

感潮河段橋梁梁底檢測工具精進及測試

鄭登鍵¹ 賴瑞應² 林晨光³ 黃維信⁴

¹交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

²交通部運輸研究所港灣技術研究中心簡任研究員兼科長

³大同大學機械與材料工程學系助理教授

⁴大同大學媒體設計學系教授

摘要

橋梁維護管理工作，攸關民眾行的安全，因此，檢測工作是否能確實執行相當關鍵。目前全國約 2.9 萬座道路橋梁由各維護管理機關定期檢測，而當遇狹窄、近水且幽暗之梁底檢測環境時，不僅不易趨近檢測，且檢測人員亦有安全疑慮，往往使檢測工作未能落實。本研究前期研發能酬載於輕便型推車上之機械手臂，利用多節可伸縮之特性，將鏡頭探入狹暗橋梁底部空間，橋檢人員應用梁底檢測機械手臂，即可於橋面上操作，透過回傳影像即時檢查橋梁梁底狀況。本研究精進獨立推車型工具，增長臂桿並改良材質、結構，提升影像穩定度及清晰度，並新增補光照明、雷射虛擬尺功能及定位功能，目前已可初步代替橋檢人員進入橋梁梁底空間進行構件檢測。

一、前言

臺灣屬亞熱帶海島型氣候，四面環海、河川短急且夏季常遇颱風侵襲，西部平原區人口稠密土地高度開發交通路網遍布，極需仰賴橋梁等基礎建設滿足運輸需求。依據「臺灣地區橋梁管理資訊系統」(Taiwan Bridge Management System, TBMS)統計資料，截至 2020 年底正常使用與維修中之車行橋梁約 29,025 座，橋梁維護管理工作有賴於各級橋梁管理單位，維管工作確實與否、品質好壞攸關民眾行的安全，因此橋梁檢測工作是否能落實執行相當關鍵。

感潮河段為受潮汐影響之河川流域，特別是臺灣西部平原地區因長期抽取地下水而發生地層下陷，使該區域內橋梁之高程逐漸下降，部分橋梁甚至於漲潮時浸潤在帶鹽分之水中，退潮時則暴露於大氣中，於鹽水與大氣反覆作用下，易造成鋼筋鏽蝕膨脹致表面混凝土剝落，進而逐漸降低橋梁之承載能力。而此類橋梁進行橋梁檢測時，檢測人員需乘坐橡皮艇，或穿著漁夫裝進入橋梁底部檢測，但因橋下狹窄近水、潮濕晦暗，檢測人員往往需冒著極高的危險趨近勘查檢測而卻步，使得無法落實橋檢作業。有鑒於此，橋梁相關檢測若能以自動化設備輔助，取代全人力檢測，除能落實檢測工作且降低檢測風險外，可提升檢測成效，保障用路人之安全。

二、感潮河段橋梁檢測

為確保橋梁正常運作且安全無虞，依據交通部 2020 年 1 月 3 日頒布「公路橋梁檢測及補強規範」及「公路養護規範」之修正規定，公路養護管理機關應辦理橋梁定期、重大事故或災害後之檢測與維修程序。而橋梁檢測之目的係為早期發現橋梁結構物的異常與損傷劣化，以掌握橋梁之安全與使用性。檢測以目視為主，儀器為輔，發現橋梁有異常或劣化時，須擬定合宜之計畫進行維修與補強。在實施橋梁檢測作業時，必須盡可能接近橋梁結構物，實務上常採用之輔助工具為：橋梁檢測車、高空作業車、無人飛行載具等，但遇梁底淨高狹小之跨水橋或感潮河段橋梁，因檢測作業空間不足且環境惡劣，以當前之檢測輔助工具亦無法適用，橋檢人員則需改乘橡皮艇，或以其他方式盡量趨近待檢測構件，以臻檢測落實。

2019 年「感潮河段橋梁梁底檢測工具研發建置計畫」^[2]研究成果中，以碳纖維管製作伸縮檢測臂桿，並設置遙控裝置與人機介面控制伸縮臂，開發出操作簡易、便於攜帶且經濟實用之「推車型橋梁檢測設備」。此檢測設備經實地測試雖已可運作，但因檢測臂桿長度達 7 公尺，且設備整體重量較輕，造成檢測桿末端攝影模組晃動嚴重，致擷取之影像不穩定並有光源不足等問題。爰此，為增進橋檢設備之適用範圍、影像清晰度、設備穩定性及運作效率，期透過本研究持續提升我國橋梁檢測之品質及效率。

三、橋梁檢測設備

常用的橋梁檢測方法大多僅能針對局部材料性質進行檢測(如超音波波速量測、音洩檢測、敲擊回音法…等)，對於結構整體行為採用的檢測方法包括：微振量測、靜載重試驗與動載重試驗等。進行此類檢測時，往往需要封閉橋梁，為避免造成交通衝擊，導致僅可於凌晨進行檢測，且相當費時費力^[1]。此外，為縮短橋梁檢測作業時間，並解決橋檢人員無法接近橋梁之問題，已開發出不同形式之檢測工具，輔助橋梁檢測人員快速、系統化進行橋梁檢測工作，以下就現行使用之橋梁檢測工具^[2]進行介紹。

3.1 橋梁檢測設備

3.1.1 橋梁檢測車(船)

1. 吊籃式橋梁檢測車：

伸展臂具有多個摺疊自由度，可跨越人行道或橋梁護欄甚至特殊造型之鋼構橋，能適用於多種不同結構橋梁之檢測工作，依作業需求得上升或下降進行橋梁檢測。依檢測環境不同，設計合適之移動機構，除輪型載具外，亦有履帶型設備可因應不平整之地形；進行鐵道橋梁檢測時，以鋼輪驅動，便可於軌道上移動。此外，跨水橋梁檢測時，亦可搭配船舶或水上移動平台方式載送，或直接將檢測設備安裝於船舶上，由水面向上抬升進行檢測。

2. 桁架式橋梁檢測車：

工作支臂採用桁架結構，垂直臂為舉升機構，垂直臂和伸縮臂之桁架結構中為人員通道，檢測人員得於伸縮臂中進行檢測作業，整體結構龐大，需要有寬廣之作業空間。

3. 永久式橋梁檢測設備：

橋梁設計建造時，於橋梁上安裝永久式橋梁檢測設備，其桁架會橫跨整個橋梁斷面，透過固定於梁底之軌道，驅動及控制系統控制桁架移動，檢測人員經由檢修通道，由橋面下行至桁架通道中進行檢測。

3.1.2 機械手臂型橋梁檢測車

實施橋梁檢測作業，除將檢測人員載送至接近待檢測構件之方式外，日本 Zivil 調查設計株式會社之機械手臂型橋梁檢測車，以機械手臂掛載不同感測儀器，利用感測儀器拍攝或量測橋梁各構件，拍攝影像及量測數據評估橋梁狀態。

3.1.3 無人飛行載具檢測

無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)發展快速，近年亦應用於橋梁檢測作業，UAV 主要是以 GPS 進行定位操作，但用於橋梁檢測時，GPS 訊號可能受到橋體遮蔽而無法順利導航。但目前輔助定位技術已日趨成熟，可作業前設定巡航軌跡，即便沒有 GPS 訊號 UAV 還是可以自動巡航，或利用參考基地站，引導 UAV 依設定航線進行拍攝。UAV 發展應用於橋梁檢測介紹如下：

1. 水空兩用 UAV：

美國新澤西州(New Jersey)特拉華河灣管理局(Delaware River Bay Authority, DRBA)和羅格斯大學(Rutgers University)共同開發空中/水下兩用無人飛機「領航者」(Naviator)。使用時可快速轉換水下操作或空中飛行模式，以因應不同檢測需求，目前已針對特拉華紀念大橋(Delaware Memorial Bridge)進行實測^[4]。

2. 防撞型 UAV：

為了防止 UAV 因操作不當而發生墜機，目前部份 UAV 已導入避障功能，但仍很難完全避免，為解決此問題，已有新創公司開發防護罩，可加裝於既有 UAV，以降低 UAV 墜落之損害。

3. 貼附型 UAV：

UAV 除具有防撞功能，並利用不同向之螺旋槳設計，可貼附於橋梁底部移動。

4. 行走型 UAV：

直接沿著橋柱垂直行走之 UAV。為檢測橋梁特定構件，亦有外形增加輪圈功能之小型 UAV，可於橋梁構件中行走。

5. 搭載檢測設備之 UAV：

除掛載高解析度相機，亦能掛載不同功能之檢測設備，如 CATEC(Center for Advanced Aerospace Technologies)無人機即搭載超音波檢測設備，可用於檢測橋梁底部或側面橋柱之狀況。除了應用在橋梁檢測外，也可應用於金屬管線(柱)之檢測作業。

3.1.4 遙控船艇

美國 Metropolitan Environmental Services 公司目前已發展出適用於地下道之檢測設備，該設備架設在浮力桶上，前方配備高解析度攝影機(HDCCTV)、聲納及雷射掃瞄設備，後端利用捲線器控制檢測設備施放距離，也可以協助回收檢測設備。檢測過程中可透過平板電腦隨時監控檢測情形，也可即時調整燈光亮度及對比等。

3.1.5 鋼構橋檢測機器人

檢測機器人利用磁吸特性，透過電磁原理控制機器人行走於鋼構橋上進行檢測。澳洲雪梨科技大學(University of Technology Sydney, UTS) 開發應用於鋼構橋檢測之自主攀爬機器人，可用於檢查橋梁內部，藉由特殊磁腳，可攀爬垂直鋼牆、避開障礙物，並在橋梁或其他鋼結構(如船體、輸電塔及石油鑽井平台)內之狹小空間旋轉。檢測過程中，收集記錄檢查數據，並與前期數據進行比較^[5]。

3.1.6 長桿拍攝工具

雖然影像技術已有長足進步，但為拍攝清晰影像需盡可能接近被拍攝物。因此進行橋梁檢測時，可利用具延伸功能之長桿接近橋底，再利用相機進行拍攝。該長桿可直接架設於一般地面上或用手持握，亦也可放置於船艇上，或是架設於橋梁護欄上往下延伸。目前無線傳輸技術及影像攝影鏡頭技術日益成熟，有些設備具備 30 倍光學變焦鏡頭，搭配相機震動校正及除霧功能，便可在惡劣條件下進行精確檢測，甚至能辨識出距離 20 公尺遠之 0.2mm 寬裂縫，搭配虛擬尺量測功能，即可透過平板電腦之虛擬尺，直接量測裂縫寬度及長度。由於長桿之組立簡便，因此國內已有許多單位自行組立長桿檢測設備，再搭配不同攝影設備，即可進行檢測作業。因橫桿要固定攝影設備，考量人員操作時之握持力量負荷，通常橫桿長度在 1 公尺內，因此梁底檢測範圍相當有限。

3.2 小結

綜觀國內外之現行橋檢設備，現行橋梁檢測車雖型式眾多，但設備龐大且造價不菲，新興無人機檢測設備雖方便且成本低，但有其使用環境限制。本研究因感潮河段橋梁環境有其特殊性及落實檢測之必要性，針對此類橋梁檢測工具進行研發，透過本節蒐整之各類檢測設備，參考應用於本研究開發橋梁檢測設備之相關功能，從經濟性、便攜性、實用性且易操作為目標，期有助於輔助橋梁檢測進行，便於第一線人員使用。

四、機械手臂型橋梁檢測設備精進

本研究為 2019 年「感潮河段橋梁梁底檢測工具研發建置計畫」^[2]之延伸，著重強化前期研究成果設備未完善之處。前期設備拍攝影像嚴重晃動與光源不足，首應加強攝影穩定性，即為增加整體結構強度，本設備強度設計瓶頸於 C 桿件，該桿件為縱橫比極大之長桿，爰此，應著重於加強 C 桿之強度，同時解決影像晃動並可增設補光裝置，解決橋底影像光源不足之問題。

4.1 C 桿強度提升

C 桿件需有足夠長度將攝影設備送至梁底拍攝影像，並能便於收納運送，故 C 桿設計以套管形式具備伸長與收縮功能。為便於運送，依小貨車車斗長度，C 桿裝置收縮後長度需小於 2.8 公尺，且伸長需達 7 公尺，設計以 4 節套管組成(如圖 1 所示)。本研究提出下述之 C 桿強度提升方案：

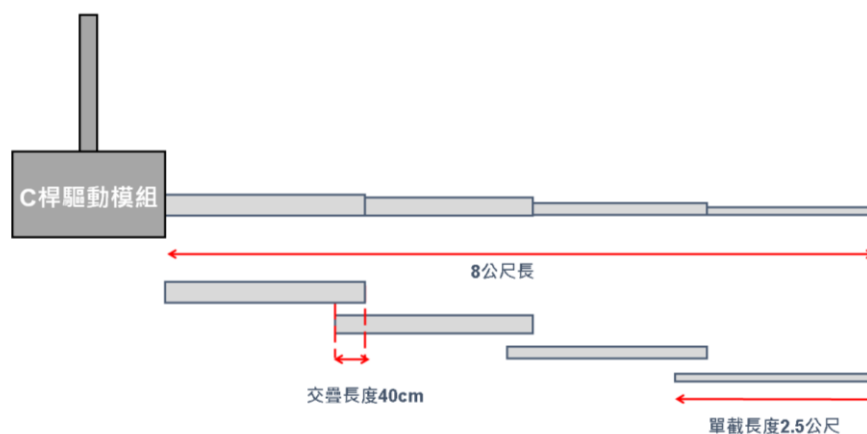


圖 1 C 桿套管設計圖

4.1.1 方形碳纖維伸縮套管強度分析

為提升 C 桿強度，本研究以方形截面管替代前期研究設備之圓形截面管，模擬分析以不同壁厚及不同截面尺寸錐度管代替多截方管(如圖 2 所示)，研究以前端方管 20mm、後端方管 55mm，且前端附載設定為 500g，其模擬結果如圖 3 所示。

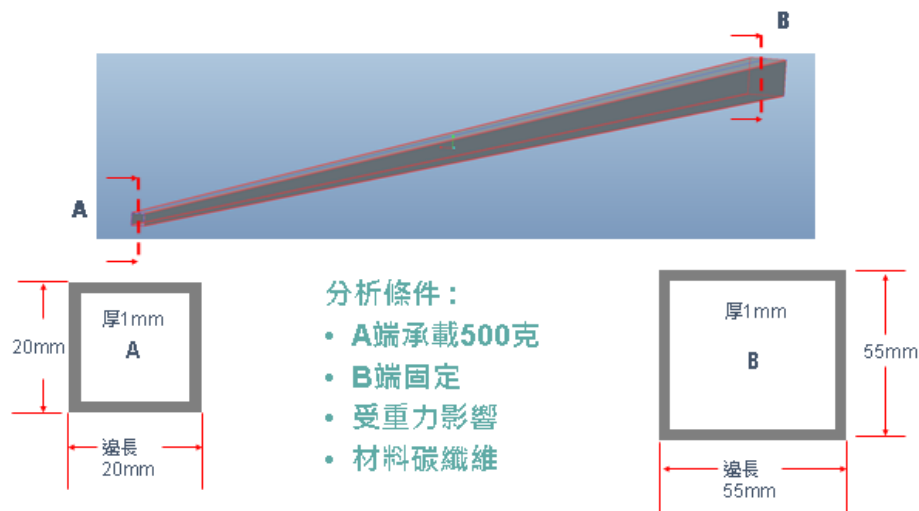


圖 2 方形 C 桿變形量模擬條件

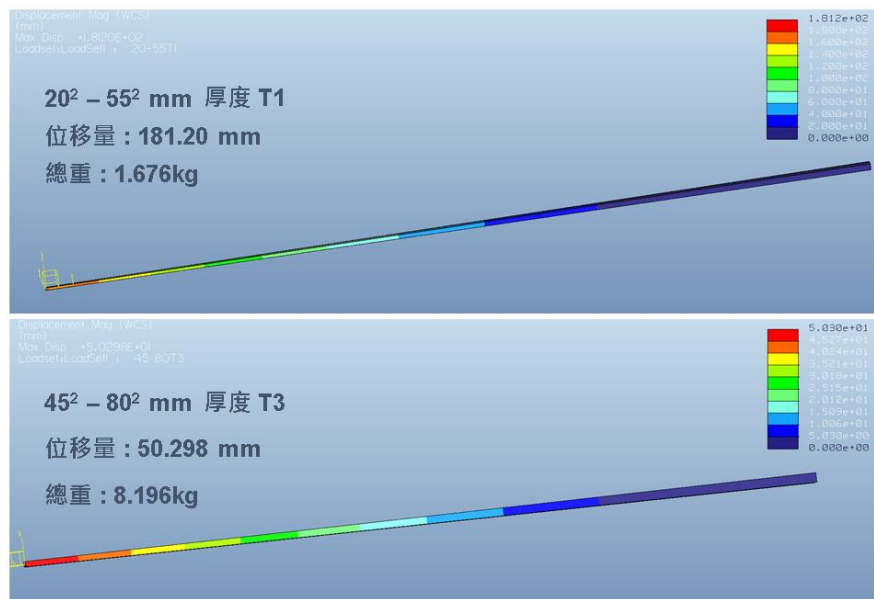


圖 3 方形 C 桿變形量模擬

模擬結果如表 1 所示，外型尺寸對變形量影響極大，而壁厚影響則相對較小，如面積慣性矩計算法則，壁厚 2.5mm 與 3mm 之方形管變形量相差甚微。以前端 45mm、後端 80mm 方形管為例，壁厚 2.5mm 時前端變形量為 51.339mm；壁厚 3mm 時前端變形量為 50.298mm，變形量僅減少 2.2%，而總重卻增加了 19.0%，而為探求適當之壁厚，本研究以變截面方形管，模擬前後端改變方形管壁厚之方案。以前端外徑 45mm 後端外徑 80mm 方型管，分析前端至後端壁厚改變 1mm-3mm 及 3mm-1mm 兩種狀況之變形量(如圖 4 所示)。分析結果顯示當前端壁厚減少，後端壁厚增加，前端變形量低於全採用厚管壁，如表 2 所列，在外型尺寸相同之下，整體採用 3mm 厚度之方形管材，前端變形量為 50.298mm；前端採用 1mm、後端採用 3mm 之方形管材，

前端變形量則為 37.157mm，大幅減少變形量 26.1%，且總重減少了 29.1%。因成本考量無法採用價格較高的變截面方管，依模擬結果，本研究採用 4 截厚度不同之方形管組成。

表 1 方管 C 桿變形量分析

外型尺寸(前端-後端)	厚度(mm)	總重(kg)	變形量(mm)
20 ² - 55 ² mm	1	1.676	181.20
	1.5	2.479	151.24
	2	3.260	136.97
	2.5	4.018	128.98
	3	4.752	124.12
30 ² -65 ² mm	1	2.135	110.57
	1.5	3.168	95.144
	2	4.178	87.872
	2.5	5.166	83.866
	3	6.130	81.488
45 ² – 80 ² mm	1	2.824	65.677
	1.5	4.201	56.497
	2	5.556	53.149
	2.5	6.888	51.339
	3	8.196	50.298

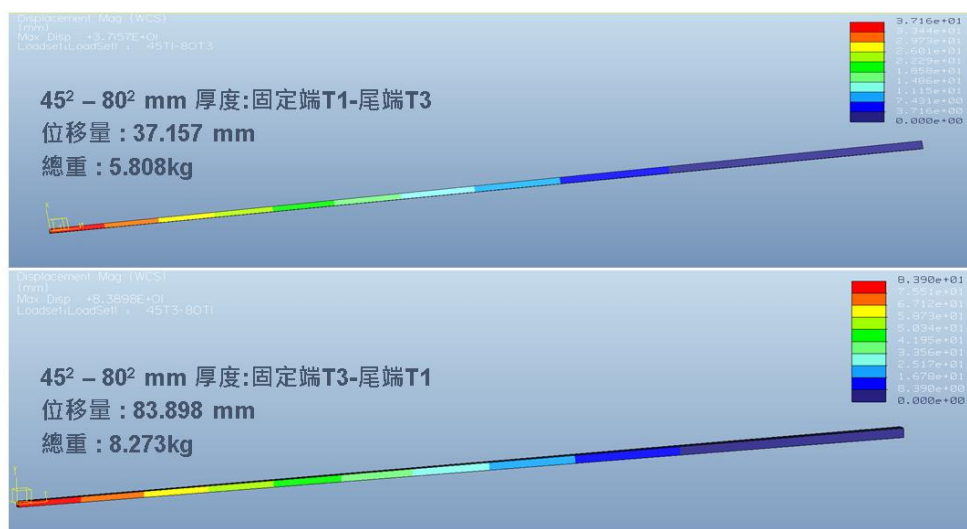


圖 4 變截面方管變形量模擬

表 2 方管 C 桿變形量模擬

外型尺寸(前端-後端)	厚度(mm)	總重(kg)	變形量(mm)
45 ² – 80 ² mm	1	2.824	65.677
	1.5	4.201	56.497
	2	5.556	53.149
	2.5	6.888	51.339
	3	8.196	50.298
45 ² – 80 ² mm	1 – 3	5.808	37.157
	3 – 1	5.273	83.898

本研究依據上述模擬結論，製成前端 45mm 後端 80mm，4 截厚度不同(1-3mm)之方形管組成之 C 桿，實際測量其下垂量，以尾節碳纖維管下緣對應地面距離為基準，當 C 桿完全收回時，離地面間距為 85.6cm，當 C 桿完全伸長時，離地面距離為 73.8cm，計算得知下垂量為 11.8cm，與模擬參數 3.7cm 相比，高出 8.1cm，主因為套管節間間隙造成下垂，但與前期橋檢工具 40cm 下垂量相比，已大幅改善並提升穩定度。

4.2 C 桿前端裝置開發

提高 C 桿之強度除可增加穩定度，亦可增加前端負載量，本研究為提升影像品質及檢測功能，於 C 桿前端增設攝影模組、穩定器/轉向模組、補光模組、雷射虛擬比例尺模組。為降低 C 桿前端附載，本研究將電池設計為共用，以攝影雲台整合上述各功能模組。

4.2.1 攝影模組

為取得橋梁梁底影像，前期設備因 C 桿強度不足，攝影模組採用小型密錄器，導致影像模糊，本研究改採用 Garmin Dash Cam Mini 車用攝影機，特點為體積小、重量輕、可即時回傳影像、夜間錄影效果良好，且內部無裝置電池，通電即開始錄影，符合本研究需求。

4.2.2 穩定器/轉向模組

穩定器/轉向模組以 Arduino Nano 為控制器核心，收取六軸感測器（MPU6050）之信號，判斷雲台三軸絕對角度，並利用 PID 演算法進行運算，將訊號提供給馬達驅動 IC（L293D），驅動兩軸之馬達以穩定雲台與影像擷取設備，使用者以手機 App 控制，透過藍芽通信方式進行傳輸，調整相機視角，提高視角範圍。本研究系統以 PID 演算法為控制，律定鏡頭穩定朝向梁底，鏡面屬於水平狀態，故 Set Point 為 0，透過 6 軸感測器感知鏡頭偏移角度，帶入 PID 演算法後，系統自動算出馬達應提供之轉速。

4.2.3 補光模組

參考常用強光手電筒之功率約 5W，為滿足梁底補光需求，本研究採用 3W LED 元件 2 顆，電源則由共用電池供給。

4.2.4 雷射參考尺模組

本研究自行開發雷射比例尺投影裝置，設置 2 平行之雷射燈產生兩束平行雷射，不受量測距離影響之等距離雷射標點(經實測 2 雷射光源於 5 公尺內皆能維持 5 公分 $\pm$ 1mm 之間距)，於實地檢測時，參照影像中 2 雷射點中心距離，即可計算影像比例，進而推算裂縫寬度。本研究設計特製雷射模組固定座以 3D 列印方式製作將雷射模組固定，透過止付螺絲對雷射模組的壓迫達到微調之功能。

4.2.5 C 桿前端整合裝置

整合上述攝影模組、穩定器/轉向模組、補光模組、雷射虛擬比例尺模組，本研究設計 C 桿前端整合模組如圖 5 所示，含電池重量為 420g，重量略低於預估之 500g 值，外型尺寸為 280mm x 100mm x 50mm。以 18650 磷酸鋰鐵電池 2 顆串聯為共用電源，可即時替換電源設計，避免設備使用時間限制。本裝置之 PCB 基板上，包含通信模組、Arduino 微控制器、電源供應 IC、馬達驅動 IC，如圖 6 所示。電源穩定 IC 可將電池提供之 8.4V 電壓降為 5V，為 C 桿前端整合裝置上所有模組供電。通信模組接受操作者指令後輸出信號至微控制器，微控制器處理後再輸出信號至馬達控制 IC 控制穩定器/轉向模組動作，其控制介面以 App inventor 撰寫，可透過手機或平板控制。

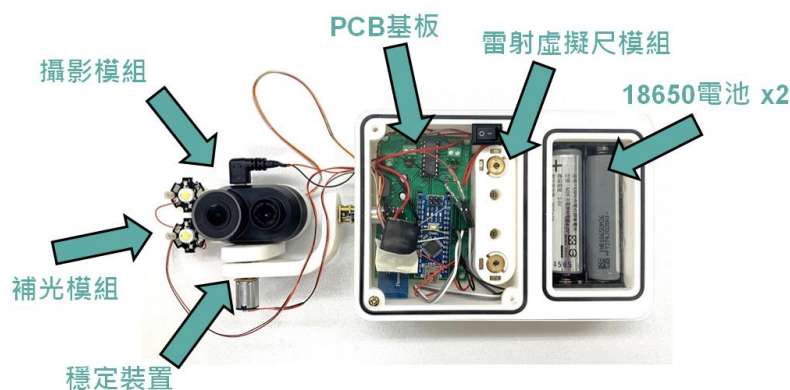


圖 5 C 桿前端整合裝置

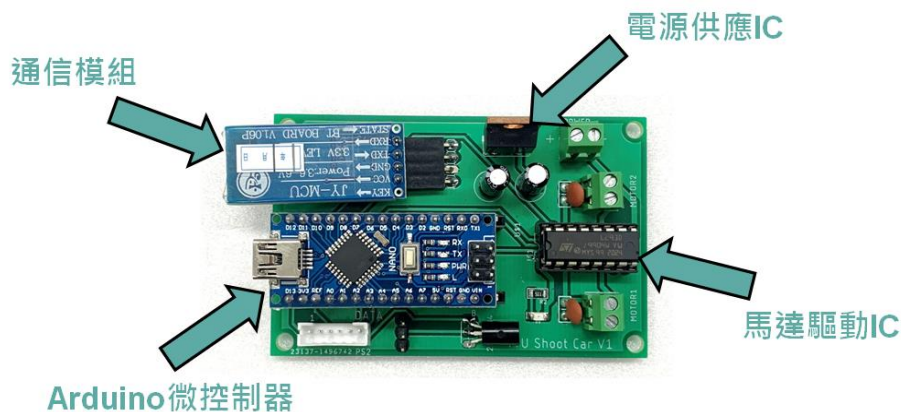


圖 6 C 桿前端整合裝置內 PCB 基板

五、實地測試與成果

為測試本研究設備量測極限範圍，篩選最大淨寬小於 16 公尺之橋梁；因桿件開展空間需求，需選定無電線架設之道路；設備功能測試考量可能發生故障需涉水檢修，選定流量較小可涉水之河流；考量實測安全，排除車流量大之道路。最終選定橋梁長度 6 公尺以上、最大淨寬小於 16 公尺、無電線架設、水流較小、車流量較小之 3 座橋梁：

1. 桃園市「山外一橋」(最大淨寬 14.6 公尺、最大跨距 11.7 公尺)
2. 桃園市「土地公坡橋」(最大淨寬 12 公尺、最大跨距 11.1 公尺)
3. 新竹縣「德和橋」(最大淨寬 5.3 公尺、最大跨距 15.4 公尺)

5.1 實地測試

本研究設備執行檢測流程如圖 7 所示，設備前置安裝操作人員需 5 員，所需時間約 20 分鐘。

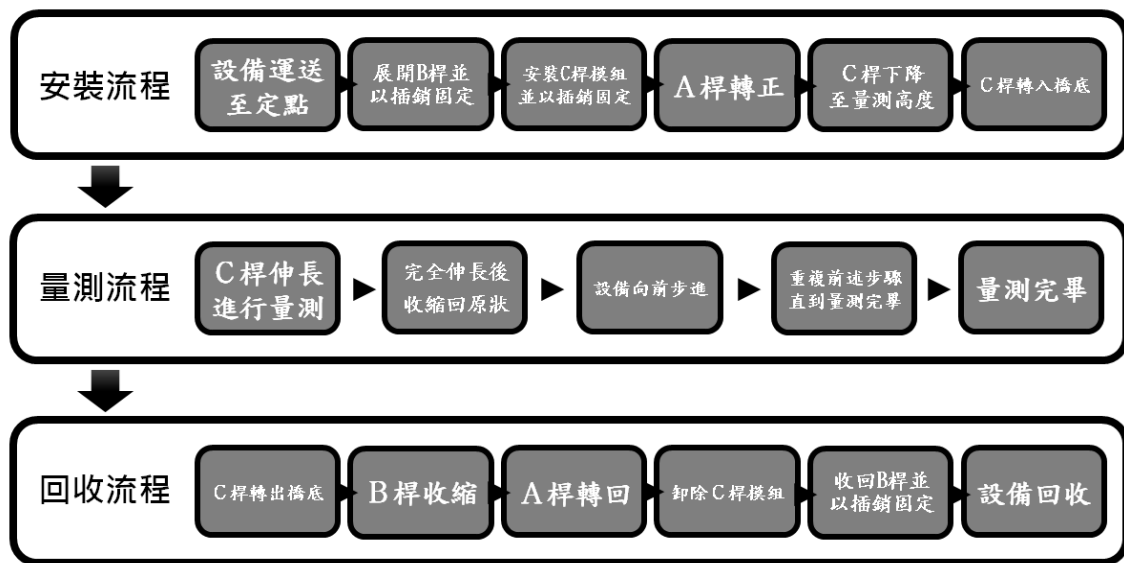


圖 7 檢測作業流程圖

5.2 量測影像

實地測試之量測影像如圖 8 至圖 10 所示，當設備主體移動至定位後，C 桿以步進方式每次移動約 60cm 伸入梁底檢測取得影像，當伸長至最長後收回，設備本體前進約 50cm，再重複伸長 C 桿取得下一區段影像。



圖 8 梁底實拍影像(A)



圖 9 梁底實拍影像(B)



圖 10 轉動攝影裝置拍攝梁底橋台結構

六、結論與建議

6.1 結論

本研究為開發簡便、易攜且實用之橋梁檢測輔助工具之目標，承接前期研究開發之雛型橋檢設備為基礎進行功能精進，著重於影像穩定度及清晰度。參照國內外之橋檢設備依感潮河段橋梁檢測實際面臨之檢測現況與困難，因應不同情境及需求增加本研究橋檢工具之相關功能，經過實地測試適時調整優化橋檢設備及相應之控制元件，經檢視拍攝之影像，本研究橋梁檢測工具橋底影像之穩定度及清晰度大幅提升，已可初步代替橋檢人員進入橋梁梁底空間進行構件檢測。

6.2 建議

機械設備設計參數複雜，難以完全模擬預測，在設備研發過程中所發生之問題，可能成為未來量產過程之瓶頸；同樣在實測過程中發現之錯誤及困難，亦有可能影響未來工程人員使用。以下統整本研究之問題做為未來研究之建議：

1. 設備自動化精進

本研究實測過程中因人為操作失誤造成設備損壞，檢討其過程係因設備整合不完全所致，為防止實際使用時此類狀況之發生，量測流程建議採更高度自動化方式進行，避免設備因操作人員失誤造成損壞。

2. 設備輕便化精進

C 桿長度增加後，造成設備佈設人力、時間大幅增加，且使用時受環境空間、高度限制。建議此設備應以輕便、泛用設計為主，應採取輕便傾向設計，增加檢測人員使用意願。

3. 梁底全幅影像拼接精進

配合橋梁梁底影像拼接需求，未來量測方式需以照片方式呈現，本研究目前設計以影像擷取為主，但已初步測試設備自動固定距離步進之方法，未來可能需再增進定位之精度，以符合影像之需求。

參考文獻

1. 黃進國、王仲宇、冀樹勇 (2011), 「橋梁損傷之快速診斷方法研究」, 中興工程季刊, 137-142 頁。
2. 柯正龍、黃俊豪、黃維信、林晨光、葉隆吉、楊祝壽、黃瑋晟、劉雨青、王沁偉、高振唐 (2019), 「感潮河段橋梁梁底檢測工具研發建置計畫」, 交通部運輸研究所。
3. 邱永芳、黃俊豪、胡啟文、黃維信、葉隆吉、楊祝壽、陳柏源、黃瑋晟、陳祖德 (2017), 「感潮河段橋梁梁底檢測方式初探」, 交通部運輸研究所。
4. The Inquirer Daily News, 2017, Rutgers drone, at home in air and water, inspects Delaware Memorial Bridge, 取自 <http://goo.gl/ZdKM51>, 查詢日期: 2021 年 6 月 27 日。
5. Inchworm Inspires Bridge Inspection Robot, <http://www.botmag.com/9597-2/>, 查詢日期: 2021 年 6 月 27 日。