

100-55-2136

MOTC-IOT-98-EDB002

橋梁檢測機械手臂前端感知/ 偵攝元件之研發進階計畫

著者：曾志煌、陳茂南、巫柏蕙、馮君平、董基良、林志勇、

許峻嘉

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

橋梁檢測機械手臂前端感知/偵攝元件之研發進階計畫 / 曾志煌等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 100. 04
面 ; 公分

ISBN 978-986-02-7620-6 (平裝)

1.交通管理 2.橋樑工程 3.檢驗 4.人力機械

557.15029

100006289

橋梁檢測機械手臂前端感知/偵攝元件之研發進階計畫

著 者：曾志煌、陳茂南、巫柏蕙、馮君平、董基良、林志勇、許峻嘉

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>圖書服務>本所出版品)

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國 100 年 4 月

印 刷 者：良機事務機器有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 80 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010000820 ISBN：978-986-02-7620-6 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：橋梁檢測機械手臂前端感知/偵攝元件之研發進階計畫			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-02-7620-6(平裝)	政府出版品統一編號 1010000820	運輸研究所出版品編號 100-55-2136	計畫編號 98-EDB002
本所主辦單位：運輸工程組 主管：曾志煌 計畫主持人：曾志煌 研究人員：陳茂南 巫柏蕙 聯絡電話：(02)2349-6826 傳真號碼：(02)2545-0427	合作研究單位：亞東技術學院 計畫主持人：馮君平教授 研究人員：董基良、林志勇、許峻嘉 地址：臺北縣板橋市四川路2段58號 聯絡電話：(02)77380145-3131		研究期間 自 98 年 2 月 至 98 年 12 月
關鍵詞：橋梁檢測車、機械手臂、攝影檢測			
<p>摘要：</p> <p>臺灣地區有超過 25,000 座公路橋梁，平均橋齡接近 20 年，隨著橋齡增加，檢測及維修工作負擔也將隨之加重。國內常用之橋梁檢測車存在價格高昂、數量少、體積大、操作不便之問題；而將檢測人員運送至橋梁下執行目視檢測工作也存在較高之安全風險，因此開發一車載橋梁檢測設備使有限人力可快速、經濟及安全地進行橋梁檢測工作，即為本研究的目的。</p> <p>基於 96、97 年開發橋梁檢測機械手臂之經驗及成果，本研究進一步就檢測影像清晰度、裂縫長度計算、橋梁結構死角（大梁腹版、橫隔梁、支承墊）檢測、檢測位置定位等進行設計改善及實測，以補強 97 年度研發成果之功能，俾使橋梁檢測機械手臂更具實用價值。本研究除對整體機械手臂結構進行有限元素分析外，亦實地於省道臺 2 丙線長潭橋進行驗證測試，檢視機械手臂檢測作業之操作流程，並進行攝影機傳輸影像之靜態和動態測試，以檢視攝影品質。經實地檢測驗證，本研究開發之橋梁檢測機械手臂滿足檢測需求，可作為橋梁檢測之初步篩選工具，而各組件及設備之經費需求總計約在 80 萬元以內，具經濟效益。</p>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 4 月	200	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（解密條件：<input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密， <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Advanced Research & Development on Detecting Component of Mechanical Arm for Bridge Inspector			
ISBN(OR ISSN) ISBN978-986-02-7620-6(pbk.)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010000820	IOT SERIAL NUMBER 100-55-2136	PROJECT NUMBER 98-EDB002
DIVISION: Engineering Division DIVISION DIRECTOR: James C.H. Tseng PRINCIPAL INVESTIGATOR: James C.H. Tseng PROJECT STAFF: Chen, Mao-Nan , Wu, Po-Huei PHONE: (02)2349-6826 FAX: (02)2545-0427			PROJECT PERIOD FROM February 2009 TO December 2009
RESEARCH AGENCY: Oriental Institute of Technology PRINCIPAL INVESTIGATOR: Fung, Chin-Ping PROJECT STAFF: Doong, Ji-Liang, Lin, Chih-Yung, Hsu, Chun-Chia ADDRESS: 58,Sec.2,Sihchuan Rd.,Pan-Chiao City,Taipei County 22061,Taiwan, R.O.C. PHONE: (02)77380145-3131			
KEY WORDS: Bridge inspector, Robot arm, Video inspecting			
ABSTRACT: <p>The number of highway bridges in the Taiwan area is over 25,000, and the average age of each bridge is nearly 20. The work load of inspection and maintenance increases with bridge age. The bridge inspector used now has the shortcomings of high cost, huge body and difficult operation. Besides, huge risk occurs in the inspection procedure in which a worker is placed underneath the bridge. This project thus develops a prototype bridge inspector carried by vehicle to inspect bridges in a fast, economic and safe way.</p> <p>Based on the experience and results of projects from 2007 & 2008, developing the bridge inspector, this project further focuses on photography definition, crack length calculation, vision dead angles, and inspection positioning to enhance functions of the bridge inspector prototype. The robot's structure is analyzed using the finite element method. Field tests were taken on Chang-Tang Bridge (Provincial Highway No. 2C) to validate the operation process of the bridge inspector and examine the photograph quality under static and moving conditions. Field tests showed that the bridge inspector developed by this project satisfied the requirement of inspection for a screening tool, and provided of great economic benefit to bridge inspection with a cost of less than NT. 800,000.</p>			
DATE OF PUBLICATION April 2011	NUMBER OF PAGES 200	PRICE 200	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

第一章 緒論.....	1-1
1.1 計畫背景.....	1-1
1.2 研究目的.....	1-2
1.3 研究範圍與對象.....	1-3
1.4 研究內容與工作項目.....	1-4
第二章 橋梁檢測設備回顧.....	2-1
2.1 國外橋梁檢測設備.....	2-1
2.1.1 大型橋梁檢測設備.....	2-1
2.1.2 小型橋梁檢測設備.....	2-9
2.2 國內檢測車發展.....	2-13
2.2.1 營建署 89 年度「機械手臂技術與橋梁結構安全檢測之應用」計畫.....	2-13
2.2.2 本所 96 年度「橋梁檢測機械手臂研發計畫」.....	2-17
2.2.3 本所 97 年度「橋梁檢測機械手臂研發進階計畫」.....	2-22
第三章 橋梁檢測機械手臂改善設計.....	3-1
3.1 檢測影像品質及裂縫長度計算.....	3-1
3.2 橋梁結構死角檢測.....	3-16
3.3 機械手臂結構強度分析.....	3-20
3.4 檢測位置定位.....	3-37
3.5 機械手臂機構平衡.....	3-43
3.6 機械手臂設備規格.....	3-49
第四章 橋梁檢測機械手臂實測.....	4-1
4.1 目標檢測範圍 4.5 公尺橋檢實測.....	4-1
4.2 目標檢測範圍 6.0 公尺橋檢實測.....	4-9
第五章 結論與建議.....	5-1

5.1 結論.....	5-1
5.2 建議.....	5-1
參考文獻	參-1
附錄 1 期中報告審查意見表	附 1-1
附錄 2 期末報告審查意見表	附 2-1
附錄 3 期末簡報	附 3-1
附錄 4 橋梁檢測機械手臂安裝手冊	附 4-1
附錄 5 橋梁檢測機械手臂操作手冊	附 5-1

表目錄

表 1-1 臺灣地區之橋梁數量統計	1-1
表 1-2 臺灣地區橋梁橋齡在 40 年以上之橋梁數量統計	1-2
表 1-3 臺灣地區橋梁之平均橋齡統計	1-2
表 1-4 臺灣地區橋梁依橋面寬度分類之數量統計	1-4
表 2-1 德國 MOOG 公司的 MBI200-1.5/S 重型裝載設備規格	2-8
表 2-2 機械手臂尺寸及重量	2-15
表 3-1 利凌企業之高解析日夜兩用 12 倍高速球型攝影機(SP2128N)規格	3-3
表 3-2 不同鏡頭放大倍率之 A4 紙邊長長度計算結果	3-13
表 3-3 不同 CCD 傾斜角度之長度計算結果	3-15
表 3-4 TORAY T300 carbon/epoxy 材料係數	3-29
表 3-5 全球衛星定位系統 A-GPS 訊號定位之相對誤差	3-42
表 3-6 全球衛星定位系統 GPS 訊號定位之相對誤差	3-42
表 3-7 橋檢車機械手臂各設備組件性能規格和價格	3-49

圖目錄

圖 1.1 研究架構及流程.....	1-5
圖 2.1 Hydra Platforms Mfg Inc.橋梁檢測車 HPT60 運輸尺寸	2-2
圖 2.2 Hydra Platforms Mfg Inc.橋梁檢測車作業實況	2-2
圖 2.3 Aspen Aerials 橋梁檢測車作業實況	2-3
圖 2.4 Aspen Aerials 最大的橋梁檢測作業平臺 A-75	2-4
圖 2.5 N. E. Bridge Contractors, Inc.執行鐵路橋梁檢測.....	2-5
圖 2.6 MOOG 公司重型裝載設備及吊籃式設備示意圖	2-6
圖 2.7 MOOG 公司重型裝載設備之橋梁檢測實況之 1	2-7
圖 2.8 MOOG 公司重型裝載設備之橋梁檢測實況之 2	2-7
圖 2.9 Facelift, Inc.的橋梁檢測人員承載設備(Nifty height rider 120NBE).....	2-9
圖 2.10 Carnegie Mellon 大學之蛇狀機械手臂	2-10
圖 2.11 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 之小型遙控直升機執行橋梁檢測 ...	2-11
圖 2.12 美國加州交通部及 FHWA 之高空橋梁檢測系統概念	2-12
圖 2.13 JLN Labs 之遙控直升機	2-12
圖 2.14 營建署 89 年計畫之機械手臂設計與組裝簡圖	2-14
圖 2.15 富練橋之上游全貌	2-16
圖 2.16 橋檢車在富練橋實測之準備作業狀況	2-16
圖 2.17 橋檢車在富練橋作業實況	2-17
圖 2.18 本所 96 年度計畫之機械手臂設計與組裝簡圖	2-18
圖 2.19 機械手臂組裝後油壓推進測試	2-19
圖 2.20 沒有光源環境下 Speed Dome 攝影機攝影品質	2-20
圖 2.21 橋梁檢測機械手臂室外測試	2-20
圖 2.22 CCD 連續攝影之影像擷取	2-21
圖 2.23 本所 97 年計畫之機械手臂設計與組裝簡圖	2-23

圖 2.24 橋檢車及機械手臂之實體車.....	2-23
圖 2.25 橋檢車在澎湖跨海大橋實測之作業實況(1).....	2-24
圖 2.26 橋檢車在澎湖跨海大橋實測之作業實況(2).....	2-25
圖 3.1 利凌企業之高解析日夜 2 用 12 倍高速球型攝影機(SP2128N).....	3-2
圖 3.2 低照度環境下攝影.....	3-4
圖 3.3 雙 CCD 方式配置之攝影設備	3-5
圖 3.4 左側攝影機關掉紅外線功能雙 CCD 所攝得影像比較	3-5
圖 3.5 雙 CCD 均開啟紅外線功能所攝得影像比較	3-6
圖 3.6 兩互相平行之 CCD 成像示意圖	3-7
圖 3.7 目標點之空間座標推導.....	3-8
圖 3.8 平視雙眼立體成像原理圖.....	3-10
圖 3.9 鏡頭放大倍率為 1 時攝影機攝得之影像.....	3-12
圖 3.10 鏡頭放大倍率為 3.5 時攝影機攝得之影像.....	3-12
圖 3.11 CCD 影像面法向量與物件 A4 紙平面法向量兩者間夾角 0 度時所攝得之影像	3-14
圖 3.12 CCD 影像面法向量與物件 A4 紙平面法向量兩者間夾角 45 度時所攝得之影像	3-14
圖 3.13 夜間室外環境下計算白色 POM 塑鋼板上之圓直徑	3-16
圖 3.14 新設計所增加之油壓缸(第 4 臂).....	3-17
圖 3.15 第 4 臂油壓缸組裝.....	3-17
圖 3.16 第 4 臂觀察橋梁結構各死角之作業示意圖.....	3-18
圖 3.17 第 1 階段設計之機械手臂組裝及操作測試.....	3-19
圖 3.18 第 2 階段設計之機械手臂組裝及操作測試.....	3-19
圖 3.19 折疊式第 3 臂設計.....	3-20
圖 3.20 第 1 階段設計之機械手臂有限元素模型.....	3-21
圖 3.21 第 1 階段設計之機械手臂考慮自重及承受負荷後形變狀況.....	3-22

圖 3.22 第 1 階段設計之機械手臂各結構件應力大小及分佈.....	3-22
圖 3.23 第 1 階段設計之機械手臂各結構件應變大小及分佈.....	3-23
圖 3.24 第 2 階段設計之機械手臂有限元素模型.....	3-24
圖 3.25 第 2 階段設計之機械手臂考慮自重及承受負荷後形變狀況.....	3-25
圖 3.26 第 2 階段設計之機械手臂各結構件應力大小及分佈.....	3-25
圖 3.27 第 2 階段設計之機械手臂各結構件應變大小及分佈.....	3-26
圖 3.28 機械手臂受各振動頻率動態作用力下的垂直方向位移量.....	3-27
圖 3.29 機械手臂受各振動頻率動態作用力下的水平方向位移量.....	3-27
圖 3.30 第 3 臂碳纖維疊層有限元素模型.....	3-28
圖 3.31 碳纖維第 3 臂有限元素模型.....	3-30
圖 3.32 碳纖維第 3 臂考慮自重及承受負荷後之變形狀況.....	3-31
圖 3.33 碳纖維第 3 臂表面纖維方向之應力大小及分佈.....	3-31
圖 3.34 碳纖維第 3 臂橫向之應力大小及分佈.....	3-32
圖 3.35 碳纖維第 3 臂板厚度方向之應力大小及分佈.....	3-32
圖 3.36 碳纖維第 3 臂應變大小及分佈.....	3-33
圖 3.37 鋁合金第 3 臂有限元素模型.....	3-34
圖 3.38 鋁合金第 3 臂考慮自重及承受負荷後之變形狀況.....	3-35
圖 3.39 鋁合金第 3 臂縱軸方向之應力大小及分佈.....	3-35
圖 3.40 鋁合金第 3 臂橫軸方向之應力大小及分佈.....	3-36
圖 3.41 鋁合金第 3 臂板厚度方向之應力大小及分佈.....	3-36
圖 3.42 鋁合金第 3 臂應變大小及分佈.....	3-37
圖 3.43 橋梁構件編碼方式.....	3-39
圖 3.44 A-GPS 接受器	3-40
圖 3.45 A-GPS 定位資料點處理	3-40
圖 3.46 橋檢車位置經緯度資訊之呈現畫面.....	3-41
圖 3.47 第 3 臂之負載、自重及配重分佈.....	3-45

圖 3.48 負載力矩與平衡力矩之實際平衡狀況測試.....	3-46
圖 3.49 前方安定度計算規範.....	3-46
圖 3.50 橋檢車受最大傾覆力矩時之受力狀況.....	3-48
圖 4.1 省道臺 2 丙線長潭橋.....	4-1
圖 4.2 第 3 臂跨越橋護欄.....	4-2
圖 4.3 將第 3 臂垂降時至橋大梁以下.....	4-3
圖 4.4 迴轉第 1 臂將攝影機伸入橋面下.....	4-3
圖 4.5 收回第 1 臂將攝影機由橋外緣向橋中心移動.....	4-4
圖 4.6 機械手臂負載攝影機伸入橋面下.....	4-4
圖 4.7 攝影機預定停留位置及檢測範圍.....	4-5
圖 4.8 攝影機於橋外側所拍攝之畫面.....	4-6
圖 4.9 攝影機伸入橋中央到達 2 大梁間.....	4-6
圖 4.10 第 4 臂油壓缸上升.....	4-7
圖 4.11 第 4 臂油壓缸縮降.....	4-7
圖 4.12 攝影機攝得之大梁腹版.....	4-8
圖 4.13 攝影機攝得之橫隔梁.....	4-8
圖 4.14 攝影機攝得之支承墊.....	4-9
圖 4.15 橋檢車設置安全警示及機械手臂整備.....	4-10
圖 4.16 第 3 臂組裝.....	4-11
圖 4.17 第 3 臂舉升.....	4-11
圖 4.18 第 3 臂到達檢測位置.....	4-12
圖 4.19 橋檢車以低速向前行駛之動態檢測.....	4-12
圖 4.20 動態檢測擷取之畫面.....	4-14
圖 4.21 第 4 臂油壓缸未伸長(圖左)及推出達最大行程(圖右)時之檢測影像	4-15
圖 4.22 第 4 臂完全下降至大梁底面以下示意圖.....	4-15

第一章 緒論

1.1 計畫背景

跨越美國密西西比河的明尼蘇達州明尼亞波利 35 號西向州際高速公路(I-35W)大橋於民國 96 年 8 月 1 日傍晚發生斷裂，造成數十人落水失蹤。該橋梁是一條水泥和鋼造的懸臂式大橋，橋齡已有 40 年。這起意外事件再次引起全球各地對橋梁結構安全的高度重視，也警示橋梁管理機關對橋齡高的橋梁應加強定期目視觀測橋梁損壞情形，做好監控、列管之工作。橋梁的腐蝕、裂化多為漸進式，換言之，橋梁斷裂之前應會顯出某些徵兆，因此若能及早發現問題，即可達到預警的效果並解決問題。

臺灣位處地震頻繁地帶，橋梁結構常遭受地震侵襲，而921地震更造成大範圍土石鬆動，其後每次颱風，大量降雨造成的急流夾帶泥砂，不斷衝擊橋梁，更提高了橋梁受損的風險。這些地震或颱風對橋梁造成的破壞若能及早發現並加以預警或修復，即可大幅降低生命的傷亡並延長橋梁壽命。

依據「臺灣地區橋梁管理資訊系統」98年12月的統計資料，臺灣地區共有橋梁25,485座(不含鐵路橋梁)，平均橋齡19.7年，橋齡在40年以上者達760座，詳細之數量統計列於表1-1至表1-3。由橋齡的統計數字顯示，臺灣地區橋梁已進入老化期，檢測及維修工作將隨橋齡日增，而檢測結果為橋梁是否需進行維修之依據，故檢測之重要程度與工作量較維修更為大且繁重。

表1-1 臺灣地區之橋梁數量統計

橋梁管理機關	管理橋總數
縣市政府	19,368
公路總局	3,975
高公局	2,142
總計	25,485

表1-2 臺灣地區橋梁橋齡在40年以上之橋梁數量統計

橋梁管理機關	橋齡在40年以上之橋數
縣市政府	407
公路總局	353
高公局	0
總計	760

表1-3 臺灣地區橋梁之平均橋齡統計

橋梁管理機關	平均橋齡(年)
縣市政府	19.82
公路總局	22.52
高公局	13.87
總計	19.70

1.2 研究目的

橋梁構件會隨著時間累積自然而然發生劣化現象，若再伴隨著交通量增加、重車流量增多，劣化則可能加速加劇。此外，天災及人為事故對橋梁的破壞，往往比自然劣化帶來的傷害更大，因此橋梁維修是無法避免的。然而，無論要發現橋梁的損壞狀況及程度，或是決定維修之方式，都必須以橋梁檢測的結果作為依據。

龐大的檢測工作需要充足的人力，然而目前各橋梁管理單位執行檢測工作之人力卻不足，迫切需要可提高效率及節省人力的檢測輔助設備。目前雖已有自國外採購之橋梁檢測車供管理單位使用，但由於該型式之橋梁檢測車執行檢測時係將檢測人員運送至橋梁下執行目測工作，而且體積大、價格高、數量少，因此很難滿足現階段及未來的龐大檢測工作量。當前執行橋梁檢測工具的需求在一兼顧效率、經濟、安全的小型橋梁檢測車，以作為初步之橋梁檢測篩選工具，再視需要對有疑慮之處以大型橋檢車執行進一步檢測，或可利用大、小型橋檢車分別針對大、小型橋梁執行檢測，以提高整體檢測效率。

營建署在民國 89 年即曾進行橋梁檢測車^[1]之研發，該檢測車以大貨車承載機械手

臂，並將 CCD 攝影機置於機械手臂前端，藉此執行檢測工作並傳輸檢測之影像。然而，此研發成果之機械手臂機構過於龐大，且整體結構過重，在操作上並不方便，故未能推廣。本所於 96 年試行開發以小型箱型車為載臺的機械手臂橋梁檢測車，當年度計畫成果成功解決過去機械手臂龐大及以大貨車為載臺的問題，並初步克服機械手臂機構之收納性。以小型箱型車承載裝置 CCD 攝影機的機械手臂執行檢測工作，並採用紅外線攝影機，經驗證在低照度環境下及機械手臂操作時仍有良好的檢測品質^[2]。

延續前述計畫之成果，本所 97 年更進一步朝實用及方便的角度持續改良橋梁檢測車以供橋梁管理單位實際執行檢測之用。97 年計畫所研發之橋梁檢測機械手臂是以小型貨車(3.5 公噸以下，駕駛人可持小型車普通駕照)為機械手臂載臺，採 3 臂式機械手臂，前 2 臂均為 3 節式之伸縮臂，第 3 臂則為固定長度臂，其上附載 2 個紅外線 CCD 攝影機，拍攝時同步將影像傳輸給橋面上的檢測人員，改變傳統上由檢測人員直接深入橋面下執行目測的方式，降低執行檢測作業之風險。所開發之橋梁檢測機械手臂曾分別實地於翡翠水庫一號橋、澎湖跨海大橋及塔寮坑溪堤岸邊進行數次之測試，證實機械手臂檢測作業之可行^[3]。

96、97 年研究計畫開發之橋梁檢測車著重在檢測設備承載車輛之改裝設計、機械手臂之設計分析改進及攝影品質之清晰穩定，研究成果大體上已滿足橋梁檢測初步篩選作業所需。本(98)年度將以 97 年度之研究成果為基礎，進一步就檢測影像清晰度、裂縫長度計算、橋梁結構死角（大梁腹版、橫隔梁、支承墊）檢測、檢測位置定位等進行設計改善及實測，俾使橋梁檢測機械手臂更具實用價值。此外，檢測設備承載車輛仍將延續 97 年計畫使用之 3.5 公噸以下小貨車，並訂定操作流程、增加機械手臂操作穩定度，以補強 97 年度研發成果之功能。

1.3 研究範圍與對象

97 年度研究開發之橋梁檢測機械手臂檢測範圍可達 6 公尺，因此雙向來回各進行一次，可檢測橋面寬度 12 公尺的橋梁。依「臺灣地區橋梁管理資訊系統」之統計資料，

如表 1-4 所示，國內橋寬小於 12 公尺之橋數計有 18,579 座，佔橋梁總數之 72.90%，即已有半數以上橋梁應可應用此機械手臂執行檢測。另依據 97 年度之設計及實測經驗，增加機械手臂第 3 臂之長度即能有效增加檢測範圍，但相對增加之負重已非 3.5 噸以下小貨車所能承載，故 98 年度之橋檢車開發設計，將以 97 年之橋檢車為基礎，強化橋檢車開發之實用價值，特別針對大梁腹版、橫隔梁、支承墊等原機械手臂之檢測死角進行設計改善。由於因應檢測死角須變更部份機構設計，致機械手臂重量增加，為補償所增加之重量，檢測範圍暫以單邊檢測 4.5 公尺為目標，在設計構想實證之後，只要以較大型之貨車承載檢測設備即能擴大檢測範圍。

表1-4 臺灣地區橋梁依橋面寬度分類之數量統計

橋梁管理 機關	橋寬小於 9 公尺 之橋數	橋寬小於 12 公尺 之橋數	橋寬小於 15 公尺 之橋數	橋寬小於 20 公尺 之橋數
縣市政府	13,849	16,362	17,581	18,346
公路總局	1,110	1,626	2,005	2,909
高公局	386	591	788	1,746
合計	15,345	18,579	20,374	23,091
佔橋梁總 數百分比	60.21%	72.90%	79.95 %	90.61 %

1.4 研究內容與工作項目

本研究以 97 年度計畫所開發之橋梁檢測機械手臂為基礎，沿用 3.5 公噸以下小型貨車承載機械手臂配置紅外線 CCD 攝影機，利用影像處理技術檢測橋梁結構，作為初步檢測篩選工具，後續再視實際需求以舉高車或大型橋梁檢測車搭載養護人員至橋面版下方執行進一步檢測。98 年度研究計畫除延續前 2 年研究成果，賡續進行操作流程之簡化，並增加操作之穩定度外，並進一步就檢測影像清晰度、裂縫長度計算、檢測死角（大梁腹版、橫隔梁、支承墊）克服、檢測位置定位等進行設計改善及實測，俾使橋梁檢測機械手臂更具實用價值。計畫內容及工作項目如下：

1. 以 3.5 公噸車輛為裝備之承載平台，評估延長機械手臂長度以增加可檢測車道

數之可行性。

2. 研究解決檢測死角（如大梁腹版、支承墊）、檢測位置自動定位、強化檢測影像品質、減輕機構重量、簡化操作流程、增加機械手臂操作之穩定度等之方式。
3. 研究改良原橋梁目視檢測構件模型或開發新機構及修改控制軟體，以達成前述研究重點，改良之構件或新開發之機構以有限元素法分析（含動力及靜力分析）結構應力。
4. 修改或開發前端數位影像擷取及後端資料分析軟硬體，並加以整合。
5. 進行實際橋梁實機測試。
6. 改良或開發之橋梁目視檢測軟體輸出結果與後端橋梁資料庫整合。
7. 依據現有勞工安全衛生相關法規，評估檢討所改良或開發之橋梁目視檢測構件模型之穩定性、合法性、勞工操作之安全性，並撰寫構件設備規格書及操作說明書。

研究架構及流程如圖 1.1 所示。

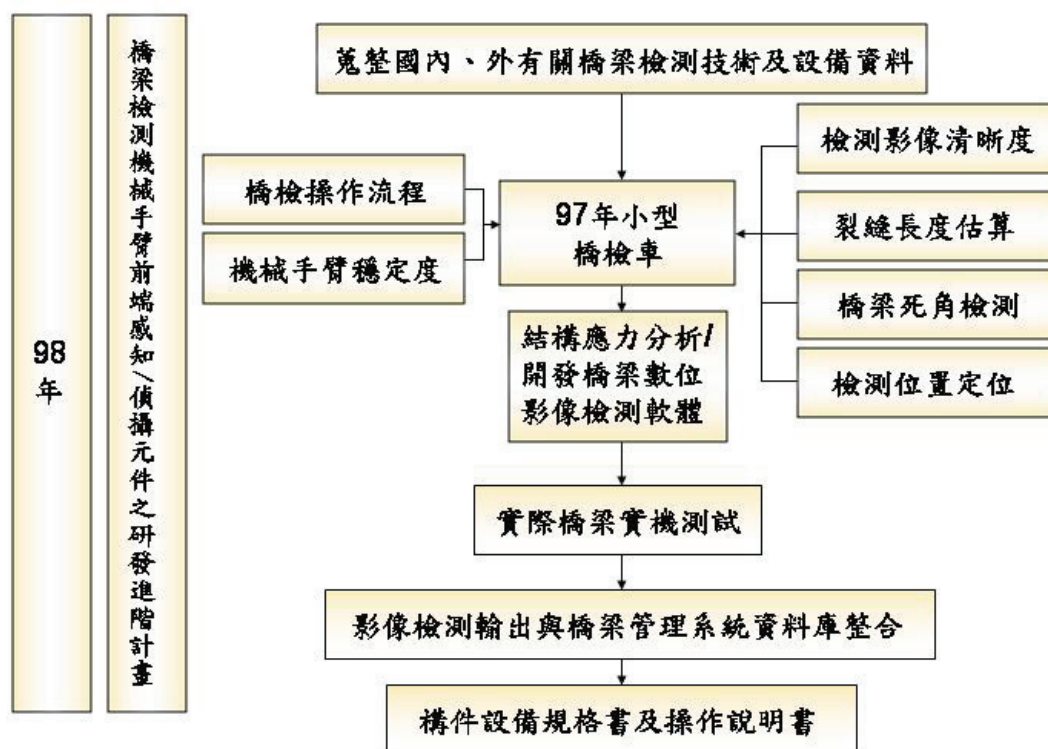


圖 1.1 研究架構及流程

第二章 橋梁檢測設備回顧

目前橋梁目視檢測多以不同設備承載檢測人員或影像擷取裝置來執行，相關檢測方法及設備整理及回顧如下：

2.1 國外橋梁檢測設備

橋梁檢測設備大致可以承載檢測人員或影像擷取裝置來區分，承載檢測人員者多為大型橋梁檢測設備，由多節臂桿組成檢查機械手臂，但其機械手臂部份的設計型式各異，視各開發廠商構想而定，大致上其臂桿均可作360°旋轉，並可檢查到橋梁的每個角落，而其機械手臂尾端從只容許1個人站立之籃筒到可同時站立數人之平臺均有^[4-8]；而承載影像擷取裝置之檢測設備則多較為小型，其發展是為保障檢測人員之安全，故以攝影機等設備拍攝橋梁取代人員直接目測，其研發和應用上均在於如何將攝影機送至橋面下以執行拍攝工作^[9-12]。

2.1.1 大型橋梁檢測設備

- Hydra Platforms Mfg Inc.^[4]：

Hydra Platforms Mfg Inc.是1家專門設計和製造橋面下檢測自動舉升平臺的公司，其所開發之大型機械手臂作業平臺有卡車承載型(Truck mounted platforms)及拖車承載型(Trailer mounted platforms)2種。圖2.1為該公司的一種卡車承載型產品(HPT66)運輸時尺寸，全車長12.2公尺，寬2.45公尺，高4.1公尺，總重(含作業平臺)為25公噸。執行橋梁檢測作業時機械手臂展開之作業實況如圖2.2所示，它的平臺工作範圍可達20.1公尺，平臺承載能力635公斤，最大下降深度為橋面7.3公尺。

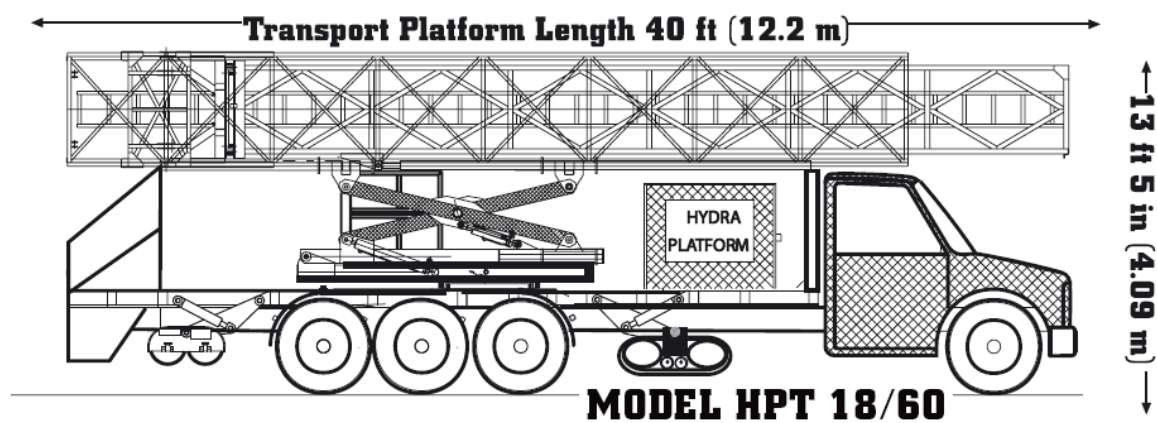


圖 2.1 Hydra Platforms Mfg Inc.橋梁檢測車 HPT60 運輸尺寸^[4]



圖 2.2 Hydra Platforms Mfg Inc.橋梁檢測車作業實況^[4]

- Aspen Aerials^[5]：

Aspen Aerials 是 1 家專門設計及製造橋梁檢測及維護機械手臂作業平臺的公司，其各式檢測車之操作實況如圖 2.3 所示。該公司之產品係以吊籃式機械手臂作業平臺為主，這種機械手臂的優點在於它可以依實際狀況將檢測車停放在橋面上，自上而下檢測橋面下狀況，或以高空作業方式將檢測車停放在橋面下之一般平面道路上，自下而上檢測橋面。以該公司最大的橋梁檢測作業平臺 A-75 為例，如圖 2.4 所示，其最大水平檢測範圍可達 22.8 公尺，垂直橋面深度可達 22 公尺，向上舉升高度可達 16.1 公尺，吊籃的承載重量為 318 公斤，運輸時全車尺寸為長 12.75 公尺，高 4.07 公尺。圖 2.5 則為 Aspen Aerial A-30 橋梁檢測車執行鐵路橋梁檢測之情形。



圖 2.3 Aspen Aerials 橋梁檢測車作業實況^[5]



圖 2.4 Aspen Aerials 最大的橋梁檢測作業平臺 A-75^[5]



圖 2.5 N. E. Bridge Contractors, Inc.執行鐵路橋梁檢測^[7]

- MOOG GMBH^[6]：

MOOG 公司為一專門製造橋梁檢測平台之公司，其產品有重型裝載設備及吊籃式設備。2 種設備之示意圖如圖 2.6 所示，使用大貨車或聯結車為載台，藉由該設備將人員送至橋面下執行檢測作業。

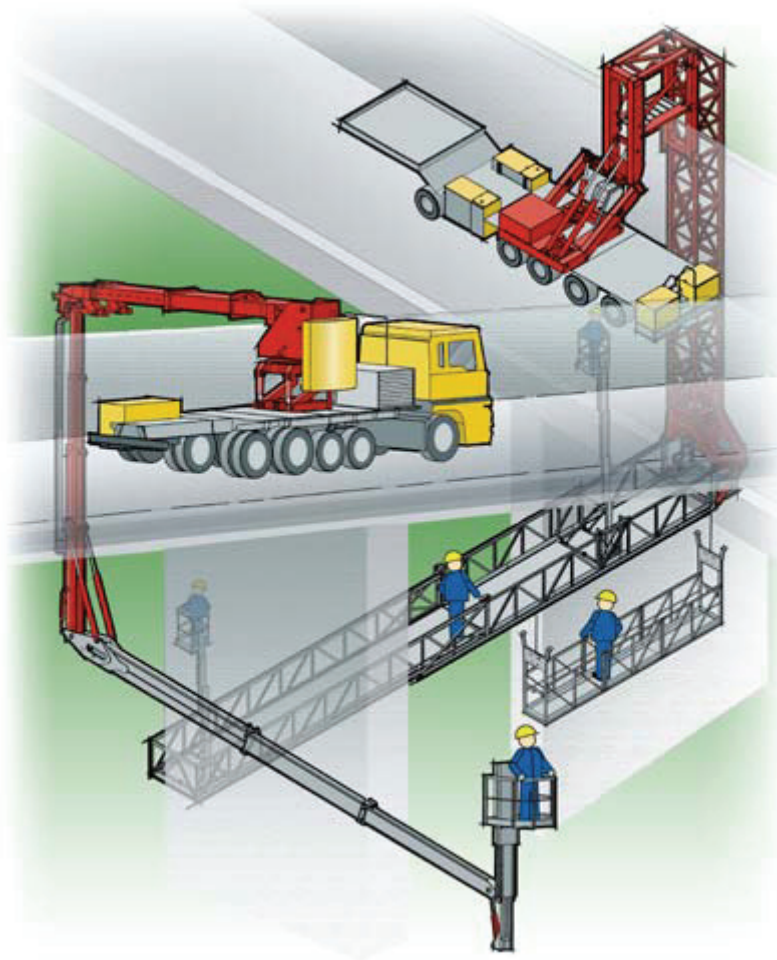


圖 2.6 MOOG 公司重型裝載設備及吊籃式設備示意圖^[6]

MOOG 公司重型裝載設備之橋梁檢測實況如圖 2.7 及圖 2.8 所示，該公司所開發之 MBI200-1.5/S 規格如表 2-1 所示。交通部公路總局擁有 2 部橋梁檢測車，分別負責臺灣本島東西部橋梁之檢測工作。該設備之最大水平工作範圍是 20 公尺，最大垂直下降深度是 9.5 公尺，平台末端載重為 400 公斤，因整車含設備淨重達 32 公噸，依現行交通法規無法申領車輛牌照，僅以通行證作為運輸依據。其運輸尺寸分別為長 12 公尺，寬 2.5 公尺，高 4 公尺。



圖 2.7 MOOG 公司重型裝載設備之橋梁檢測實況之 1^[6]



圖 2.8 MOOG 公司重型裝載設備之橋梁檢測實況之 2^[6]

表2-1 德國MOOG公司的MBI200-1.5/S重型裝載設備規格

技術數據	
最大水平工作範圍	20.0 公尺
最大垂直下降深度	9.5 公尺
平臺寬度	2.5 公尺
橋面佔用寬度	2.5 公尺
平臺最大負載重量	800 公斤
平臺末端最大負載重量.	400 公斤
跨越行人道寬度	2.5 公尺
跨越護欄最大高度	3.0 公尺
平臺旋轉度	180°
運輸尺寸：	
淨重	32000 公斤
總長	12.0 公尺
總寬	2.5 公尺
總高	4.0 公尺
設有液壓驅動自行推進裝置及平臺	
配有電源插座	

- Facelift, Inc.^[8]

Facelift, Inc.的橋梁檢測人員承載設備(Nifty height rider 120NBE)，如圖 2.9 所示，為一吊籃式高空作業車。檢測人員執行作業時是將作業車停於橋下道路，並於作業車平穩固定後將人員舉升至橋面下實施目測檢視。



圖 2.9 Facelift, Inc.的橋梁檢測人員承載設備(Nifty height rider 120NBE)^[8]

2.1.2 小型橋梁檢測設備

前述之橋梁檢測設備都是搭載檢測人員至橋面下執行目視檢測工作，為了要確保檢測人員之安全，其作業平臺往往非常堅固且龐大，而承載作業平臺之車輛也幾乎都是大型卡車，這些都是檢測工作的額外負擔。小型橋梁檢測設備方面則呈現不同的檢測思維，其以攝影機來取代檢測人員直接目測，提高檢測工作的安全性，同時，也藉助攝影

機的影像儲存功能，讓檢測影像能夠被重覆檢視，彌補檢測人員執行目視檢測時可能有的疏失。目前由於電子產業的進步，攝影機的功能及重量亦逐漸能滿足橋梁檢測上的要求，因而有取代人員直接目測的趨勢，其研發和應用上即在於如何將攝影機送至橋面下執行拍攝工作。以下即介紹以攝影機執行橋梁檢測的相關應用發展。

- Sensor Based Planning Lab, Carnegie Mellon University^[8]：

蛇狀機械手臂(Serpentine Robot)是由 Carnegie Mellon 大學的 Sensor Based Planning Lab 所發展。蛇狀機械手臂之命名係因為其機械手臂突破傳統上關節處僅有 3 個自由度的限制，能像蛇一般蜿蜒運動。該機械手臂前端裝置攝影機後，能對橋梁鋼骨結構執行檢測，也能在殘垣廢墟中執行搜尋救災之任務，其未來之發展及應用上相當具有潛力。

由於該機械手臂的運動軌跡具變化性，因而其研發及應用上之瓶頸在於必須事先作好路徑規劃。以橋梁鋼骨結構檢測為例，需先以橋梁結構的立體設計圖來規劃路徑，再驅動機械手臂依路徑前進。目前的研究成果僅為實驗室模型，如圖 2.10 所示，距離實際運用仍需一段時間。



圖 2.10 Carnegie Mellon 大學之蛇狀機械手臂^[9]

- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (French Public Works Research Laboratory)^[10]：

法國 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 的橋梁檢測方案是採用小型遙控直升機(Plate-forme Mobile d'Instrumentation, PMI)裝置 CCD 執行橋梁拍攝工作，如圖 2.11

所示。



圖 2.11 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 之小型遙控直升機執行橋梁檢測^[10]

以小型遙控直升機執行橋梁檢測不會受地形或橋梁結構之限制，可以深入到橋面下任何位置拍攝。不過，但拍攝時需注意直升機的穩定性，避免晃動，以取得品質較佳的照片，此外，在遙控直升機時若不能目視著直升機，飛行過程中則可能發生意外碰撞，故應特別小心。

- California Department of Transportation (Caltrans), USA^[11]：

美國加州交通部及 FHWA 合作發展一高空橋梁檢測系統(Aerial Platform System for Bridge Inspection)，其概念如圖 2.12 所示，目前仍在原型機發展和測試階段。依其構想，它配備一攝影機，並能夠垂直升空及降落，將攝影機置於欲檢視處 0.6 公尺範圍內，藉由長 30 公尺的光纖來傳送控制訊號及回傳視訊至地面基地。

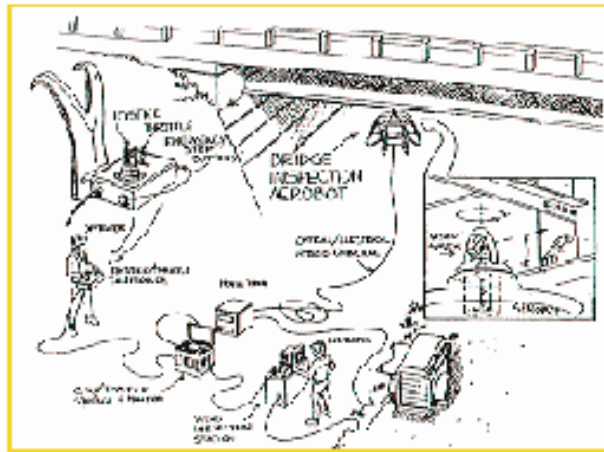


圖 2.12 美國加州交通部及 FHWA 之高空橋梁檢測系統概念^[11]

- JLN Labs^[12] :

Jean-Louis Naudin 的 JLN Labs 亦發展遙控直升機，如圖 2.13 所示，配備高解析度 CCD 來執行橋梁檢測工作。



圖 2.13 JLN Labs 之遙控直升機^[12]

2.2 國內檢測車發展

國內之橋梁檢測車在民國 89 年即由營建署主導發展^[1]，是以油壓及馬達為驅動之機械手臂配合數位攝影機之影像處理來執行橋梁檢測之工作。其後，則是交通部運研所自 96 年之後至今開發之小型橋檢車，各研發階段之內容及成果整理如後。

2.2.1 營建署 89 年度「機械手臂技術與橋梁結構安全檢測之應用」計畫

營建署在民國 89 年首先進行橋檢車開發計畫，目標在於發展 1 種以油壓及馬達為驅動之機械手臂配合數位攝影機，以影像處理的技術解決傳統上使用舉高車或橋梁檢測車由檢測人員執行目視檢測的不便，期使橋梁檢測得以低成本及高效率的進行。橋梁安全檢測的工作範圍極廣，單一研究計畫無法完全涵括，該計畫之執行是藉機械手臂輔以影像處理技術的開發，以簡化及加速傳統目視檢測工作之進行。

該計畫之機械手臂的設計與組裝簡圖如圖 2.14 所示。機械手臂是由 4 隻機械臂所組成，整個機械手臂架設固定於貨車大梁之油壓旋轉盤上。機械臂之配置是第 1 臂(Arm1)垂直於旋轉盤，以油壓馬達配合內齒輪來帶動整支機械臂做旋轉運動；第 2 臂(Arm2)以正交之方式架置於第 1 臂上，第 2 臂之另一端垂直架設第 3 臂(Arm3)；第 3 臂(Arm3)係由一支 1.8 公尺的 C 型鋼及 2 支 1.8 公尺配有滑塊之滑軌所組成，C 型鋼是直接與第 2 臂(Arm2)之一端焊接固定，其他 2 支滑軌藉由滑塊及捲揚機帶動在垂直方向作滑行運動；第 4 臂(Arm4)則連結於第 3 伸縮機械臂之底端，而與第 3 臂成垂直方向，並以第 3 臂為軸心做旋轉運動。第 4 臂共有 2 節，每一節長 2 公尺，可個別做旋轉運動。旋轉運動利用伺服馬達配合減速機做平面旋轉，藉以達到觀察橋面下各點之需求。CCD 攝影機則安置於第 4 臂之最前端，以 BNC 線傳輸方式將影像傳輸至控制電腦之螢幕上。

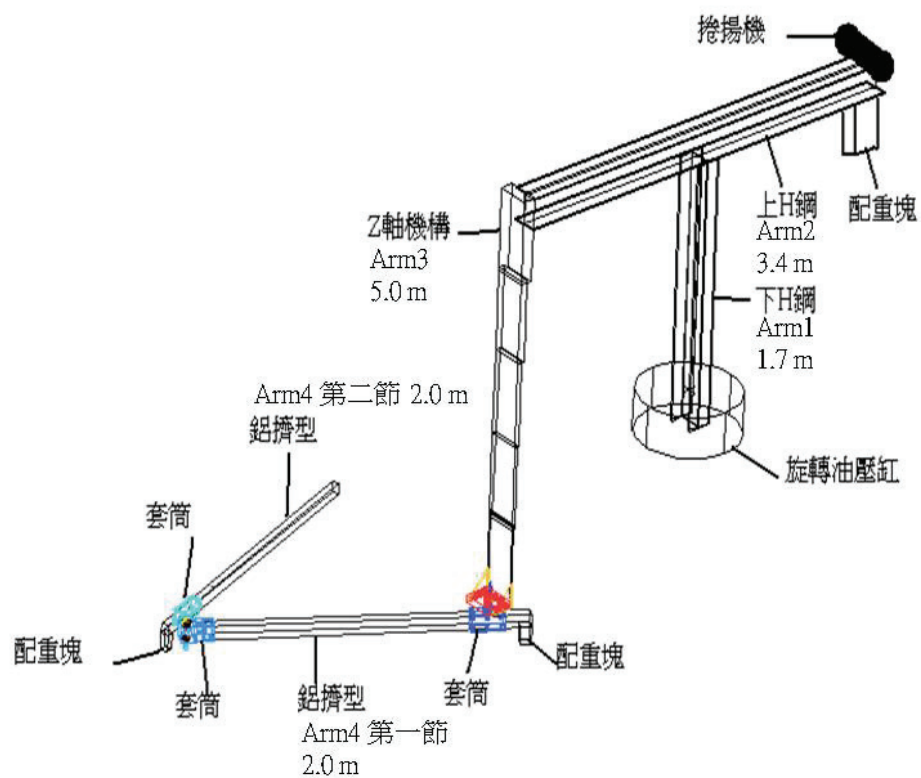


圖 2.14 營建署 89 年計畫之機械手臂設計與組裝簡圖

機械手臂加上配重塊總重量約為 922 公斤，細部尺寸與重量列表如表 2-2。

表2-2 機械手臂尺寸及重量

機械臂編號	尺寸 (公釐)	重量 (公斤)
Arm1	H 鋼梁 250×250×1500	151.8
Arm2	H 鋼梁 250×250× 3400	169.7
	後端配重塊	300
Arm3	C 型鋼 200×75×1800	22.9
	第1節滑塊和滑軌 200×10×1800	76.15
	第2節滑塊和滑軌 200×10×1800	76.15
Arm4	第1節鋁擠型 60×60×2500	7
	第1節套筒 90×80×250	3
	第1節配重塊	84
	第2節鋁擠型 80×80×2500	13.5
	第2節前套筒 100×100×250	1.5
	第2節配重塊	10
	第2節後套筒 110×100×250	2.9
	前後轉軸	2.9
總重		922

該計畫實測選於桃園縣觀音鄉桃 83 線 4K+272.0 之富練橋。富練橋為一單跨簡支橋梁，橋寬 13.1 公尺，橋梁總長 15.9 公尺，交通流量不大，其上游全貌如圖 2.15 所示，橋檢車在富練橋實測之準備作業及實況則如圖 2.16 及圖 2.17 所示。



圖 2.15 富練橋之上游全貌



圖 2.16 橋檢車在富練橋實測之準備作業狀況



圖 2.17 橋檢車在富練橋作業實況

營建署之橋檢車開發計畫的執行成效，整體而言已達成其預定目標，完成機械手臂輔以影像處理技術的開發，以簡化及加速傳統目視檢測工作之進行，並以富練橋進行實測，證明構想之橋檢技術之可行性。然而，由於該橋檢車為超過 3.5 噸之中型貨車，駕駛人必須具備大貨車駕駛執照才能駕駛，且其機械手臂部份淨重近約 1 公噸，整體機構亦顯龐大，在操作上仍有困難；此外，由於其 CCD 攝影機不具夜視功能，在橋面下光線不足的作業場所中拍攝之影像品質仍有疑慮。諸多待克服之問題使計畫構想未能落實及推展。

2.2.2 所 96 年度「橋梁檢測機械手臂研發計畫」^[2]

由於臺灣地區橋梁多屬小型橋梁，橋寬小於 15 公尺之橋數計有 19,378 座，佔橋梁總數之 80.40%；橋寬小於 12 公尺之橋數亦有 17,359 座，達橋梁總數之 72.02%，國外進口之大型檢測車實際應用多有障礙，故本所再推動研發以機械手臂附加 CCD 攝影機

執行橋梁檢測的計畫。針對之前營建署的橋檢車開發計畫之不足，包括以中型貨車作為機械手臂承載車輛、機械手臂結構龐大無法收起、攝影機在光線不足作業場所中之檢測品質等進行研究改善。

96 年度橋檢車開發計畫是以小箱型車為機械手臂承載車輛，機械手臂的設計與組裝簡圖如圖 2.18 所示。整組機械手臂是由 3 隻機械手臂組成，其中第 1 臂有 4 節，各節層層相疊，以滑輪及滑軌相聯並用油壓缸推動作伸縮之直線運動；第 2 臂以 1 頂板與第 1 臂相連，油壓缸推動頂板即可將第 2 臂頂起而與第 1 臂垂直，如圖 2.19 所示，第 2 臂有 3 節，各節外徑不同相互套接而以油壓缸推動作伸縮之直線運動；第 3 臂與第 2 臂相互垂直，以第 2 臂為軸心用油壓缸推動作水平面旋轉。不執行檢測時，第 3 臂與其他機械臂相互分離而可以將第 1 臂與第 2 臂收納入箱型車內，待執行檢測時，再將第 3 臂與第 2 臂接合。

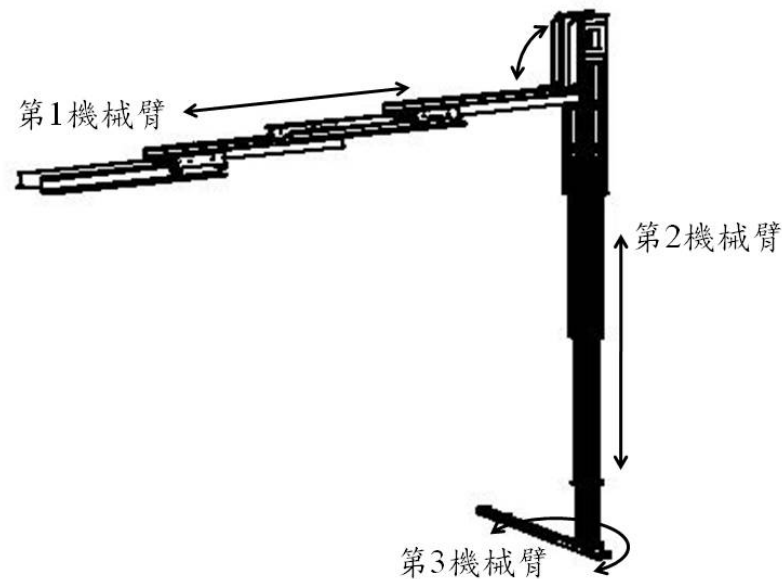


圖 2.18 本所 96 年度計畫之機械手臂設計與組裝簡圖



圖 2.19 機械手臂組裝後油壓推進測試

附載機械手臂之橋梁檢測車所使用的攝影機主要考量為重量及環境亮度。由於攝影機裝設在機械手臂前端，為避免機械手臂承受過大的負荷，因此攝影機的重量要輕；此外，橋面下的檢測環境往往光源不足，因此攝影機應考慮紅外線攝影，或配備輔助光源。故 96 年橋檢車開發計畫選用具備 22 倍光學及 10 倍數位伸縮鏡頭之高解析度/低照度彩色攝影機 Speed Dome，攝影機可以水平 360°連續旋轉，垂直 90°旋轉，180°自動翻轉，而紅外線可達 50 公尺之距離。Speed Dome 攝影機在沒有光源的環境下測試其攝影品質，如圖 2.20 所示。

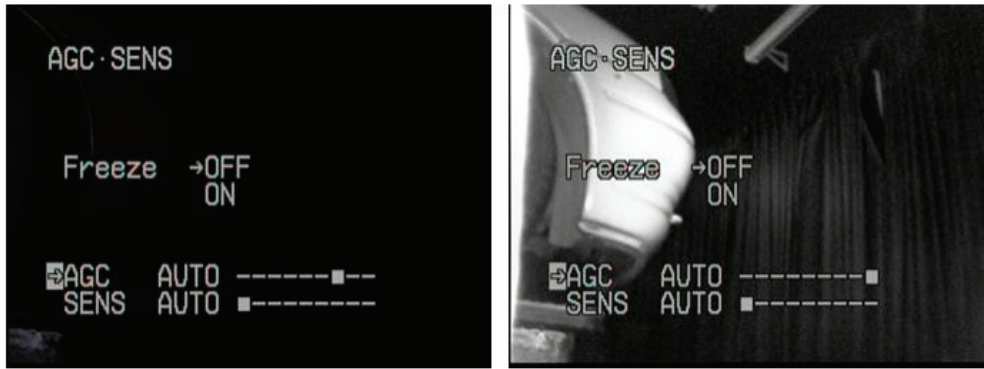


圖 2.20 沒有光源環境下 Speed Dome 攝影機攝影品質

96 年度橋檢車開發計畫在行期間完成室外機械手臂操作測試，如圖 2.21 所示。此外，機械手臂操作時引起之振動對攝影機拍攝的影像品質亦作檢驗，如圖 2.22 所示，連續之影像擷取品質並未受機械手臂操作之影響。



圖 2.21 橋梁檢測機械手臂室外測試

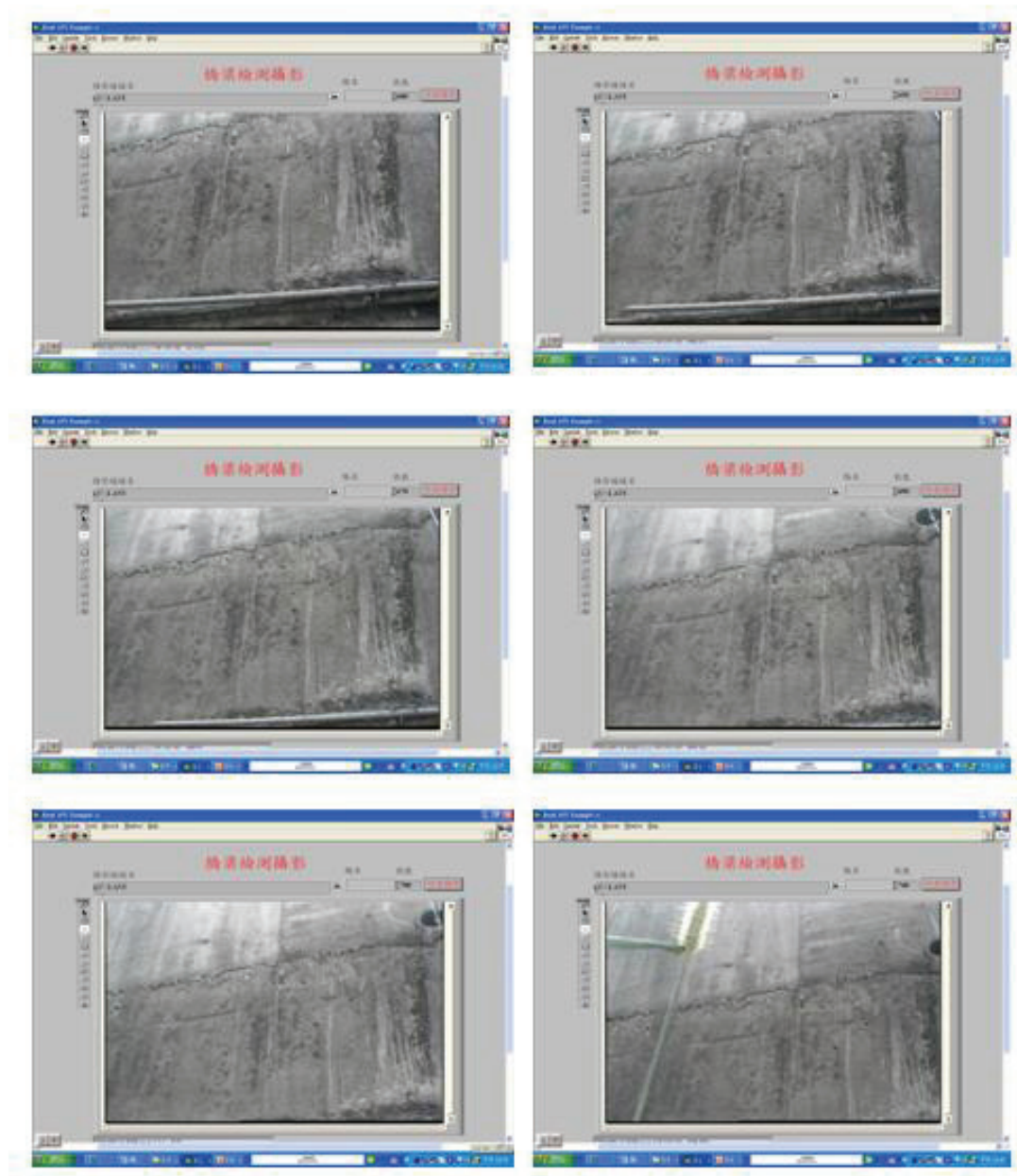


圖 2.22 CCD 連續攝影之影像擷取

2.2.3 本所 97 年度「橋梁檢測機械手臂研發進階計畫」^[3]

本所 96 年度計畫成果初步解決先前機械手臂龐大及以大型貨車為載臺的問題，並克服機械手臂機構之收納性，以小型箱型車承載裝置 CCD 攝影機的機械手臂執行檢測工作；而在攝影機方面，亦驗證在低照度環境下及機械手臂操作時仍有良好的檢測品質。然而，該計畫以小箱型車為載臺，機械手臂自後門伸出作業，仍需佔用至少 1 個車道，且檢測範圍太小亦無法滿足實務上需求，故本所著手進行 97 年度計畫，針對上述不足再進行研究改善。

97 年度橋檢車開發計畫以小型貨車(3.5 公噸以下，駕駛人可持小型車普通駕照)為機械手臂載臺，採 3 臂式機械手臂，附載 2 個紅外線 CCD 攝影機，同步拍攝及傳輸影像。橋檢車及機械手臂的設計與組裝簡圖及實體車如圖 2.23 及圖 2.24 所示。機械手臂是由 3 隻手臂所組成。第 1 臂直接選用國內力有機械^[11]之油壓吊桿，該吊桿共有 3 節，以油壓缸驅動延伸，全長可達 6.8 公尺，此外，吊桿另藉由立柱使之能作 359°水平旋轉及 76°上仰；第 2 臂以 3 節鋼管套接而成，與第 1 臂之油壓吊桿以插銷結合，鋼管中空部份另以鋼索穿過，最內層之鋼管末端與鋼索固定，鋼索則以捲揚機控制第 2 臂各節鋼管收放作直線運動，在達最大下降高度時第 2 臂全長 4.5 公尺；機械手臂第 3 臂以 4 節鋁合金板折彎成型組裝而成，截面尺寸採遞減之設計，每節長 1.5 公尺，全長共計 6 公尺，第 3 臂與第 2 臂以快速接頭銜接，鎖緊後兩者不會產生相對運動。

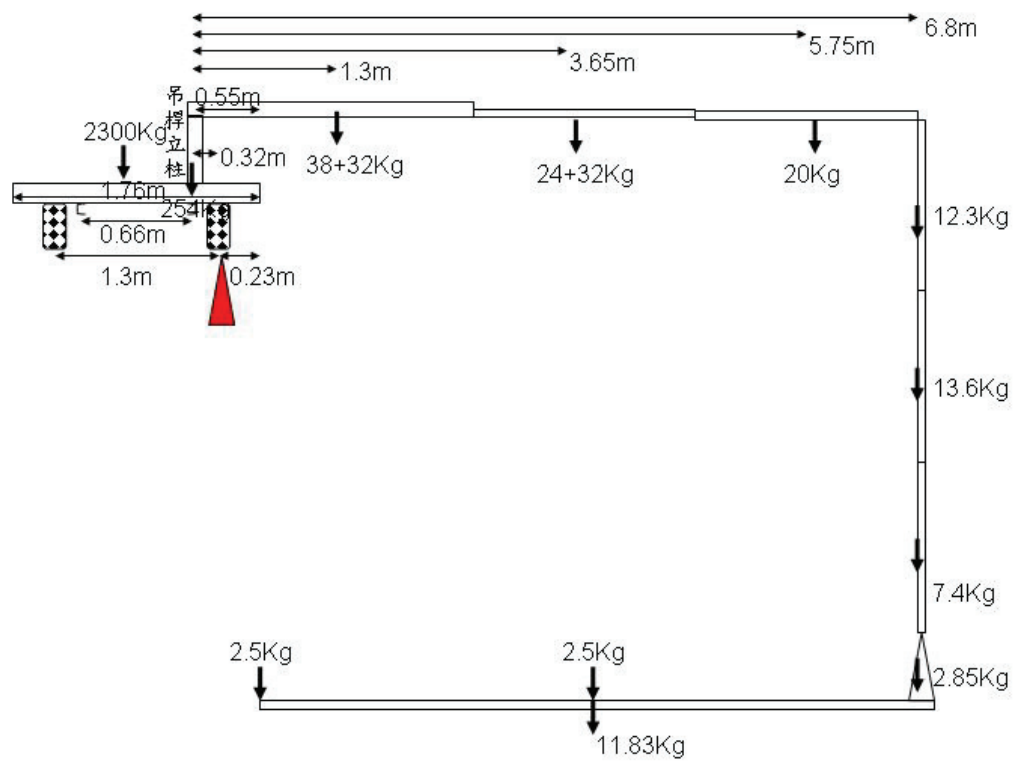


圖 2.23 本所 97 年度計畫之機械手臂設計與組裝簡圖



圖 2.24 橋檢車及機械手臂之實體車

橋檢車 97 年度計畫之實地檢測共計進行 3 次，前 2 次選擇在臺北縣翡翠水庫管制區內之一號橋，第 3 次則於外島澎湖跨海大橋實測。在翡翠水庫 1 號橋進行實地測試時亦測試動態拍攝成效，即在橋檢車動態前進狀況下，CCD 隨橋檢車前進同步進行拍攝工作，確認動態檢測之可行性及攝影品質。橋檢車在澎湖跨海大橋實測之作業實況則如圖 2.25 及圖 2.26 所示。



圖 2.25 橋檢車在澎湖跨海大橋實測之作業實況(1)



圖 2.26 橋檢車在澎湖跨海大橋實測之作業實況(2)

第三章 橋梁檢測機械手臂改善設計

本研究以 97 年之橋檢車開發計畫成果為基礎，進一步就橋梁檢測之影像清晰度、裂縫長度計算、橋梁結構死角（大梁腹版、橫隔梁、支承墊）檢測、檢測位置定位等進行設計改善及實測，俾使橋梁檢測機械手臂更具實用價值。各研究重點之設計改善及實測驗證分述於後。

3.1 檢測影像品質及裂縫長度計算

隨著影像擷取及顯示設備的硬體改善精進，CCD(Charge Coupled Device)裝置配合數位影像處理技術擷取影像已成為自動化機械設備中非常重要的一環，而國內近年來所致力開發之橋梁檢測機械手臂之主要目標即在發展輔助人工檢測之自動化機器視覺輔助設備。

基本上，橋梁檢測機械手臂考慮實用價值時，其所搭配之 CCD 必須滿足在進行橋梁檢測作業時，CCD 隨機械手臂運動或橋檢車前行時所擷取之影像仍能清晰可辨識；在橋下光線不足的環境作業時，CCD 擷取之影像亦必須清晰；當影像經判讀有裂縫存在時，要能初步估算裂縫長度並記錄存檔。

在實地橋梁進行實測時，動態環境下 CCD 之影像品質檢視均在 96 及 97 年計畫中執行，而在實驗室中控制光線以產生不同亮度環境，藉以檢測 CCD 之影像品質亦在 97 年計畫中執行。本年度計畫將進一步在夜間室外環境下檢視 CCD 影像，並在本研究開發之橋梁檢測影像處理軟體下發展裂縫估算功能。

96 年橋梁檢測車開發計畫之攝影設備採用國內惟迪電子^[14]的室外型 22 倍星光級紅外線夜視 Speed Dome 攝影機，經室外測試，其連續影像之擷取品質穩定而且清晰，而該攝影機在實驗室沒有光源的環境下，調低照度後仍可清楚顯現物體景像，故 97 年之橋梁檢測車亦採用該公司產品，惟在 97 年計畫中第 3 臂長度已達 6 公尺，且需承載 2 台攝影機，在減輕重量考慮下，改採相同類型，但不配備鏡頭旋轉機構底座、不具鏡頭

旋轉功能之彩色 22 倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL)。該攝影機在 97 年度研究進行中經數次橋梁實測，其動態檢測下的影像品質符合需求。

由於惟迪電子之彩色 22 倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL)即使不配備鏡頭旋轉機構底座，其單機重量仍有 2.5 公斤，然本研究擬針對橋梁死角檢測進行機械手臂改善設計，部份設計將使第 3 臂承載重量增加，在攝影機仍必須具備旋轉功能之狀況下，該機型之重量及功能已無法滿足需求，必須另尋功能相近，重量更輕之攝影機。利凌企業^[15]之高解析日夜 2 用 12 倍高速球型攝影機(SP2128N)，如圖 3.1 所示，其重量僅 1 公斤，並具備旋轉定位功能，故為本研究選，SP2128N 規格如表 3-1 所示。

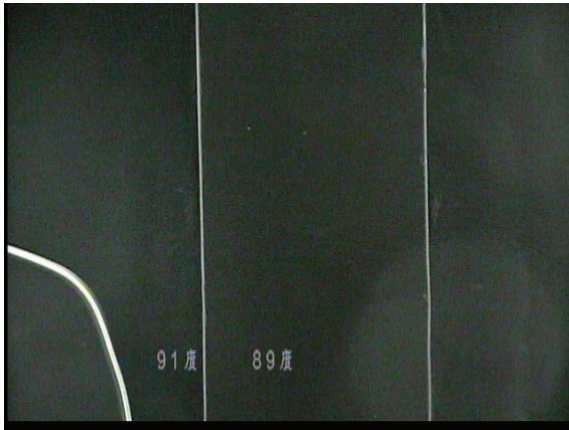


圖 3.1 利凌企業之高解析日夜 2 用 12 倍高速球型攝影機(SP2128N)

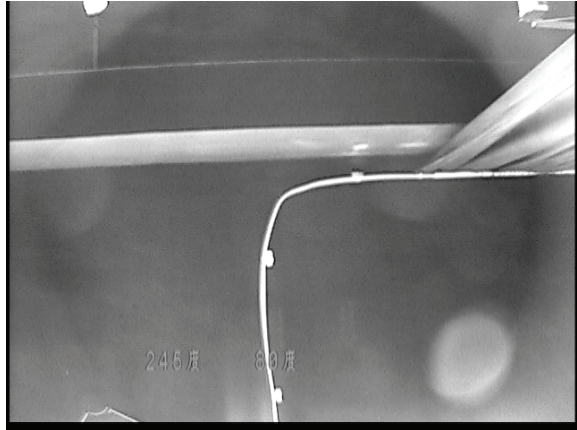
表3-1 利凌企業之高解析日夜兩用12倍高速球型攝影機(SP2128N)規格

SP2128N		規格
攝像元素		Sony 1/4" Super HAD CCD (3.2 公釐*2.44 公釐)
影像總圖素		811 (H) x 508 (V)
掃描系統		2:1 交織式掃描
最低照度		彩色：0.3 Lux at F1.6，黑白：0 Lux (IR 開啟)
工作溫度		- 10°C ~ + 50°C (14°F ~ 122°F)
工作溼度		0% ~ 90%
紅外線	發光體	14 顆，850nm
LED	光束角度	30°
	投射有效距離	16 公尺
尺寸		142 公釐(高) x 135 公釐(直徑)
重量		1000 公克
迴轉台	水平旋轉角度	360° 連續旋轉，旋轉速度最快每秒 120°
	垂直角度	0° ~ 90°
	水平垂直迴轉精確度	0.1°
鏡頭	縮放倍數	12 倍光學鏡頭
	焦距	3.8 公釐~45.6 公釐
	鏡頭光圈 F 值	F/1.6 ~ F/360
	可視角度	廣角：65.4° (對角) 52.8° (水平) 39.7° (垂直)
	可視角度	望遠：5.54° (對角) 4.49° (水平) 3.40° (垂直)

本研究首先測試 SP2128N 在光線不足的環境中作業時，CCD 擷取影像之清晰度。在實驗室低照度環境(門窗緊閉、窗簾拉上)下，將攝影機垂直及有傾斜拍攝天花板梁柱，拍攝結果如圖 3.2 所示。測試結果顯示，在低照度時紅外線即自動啟動，功能表現合乎研究要求。



垂直拍攝天花板梁柱



傾斜拍攝天花板梁柱

圖 3.2 低照度環境下攝影

接著將測試環境移至夜間之樹林市塔寮坑溪堤岸，本研究攝影設備以雙 CCD 方式配置，如圖 3.3 所示，將雙 CCD 左側攝影機紅外線功能關掉，與右側攝影機紅外線功能啟動所攝得之影像並陳於圖 3.4，由圖中可以看出，未啟動紅外線功能時，堤岸之水泥牆面幾乎無法辨識，而當左側攝影機啟動紅外線功能後，影像即如圖 3.5 所示，雙 CCD 攝得之影像均相當清晰。



圖 3.3 雙 CCD 方式配置之攝影設備

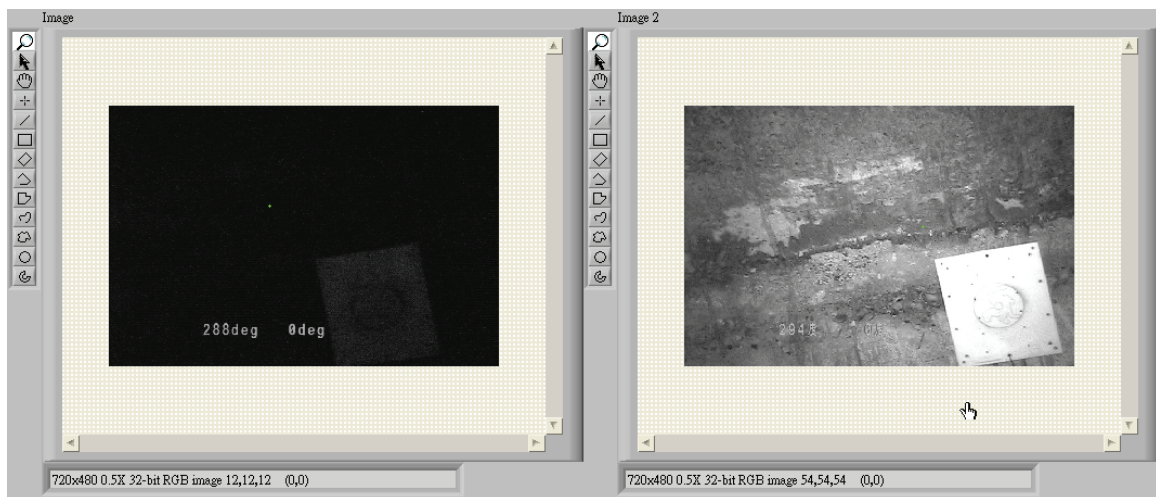


圖 3.4 左側攝影機關掉紅外線功能雙 CCD 所攝得影像比較



圖 3.5 雙 CCD 均開啟紅外線功能所攝得影像比較

除了要清楚辨識橋梁構件的外觀，構件劣化的範圍(或尺寸)也是檢測人員關切的重點，因此本研究將嘗試計算橋梁構件表面所攝得的裂縫長度。橋梁混凝土面之裂縫長度是要計算裂縫之起點至終點間的距離，而 2 點間的空間距離計算是基於該兩點空間座標 (X, Y, Z) 已知的條件下，以畢氏定理計算之。然而，要獲得物體(點)在空間中的平面座標 (X, Y) 資訊，必須先藉由推導立體成像之技術以還原在 2D 影像中失去的深度資訊，亦即須先求解該物體(點)在空間中的第三維 Z 方向深度^[17]。計算原理示意如圖 3.6，作法是將 2 台攝影機同時拍攝一定點來求取該物體(點)與攝影機成像平面間之縱深距離，圖中代表的是相互平行並列的 2 個 CCD 成像示意圖，空間中某一物體(點)投射於 2 個 CCD 感測器上影像的位置座標分別是 (x_1, y_1) 及 (x_2, y_2) ，2 個 CCD 攝影機鏡頭透鏡中心相距 B ，而鏡頭透鏡中心與 CCD 感測器距離(像距)為 λ 。

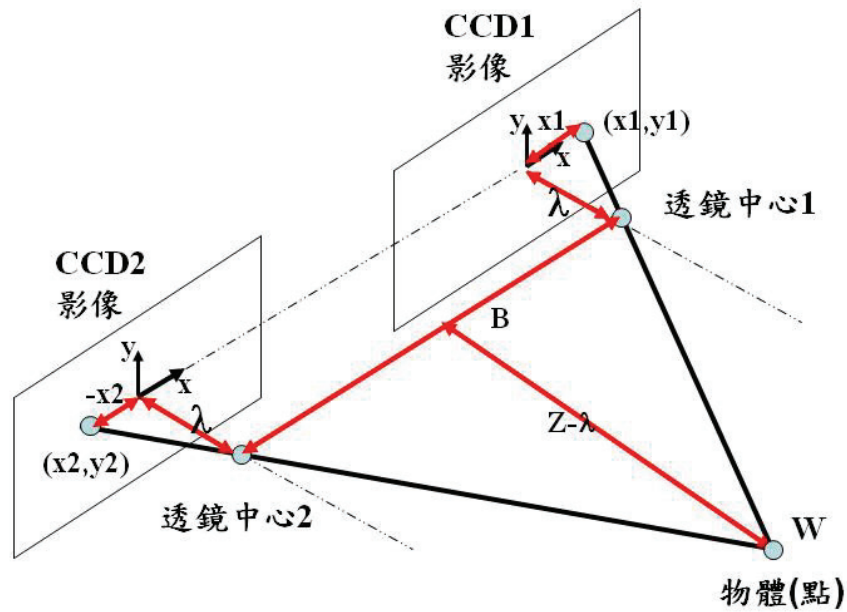


圖 3.6 兩互相平行之 CCD 成像示意圖

由圖中 2 個相似三角形($\triangle W$ —透鏡中心 1—透鏡中心 2， \triangle 透鏡中心 1—投射成像點 1—CCD1 影像座標原點+透鏡中心 2—CCD2 影像座標原點—投射成像點 2)關係，可以得到以下列關係式

$$\frac{\lambda}{(x_1 - x_2)} = \frac{Z - \lambda}{B}$$

$$\frac{B\lambda}{(x_1 - x_2)} = Z - \lambda$$

$$\lambda + \frac{B\lambda}{(x_1 - x_2)} = Z$$

$$Z = \lambda - \frac{\lambda B}{x_2 - x_1}$$

因此，在相互平行並列的 2 個 CCD 所獲取的 2 張影像中，只要求得同一物體(點)經透鏡分別投射在 2 張影像中的投射成像點 1 及投射成像點 2 個別與其 CCD 影像座標

原點的距離和， $|x_1| + |x_2| = (x_1 - x_2)$ ，再配合已知的 2 個 CCD 攝影機鏡頭透鏡中心距離 B 和像距 λ ，即可獲得失去的深度資訊 Z 。相同深度 Z 的任一物體(點)在空間中的平面座標(X, Y)可進一步由相似三角形關係求得， $X = -\frac{B}{(x_1 - x_2)}x_0 = \frac{(\lambda - Z)}{\lambda}x_0$ ， $Y = -\frac{B}{(x_1 - x_2)}y_0 = \frac{(\lambda - Z)}{\lambda}y_0$ ，其中 (x_0, y_0) 是空間中之物體(點)經透鏡投射在任一 CCD 影像中的座標位置。

相同的理論推導及計算亦可見於其他文獻^[16~18]中。參考圖 3.7，馮文灝^[17]對空間中目標點 A 的空間座標推導是取左 CCD 影像座標系統為 S_1 -XYZ，其原點為左攝影中心 S_1 ， Z 軸與左 CCD 之主光軸重合(背離目標物方向為正)， X 軸為 2 個 CCD 攝影機鏡頭透鏡中心連線方向。

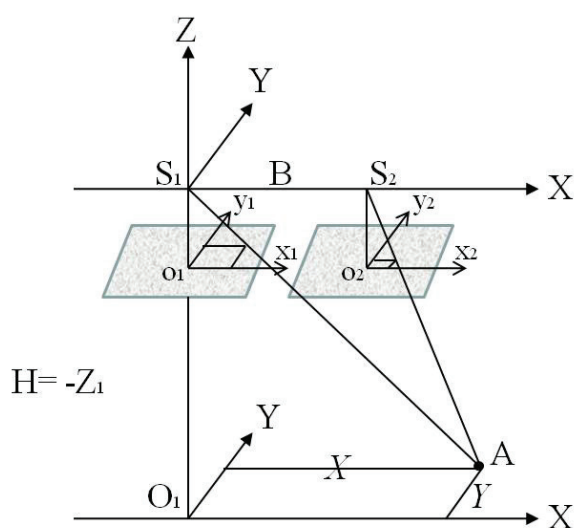


圖 3.7 目標點之空間座標推導^[17]

假設相片座標系 o_1 - x_1y_1 及 o_2 - x_2y_2 均與 S_1 -XYZ 相互平行，則任一目標點 A 在 S_1 -XYZ 系統內的座標為 $(X, Y, -Z)$ ，或寫作 (X, Y, H) ，存在以下關係式：

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{B}{p}x_1 = \frac{B}{p}x \\ Y &= \frac{B}{p}y_1 = \frac{B}{p}y \\ H = -Z &= \frac{B}{p}f \end{aligned} \right\}$$

或寫作

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{B}{p} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}$$

其中，

$p = |x_1| + |x_2|$ ，是同一物體(點)經透鏡分別投射在兩張影像中的投射成像點 1 及投射成像點 2 個別與其相片座標系原點距離之和

$f =$ 像距

此外，以機器人視覺原理來推導空間中目標點之空間座標亦得到相同公式。張廣軍^[18]的雙眼立體視覺三維測量是基於視差，由三角法原理獲得三維資訊的，即由 2 個攝影機的圖像平面(或單一攝影機在不同位置的圖像平面)和被測物體之間構成 1 個三角形，已知 2 攝影機之間的位置關係，便可獲取 2 攝影機中共同視野內物體的三維尺寸及空間物體特徵點的三維座標。圖 3.8 所示為簡單的平視雙眼立體成像原理圖，2 攝影機的投影中心連線距離為 B 。2 攝影機在同一時刻觀看空間物體的同一特徵點 P ，分別在“左眼”和“右眼”上獲取了點 P 的圖像，它們的圖像座標分別為 $P_{\text{left}}=(X_{\text{left}}, Y_{\text{left}})$ ， $P_{\text{right}}=(X_{\text{right}}, Y_{\text{right}})$ 。

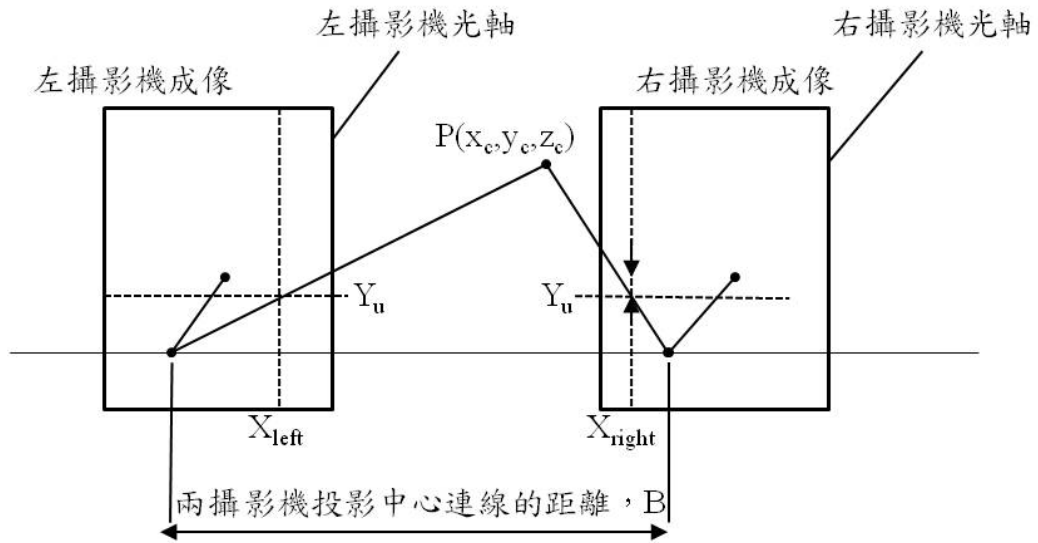


圖 3.8 平視雙眼立體成像原理圖

假定 2 攝影機的成像在同一個平面上，則特徵點 P 成像的 Y 座標相同，即 $Y_{\text{left}} = Y_{\text{right}} = Y$ ，則由三角幾何關係得到

$$\begin{cases} X_{\text{left}} = f \frac{x_c}{z_c} \\ X_{\text{right}} = f \frac{(x_c - B)}{z_c} \\ Y = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases}$$

而視差 $\text{Disparity} = X_{\text{left}} - X_{\text{right}}$ ，由此可計算出特徵點 P 在攝影機座標系下的三維座標為

$$\begin{cases} x_c = \frac{B \cdot X_{\text{left}}}{\text{Disparity}} \\ y_c = \frac{B \cdot Y}{\text{Disparity}} \\ z_c = \frac{B \cdot f}{\text{Disparity}} \end{cases}$$

因此，左攝影機成像面上的任意一點只要能在右攝影機像面上找到對應的匹配點(此兩點是空間中的同一點，但在左、右攝影機成像面上各自投射所得的點)，就可以確定出該點的空間三維座標。由於這種方法是點對點的運算，像面上所有點只要存在相應的匹配點，就可以利手上述運算，獲取其對應的三維座標。空間中存在於橋面的裂縫長度可應用前述之視覺三維測量原理及公式，先求解計算裂縫起始點及結束點之空間座標，再以畢氏定理計算裂縫起始點至裂縫結束點 2 點之間的空間距離。

本研究裂縫計算程式以 LabVIEW 撰寫，先在實驗室內測試精確度。裂縫長度計算之精確度會受裂縫起始點或結束點成像時攝影機之放大倍率及裂縫所在牆面與雙 CCD 成像平面間之傾斜角度影響，雙 CCD 放大倍率及傾斜角度影響分別探討如下。

以 A4 紙張貼於牆面上，雙 CCD 置於實驗桌上並調整攝影機之鏡頭軸線垂直於牆面拍攝該 A4 紙，依序將鏡頭放大倍率設定從 1 至 3.5，每隔 0.5 倍拍攝並計算 A4 紙的長邊邊長。在鏡頭放大倍率分別設定為 1 和 3.5 時攝影機攝得之影像分別如圖 3.9 和圖 3.10 所示，其餘不同鏡頭放大倍率設定時的 A4 紙邊長計算結果列於表 3-2。由計算結果顯示，在鏡頭放大倍率 2 以下時，有較大的計算誤差，而鏡頭放大倍率增加至 2 倍以上時，誤差均在 4% 以內，而在鏡頭放大倍率 2 倍及 3 倍時再作重覆量測，也發現誤差變化不大。分析其誤差，研判是由於計算 CCD 畫面影像上 2 點間距離是先藉由還原 2D 畫面影像的深度資訊(物距)，計算物距時，必須分別在 2 張不同 CCD 影像畫面上點選空間中同一物體(點)，在 CCD 影像畫面上點選實際上是點選影像畫面上的某一像素，而影像解晰度隨鏡頭放大倍率而變化，在較高倍放大倍率下的每一 CCD 畫面像素會對應至實際空間中較小之矩形尺寸，因此在較高倍放大倍率的 CCD 影像上點選時可以有較高之精度，長度計算之精確度也因此提高。當重覆點選或第 2 次點選時，幾乎不可能點選至同一像素，故長度計算結果也必然有些許差異。

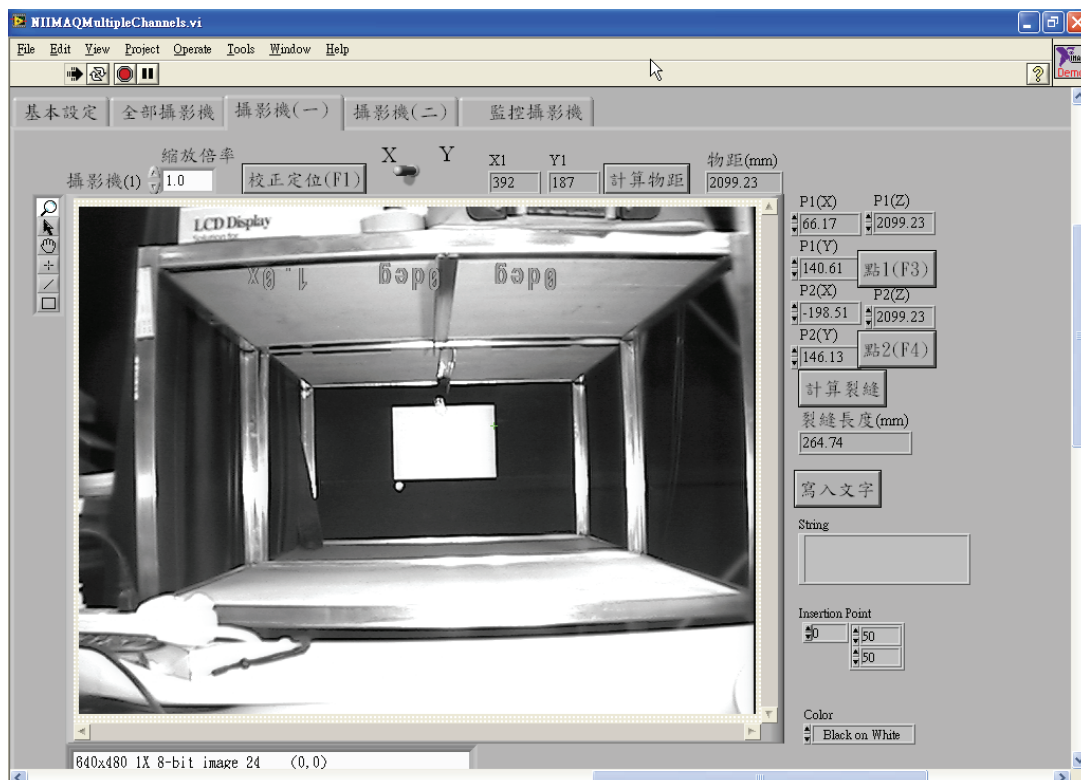


圖 3.9 鏡頭放大倍率為 1 時攝影機攝得之影像

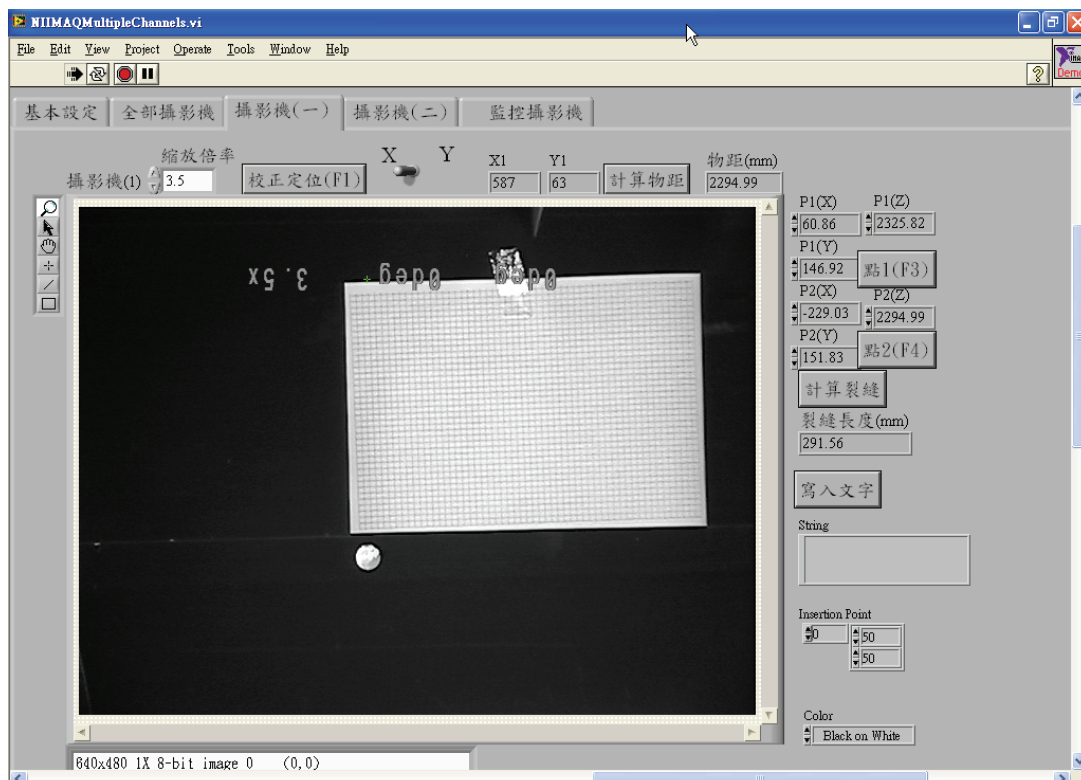


圖 3.10 鏡頭放大倍率為 3.5 時攝影機攝得之影像

表3-2 不同鏡頭放大倍率之A4紙邊長長度計算結果

鏡頭放大倍率	長度計算值(公釐)	實際長度(公釐)	長度計算值/實際長度
1.0	264.74	297	0.891
1.5	275.23	297	0.927
2.0	285.29	297	0.961
	291.60	297	0.981
2.5	286.34	297	0.964
3.0	289.88	297	0.976
	294.24	297	0.991
3.5	291.56	297	0.982

前述以雙 CCD 方式求取物體(點)在空間中的三維座標，再據以計算空間中長度，均是假設 CCD 影像面與物體平面呈水平，亦即雙 CCD 之連線與物體所在表面相互平行。然而而在實際執行橋檢作業時，雙 CCD 之成像面與橋梁構件表面必定無法一直保持平行，因此，對兩者因傾斜所產生之誤差大小必須先行掌握及瞭解。

在實驗室中以雙 CCD 配置並固定鏡頭放大倍率為 3，測試 CCD 影像面與物體所在平面有不同傾斜角度時的長度計算誤差。測試時，以 A4 紙張貼於牆面上，設定攝影機俯仰角 0 度時，即雙 CCD 之影像面與牆面平行，此時，CCD 之影像面的法向量與牆面法向量間在同一直線上，兩者之夾角為 0 度，亦即攝影機之鏡頭軸線即與牆面相互垂直；之後控制雙 CCD 上仰角度，每次增加 5 度，依序分別為 5 度、10 度、15 度、20 度、25 度、30 度、35 度、40 度、45 度。雙 CCD 之影像面法向量與物件 A4 紙平面法向量兩者間夾角 0 度及 45 度時所攝得之影像分如圖 3.11 及圖 3.12 所示。



圖 3.11 CCD 影像面法向量與物件 A4 紙平面法向量兩者間夾角 0 度時所攝得之影像

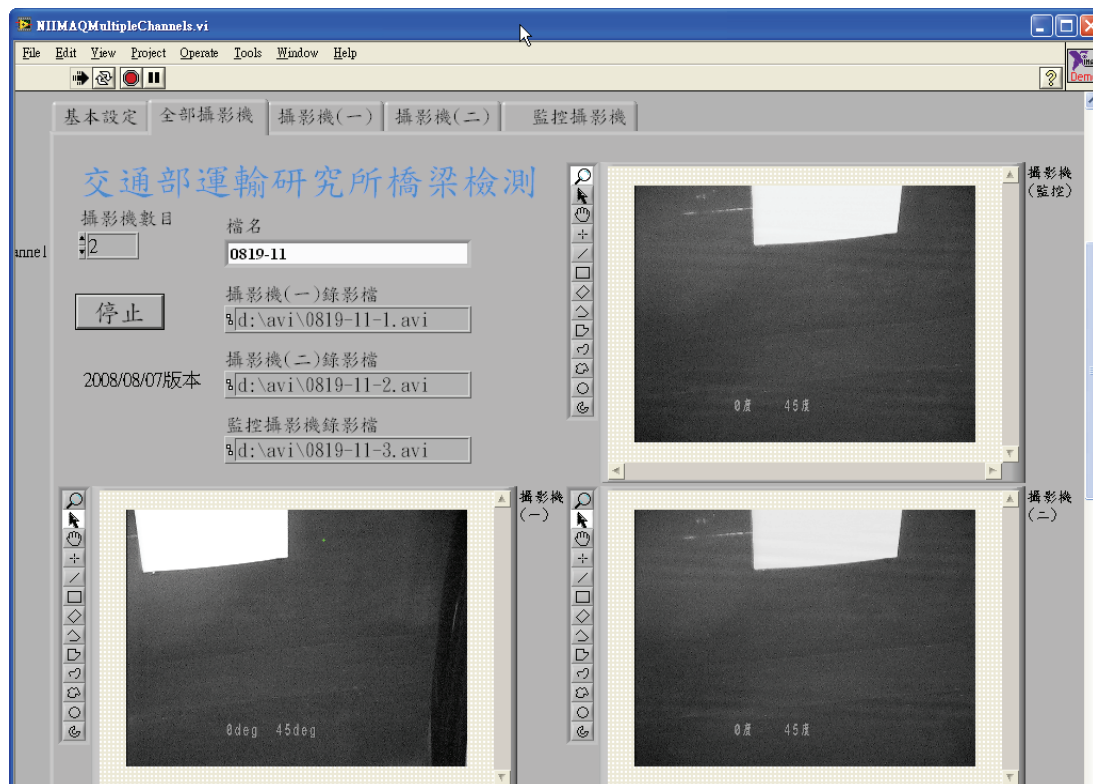


圖 3.12 CCD 影像面法向量與物件 A4 紙平面法向量兩者間夾角 45 度時所攝得之影像

CCD 之影像面與 A4 紙平面從相互平行至兩平面夾角 45 度，每隔 5 度從拍攝之影像畫面點選畫面中 A4 紙長度方向之 2 頂角，分別計算頂角之空間座標後再以畢氏定理計算 2 頂角間之距離，計算結果列表於表 3-3，誤差大約在 6% 以下。從計算結果發現，CCD 影像面與物件平面間夾角對計算誤差的影響並未有明確之規則性，誤差之產生可能是在點選目標點時點選至不同像素所致。

表3-3 不同CCD傾斜角度之長度計算結果

傾斜角度	實際長度(公釐)	計算長度(公釐)	計算與實際長度比值
0	297	293.62	0.989
5	297	292.33	0.984
10	297	310.79	1.046
15	297	298.04	1.004
20	297	290.40	0.978
25	297	284.40	0.958
30	297	301.54	1.015
35	297	281.22	0.947
40	297	292.20	0.984
45	297	278.20	0.939

裂縫長度計算最後再移至夜間室外環境進行驗證，測試物件選擇一白色 POM 塑鋼板，其上用鉛筆繪一直徑 12 公分之圓為目標物，如圖 3.13 所示。點選圓周上 2 點後程式計算得直徑 12.763 公分，誤差 6.4%。



圖 3.13 夜間室外環境下計算白色 POM 塑鋼板上之圓直徑

3.2 橋梁結構死角檢測

本研究以 97 年之橋檢車開發計畫成果為基礎，期能改善大梁腹版、橫隔梁、支承墊等橋梁結構死角之檢測，以提高橋檢車開發之實用性。為檢測橋梁結構死角，本研究將 97 年橋檢車機械手臂之設計作部份變更。原設計是將攝影機固定於機械手臂中第 3 臂之前端，而新設計是在第 3 臂之前端增加一油壓缸，如圖 3.14 所示，其與第 3 臂垂直固定，並藉由油壓驅動以舉升附加於其前端之雙 CCD，如圖 3.15 所示。當執行橋檢作業時，第 3 臂深入橋面下並平行於橋面版，而新增之油壓缸(第 4 臂)即能垂直於橋面版且將攝影機舉升，深入 2 大梁間，更貼近大梁腹版以觀察橋梁結構各死角，作業示意圖如圖 3.16 所示。



圖 3.14 新設計所增加之油壓缸(第 4 臂)



圖 3.15 第 4 臂油壓缸組裝

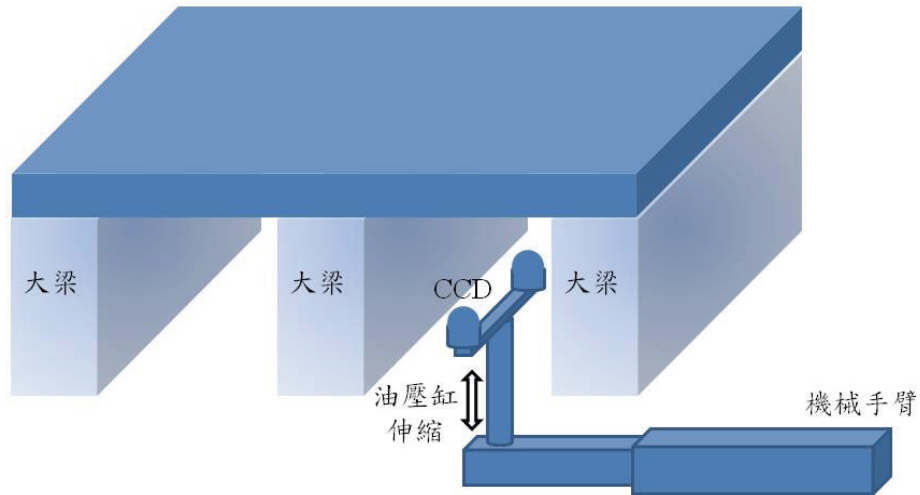


圖 3.16 第 4 臂觀察橋梁結構各死角之作業示意圖

為檢測橋梁結構死角而增加之第 4 臂，及為平衡 CCD 及第 4 臂所設計之配重塊，均將影響第 3 臂的結構承受能力和機械手臂操作時之整體平衡，在優先考慮結構及操作安全性之情形下，本研究分 2 階段對第 3 臂之設計進行測試。第 1 階段先以第 3 臂 4.5 公尺長外加平衡臂 1.5 公尺進行橋梁實測，第 2 階段延長第 3 臂至 6 公尺長外加平衡臂 3 公尺，再進行橋梁實測。2 階段設計之橋檢車及機械手臂均先於樹林市塔寮坑溪堤岸邊進行組裝及操作測試，如圖 3.17 及圖 3.18 所示，組裝及操作測試狀況良好。



圖 3.17 第 1 階段設計之機械手臂組裝及操作測試



圖 3.18 第 2 階段設計之機械手臂組裝及操作測試

此外，為加速橋檢作業執行時第 3 臂的組裝速度，同時也考慮該臂在第 2 階段設計時包含平衡臂總長將達 9 公尺，對組裝及運送都會產生困擾，故將第 3 臂設計成折疊式。於平時收納及運送時，折疊成 Z 字型，置放於橋檢車上，如圖 3.19 左圖所示，執行作業時即將之展開，並以扣環相扣，如圖 3.19 右圖所示，省卻鎖螺絲螺帽之繁瑣工作。



圖 3.19 折疊式第 3 臂設計

3.3 機械手臂結構強度分析

新設計之機械手臂與之前年度計畫之差異，主要是增加第 4 臂以檢測橋梁結構死角。在結構強度上，因增加第 4 臂、雙 CCD 及平衡塊所增加之負載對機械手臂各臂之影響必須先行計算，以確保安全。結構強度計算採有限元素法，以工程用有限元素分析套裝軟體 ANSYS 執行，各結構件以梁元素模擬，並輸入構件截面積相關尺寸及材料性質，作用力則包含負載之 CCD 重、配重塊重及結構自重。

考慮機械手臂操作時將第 1 及第 2 臂完全延伸狀態之機械手臂整體結構強度，第 1 階段第 3 臂設計為 4.5 公尺長及外加平衡臂 1.5 公尺，機械手臂之有限元素模型如圖 3.20 所示。

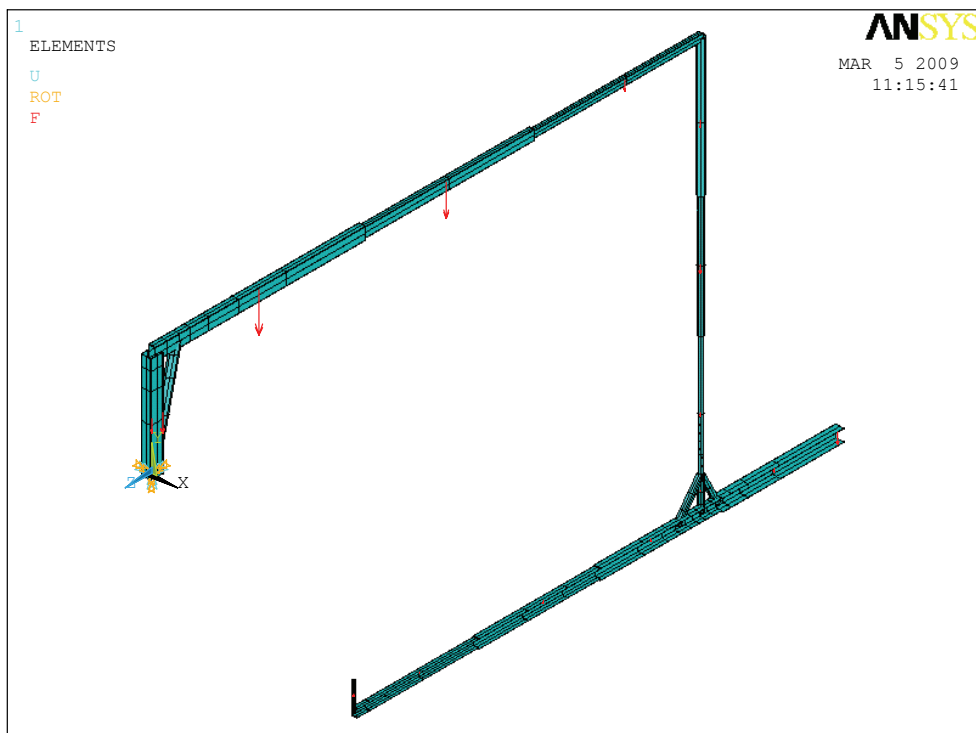


圖 3.20 第 1 階段設計之機械手臂有限元素模型

第 1 階段設計之機械手臂初步靜態有限元素分析結果如圖 3.21 至圖 3.23 所示，圖 3.21 為機械手臂考慮自重及承受 CCD 和配重塊負荷後之形變狀況，圖 3.22 則顯示機械手臂各結構件之應力大小及分佈，最大應力值 117 牛頓/平方公釐在第 1 臂之套管結構中，而以一般結構鋼降伏強度 250 牛頓/平方公釐計算，安全係數 2.14。圖 3.23 為機械手臂各結構件之應變大小及分佈，最大應變值 $0.63\text{E-}3$ 。



圖 3.21 第 1 階段設計之機械手臂考慮自重及承受負荷後形變狀況

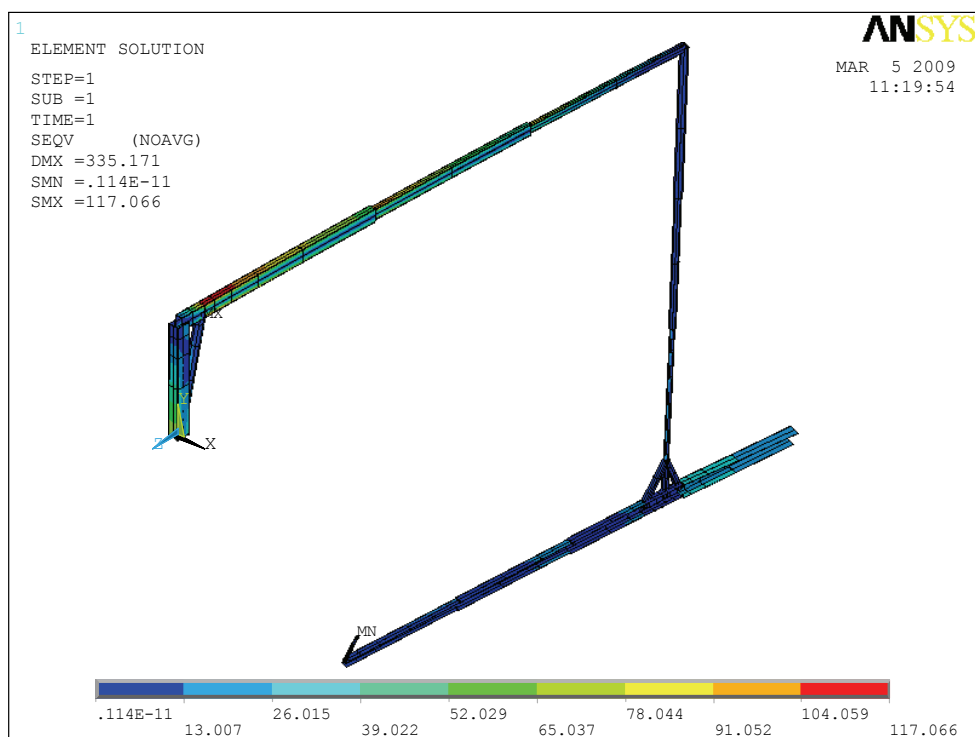


圖 3.22 第 1 階段設計之機械手臂各結構件應力大小及分佈

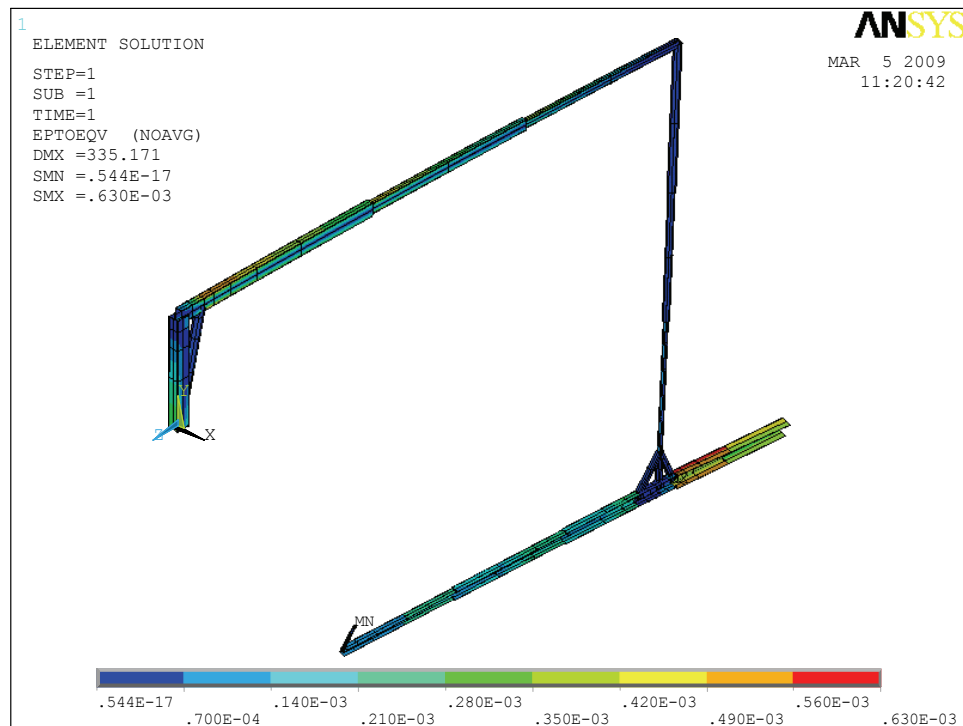


圖 3.23 第 1 階段設計之機械手臂各結構件應變大小及分佈

第 2 階段之第 3 臂設計為 6 公尺長及外加平衡臂 3 公尺，該機械手臂之有限元素模型如圖 3.24 所示。

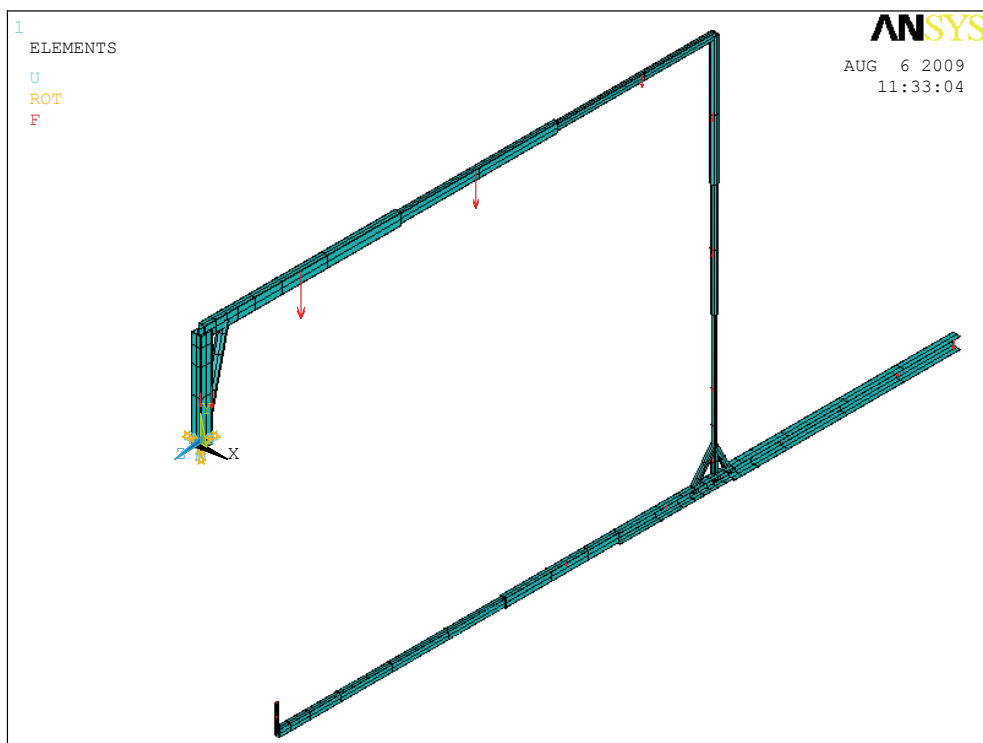


圖 3.24 第 2 階段設計之機械手臂有限元素模型

第 2 階段之機械手臂靜態有限元素分析結果如圖 3.25 至圖 3.27 所示，圖 3.25 為機械手臂考慮自重及承受 CCD 和配重塊負荷後之形變狀況，圖 3.26 則顯示機械手臂各結構件受力後之應力大小及分佈，最大應力值 121 牛頓/平方公釐在第 1 臂之套管結構中，同樣以一般結構鋼降伏強度 250 牛頓/平方公釐計算，安全係數為 2.07，略小於第 1 階段設計之機械手臂安全係數 2.14。圖 3.27 為機械手臂各結構件之應變大小及分佈，最大應變值為 $0.655\text{E-}3$ 。



圖 3.25 第 2 階段設計之機械手臂考慮自重及承受負荷後形變狀況

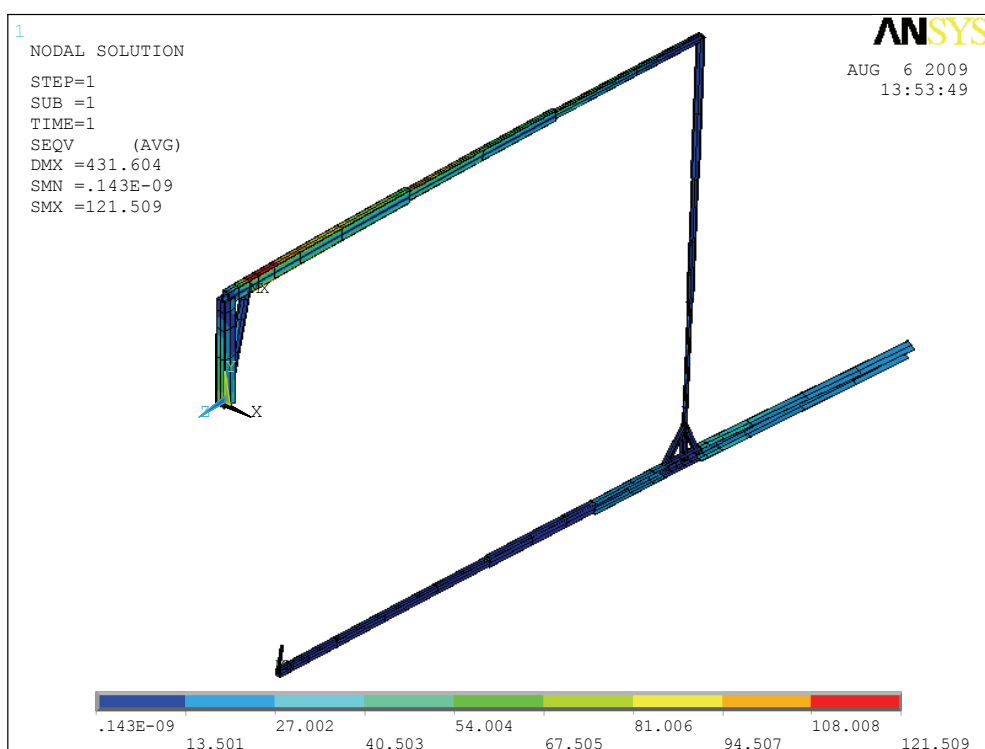


圖 3.26 第 2 階段設計之機械手臂各結構件應力大小及分佈

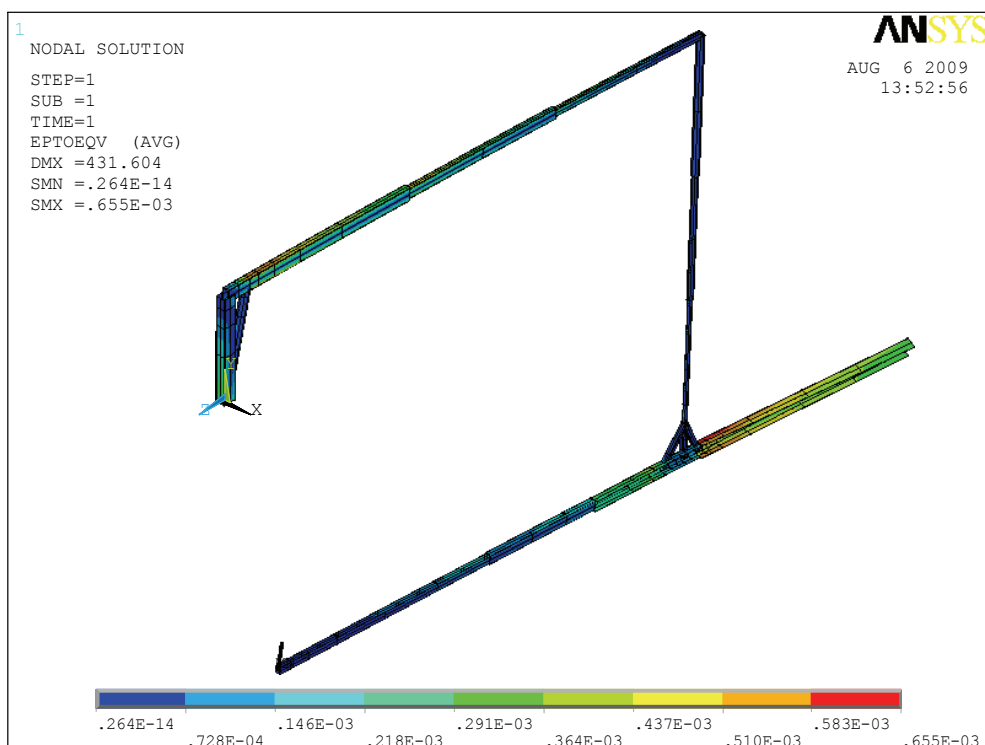


圖 3.27 第 2 階段設計之機械手臂各結構件應變大小及分佈

結構動態分析上，以機械手臂第 1 臂伸臂吊桿水平向外操作至最大伸長量及第 2 臂鋼管垂直下伸至最大伸長量位置時受機械手臂自重及承載重的簡諧振動(Harmonic vibration)動態作用力，評估振動頻率從 1Hz 到 50Hz 下的表現。

圖 3.28 及圖 3.29 分別顯示機械手臂受動態作用力時，第 3 臂末端之攝影機位置在各振動頻率下的上下垂直方向和左右水平方向的振幅位移量。計算結果顯示，受動態作用力頻率 1Hz 及 6Hz 時有較大之共振現象，而在作用力頻率 10Hz 以上時動態效應即不顯著。

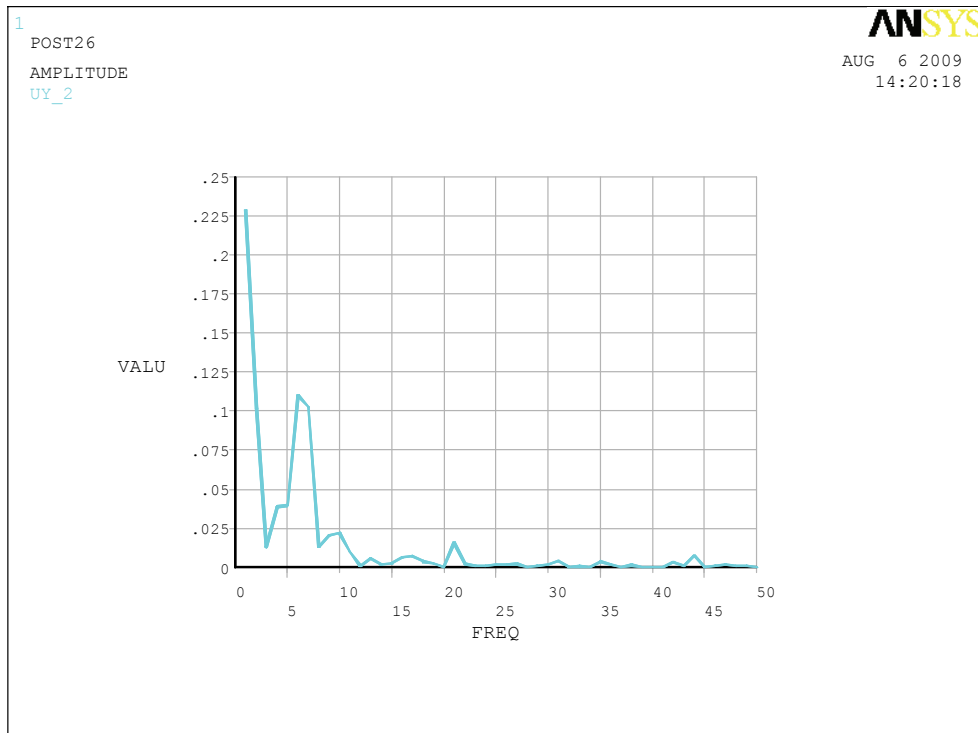


圖 3.28 機械手臂受各振動頻率動態作用力下的垂直方向位移量

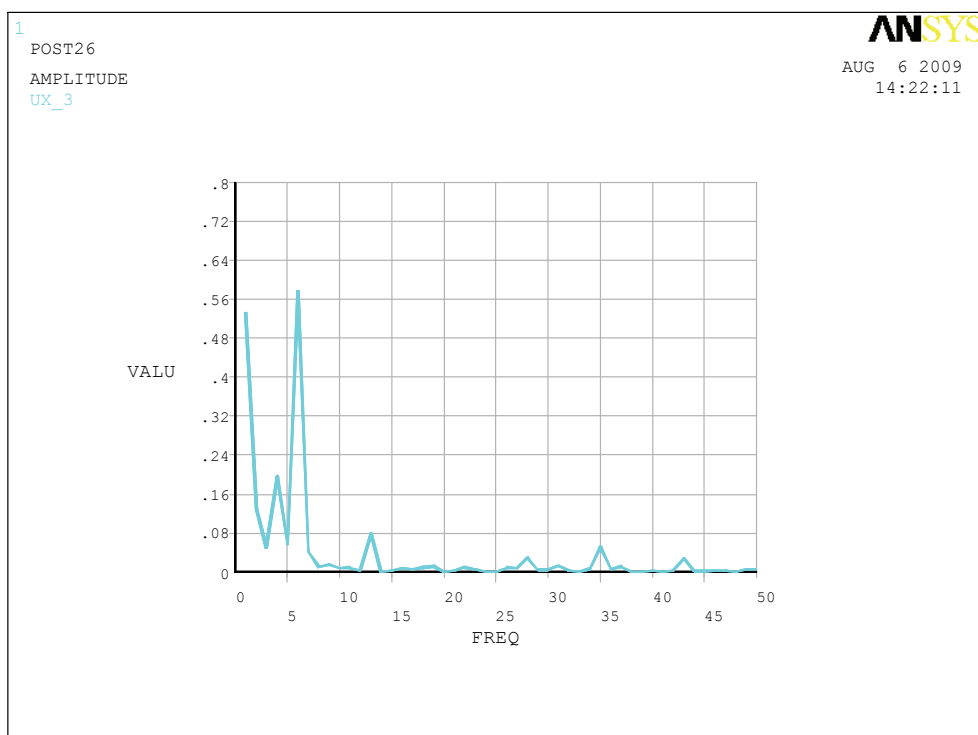


圖 3.29 機械手臂受各振動頻率動態作用力下的水平方向位移量

考量碳纖維複合材料重量輕及強度高的特性，未來或可用以取代第 3 臂之鋁合金材質，以下將就兩不同材質的第 3 臂進行結構強度分析。

第 3 臂選用總層數為 8 層之碳纖維/環氧樹脂疊層，以對稱方式排列，單層厚度 0.375 公釐，總厚度為 3.0 公釐，排列順序為 $[0/90/45/-45]_s$ ，其纖維疊層之有限元素模型如圖 3.30 所示。

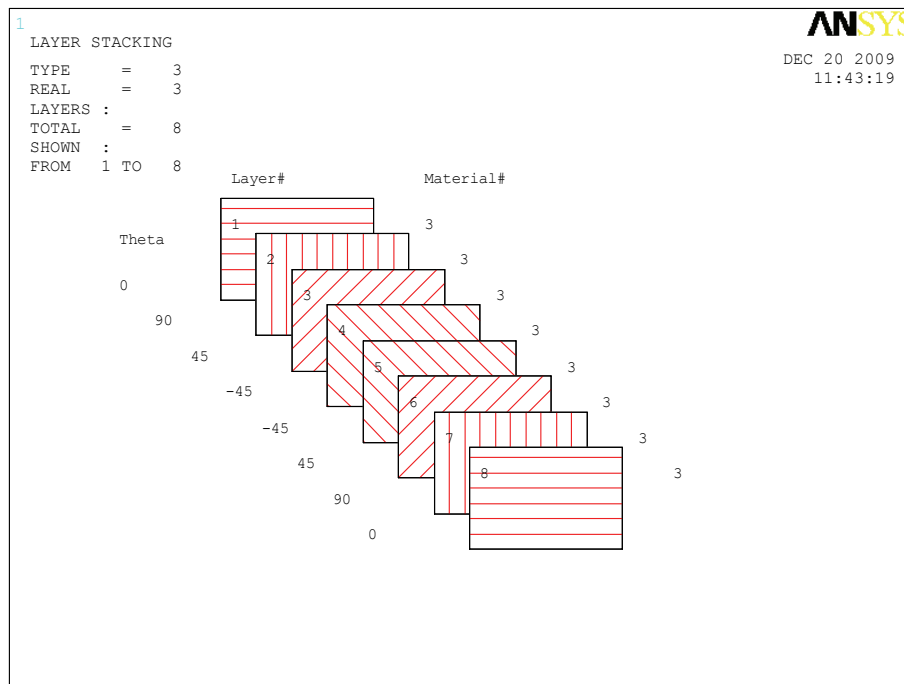


圖 3.30 第 3 臂碳纖維疊層有限元素模型

單層複材選用 TORAY 的 T300，纖維體積比 $v_f=70\%$ ，密度 $1.80E-6$ 公斤/立方公釐，重要材料係數如表 3-4 所示。

表 3-4 TORAY T300 carbon/epoxy 材料係數

Young's modulus (GPa)		
E11	E22	E33
162	14.9	14.9
Poisson's ratio		
ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
0.283	0.283	0.386
Shear modulus (GPa)		
G12	G13	G23
5.7	5.7	5.4

第 3 臂之設計仍採第 2 階段之 6 公尺長及外加平衡臂 3 公尺，以和第 2 臂連接處為固定支點，將材料自重、配重塊、CCD 及第 4 臂作為機械臂之受力建構有限元素模型，如圖 3.31 所示。

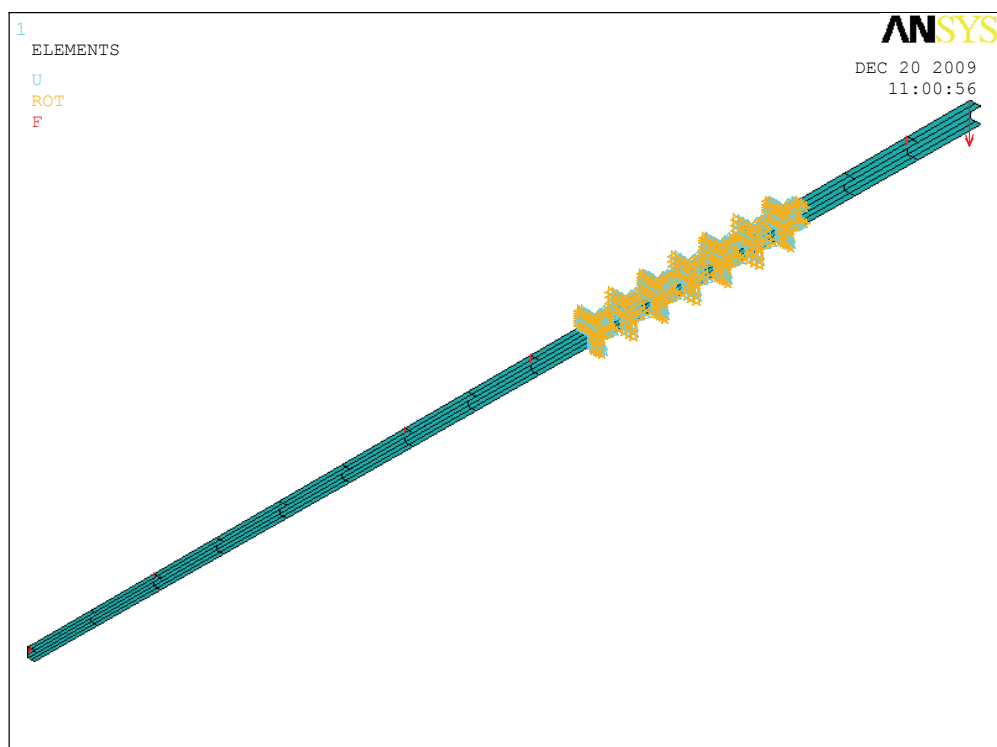


圖 3.31 碳纖維第 3 臂有限元素模型

碳纖維第 3 臂靜態有限元素分析結果如圖 3.32~3.36 所示，機械手臂考慮自重及承受 CCD 和配重塊負荷後之變形狀況如圖 3.32，圖 3.33 則顯示第 3 臂受力後在機械臂縱軸向，也就是機械臂表面層碳纖維纖維長度方向之應力大小及分佈，最大應力值 10.8 牛頓/平方公釐，而 TORAY T300 的纖維方向抗拉強度為 1760 牛頓/平方公釐，顯見碳纖維在縱向強度上沒有問題；此外，第 3 臂受力後在機械臂橫向及纖維板厚度方向之應力大小及分佈如圖 3.34 及圖 3.35 所示，最大應力值分別為 10.6 牛頓/平方公釐和 4.3 牛頓/平方公釐，對照 TORAY T300 的橫向和厚度方向抗拉強度 80 牛頓/平方公釐，安全係數分別是 7.5 和 18.6，顯示第 3 臂若採用碳纖維材料在安全上沒有問題。圖 3.36 顯示第 3 臂之應變大小及分佈，最大應變值 $0.377\text{E-}3$ 。

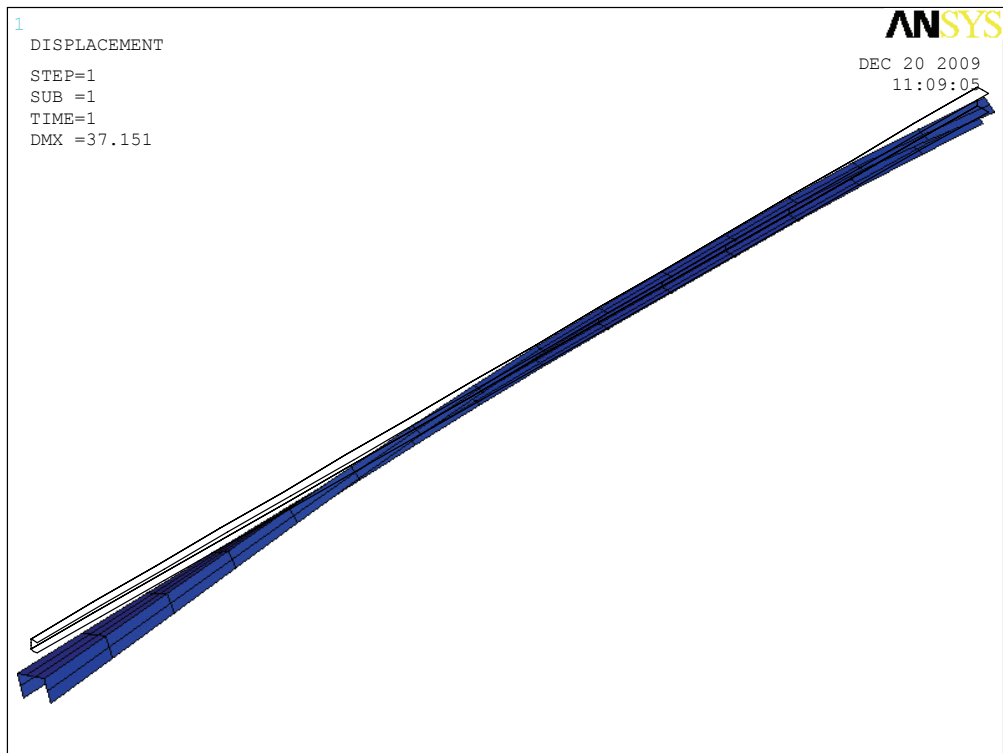


圖 3.32 碳纖維第 3 臂考慮自重及承受負荷後之變形狀況

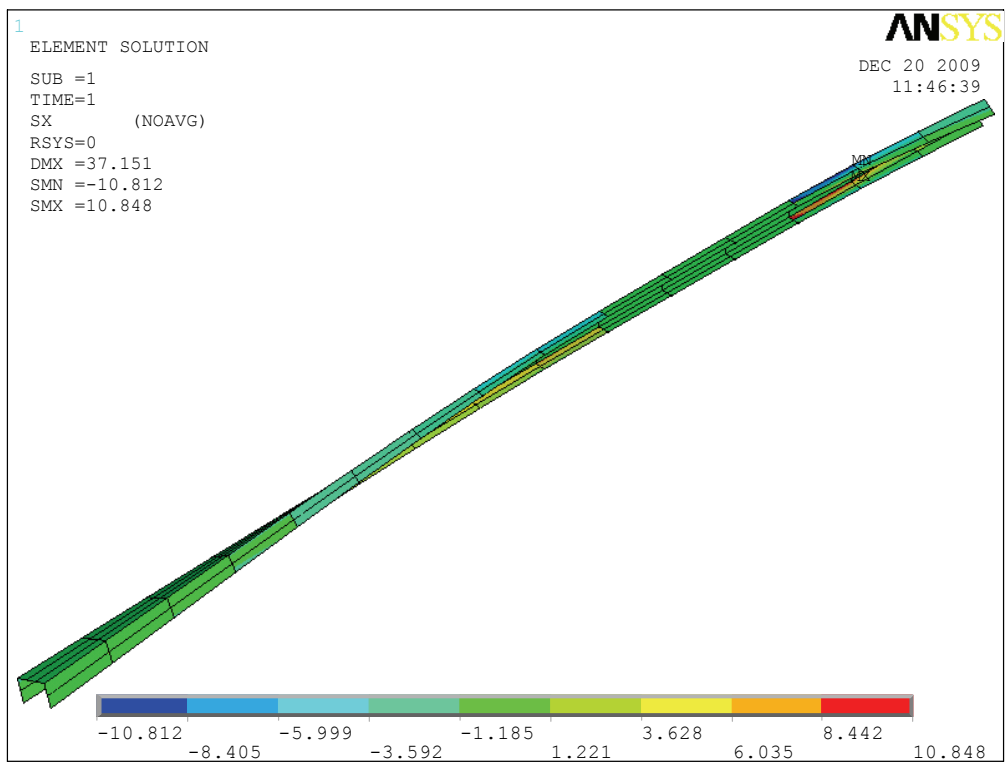


圖 3.33 碳纖維第 3 臂表面纖維方向之應力大小及分佈

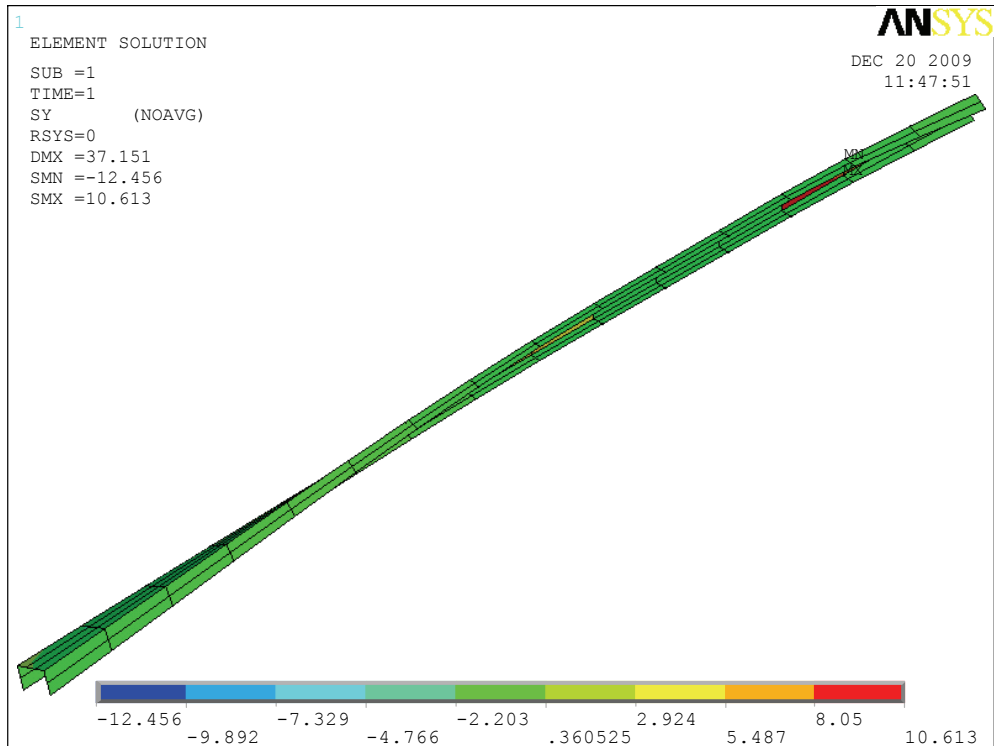


圖 3.34 碳纖維第 3 臂橫向之應力大小及分佈

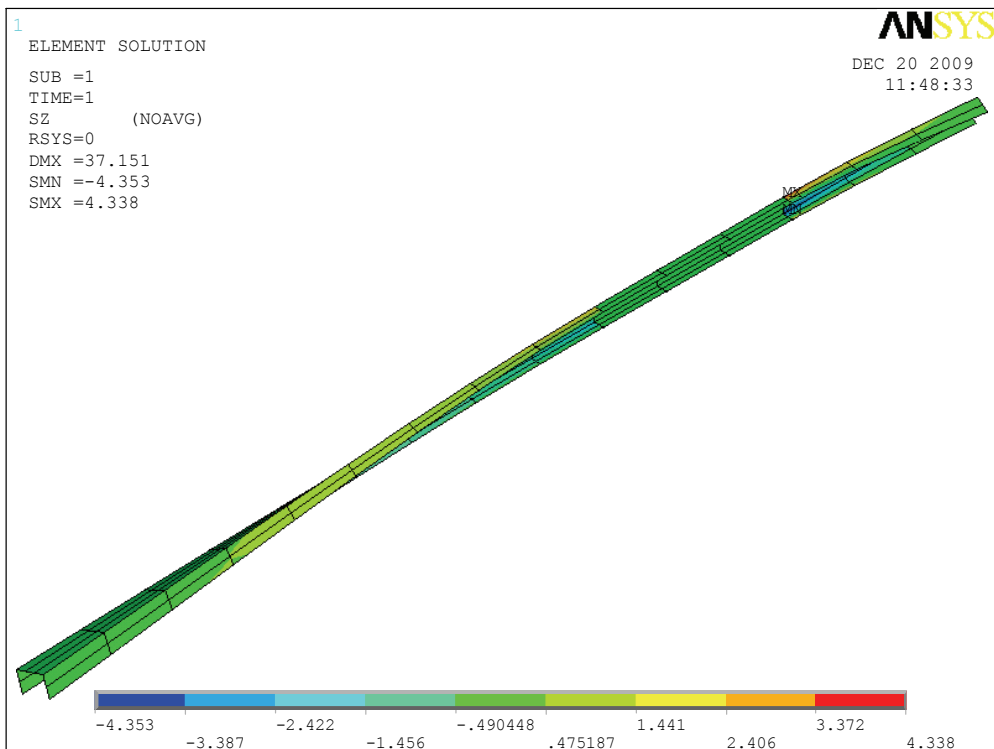


圖 3.35 碳纖維第 3 臂板厚度方向之應力大小及分佈

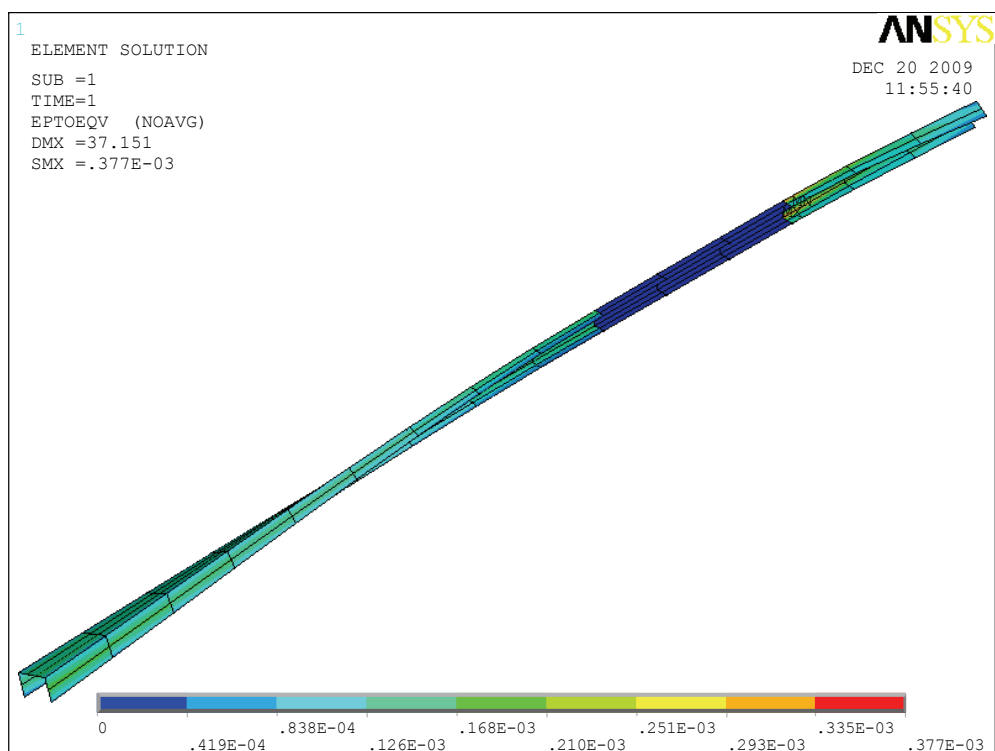


圖 3.36 碳纖維第 3 臂應變大小及分佈

對照碳纖維第 3 臂設計，用厚度 3.0 公釐之鋁合金板材製作時，以相同之尺寸大小、負載荷重及固定支點建構之有限元素模型如圖 3.37 所示。

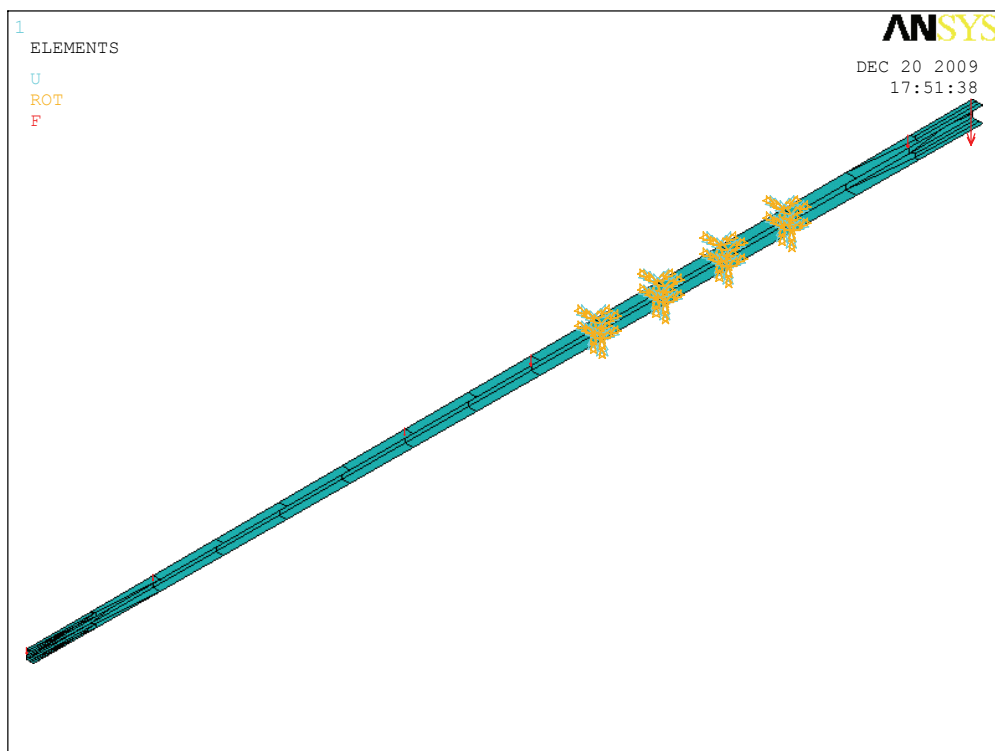


圖 3.37 鋁合金第 3 臂有限元素模型

鋁合金第 3 臂靜態有限元素分析結果如圖 3.38 至圖 3.42 所示，機械手臂考慮自重及承受 CCD 和配重塊負荷後之變形狀況如圖 3.38，最大撓屈變形 23.89 公釐，較碳纖維第 3 臂之最大撓屈變形 37.15 公釐稍小(如圖 3.32)。圖 3.39 至圖 3.41 則顯示第 3 臂受力後在機械臂縱軸向、橫向及鋁板厚度方向之應力大小及分佈，最大應力值分別是 15.8 牛頓/平方公釐、2.26 牛頓/平方公釐、5.69 牛頓/平方公釐，而鋁合金 6061 的抗拉強度為 290 牛頓/平方公釐，安全係數至少為 18.3，顯示以鋁合金板製作之第 3 臂在安全上亦無問題。圖 3.42 顯示第 3 臂之應變大小及分佈，最大應變值 0.232E-3。

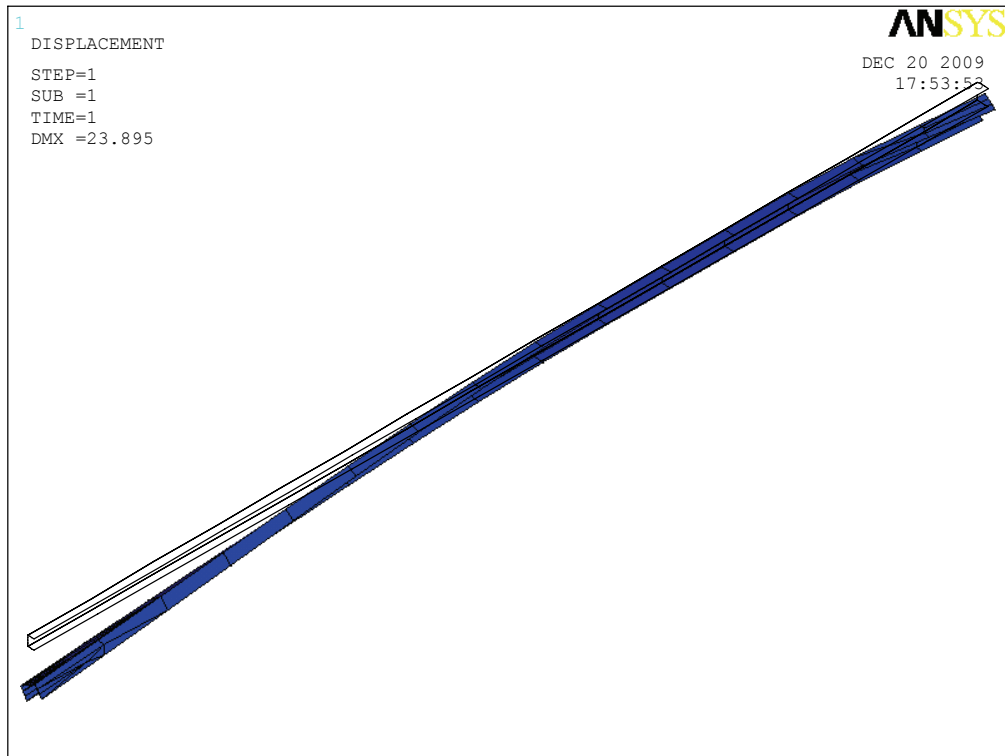


圖 3.38 鋁合金第 3 臂考慮自重及承受負荷後之變形狀況

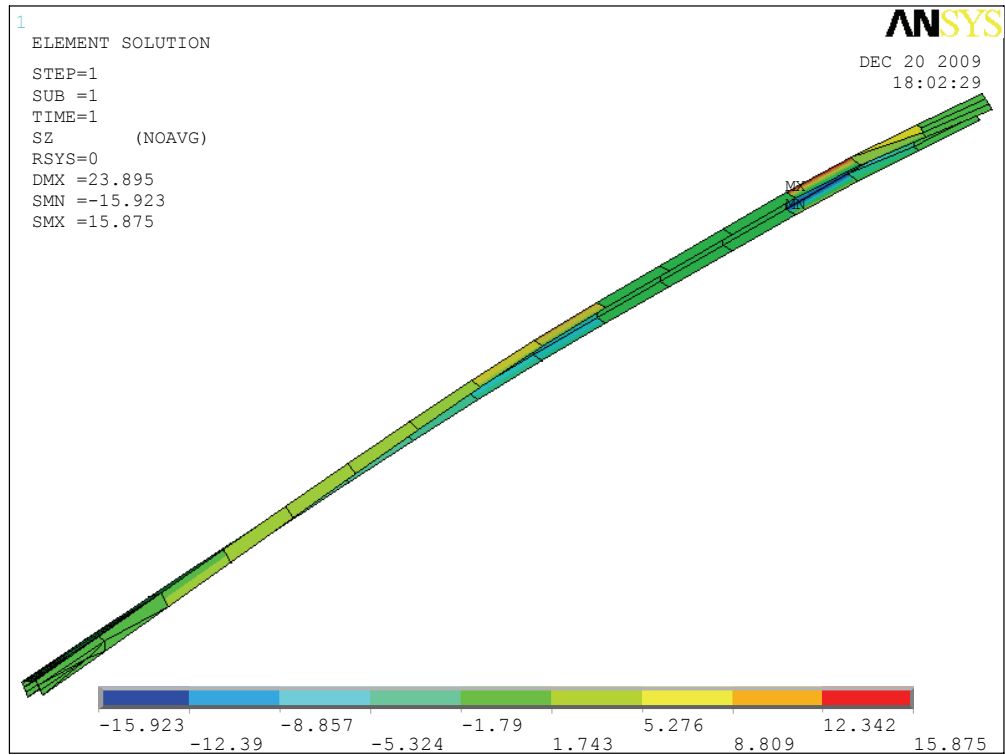


圖 3.39 鋁合金第 3 臂縱軸方向之應力大小及分佈

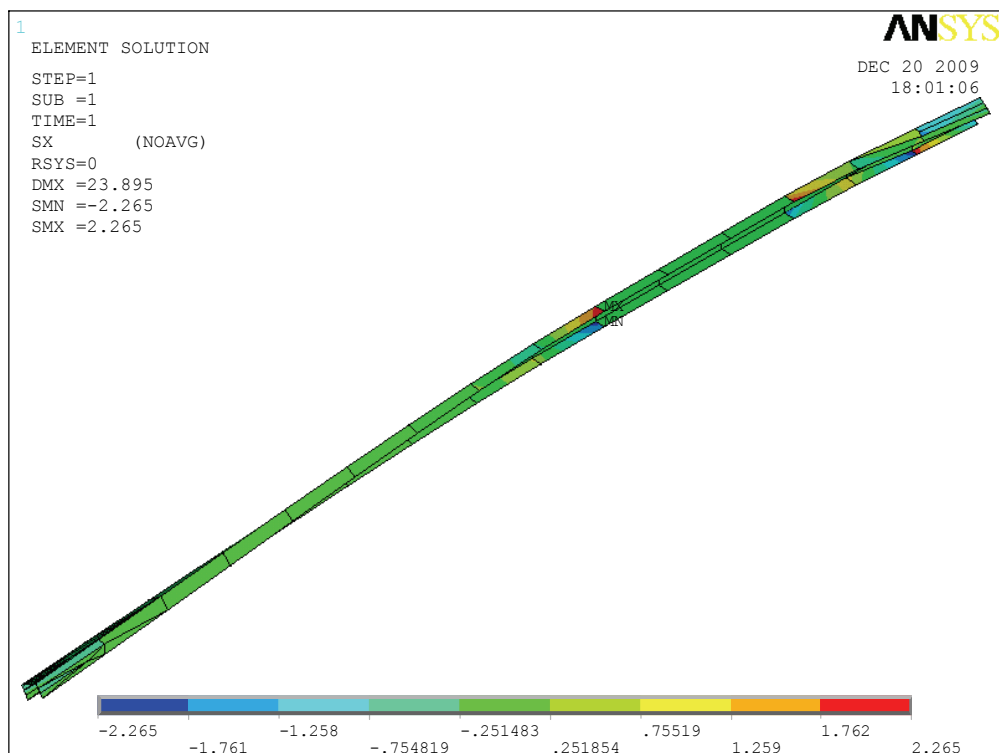


圖 3.40 鋁合金第 3 臂橫軸方向之應力大小及分佈

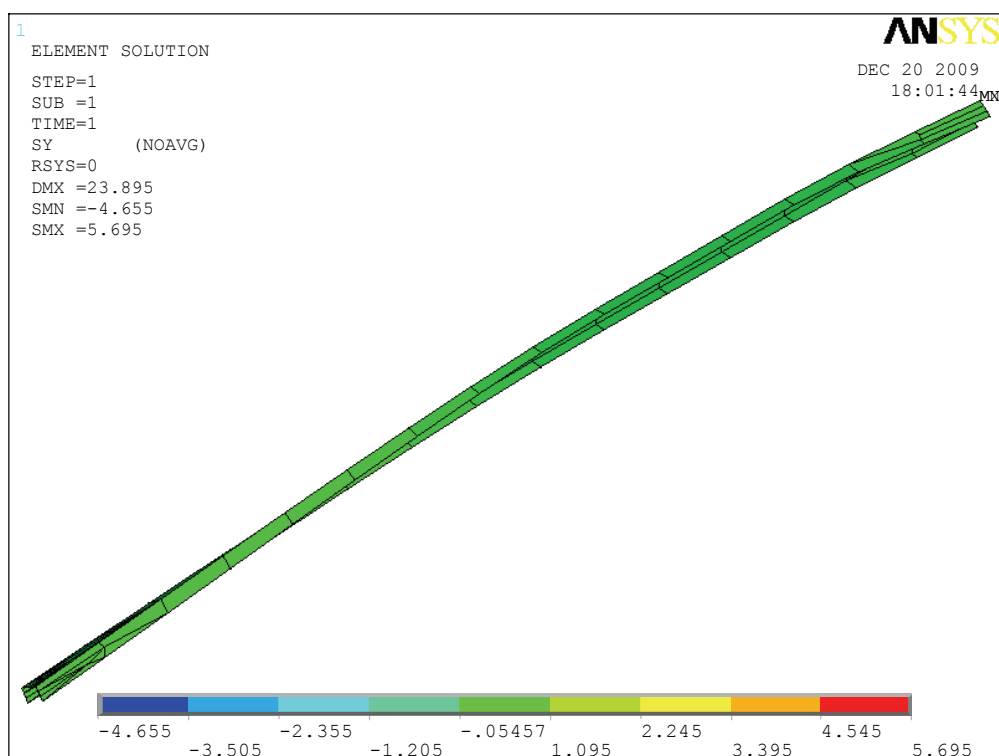


圖 3.41 鋁合金第 3 臂板厚度方向之應力大小及分佈

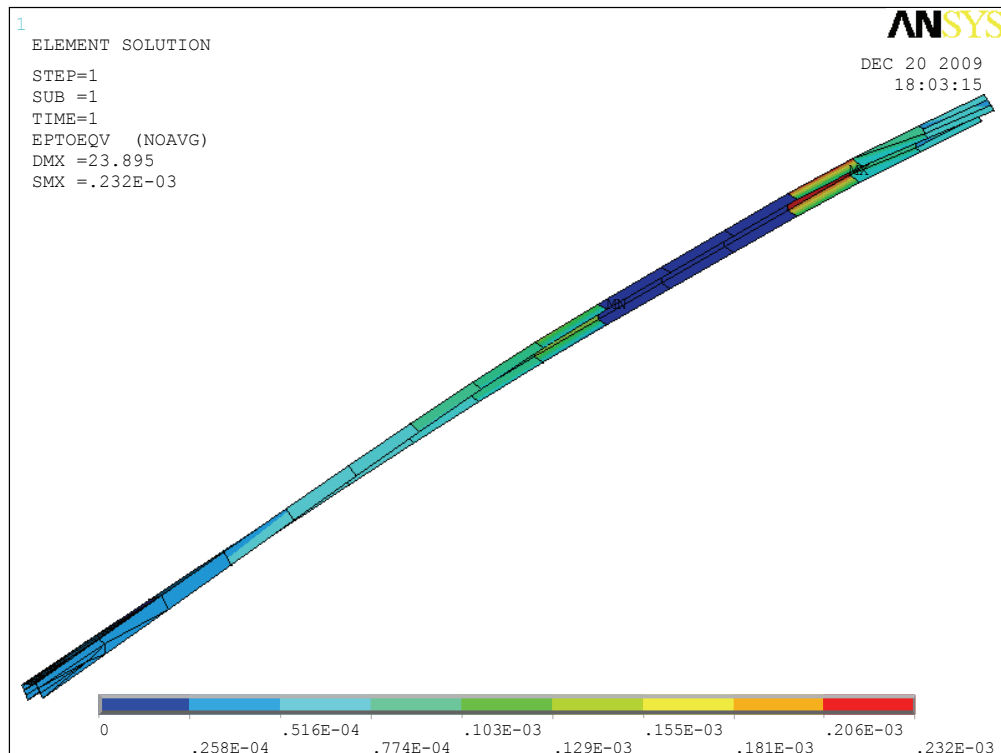


圖 3.42 鋁合金第 3 臂應變大小及分佈

綜上，第 3 臂分別以碳纖維和鋁合金製作時，鋁合金在承受相同負荷下的最大撓屈變形量及應變較小，最大應力則是碳纖維較小，但兩者間的差距都不大，安全係數也都遠高於一般設計上之需求，因此就結構強度上來說，2 種材質均符合安全要求。此外，從重量及操作輕便性考量，因碳纖維的重量約是鋁合金的 2/3，2 種不同材質的第 3 臂重量差異大約 8 公斤左右，然碳纖維的成本大約是鋁合金的 3~4 倍，第 3 臂價差約新台幣 15 萬元，因此在材料選用上仍需審慎評估。

3.4 檢測位置定位

依據「臺灣地區橋梁管理資訊系統」，橋梁基本資料中已包括橋頭(里程數較少之橋近端)和橋尾(里程數較多之橋遠端)之 GPS 經緯度座標，本研究係以橋檢作業自動化為目標，因此擬發展自動定位系統，自動記錄橋檢車執行橋檢作業時的位置，聯結檢測影像與檢測位置，並儲存於「臺灣地區橋梁管理資訊系統」。

目前自動定位一般均採用 GPS。GPS 所採用的定位法是距離交會法，利用電波傳送的速度及時間，算出電波發射點(衛星)及電波接收點(用戶端)間的距離，利用 3 度空間的距離交會法求出使用者所在位置。GPS 在實際應用上有時會產生相當大之誤差，GPS 誤差產生的原因很多，一般按誤差來源可分成 3 大類，即衛星偏差、觀測偏差及與觀測相關之偏差。各種誤差都嚴重影響 GPS 定位精確度，因此為提高定位實用性，各種解決方案陸續被提出，A-GPS 即是其一。A-GPS 由 3 部分組成，分別為具通訊功能的 GPS 接收器(手機)、網路系統端的地面 GPS 接收系統(輔助伺服器)以及具有定位服務通訊功能的網路。A-GPS 利用手機基地台的信號連接遠程伺服器，再配合傳統的 GPS 衛星接受器，讓定位的速度更快、效率更高。

目前各橋梁管理單位執行檢測工作時，除需就「臺灣地區橋梁管理資訊系統」規定之目視檢測項目，如大梁、橫隔梁、橋面版、支承墊等，逐跨或逐墩檢測評分外，另須針對各構件之各式破壞，分別記錄其破壞位置、大小或數量，並填寫建議維修工法輔以相片紀錄。由於橋梁具有相似構件之重覆性，亦即每跨之構件項目及配置雷同，因此需以系統化之構件編碼方式，標示各構件位置，以利於相片或紀錄中追蹤歷之檢測發現破壞之位置，橋梁構件編碼方式如圖 3.43 所示。當檢測人員以目視方式執行橋檢工作時，對破壞位置之記錄，需從橋側向橋中心方向計數大梁編號，同時也需從橋墩處逐一計數橫隔梁編號。然而，一般橋梁的橋跨長度往往長達 30 公尺，甚至更長，當對橫隔梁編號逐一計數時，往往容易出錯。因此，若能以較精確之 GPS 輔助定位，將定位精度提升至 2~3 公尺，或可使橋梁檢測位置定位更為精準。



圖 3.44 A-GPS 接受器

測試時，以手持 A-GPS 接受器行走於臺北市中山北路，來回一趟後定點停滯，定位資料點經處理後將行走路徑及定點位置描繪於 Google Earth 上，如圖 3.45 所示，定位精度在 2 公尺內。

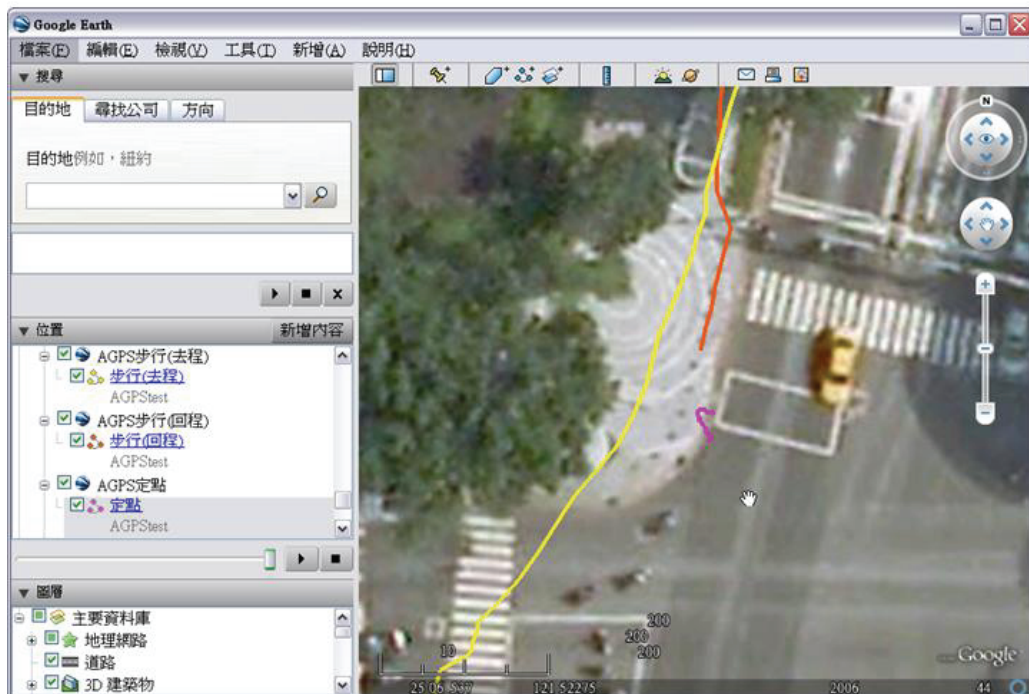


圖 3.45 A-GPS 定位資料點處理

A-GPS 之定位實測亦配合機械手臂橋檢車實際橋梁檢測同步進行，過程中同時記錄 GPS 訊號，以比對兩者之精度。橋檢車於省道臺2 丙線長潭橋實測時，接收到的 A-GPS 訊號由系統程式將橋檢車所在位置之經緯度資訊以(度.分)之型式呈現於檢測畫面右上角，如圖 3.46 所示。

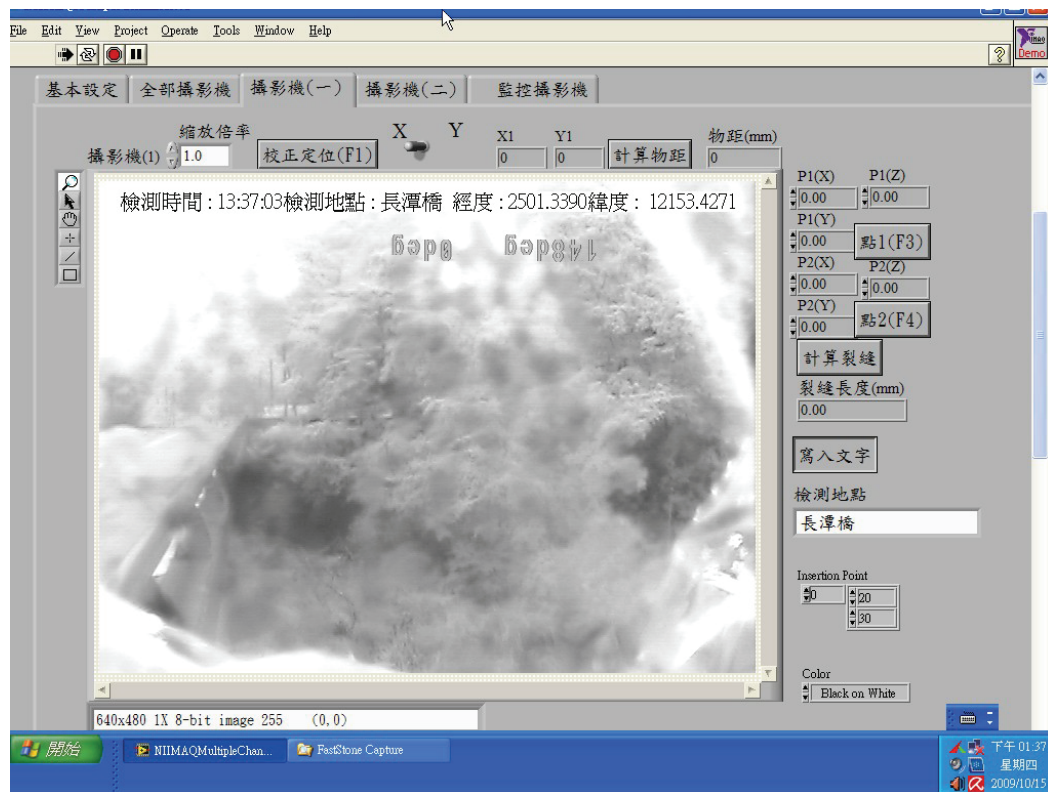


圖 3.46 橋檢車位置經緯度資訊之呈現畫面

當橋檢車停於定點時，系統會連續接收 A-GPS 訊號並記錄。先將每筆訊號的位置經緯度資訊換算為地表位置座標，再取平均值為平均位置點，而後分別計算每筆訊號對應位置與該平均位置點的相對距離，計算結果如表 3-5 所示。顯示 A-GPS 訊號定位之相對誤差半徑約在 0.5 公尺左右。

表3-5 全球衛星定位系統A-GPS訊號定位之相對誤差

A-GPS 經緯度 (經度, 緯度)	位置座標 (X, Y)	與平均位置點 相對距離 (公尺)
(25.022297, 121.890500)	(339873.19, 2768542.67)	0.406
(25.022298, 121.890500)	(339873.19, 2768542.78)	0.381
(25.022298, 121.890502)	(339873.39, 2768542.78)	0.183
(25.022298, 121.890503)	(339873.49, 2768542.78)	0.087
(25.022298, 121.890505)	(339873.69, 2768542.78)	0.124
(25.022298, 121.890507)	(339873.89, 2768542.78)	0.322
(25.022298, 121.890508)	(339873.99, 2768542.78)	0.421
(25.022298, 121.890505)	(339873.69, 2768542.78)	0.124
(25.022300, 121.890505)	(339873.69, 2768543.00)	0.222
(25.022300, 121.890503)	(339873.49, 2768543.00)	0.203

對照 A-GPS 訊號之接收，同一時間另外同步記錄 GPS 訊號，並計算每筆訊號的位置座標及其與平均位置點的相對距離，結果列表於表 3-6。依據 GPS 訊號所計算之相對定位精度誤差半徑約從 3 公尺至 15 公尺不等，明顯較 A-GPS 訊號之定位誤差半徑大許多。

表3-6 全球衛星定位系統GPS訊號定位之相對誤差

GPS 經緯度 (經度, 緯度)	位置座標 (X, Y)	與平均位置點 相對距離 (公尺)
(25.022348, 121.890518)	(339875.00, 2768548.36)	14.333
(25.022350, 121.890522)	(339875.34, 2768548.55)	14.673
(25.022335, 121.890350)	(339858.02, 2768546.78)	3.132
(25.022350, 121.890340)	(339857.00, 2768548.43)	3.667
(25.022358, 121.890322)	(339855.15, 2768549.34)	5.588
(25.022362, 121.890293)	(339852.28, 2768549.69)	8.478
(25.022363, 121.890258)	(339848.74, 2768549.85)	12.008
(25.022363, 121.890248)	(339847.73, 2768549.85)	13.012
(25.022333, 121.890457)	(339868.79, 2768546.66)	8.319
(25.022337, 121.890455)	(339868.62, 2768547.03)	8.079

A-GPS 之定位雖然在精度上較傳統之 GPS 定位高許多，但仍有 0.5 至 1 公尺的可能誤差半徑範圍，因此以衛星訊號輔助橋檢車定位，需考慮其可能之誤差。實務操作上，檢測人員可以在檢測出有結構破壞處先以 A-GPS 定位，日後維修時，工程人員必需在誤差範圍內進一步搜尋和確定。

3.5 機械手臂機構平衡

以本研究研發之機械手臂附載攝影機進行橋梁檢測，其檢測範圍取決於第 3 臂之長度，第 3 臂愈長，攝影機愈能深入橋面下或能附載更多部攝影機，進行較大範圍甚至同步檢測。然而，因第 3 臂與第 2 臂垂直相接，第 3 臂之自重及其負載將對第 2 臂在臂相接處產生力矩。此力矩一方面會造成第 2 臂之彎曲應力，另一方面也會讓構成第 2 臂之伸縮套管因力矩作用而彎曲，使其在伸縮時因卡住而無法收放。特別是當第 3 臂加長時，即使攝影機之重量不變，因力臂增加，對第 2 臂產生之力矩亦增加，此時就必須考慮設計一平衡力矩來抵銷，以確保操作的順利及安全。

平衡力矩的設計方式有 2 種，其一是在第 3 臂前端攝影機安裝處，以拉繩施一向上之拉力來抵銷第 3 臂及攝影機向下的重力，其二是第 3 臂以 T 型方式與第 2 臂垂直相接，並在第 3 臂上與攝影機反向之一端安裝配重塊，藉配重塊所產生之力矩來平衡。第 1 種平衡力矩的設計因不採用配重塊，整體結構重量較輕，但需另行設計收放拉繩之機構，同時也不容易同步操控機械手臂及拉繩，有操控上的困難；第 2 種平衡力矩的設計因增加配重塊，所以重量是最大考量因素，但其操控上的方便性具有優勢，2 種設計方式均曾在本所 97 年計畫中實測^[15]。由於 2 種設計各有其利弊，本研究最後仍以操控便利性為主要考量，採行配重塊設計，惟配重塊之重量、放置位置及實際操控時是否影響機械手臂運作還需計算及進行實測，經本研究於省道臺 2 丙線長潭橋檢測驗證，整體操作過程流暢順利。以下則再就第 3 臂 6 公尺長並外加 3 公尺平衡臂時，考慮結構自重及負載 2 個 CCD 和 1 個油壓缸後，配重塊之重量、放置位置所產生之平衡力矩列式計算，計算之負載、自重及配重分佈如圖 3.47 所示。

1. 負載力矩

負載計有 2 個 CCD (1 公斤×2)，1 個 CCD 座架(1 公斤)，1 個油壓缸(2.43 公斤)，共重 5.43 公斤。此外，第 3 臂附載 CCD 端之機械臂自重 11.5 公斤(3.6 公斤+ 3.3 公斤+ 2.3 公斤+ 2.3 公斤)。

CCD 端(CCD+座架+油壓缸)之負載力矩--

$$(2+1+2.43)\text{公斤} \times (1.2+1.5+1.5+1.5)\text{公尺} = 30.951 \text{ 公斤-公尺}$$

第 3 臂自重之負載力矩--

$$(3.6 \text{ 公斤} \times 0.6 \text{ 公尺}) + (3.3 \text{ 公斤} \times 1.95 \text{ 公尺}) + (2.3 \text{ 公斤} \times 3.45 \text{ 公尺}) + (2.3 \text{ 公斤} \times 4.95 \text{ 公尺}) = 27.915 \text{ 公斤-公尺}$$

負載合力矩--

$$30.951 + 27.915 = 58.866 \text{ 公斤-公尺}$$

2. 平衡力矩

平衡塊計 3 塊，共重 15 公斤，置於第 3 臂平衡端末端，而第 3 臂平衡端之機械臂自重 10.9 公斤(0.9 公斤+ 5 公斤+ 5 公斤)。

平衡塊之平衡力矩--

$$5 \text{ Kg} \times 3 \times (0.3 + 1.5 + 1.5) \text{ m} = 49.5 \text{ Kg-m}$$

第 3 臂平衡端自重之平衡力矩--

$$(0.9 \text{ 公斤} \times 0.15 \text{ 公尺}) + (5 \text{ 公斤} \times 1.05 \text{ 公尺}) + (5 \text{ 公斤} \times 2.55 \text{ 公尺}) = 18.135 \text{ 公斤-公尺}$$

平衡合力矩--

$$49.5 + 18.135 = 67.635 \text{ 公斤-公尺}$$

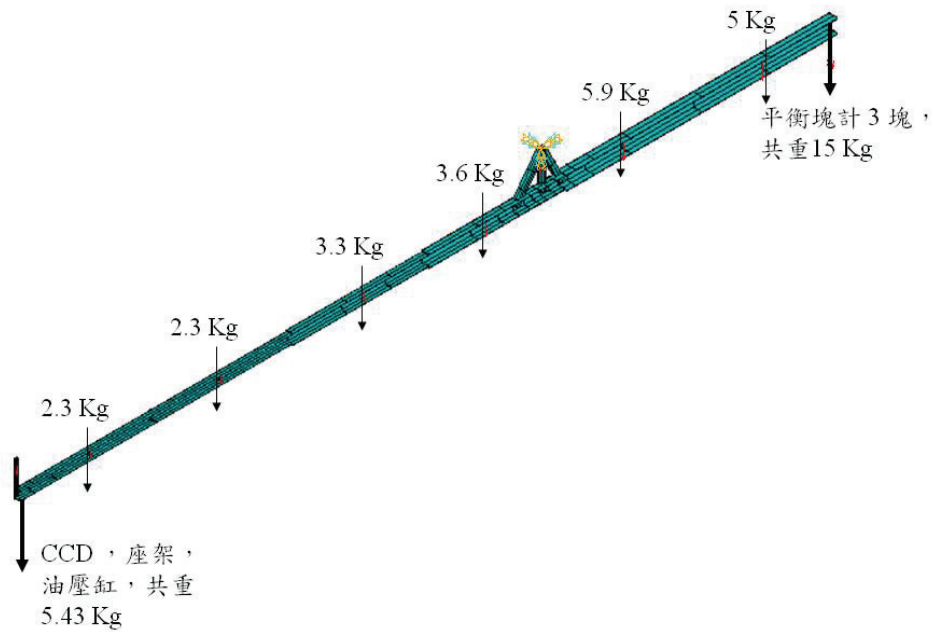


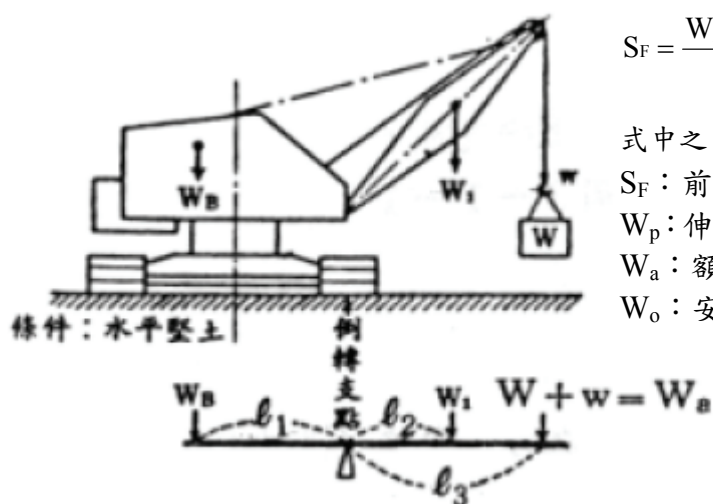
圖 3.47 第 3 臂之負載、自重及配重分佈

負載力矩與平衡力矩之比約 1:1.15，惟其中並未將第 3 臂附載 CCD 端之 CCD 電源線、訊號傳輸線及油壓管等之重量納入計算，因此實際平衡狀況測試可參考省道臺 2 丙線長潭橋實測，如圖 3.48 所示，第 3 臂近似水平，顯示負載力矩與平衡力矩趨近於平衡。



圖 3.48 負載力矩與平衡力矩之實際平衡狀況測試

依行政院勞工委員會 94 年 5 月 12 日勞檢 2 字第 0940024049 號令發布之「移動式起重機安全檢查構造標準」第 2 章第 5 節，如圖 3.49 所示，前方安定度之安全係數應大於 1.15，故橋檢車之傾覆安全係數應予計算確認。



$$S_F = \frac{W_p + W_a + W_o}{W_p + W_a}$$

式中之 S_F 、 W_p 、 W_a 及 W_o 分別表示下列之值：

S_F ：前方安定度。

W_p ：伸臂重量中之前端等價質量（公噸）。

W_a ：額定荷重與吊具之質量和（公噸）。

W_o ：安定餘裕荷重（公噸）。

圖 3.49 前方安定度計算規範

橋梁檢測機械手臂操作是在車輛側面進行作業，而當機械手臂第 1 臂完全伸出時，橋檢車所受傾覆力矩最大，依此條件之橋檢車及機械手臂相關尺寸及受力狀況如圖 3.50 所示，傾覆安全係數計算如下：

機械手臂結構自重對橋檢車之最大傾覆力矩：

$$\begin{aligned} & [(38+32) \times (1.3-0.32) + (24+32) \times (3.65-0.32) + 20 \times (5.75-0.32)] + \\ & [(12.3+13.6+7.4+2.85) \times (6.8-0.32)] + [5 \times (6.8+1.8+0.75-0.32) + 5.9 \times (6.8+0.9-0.32) + \\ & 3.6 \times (6.8-0.6-0.32) + 3.3 \times (6.8-1.2-0.75-0.32) + 2.3 \times (6.8-1.2-1.5-0.75-0.32) + \\ & 2.3 \times (6.8-1.2-1.5-1.5-0.75-0.32)] = (68.8+186.48+108.6) + 234.25 + \\ & (45.15+43.54+21.17+14.95+6.97+3.52) = 733.43 \end{aligned}$$

配重塊重對橋檢車之最大傾覆力矩：

$$15 \times (6.8+1.8+1.5-0.32) = 146.7$$

CCD 負載對橋檢車之最大傾覆力矩：

$$5.43 \times (6.8-1.2-1.5-1.5-1.5-0.32) = 4.24$$

最大傾覆力矩：

$$733.43 + 146.7 + 4.24 = 884.37$$

橋檢車車重及油壓吊桿機臺重之反傾覆力矩：

$$(2300 \times 0.65) + (254 \times 0.32) = 1495 + 81.28 = 1576.28$$

傾覆安全係數： $1576.28 \div 884.37 = 1.78$

3.6 機械手臂設備規格

依前述設計並修改後之橋檢車機械手臂，可於 4 級風以下且無雨的室外環境，檢測寬度在 12 公尺以下橋梁，而新增之第 4 臂可伸入大梁間，檢測大梁腹版、橫隔梁、支承墊等，再透過雙 CCD 攝影，已可概估劣化尺寸或範圍。各設備組件性能規格及價格如表 3-7。

表3-7 橋檢車機械手臂各設備組件性能規格及價格

設備組件	性能規格	價格
承載車輛	總重 3500 公斤以下，載重 1000 公斤小型貨車	80 萬
第 1 臂油壓吊桿	最大伸長 6.8 公尺，水平最大吊重 125 公斤	30 萬
第 2 臂套管	最大伸長 4.5 公尺	10 萬
第 3 臂鋁合金管及配重塊	變截面積設計，板厚 2~3 公釐，總長 9 公尺 (第 3 臂若採玻璃纖維管材質且均一截面積設計估計約須 20 萬)	6 萬
第 4 臂油壓管及組件	有效行程 200 公釐，最大長度 540 公釐	4 萬
攝影機、影像擷取卡及線路	12 倍光學鏡頭，360°水平及 90°垂直旋轉， 重量 1 公斤，紅外線投射距離 16 公尺	12 萬
控制電腦及機櫃(含 A-GPS、不斷電系統、蓄電池)	CPU P4 2.8G，DDR333 512MB	10 萬

第四章 橋梁檢測機械手臂實測

4.1 目標檢測範圍 4.5 公尺橋檢實測

本研究針對可檢測之橋寬範圍部分分 2 階段進行。第 1 階段先考慮第 3 臂 4.5 公尺長及外加平衡臂 1.5 公尺，檢測從橋外緣深入橋面中心約 4.5 公尺之範圍。橋檢車、機械手臂及攝影機均先於樹林市塔寮坑溪堤岸邊進行組裝、操作測試及影像檢測，而後正式橋檢實測地點選定為貢寮鄉省道臺 2 丙線長潭橋，進行檢測橋梁結構死角之實測驗證。長潭橋位於臺 2 丙線 23K+818 處，為一橋面 14.4 公尺寬之雙向 4 車道橋梁，如圖 4.1 所示，橋長 34.9 公尺，平日車流量不大，適合橋檢作業測試。



圖 4.1 省道臺 2 丙線長潭橋

第 1 階段之長潭橋實地檢測，首先是要確認機械手臂之操作流程，必須能順利而且無誤地將攝影機深入橋面下執行影像攝影。機械手臂操作流程如圖 4.2 至圖 4.6 所示，舉升第 1 臂並迴轉，在第 3 臂跨越橋護欄後(圖 4.2)，由鋼索控制第 2 臂將第 3 臂垂降

至大梁以下(圖 4.3)，再迴轉第 1 臂，即可將攝影機伸入橋面版下方(圖 4.4)，確認攝影機已在橋面版下方後，收回第 1 臂(圖 4.5)，此時攝影機將隨著第 1 臂由橋外緣向橋中心移動並同步啟動影像檢測，完成機械手臂負載攝影機伸入橋面下之動作操控(圖 4.6)。



圖 4.2 第 3 臂跨越橋護欄



圖 4.3 將第 3 臂垂降至橋大梁以下



圖 4.4 迴轉第 1 臂將攝影機伸入橋面下



圖 4.5 收回第 1 臂將攝影機由橋外緣向橋中心移動



圖 4.6 機械手臂負載攝影機伸入橋面下

檢測過程中，攝影機預定停留位置及檢測範圍如圖 4.7 所示。攝影機先不伸入橋面版下方而僅停留於橋外側大梁邊，藉以評估其檢測範圍能否及於大梁腹版及橫隔梁；接著測試能否將攝影機舉升至兩大梁間，如右圖所示。

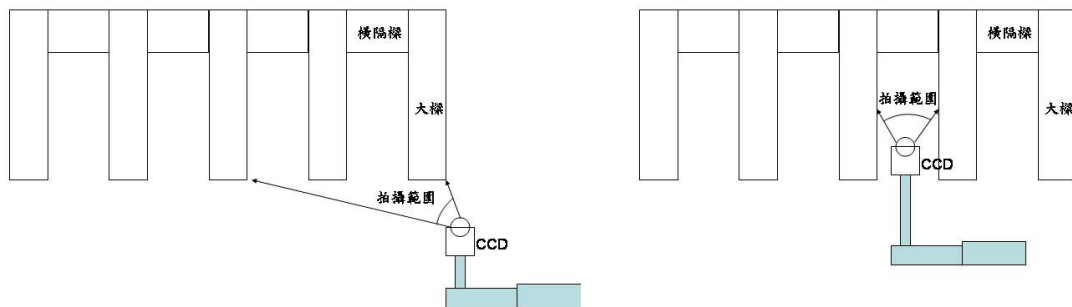


圖 4.7 攝影機預定停留位置及檢測範圍

當攝影機停留於橋外側大梁邊時，攝得畫面如圖 4.8 所示，攝影機在該位置時僅能拍攝到大梁底面，無法觀察到大梁腹版、橫隔梁等構件。攝影機進一步往橋中央伸入，到達 2 大梁間位置後，如圖 4.9 所示，同時在該位置測試第 4 臂之操作，第 4 臂油壓缸伸縮分別如圖 4.10 及圖 4.11 所示。攝影機在 2 大梁間所攝得之大梁腹版、橫隔梁及支承墊如圖 4.12、圖 4.13、圖 4.14 所示，畫面拍攝效果良好。

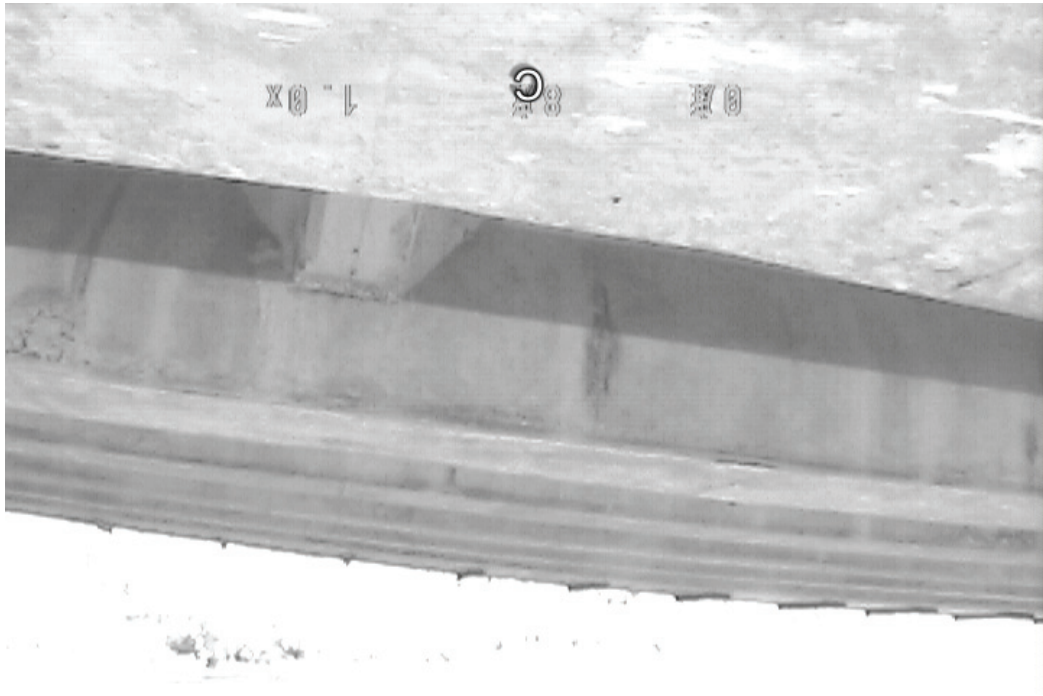


圖 4.8 攝影機於橋外側所拍攝之畫面



圖 4.9 攝影機伸入橋中央到達 2 大梁間



圖 4.10 第 4 臂油壓缸上升



圖 4.11 第 4 臂油壓缸縮降



圖 4.12 攝影機攝得之大梁腹版



圖 4.13 攝影機攝得之橫隔梁

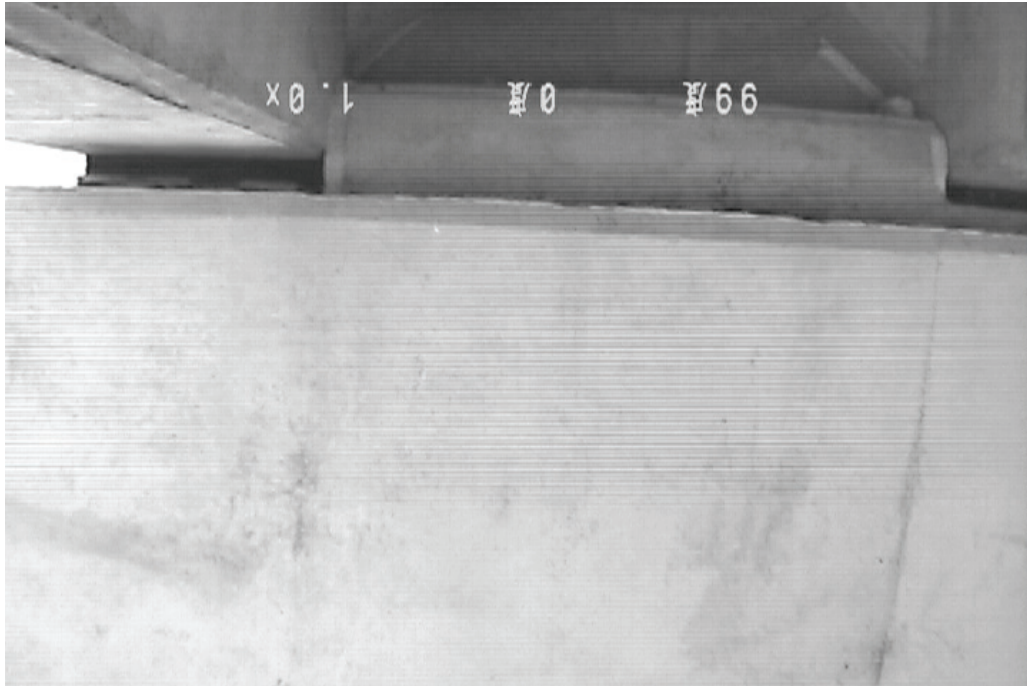


圖 4.14 攝影機攝得之支承墊

4.2 目標檢測範圍 6.0 公尺橋檢實測

第 2 階段測試是延長第 3 臂至 6 公尺長並外加平衡臂 3 公尺，以檢測範圍 6.0 公尺為目標。加長第 3 臂對橋檢車整體設計的影響需從 3 方面考慮，其 1 是第 3 臂之結構強度，增長後的結構強度分析詳見本報告 3.2 節，第 3 臂承載攝影機及配重塊後結構尚在安全範圍內；其次，攝影機及結構自重對第 3 臂產生一負載力矩，而配重塊對第 3 臂另產生一平衡力矩，此 2 力矩之平衡問題將造成第 2 臂套管伸縮時之障礙，相關分析詳 3.4 節，計算結果顯示 2 力矩近似平衡；其 3，第 3 臂增長後之結構總重量、攝影機及配重塊重量，再加上第 2 臂之結構重量，共重 79 公斤，是為第 1 臂之實際荷重，而此荷重須低於其額定荷重。第 1 臂之額定荷重及結構強度分析詳見本所 97 年「橋梁檢測機械手臂研發進階計畫」結案報告，其中，依「移動式起重機安全檢查構造標準」之結構應力安全係數 1.5 計算，第 1 臂在最大操作範圍 6.8 公尺之水平吊重容許值為 125 公斤。依此，本階段第 3 臂加長設計後併加第 2 臂之總重仍在第 1 臂的容許值內。

本階段目標檢測範圍 6.0 公尺橋檢實測仍選定位於貢寮鄉之長潭橋，首先測試第 3 臂加長後之完整機械手臂操控步驟，確認機械手臂負載攝影機執行檢測任務之順利及無誤。測試過程從橋檢車設置安全警示及機械手臂整備(圖 4.15)、第 3 臂組裝(圖 4.16)、第 3 臂舉升(圖 4.17)、第 3 臂跨越橋護欄後下降及旋轉到檢測位置(圖 4.18)，實測結果顯示，加長後之第 3 臂仍可順暢執行檢測工作。



圖 4.15 橋檢車設置安全警示及機械手臂整備



圖 4.16 第 3 臂組裝



圖 4.17 第 3 臂舉升



圖 4.18 第 3 臂到達檢測位置

實地檢測之另一測試重點是測試橋檢車行進時，動態影像之檢測品質。第 3 臂伸入橋面下後，橋檢車即緩緩向前行駛。如圖 4.19 所示，從左圖之自用小客車向前低速行駛移動至右圖所示之下一個橋墩前。



圖 4.19 橋檢車以低速向前行駛之動態檢測

橋檢車移動過程中 CCD 所拍攝之影像以每隔 3 至 8 秒左右擷取畫面 1 次，如圖 4.20 所示，CCD 所拍攝之影像畫面大致清晰穩定，因此以橋檢車負載攝影機進行檢測時，除即時觀察並記錄定點檢測結果外，先以較快速的動態影像拍攝和錄影後，再直接從錄影畫面檢視橋梁狀況亦是可行方案。

為能更清楚觀察橋梁結構死角，本研究修改本所年度機械手臂研發成果，以油壓缸建構第 4 臂。第 4 臂之功能在舉升其所負載之 CCD，使之伸入 2 大梁間觀察橋梁大梁腹版、支承墊等結構死角(原無第 4 臂時，CCD 僅能貼近大梁底面而無法伸入 2 大梁間，觀察效果將因此受限)。目前一般橋梁之大梁深度介於 600~2000 公釐之間，本研究所採用之第 4 臂油壓缸原長度為 340 公釐，驅動第 4 臂油壓缸可再將攝影機頂高 200 公釐。

針對本研究所採用之第 4 臂油壓缸，橋檢實測時亦同時檢測第 4 臂油壓缸推出達最大行程時之影像，並與第 4 臂油壓缸未伸長時之影像比較，兩者在相同影像倍率時所攝得之影像如圖 4.21 之左右，就清晰度而言，兩者差異不大，故就長潭橋而言，若僅檢測大梁及橋面版底面，第 4 臂伸長與否幾乎沒有影響。由於本研究所採用之第 4 臂油壓缸有效行程 200 公釐，伸出達最大長度時為 540 公釐，與長潭橋大梁深度 2000 公釐仍有一段差距，為彌補此一差距，設計上可選用有較長行程之油壓缸，惟長行程油壓缸之原長度必需足以容納活塞行程，但第 4 臂油壓缸長度增加時，第 2 臂伸縮套筒之總長度至少亦須增加相同之量，才能將第 4 臂完全降至橋梁大梁底面以下，如圖 4.22 所示，使之迴轉進入橋面下時不會碰撞到大梁，但此一模式將變更機械手臂之整體設計，本研究暫不予以考慮。

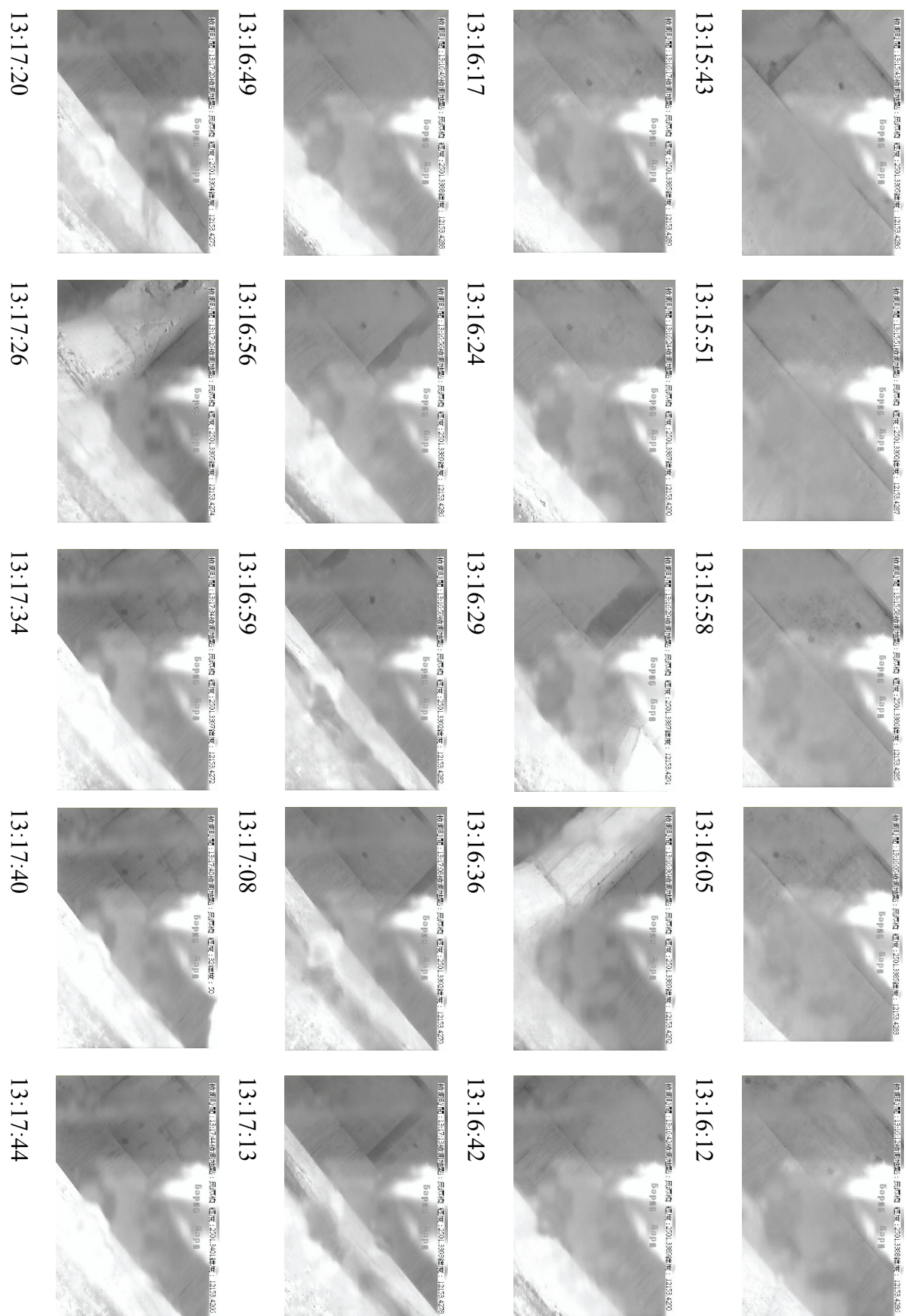


圖 4.20 動態檢測擷取之畫面



圖 4.21 第 4 臂油壓缸未伸長(圖左)及推出達最大行程(圖右)時之檢測影像

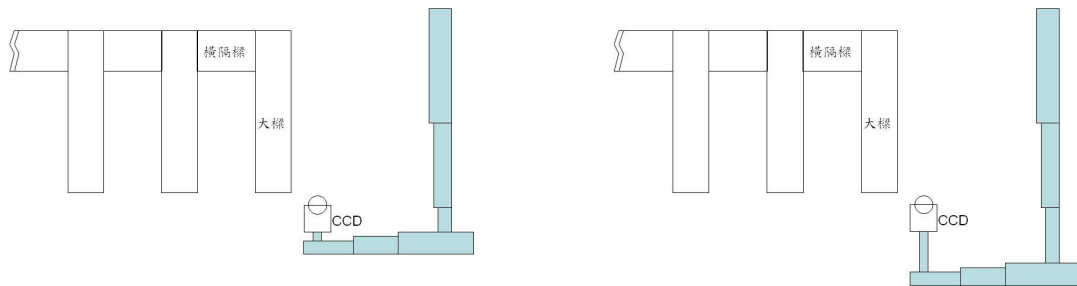


圖 4.22 第 4 臂須完全下降至大梁底面以下示意圖

在不變更第 4 臂油壓缸長度的情況下，可考慮藉由鏡頭伸縮，放大影像倍率等方式來觀察橋梁結構面。本研究所選用之高速球型攝影機具 12 倍縮放倍數之光學鏡頭，紅外線投射距離可達 16 公尺，因此檢測 2 公尺深之大梁應無問題，而其在鏡頭放大倍率 1 倍及 3.5 倍時對 2 公尺外 A4 紙張拍攝之影像分如前一章節中的圖 3.9 及圖 3.10 所示，在鏡頭放大倍率達 3.5 倍時，紙張上之格線即清晰可見。

經測試油壓缸行程改變對影像清晰程度影響不大，而調整鏡頭放大倍率可以達到很好的近距離觀察效果，因此可考慮以固定長度之第 4 臂取代油壓缸，以減輕重量及減少操控程序。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究開發之橋梁檢測機械手臂是以小型貨車(3.5 公噸以下，駕駛人可持小型車普通駕照)為載臺，機械手臂附載紅外線 CCD 攝影機伸入橋面下觀察，同步拍攝及傳輸影像給橋面上之檢測人員。本研究獲致之結論如下：

1. 輔助傳統由檢測人員直接於橋面下目視的方式，降低執行檢測作業之風險。
2. 藉由數位影像之即時觀察，或記錄存檔後之離線檢視，可作為橋梁檢測初步篩選之工具。
3. 檢測所得資料可上傳至「臺灣地區橋梁管理資訊系統」，完整記錄檢測作業，提供後續維修參考。
4. 經實地檢測，本研究開發之橋梁檢測機械手臂可攝得大梁腹版、橫隔梁、支承墊等橋梁構件之影像，證實本橋檢車已具相當程度之實用性。
5. 橋梁檢測機械手臂藉以 6 公尺長第 3 臂(不含平衡臂)附載紅外線攝影機，於雙向車道來回各進行 1 次，可檢測橋面寬度約 12 公尺以下的橋梁，約能滿檢測全臺灣地區 7 成左右之公路橋梁。
6. 橋檢車除可進行定點靜態檢測，也可以低速行駛執行動態檢測及錄影。
7. 不含承載機械手臂之小型貨車，橋梁檢測機械手臂各組件設備之經費需求約在 80 萬元以內，具經濟效益。

5.2 建議

橋梁檢測機械手臂之開發設計經不斷修正及測試，已累積相當經驗，針對未來之發展建議如下：

1. 機械手臂第 2 臂多節設計

本研究橋梁檢測機械手臂第 2 臂為 3 節式套管設計，每節長 1.7 公尺，各節套管自

最外層之第 1 節至最內層之第 3 節的厚度分別為 3.5 公釐、5 公釐、4 公釐，內徑則分別為 40 公釐、30 公釐、20 公釐，為因應橋面下不同檢測深度之需求，未來可尋求更適當厚度及內徑之各節套管，設計為 4 節以上套管以增加總長度，並增加各節套管間之重疊長度以強化整體結構。

2. 機械手臂第 4 臂固定長度

為更清楚檢測大梁腹版頂端及橋面版底面，本研究以增設第 4 臂油壓缸，藉由油壓缸的行程近距離觀察構件。惟經實測發現，油壓缸須有足夠長度才能完全達到上述目標，且第 2 臂也須相應增加長度，才能順利將機械手臂伸入橋面版下方。故建議改採第 4 臂固定長度設計，另補以高倍數伸縮鏡頭，以減輕機械手臂之負載。

3. 攝影機輕量化及防水性

本研究選用有 12 倍伸縮鏡頭之紅外線高速球型攝影機，單機重量僅 1 公斤，攝影功能亦符合橋檢作業需求。惟電子相關技術之發展非常快速，未來可以選用更輕巧、功能更強之攝影機，則機械手臂之設計將更具彈性。此外，為因應室外作業環境，攝影機、電腦主機、線路等電子設備應再加強其防水性。

4. 機械手臂商品化包裝

本研究初步驗證橋檢車機械手臂輔助橋檢工作之可行性，所開發之設備亦符合功能需求，橋檢車雛型已大致完成，後續可考量朝商品化角度來包裝並持續改良橋檢車。

參考文獻

- [1] 周健捷、蔣偉寧、唐治平、董必正，機械手臂技術與橋梁結構安全檢測之應用，內政部營建署，2000 年 12 月。
- [2] 曾志煌、陳茂南、巫柏蕙、馮君平、鄭銘章、黃俊仁、董基良、董必正、林志勇、宋文旭、許峻嘉，橋梁檢測機械手臂研發計畫，交通部運輸研究所，2010 年 2 月。
- [3] 曾志煌、陳茂南、巫柏蕙、董基良、鄭銘章、馮君平、林志勇、黃維信、黃臣鴻，交通設施營運維護效能提昇計畫－橋梁檢測機械手臂研發進階計畫，交通部運輸研究所，2010 年 12 月。
- [4] Hydra Platforms Manufacturing, <http://www.hydraplatform.com/home.asp>
- [5] Aspen Aerials, <http://www.aspenaerials.com/index.htm>
- [6] Moog, <http://www.moog-online.de/eingange.htm>
- [7] N. E. Bridge Contractors, Inc., <http://www.bridgeriggers.com/prod03.htm>
- [8] Facelift, Inc.,
<http://www.facelift.co.uk/piclibrary/?machine=&category=&location=&jobused=&start=81>
- [9] Serpentine Robot, http://www.ri.cmu.edu/projects/project_222.html
- [10] LCPC,
http://www.lcpc.fr/fr/presentation/organigramme/div_mi/recherche/theme/axe4.php
- [11] Aerial Platform System for Bridge Inspection,
<http://www.tfhr.gov/pubrds/winter95/p95wi26.htm>
- [12] JLN Labs, <http://jnaudin.free.fr/uav/qro/qromission1.htm>
- [13] 力有機械企業社，
<http://tw.ttnet.net/ttnet/gotoprd/MA356/020/0/944303134353334353.htm>
- [14] 惟迪電子股份有限公司，<http://www.vdicctv.com/>
- [15] 利凌企業股份有限公司，www.meritlilin.com/

- [16] R.C. Gonzalec and R. E. Woods, Digital Image Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [17] 馮文灝，近景攝影測量—物體外型與運動狀態的攝影法測定，武漢大學出版社，2002 年 2 月。
- [18] 張廣軍，機器視覺，科學出版社，2005 年 6 月。

附錄 1 期中報告審查意見表

交通部運輸研究所合作研究計畫

☒期中 ☐期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：橋梁檢測機械手臂前端感知/偵攝元件之研發進階計畫

執行單位：亞東技術學院

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
(一) 林士傑委員		
1. 第 4 臂是否有存在的必要？ 藉由第 4 臂舉升 CCD 觀測所得影像與不舉升 CCD 差異何在？	1. 第 4 臂之功能在舉升 CCD，使能伸入 2 大梁間觀察橋梁結構死角；若無第 4 臂，則 CCD 僅能貼近大梁底面而無法伸入 2 大梁間，觀察效果將因此受限。 目前一般橋梁之大梁深度介於 600~2000 公釐之間，而現行設計之第 4 臂油壓缸原長度 340 公釐，有效行程 200 公釐，最大長度 540 公釐，因此不足以完全伸入 2 大梁間。若以增加第 4 臂油壓缸長度來因應，則相對第 2 臂伸縮套筒亦必須增加相同之長度，才能將第 3 臂和第 4 臂同時下降至橋梁大梁底面以下，使之迴轉進入橋面下時不致於碰撞橋梁大梁，惟此一模式將變更機械手臂之整體設計，本研究暫不予以考慮。對第 4 臂伸入不足部份將藉由鏡頭伸縮，放大影像倍率之方式來彌補。 後續將測試現行所採用油壓缸之行程對影像觀察的影響，若影響不大，則將	同意

	建議以固定長度之第 4 臂取代油壓缸，以減輕重量及免除不必要之操控程序。	
2. 報告中提到 CCD 角度傾斜時量測長度之誤差較大，所引用之公式可行，但沒有詳細說明如何量測裂縫長度，或如何對應到裂縫長度。通常不會使用相似三角形計算，因需考慮角度；即使 CCD 未垂直觀察面仍應可計算出裂縫長度並減少誤差，許多國內學者已有此研究，請再檢視此方法。	2. 裂縫長度之量測是運用雙鏡頭立體視覺三維測量原理先求解計算縫起始點或結束點之空間座標，再據以計算裂縫起始點至裂縫結束點 2 點之間的空間距離。相關視覺三維測量原理及公式，於結案報告中將進一步完整補充說明。	同意
3. AGPS 定位是依靠基地台，但許多橋梁因位處郊區，能否有效接收基地台訊號以判別橋梁位置？	3. AGPS 之定位，是由 AGPS 接收器(手機)透過基地台無線網路連至 AGPS 伺服器來下載定位地區的星曆圖資料。AGPS 接收器藉由和伺服器之通訊而獲得定位輔助，同時因為部分原本是由接收器處理的工作被輔助定位伺服器所處理，AGPS 接收器的效率會比沒有協助定位伺服器的傳統 GPS 接收器高許多。 在某些沒有基地台或無線網路訊號微弱之地區，AGPS 之定位則可以藉由事先下載定位地區的星曆圖資料存於 AGPS 導航系統，協助接收器內的傳統 GPS 接收器執行定位功能。	同意
4. 研究團隊以影像的方式來檢測橋梁裂縫，但是否有思考過以不同的方法來檢測橋梁？橋梁檢測不一定是依賴目視檢測，國外文獻是否有提到其他相關方法？	4. 橋梁檢測之方式，有目視檢測、非破壞性檢測及破壞性檢測。目視檢測是利用目視的方式對整座橋梁做外觀上的全面性檢查，如果發現異常、缺陷或損壞的部分則須拍攝照片作為紀錄。本研究之執行重	同意

	點即是用影像處理技術檢測橋梁結構，作為第一線之檢測篩選工具，以輔助傳統的目視檢測。一般在目視檢測完成後，會針對狀況較差的構件再進行非破壞性(表面硬度法、表面強度法、超音波檢測法、成熟度檢測法等)或破壞性檢測。	
5. 建議讓使用者在監看時可選擇播放速度。	5. 遵照辦理。	同意
6. 若考量減輕重量，是否可將第 4 臂改採固定軸？而不是用油壓缸，依靠第 2 臂來調整高度。	6. 如前所述，後續將測試現行所採用之油壓缸的行程對影像觀察之影響，若影響不大，則將建議以固定長度之第 4 臂取代油壓缸，惟固定軸之長度須配合第 2 臂，第 2 臂之長度必須足夠將第 4 臂垂直下降至低於橋梁大梁底面以下，使第 4 臂伸入橋面下時不致於碰撞橋梁大梁。	同意
7. 若換成碳纖維材料，考量成本問題，請計算與原先設計成本差異，提供承辦單位價格參考。	7. 遵照辦理，碳纖維材料之第 4 臂訪價所得資訊彙整於期末報告。	同意
(二) 邱士軒委員		
1. 以機械手臂承載攝影機所拍攝之影像震動劇烈，人員觀察不易，是否能夠克服晃動問題？機構設計應考慮震動問題及其抑制方法。	1. 機械手臂承載攝影機之震動源包括其他車輛通過橋面、橋檢車引擎運轉及強陣風吹襲，這些震動源對攝影機拍攝之影像震動的影響主要是引發橋檢車之整車震動，因此要保持攝影機之穩定，除機構設計之減震外，還需對攝影機進行空間定位，並藉由機械手臂上裝置之各位置感測器之訊號監控，進行回饋控制，調整各機械手臂長度，以保持攝影機之穩定。相關之攝影機穩定控制需進一步之感測設備及	同意

	理論應用，宜另案探討。	
2. 是否考慮用電腦來進行控制？以運動學理論為基礎，即可以用電腦來驅動 4 個可以作動的軸，藉此控制雙眼 CCD 的位置，若有絕對座標系的話，即可以做前端 CCD 位置與姿勢的控制，對使用者來說較方便。一般機械手臂或工業用機械手臂都是以以此方法做控制。	2. 前端 CCD 位置與姿勢的控制，於每一自由度均需相對之位置感測器、伺服閥、伺服卡及 DAQ 卡，建置成本將相對增加。此外，由於橋檢作業環境不同於實驗室或工廠，嚴苛之作業環境易讓感測器及定位控制設備在操作過程中受損，且相關設備之故障排除非現場作業人員所能處理，必須後送維修，見諸國外所有之橋檢車，均無以電腦控制機械手臂之車型，因此不建議計畫之橋檢車進行前端 CCD 位置與姿勢的控制研發。	同意
3. 就辨識系統計算 2 點之間的距離部份，無論觀測面傾斜或垂直於攝影機，雙眼系統應可針對某 1 點先計算出其座標，再計算出另 1 點座標，2 個點距離即可用畢氏定理計算出，較之單 CCD 系統必須垂直於觀察面來計算長度，雙眼系統有較大彈性；此外，由人員辨識裂縫較累，是否可發展自動辨識與搜尋，以達省時省力。	3. 空間中 2 點間距離之計算是應用雙眼系統之視覺三維測量原理及公式，其基本原理即是先求解計算縫起始點或結束點之空間座標，再據以計算裂縫起始點至裂縫結束點 2 點之間的空間距離。橋檢車仍將採用雙眼系統執行橋梁裂縫尺寸、計算，相關原理及公式於結案報告中將進一步完整補充說明。 橋梁裂縫檢測可利用影像二質化處理來快速篩檢辨識裂縫，97 年計畫執行時已將此功能納入。	同意
(三) 鄧文廣委員		
1. 此計畫研究目的在於評估確認橋梁檢測機械手臂之可行性，以橋梁檢測實務來看，檢測自動辨識目前仍存在許多困難，但也是未來值得努力的一個目標，而由第 1 年至現今第 3 年計畫執行，機械手臂由 3 臂擴充至 4 臂及雙眼 CCD，已是很大的進	1. 敬悉。	同意

步，未來可持續研究改進。		
2. 去年計畫成果之檢測範圍可達 6 公尺，而今年度橋梁檢測寬度卻由 6 公尺減為 4.5 公尺，以研究一貫性而言，建議仍以 6 公尺為基礎，以現有的設備與方向做改進發展；裝置雙眼 CCD 會增加重量，可考量及評估使用碳纖維材質的桁架以減輕重量。	2. 期中階段之橋梁實測以 4.5 公尺範圍進行，實測效果良好。期末橋梁實測將以 6 公尺檢測範圍為目標，同時以強化第 3 臂結構、計算裂縫空間距離、增加 AGPS 定位功能為後續主要工作項目。	同意
3. 報告中第 38 頁，公式計算出的結果誤差達到 30%，請檢核公式或參考其他公式。	3. 計算物距時，須分別於 2CCD 影像畫面上點選空間中之同一物體點，而誤差之產生即是畫面之解析度不夠所致，因此調整增加放大倍率即能增加點選物件的解析度並降低誤差。	同意
4. 第 4 臂之機構伸長及雙 CCD 之旋轉方式，及其所能檢測之橋面版或梁腹版範圍，應解釋或交代清楚；而什麼情況下僅能觀測裂縫，又什麼情況下可以進一步計算裂縫長度，也必需說明清楚。	4. 遵照辦理，相關 CCD 之檢測範圍及裂縫長度計算應用條件將補充說明於期末報告中。	同意
5. 是否可以考慮在第 4 臂處增加一旋轉自由度，可以加大能計算裂縫長度之檢測範圍。	5. 第 4 臂處加裝一伺服馬達、步進馬達或油壓旋轉缸皆可以增加一旋轉自由度，惟設計上必須強化第 4 臂之結構強度及增加配重塊重量以保持第 4 臂之平衡，如此將增加第 1 臂之吊重負荷。為安全考慮，對應此一設計改變，橋檢車之承載車輛及第 1 臂應重新選用較高規格者，上述改款之必要性可在未來研究中再進一步評估。	同意
6. 報告中未計算機械手臂結構的穩定度，建議補充計算。	6. 遵照辦理，相關機械手臂的穩定度(平衡安全性)補充說明於期末報告中。	同意
7. 後續研究若仍採用第 4 臂，則油壓缸的設計高度需做適	7. 第 4 臂若伸入 2 公尺大梁梁深的 1/2 時，其結構長	同意

<p>當的估算。目前大部份之橋梁梁深約 2 公尺左右，第 4 臂應深入 50、60 或 70 公分...何者較適當，或深入 2 公尺梁深的 1/4 或 1/2 較好，這牽涉到解析度，建議進一步評估。</p>	<p>度即需達 1 公尺，而第 2 臂則亦必須配合相對增加 1 公尺長度，才能在操控第 2 臂延伸向橋下降時，將垂直之第 4 臂完全下降至低於大梁底面以下，確保第 4 臂迴轉進入橋面下時不至碰撞大梁。</p> <p>目前之第 4 臂設計規格可將攝影機伸入 2 公尺大梁梁深的 1/4，能滿足基本需求，而未來可配合較高規格之承載車輛及第 1 臂進一步修正，變更第 4 臂之設計。</p>	
<p>(四) 公路總局</p>		
<p>1. 研究團隊之報告在檢測位置定位部分，以 AGPS 目前只能做到定位檢測車的位置，但在實際檢測時還須記錄受損結構的編號與位置座標，建議研究團隊後續需做到此部分。</p>	<p>1. AGPS 定位精度較之傳統 GPS 定位為佳，但仍有 1~2 公尺誤差範圍，此範圍已涵蓋檢測車本身及橋梁受損結構之位置，因此目前規劃是在以檢測車自動 AGPS 定位之基礎上，以人工作業方式進一步記錄受損結構的編號。未來衛星定位之技術進一步發展而提高精度之後，即能直接定位橋梁受損結構之位置。</p>	<p>同意</p>
<p>七、主席結論：</p>		
<p>1. 本計畫為一研究發展案，希望儘可能評估所有解決問題之可能性組合；而橋梁檢測機械手臂的檢測範圍希望還是以 97 年度研究成果—6 公尺為基礎，不宜縮短，以免影響未來之實用性。</p>	<p>1. 期末橋梁實測將以 6 公尺檢測範圍為目標，並在後續工作中整理評估其他方案之可行性和技術待突破處。</p>	<p>同意</p>
<p>2. 研究過程中應多方嘗試各種設計組合，倘評估或測試後確認窒礙難行，亦應將其結構或成本上的困難處予以記錄，以供參考。</p>	<p>2. 遵照辦理，研發紀錄將彙整並補充說明於期末報告中。</p>	<p>同意</p>
<p>3. 請研究單位針對各委員所提之建議事項做回應與修正，</p>	<p>3. 遵照辦理。</p>	<p>同意</p>

並列入期末報告中。		
4. 本期中報告審查通過。	4. 敬悉。	同意
八、散會		

附錄 2 期末報告審查意見表

交通部運輸研究所合作研究計畫

☐期中 ☒期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：橋梁檢測機械手臂前端感知/偵攝元件之研發進階計畫

執行單位：亞東技術學院

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
(一) 公路總局		
1. 機械手臂的研發對於檢測過去無法直接目視檢測的橋梁應有很大的幫助，在此表示肯定。	1. 敬悉。	同意
2. 建議拍攝動態影像時，應將拍攝情形與現場構件加以對照，如此可更清楚知道拍攝位置與構件的真實情況與相對位置，對檢測人員會有更大的助益。	2. 遵照辦理。動態檢測所拍攝之現場橋跨、大梁等構件編號增補於結案報告中，以便於相互對照及判讀。	同意
3. 檢測車後方可否加設警示牌或 LED 燈？以增進檢測作業之安全性。	3. 檢測車在商品化時可於駕駛座上方車頂加裝大型 LED 警示牌，以加強檢測作業之安全性。	同意
(二) 高速公路局		
1. 本設備檢測 1 跨（30 公尺）需時多久？	1. 依橋檢車實測結果顯示，動態檢測一跨需時約 2 分鐘可完成 2 大梁間大梁腹版及其間橫隔梁的錄影檢測。	同意
2. 有些構件受損時會有異常的聲音，未來是否可以增加收音的設備，以加速檢測人員尋找受損部位的時間？	2. 橋檢車可以機械手臂附載攝影機檢測橋梁構件，也可以加裝聲音收錄之設備及判讀聲音來源，以協助檢測人員尋找受損構件。	同意
(三) 陳松堂委員		
1. 本計畫對工程處來講是一大福音，相對於過去幾年的研究，今年進步最多，包括攝影機的夜視功能、死角的處	1. 敬悉。	同意

<p>理都納入研究範圍，此外增加第 4 臂又可以檢測到梁與梁間的狀況，在此給予肯定。</p>		
<p>2. 橋下攝影都是假設以正向攝影來分析長、深度，斜角部分的誤差經研究團隊測試，誤差大約在 10% 以內的範圍，故以實用性而言，誤差已在可容許的範圍，但在理論推導的部分是否也能將傾角加入計算，以減少誤差率；報告中是以調整攝影機鏡頭的方式來評估誤差，至於攝影機與拍攝面間的距離是否也會影響誤差的大小，請研究團隊說明。</p>	<p>2. 裂縫長度計算之原理是先求解裂縫起始點及結束點之空間座標，再據以計算 2 點之間的空間距離，因此正向攝影及傾斜攝影都可應用此計算原理。其所產生之誤差主要是因點選的像素精度所造成，可以藉由重覆測量求取平均值之方式減少人為誤差；此外，攝影機鏡頭倍率愈高，或攝影機愈接近檢測面，其誤差亦愈小。攝影機與拍攝面間距離對誤差之影響，將增補於結案報告中之 3.1 節。</p>	<p>同意</p>
<p>3. 報告中影像以黑白方式呈現，閱讀者看不清楚，建議在定稿時改以彩色或其他方式（如：選晴天重拍）使影像能更清楚。</p>	<p>3. 當檢測環境光線不足時，攝影機即自動啟動紅外線，此時所得之影像即為黑白。雨天所拍攝之影像較為模糊，倘時間允許，將於晴天時重拍一次，並將拍攝結果增補於結案報告中。</p>	<p>同意</p>
<p>4. 報告中機械手臂都是以第 1 臂與第 3 臂平行的狀態進行穩定分析，但此一狀態並非外力最大的情況，應以第 3 臂平行車行方向時的狀態進行穩定分析，若目前是以夾 20° 的方式，分析時就應該以夾 20° 的狀態計算，此外以這樣的設計與操作模式，未來操作手冊中也應該說明此一操作角度，避免將來實際操作時，超過機械手臂的穩定範圍。</p>	<p>4. 當第 3 臂與第 1 臂相互垂直時，第 3 臂之自重及附載重量對橋檢車所形成的傾覆力矩之力臂長度均相同，因而第 3 臂之自重及附載重量可以合併計算，所得傾覆安全係數為 1.80，相關分析計算列於結案報告中之 3.4 節。</p>	<p>同意</p>
<p>5. 橋梁檢測位置的定位，在實務上並未要求其所在位置的絕對座標，故目前計畫中以</p>	<p>5. 敬悉。相對座標定位方式增補於結案報告中之 3.3 節。</p>	<p>同意</p>

A-GPS 輔助定位之需求性較低，建議考量提供精度較高的相對座標（例如距離橋台多遠）給使用者較有意義。		
6. 機械手臂操作的流程（SOP）請在報告中補充。	6. 遵照辦理。	同意
7. 軟硬體設備之移交請按契約規定辦理。	7. 遵照辦理。	同意
8. 報告中提及機械手臂不含車輛所需費用約為 80 萬元，按計畫中機械手臂的操作方式已較目前使用的橋檢車輕巧，實用性亦高，建議將來可以發展為一整體的原型檢測車，提供給工程單位使用。	8. 橋檢車目前已將第 3 臂設計為折疊式，因此可順利置放於貨車後車廂中，未來可進一步將第 2 臂變更設計為 4 節套管式，以縮短收合時的長度，進而降低其直立於後車廂的高度，使第 2 臂與第 3 臂收合時不必拆卸分裝。	同意
(四)鄧文廣委員		
1. 本計畫研究過程紮實，報告內容尚稱完整，在此給予肯定。	1. 敬悉。	同意
2. 機械手臂的功能僅在輔助原本的橋梁目視檢測工作，屬於前置作業的性質，不論是定位或是缺損狀態的觀測，一旦發現缺損，檢測人員還是必須實際接近缺損位置量測評估，不能直接就機械手臂上攝影機所見逕為決策，此一輔助特性應在報告中加強闡述，避免造成機械手臂取代傳統檢測車之誤解。	2. 遵照辦理。橋梁檢測車之輔助功能陳述增補於結案報告中之 1.2 節。	同意
3. 報告第 1 章中關於國內橋梁狀況的統計數據都是 97 年的數據，建議應予更新。	3. 遵照辦理。	同意
4. 報告第 38、41 頁關於相似三角形的說明仍有不足，造成讀者懷疑是否是因相似三角形的比對有誤而造成後續計算的誤差，建議再予調整。	4. 裂縫計算公式在不同文獻中之符號表示略有不同，但基本公式則完全相同，且經驗證正確無誤。第 41 頁 2 攝影機投影中心連線距離 B 與第 38 頁的 B 均代表 2 攝影機透鏡中心間之距離，其餘公式中不同符號之對照說明	同意

	將增補於結案報告中。	
5. 有關鏡頭放大倍率的調整比對部分，同一放大倍率下何以會有不同的誤差值？建議可以一定的放大倍率，觀測不同長度物體，求取每 1 種倍率的誤差值；第 46 頁攝影機傾角變化的測試比對亦應以相同傾角，多次量測的方式，求取每 1 種傾角的誤差值，最後結果即可供使用者在調整倍率及傾角時之參考。	5. 相同倍率下，長度計算值不同是因為不同量測所得，多次重覆量測後可進一步求其平均值。最佳拍攝倍率之建議值，是基於在固定鏡頭放大倍率下，分別以不同長度線段為目標物量測後予以評估，建議值及評估說明增補於結案報告中之 3.1 節。	同意
6. 第 4 臂的行程只有 20 公分，對 2 公尺深的梁而言，以目前計畫的理論基礎，將來在檢測時可能有部分區域的裂縫計算會產生極大的誤差，建議要在報告中將機械手臂的使用限制專章說明清楚。	6. 攝影機之拍攝角度可從水平 0°至垂直 90°，進一步的拍攝角度說明及拍攝裂縫的使用限制另列專章增補於結案報告中。	同意
7. A-GPS 輔助的定位是檢測車位置定位，而不是橋梁構件位置的定位，這一部份要寫清楚。	7. 遵照辦理。	同意
8. 65 頁負載力矩計算裡的力臂與附圖所示不相符，請再加以檢核。	8. 遵照辦理。負載力矩計算之力臂長度標示修正於結案報告中。	同意
9. 69 頁，第 3 臂與車行方向平行時的力矩應該最大，此時的安全係數應該最小，但是報告中反而是第 3 臂與第 1 臂平行時的安全係數最小，請再加以檢核。	9. 傾覆力矩計算時考慮配重塊的影響，因而造成第 3 臂與第 1 臂相互平行時之傾覆力矩大於 2 機械臂垂直時之傾覆力矩。	同意
10. 本研究所開發的設備對橋梁檢測作業甚有幫助，但是設備使用上的限制（如：移動速度）、計算裂縫長度時的擷取方式等等建議一定要敘述清楚，如此設備的實用性將大幅提昇。	10. 遵照辦理。設備使用限制之說明另列專章增補於結案報告中。	同意
(五)邱士軒委員		
1. 36 頁圖 3.3 雙眼視部份，因為 2 個攝影機為個別操作，所以要讓 2 個攝影機的座標	1. 裂縫長度之量測是運用雙鏡頭立體視覺三維測量原理，該原理已廣泛應	同意

系完全平行是不可能的，故以目前雙眼立體視的公式計算也不會有很高的精度，若要有很高的精度，則 2 個攝影機必須先校正平行後固定，另將底座做成可以旋轉的方位角及仰角平台，則檢測的精準度就會比較高。目前的設計方式會使得理論與實際不相符合。	用於機器人視覺系統，用以輔助機器人的自我定位及動態物件抓取等機器人動作。而當運用雙鏡頭操作時，攝影機固定校正是首先需進行的工作，所以要提升裂縫長度之精準度，後續之改善設計即應思考攝影機之固定和校正工作。	
2. 若使用 1 個攝影機，只要可以有參考的物體當作比例尺，應該也可以進行裂縫長度的估算，也比較容易操控。	2. 攝影機使用 1 台可以做裂縫長度估算，但必需有參考比例尺。打雷射點方式可以標示出比例尺，但打雷射點之方式需使用兩支雷射光筆，而現階段採用的攝影機為商品化之成品，攝影機鏡頭無法與雷射光筆同步旋轉及俯仰，未來若採用僅 1 台攝影機之觀察方式，可考慮重新設計機構整合攝影機鏡頭與雷射光筆，以達到同步動作之需求。	同意
3. 以目前的計畫成果顯示，計畫似未達成「強化檢測影像品質」的目標。	3. 強化檢測影像品質是強調影像品質在動態檢測、光照不足環境下滿足對裂縫長度計算之需求及精度之提昇。目前實地橋梁檢測結果顯示，初步目標已達成，後續應找出最佳之檢測環境條件，以達到最好的檢測品質。	同意
4. 檢測裂縫長度似乎都是在實驗室的理想狀態下測試實驗，是否有在實際橋梁上進行測試，估算比對其裂縫長度？	4. 由於實地檢測時均未發現裂縫存在，因此在實地檢測過程中均未做過實際裂縫長度估算，而以實驗室內及戶外河堤環境之各種條件替代測試。	同意
(六)林士傑委員		
1. 高速公路局同仁所提偵測聲音源之設備目前已經有，建議可以上網搜尋。	1. 敬悉。	同意
2. 本研究已執行 3 年，應該可	2. 遵照辦理。未來嘗試安排	同意

以進入實際操練的階段，與會人員未必瞭解檢測人員真正的需求為何，故建議可以將目前設備交給橋梁檢測人員實地操作，回饋其使用意見，作為後續研究改進的方向，使計畫所開發的設備將來能夠真正落實應用。	橋檢人員實際參與實測，相關回饋意見增補於結案報告中。	
3. 要定絕對座標位置困難度很高，費用可能也很高，使用相對位置應該會簡單很多。	3. 目前以 A-GPS 定位之橋檢車，其準度實測之誤差範圍在 1 公尺左右，此精度已能為橋檢人員接受。相對精度上可採用以橋臺為基準點，再以雷射測距儀或里程計輔助量測，即可以得到極佳之相對精度。	同意
4. 量測誤差的影響因素很多，除了點錯像素之外，放大倍率及物件距離等都會造成影響，建議可以試著去計算不同倍率及深度下，1 個像素的誤差量大小為何。	4. 1 個像素所對應的實際空間長度依鏡頭放大倍率及物距而異，各不同條件下之誤差量詳細列表增補於結案報告中之第 3.1 節。	同意
5. 影像在紅外線開啟時轉為黑白的部分，未來可參考橋梁檢測人員意見，考量加載 LED 光源，讓影像可以變成彩色的。	5. 敬悉。	同意
6. 根據其他委員所述，本設備尋找橋梁構件缺損有無之功能，可能比計算裂縫尺寸等重要，故按邱委員所提，以單一攝影機加載雷射的方式或許也可行，建議再多參酌橋梁檢測人員的意見。	6. 敬悉。以橋檢實務而言，在量測出裂縫長度、寬度之後，仍需由結構工程人員再次確認並研定施工工法，此即為橋檢車之輔助功能的定位，而藉由影像處理的快速篩檢，以降低橋檢作業的負荷。	同意
7. 改採碳纖維材質所需費用報告中已經提出，惟在強度分析上並未見相關計算，建議再加以補充。	7. 碳纖維管之強度分析增補於結案報告中之 3.2 節。	同意
8. 本設備使用規範的內容應邀請橋梁檢測人員參與，俾真正掌握其需求，讓計畫成果更務實。	8. 遵照辦理。未來嘗試安排橋檢人員實際參與實測，蒐集回饋意見修正使用規範。	同意

七、主席結論：		
1. 有關是否改以單一攝影機進行目視檢測，以簡化設備及操作，請研究單位納入報告建議中。	1. 遵照辦理，以單一攝影機進行目視檢測之評估相關內容增補於結案報告中。	同意
2. 感謝研究單位的配合，本研究已見初步成果，亦獲得委員的肯定，也感謝各位委員及高公局、公路總局同仁協助檢視本計畫。	2. 敬悉。	同意
3. 各委員及出席單位所提議意見請研究單位列表並逐一回應，契約範圍內及本審查會中之承諾事項，請研究單位務必落實；非契約範圍內之建議事項則請參考或寫入報告之建議事項中。	3. 遵照辦理。	同意
4. 本研究期末報告審查通過，請研究單位於 12 月 18 日前將修正後之期末報告定稿送交本所。	4. 遵照辦理。	同意
八、散會		

附錄 3 期末簡報



橋梁檢測機械手臂前端感知/偵攝 元件之研發進階計畫

期末簡報

亞東技術學院
機械工程系 馮君平



簡報大綱

- 一、緒論
- 二、橋梁檢測設備回顧
- 三、橋梁檢測機械手臂改善設計
- 四、橋梁檢測機械手臂實測
- 五、結論與建議

研究背景與動機



- 依據「臺灣地區橋梁管理系統」至98年12月的統計資料，臺灣地區共有大小橋梁**25,485座**(不含鐵路橋梁)，橋梁**平均橋齡為19.7年**，而橋梁橋齡在40年以上之數量則達760座。
- 橋梁結構經年受地震及湍急河流的泥砂衝擊，加以橋梁已進入老化期，**檢測及維修工作之落實**，能及早發現橋梁受損，並予以預警或修復，以降低生命的傷亡及延長橋梁壽命。



- **橋梁維修必須依橋梁檢測之結果**決定維修方式，但執行檢測工作相當耗費人力及時間，目前現有之橋梁檢測車**數量少、操作費時**，難滿足現階段之**龐大檢測工作量**，而將檢測人員運送至橋梁下執行目測工作也存在有**較高之安全風險**。
- 因此，當前橋梁檢測之重要課題在發展一兼顧效率、經濟、安全之**小型橋梁檢測車**，作為初步之橋梁**檢測篩選工具**，或以大、小型橋檢車分別針對大、小型橋梁執行檢測之搭配方式，以**提高整體檢測效率**。

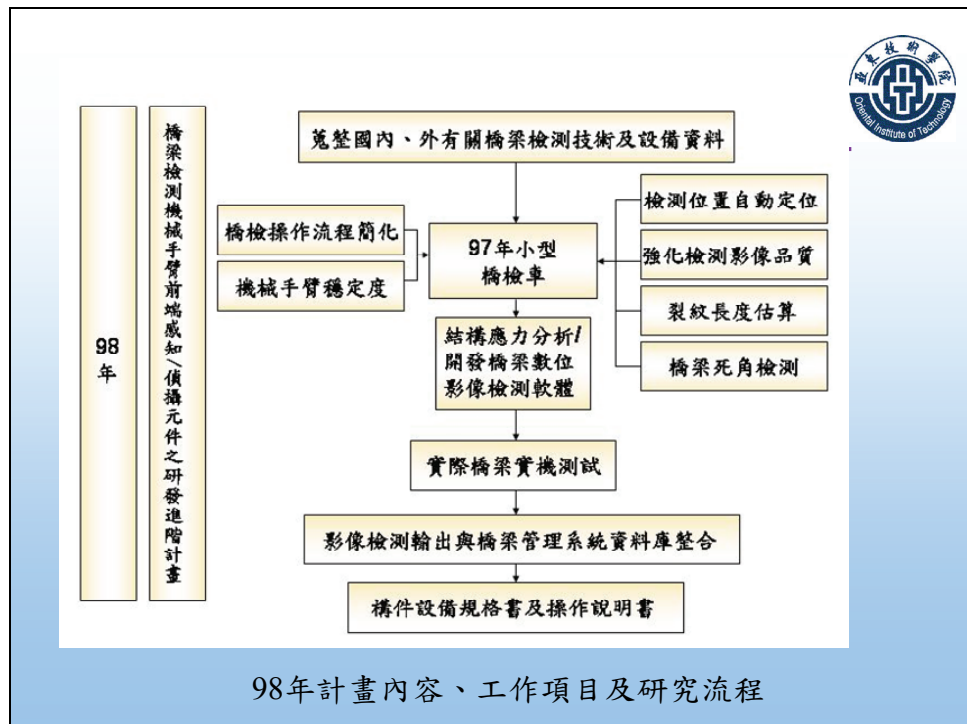



- **營建署**在**89年**發展一裝載機械手臂之橋梁檢測車，並初步測試檢測功能，但機構龐大、結構過重，在**使用上並不方便**。
- **運研所**於**96年**開發以**小型箱型車**為載臺的橋梁檢測車。初步克服機械手臂機構之收納性，且檢測影像品質良好，但其**操作性及檢測範圍**仍有改善空間。
- **運研所****97年**再開發以**小型貨車**為載臺，三臂式機械手臂附載紅外線攝影機，並實地於**翡翠水庫一號橋、澎湖跨海大橋**，及**塔寮坑溪**堤岸邊進行數次驗證測試，已初步**證實機械手臂執行檢測作業之可行**。

研究內容與工作項目



- 96~97年開發之橋梁檢測車著重在**承載車輛改裝設計、機械手臂設計分析及改進、攝影檢測品質清晰穩定**。
- 98年度將延續去年度之成果，賡續進行**檢測流程簡化**，增加**機械手臂操作穩定**，並進一步就**檢測位置自動定位、強化檢測影像品質、裂縫長度估算、檢測死角**（如大梁腹版、支承墊）等項目進行開發，俾使橋梁檢測機械手臂更具實用價值。

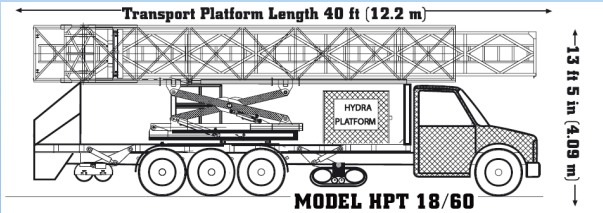




 中央技術學院
 Central Institute of Technology

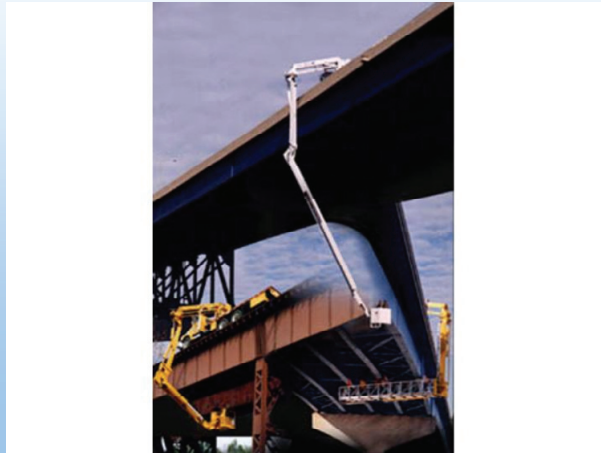
橋梁檢測設備回顧

- 國外相關橋梁檢測設備
 - 大型橋梁檢測設備，由多節臂桿組成以承載檢測人員。

Hydra Platforms Manufacturing

Aspen Aerials



Moog



N. E. Bridge Contractors, Inc.



Facelift, Inc.



- 小型橋梁檢測設備，以攝影機來取代人員之直接目測。

Serpentine Robot

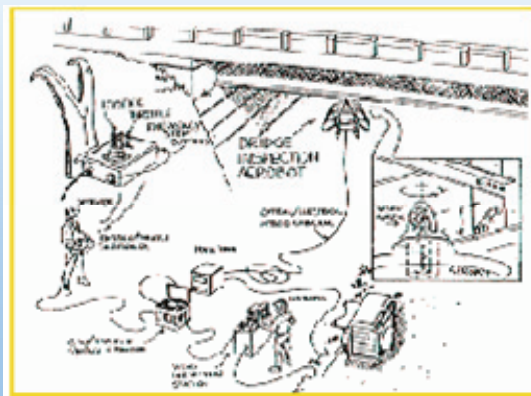




Laboratoire Central des Ponts et Chaussées , LCPC



California Department of Transportation (Caltrans), USA



JLN Labs

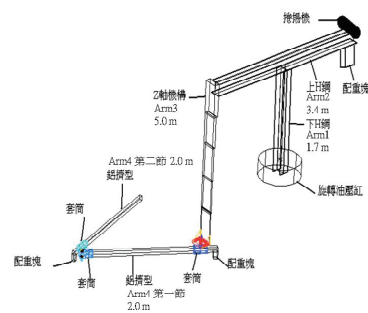


橋梁檢測設備回顧

- 國內目前使用之橋梁檢測車



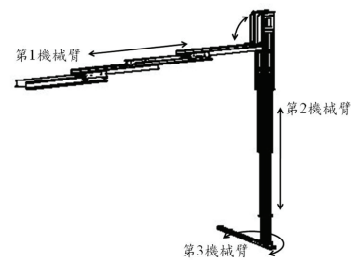
- 營建署在89年首先進行橋檢車開發，以油壓及馬達為驅動之機械手臂配合數位攝影機及影像處理的技術，簡化及加速傳統目視檢測工作之進行。

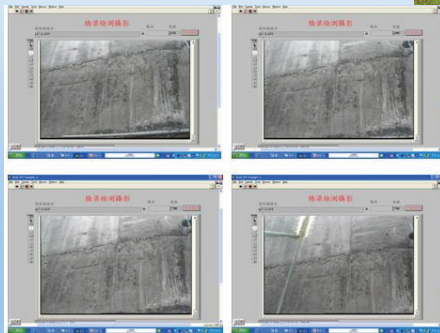




- 大於3.5噸之貨車，駕駛人必須具備大貨車駕駛執照。
- 機械手臂部份淨重近約1公噸，機構龐大，操作上仍存在部份困難。
- 攝影機不具夜視功能，光線不足的作業場所中所拍攝之檢測品質仍有疑慮。
- 因前述諸多待克服之問題，計畫構想未能完全落實及推展。

- 橋檢車之**需求存在**，特別是臺灣地區橋梁多屬小型橋梁。
- 交通部運研所再推動以機械手臂附加CCD攝影機執行橋梁檢測的研發計畫。針對承載機械手臂之**貨車型式**、機械手臂**機構操控及收納**、攝影機在**光線不足環境**下作業等問題進行改善。
- 運研所於**96年**開發以**小型箱型車**為載臺的橋梁檢測車，初步克服機械手臂**機構之收納**性，且檢測**影像品質**良好。





- 運研所96年計畫成果之**操作性及檢測範圍**仍有改善空間。
- **運研所97年**另再開發以**小型貨車**為載臺，三臂式機械手臂附載紅外線攝影機。



- 橋檢車實地於**翡翠水庫一號橋**、**澎湖跨海大橋**進行驗證測試，初步**確認機械手臂執行檢測作業之可行**。



橋梁檢測機械手臂改善設計

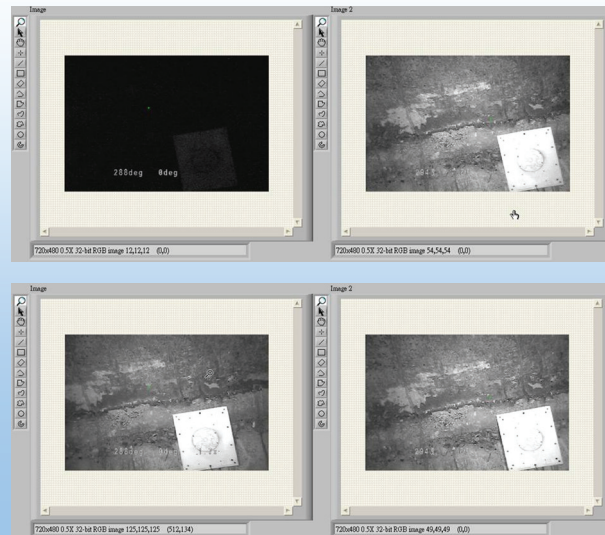


- 基於97年度之橋檢車開發計畫成果，98年度研究重點就橋梁檢測之**影像清晰度**、**裂縫長度計算**、**橋梁結構死角檢測**、**檢測位置定位**等進行設計改善及實測，提高橋檢車開發之**實用性**。

梁檢測影像品質及裂縫長度計算

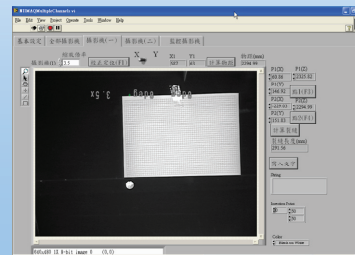
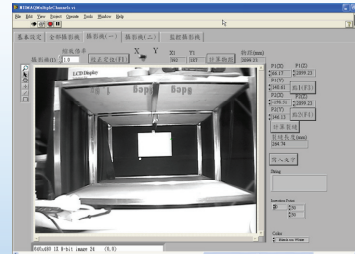


- 考慮實用價值時，必須滿足
 1. **機械手臂運動或橋檢車前行**時，CCD擷取之影像清晰可辨識；
 2. **橋下光線不足環境**中作業時，CCD擷取之影像亦必須清晰；
 3. 當影像經判讀有**裂縫存在**時，要能初步估算裂縫長度。
- 動態環境下CCD之影像品質檢視在96~97年計畫中執行；在實驗室中控制不同亮度環境檢測CCD影像在97年計畫中執行。
- 98年度就夜間之室外環境下檢測CCD影像，並在現階段開發之橋梁檢測影像處理軟體下發展裂縫估算之功能。

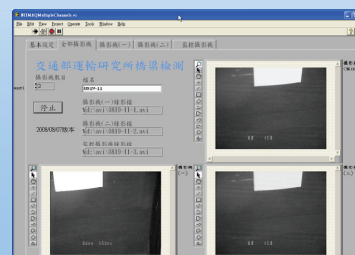
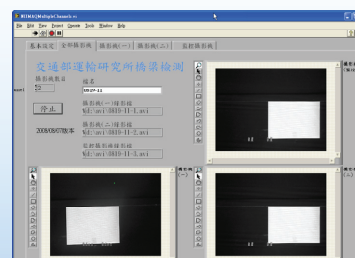


- 目標點之空間座標推導及裂縫長度計算
 1. R.C. Gonzalec and R. E. Woods, Digital Image Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.
 2. 馮文灝, "近景攝影測量—物體外型與運動狀態的攝影法測定", 武漢大學出版社, 2002年2月。
 3. 張廣軍, "機器視覺", 科學出版社, 2005年6月。
- 裂縫長度之計算是應用視覺三維測量原理及公式, 先求解計算裂縫起始點及結束點之空間座標, 再以畢氏定理計算裂縫起始點至裂縫結束點2點之間的空間距離。

鏡頭放大 倍率	長度計算值 (mm)	實際長度 (mm)	長度計算值/ 實際長度
1.0	264.74	297	0.891
1.5	275.23	297	0.927
2.0	285.29	297	0.961
	291.60	297	0.981
2.5	286.34	297	0.964
3.0	289.88	297	0.976
	294.24	297	0.991
3.5	291.56	297	0.982



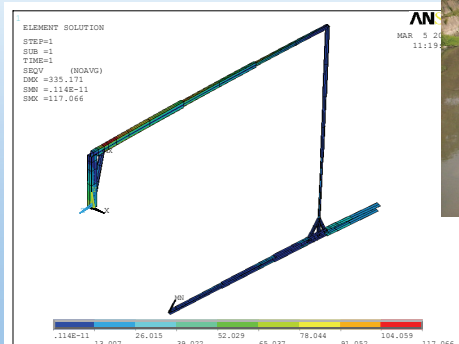
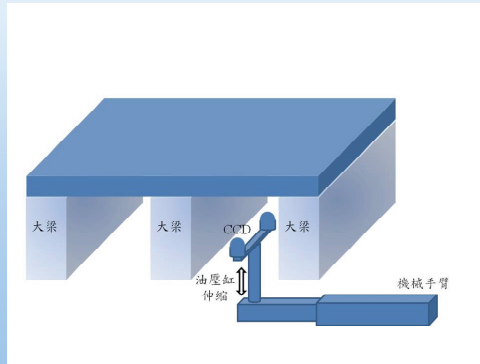
傾斜角度	實際長度 (mm)	計算長度 (mm)	計算與實際長度 比值
0	297	293.62	0.989
5	297	292.33	0.984
10	297	310.79	1.046
15	297	298.04	1.004
20	297	290.40	0.978
25	297	284.40	0.958
30	297	301.54	1.015
35	297	281.22	0.947
40	297	292.20	0.984
45	297	278.20	0.939



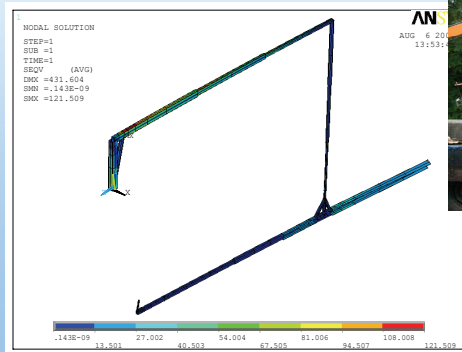
橋梁結構死角檢測



- 新增第4臂之油壓缸，垂直於橋面版且將攝影機舉升，更貼近大梁腹版以觀察橋梁結構各死角。



第1階段之機械手臂測試



第2階段之機械手臂測試



折疊式第3臂設計

-

- 

-

A-GPS訊號定位之相對誤差

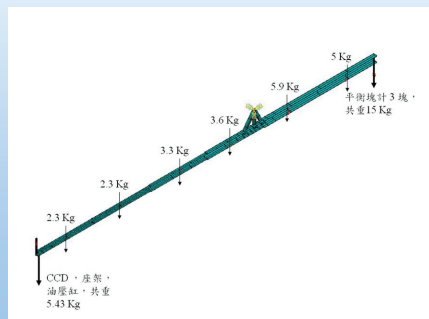
A-GPS經緯度 (經度, 緯度)	位置座標 (X, Y)	與平均位置 點相對距離 (m)
(25.022297, 121.890500)	(339873.19, 2768542.67)	0.406
(25.022298, 121.890500)	(339873.19, 2768542.78)	0.381
(25.022298, 121.890502)	(339873.39, 2768542.78)	0.183
(25.022298, 121.890503)	(339873.49, 2768542.78)	0.087
(25.022298, 121.890505)	(339873.69, 2768542.78)	0.124
(25.022298, 121.890507)	(339873.89, 2768542.78)	0.322
(25.022298, 121.890508)	(339873.99, 2768542.78)	0.421
(25.022298, 121.890505)	(339873.69, 2768542.78)	0.124
(25.022300, 121.890505)	(339873.69, 2768543.00)	0.222
(25.022300, 121.890503)	(339873.49, 2768543.00)	0.203



- GPS訊號所計算之相對定位精度之誤差半徑約從3~15公尺。

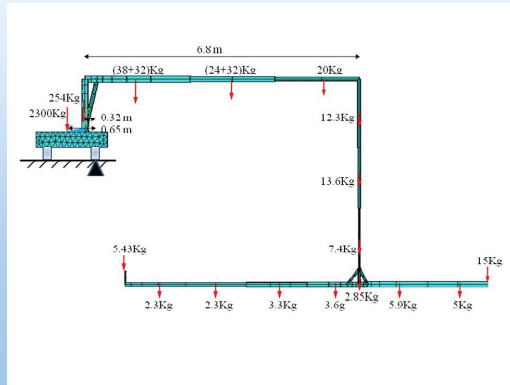
機械手臂機構平衡

- 平衡力矩之設計方式
 - 拉繩拉力作用於攝影機端
 - 平衡臂及配重塊



負載力矩與平衡力矩兩者計算之比約 1:1.15

- 「移動式起重機安全檢查構造標準」規範前方安定度之安全係數應大於1.15。



傾覆安全係數 1.78

機械手臂操作流程

- 橋檢車機械手臂之設計方式在於將所有油壓控制集中於第1臂。
- 配合機械手臂之設計，律定操作流程—
 1. 組裝
 2. 第1臂上仰，迴旋
 3. 放第2臂
 4. 第1臂再迴旋

橋檢機械手臂設備規格



橋檢車整車及設備組件	性能及規格	報價
檢測項目	橋面下大梁及結構死角之牆面裂縫	
檢測橋面寬度	12公尺以內	
作業環境	4級風以下，無雨	
承載車輛	總重3500Kg以下，載重1000Kg小型貨車	80萬
第1臂油壓吊桿	最大伸長，水平最大吊重125Kg	30萬
第2臂套管	最大伸長	10萬
第3臂鋁合金管及配重塊	變截面積設計，板厚2~m，總長9m	6萬
(第3臂24T碳纖維管	均一截面積設計，24T碳纖維彈性模數	
	24Ton/mm2，密度1.8g/cm3	20萬)
第4臂油壓管及組件	有效行程m，最大長度m	4萬
攝影機、影像擷取卡及線路	12倍光學鏡頭，360°水平及90°垂直旋轉， 重量，紅外線投射距離	12萬
控制電腦及機櫃(含A-GPS、不 斷電系統、蓄電池)	CPU P4，DDR333 512MB	10萬

橋梁檢測機械手臂實測



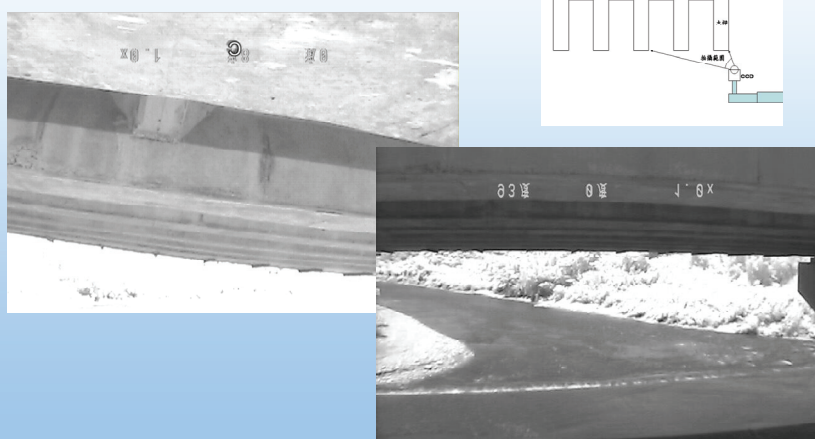
- 第1階段實測
 - 確認機械手臂操作流程
 - 確認第4臂之需求及測試攝影機伸入至2大梁間



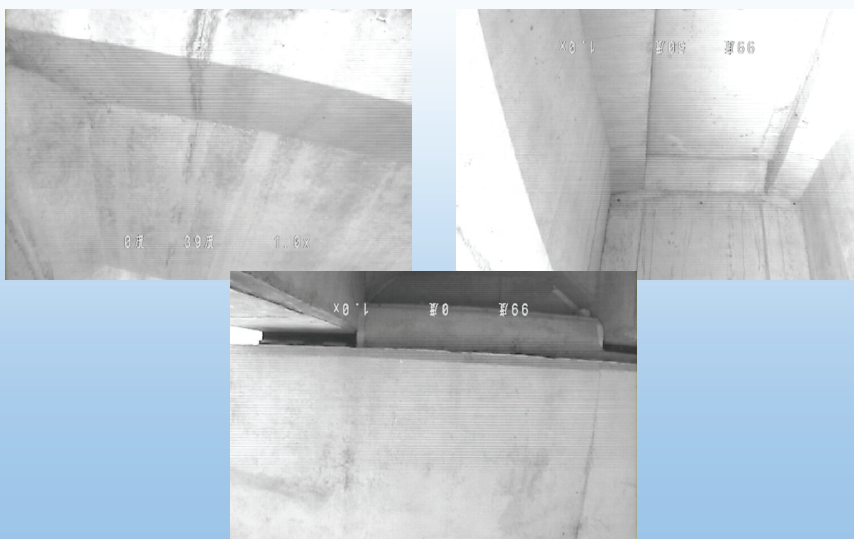
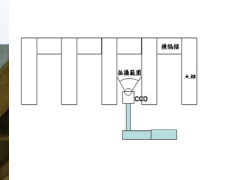
• 確認機械手臂操作流程



• 確認第4臂之需求



- 測試攝影機伸入至2大梁間



- 第2階段實測

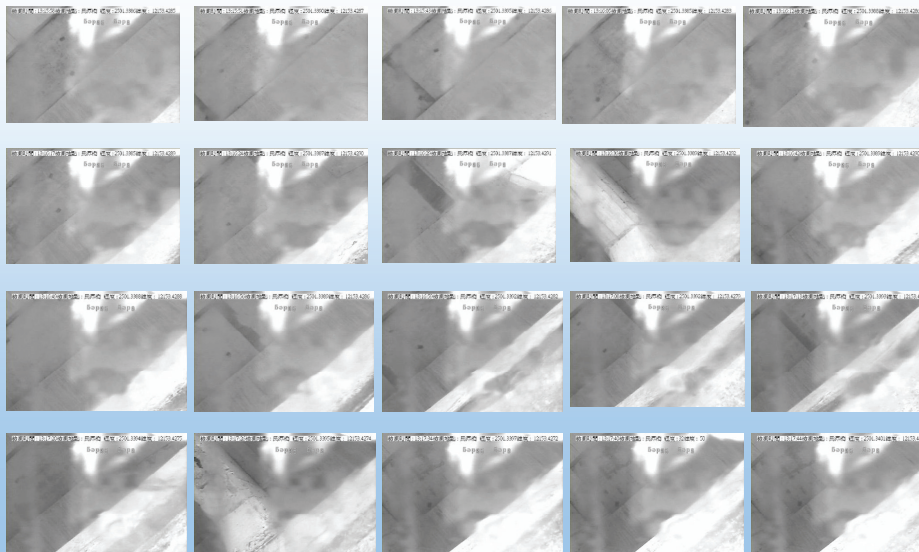
- 測試第3臂加長後之操作流程
- 測試橋檢車行進時動態影像品質
- 第4臂油壓缸伸縮之檢測影像



- 測試第3臂加長後之操作流程



- 測試橋檢車行進時動態影像品質



- 第4臂油壓缸伸縮之檢測影像

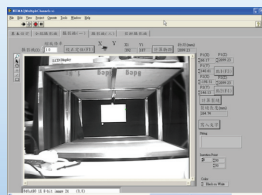
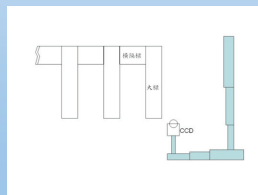
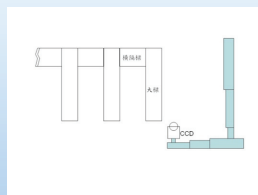


油壓缸縮

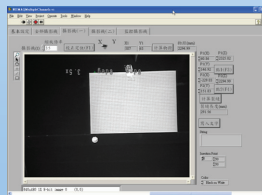


油壓缸伸

- 經測試，目前採用之油壓缸行程對影像觀察之差異性不大，僅調整鏡頭放大倍率也可以達到很好的近距離觀察效果。



(1.0倍倍率)



(3.5倍倍率)

結論與建議



- 結論

1. 輔助由檢測人員深入橋面下執行目測的方式，降低執行作業風險。
2. 藉由數位影像，可作為初步之橋梁檢測篩選工具。
3. 檢測所得資料聯結至橋梁管理資料庫系統，提供工程維修作業用。
4. 實地檢測已驗證對結構死角之檢測可行性，開發具實用性。
5. 可執行檢測橋寬約12公尺以下橋梁，滿足臺灣地區約7成之檢測。
6. 可進行定點靜態之檢測，也可低速前進執行動態錄影。
7. 機械手臂各組件及設備之經費需求約在80萬元以內，具經濟效益。



- 建議

1. 機械手臂第2臂多節設計。
2. 機械手臂第4臂固定長度。
3. 攝影機輕量化及防水性。
4. 機械手臂商品化包裝。



敬請指教

附錄 4

橋梁檢測機械手臂安裝手冊

目錄

1.機械手臂各臂	附 4-3
1.1 機械手臂第 1 臂	附 4-3
1.2 機械手臂第 2 臂	附 4-4
1.3 機械手臂第 3 臂	附 4-5
1.4 機械手臂第 4 臂	附 4-8
2.機械手臂接頭	附 4-8
2.1 第 1 臂與第 2 臂間接頭	附 4-8
2.2 第 2 臂與第 3 臂間接頭	附 4-9
2.3 第 3 臂與第 4 臂間接頭	附 4-9
3.機械手臂組裝	附 4-10

1.機械手臂各臂

橋梁檢測機械手臂之設計採 4 臂式。

1.1 機械手臂第 1 臂

機械手臂第 1 臂選用國內臺南縣善化鎮力有機械生產之油壓吊桿，型號 LY3A，採油壓驅動，全長可達 6.8 公尺並可作水平 359°旋轉及垂直 76°上仰，在最大仰角及最大操作範圍(吊桿伸至最長)時可吊重 200 公斤，另配有 2 支油壓型支撐腳。型號 LY3A 油壓吊桿相關規格列於表 1。

表1 力有機械之LY3A油壓吊桿相關規格

規格	LY3A	
型號		
總重(公斤)	400	
旋轉角度	359°	
旋轉方式	油壓	
仰角角度	76°	
第 1 節	長度(公尺)	2.6
	吊重(公斤)	1300
第 2 節	長度(公尺)	4.7
	吊重(公斤)	720
第 3 節	長度(公尺)	6.8
	吊重(公斤)	500
支撐腳	油壓型	
立柱高度(公尺)	1.4	
動力源	PTO	
操控方式	線控	
捲揚機	電動	

力有機械之 LY3A 油壓吊桿油壓相關零配件資料列於表 2。

表2 力有機械之LY3A油壓相關零配件資料

	內徑	外徑	行程
上下油壓缸(公釐)	75	90	470
伸縮油壓缸(公釐)	50	60	1100
油箱容量(公升)		6	
馬達、幫浦、油箱之壓力 (公斤/平方公分)		170	

力有機械之 LY3A 油壓吊桿各桿尺寸如圖 1 所示。

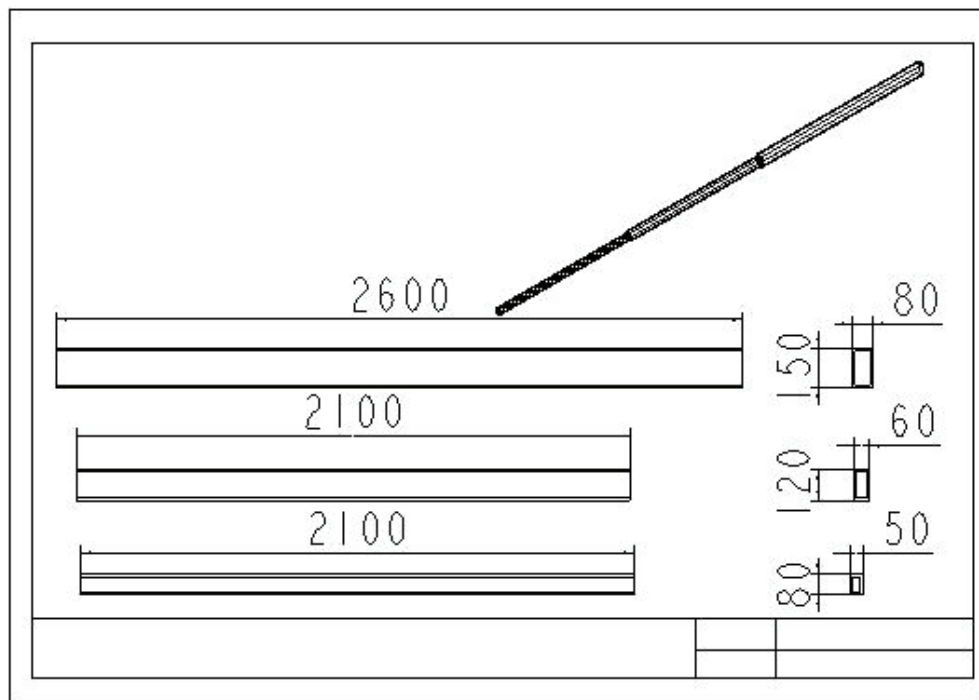


圖 1 力有機械之 LY3A 油壓吊桿各桿尺寸圖(單位：公釐)

1.2 機械手臂第 2 臂

機械手臂第 2 臂以 3 節 STPG38 鋼管套接而成，各節鋼管重量自外而內依次為 12.3、13.6、7.4 公斤，鋼管中空部份以鋼索穿過，最內層之鋼管末端與鋼索固定，鋼索則以捲揚機控制收放，達最大下降高度時第 2 臂全長 4.5 公尺。

機械手臂第 2 臂各節尺寸如圖 2 所示。

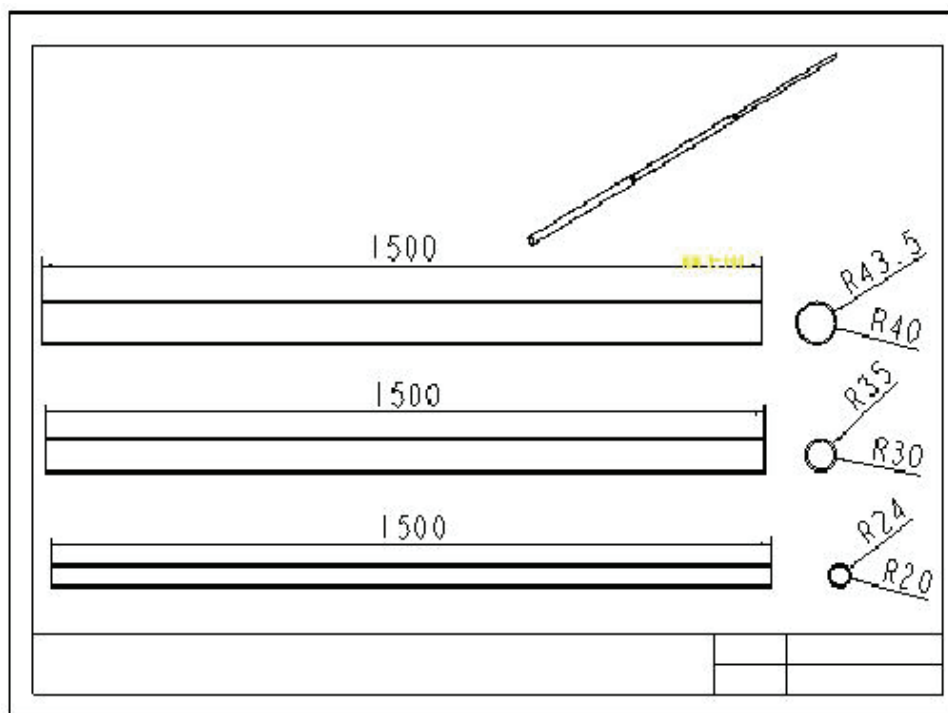


圖 2 機械手臂第 2 臂尺寸圖(單位：公釐)

1.3 機械手臂第 3 臂

機械手臂第 3 臂各節以鋁合金板成型之 C 字型管組裝而成，每節長 1.5 公尺，採尺寸遞減之設計。第 3 臂各節之截面尺寸如圖 3~5 所示，其中第 3 節與第 4 節尺寸相同，各節重量依次為 4.5、3.3、2.3、2.3 公斤。第 3 臂另有平衡臂之設計，以 2 節鋁合金板成型之 C 字型管組裝而成，截面尺寸如圖 6 所標示，每節長 1.5 公尺，各重 5.5 公斤。

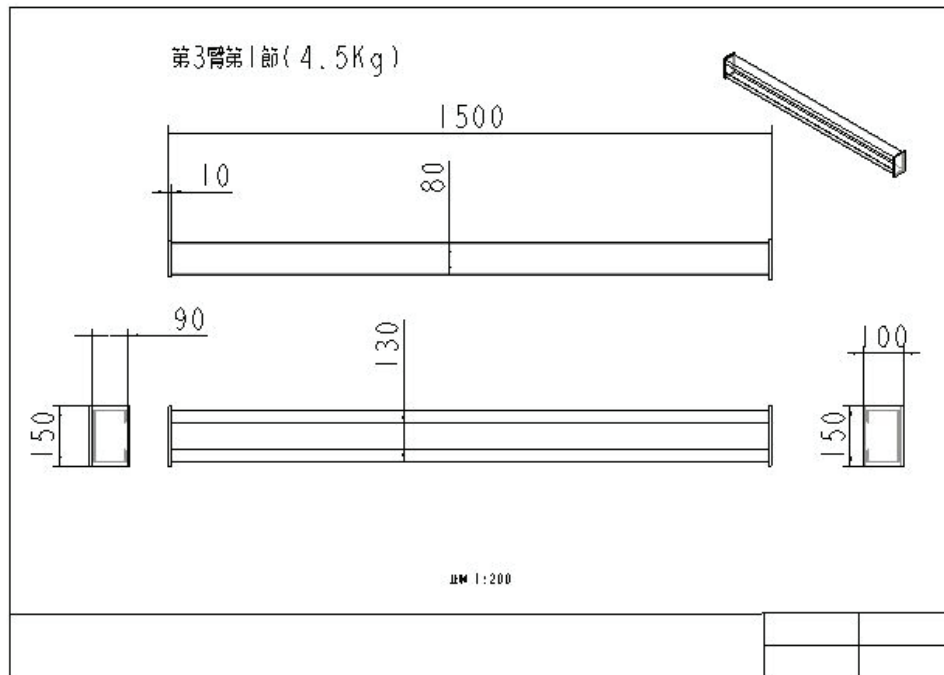


圖 3 機械手臂第 3 臂第 1 節尺寸圖(單位：公釐)

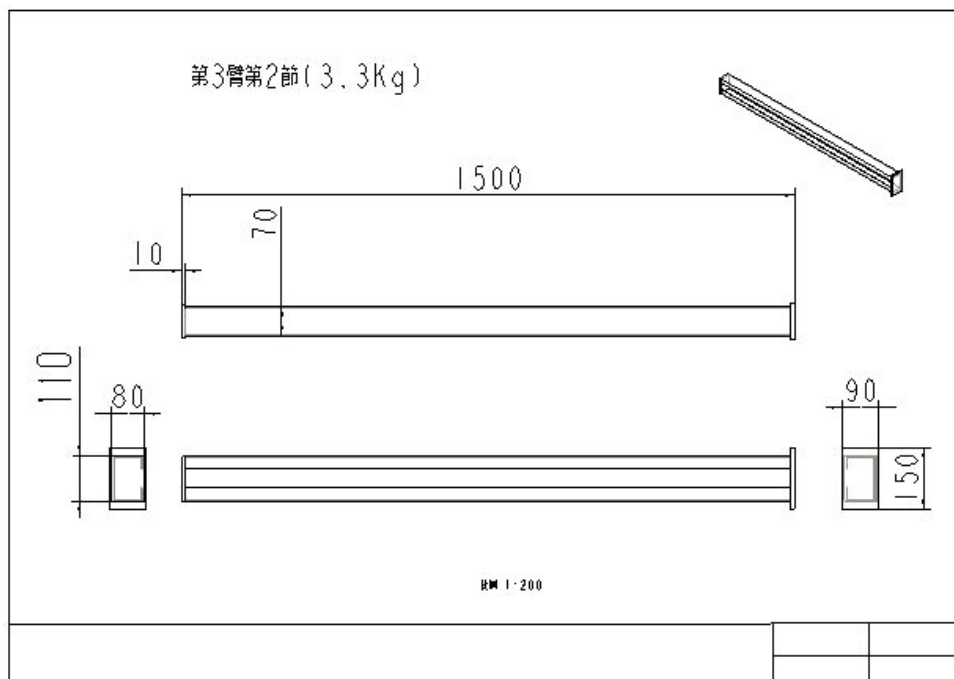


圖 4 機械手臂第 3 臂第 2 節尺寸圖(單位：公釐)

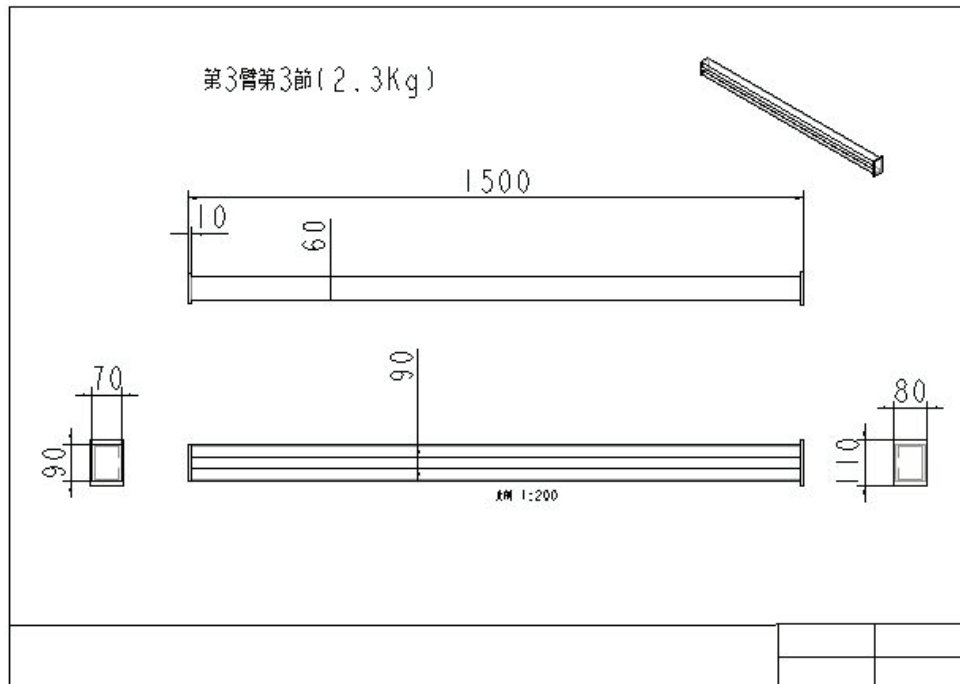


圖 5 機械手臂第 3 臂第 3、4 節尺寸圖(單位：公釐)

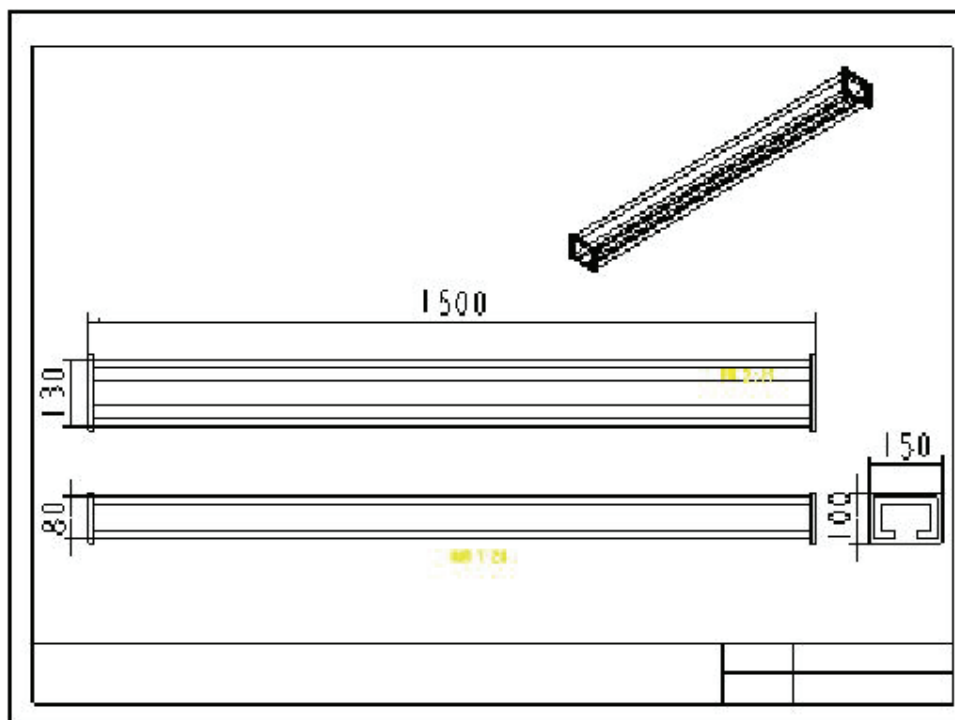


圖 6 機械手臂第 3 臂之平衡臂尺寸圖(單位：公釐)

第 3 臂 C 字型管內均銲接隔板以加強其整體強度，各節間以螺絲互鎖固定。

1.4 機械手臂第 4 臂

第 4 臂為一油壓缸，有效行程 200 公釐，最大長度 540 公釐，如圖 7 所示。



圖 7 第 4 臂油壓缸

2.機械手臂接頭

橋梁檢測機械手臂之設計為 4 臂式，各臂間共有 3 個接頭。第 1 臂與第 2 臂間之接頭不可分離；第 2 臂與第 3 臂間接頭則設計為可分離式，以方便拆裝；第 3 臂與第 4 臂間接頭則為完全固定式。

2.1 第 1 臂與第 2 臂間接頭

第 1 臂與第 2 臂間之接頭為插銷型式，2 機械臂無法分離，僅能作 1 個自由度之相對旋轉，接頭如圖 8 所示。以第 1 臂油壓吊桿原配備之鋼索繞過接頭後，穿入第 2 臂之圓管中，再鎖住第 2 臂之最內層圓管的末端，即可藉由鋼索之收放來調整第 2 臂之長度。



圖 8 第 1 臂與第 2 臂間之接頭

2.2 第 2 臂與第 3 臂間接頭

第 3 臂上有一節垂直臂，以快速螺絲接頭(圖 9 左)與第 2 臂圓鐵管(圖 9 右)相接。



圖 9 第 2 臂與第 3 臂間之接頭

2.3 第 3 臂與第 4 臂間接頭

第 3 臂與第 4 臂間接頭為完全固定式，將第 4 臂油壓缸鎖於第 3 臂前端，如

圖 10 所示。



圖 10 第 3 臂與第 4 臂間之接頭

3.機械手臂機械臂組裝

機械手臂組裝後，實測操作如圖 11 所示。



圖 11 機械手臂組裝後實測操作

附錄 5

橋梁檢測機械手臂操作手冊

目錄

1.機械手臂組成.....	附 5-3
2.機械手臂第 1 臂操作.....	附 5-3
3.機械手臂第 2 臂操作.....	附 5-6
4.機械手臂第 4 臂操作.....	附 5-8
5.攝影機操作.....	附 5-9
6.橋梁檢測作業步驟.....	附 5-24

1.機械手臂組成

橋梁檢測機械手臂是由 4 截機械手臂及 1 支紅外線攝影機所組成，各機械手臂及攝影機之操作分述於後。

2.機械手臂第 1 臂操作

機械手臂第 1 臂採用國內力有機械之油壓吊桿，該吊桿共有 3 節，以油壓缸驅動延伸及回縮，伸縮範圍從 2.6 公尺至 6.8 公尺，此外，吊桿另藉由油壓缸齒條能使第 1 臂能作 359° 旋轉，而油壓缸立柱則能讓第 1 臂垂直 76° 上仰，第 1 臂合計有 3 個自由度。

機械手臂第 1 臂及第 2 臂之操作使用控制按鈕，如圖 1 所示，共計有 8 個按鈕管控。操作時手持控制按鈕，按鈕從上至下分別控制第 1 臂之上舉、下降，鋼索(第 2 臂)之放、收，第 1 臂之前伸、後縮，第 1 臂之左旋、右旋。



圖 1 機械手臂第 1 臂之操作按鈕

當按下第 1 個控制按鈕(圖 2 左)時，油壓缸立柱伸長(圖 2 右)，第 1 臂因油壓缸上頂而舉升。



圖 2 第 1 臂舉升之操作

當按下第 2 個控制按鈕(圖 3 左)時，油壓缸立柱縮短(圖 3 右)，第 1 臂因油壓缸下壓而下降。



圖 3 第 1 臂下降之操作

當按下第 5 個控制按鈕(圖 4 左)時，附加在第 1 臂上的油壓缸伸長(圖 4 右)，第 1 臂因油壓缸伸長而前伸。



圖 4 第 1 臂前伸之操作

當按下第 6 個控制按鈕(圖 5 左)時,附加在第 1 臂上的油壓缸縮短(圖 5 右),第 1 臂因油壓缸縮短而後縮。



圖 5 第 1 臂後縮之操作

當按下第 7 個控制按鈕(圖 6 左)時,油壓齒條將帶動整個第 1 臂作旋轉運動,以操作人員站立於副駕駛座旁而面朝車尾方向,第 1 臂向左旋轉(圖 6 右)。



圖 6 第 1 臂左旋之操作

當按下第 8 個控制按鈕(圖 7 左)時,油壓齒條將帶動整個第 1 臂作旋轉運動,以操作人員站立於副駕駛座旁而面朝車尾方向,第 1 臂向右旋轉(圖 7 右)。



圖 7 第 1 臂右旋之操作

3.機械手臂第 2 臂操作

機械手臂第 2 臂係以 3 節鋼管套接而成,與第 1 臂之油壓吊桿以插鞘結合,鋼管中空部份另以鋼索穿過,最內層之鋼管末端與鋼索固定,鋼索則以捲揚機控制使第 2 臂各節鋼管收放作直線運動。

機械手臂第2臂之操作控制按鈕和第1臂之操作控制按鈕均在同一控制把手上，當手持控制把手操控機械手臂時，控制按鈕從上至下之第3和第4控制鈕分別控制鋼索(第2臂)之放、收。

當按下第3個控制按鈕(圖8左)時，捲揚機會啟動收回鋼索使第2臂之套管縮短(圖8右)。



圖8 第2臂縮短之操作

當按下第4個控制按鈕(圖9左)時，捲揚機會啟動放出鋼索使第2臂之套管隨鋼索放長而下降伸長(圖9右)。



圖9 第2臂伸長之操作

4.機械手臂第 4 臂操作

第 4 臂為一油壓缸，其與第 3 臂垂直固定，並藉由油壓驅動以舉升附加於其前端之雙 CCD。第 4 臂之控制把手及操作按鈕如圖 10 所示。



圖 10 機械手臂第 4 臂之操作按鈕

當按下第 1 個控制按鈕(圖 11 左)時，油壓缸會伸長(圖 11 右)，而附加於第 4 臂前端之雙 CCD 將因油壓缸伸長而舉升。



圖 11 第 4 臂上舉之操作

當按下第 2 個控制按鈕(圖 12 左)時，油壓缸會縮短(圖 12 右)，附加於第 4 臂前端之雙 CCD 將因油壓缸伸長而下降。

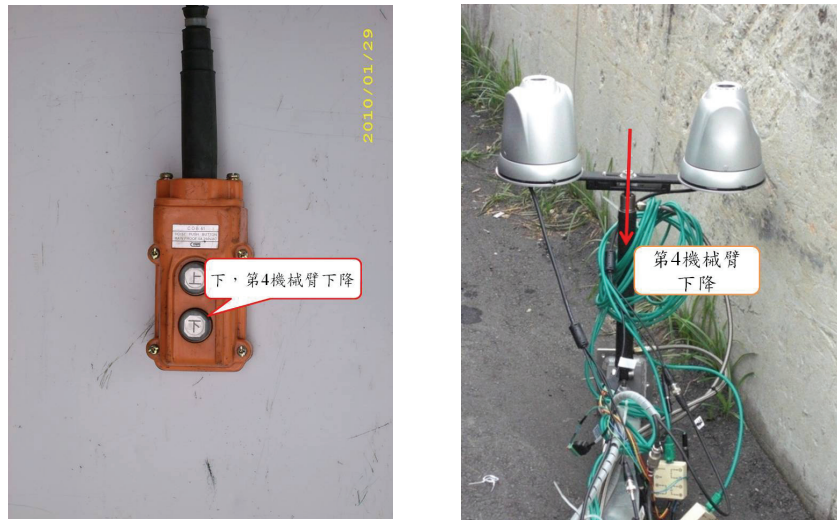


圖 12 第 4 臂下降之操作

5.攝影機操作

橋梁檢測機械手臂之攝影機模組包括拍攝攝影機(如圖 13)、監控攝影機(如圖 14)、攝影機鍵盤控制器搖桿(如圖 15)、AGPS(如圖 16)、控制箱(內含電腦、螢幕、電瓶、變壓器、UPS、影像擷取卡、攝影機電源連接盒，如圖 17) 等單元，各單元名稱及功能如表 1。

表 1 攝影機模組各單元名稱及功能

攝影機模組單元名稱	功能
拍攝攝影機	拍攝橋梁構件，以檢測橋梁狀況
監控攝影機	監控檢測設備是否會碰撞橋梁
攝影機鍵盤控制器搖桿	控制拍攝攝影機
AGPS	偵測橋梁檢測車之位置（經、緯度）
控制箱	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電腦：安裝影像擷取卡及影像擷取操作軟體。 2. 影像擷取卡：連接攝影機接頭，將 3 台攝影機拍攝影像傳輸到電腦影像擷取操作軟體儲存拍攝影像。 3. 電瓶：供應控制箱所需電源。 4. 變壓器：將電瓶供應的電壓轉換成 110V。 5. UPS：變壓器輸出的電源經 UPS 穩壓，供應穩定的電源給控制箱。 6. 攝影機電源連接盒：輸出電源供應攝影機及攝影機控制搖桿。



圖 13 拍攝攝影機



圖 14 監控攝影機



圖 15 攝影機鍵盤控制器搖桿



圖 16 AGPS

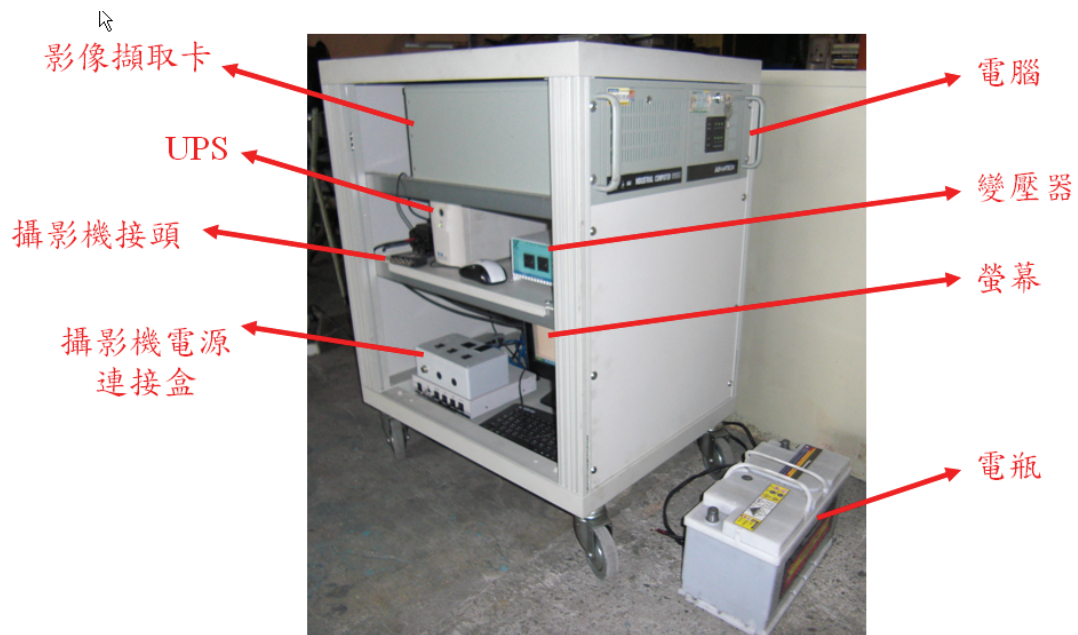


圖 17 控制箱

攝影機鍵盤控制器搖桿操作步驟如下：

步驟 1：按『SET』鍵，進入選單的設定模式(如圖 18)。

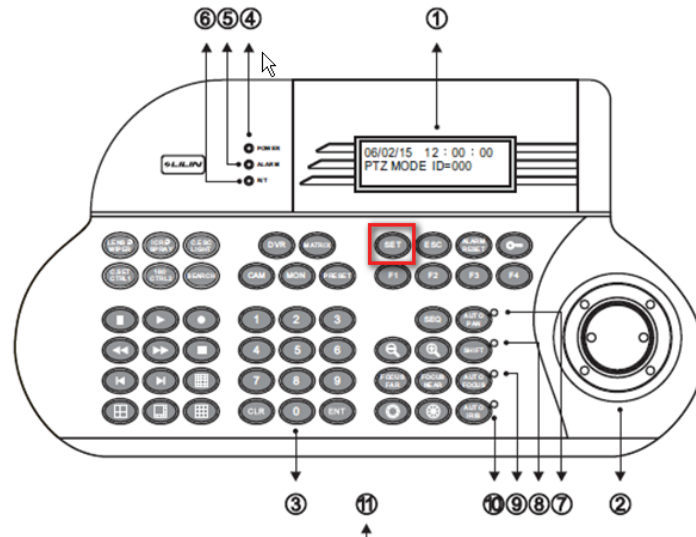


圖 18 按『SET』鍵

步驟 2：螢幕顯示『PTZ MODEID=0』時(如圖 19)尚無法控制攝影機，按『1』及『CAM』則攝影機控制器搖桿可控制『1 號攝影機』。

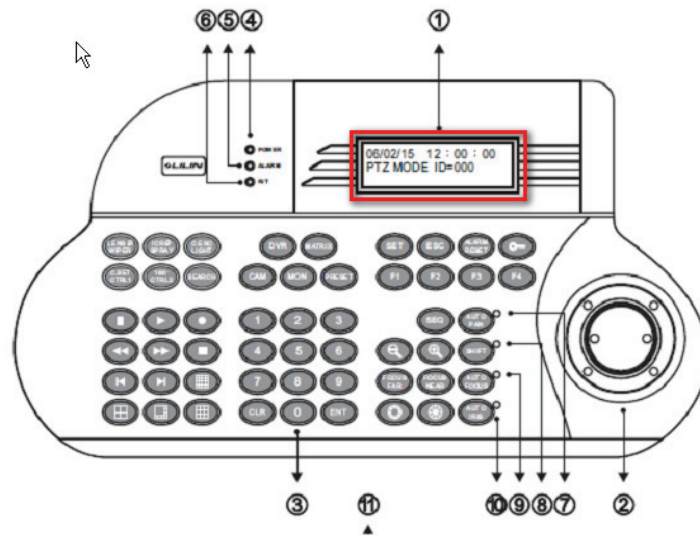


圖 19 顯示螢幕

步驟 3：調整攝影機手動縮放速度，以確保 2 支攝影機縮放倍數一致(小數點 1 位)，倘縮放速度太快將無法微調。按『C.SET CTRL1』(如圖 20)可進入功能設定畫面(如圖 21)。

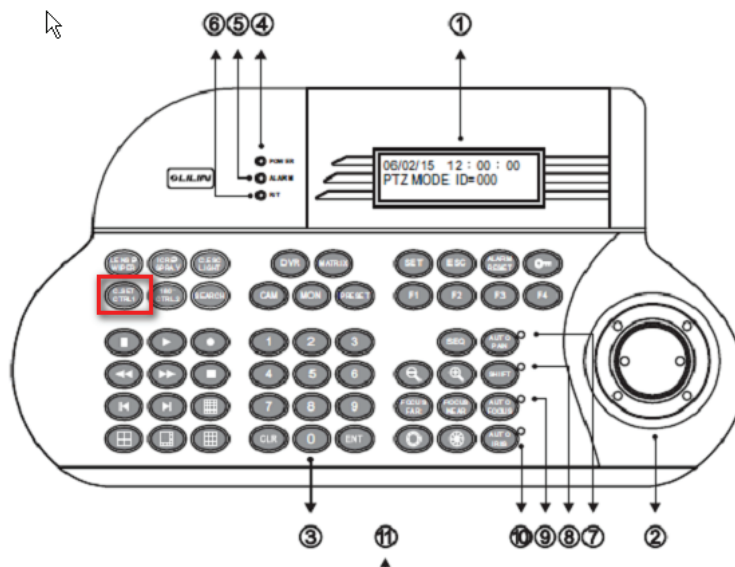


圖 20 按『C.SET CTRL1』

步驟 4：使用搖桿將游標移動至『功能設定』。(如圖 21)

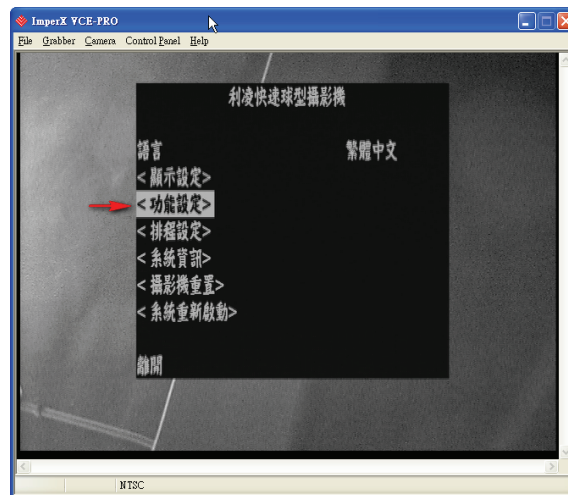


圖 21 功能設定

步驟 5：使用搖桿將游標移動至『攝影機』。(如圖 22)

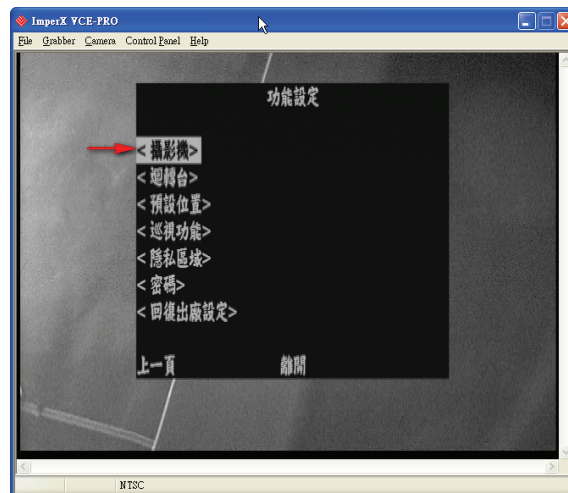


圖 22 攝影機

步驟 6：使用搖桿將游標移動至『手動縮放速度』，1 最慢(建議值)、15 最快。(如圖 23)

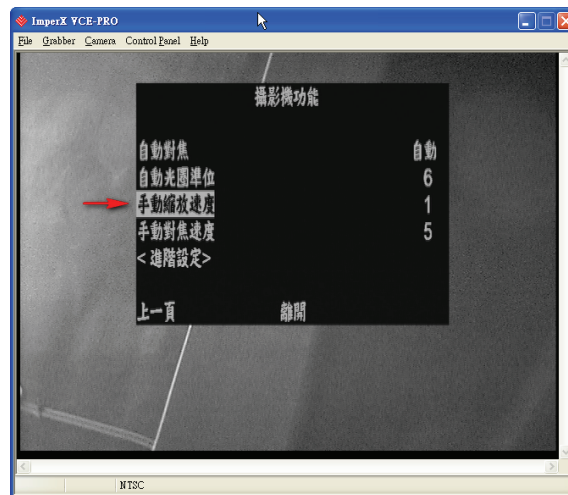


圖 23 手動縮放速度

步驟 7：設定鏡頭縮放倍率顯示時間，使螢幕上持續顯示縮放倍率以方便確認並調整倍率。使用搖桿將游標移動至『顯示設定』。(如圖 24)

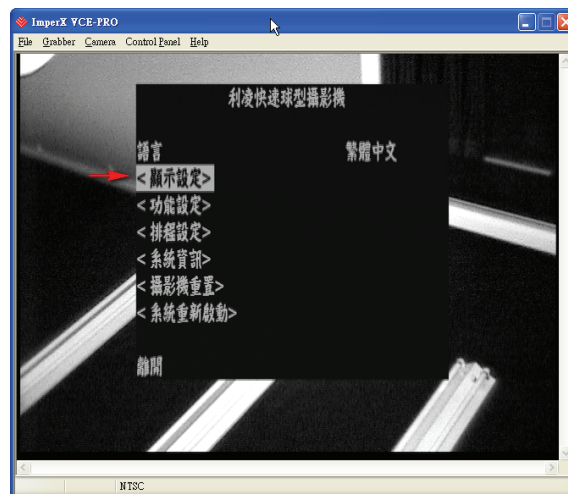


圖 24 顯示設定

步驟 8：使用搖桿將游標移動至『鏡頭縮放倍率』，顯示時間 255 秒(Max)建議值。
(如圖 25)



圖 25 鏡頭縮放倍率

設定預設點位置步驟如下：

步驟 1：按數字鍵 1~128，再按 PRESET 鍵選擇預設點位置(此時鍵盤控制器回應 2 聲嗶聲確認已選擇預設點位置)。

步驟 2：操作鍵盤控制器搖桿，將監視畫面移至需要呈現的區域。

步驟 3：按鍵盤控制器上的數字鍵『1』，再按下『F3』，這時鍵盤控制器會回應 2 聲嗶聲確認設定該點為預設點已被儲存。

呼叫預設點位置步驟如下：

步驟 1：按下鍵盤控制器上的數字鍵『1』。

步驟 2：按下『PRESET』，攝影機會快速移動至第 1 點預設點位置。

橋梁現場檢測接線安裝步驟如下：

接線位置有 3 處(如圖 26 所示)，位置(1)為 2 台攝影機裝置處，位置(2)為第 2 臂與第 3 臂連接處，位置(3)則為連接電腦控制箱處。



圖 26 機械手臂連接線位置

步驟 1：接線位置(1)為 2 台攝影機裝置處(如圖 27)，每台攝影機需要連接的線包含 1 條 BNC 接頭之攝影機訊號線(如圖 28)、1 條攝影機電源線、1 條攝影機鍵盤控制器電源線、1 條 RJ45 接頭之攝影機鍵盤控制器控制線 (如圖 29)。



圖 27 接線位置(1)



圖 28 BNC 接頭



圖 29 RJ45 接頭

步驟 2：接線位置(2)為第 2 臂與第 3 臂連接處(如圖 30)。每台攝影機需要連接的線包含 1 條 BNC 接頭之攝影機訊號線、1 條攝影機及攝影機鍵盤控制器共用電源線、1 條 RJ45 接頭之攝影機鍵盤控制器控制線及操控油壓缸上升下降的油管。



圖 30 接線位置(2)

步驟 3：接線位置(3)為連接電腦控制箱處(如圖 31)。攝影機訊號線連接到控制箱的攝影機接頭，電源線連接到控制箱的攝影機電源連接盒，攝影機訊號線(BNC 接頭)連接到攝影機鍵盤控制器(如圖 32)。



圖 31 接線位置(3)



圖 32 攝影機鍵盤控制器

影像擷取軟體之操作

主畫面(如圖 33 所示)，主畫面可顯示 3 個攝影機的拍攝畫面包含攝影機(一)、攝影機(二)及監控攝影機。攝影機(一)、攝影機(二)主要功能在拍攝橋梁，監控攝影機則在監控攝影機(一)、攝影機(二)是否會碰撞橋梁。



圖 33 影像擷取軟體主畫面

影像擷取軟體主畫面內之各項輸入說明如下。

(1)攝影機數目：

設定連接系統的攝影機數目。

(2)預設檔名：

輸入儲存錄影檔檔名，若輸入 20100114，則預設攝影機(一)錄影檔名為『c:\avi\20100114-1.avi』、攝影機(二)錄影檔名為『c:\avi\20100114-2.avi』、監控攝影機錄影檔名為『c:\avi\20100114-3.avi』

(3)基本設定：

滑鼠點選切換至『基本設定』畫面。

(4)全部攝影機：

滑鼠點選切換至『全部攝影機』畫面。

(5)攝影機(一)：

滑鼠點選切換至『攝影機(一)』畫面。

(6)攝影機(二)：

滑鼠點選切換至『攝影機(二)』畫面。

(7)監控攝影機：

滑鼠點選切換至『監控攝影機』畫面。

影像擷取軟體基本設定畫面，如圖 34 所示，各輸入欄位說明如下。

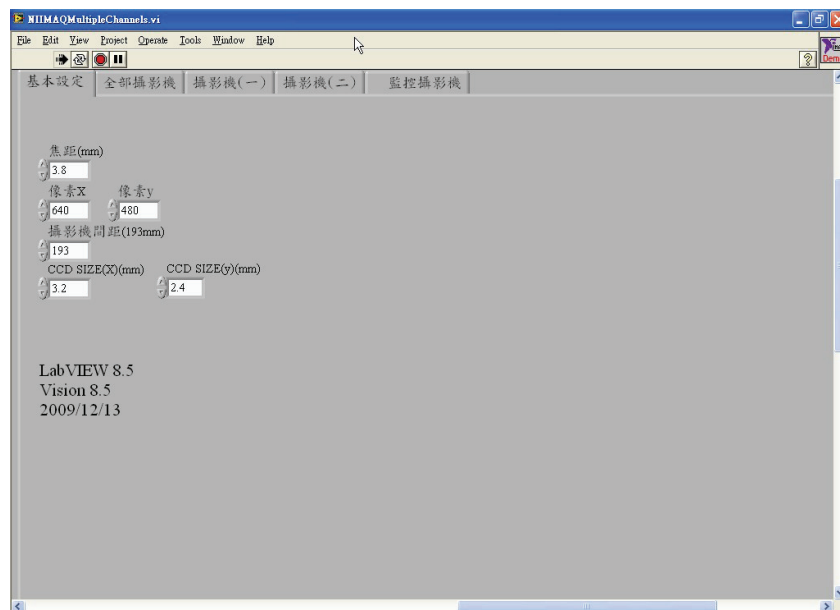


圖 34 影像擷取軟體基本設定畫面

(1)焦距(mm)：

預設值 3.8mm(目前使用的攝影機)，除非更換攝影機型號才需更改。

(2)像素(x)：

預設值 640。

(3)像素(y)：

預設值 480。

(4)攝影機間距(193mm)：

目前 2 支攝影機中心間距為 193mm，距離不可太大，需讓 2 個攝影機拍攝的影像重疊，才可計算物距。

(5)CCD SIZE(x)(mm)：

目前攝影機 SIZE(x)為 3.2mm，除非更換攝影機型號才需更改。

(6) CCD SIZE(y)(mm)：

目前攝影機 SIZE(y)為 2.4mm，除非更換攝影機型號才需更改。

此畫面為攝影機的規格，除非更換攝影機才需更改。

攝影機(一)畫面，如圖 35 所示，各輸入欄位說明如下：

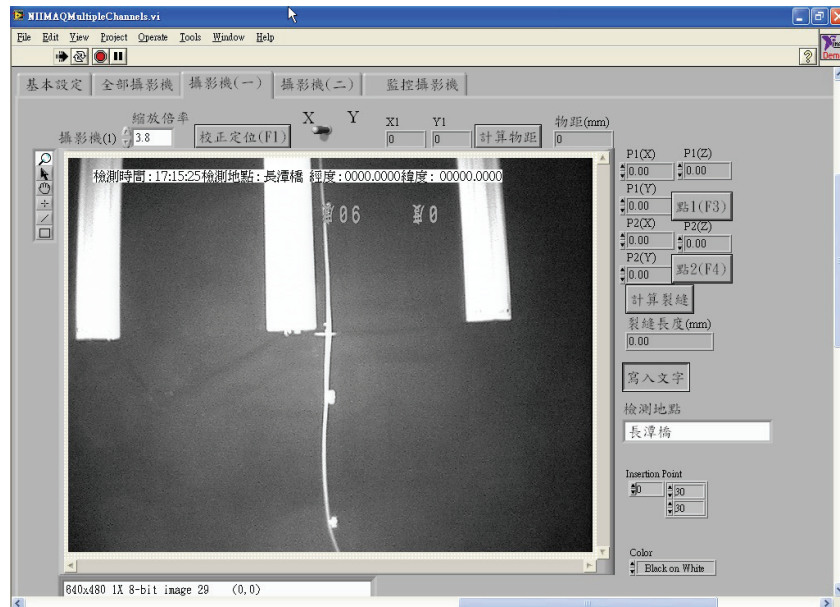


圖 35 攝影機(一)畫面

(1)縮放倍率：

與攝影機硬體設定的倍率設為一致。

(2)校正定位(F1)：

選擇欲量測的點(快速鍵為 F1)，滑鼠點選後，X1、Y1 會顯示量測座標值。

(3)計算物距：

滑鼠點選後，會顯示物距(mm)。

(4)點 1(F3)：

X1、Y1 座標值若為裂縫起點，則滑鼠點選(快速鍵為 F3)，X1、Y1 座標值及物距會分別填入 P1(X)、P1(Y)、P1(Z)。

(5)點 2(F4)：

X2、Y2 座標值若為裂縫終點，則滑鼠點選(快速鍵為 F4)，X2、Y2 座標值及物距會分別填入 P2(X)、P2(Y)、P2(Z)。

(6)計算裂縫：

滑鼠點選『計算裂縫』，會顯示裂縫長度(mm)。

(7)檢測地點：

輸入檢測地點，且點選『寫入文字』會將檢測地點顯示在影像中。

(8)寫入文字：

滑鼠點選『寫入文字』，會將檢測地點顯示在影像中。

(9)Insertion point：

設定寫入文字顯示在影像中的 X、Y 位置。

攝影機(二)畫面，如圖 36 所示，各輸入欄位說明如下：



圖 36 攝影機(二)畫面

(1)校正定位(F2)：

選擇欲量測的點(快速鍵為 F2)，滑鼠點選後，X2、Y2 會顯示量測座標值。

選擇的點需跟攝影機(一)畫面選擇的點需同 1 點。

監控攝影機畫面，如圖 37 所示，此畫面顯示監控攝影機所拍攝的畫面，主要用途在監控橋梁檢測設備是否會碰撞到橋梁。

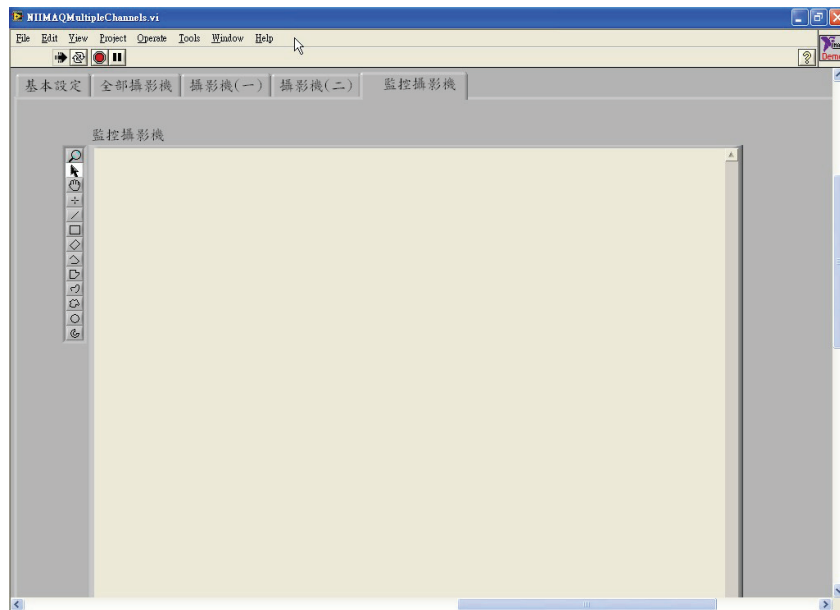


圖 37 監控攝影機畫面

6. 橋梁檢測作業步驟

1. 機械手臂組裝接合。

(a) 第 1 臂向車後方向延伸，吊掛第 2 臂並將之推送至吊桿轉軸(立柱)正後方約 6 公尺處，如圖 38 所示。



圖 38 機械手臂操作流程 1-(a)

(b)第 3 臂水平置放於地面，調整其軸向使之與車身縱向維持約 25 度夾角，
如圖 39 所示。



圖 39 機械手臂操作流程 1-(b)

(c)對接第 3 臂與第 2 臂，對接時將快速接頭對準後扣住，如圖 40 所示，
再以 13 號梅花板手上扭力。



圖 40 機械手臂操作流程 1-(c)

2.第 3 臂及攝影機移出橋梁護欄。

(a)收回鋼索吊起第 3 臂並上仰第 1 機械臂至仰角 20 度左右，確認第 3 機械臂之高度高於橋護欄，如圖 41 所示。



圖 41 機械手臂操作流程 2-(a)

(b)將第 1 臂向橋外方向迴轉，第 3 臂即跨出橋梁護欄，直至與橋身縱向呈平行，如圖 42 所示。



圖 42 機械手臂操作流程 2-(b)

3.第 3 臂及攝影機伸入橋面下檢測。

(a)以鋼索垂放第 2 臂，至第 3 臂及負載之攝影機低於橋下大梁之深度，如圖 43 所示。



圖 43 機械手臂操作流程 3-(a)

(b)再迴轉第 1 臂，使之垂直於橋面上車行方向，第 3 臂及攝影機即順勢伸進橋梁底面，如圖 44 所示。

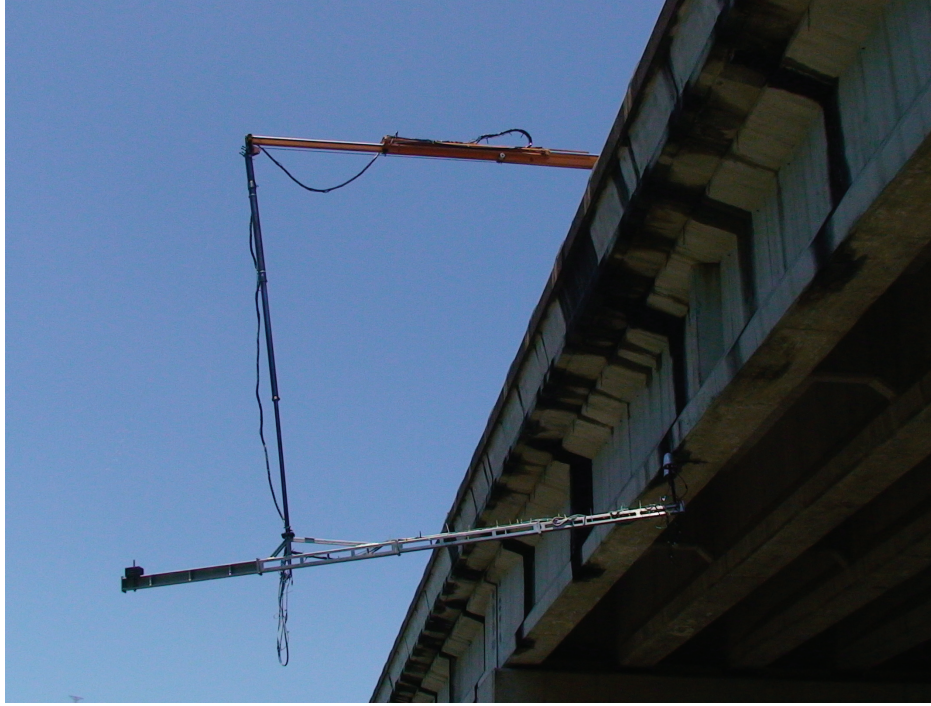


圖 44 機械手臂操作流程 3-(b)

4. 機械手臂回收程序，依前述步驟反向執行。