



人工智慧橋梁檢測車之 研發與應用

李坤哲*／黎明工程顧問股份有限公司 副總經理

傅立祥／交通部公路局中區養護工程分局 分局長

郭清水／交通部公路局雲嘉南區養護工程分局 分局長

黃志杰／黎明工程顧問股份有限公司 主任

曾蕙如／工業技術研究院 經理

臺灣橋梁正逐漸面臨高齡化問題，應及早發現橋梁結構劣化，進行維修補強，以延長橋梁使用年限。依據交通部頒佈之「公路橋梁檢測及補強規範」，橋梁定期檢測方式以直接目視或間接目視檢測為主，然檢測人員於橋面徒步作業時，經風險評估屬車輛撞擊之極高風險等級，即使依規定佈設交維設施，相關橋面施工之職安事故仍時有所聞。本研究開發 AI 智慧橋梁檢測車，結合車載影像擷取系統與 AI 影像辨識技術，並針對角鋼及齒型伸縮縫等稀缺劣化樣本同時進行 AI 生成擴增及實體模擬。AI 智慧橋梁檢測車作業時 1 名檢測員駕駛車輛，另 1 名負責操作 AI 影像擷取辨識系統，以時速 40~80 公里行車方式辦理橋面構件檢測，達到橋梁檢測全自動化，可提升橋檢效率及安全性並大幅降低影響交通程度。

前言

橋面檢測作業面臨之風險及困難

臺灣有近 2 萬 3 仟座車行橋梁，其中橋齡逾 30 年之數量超過 3 成，若未能及時檢測與維護，可能導致橋梁功能下降，甚至發生安全事故。

交通部頒佈之「公路橋梁檢測及補強規範」為我國橋梁檢測之重要依據，其規定定期檢測構件包含：伸縮縫、橋護欄、排水設施、主梁、橫隔梁、橋面板、支承、防落設施、橋台、橋台基礎、橋墩墩體、橋墩基礎、翼牆／擋土牆、河道、引道路堤、引道路堤保護設施、引道護欄、橋墩／橋基保護設施及其他附屬設施等總共 19 項目。

另規定：「定期檢測方式採直接目視或間接目視檢測為主，檢測人員以徒步儘可能接近檢測構件，必要時搭乘輔助載具，或使用其他觀測、量測設備取得相關資訊，判斷構件是否有劣化或異常情況」。檢測人員在辦理伸縮縫、橋護欄及排水設施等 3 項檢測時，目前是以徒步沿橋梁路肩進行目視檢測及量測（圖 1），此種檢測方式存在以下風險與困難：

檢測人員作業風險高

由於橋面檢測作業緊鄰車道，檢測人員易遭受行駛車輛撞擊。尤其高速公路及快速公路交通量大且車速快，以及山區道路狹窄蜿蜒，駕駛應變視距短時，經分析風險發生之「可能性」及風險後果之「嚴重度」，屬極高風險等級。

近年來，車輛先進輔助駕駛系統（Advanced Driver Assistance Systems, ADAS）逐漸普及，加上部分駕駛

* 通訊作者，Kenny@li-mi.com.tw

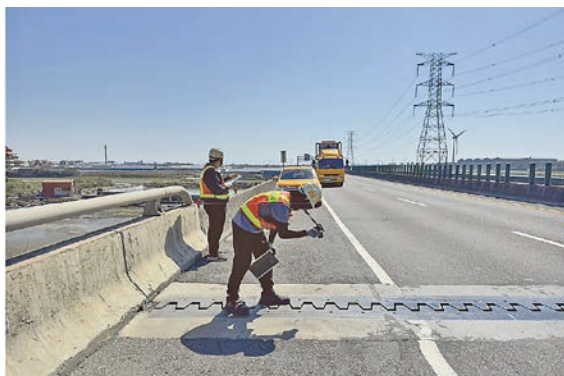


圖 1 橋面徒步檢測作業及交維設施

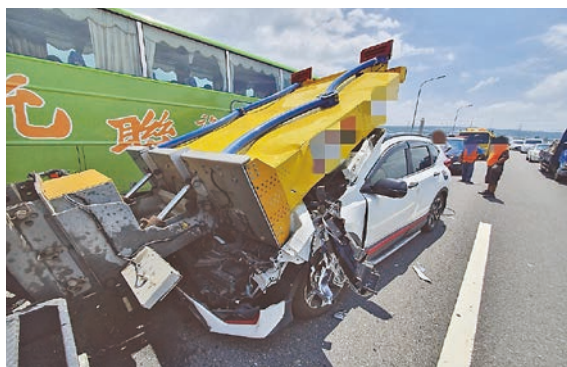


圖 2 施工車輛追撞事故

過度依賴其功能，導致路面施工人員、車輛等遭撞事故數量連年攀升。依據國家運輸安全調查委員會「112 年度運輸安全改善建議評估報告」，統計 110～112 年期間國道施工車輛遭撞事故共計 321 件，平均每 4 天就有 1 起事故發生（圖 2）。

交通維持作業影響交通順暢

為保障檢測人員人身安全，進行橋面檢測時需事先於橋梁路肩或外車道佈設相關交通維持設施，此措施雖可保障檢測人員安全，但同時亦會對交通流量造成影響，導致交通阻塞，並增加檢測作業成本。

檢測效率受限

傳統人工檢測方式效率相對較低，且移動性施工車隊移動速度緩慢，難以快速且全面的完成大範圍橋梁檢測作業。

降低橋面檢測風險之交通措施

為降低檢測人員於橋面檢測之作業風險，公路主管機關已採取多項措施，如：

緩撞車導入

交通部高速公路局從 109 年開始導入國外盛行的



圖 3 LED 標誌緩撞拖車

「緩撞車」（圖 3），預防路面工程人員作業時直接遭受後車撞擊，佈設於施工車隊最後面作為第一道防線，在工程隊伍不慎被駕駛撞上時，避免引發重大傷亡。

訂定交通管制規範

交通部公路局為維護快速公路施工時用路人行車及工作人員作業之安全，訂定「快速公路施工交通管制手冊」。於快速公路辦理橋梁檢測作業時，以外側路肩移動施工為原則，於工作隊伍之前設置 LED 標誌警示車及 LED 標誌緩撞拖車（圖 4），並於施工前通知警廣及登載施工資訊於公路交通資訊顯示板（CMS）（圖 5）。



圖 4 快速公路移動施工配置



圖 5 CMS 施工交通資訊

加強車流分析與監控

台 61 線西濱快速公路縱貫全台西部沿海，其中區及雲嘉南區路段行經台中港、彰濱及麥寮等工業區，交通量大且重車比例高。交通部公路局要求施工車輛裝載行車影像即時傳輸及 GPS 定位設備，由監看人員即時掌握車距及行車動態，以降低快速公路重車事故發生機率及嚴重程度（圖 6）。



圖 6 快速公路施工車隊監控

人工智慧應用於橋梁檢測相關研究

交通部公路局、交通部公路局中區養護工程分局與黎明公司合作研發 AI 無人機智慧橋梁檢測系統，112 年起已實際應用於 14 座橋梁之跨河段之現地檢測，以無人機搭配人工智慧（Artificial Intelligence, 以下簡稱 AI）自動偵測橋梁劣化構件並完成劣化評等（圖 7）^[1,2]，研究成果影片請參考下方連結及 QR code。

https://www.limi.com.tw/project_13_30.aspx

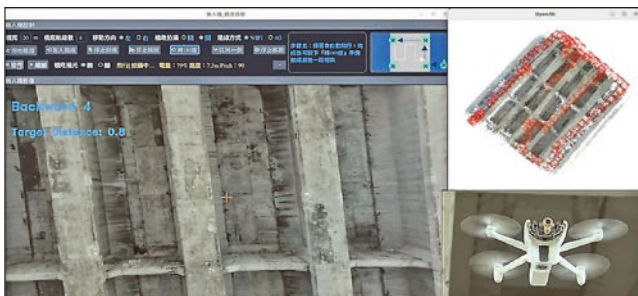


圖 7 AI 無人機智慧橋梁檢測作業

問題及對策

依據交通部民用航空局「遙控無人機管理規則」第 28 條規定：「操作人從事遙控無人機飛航活動時應遠離高速公路、快速公（道）路、鐵路、高架鐵路、地面或高架之大眾捷運系統、建築物及障礙物三十公尺以上」，為避免無人機於橋面檢測因飛安事故造成路人車傷亡，故不能於高速公路、快速公路上方使用無人機辦理橋面構件檢測。

為解決上述橋面檢測作業風險及困難，本研究以車行方式取代傳統徒步方式檢測作業，透過車載影像擷取系統與 AI 影像辨識技術進行橋面系統構件劣化偵測。

人工智慧橋梁檢測車檢測標的

本研究開發之人工智慧橋梁檢測車，旨在取代傳統檢測人員徒步直接目視檢測之【橋護欄】、【排水設施】及【伸縮縫】等 3 項橋面構件。因 AI 影像辨識技術主要係透過影像進行深度學習與劣化偵測分析，故本研究自「公路橋梁檢測補強規範」之橋面構件劣化評等表中，篩選常見且可透過影像辨識之劣化類型作為主要檢測標的。例如：

1. 橋護欄：「混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、鏽蝕」、「螺栓損傷、欠缺或鬆動或護欄脫落」、「生鏽或腐蝕」、「護欄損傷」（圖 8）。
2. 排水設施：「排水設施阻塞或功能性降低」、「排水設施損傷」（圖 9）。
3. 伸縮縫：「伸縮縫間雜物堆積」、「伸縮縫間隙異常」、「高低差」、「伸縮縫裝置損傷」（圖 10）。



圖 8 橋護欄檢測標的



圖 9 排水設施檢測標的

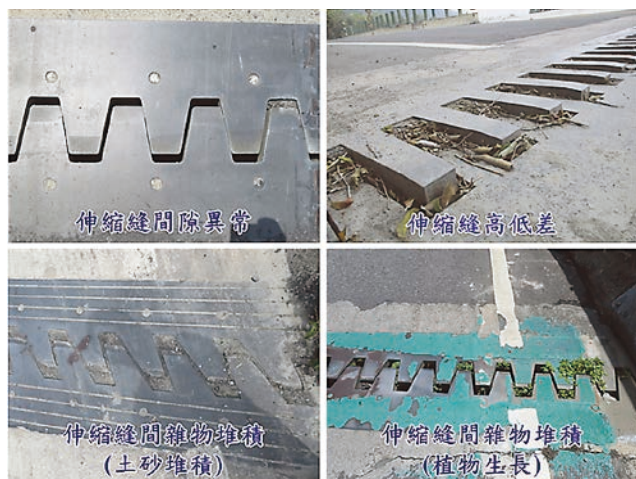


圖 10 伸縮縫檢測標的

檢測車設計與檢測流程

本研究以車行方式拍攝橋面構件影像，開發檢測車裝載 5 組攝影鏡頭，分別安裝於車頭前方、車頂左右兩側、車尾垂直向下，以及車尾仰角 30 度等位置，其中車頭及車尾鏡頭負責拍攝記錄「伸縮縫」影像，左右側鏡頭負責拍攝記錄「橋護欄」及「排水設施」影像（圖 11）。

檢測車後座左側設置 GPS 模組及電腦主機，於進行橋面車行檢測時，電腦主機將同步擷取多鏡頭影像及拍攝位置資訊，並透過 AI 進行劣化偵測，即時呈現於螢幕上供車上後座右側之檢測人員檢視（圖 12 和圖 13）。檢測結束後系統將自動彙整劣化偵測結果，整合每個劣化影像及位置於 KMZ 檔案，檢測人員可使用 Google Earth 程式瀏覽橋梁劣化位置及影像，快速掌握橋梁狀況（圖 14 和圖 15）。



圖 11 車載攝影鏡頭配置圖



圖 12 車上影像擷取辨識系統

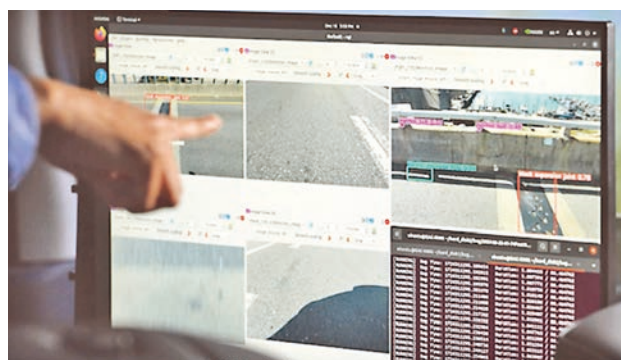


圖 13 車行檢測即時偵測畫面

為將檢測車導入快速公路及高速公路，本研究以高速公路中線車道最低速限 80 公里為目標，於 113 年完成攝影鏡頭及電腦硬體更新整測，相機快門種類由滾動式快門（rolling shutter）更新為適合高速拍攝之全局快門（global shutter），幀率（Frame Per Second, FPS）由每秒拍攝 30 幀提升為 45 幀，檢測車若以時速 80 公里速度進行拍攝時，每 0.49 公尺擷取 1 幀影像，影像重疊率達 50% [3]。

AI 影像深度學習

為訓練 AI 模型使其具備自動化檢測橋面構件劣化之能力，本研究針對橋護欄、排水設施及伸縮縫等構件，先蒐集前述檢測標的之劣化類型影像共計 46,561 張，再由人工標記劣化範圍建立影像資料庫，作為 AI 深度學習之基礎。

本研究劣化偵測模型採用 YOLOv8s，起初採用平面道路橋梁蒐集的劣化標記資料，並導入官方權重（official weight）建立預訓練模型（pretrain model），經實際場域驗證其偵測能力符合檢測需求後，導入快速公路路段（如：台 61 線、台 72 線、台 74 線等）之劣化標記影像進行偵測模型微調，加強偵測模型針對快速公路構件型式之偵測效果（圖 16）[4]。

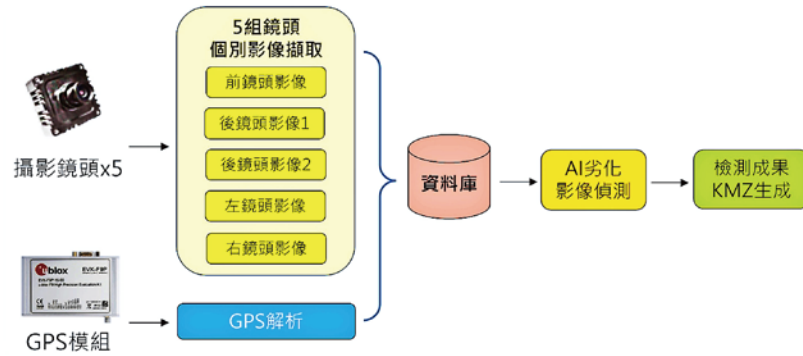


圖 14 AI 橋梁檢測車檢測流程

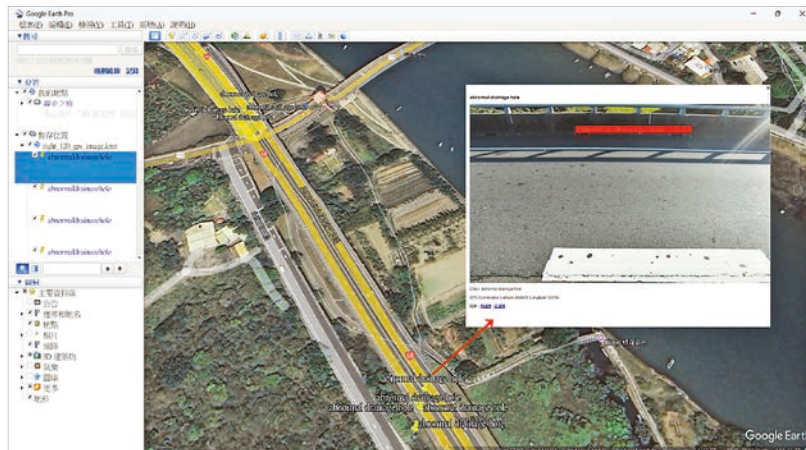


圖 15 Google Earth 瀏覽檢測成果

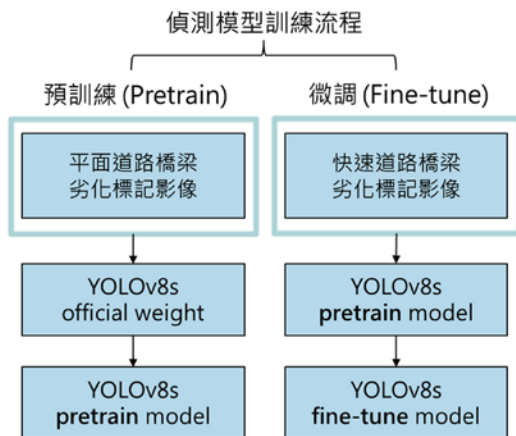


圖 16 偵測模型訓練流程

稀缺樣本擴增

本研究蒐集劣化影像時發現伸縮縫「間隙異常」及「高低差」兩種劣化類型樣本數量相對稀缺，訓練資料不足會導致偵測模型難以有效學習異常伸縮縫之特徵，進而影響偵測模型對劣化構件的檢測能力。本研究同時以生成式 AI 及實體伸縮縫模型模擬劣化情境，增加可投入模型訓練之劣化樣本，說明如下：

生成式 AI 擴增訓練樣本

因橋梁現地可蒐集之劣化影像數量有限，為有效增加訓練樣本數量，本研究採用 ControlNet 生成式 AI 生成高品質之伸縮縫「間隙異常」劣化樣本。

ControlNet 是一種能夠依照特定條件生成圖片的技術，其運作方式是在原本的 Stable Diffusion 模型裡加上一個可以「控制」影像生成的機制，使 AI 在產生圖片時不只是隨機創作，而是能夠參考輸入的條件，確保生成影像與原始結構相似，並可依照使用者需求調整細節，使生成之圖片既真實又符合特定要求。因此，在本研究中利用 ControlNet 的這項特性，控制橋梁伸縮縫的結構特徵，產生具有劣化特徵且高品質樣本，強化檢測分析（圖 17）。

實體伸縮縫模型擴增訓練樣本

為擴增伸縮縫劣化樣本數量，本研究使用實體角鋼及齒型伸縮縫模型，模擬「間隙異常」及「高低差」劣化類型進行拍攝，大幅增加不同劣化程度樣本供模型深度學習（圖 18 和圖 19）。

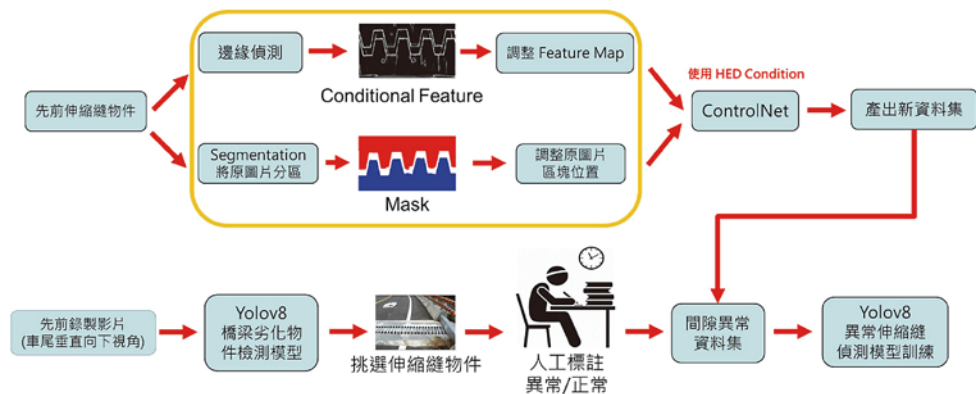


圖 17 導入 ControlNet 進行模組訓練流程



圖 18 實體角鋼伸縮縫劣化樣本蒐集



圖 19 齒型伸縮縫模型劣化樣本蒐集

劣化情境模擬係依據實際橋檢人員於橋梁現地檢測劣化構件之標準進行樣本蒐集，伸縮縫「高低差」劣化樣本自 10 mm 開始，每次增加 5 mm 直至嚴重高低差且影響行車安全程度。伸縮縫「間隙異常」則模擬兩側伸縮縫接觸閉塞，無足夠伸縮量之情形，其中齒型伸縮縫又分為側向及縱向閉合兩種劣化類型（圖 20 和圖 21）。

研究成果

AI 劣化偵測成果

本研究依據前述列出的主要檢測標的進行偵測模型訓練，為驗證 AI 橋梁檢測車於現地環境偵測準確率，實際於台 16 線、台 18 線及台 61 線、台 72 線、台 74 線等快速公路進行場域驗證，「橋護欄脫落」及「排水設施」

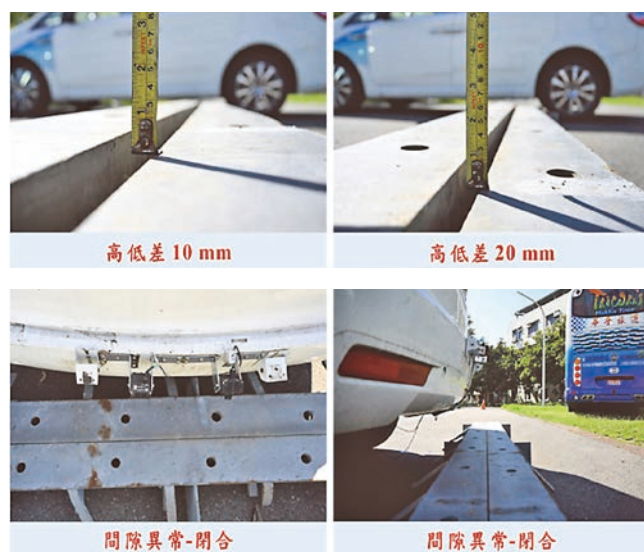


圖 20 實體角鋼伸縮縫劣化情境模擬

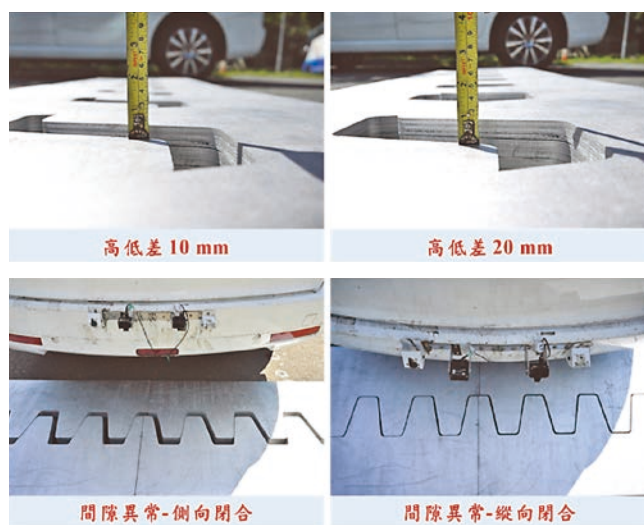


圖 21 齒型伸縮縫模型劣化情境模擬

等劣化偵測準確度可達 77.9% 以上；「伸縮縫」劣化偵測準確度可達 61.1% 以上（表 1）（圖 22 至圖 24）。

表 1 主要檢測標的 AI 偵測準確度

偵測構件	偵測類型	準確度
橋護欄	正常螺栓	95.2%
	混凝土剝落、鋼筋外露	93.7%
	護欄基座螺栓生鏽	100.0%
	鋼管護欄生鏽	77.9%
	橋護欄脫落	89.6%
排水設施	正常排水設施	92.9%
	排水設施阻塞	91.0%
伸縮縫	正常伸縮縫	96.5%
	伸縮縫間雜物堆積	92.4%
	間隙異常	72.0%
	高低差	61.1%

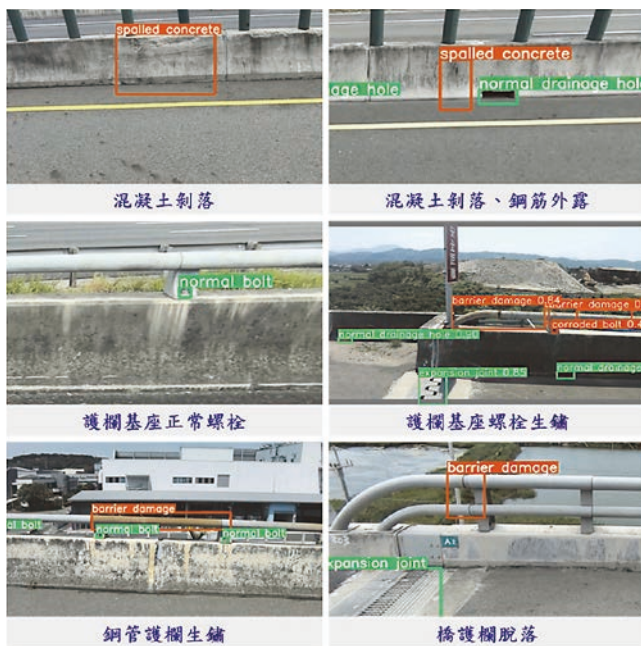


圖 22 橋護欄劣化構件 AI 偵測成果

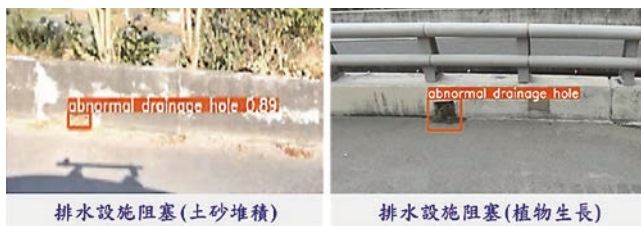


圖 23 排水設施劣化構件 AI 偵測成果

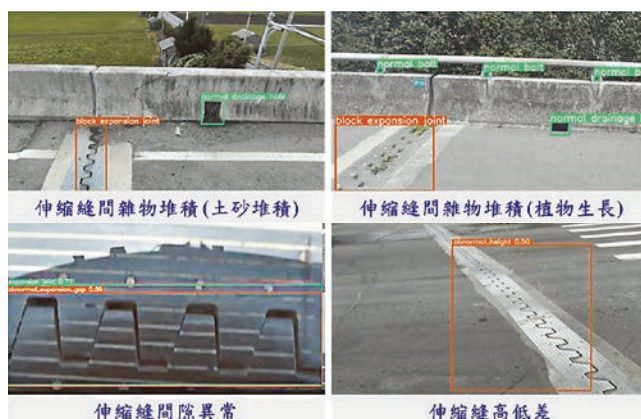
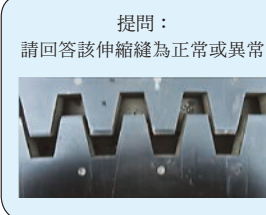


圖 24 伸縮縫劣化構件 AI 偵測成果

導入生成式 AI 之影像劣化判釋與成果

為加強伸縮縫「間隙異常」及「高低差」之劣化偵測準確率，本研究使用去識別化影像測試 ChatGPT 是否可成功辨識劣化狀況，實驗結果顯示 GPT 對伸縮縫的理解具有一定程度（圖 25），但如果要再提升判斷可靠性，須提供更詳細數據。另由於 GPT 係依據使用量計費，對於大量橋檢影像分析會衍伸額外的成本，且可能會有隱私安全、網路依賴性等問題。

為改善上述議題，本研究改於本地端部署開源大型語言模型 LLaVA（Large Language and Vision Assistant），LLaVA 是基於 LLM（Large Language Model，大型語言模型）發展而來的多模態 AI 模型，能夠同時處理文字與影像，在圖像理解、視覺問答、圖片描述等任務上表現優異。根據研究測試結果發現，目前針對存在高低差的伸縮縫偵測效果尚可（圖 26），然而對無高低差的正常伸縮縫偵測效果較不理想，後續將持續對模型進行調校，以達到更佳的成果。



回答：

根據提供的圖片，該伸縮縫的間隙看起來較為整齊，但要判斷是否異常仍然需要考慮一些因素，例如：

1. 間隙大小：根據圖片，該伸縮縫的間隙看起來適中，並沒有明顯的過大或過小的跡象。
2. 伸縮縫內部情況：從圖片中，伸縮縫內部似乎有一些污垢或碎屑，但這通常不會影響其功能。需要確保這些碎屑不會導致伸縮縫的卡塞或阻塞。
3. 結構整齊度：伸縮縫的鋸齒形狀看起來對稱且無明顯的損壞或裂縫，這是正常的設計。

總結來說，該伸縮縫看起來是**正常**的，並無明顯異常的跡象。如需更詳細的評估，可能需要了解具體的設計規範或參考更多現場資料。

圖 25 GPT 伸縮縫劣化判釋回應

提問：
橋梁伸縮縫是否有高低差？



回答：

是的，橋梁伸縮縫確實有高度差異。伸縮縫的**左側比右側高**。這可能是由於地基不均勻沉降、不同的熱收縮，或其他結構性問題造成的。這類差異應由結構工程師來處理，以確保橋梁的安全性和耐久性。

圖 26 LLaVA 伸縮縫劣化判釋回應

AI 橋梁檢測車應用場景及效益

AI 橋梁檢測車應用於山區道路或快速公路，僅需 2 名檢測人員在車內即可完成檢測作業，1 名負責駕駛車輛，另 1 名負責操作 AI 影像擷取辨識系統。無需額外佈設交維設施，既可確保作業安全，亦能減少對車流的干擾，大幅降低整體作業有形及無形之成本。

本研究先後於台 18 線芙谷峩橋（山區道路）及台 76 線貓羅溪斜張橋（快速公路）兩交通敏感路段辦理場域驗證（圖 27 和圖 28），前者為阿里山國家森林遊樂區主要聯外道路，後者為南投聯絡彰化之重要快速公路。AI 橋梁檢測車於上述路段皆能以車行方式成功檢出劣化構件，成果與檢測人員之徒步檢測相符。



圖 27 台 18 線芙谷峩橋檢測成果



圖 28 台 76 線貓羅溪斜張橋檢測成果

結語

傳統橋面檢測作業以人力徒步方式進行，不僅檢測效率低，檢測人員更面臨車輛撞擊之高度作業風險。本研究成功開發 AI 智慧橋梁檢測車，透過車載影像擷取系統與 AI 影像辨識技術，以時速 40 ~ 80 公里行車方式檢測橋面構件，產生檢測報表，達到檢測全自動化。

此外，針對伸縮縫「間隙異常」及「高低差」等劣化類型樣本稀缺問題，本研究同時以生成式 AI 及實體伸縮縫模型等模擬劣化情境來擴增稀缺劣化樣本，成功強化 AI 影像辨識模型之學習能力，提升橋面劣化構件檢測之準確性。

AI 智慧橋梁檢測車已實際於快速公路及山區公路進行場域驗證，檢測成果與人工檢測成果相符，證實本系統於實際應用上確實可行，可為橋梁檢測作業提供更安全、有效率之解決方案。

誌謝

本研究之發想源自與交通部公路局合作開發的 AI 無人機智慧橋梁檢測系統，以該計畫之 AI 劣化偵測技術為基礎，延伸開發 AI 橋梁檢測車，為 AI 橋梁檢測補上最後一塊拼圖。感謝交通部公路局中區工程養護分局員林工務段及交通部公路局雲嘉南區工程養護分局阿里山工務段協助提供場域辦理資料蒐集與驗證，使本研究臻於完善。

參考文獻

1. 劉世桐、陳毅銘、李坤哲、黃志杰、陳國睿（2021），「非接觸式量測及 AI 自動偵測裂縫於橋梁檢測之應用」，臺灣公路工程，第 47 卷第 3 期。
2. 范佑誠、陳毅銘、李坤哲、黃志杰、周業凱（2024），「AI 無人機智慧橋梁檢測系統」，臺灣公路工程，第 50 卷第 5 期。
3. 李坤哲、黃志杰、鄭安凱、曾蕙如（2024），「AI 智慧橋梁檢測車於橋面檢測之應用」，技師報，第 1436 期。
4. 曾蕙如、陳世哲、曾恕康、吳依玲、李坤哲、黃志杰（2024），「AI 橋面劣化偵測應用」，電腦與通訊，第 197 期。

