目標之監測、搜索與救援。同時本文針對災害現場之安全，保安和救援應用，進而滿足各種實際災害應變之任務，減少救災人員的傷亡，並解決人力短缺無法做大範圍的搜救，有效的保護國民安全。

After the Fukushima nuclear disaster and the Wenchuan earthquake, the relevant government agencies in various countries realized the urgency of disaster response robots. There are many natural or man-made disasters in Taiwan, and it is usually impossible to dispatch relevant personnel to search and rescue or exploration at the earliest time. This paper proposes that ground, marine, aerial, and underwater robots collaboration in disaster response. Heterogeneous robots collect environmental big data from the scene and then use artificial intelligence analysis in the cloud to make the best decision. Related tasks include target monitoring, search and rescue. This paper aims at the safety, security and rescue in disaster response, and thus responding to various actual disasters; reducing the casualties, addressing the shortage of manpower, and large-scale search and rescue.

一、前言

災害應變 (Disaster Response) 包括了災前預警，災時搜救 (Search and Rescue, SAR) 及災後復原三大重要任務，而災害包括了自然 (大陸汶川大地震 69,227 人死亡，直接經濟損失 8,451 億元人

民幣，東日本大震災，15,893 人死亡，經濟損失 2,100 億美元。) 與人為 (美國 911 恐攻，死亡人數是 2,996 人，經濟損失 1,780 億美元)。因此各國均設有相關災害應變單位，包括聯合國的災害風險降低辦公室及我國的國家災害防救科技中心。

人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 誕生於 1950 年代，由於受限於電腦大數據儲存及運算能力的限制，一直未能突破真正實現的瓶頸，直到 2016 年 3 月 AlphaGo 以 4：1 戰勝世界職業圍棋九段棋士，AI 在與人類智慧相比上，驗證了實務可行性，採用深度學習的 AI，對大數據特徵，展現了優於人類的分類推理能力⁽¹⁾。而在災害應變應用上從災前預警⁽²⁾，災時搜救⁽³⁾，及災後復原⁽⁴⁾，也正處於概念提出與驗證階段。

協作對於機器人 (Robot) 群體在災難應變環境中的有效表現至關重要。特別是具有不同任務的異構機器人在複雜場景中進行協作，譬如受害者搜索⁽⁵⁾。或是在尋找倒塌建築物中的受害者時，機器人能夠穿過狹窄的空間。譬如蛇形機器人就適用於此搜索任務⁽⁶⁾。

二、系統架構

本文提出以自主機器人應用於災害應變－搜救 (Disaster Response-SAR, Search and Rescue)，將人工智慧演算法，搭配無人載具 (Unmanned Vehicle)，使其具有自主行為 (Autonomous behavior)，進而提升為移動機器人 (Mobile Robot)，包括陸海空及水下四棲運動機制，架構如圖 1(a) 所

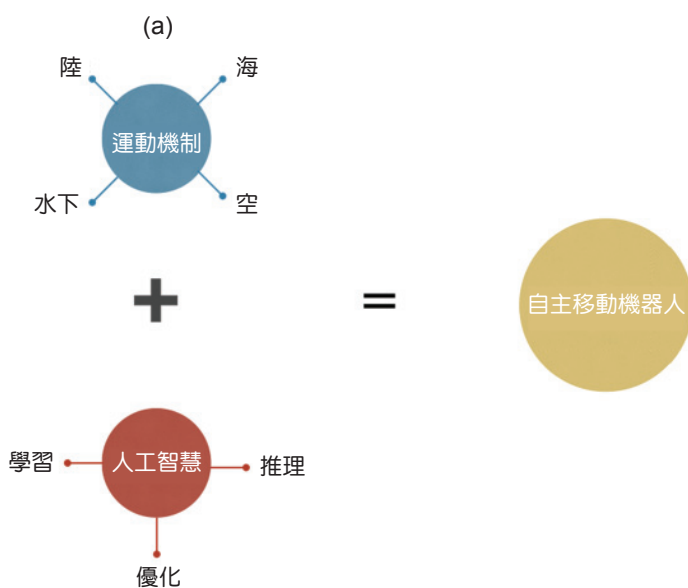


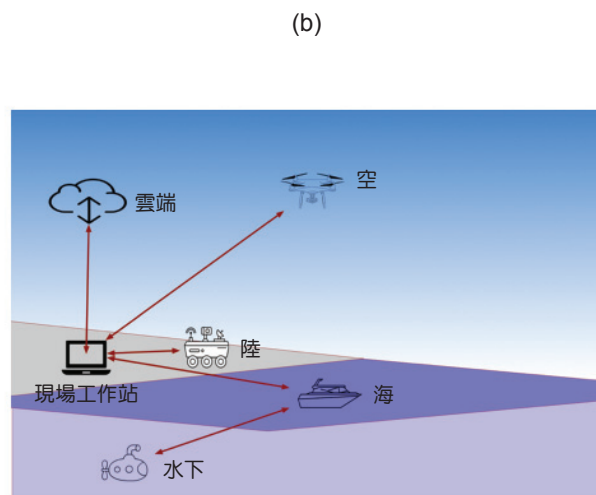
圖 1. 災害應變：(a) 人工智慧與機器人、(b) 情境。

- 示。本文所提出的災害應變－搜救概念情境如圖 1(b) 所示。陸海空及水下機器人分別進行
- (1) 各災害環境空間之大數據『影像搜集』，經由現場工作站傳至雲端圖形處理單 (Graphic Processing Unit, GPU) 伺服器進行，
 - (2) 『訓練』深度學習模型及，
 - (3) 『模型驗證』，訓練好之深度學習模型經由雲端傳至現場工作站再傳至各陸海空及水下機器人進行，
 - (4) 現場物件與環境『辨識』。

圖 2 說明了本文提出的陸海空及水下移動機器人群體智慧的行為控制系統架構。現場機器人自主行為 (避障、目標搜索、軌跡追蹤和編隊) 和遠端人工智慧 (應變策略)，前進指揮部位於現場工作站，AI 應變中心位於雲端。

三、無人載具架構(硬體運動機制)

移動機器人 (Mobile Robot) 與無人載具 (Unmanned Vehicle) 的不同，在於控制模式。一般來說，只要是無人類駕駛的可在環境中運動的平台都是無人載具 (遙控，自動或自主均可)，而移動機器人也是無人載具的一種，但須有自主能力，來應付未知之不確定性。



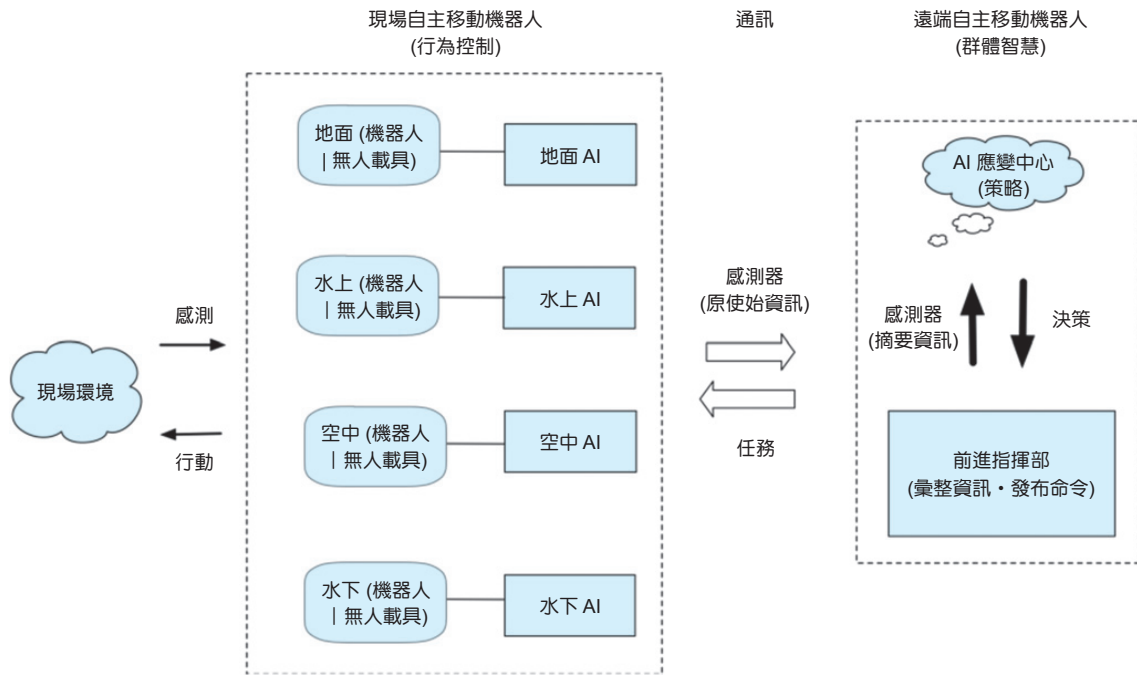


圖 2. 系統架構。

- (1) 遙控：由人類以無線或有線方式控制。
- (2) 自動：電腦程式執行規畫好的任務。
- (3) 自主：能應變 (處理無法預知的狀況－行為控制 (目標搜尋、避障、軌跡追蹤及保持隊形))。

圖 3 為本文使用的陸海空及水下機器人⁽⁷⁾。無人載具上分別搭載各式感測器⁽⁸⁾，如聲納、雷射測

距儀、相機、全球定位系統、慣性導航儀與電子羅盤等等。

圖 4 說明了本文提出的階層式控制系統架構 (分散式)，高階控制系統位於遠端，而低階控制系統則位於機器人上。

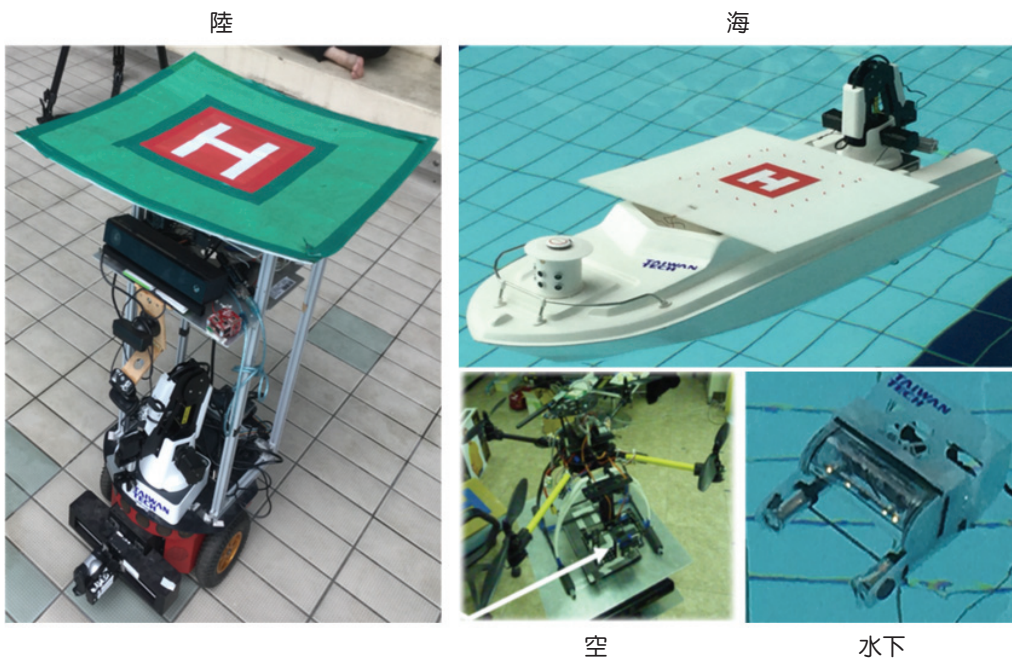


圖 3. 運動機構。

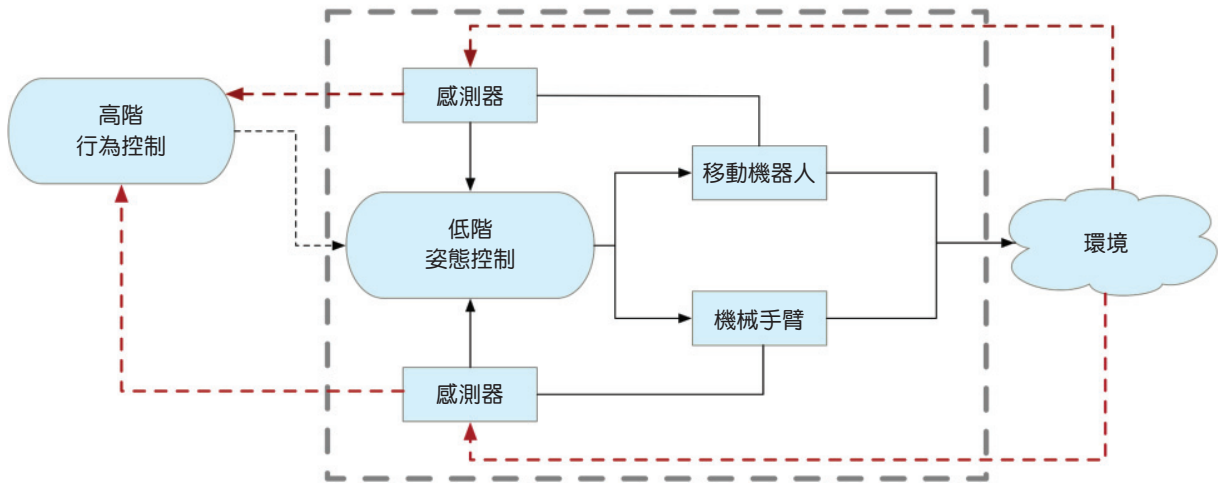


圖 4. 階層式控制 (分散式)。

四、人工智慧架構 (軟體演算法)

本文將人工智慧演算法，分別為 (1) 推理智慧 (模糊邏輯)，(2) 學習智慧 (類神經網路與深度學習) 以及 (3) 演化智慧 (基因演算法)，融入了自主移動機器人導航 (感知、定位、建圖、路徑規劃及運動控制)⁽⁹⁾，實現圖 6 之高階控制任務 (避障、目標搜索、軌跡追蹤和編隊)。圖 5 說明了本文提出的陸

海空及水下移動機器人群體智慧的高階行為控制系統架構。現場機器人行為控制包括避障、目標搜索、軌跡追蹤和編隊⁽⁸⁾。

模糊邏輯控制 (Fuzzy Logic Control, FLC) 是模擬人類經由知識庫來推理產生決策的智慧，本文採用來作為移動機器人姿態 (位置及朝向) 控制。其中輸入：感測器測量值 (障礙物距離和方向)，輸出：控制信號 (機器人速度和轉向)。

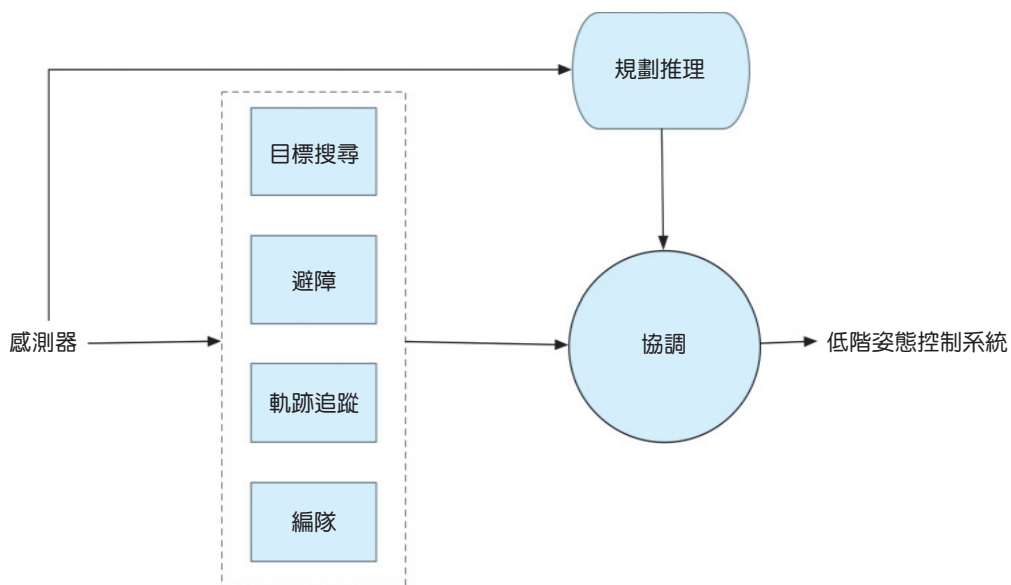


圖 5. 高階控制。

類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN) 是模擬人類經由除錯產生學習的智慧，本文採用來作為移動機器人分類環境與物件參數的演算法，環境參數包括亂流大小與方向，物件參數包括機器人姿態 (位置與朝向)，液體成份檢測。

基因演算法 (Genetic Algorithm, GA) 是模擬生物經由演化產生最適應環境的智慧，本文採用來作為移動機器人路徑規劃之優化，在機器人到達目的地之間的最短與最安全路徑中，取得最佳化方案，基因演算法為遺傳運算 (Evolutional Computing) 其中一種方法，以達爾文所提出的「物競天擇，適者生存」理論，來進行優化。

五、地點辨識 (深度學習)

地點識別是識別機器人是否去過一個已知位置的過程，用於軌跡漂移校正和軌跡／地圖合併，本文所提出的深度學習之終身地點辨識：基於視覺的機器人感知⁽¹¹⁾，用來解決機器人的主要問題：同步建圖與定位 SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)，而地點辨識是其中以「基於視覺的機器人感知」的挑戰，傳統地點辨識方法存在以下無法解決的問題：

- (1) 不同的地方 (外觀相似) 辨識為相同的地方。
- (2) 相同的地方辨識為不同的地方 (些許外觀變化)。
- (3) 大的視角變化 (特別是來自無人機)。
- (4) 季節／光線變化。

本文提出的深度學習之終身地點辨識：基於視覺的機器人感知，利用長時間地識別以前去過的地點，以解決傳統方法無法解決的問題，例如同一地點可能經歷由不同光線、季節或天氣引起的戲劇性的狀況變化。目前國內外所開發系統即遇到了瓶頸 (譬如 Google 自駕車無法分辨下雪與結冰環境)。

本文提出的深度學習之終身地點辨識，利用深度學習模型在各種高階影像語義任務上 (如場景識別、物件檢測與場景分割等)。使用深度學習可以直接在任務上進行端到端訓練，無需手動調整系統參數。

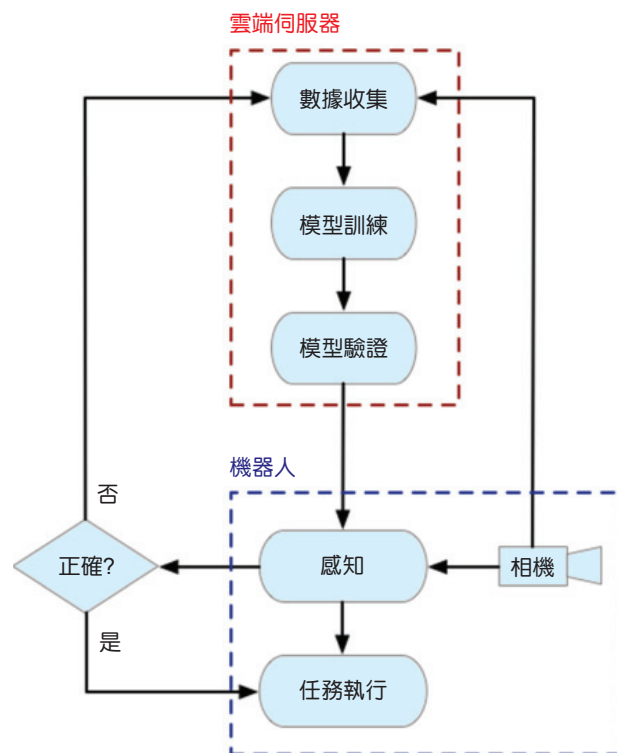


圖 6. 深度學習系統架構。

本文提出的深度學習之終身地點辨識，使用四棲移動機器人來搜集環境影像，來做環境認知，而非目前國內外方法，從影像資料庫、單一載具或固定相機來取得影像。

圖 6 說明了本論文提出的深度學習系統架構，第一步為環境大數據收集 (現場陸海空及水下機器人)，第二步為深度學習模型訓練 (雲端 GPU 伺服器)，第三步為深度學習模型驗證 (雲端 GPU 伺服器)，第四步為將訓練過的深度學習模型上線 (現場 GPU 陸海空及水下移動機器人)。

六、地面移動機器人

地面移動機器人有如下優點：

- (1) 可擴展性更高，載重和體積限制比其他幾種載具要小得多，因此安裝在地面機器人上的感測器、致動器等設備就可以更複雜更精密。
- (2) 通常需要救災的地方都是在陸地上，如地震、火災、生化災害。

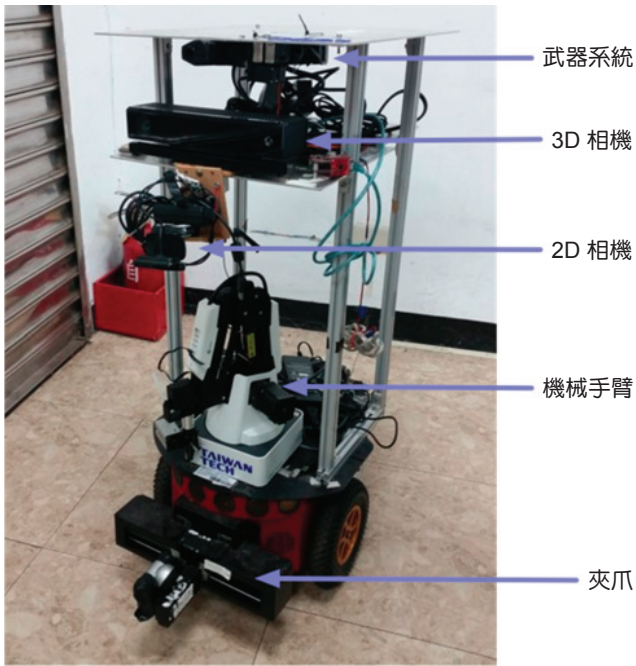


圖 7. 智慧保全機器人。

(3) 機械結構更加成熟，如輪式、履帶式、足式等。

1. 智慧保全機器人

本文所提出的智慧保全機器人⁽¹²⁾ (如圖 7 所示)，針對保全 (非自然災害) 應用，使用帶有武器的地面機器人進行保全工作。具有影像伺服控制及人工智慧，可進行距離偵測、人體追蹤、武器設計、軌跡巡邏及自主避障。機器人並可巡邏監控及

災情預警。

智慧型隨扈機器人實現之功能簡述如下 (如圖 8 所示)

- (1) 距離偵測：可識別範圍內人形目標與機器人的距離，並保持距離。
- (2) 人型辨識：可辨識人體特徵及人體動作，並接受主人的動作指令行動。
- (3) 武器系統：機器人具有射擊功能，可瞄準目標進行連續射擊。
- (4) 追蹤系統：機器人可保持距離並跟隨主人行動。
- (5) 障礙物偵測系統：機器人可自主判斷障礙物，並自主決定如何繞過，避免出現碰撞產生損失。
- (6) 軌跡追蹤系統：機器人可根據設定好的軌跡進行巡邏。

2. 化學物質檢測機器人

本文提出了利用地面移動機器人搭載微光譜儀進行遠端化學物質內容偵測⁽¹³⁾。提出之導航系統在各種不確定因素下是穩健的，機器人能夠有效且高效地行動於各種環境。微光譜儀鑑定系統成功地對各種樣本進行分類。移動機器人為帶有 8 個前向聲納的兩輪差速驅動運動機構，指揮中心通過無線網絡與機器人進行通訊，微光譜儀和光源連接在夾具上。圖 9 所示為本地面移動機器人的導航、樣本夾取、感測與感知模組。

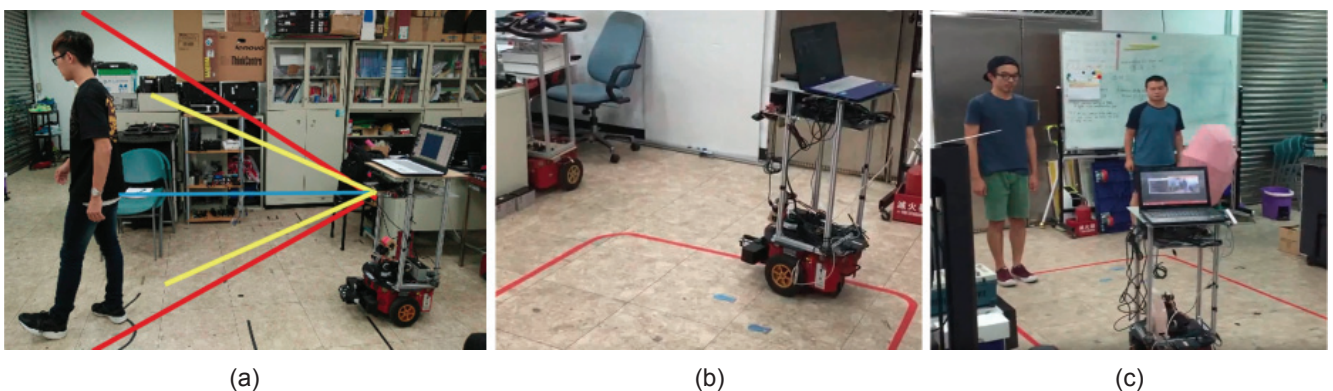


圖 8. 智慧保全機器人：(a) 保持距離、(b) 軌跡追蹤巡邏、(c) 轉向、瞄準與射擊入侵者。

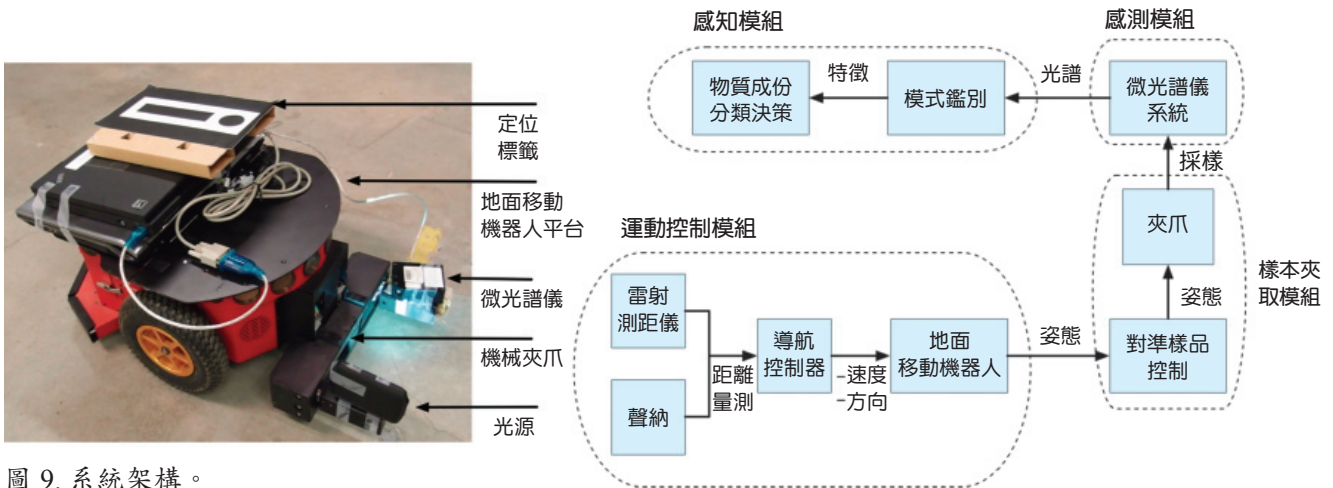


圖 9. 系統架構。

3. 危險物質採樣機器人

本文提出搭載機械手臂的地面機器人進行危險物質採樣^(14,15)。地面機器人藉由空中機器人支援來完成目標偵蒐，利用光譜儀結合人工智慧(類神經網路)進行物質辨識，使用影像伺服控制進行採樣任務，空中機器人的協同作業為地面機器人進行路徑規劃及導航。

首先進行空中定位(地面機器人，目標與障礙物)與路徑規劃(如圖 10 所示)，地面機器人接近目標後，使用本身的相機定位(目標待測物)，利用視覺機器學習演算法測量目標與機器人的相對位置，接著控制機械手臂夾取目標，然後利用裝配在機器人上的微光譜儀檢測目標的具體物質成分，最後無人機自主降落。

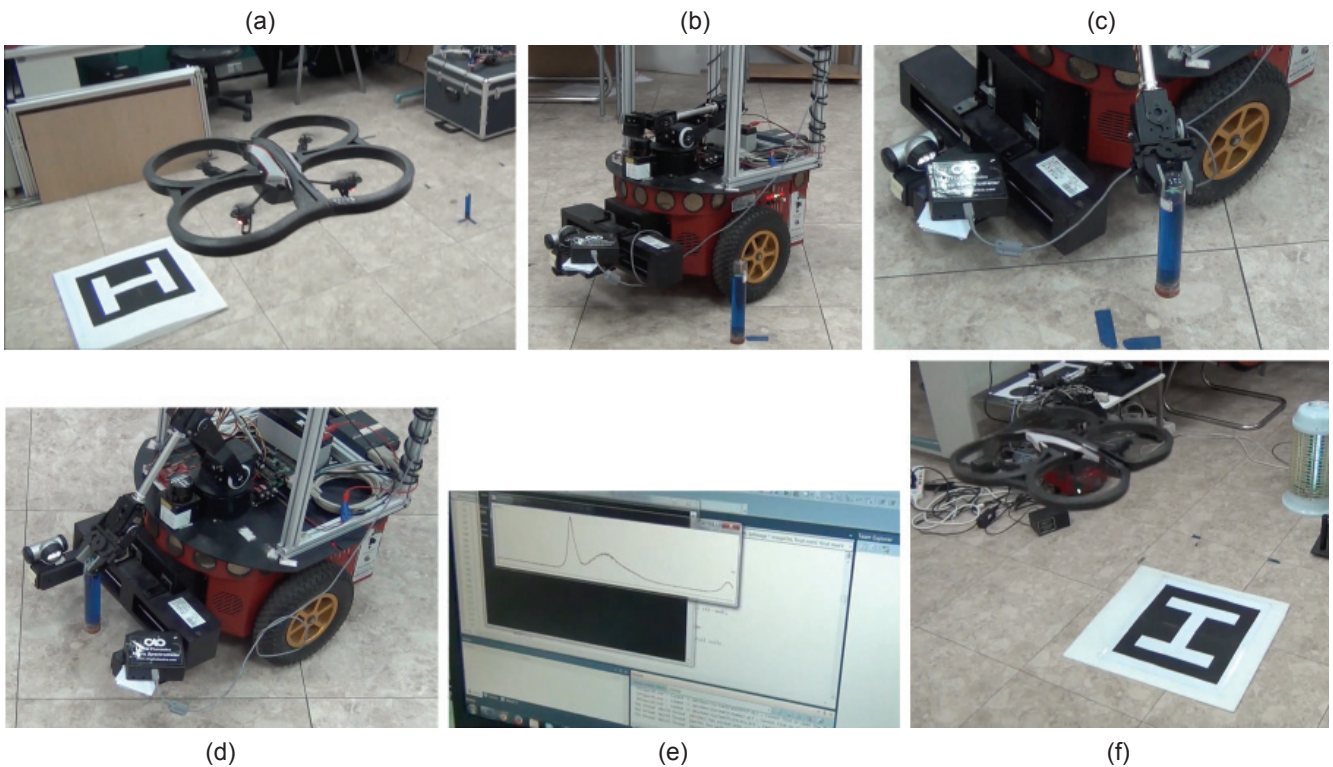


圖 10. (a) 空中建圖與定位、(b) 地面定位、(c) 待測物夾取、(d) 微光譜儀檢測目標、(e) 光譜識別、(f) 自主降落。

七、空中機器人

空中機器人應用很廣泛，相對於地面和海上機器人，空中機器人具有高速、靈活、視野開闊等特點。在災害救援時，被應用於偵查災害情況，大範圍搜救被困人員，快速運送救援物資，快速構建災區模型等任務。本文使用空中機器人進行人臉辨識、目標量測、船隻搜尋、3D 環境建模等功能及基於人工智慧的陸空、海空協同。

1. 混合式再生能源電力系統

本文提出架構在無人機上的再生能源系統⁽¹⁶⁾，運用太陽、雨水、空氣以及鋰電池建立一個可永續的能源系統 (如圖 11 所示)。此設計以救災和探勘為前提，減少機器人作業時因電力因素而一

去不返的失敗機率。

透過個感測器截取太陽功率數據、降雨量多寡、空氣含氧量多寡、太陽電池可供電力多寡、燃料電池可供電多寡、鋰電池可供電多寡、儲水槽水量多寡、氫氣瓶含量多寡，以上數據經過電力分配系統分析計算後控制切換開關，來達到不同的供電方案模式 (如圖 12 所示)。依環境的不同太陽能電池會有以下可能動作：停止運作、電解水、為鋰電池充電或直接供電給 UAV (或上述兩種以上同時運作)。燃料電池會有以下可能動作：停止運作、為鋰電池充電或直接供電給 UAV (或上述兩種以上同時運作)。鋰電池會有以下可能動作：待充電或直接供電給 UAV。各模式交叉的配合來提升再生能源的使用效率。

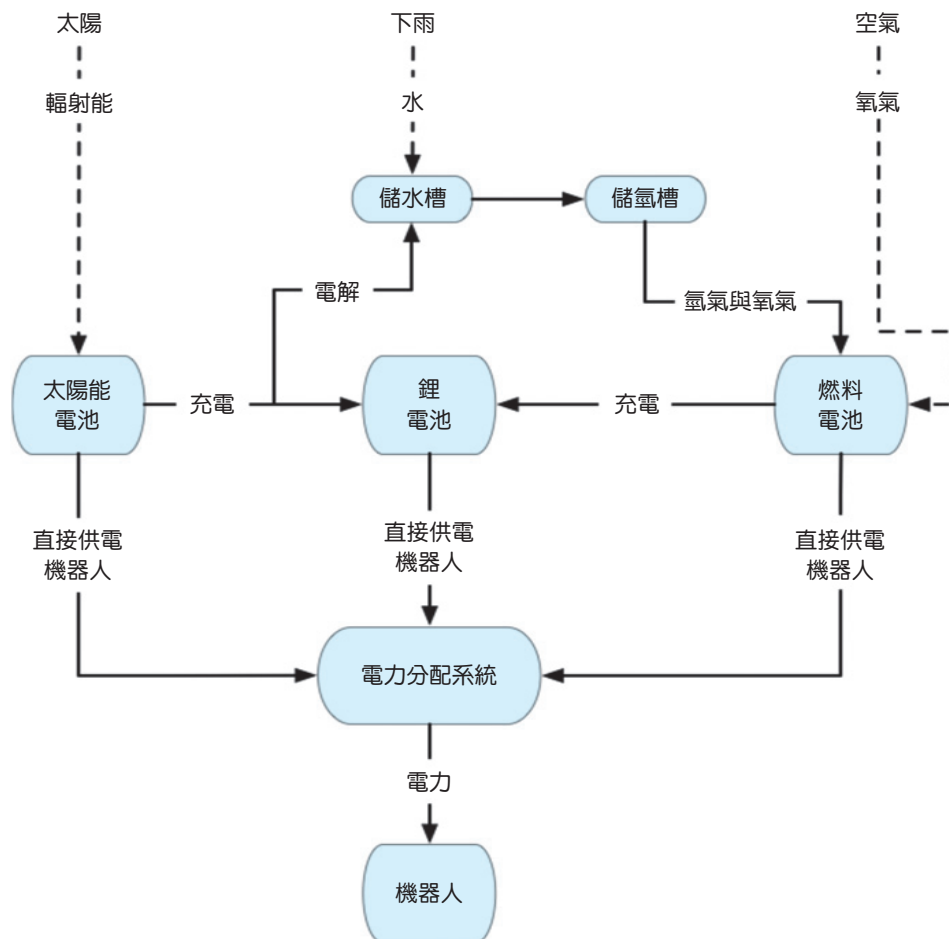


圖 11. 系統架構。

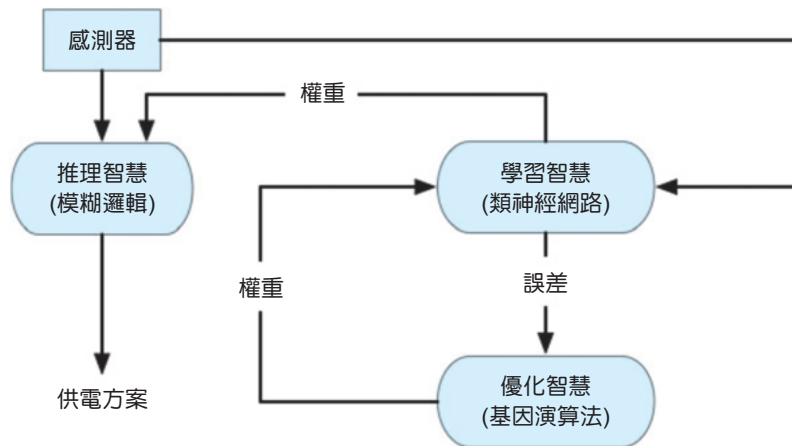


圖 12. 電力分配系統。



(a)



(b)

圖 13. 人臉辨識與追蹤：(a) 側拍、(b) 機器人視覺識別與鎖定。

2. 人臉辨識與追蹤

在自然與人為災害期間，臉部識別可以搜索失蹤人員、受傷人員、老年人、殘疾、及人質（識別和定位受害者和攻擊者）。本文提出了通過以空中機器人進行人臉識別和追蹤（定位）⁽¹⁷⁾（如圖 13 所示），幫助搜救人員縮短搜索時間及減少地面機器人的搜索區域。

3. 視覺導航

近年來，小型無人機在性能上獲得了很大的提升，為監視、檢查等軍事和民生應用展現了前景。但是，缺乏有效的自主導航能力嚴重限制了應用的機會。視覺導航方法是有吸引力的解決方案，因此本文提出應用視覺導航系統於小型無人飛行載具⁽¹⁸⁾。搭載相機的空中機器人通過環境，相機同時

朝運動方向拍攝。圖14(a)中顯示了視訊序列的一幀影像。搭載相機的空中機器人路徑和環境的重建結果如圖 14(b) 所示。

4. 海上災難救援

傳統的海洋救災需要大量的人力資源、時間，船舶自動辨識系統 (Automatic Identification System, AIS) 藉由船舶交通管理系統 (Vessel Traffic Service, VTS) 可自動識別與定位船舶以防止發生意外，然而現今的船舶自動辨識系統局限於僅能架設基地台與陸地上，使得船舶自動辨識系統掃描範圍受到限制。

本文重點研究了使用空中機器人結合自動船舶辨識系統的可行性⁽¹⁹⁾，通過控制站以及發生事故的船隻所回傳之 GPS 信號導引空中機器人飛行至

指定高度或是事故現場，待空中機器人飛行至指定位置時擷取裝載於船上 AIS 訊號，並即時回傳至控制站使救災過程更順利，有效縮短救災搜索時間(如圖 15 所示)。

5. 空中機器人之關鍵基礎設施的檢查

本裝置⁽²⁰⁾主體包括空中無人載具、3D 掃描儀、熱顯像儀和 2D 相機，通過將這三個不同的攝

像機搭載在空中無人載具上進行建築物結構的缺陷檢測。系統總架構如圖 16 所示。

其中，3D 掃描儀可以建築物結構的 3D 建模；熱顯像儀通過對拍攝到的影像進行紅外光譜分析，可以清晰得看出結構的裂縫與缺陷；而 2D 相機拍攝建築物實體結構與外牆表面的影像。最後將三個的影像結合一起比對，讓系統進行自動辨識，找出建築物的結構缺陷。

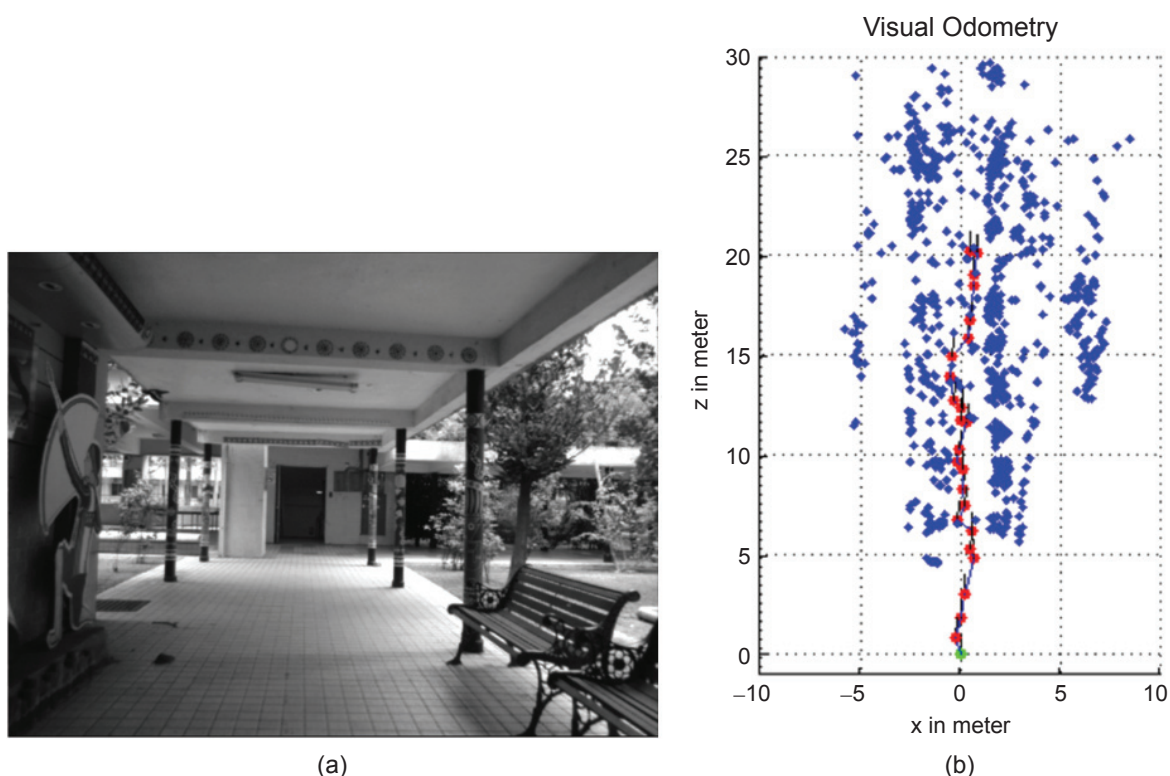


圖 14. (a) 來自環境視訊序列的一幀影像、(b)「走廊序列」重建的鳥瞰透視圖。

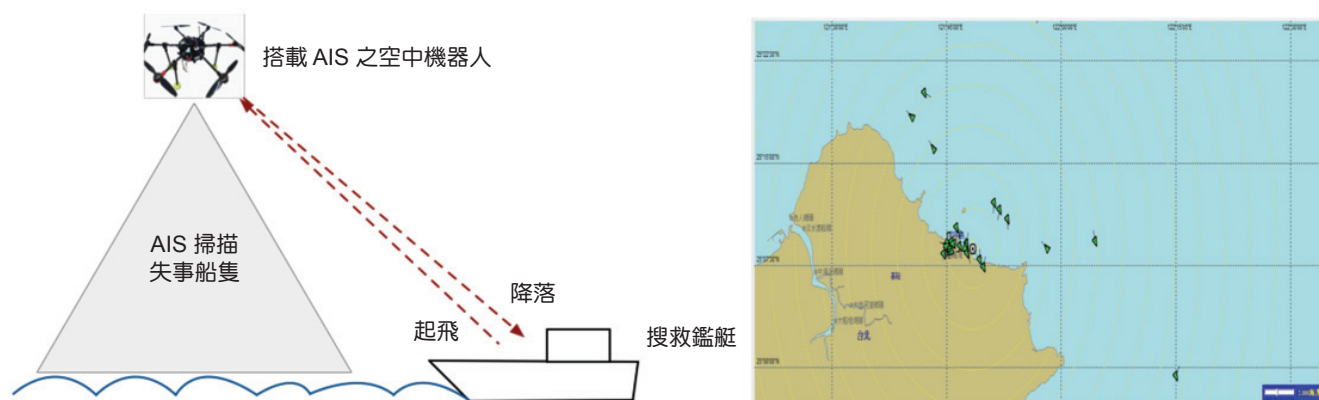


圖 15. 海上災難救援機器人。

當檢測出缺陷時，本裝置會利用 GPS 記錄下此處的準確位置，並把該位置信息存儲到內存系統中；同時結合無線傳輸的技術，位置信息也會即時傳輸到工作人員的電腦上。本裝置還包括其他感測器。IMU 測量 UAV 的角速度和加速度，並以此得出 UAV 的運動狀態；聲納測量 UAV 與目標物 (建築物結構/牆面) 的距離。

八、水上移動機器人

在水上救災時，UAV 常常因為所攜帶能源有限而無法長時間滯空，以及通訊範圍有限，因此本文提出了搭載 UAV 之海上平台的概念。

1. 海空協同定點降落

這個概念最關鍵的部分就是 UAV 能準確的自主降落在海上機器人平台上。此構想使用 fuzzy-neural network 和 image-based 的影像伺服控制方法完成降落⁽²¹⁾。

2. 水上無人載具製作

本研究設計與製作一水上無人載具使其可執行前進、後退、轉向運動，並挑選適合的控制單元、感測器、電源管理等裝載於其中。水上無人載具設計以玻璃纖維構成 (如圖 18 所示)，長 125 cm 寬 35cm 高 22 cm，排水量 30 kg。

無人載具藉由感測器感知環境，確定自己在水中的位置和方向，找到目標、並規劃運動並執行運動。而執行如此任務的關鍵是由一套硬體和軟體組件的搭配來完成，其中傳動裝置由單螺槳使載具推進，螺槳正、反轉可使載具向前或向後移動，螺槳經由一傳動軸及減速時規皮帶連接電動馬達，由馬達控制槳葉轉向及速度改變，另外配有一轉向舵連伺服機，透過伺服機的控制改變螺槳推進力方向，使水上無人載具在水上進行轉向移動。

裝設於載具上之感測器包含船舶自動辨識系統 (AIS)、全球定位系統 (GPS)、慣性量測單元 (IMU)、電子羅盤，CCD 相機，載具週邊佈設聲納。另為使載具可與地面通訊站傳遞訊號，裝設

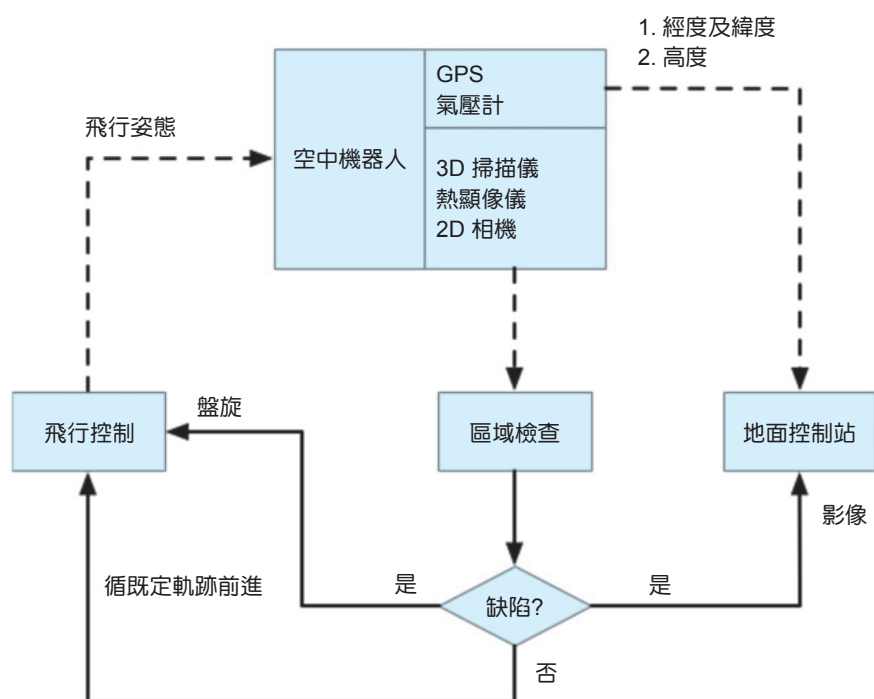


圖 16. 系統總架構：空中機器人之關鍵基礎設施的檢查。

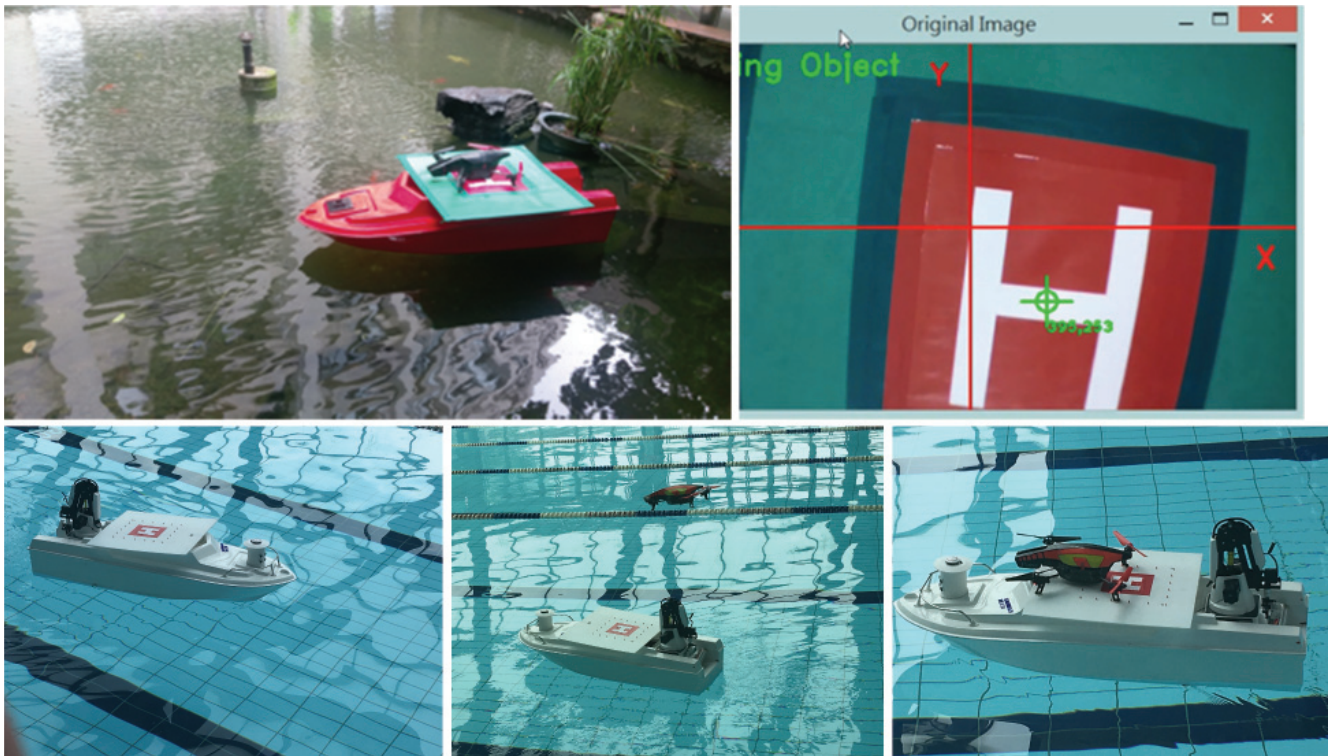


圖 17. 水上機器人：空中機器人自主降落完成。

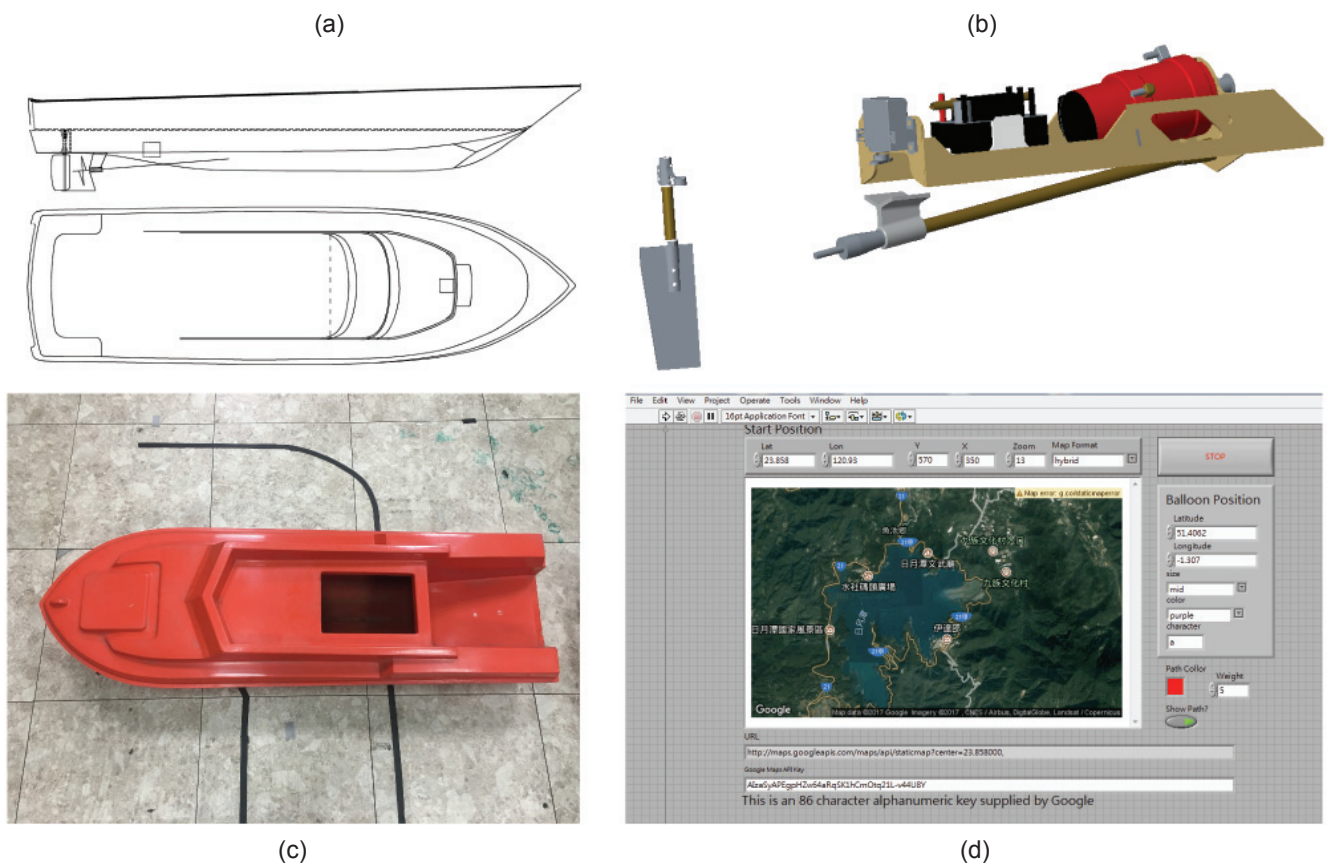


圖 18. 水上機器人。(a) 外型設計、(b) 傳動裝置設計、(c) 成品、(d) 日月潭下水導航測試。

Wi-Fi 低功率傳輸設備。並以 NI MyRIO 控制器做為主控制器搭配 Nvidia Jetson TX2 做影像深度學習處理。

九、水下機器人

水下載具包括 (1) 遙控式水下載具 ROV (Remotely Operated Vehicle, ROV)，(2) 自主式水下載具 AUV (autonomous underwater vehicle, AUV) 以及 (3) 自主式水下滑翔機 (Autonomous Underwater Glider, AUG)。依照本文前述定義，僅自主式水下載具為水下機器人。本文所提出的系統針對水下救難搜索。

1. 小型水下載具設計

本小型巡航水下機器人概念雛形設計⁽²²⁾ (如圖 19 所示) 結合人因工程與機器人元素，針對水下環境，地點與物件視覺辨識，協助搜救任務，概念設計包括 AI、遠端線控、自動及自主模式，以智慧型裝置即時控制及接收小型自主巡航水下機器人上之相機影像。配備聲納、慣性導航儀 (IMU) 及相機，進行編隊、避障、軌跡追蹤與目標搜尋之自主行為控制，並以網路式控制系統 (Networked

Control System, NCS) 架構⁽²³⁾ 與遠端控制站傳送致動器及接收感測器訊號。

2. 水下環境辨識

本文提出利用深度學習進行永續式的物體、地點及環境的視覺辨識。如圖 20 所示本文所使用的水下載具，其具有兩個平行雷射光源和一個 CCD 相機，水下機器人搜集環境大數據，然後進行地點識別 (如圖 21 所示)。

3. 水下避障

目前已有許多穩定的水下機器人靜態避障系統，但缺乏動態避障系統。本文提出了既可以檢測障礙物是靜態還是動態的，也可以找到障礙物和水下機器人之間的距離。利用光流演算法來區分視訊流中的動態障礙物和靜態障礙物，並且使用消失點理論，使用兩個平行雷射源來測量障礙物和水下機器之間的距離，因而影像中有兩個雷射光點 (如圖 22(a) 所示)。雷射光斑點明亮，易於在水中觀察。經由低頻濾波器來消除影像中的雜訊、灰階影像轉換及亮度閾值二值化，最後產生兩個雷射光點圖 (如圖 22(b) 所示)。

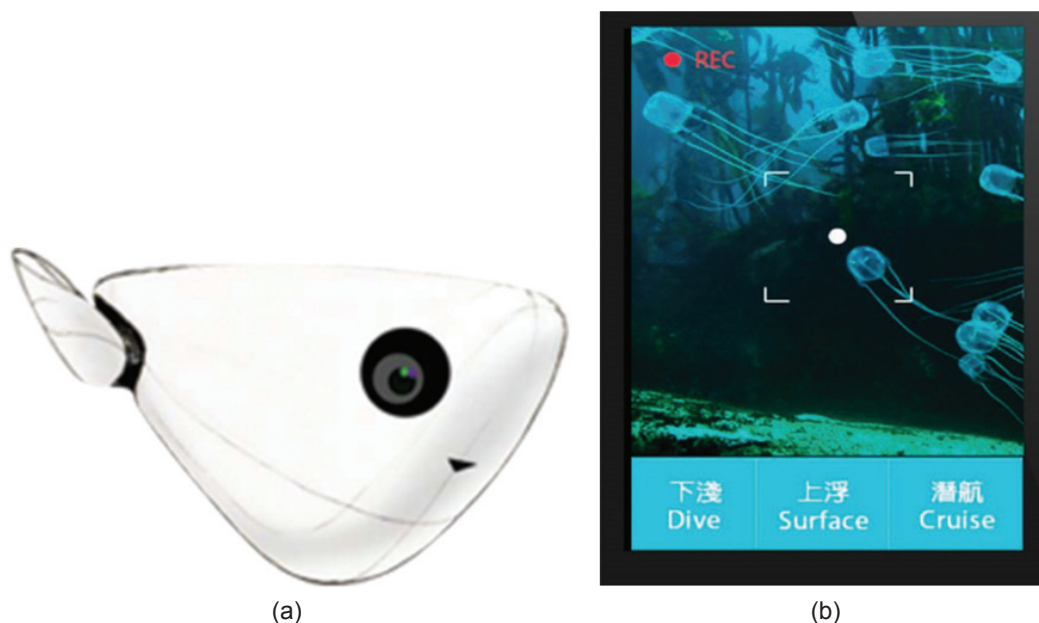


圖 19. 小型巡航水下機器人：(a) 外觀造型 (b) 人機介面。

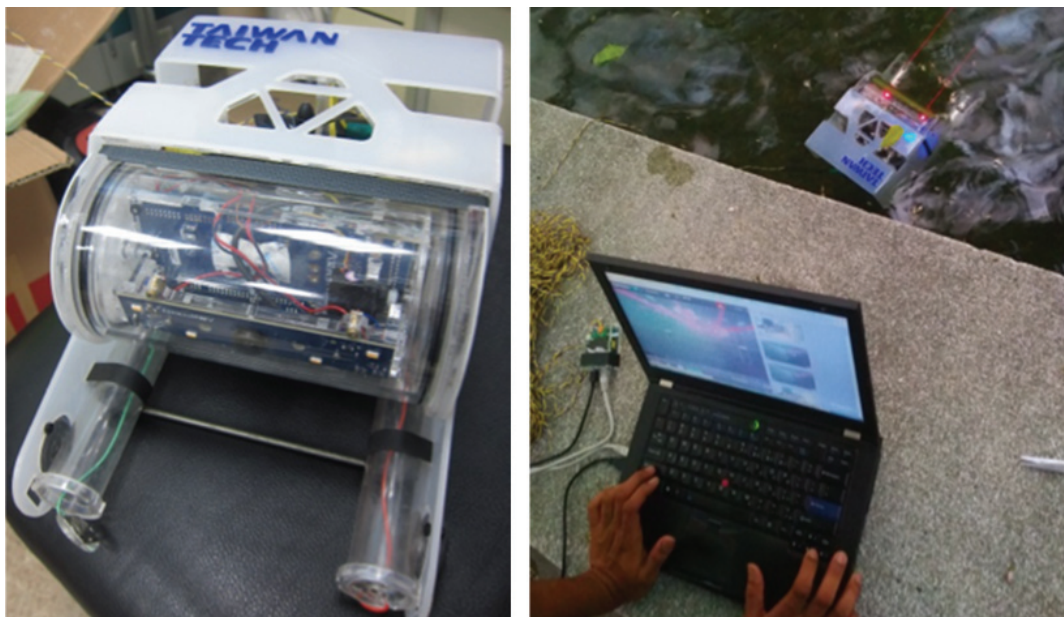


圖 20. 水下機器人。

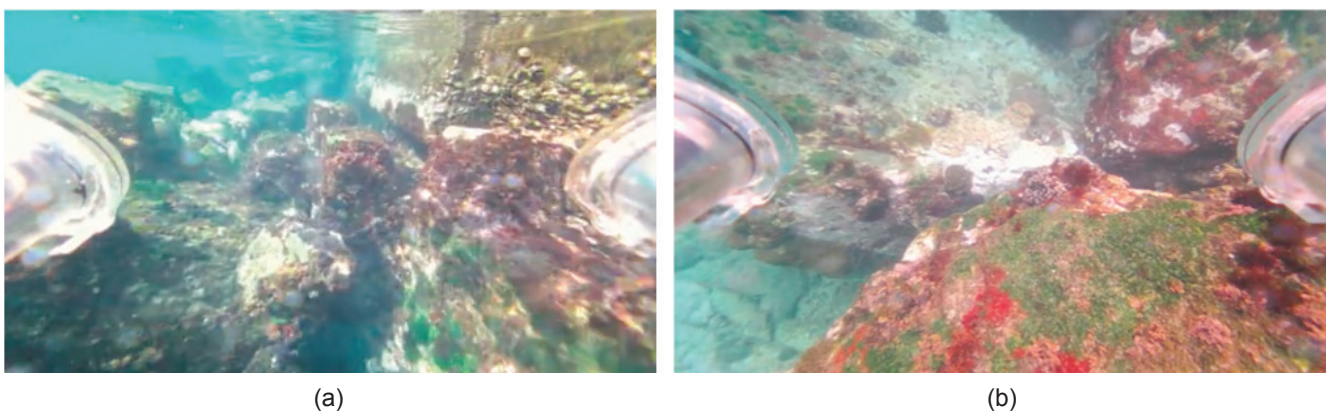


圖 21. 地點識別：(a) 高雄海域、(b) 基隆海域。

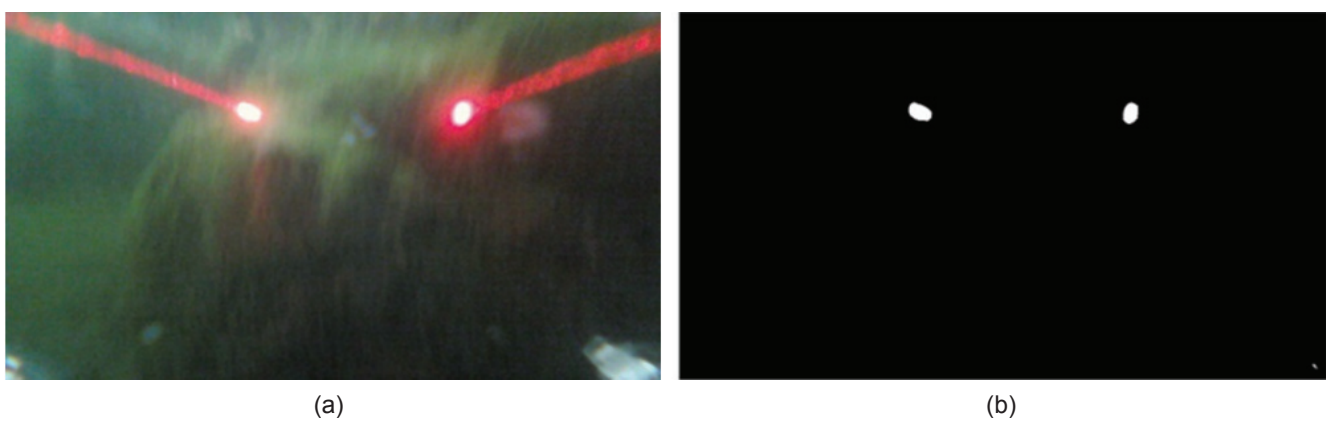


圖 22. (a) 水下障礙物、(b) 特徵擷取。

十、結論

本文提出了以人工智慧為基礎之陸、海、空，及水下四種機器人合作架構，應用於災害應變—搜救。陸海空及水下機器人分別進行各災害環境之大數據『影像搜集』，再經由現場工作站傳至雲端圖形處理單元 GPU 伺服器進行『訓練』深度學習模型及『模型驗證』，訓練好之深度學習模型再經由雲端傳至現場工作站，再傳至各陸海空及水下機器人進行現場物件與環境『辨識』。本文結果顯示機器人以陸海空及水下四路挺進災區並協同合作較傳統單一機構之救災機器人更為有效。結果亦顯示經由人工智慧之推理下決策較傳統人工方式更為符合災害應變之環境。本文研究重點為改善在災害應變環境中單一機器人之諸多限制，因此提出陸海空及水下機器人之群體智慧作為此篇論文之研究。

參考文獻

1. “AI 大特輯-從零開始了解人工智慧”，Newton 牛頓科學雜誌，126 (2018).
2. P. Moore and H. V. Pham, “Predicting intelligence using hybrid Artificial Neural Networks in Context-Aware tunneling systems under risk and uncertain geological environment”, 2012 Sixth International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, July 4-6 (2012).
3. J. G. Blich, *Expert Systems with Applications*, 11 (2), 109 (1996).
4. A. Vetrivel, M. Gerke, N. Kerle, F. Nex, and G. Vosselman, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 140, 45 (2018).
5. Z. Beck, W. T. L. Teacy, A. Rogers, and N. R. Jennings, *Robotics and Autonomous Systems*, 100, 251 (2018).
6. F. Matsuno, *Advanced Robotics*, 16 (6), 517 (2002).
7. 林其禹, 郭重顯, 邱士軒, 李敏凡, 范欽雄, 林伯慎, “運動機制”, 智慧型機器人: 原理與應用, 新北市: 高立圖書 (2013).
8. 林其禹, 郭重顯, 邱士軒, 李敏凡, 范欽雄, 林伯慎, “感測器”, 智慧型機器人: 原理與應用, 新北市: 高立圖書 (2013).
9. 林其禹, 郭重顯, 邱士軒, 李敏凡, 范欽雄, 林伯慎, “機器人導航”, 智慧型機器人: 原理與應用, 新北市: 高立圖書 (2013).
10. 林其禹, 郭重顯, 邱士軒, 李敏凡, 范欽雄, 林伯慎, “智慧型機器人設計範例”, 智慧型機器人: 原理與應用, 新北市: 高立圖書 (2013).
11. 李敏凡, “深度學習之地點辨識: 基於視覺的機器人感知”, 科技部專題研究計畫, 107WFA2510352 (2017).
12. 李敏凡, “智慧保全機器人”, 2017 智慧城市展 (Smart City Summit & Expo), 教育部區域產學合作中心國立臺灣科技大學北區技職大聯盟, February 21- 24 (2017).
13. Min-Fan Ricky Lee, Fu-Hsin Steven Chiu, Clarence W. de Silva, Chia-Yu Amy Shih, *International Journal of Fuzzy Systems*, 16 (3), 389 (2014).
14. 李敏凡, “無人的天空”, 公共電視-獨立特派員, 第 397 集, May 13 (2015).
15. 李敏凡, 第二名“災害應變: 群體機器人陸海空協同”, 2014 IEEE IRHOCS 國際機器人實作競賽, December 24 (2014).
16. 李敏凡, 陳健庭, 莊銀章, 吳柏勳, “智慧型空中移動機器人混合式再生能源電力系統”, 專利: 發明, 專利號: I619643, (2018).
17. Min-Fan Ricky Lee, Ying-Chi Li and Ming-Yen Chien, *Advanced Robotics*, 29 (3), 187 (2015).
18. Christian Ivancsits and Min-Fan Ricky Lee, *Sensor Review*, 33 (3), 267 (2013).
19. 李敏凡, “機器人變身, 即刻救援-救災機器人”, 科學築夢大現場 2: 歡迎光臨機器人時代, 台北市: 親子天下, (2016).
20. 李敏凡, 陸曉菲, 劉尚欣, 黃翰祥, 林蔡楨, “災害應變機器人: 使用無人機關鍵基礎設施的檢查”, 專利: 新型, 證號: TW M525323 U, July 11 (2016).
21. 李敏凡, 蔡承翰, Anjana, Kumar, JESUS, URIEL, TORRES, HERNANDEZ, 賈華宇, “智慧型亂流決策與自主降落”, 專利: 發明, 專利號: I623346 (2015).
22. 李敏凡, 鍾培成, “Narobot_小型巡航水下機器人”, 典範科技大學計畫: 研發成果度雛形化, 國立臺灣科技大學, 技術移轉中心 (2016).
23. Min-Fan Ricky Lee, Fu-Hsin Steven Chiu, Hsuan-Chiao Huang, and Christian Ivancsits, *International Journal of Distributed Sensor Networks* (2013).



李敏凡先生為美國康乃爾大學農業與生物工程系博士，現為國立臺灣科技大學自動化及控制研究所副教授。

Min-Fan Ricky Lee received his Ph.D. in agricultural and biological engineering from Cornell University, USA. He is currently an associate professor in the Graduate Institute of Automation and Control at National Taiwan University of Science and Technology.



楊禮榮先生現為國立臺灣科技大學自動化及控制研究所碩士生。

Li-Jung Yang is currently a M.S. student in the Graduate Institute of Automation and Control at National Taiwan University of Science and Technology.



孔維義先生現為國立臺灣科技大學自動化及控制研究所碩士生。

Wei-Yi Kong is currently a M.S. student in the Graduate Institute of Automation and Control at National Taiwan University of Science and Technology.