



國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

提升數位影像相關法全場量測表現並應用於風機系統

結構量測及揚聲器減振材料分析

Improving the Fullfield Measurement Performance of Digital

Image Correlation for Wind Turbine Structure and Vibration

Analysis of Materials in Loudspeakers Suppression

李奕

Yi Lee

指導教授：馬劍清 博士

Advisor: Chien-Ching Ma, Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July, 2024



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

提升數位影像相關法全場量測表現並應用於風機系統結構量
測及揚聲器減振材料分析

Improving the Fullfield Measurement Performance of Digital Image
Correlation for Wind Turbine Structure and Vibration Analysis of
Materials in Loudspeakers Suppression

本論文係李奕(R11522508)在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國 113 年 7 月 25 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Mechanical Engineering on 25th July 2024 have examined a Master's thesis entitled above presented by YI, LEE (R11522508) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

黃育熙 代

(指導教授 Advisor)

黃育熙

廖展誼

張敬源

系主任/所長 Director:

莊嘉揚



致謝



本論文的完成首先要感謝我的指導教授馬劍清老師，提供我們資源充足的研究環境，並在我們遇到困難時指點迷津，為破壞實驗室的人們指引正確的方向。雖然很遺憾無法讓老師看到完整的論文與我們畢業的樣子，不過會時刻銘記老師不斷精益求精，追求完美的精神繼續前進。

感謝實驗室畢業的大學長、大學姐們，在每次的實驗室會議中給予大家改進的建議，也對大家在實驗室的日常及技術面遇到的各種難題提供協助。感謝黃育熙老師在意外發生後第一時間接下我們碩二生口試及論文相關事務的重任，另外在本文第五章的產學合作計畫中也受到老師及實驗力學實驗室的同學們許多的協助。感謝廖展誼老師及張敬源老師擔任我的口試委員，對我的論文提出詳盡的修改建議，確保內容正確、完整、嚴謹。感謝吳亦莊老師在我們報告時給予建議，也時常出現在實驗室與我們聊天。

感謝國釗學長統籌各種實驗室的事務，帶領我們保持正確的研究態度；感謝瑞琪學姊協助處理各種行政事務及報帳事宜；感謝亦倫學長對公共事務的熱心，及對研究及論文細節的指引；也感謝秉良學長為實驗室帶來全新的研究方向及應用。

感謝佳軒學姊及彤欣在大學專題時的協助，也讓我對實驗室的研究方向有所了解。感謝冠甫學長在在數位影像相關法上完整的教學，也解決研究遇到的各種困難。感謝鎧學長、彥霖學長作為相同研究領域的榜樣，感謝承融學長在產學合作計畫及有限元素法上提供的協助，也感謝任航學長常與我們打球，為實驗室的大家帶來活力。

實驗室的同窗們，兩年間無論研究、上課或日常生活皆與大家一起度過。感謝運動全能的禹淮不斷的帶我們去打球，讓我們在研究之餘保持運動，維持身心健康。感謝肇輝一同探討研究上的方向，也讓我時刻督促自己要更加努力，才能在研究上有所成功。感謝祈維做出許多 3D 列印試片，讓本文的新方法有所應用。

感謝奇鈞雖然很少出現，但在實驗室聚餐、唱歌等活動時總會陪伴大家。

感謝實驗室的學弟愷莘、博璿、宇恆、佑宸、宇辰及龍，在我們碩二後在實驗及實驗室各種雜務上提供的協助，和在實驗室各種團體活動的參與。希望大家未來傳承破壞實驗室，或是說波動與動態感測實驗室的精神繼續努力下去。

感謝產學合作計畫的夥伴們，建佑學長、以信、佳怡及德原，一同度過重重困難完成為期一年的計畫，感謝機械系棒球隊的夥伴，晏昀、士傑、子升、昇融、逸鈞、逸豪、天豪、國華、鎧瀚及宇宏等人，在大學及研究所這些年一同追求相同的目標。

感謝我國中的摯友們尚義、德原、如彤、禮蔚、博遠及晴等人，在這些年來的陪伴與我在忙於研究時的各種鼓勵。感謝國小資優班的鼎鈞、彥文和宗怡等人，還有高中同學訢、昱安等人讓我在百忙之中有少許的社交活動。

最後感謝父母的養育之恩，讓我在學業的路上一路中沒有後顧之憂，並時刻有個溫暖的歸處。感謝我的弟弟一路來的陪伴，並感謝祖父母及其他家人們各方面的關心及協助。

李奕 筆於 台灣大學 破壞實驗室 2024.08.05

摘要



數位影像相關法(Digital image correlation, DIC)為影像光學量測技術的一種，具有非接觸、非破壞、全場量測、跨尺度等特性，廣泛應用於相關工程領域及學術研究。數位影像相關法以成熟的數學理論追蹤待測物上的特徵，並計算影像序列與特徵的相關係數，取得特徵的位移、變形等資訊。

本論文以使用數位影像相關法進行實用性量測，並針對實驗中遇到的問題進行改良，以發揮數位影像相關法在全場及動態量測上的優勢，並提升現有系統的精度及便利性。在第一章中，首先針對全場量測中之自動選點方法進行優化，透過誤差點篩選濾除三維全場量測時明顯偏差的分析點，在全場變形量測及形貌重建實驗中能改善自動選點誤差造成的雜訊問題。另一方面，本文引入 Distmesh 演算法進行全場量測的自動選點，其中透過改變距離函數能自由調整佈點區域之形狀，並建立均勻的三角形網格做為分析點。

本文第二部分針對風力發電機系統的風機葉片及離岸風機底座兩個關鍵結構進行動態量測。其中針對風機葉片透過改變鎖固條件進行分析結構損傷對共振頻率的影響，同時由全場位移進行變形重建及模態振型分析。在離岸風機底座的實驗中，透過不同的敲擊位置及拍攝角度觀察暫態位移及頻域訊號的變化，進一步了解風機基座的動態特性，並與風機葉片之量測結合，展現數位影像相關法針對風力發電系統動態、全場的量測優勢。

本文第三部分以筆電揚聲器為研究主題，首先使用數位影像相關法配合拉伸試驗，分析不同緩衝圈材質之材料參數，並建立有限元素模型模型分析不同緩衝圈材質的減振效果。在拉伸試驗中，應用樣板更新法追蹤大變形下的軸向和橫向應變值，並對過程中的累計誤差問題進行探討及改善。得到楊氏模數與薄松比後，使用 COMSOL Multiphysics 分析不同緩衝圈材質的減振效果，再配合實體揚聲器的振動

量測實驗驗證模擬結果。

關鍵字：數位影像相關法、影像光學量測、Distmesh、風力發電機、拉伸試驗、揚聲器、有限元素法



Abstract

Digital Image Correlation (DIC) is an optical imaging measurement technique characterized by its non-contact, non-destructive, fullfield measurement, and cross-scale capabilities. It is widely used in related engineering fields and academic research. DIC uses well-established mathematical theories to track features on the object under test and calculate the correlation coefficients of image sequences and features to obtain information on displacement and deformation.

The thesis focuses on using digital image correlation (DIC) for practical measurements and improving issues encountered during experiments. The goal is to maximize the advantages of DIC in fullfield and dynamic measurements and enhance the accuracy and convenience of existing systems. The first part of the thesis improves the automatic point selection method in full-field measurements. By filtering out error points in 3D full-field measurements, the noise problem caused by automatic point selection errors in full-field deformation measurement and shape reconstruction is improved. On the other hand, the Distmesh algorithm is introduced for automatic point selection in full-field measurements. By changing the distance function, the shape of the point distribution area can be arbitrarily adjusted, and a uniform triangular mesh is established for fullfield measurement.

The second part focuses on the dynamic measurement of two key structures in wind turbine systems: the turbine blades and the offshore wind turbine foundation. For turbine blades, the effect of structural damage on the resonance frequency is analyzed by changing the screw locking conditions, and deformation reconstruction and modal shape analysis are conducted based on the full-field displacement. In the experiments of

offshore wind turbine foundation, transient displacement and frequency spectrum are observed through different impact locations and shooting angles to further understand the dynamic characteristics of the wind turbine base. The part demonstrates the advantages of DIC in dynamic, fullfield measurements for wind turbine systems.

The third part studied on the laptop speakers. First, DIC is applied in tensile tests to analyze the material parameters of different buffer ring materials. Second, we established a finite element model to analyze the damping effects of different buffer ring materials in vibration. During the tensile test, the template update method is applied to track axial and transverse strain values under large deformation, and the cumulative error problem in the process is improved. After obtaining the Young's modulus and Poisson's ratio, COMSOL Multiphysics is used to analyze the vibration suppression of different buffer ring materials, and the simulation results are verified with vibration measurement for loudspeakers.

Keywords: Digital Image Correlation, Optical Image Measurement, Distmesh, Wind Turbine, Tensile Test, Speaker, Finite Element Method

目次

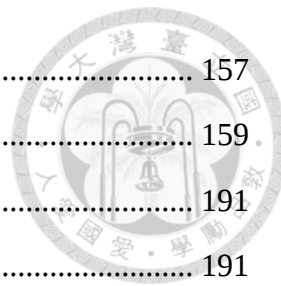


摘要	I
Abstract.....	III
目次	V
圖次	IX
表次	XIX
第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 內容簡介	3
第二章 數位影像相關法原理與實驗儀器介紹	7
2.1 數位影像相關法簡介	7
2.1.1 數位影像相關法量測流程與特色	7
2.1.2 時間參數	8
2.1.3 空間參數	8
2.1.4 樣板子集合與搜尋子集合	8
2.2 數位影像相關法計算原理	9
2.2.1 整像素求解	9
2.2.2 次像素搜尋演算法	11
2.2.3 二維數位影像相關法	23
2.2.4 三維數位影像相關法	25
2.2.5 逐點最小平方法	28
2.3 實驗儀器介紹	29
2.3.1 數位工業相機	29
2.3.2 數位工業相機鏡頭	29

2.3.3	雷射位移計	29
2.3.4	光纖位移計	30
2.3.5	萬能材料試驗機	30
第三章 提升數位影像相關法全場量測表現		45
3.1	全場選點方法回顧	45
3.1.1	全場數位影像相關法量測流程	45
3.1.2	方法回顧:中空圓環形網格生成	46
3.1.3	方法回顧:對極幾何應用於三維自動選點	46
3.1.4	方法回顧:利用特徵圖像匹配改善圖像變形問題	47
3.2	透過誤差點刪除增加三維全場量測精度	47
3.2.1	誤差點篩選機制-均勻四邊形網格	47
3.2.2	刪點資料計算方式	49
3.2.3	懸臂薄板靜態位移實驗	50
3.2.4	風力發電機葉片形貌重建實驗	53
3.3	建立泛用性三角形網格全場選點方法	55
3.3.1	Distmesh 簡介	55
3.3.2	整合 Distmesh 與全場數位影像相關法選點系統	56
3.3.3	逐點最小平方法應用於三角形網格應變計算	57
3.3.4	誤差點篩選應用於三角形網格全場佈點	57
3.4	泛用性三角形網格選點方法實際應用	59
3.4.1	SEM: 圓孔試片拉伸試驗	59
3.4.2	3D 列印拉伸試片全場變形量測	61
3.4.3	球體形貌重建實驗	62
第四章 風力發電系統動態變形量測與全場位移重建		97
4.1	風力發電機葉片振動位移量測實驗	97
4.1.1	實驗架設及參數設定	97

4.1.2	實驗結果	98
4.2	風機葉片全場振動位移量測及變形重建	99
4.2.1	實驗架設	100
4.2.2	參數設定與數據處理	100
4.2.3	實驗結果	102
4.3	離岸風機基座振動量測	104
4.3.1	實驗簡介	104
4.3.2	中央圓柱振動量測	105
4.3.3	橫梁振動量測	106
4.4	小結	107
第五章	揚聲器緩衝圈減振效果實驗及理論分析	145
5.1	相關原理及分析流程	145
5.1.1	動圈式揚聲器原理簡介	145
5.1.2	線黏彈性理論	145
5.1.3	緩衝圈減振效果分析流程	147
5.1.4	緩衝圈材料種類	147
5.2	數位影像相關法應用於緩衝圈橡膠材料拉伸試驗	148
5.2.1	實驗規範及架設	148
5.2.2	追蹤機制與應變計算方法	148
5.2.3	樣板更新法之累計誤差問題與解決方法	150
5.2.4	實驗結果	152
5.3	揚聲器系統有限元素分析與驗證實驗	154
5.3.1	模型與材料參數設定	155
5.3.2	固體力學基本設定	155
5.3.3	有限元素分析結果	156
5.3.4	參數化掃描	156

5.3.5 揚聲器單點振動驗證實驗	157
5.4 小結	159
第六章 結論與未來展望	191
6.1 結論	191
6.2 未來展望	193
參考文獻	195
附錄	201



圖次



圖 2 - 1 樣板子集合示意圖	33
圖 2 - 2 常見數位影像相關法特徵：(a) 噴漆斑點特徵 (b) 手寫文字特徵 (c) 網版 印刷特徵 (d) QR-code 特徵	33
圖 2 - 3 數位影像相關法整像數求解示意圖	34
圖 2 - 4 (a)相關係數場與極大值 (b)CCPF 鄰像素示意圖	34
圖 2 - 5 形狀函數(Shape function)：剛體平移(Zero Order).....	35
圖 2 - 6 形狀函數(Shape function)：一階變形(First Order).....	35
圖 2 - 7 理想針孔成像模型示意圖	36
圖 2 - 8 理想針孔成像模型(a)上視圖 (b)側視圖	36
圖 2 - 9 相機徑向畸變 (取自 OpenCV 官方文件).....	37
圖 2 - 10 相機正切畸變 (取自 MATLAB 官方文件).....	37
圖 2 - 11 三種尺寸之棋盤格校正版	38
圖 2 - 12 三維座標轉換示意圖	38
圖 2 - 13 單相機投影模型	39
圖 2 - 14 雙相機投影模型	39
圖 2 - 15 雙相機座標與世界座標轉換關係圖	40
圖 2 - 16 PLS 原理示意圖	40
圖 2 - 17 數位工業相機 GS3-U3-23S6M-C 外觀圖	41
圖 2 - 18 數位工業相機鏡頭-V0814-MP 外觀圖	41
圖 2 - 19 數位工業相機鏡頭-TEC-M55 外觀圖	42
圖 2 - 20 雷射位移計- LK-H055 外觀圖	42
圖 2 - 21 光纖位移計- MTI-200 外觀圖	43

圖 2 - 22 光纖位移計原理示意圖	43
圖 2 - 23 光纖位移計輸出電壓與距離關係	44
圖 2 - 24 萬能材料試驗機- C42.503	44
圖 3 - 1 均勻四邊形網格佈點結果示意圖	65
圖 3 - 2 選取四角點示意圖	65
圖 3 - 3 中空圓環全場佈點結果(取自王盛儀論文)	66
圖 3 - 4 偏差選點結果範例	66
圖 3 - 5 均勻四邊形網格誤差點篩選假設條件示意圖	67
圖 3 - 6 四邊形網格行列示意圖	67
圖 3 - 7 均勻四邊形網格誤差點篩選流程圖	68
圖 3 - 8 相鄰點關係示意圖	68
圖 3 - 9 四角點邊界示意圖	69
圖 3 - 10 一維資料插值與近似(取自 Mathwork 官方網站)	69
圖 3 - 11 二維資料插值與近似(取自 Mathwork 官方網站)	70
圖 3 - 12 LOWESS 原理示意圖(取自 Mathwork 官方網站)	70
圖 3 - 13 懸臂薄版靜態位移實驗架設	71
圖 3 - 14 懸臂版尺寸及施力位置圖	71
圖 3 - 15 懸臂薄板靜態位移實驗選點結果	72
圖 3 - 16 懸臂薄板靜態位移實驗結果- x 方向	72
圖 3 - 17 懸臂薄板靜態位移實驗結果- y 方向	73
圖 3 - 18 懸臂薄板靜態位移實驗結果- z 方向	74
圖 3 - 19 分析點世界座標位置圖	74
圖 3 - 20 分析點 z 座標分布	75
圖 3 - 21 懸臂薄版有限元素法模型網格	75

圖 3 - 22 懸臂薄版靜態位移有限元素法結果.....	75
圖 3 - 23 極端選點狀況測試佈點結果.....	76
圖 3 - 24 極端選點狀況測試位移結果- x 方向	76
圖 3 - 25 極端選點狀況測試位移結果- y 方向	77
圖 3 - 26 極端選點狀況測試位移結果- z 方向	78
圖 3 - 27 風力發電機葉片表面圖	78
圖 3 - 28 風力發電機葉片形貌重建實驗架設.....	79
圖 3 - 29 風機葉片形貌重建實驗雷射位移計量測點位置圖	79
圖 3 - 30 風機葉片形貌重建實驗選點結果.....	80
圖 3 - 31 風機葉片形貌重建結果.....	80
圖 3 - 32 第一次誤差點篩選曲面擬合結果.....	80
圖 3 - 33 第一次誤差點篩選標準化 z 座標分布及閾值.....	81
圖 3 - 34 第二次誤差點篩選曲面擬合結果.....	81
圖 3 - 35 第三次誤差點篩選曲面擬合結果.....	81
圖 3 - 36 第三次誤差點篩選比例與誤差關係圖	82
圖 3 - 37 風機葉片形貌重建實驗精度驗證結果.....	82
圖 3 - 38 Distmesh 原理示意圖	83
圖 3 - 39 Distmesh 三角形網格全場選點流程圖	83
圖 3 - 40 Distmesh 三角形網格自動選點範例-任意四邊形	83
圖 3 - 41 Distmesh 三角形網格自動選點範例-任意五邊形	84
圖 3 - 42 Distmesh 三角形網格自動選點範例-帶圓孔長方形	84
圖 3 - 43 PLS 應用於於三角形網格示意圖	84
圖 3 - 44 單一三角形元素與節點標號.....	85
圖 3 - 45 三角形元素指向示意圖	85

圖 3 - 46 三角形網格選點誤差範例.....	86
圖 3 - 47 誤差點篩選應用於三角形網格流程圖.....	86
圖 3 - 48 SEM 圓孔試片拉伸試驗選點結果.....	87
圖 3 - 49 SEM 圓孔試片拉伸試驗位移場.....	87
圖 3 - 50 SEM 圓孔試片拉伸試驗應變場.....	88
圖 3 - 51 SEM 圓孔試片拉伸試驗試片尺寸圖.....	88
圖 3 - 52 SEM 圓孔試片拉伸試驗有限元素法位移場.....	89
圖 3 - 53 SEM 圓孔試片拉伸試驗有限元素法應變場.....	89
圖 3 - 54 ASTM D638 試片尺寸規範圖(取自 ASTM D638 規範文件).....	90
圖 3 - 55 3D 列印拉伸試片實體圖.....	90
圖 3 - 56 3D 列印拉伸試片全場變形量測實驗架設.....	90
圖 3 - 57 3D 列印拉伸試驗選點結果.....	91
圖 3 - 58 3D 列印拉伸試驗位移場- x 方向.....	91
圖 3 - 59 3D 列印拉伸試驗位移場- y 方向.....	92
圖 3 - 60 3D 列印拉伸試驗應變場- E_{xx}	92
圖 3 - 61 3D 列印拉伸試驗應變場- E_{yy}	93
圖 3 - 62 3D 列印拉伸試驗 E_{yy} 疊圖分析.....	93
圖 3 - 63 球體形貌重建目標物.....	94
圖 3 - 64 球體形貌重建選點結果.....	94
圖 3 - 65 球體形貌重建實驗誤差點篩選測試.....	94
圖 3 - 66 球體形貌重建結果.....	95
圖 3 - 67 球體形貌重建實驗誤差點篩選結果.....	96

圖 4 - 1 敲擊錘實體圖	110
圖 4 - 2 風機葉片振動位移量測實驗架設及敲擊點位置圖	110
圖 4 - 3 風機葉片振動位移量測實驗量測點近照	111
圖 4 - 4 風機葉片振動位移量測實驗選點位置	111
圖 4 - 5 風機葉片振動位移量測實驗結果-位移校正前	112
圖 4 - 6 風機葉片振動位移量測實驗結果-量測點與桌面位移	112
圖 4 - 7 風機葉片振動位移量測實驗結果-全螺栓鎖固	112
圖 4 - 8 風機葉片振動位移量測實驗結果-鬆弛螺栓 A	113
圖 4 - 9 風機葉片振動位移量測實驗結果-鬆弛螺栓 A、B	113
圖 4 - 10 風機葉片振動位移量測實驗結果-鬆弛螺栓 A、B、C	113
圖 4 - 11 風機葉片振動位移量測頻域訊號-全螺栓鎖固	114
圖 4 - 12 風機葉片振動位移量測頻域訊號-鬆弛螺栓 A	114
圖 4 - 13 風機葉片振動位移量測頻域訊號-鬆弛螺栓 A、B	114
圖 4 - 14 風機葉片振動位移量測頻域訊號-鬆弛螺栓 A、B、C	115
圖 4 - 15 風機葉片全場振動位移量測實驗架設	115
圖 4 - 16 風機葉片全場振動位移量測實驗架設-相機視角	115
圖 4 - 17 風機葉片全場振動位移量測實驗架設選點結果	116
圖 4 - 18 風機葉片全場振動位移量測誤差點篩選示意圖	116
圖 4 - 19 桌面位移校正方法示意圖	117
圖 4 - 20 帶通濾波法示意圖	117
圖 4 - 21 風機葉片全場振動位移量測結果: (a)原始訊號 (b)誤差點篩選後	118
圖 4 - 22 風機葉片全場振動位移量測結果: (a)桌面位移 (b)位移校正後	118
圖 4 - 23 風機葉片全場振動位移頻域訊號- point 10~ point 50	119
圖 4 - 24 風機葉片全場振動位移頻域訊號- point 60~ point 100	120

圖 4 - 25 風機葉片阻尼比分析結果.....	121
圖 4 - 26 風機葉片振動位移重建結果.....	122
圖 4 - 27 帶通濾波結果- 第一模態	122
圖 4 - 28 帶通濾波結果- 第三模態	123
圖 4 - 29 風機葉片模態重建結果- 第一模態.....	123
圖 4 - 30 風機葉片模態重建結果- 第三模態.....	124
圖 4 - 31 離岸風機基座模型外觀及尺寸	124
圖 4 - 32 離岸風機基座中央圓柱振動量測: (a)實驗架設 (b)敲擊位置 (c)分析點位置	125
圖 4 - 33 中央圓柱振動量測結果-第一次敲擊.....	125
圖 4 - 34 中央圓柱振動量測結果-第二次敲擊.....	126
圖 4 - 35 中央圓柱振動量測結果-第三次敲擊.....	126
圖 4 - 36 中央圓柱振動頻域訊號-第一次敲擊.....	127
圖 4 - 37 中央圓柱振動頻域訊號-第二次敲擊.....	128
圖 4 - 38 中央圓柱振動頻域訊號-第三次敲擊.....	129
圖 4 - 39 橫梁振動量測實驗架設.....	130
圖 4 - 40 橫梁振動量測選點位置.....	130
圖 4 - 41 橫梁振動量測敲擊位置.....	131
圖 4 - 42 橫梁振動量測-第一次敲擊 x 方向位移(point 1~ point 4)	132
圖 4 - 43 橫梁振動量測-第一次敲擊 x 方向位移(point 5~ point 8)	132
圖 4 - 44 橫梁振動量測-第一次敲擊 y 方向位移(point 1~ point 4).....	133
圖 4 - 45 橫梁振動量測-第一次敲擊 y 方向位移(point 5~ point 8).....	133
圖 4 - 46 橫梁振動量測-第二次敲擊 x 方向位移(point 1~ point 4)	134
圖 4 - 47 橫梁振動量測-第二次敲擊 x 方向位移(point 5~ point 8)	134

圖 4 - 48 橫梁振動量測-第二次敲擊 y 方向位移(point 1~ point 4).....	135
圖 4 - 49 橫梁振動量測-第二次敲擊 y 方向位移(point 5~ point 8).....	135
圖 4 - 50 橫梁振動量測-第三次敲擊 x 方向位移(point 1~ point 4).....	136
圖 4 - 51 橫梁振動量測-第三次敲擊 x 方向位移(point 5~ point 8)	136
圖 4 - 52 橫梁振動量測-第三次敲擊 y 方向位移(point 1~ point 4).....	137
圖 4 - 53 橫梁振動量測-第三次敲擊 y 方向位移(point 5~ point 8).....	137
圖 4 - 54 橫梁振動頻域訊號-第一次敲擊 x 方向	138
圖 4 - 55 橫梁振動頻域訊號-第一次敲擊 y 方向	139
圖 4 - 56 橫梁振動頻域訊號-第二次敲擊 x 方向	140
圖 4 - 57 橫梁振動頻域訊號-第二次敲擊 y 方向	141
圖 4 - 58 橫梁振動頻域訊號-第三次敲擊 x 方向	142
圖 4 - 59 橫梁振動頻域訊號-第三次敲擊 y 方向	143
圖 5 - 1 動圈式揚聲器運作原理示意圖	163
圖 5 - 2 黏彈性材料馬克斯威爾模型與凱文-佛伊格等效模型示意圖.....	163
圖 5 - 3 黏彈性材料廣義馬克斯威爾等效模型示意圖	164
圖 5 - 4 揚聲器結構圖	164
圖 5 - 5 ASTM D638 Type IV 規格圖(取自 ASTM D638 規範文件)	165
圖 5 - 6 橡膠試片拉伸試驗架設圖	165
圖 5 - 7 樣板更新法示意圖	166
圖 5 - 8 樣板更新法流程圖	166
圖 5 - 9 真實應變示意圖	167
圖 5 - 10 雙閾值樣板更新流程圖	167
圖 5 - 11 未使用雙閾值樣板更新應變量測結果.....	168
圖 5 - 12 使用雙閾值樣板更新後應變量測結果.....	168

圖 5 - 13 重設初始猜值流程圖	169
圖 5 - 14 未使用重設初始猜值相關係數波動	170
圖 5 - 15 使用重設初始猜值相關線數波動	170
圖 5 - 16 未使用重設初始猜值應變量測結果	170
圖 5 - 17 使用重設初始猜值後應變量測結果	171
圖 5 - 18 標準 30 試片拉伸試驗軸向應變	171
圖 5 - 19 標準 40 試片拉伸試驗軸向應變	171
圖 5 - 20 標準 50 試片拉伸試驗軸向應變	172
圖 5 - 21 發泡 30 試片拉伸試驗軸向應變	172
圖 5 - 22 發泡 40 試片拉伸試驗軸向應變	172
圖 5 - 23 發泡 50 試片拉伸試驗軸向應變	173
圖 5 - 24 標準 30 試片拉伸試驗橫向應變	173
圖 5 - 25 標準 40 試片拉伸試驗橫向應變	173
圖 5 - 26 標準 50 試片拉伸試驗橫向應變	174
圖 5 - 27 發泡 30 試片拉伸試驗橫向應變	174
圖 5 - 28 發泡 40 試片拉伸試驗橫向應變	174
圖 5 - 29 發泡 50 試片拉伸試驗橫向應變	175
圖 5 - 30 標準 30 試片拉伸試驗應力-應變曲線	175
圖 5 - 31 標準 40 試片拉伸試驗應力-應變曲線	175
圖 5 - 32 標準 50 試片拉伸試驗應力-應變曲線	176
圖 5 - 33 發泡 30 試片拉伸試驗應力-應變曲線	176
圖 5 - 34 發泡 40 試片拉伸試驗應力-應變曲線	176
圖 5 - 35 發泡 50 試片拉伸試驗應力-應變曲線	177
圖 5 - 36 標準試片應力-應變曲線及線性段擬合結果	177

圖 5 - 37 發泡試片應力-應變曲線及線性段擬合結果	177
圖 5 - 38 標準 30 蒲松比直接計算結果.....	178
圖 5 - 39 標準 40 蒲松比直接計算結果.....	178
圖 5 - 40 標準 50 蒲松比直接計算結果.....	178
圖 5 - 41 發泡 30 蒲松比直接計算結果.....	179
圖 5 - 42 發泡 40 蒲松比直接計算結果.....	179
圖 5 - 43 發泡 50 蒲松比直接計算結果.....	179
圖 5 - 44 C 型扣環邊界條件設定圖	180
圖 5 - 45 聯合體 1 設定圖	180
圖 5 - 46 聯合體 2 設定圖	180
圖 5 - 47 對稱條件 1 設定圖	181
圖 5 - 48 對稱條件 2 設定圖	181
圖 5 - 49 揚聲器有限元素模型網格.....	181
圖 5 - 50 振動分析點位置.....	182
圖 5 - 51 揚聲器有限元素分析振動位移結果.....	182
圖 5 - 52 揚聲器有限元素分析振動加速度結果.....	183
圖 5 - 53 揚聲器有限元素分析振動位移量值比較.....	183
圖 5 - 54 揚聲器共振模態結果.....	184
圖 5 - 55 參數化掃描結果-A 點位移	184
圖 5 - 56 參數化掃描結果-B 點位移	185
圖 5 - 57 參數化掃描結果-A 點加速度.....	185
圖 5 - 58 參數化掃描結果-B 點加速度.....	186
圖 5 - 59 揚聲器單點振動位移驗證實驗架設- 光纖位移計.....	186
圖 5 - 60 揚聲器單點振動位移驗證實驗架設- 雷射都卜勒測振儀.....	187

圖 5 - 61 光纖位移計揚聲器單點振動位移量測結果- A 點.....	187
圖 5 - 62 光纖位移計揚聲器單點振動位移量測結果- B 點.....	188
圖 5 - 63 雷射都卜勒測振儀揚聲器單點振動位移量測結果- A 點.....	188
圖 5 - 64 雷射都卜勒測振儀揚聲器單點振動位移量測結果- B 點.....	188
圖 5 - 65 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 30 A 點.....	189
圖 5 - 66 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 30 B 點.....	189
圖 5 - 67 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 40 A 點.....	189
圖 5 - 68 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 40 B 點.....	190
圖 5 - 69 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 50 A 點.....	190
圖 5 - 70 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 50 B 點.....	190

表次



表 2 - 1 數位工業相機 GS3-U3-23S6M-C 規格表	31
表 2 - 2 數位工業相機鏡頭-V0814-MP 規格表.....	31
表 2 - 3 數位工業相機鏡頭 TEC-M55 規格表	32
表 2 - 4 雷射位移計- LK-H055 規格表	32
表 3 - 1 懸臂薄板靜態位移實驗材料係數.....	64
表 3 - 2 風機葉片形貌重建誤差分析	64
表 3 - 3 ASTM D638 Type I 試片規格表	64
表 4 - 1 不同螺栓鎖固條件下風機葉片共振頻率變化- DIC.....	108
表 4 - 2 不同螺栓鎖固條件下風機葉片共振頻率變化- LD	108
表 4 - 3 風機葉片阻尼比	108
表 4 - 4 風機底座峰值頻率	109
表 4 - 5 風機底座共振頻率與 x 、 y 方向振幅	109
表 5 - 1 ASTM D638 Type IV 尺寸規格表	160
表 5 - 2 橡膠試片楊氏模數(MPa).....	160
表 5 - 3 揚聲器有限元素模型材料表	161
表 5 - 4 緩衝圈材料參數表	162



第一章 前言



1.1 研究動機

在工業產品的生命週期中，從設計、製造到運作、維護，直至報廢或回收再利用，各個階段都需要透過量測技術獲取必要的資訊，從而幫助工程人員找到解決方案，因此量測系統在工程領域中一直扮演著關鍵的角色。隨著科技的不斷發展，對量測精度的需求日益增加，而學術界也持續的發展量測技術。以距離、位移或變形的量測為例，從早期的機械式尺規工具到應變規等應用電學的技術，再到近年來如電子斑點干涉術（Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI）、光彈法（Photoelasticity）等光學檢測技術的發展，相較於傳統量測技術，這些新技術具備高精度、全場、非接觸式量測等優勢，因此被廣泛應用於民生工業、生物醫療和國防科技等領域。

除了將現實世界的資訊轉化為數據的量測技術外，當今工程界亦力求通過計算模擬實際行為的擬真技術。其中，有限元素法（Finite Element Method, FEM）在固體力學領域中，能夠通過數值計算模擬複雜的結構系統，能大幅降低製造樣品一一進行測試的成本。然而建立有限元素分析模型前必須有電腦輔助設計(Computer-Aided Design, CAD)模型及材料參數，也讓模擬技術與量測技術成為一體兩面的存在，在實際應用中缺一不可。

本論文的主題，數位影像相關法（Digital Image Correlation, DIC），為光學檢測方法的一種。由於相機、攝影機等取像設備的數位化，加上電腦計算效能的迅速提升，能夠將影像轉為數位訊號，並通過演算法分析其中待測物的變形和位移等資訊。相較於電子斑點干涉術和光彈法等技術，數位影像相關法在實驗架設及待測物限制方面更小，並且通過改變相機和鏡頭，可以應用於不同時空間尺度的量測，因此在學術界和產業界均受到廣泛關注與發展。



本文首先針對數位影像相關法於全場及動態量測上的問題進行改良，包括自動選點、誤差改善及變形重建相關的數據處理方法，並針對接近產業界問題的複雜幾何外觀結構物進行量測，以最大化發揮數位影像相關法的優勢。於後半部分中，使用數位影像相關法配合其他量測技術，量測有限元素分析所需的材料參數，最後透過 COMSOL Multiphysics 建立有限元素模型進行分析，展現數位影像相關法於實際工程問題中，與模擬技術結合的應用。

1.2 文獻回顧

於 1980 年代，美國南卡萊納大學的 Peters 等學者[1]建立了數位影像相關法的雛形，以電子斑點干涉術之原理出發點，使用雷射照射待測物表面產生特徵，並透過交叉相關(Cross Correlation)計算出鋁片的鋼體位移。隨後，Sutton 等學者[2]改為使用噴漆在物體表面上製作特徵，並提出雙線性插值法(Bilinear Interpolation Method)將離散之像素資料重建為連續資料，使數位影像相關法能量測次像素變形，再使用粗細迭代法(Coarse-fine Iteration Method)計算一階變形函數的收斂值。Chu 等學者[3]使用交叉相關，並討論了多項式插值法(Polynomial Interpolation)及數種疊代演算法在剛體平移、剛體旋轉及變形的量測。Lu 等學者[4]提出二階變形函數，在大變形量測中有更佳的精度。

為了提高數位影像相關法的精度，Sutton 等學者[5]提出牛頓拉福森法(Newton-Raphson Method, NR method)，Bruck 等人[6]在迭代過程中，使用雙立方內插(Bicubic Spline Interpolation)取代粗細迭代法。Vendroux [7]透過忽略牛頓拉福森法中海森矩陣(Hessian Matrix)的高階項，建立正向疊加牛頓拉福森法(Forward additive Newton-Raphson method, FA-NR)，提升了計算效率。Baker 等學者[8][9]以其為基礎，提出反向合成高斯牛頓法(Inverse Compositional Gauss-Newton Method, IC-GN)，在提升速度的同時其結果等價於 FA-NR。Pan 等學者[10][11]將 IC-GN 應用於實際量測，

Gao 等學者[12]使用二階形狀函數配合 IC-GN 進行迭代，提升在大變形下的量測精度。

在影像座標與世界座標的換算上，Kahn-Jetter 等學者[13]提出三維數位影像相關法(Stereo DIC)，透過三角量測原理將多個二維座標轉換為三維世界座標。Luo 等學者[14]進一步利用已知做標點配合非線性為小平方法求得雙相機系統間的座標轉換關係及相機內部參數。Zhang[15]提出透過拍攝棋盤格計算相機的內外部參數，其流程簡單、精度高且應用靈活，是目前應用最廣泛的相機校正演算法。

在產業界中，亦有業者開發以數位影像相關法技術為基礎的量測系統，其中美國 Correlated Solutions 開發之 VIC-2D/3D [16][17]和德國 Gesellschaft für optische Messtechnik (GOM)所推出的 GOM Correlate 等，是數位影像相關法技術發展成熟下的商業軟體。然而在學術研究中，使用這些軟體會使對設備、系統整合及演算法細節修改受到限制，使研究主題缺乏彈性。本實驗室於數位影像相關法領域已發展多年時間，其中張敬源[18]使用數位影像相關法及電子斑點干涉術進行全場量測，建立本實驗室全場數位影像相關法量測系統的基礎。周宛萱等人[19]-[23]使用數位影像相關法針對大型土木結構及微觀尺度之奈米材料等結構進行量測，顯示數位影像相關法之跨尺度量測能力。王盛儀[24]使用數位影像相關法進行圓環受力之全場變形分析，並進行二維軌跡量測及三維形貌重建實驗。黃右年等人[25]-[31]使用數位影像相關法進行機械手臂之軌跡量測及人機共工研究。吳冠甫[32]則引入了特徵圖像匹配進行全場選點及特徵點追蹤，並應用至三圍形貌重建及全場變形量測。本研究以過去實驗室開發之全場及動態量測方法為基礎，進一步提升量測精度及使用便利性，於技術及實用面增進本實驗室之數位影像相關法量測技術。

1.3 內容簡介

本論文以數位影像相關法為核心技術，針對量測流程、演算機制及數據處理等



方面進行優化。在實驗方面，本文分析之問題著重視實務性，包括風力發電機系統及橡膠試片拉伸試驗，其中全場、動態的量測將最大化發揮數位影像相關法的優勢。在最後一部分中，將數位影像相關法的量測結果套用至有限元素模型之設定，加上驗證實驗進行對產業界實務問題的完整分析，展現數位影像相關法的實用價值。論文各章節內容概要如下：

第一章 緒論

介紹本論文之研究動機及研究相關的背景資料，回顧數位影像相關法的發展並介紹本文各章節的架構。

第二章 數位影像相關法原理與實驗儀器介紹

本章首先介紹數位影像相關法之量測流程與特色，再進一步解釋名詞定義與背後的計算原理。其中以整像素的相關係數出發，到數種的次像素迭代演算法，再介紹二維及三維數位影像相關法中影像座標與世界座標間的轉換關係。本章最後會對實驗使用的各種設備進行簡介，介紹其用途及運作原理。

第三章 提升數位影像相關法全場量測表現

本章透過對選點及數據處理機制的優化提升全場量測的精度。首先介紹過往本實驗室在全場量測上使用的方法，並於第二部分中對基礎的均勻四邊形網格引入誤差點篩選機制，透過去除偏差的選點提升精度。第三部分將 Distmesh 演算法套用至數位影像相關法的全場選點中，使本實驗室的數位影像相關法程式能更方便的應用至複雜幾何外型的全場量測問題，同時也將逐點最小平方法(Pointwise least squares, PLS)與誤差點篩選套用至三角形網格。對於本章中提出的方法改良，會分別進行數個簡單的實驗以驗證其效果。



第四章 風力發電系統動態變形量測與全場位移重建

本章對風力發電系統中的重要結構進行動態量測，並進一步進行位移重建，以完整了解其動態特性。前半部分針對風力發電機葉片進行量測，先進行單點量測配合雷射位移計驗證結果，再延伸至全場量測取得整隻葉片的動態變形。配合誤差點篩選能大幅降低原始資料中的雜訊，成功重建風機葉片之暫態位移，透過擬合振動位移峰值能得到葉片之阻尼比，最後配合帶通濾波器重建風機葉片之模態形狀。

在第二部分中，使用數位影像相關法量測離岸風機底座模型之振動，透過不同的角度及敲擊位置分析結構的頻率響應，並與風機葉片之量測結合完成對風力發電機整體結構之動態變形量測。

第五章 揚聲器緩衝圈減振效果實驗及理論分析

本章內容為產學合作計畫，目標為分析合作廠商設計之揚聲器單體中不同緩衝圈材質之減振效果，透過有限元素法建立電腦輔助工程(Computer Aided Engineering, CAE)模型降低製作樣品實測的成本。本章前半部分透過拉伸試驗量測六種不同緩衝圈材料的材料係數，配合數位影像相關法驗證軸向應變精度並量測橫向應變以計算蒲松比。其中會介紹到數位影像相關法在大變形量測下遇到的挑戰及對應的解決方法。在後半段中，使用實驗得到之材料參數，以 COMSOL Multiphysics 對揚聲器進行振動分析，比較緩衝圈材料的減振效果，最後以單點振動量測實驗驗證模擬結果，其中在共振頻率及相對振幅上兩者之結果有所對應。

第六章 結論與未來展望

本章對本論文之研究成果進行總結，並提出本研究中值得繼續鑽研或改善的問題。



第二章 數位影像相關法原理與實驗儀器介紹

本章將介紹數位影像相關法之計算原理與本文中實驗使用到的實驗儀器設備。原理部分依序針對專有名詞定義、搜尋演算法與數位影像相關法種類進行介紹，其次介紹用於驗證數位影像相關法精度與在揚聲器有限元素模型中用於材料測試及驗證實驗之儀器。

2.1 數位影像相關法簡介

2.1.1 數位影像相關法量測流程與特色

數位影像相關法(Digital Image Correlation, DIC)為一種追蹤連續數位影像中選定的特徵以量測位移或變形的技術。透過數位相機將待測物之影像擷取為數位訊號，得到像素(pixel)之強度量質(intensity)資料，做為追蹤特徵的依據。常見的影像形式有灰階與三通道彩色影像，其中灰階影像只有單一通道代表各像素之灰階亮度，而彩色影像之三通道分別代表紅、綠、藍三原色。通道之強度量質多以 8 位元資料格式儲存，其數值在 0 到 255 間，數字越大代表越高的亮度。

得到數位影像後，會透過程式進行數位影像相關法之計算，首先會選取一或多個感興趣影像區域(Region of interest, ROI)並以其強度量質資料建立樣本子集合(Template subset)，再透過計算樣本子集合與連續影像中強度量質的交叉相關(cross correlation)，尋找其他影像中和樣本子集合有高相關性的區域，進行對感興趣影像區域之追蹤，得到影像中感興趣影像區域之位移。

數位影像相關法為非接觸、非破壞式的量測技術，並有多點量測、全場量測、架設簡單與環境需求低等優勢。隨著相機技術之發展與電腦計算效能之提升能夠進行跨尺度量測、即時監測並達到高取樣頻率。結合以上特色，數位影像相關法在相關工程領域及學術研究有廣泛的應用，在技術成熟的同時保有研究的潛力與價值。



2.1.2 時間參數

在動態量測中，紀錄相機之取樣時間是必須的，因此實驗中使用幀率(Frame rate)紀錄單位時間內拍攝之影像數量，通常以每秒拍攝張數(Frame per second, fps)表示。對於不同數位相機，通常依設計用途、使用者設定等因素具備不同的取樣速度，以本實驗室常用的工業相機為例，其最高幀率為 163 fps，而高速攝影機則能達到數千甚至超過 100000 fps 之取樣速度。

然而，在實際數位影像相關法之拍攝系統中幀率並非只受到相機之影響。在即時量測系統中，每次拍攝的間隔需要完成數位影像相關法的計算；若在非即時量測系統，則需要進行相片的儲存或使用記憶體進行暫存，若以記憶體暫存影像，雖然能得到較高的取樣頻率，但拍攝總時間會受限於記憶體大小。因此，系統之取樣頻率會受到相機最高取樣頻率、程式計算效率、影片時長、硬碟儲存速度與相片解析度等因素影響，在實驗時需要依需求選擇適當的設備與設定。

2.1.3 空間參數

數位影像的最小組成單位以像素表示，以實驗室常用工業相機為例，其解析度為 1920×1200 個像素，而相機座標會以像素點之橫、縱軸位置表示。在二維數位影像相關法中，空間參數(Gauge factor)代表影像中以像素為單位之尺寸與實際座標中尺寸之換算關係，常用單位為 mm/pixel。在三維數位影像相關法中，以三角量測法計算雙相機之影像座標與空間座標之關係，因此個別相機之空間參數並無實際意義，僅能作為影像與實際座標間比例之估算。

2.1.4 樣本子集合與搜尋子集合

如前文所述，數位影像相關法之計算中，會先選取感興趣區域並建立樣本子集合，作為進行交叉相關尋找特徵之依據。在實際操作上樣本子集合之大小為手動設定之參數，其尺寸以半窗格(Half window)表示，通常以 M 代稱之。首先會選取追

蹤目標點，又稱為感興趣點(Point of interest, POI)，並由該點所在之像素向四周延伸 M 的長度，形成一邊長為 $2M + 1$ 之正方形，即為感興趣區域，包含像素之亮度資料稱為樣本子集合，如圖 2 - 1 所示。

數位影像相關法計算樣本子集合與其他影像間之交叉相關，但在整張影像進行計算會耗費大量計算資源，也有追蹤到畫面中其他與樣本子集合相似之特徵的風險。考量一影像序列影像中物體運動軌跡連續，物體之位移能被預期在畫面中一定範圍內，縮小進行交叉相關之搜索範圍能大幅增加計算速度，同時避免追蹤錯誤之風險。此外，在進行多點量測時，常在待測物上貼附復數相似特徵點，例如噴漆斑點、文字、網版印刷或 QR Code 等，如圖 2 - 2 所示。適當的縮小搜索範圍可以使實驗時無須注意複數特徵點的相似性，簡化實驗的架設。

進行交叉之搜索範圍稱為搜尋子集合(Search template)，其大小以搜尋窗格(Search window)定義，代號為 N ，由樣本子集合四邊向外延伸 N 個像素，形成一 $(2M + 2N + 1) \times (2M + 2N + 1)$ 像素之正方形。縮小搜尋窗格雖能避免追蹤錯誤並提升計算效率，但在追蹤時若目標超出搜尋範圍會造成搜尋失敗，因此搜尋窗格之大小須依實驗架設、相機解析度等因素進行不同的設定。

2.2 數位影像相關法計算原理

數位影像相關法之計算可分為兩個主要步驟：整像素求解(Integer pixel level solution)與增加精度的次像素求解(Subpixel level solution)。本節將介紹計算影像座標之搜尋演算法，再介紹於二維及三維數位影像相關法中將影像座標轉換至世界座標之數學模型。

2.2.1 整像素求解

整像素求解之追蹤機制如圖 2 - 3 所示，左側的 f 為參考影像，包含欲搜尋的

樣本子集合，即圖 2-1 中藍色部分，其中心像素座標為 (x, y) ，而右側之 g 為欲計算之目標影像。在參考影像中由中心座標向四周延伸 N 個像素可得到樣本子集合，將其強度資料以矩陣形式表示，代號為 t ，另在目標影像中由中心座標向外延伸 $M + N$ 個像素作為搜尋子集合，計算特定位置之交叉相關係數時會取出以該點為中心，與樣本子集合同樣大小的區域，代號為 s ，將 t 及 s 進行交叉相關，公式可參考式(2.1)，

$$C_{CC} = \sum_{i=1}^N t_i \cdot s_i \quad (2.1)$$

式(2.1)中 t_i 與代表樣本子集合中第 i 個元素之強度值； s_i 則代表計算位置對應之 s 矩陣中第 i 個元素。針對不同位置計算交叉相關，藉由相關係數大小能尋找搜尋子集合中與樣本子集合相似的區域。

然而在實際實驗拍攝之連續影像中，不同區域、不同影像間之亮度不均勻，故透過相關係數 C_{CC} 容易受到影響，找出之最大值位置無法代表樣本子集合變形之位移。

正規化相關係數(Normalized cross correlation, NCC)如式(2.2)，是在計算前對亮度值進行正規化，再進一步減去亮度平均值即為零正規化交叉相關(Zero-normalized cross correlation, ZNCC)，公式如式(2.3)，

$$C_{NCC} = \sum_{i=1}^N \frac{t_i \cdot s_i}{\bar{t} \cdot \bar{s}} \quad (2.2)$$

$$C_{ZNCC} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(t_i - t_m) \cdot (s_i - s_m)}{\Delta t \cdot \Delta s} \right] \quad (2.3)$$

對於 t 與 s 兩集合， $\bar{t}$ 與 $\bar{s}$ 分別為其歐幾里德範數(Euclidean norm)， t_m 與 s_m 為兩極和個別之平均值，而 Δt 與 Δs 為離均差之歐幾里得範數，其數學式分別以(2.4)式、(2.5)式及、(2.6)式表示。



$$\bar{t} = \sqrt{\sum_{i=1}^N t_i^2}, \bar{s} = \sqrt{\sum_{i=1}^N s_i^2} \quad (2.4)$$

$$t_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, s_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i \quad (2.5)$$

$$\Delta t = \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - t_m)^2}, \Delta s = \sqrt{\sum_{i=1}^N (s_i - s_m)^2} \quad (2.6)$$

此外，總平方差(Sum of squared differences, SSD)為計算相關性的另一種方式，其值越小代表越高的相關性，以其為基礎可衍生出正規化總平方差(Normalized sum of squared differences, NSSD)及零正規化總平方差(Zero Normalized sum of squared differences, ZNSSD)計算如式(2.7)至式(2.9)表示，而其結果可以式(2.10)至式(2.12)與交叉相關之結果進行換算。

$$C_{SSD} = \sum_{i=1}^N (t_i - s_i)^2 \quad (2.7)$$

$$C_{NSSD} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i}{\bar{t}} - \frac{s_i}{\bar{s}} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$C_{ZNCC} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i - t_m}{\Delta t} - \frac{s_i - s_m}{\Delta s} \right)^2 \quad (2.9)$$

$$C_{SSD} = 2(1 - C_{CC}) \quad (2.10)$$

$$C_{NSSD} = 2(1 - C_{NCC}) \quad (2.11)$$

$$C_{ZNSSD} = 2(1 - C_{ZNCC}) \quad (2.12)$$

2.2.2 次像素搜尋演算法

為了提升數位影像相關法的精度，實際應用上會在整像素解的基礎上使用次

像素搜尋演算法進一步進行計算，常用的方法有相關係數極值搜尋法(Correlation coefficient peak finding, CCPF)、反向合成高斯牛頓法(Inverse compositional Gauss-Newton method, IC-GN)等，另外 IC-GN 之原理由牛頓拉福森法(Newton-Raphson method, NR method)與正向疊加牛頓拉福森法(Forward additive Newton-Raphson method, FA-NR)演進而成，於本小節會詳細介紹這些演算法。

相關係數極值搜尋法(Correlation coefficient peak finding, CCPF)

CCPF 是本實驗室最常使用的的次像素搜尋演算法，其精度最高可達到 0.02 pixel，且計算速度較 IC-GN 等迭代演算法快上許多。其計算以整像素解與相鄰之八個像素之相關係數為基礎，如圖 2-4，並使用二次曲面擬合，如式(2.13)，尋找相關係數場在次像素下的極值。

$$C_{NCC} = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (2.13)$$

式(2.13)中有六個待定係數，由整像素解與相鄰的八個像素之相關係數值透過最小平方法得出，如式(2.14)所示，

$$E = \sum_{j=1}^N \left[C_j - (a_0 + a_1x_j + a_2y_j + a_3x_j^2 + a_4x_jy_j + a_5y_j^2) \right]^2 \quad (2.14)$$

其中 C_j 為整像素解與相鄰像素之相關係數值， (x_j, y_j) 為其位置，共有九筆已知資訊。未得出平方差 E 之最小值，平方差對六個待定係數之微分值須為零，關係如式(2.15)，最後將其表示為式(2.16)之矩陣形式，方便電腦進行求解。



$$\begin{aligned}
\frac{\partial E}{\partial a_0} &= 2 \sum_{j=1}^N [c_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 x_j^2 + a_4 x_j y_j + a_5 y_j^2)](-1) = 0 \\
\frac{\partial E}{\partial a_1} &= 2 \sum_{j=1}^N [c_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 x_j^2 + a_4 x_j y_j + a_5 y_j^2)](-x_j) = 0 \\
\frac{\partial E}{\partial a_2} &= 2 \sum_{j=1}^N [c_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 x_j^2 + a_4 x_j y_j + a_5 y_j^2)](-y_j) = 0 \\
\frac{\partial E}{\partial a_3} &= 2 \sum_{j=1}^N [c_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 x_j^2 + a_4 x_j y_j + a_5 y_j^2)](-x_j^2) = 0 \\
\frac{\partial E}{\partial a_4} &= 2 \sum_{j=1}^N [c_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 x_j^2 + a_4 x_j y_j + a_5 y_j^2)](-x_j y_j) = 0 \\
\frac{\partial E}{\partial a_5} &= 2 \sum_{j=1}^N [c_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 x_j^2 + a_4 x_j y_j + a_5 y_j^2)](-y_j^2) = 0
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} 1 & x_j & y_j & x_j^2 & x_j y_j & y_j^2 \\ x_j & x_j^2 & x_j y_j & x_j^3 & x_j^2 y_j & x_j y_j^2 \\ y_j & x_j y_j & y_j^2 & x_j^2 y_j & x_j y_j^2 & y_j^3 \\ x_j^2 & x_j^3 & x_j^2 y_j & x_j^4 & x_j^3 y_j & x_j^2 y_j^2 \\ x_j y_j & x_j^2 y_j & x_j y_j^2 & x_j^3 y_j & x_j^2 y_j^2 & x_j y_j^3 \\ y_j^2 & x_j y_j^2 & y_j^3 & x_j^2 y_j^2 & x_j y_j^3 & y_j^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} c_j \\ x_j c_j \\ y_j c_j \\ x_j^2 c_j \\ x_j y_j c_j \\ y_j^2 c_j \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

得到待定係數後，將式(2.13)對 x 和 y 微分得到式(2.17)，由微分等於零之位置可得出擬合曲面上相關係數最大值之位置，即 (x_s, y_s) ，如式(2.18)。最後將次像數解加到整像數解中，如式(2.19)，得到具次像素精度之結果。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{NCC}}{\partial x} &= a_1 + 2a_3 x + a_4 y = 0 \\
\frac{\partial C_{NCC}}{\partial y} &= a_2 + 2a_5 y + a_4 x = 0
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
x_s &= \frac{2a_1 a_5 - a_2 a_4}{a_4^2 - 4a_3 a_5} \\
y_s &= \frac{2a_2 a_3 - a_1 a_4}{a_4^2 - 4a_3 a_5}
\end{aligned} \tag{2.18}$$



$$\begin{aligned} x^* &= x_i + x_s \\ y^* &= y_i + y_s \end{aligned} \quad (2.19)$$

牛頓拉福森法(Newton-Raphson method, NR method)

對於需求更高精度之量測問題，或需考量樣板子集合變形計算應變等情形，使用迭代演算法計算樣板變形是主流的高精度次像素搜尋方式。牛頓拉普森法(Newton-Raphson method, NR method)引入形狀函數(Shape function)描述樣板之變形，以一階形狀函數為例，樣板之變形包括剛體位移 (u_0, v_0) 及一階變形 $u_{0,x}$ 、 $u_{0,y}$ 、 $v_{0,x}$ 及 $v_{0,y}$ ，如圖 2 - 5 及圖 2 - 6 所示，樣板子集合之中心座標為 (x, y) ，演算時會先對位移及變形進行初始猜值， $P_0 = [u_0 \quad u_{0,x} \quad u_{0,y} \quad v_0 \quad v_{0,x} \quad v_{0,y}]^T$ 並代入一階變形方程式計算樣板子集合之末位置猜值 (x^*, y^*) ，

$$\begin{aligned} x^* &= x + u_0 + u_{0,x} \cdot \Delta x + \Delta x + u_{0,y} \cdot \Delta y \\ y^* &= y + v_0 + v_{0,x} \cdot \Delta x + \Delta y + v_{0,y} \cdot \Delta y \end{aligned} \quad (2.20)$$

其中 $(\Delta x, \Delta y)$ 為樣板子集合中一點 Q 與中心座標之差值，經過上式可得到變形後之樣板子集合，並計算與搜尋子集合之相關係數，透過零正規化總平方差得到式(2.21)，

$$C_{ZNSSD} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\frac{f(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(x^*, y^*) - \bar{g}}{\Delta g} \right]^2 \quad (2.21)$$

將上式進行泰勒展開後得到式(2.22)，其中 *H.O.T.* 為可忽略之高階項，將其忽略並設 $\Delta \tilde{P} = \tilde{P} - P_0$ ， $\Delta \tilde{P} = [\Delta u \quad \Delta u_{,x} \quad \Delta u_{,y} \quad \Delta v \quad \Delta v_{,x} \quad \Delta v_{,y}]^T$ 為初始猜值與實際變形 $\tilde{P}$ 之誤差，得到式(2.23)，

$$C_{ZNSSD} = C_{ZNSSD}(\underline{P}_0) + \nabla C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)(\underline{P} - \underline{P}_0) + H.O.T. \quad (2.22)$$

$$C_{ZNSSD} = C_{ZNSSD}(\underline{P}_0) + \sum_{m=1}^6 \frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_m} \cdot \Delta P_m \quad (2.23)$$

為得出極小值，另 C_{ZNSSD} 對真實變形 $\underline{P}$ 之偏微分為零，得到式(2.24)，

$$\frac{\partial C_{ZNSSD}}{\partial P_n} = 0 = \frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_n} + \sum_{m=1}^6 \frac{\partial^2 C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_m \partial P_n} \cdot \Delta P_m \quad (2.24)$$

將式(2.24)中之微分項展開，得到式(2.25)及式(2.26)，

$$\frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_n} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \frac{2}{\Delta g} \left[\frac{f(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(x^*, y^*) - \bar{g}}{\Delta g} \right] \cdot \left[-\frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial P_n} \right] \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_m \partial P_n} &= \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \frac{2}{\Delta g^2} \left[\frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial P_m} \right] \cdot \left[\frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial P_n} \right] \\ &+ \frac{2}{\Delta g} \left[\frac{f(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(x^*, y^*) - \bar{g}}{\Delta g} \right] \cdot \left[-\frac{\partial^2 g(x^*, y^*)}{\partial P_m \partial P_n} \right] \end{aligned} \quad (2.26)$$

針對式(2.26)，Vendroux 等人[7]提出忽略高階項之近似解，能夠大幅提升計算效率，其解如式(2.27)。

$$\frac{\partial^2 C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_m \partial P_n} \cong \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \frac{2}{\Delta g^2} \left[\frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial P_m} \right] \cdot \left[\frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial P_n} \right] \quad (2.27)$$

將微分項之結果代入式(2.24)，並以矩陣形式表示為式(2.28)，另經移項後可得到式



(2.29) ,

$$\mathbf{0} = \nabla C_{ZNSSD}(\underline{P}_0) + \mathbf{H} \cdot \Delta \underline{P} \quad (2.28)$$

$$\Delta \underline{P} = \Delta g \cdot \mathbf{H}^{-1} \cdot \nabla C_{ZNSSD}(\underline{P}_0) \quad (2.29)$$

至此得出真實變形與初始猜值之差值 $\Delta \underline{P}$ ，其中 $\nabla C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)$ 為相關係數對變形猜值

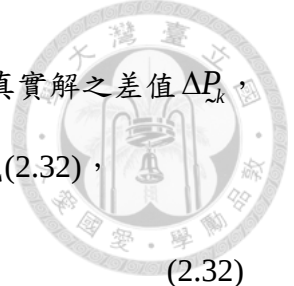
之梯度，展開後得到式(2.30)， $\mathbf{H}$ 則為海森矩陣(Hessian Matrix)，將 C_{ZNSSD} 簡寫為 C ，

以式(2.31)表示。

$$\nabla C_{ZNSSD}(\underline{P}_0) = \left[\frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_1} \quad \frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_2} \quad \frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_3} \quad \frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_4} \quad \frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_5} \quad \frac{\partial C_{ZNSSD}(\underline{P}_0)}{\partial P_6} \right]^T \quad (2.30)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_1 \partial P_1} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_1 \partial P_2} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_1 \partial P_3} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_1 \partial P_4} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_1 \partial P_5} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_1 \partial P_6} \\ \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_2 \partial P_1} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_2 \partial P_2} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_2 \partial P_3} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_2 \partial P_4} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_2 \partial P_5} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_2 \partial P_6} \\ \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_3 \partial P_1} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_3 \partial P_2} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_3 \partial P_3} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_3 \partial P_4} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_3 \partial P_5} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_3 \partial P_6} \\ \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_4 \partial P_1} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_4 \partial P_2} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_4 \partial P_3} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_4 \partial P_4} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_4 \partial P_5} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_4 \partial P_6} \\ \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_5 \partial P_1} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_5 \partial P_2} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_5 \partial P_3} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_5 \partial P_4} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_5 \partial P_5} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_5 \partial P_6} \\ \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_6 \partial P_1} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_6 \partial P_2} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_6 \partial P_3} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_6 \partial P_4} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_6 \partial P_5} & \frac{\partial^2 C(\underline{P}_0)}{\partial P_6 \partial P_6} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$





假設進行 k 次迭代後得到變形猜值 P_k ，將其代入式(2.29)得到與真實解之差值 ΔP_k ，將差值與猜值相加得到下一次疊代之變形猜值 P_{k+1} ，其計算如式(2.32)，

$$P_{k+1} = P_k + \Delta P_k \quad (2.32)$$

如此反覆迭代直到誤差小於設定之閾值，能得出優秀的量測精度。然而牛頓拉福森法每次疊代時海森矩陣 $\mathbf{H}$ 與一階變形梯度參數 $\nabla C_{ZNSSD}(P_0)$ 皆須重新計算，計算效率不佳，並隨著更高的精度要求其迭代會上升，需要更多的計算時間。

正向疊加牛頓拉福森法(Forward additive Newton-Raphson method, FA-NR)

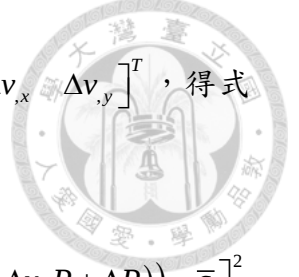
FA-NR 為牛頓拉福森法之改良，由於樣本子集合之灰階值在迭代過程中隨變形參數之變化不大，在迭代過程中設其為定值，並利用連鎖律，將計算相關係數對變形猜值之梯度的過程轉換為搜尋子集合對空間之梯度與變形函數對變形參數之梯度相乘，能夠大幅減少計算相關係數之次數。首先假設變形猜值為

$\underline{P} = [u \quad u_{,x} \quad u_{,y} \quad v \quad v_{,x} \quad v_{,y}]^T$ ，並改寫式(2.20)為矩陣形式，如式(2.33)，

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \underline{P}) = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+u_{,x} & u_{,y} & u \\ v_{,x} & 1+v_{,y} & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

其中 $W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \underline{P})$ 為變形函數(Warping function)，代表搜尋子集合之變形場，並代入零正規化總平方差之計算，改寫式(2.21)為式(2.34)。

$$C_{ZNSSD} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\frac{f(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \underline{0})) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \underline{P})) - \bar{g}}{\Delta g} \right]^2 \quad (2.34)$$



對搜尋子集合加入一為小變化量 $\Delta \underline{P} = [\Delta u \quad \Delta u_{,x} \quad \Delta u_{,y} \quad \Delta v \quad \Delta v_{,x} \quad \Delta v_{,y}]^T$ ，得式(2.35)，

$$C_{ZNSSD} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\frac{f(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, 0)) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, \underline{P} + \Delta \underline{P})) - \bar{g}}{\Delta g} \right]^2 \quad (2.35)$$

將式對變形參數 $\underline{P}$ 進行泰勒展開，留下一階項得到式(2.36)，

$$C_{ZNSSD} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\frac{f(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, 0)) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, \underline{P})) - \bar{g}}{\Delta g} - \frac{1}{\Delta g} \frac{\partial g(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, \underline{P}))}{\partial \underline{W}_1} \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \cdot \Delta \underline{P} \right]^2 \quad (2.36)$$

其中 $\frac{\partial g(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, \underline{P}))}{\partial \underline{W}_1}$ 為搜尋子集合對變形函數之梯度， $\frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}}$ 則是變形函數

對變形參數之梯度，如式(2.37)，又稱亞可比矩陣(Jacobian matrix)。

$$\frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x & \Delta y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

在求解前將符號進行簡化，如式(2.38)、式(2.39)及式(2.40)。

$$f = f(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, 0)) \quad (2.38)$$

$$g = g(\underline{W}_1(x+\Delta x, y+\Delta y, \underline{P}))$$

$$\nabla g = \frac{\partial g(\underline{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \underline{P}))}{\partial \underline{W}_1} = \left[\frac{\partial g(\underline{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \underline{P}))}{\partial x} \quad \frac{\partial g(\underline{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \underline{P}))}{\partial y} \right]$$

(2.40)

求式(2.36)對 $\Delta \underline{P}$ 梯度之零點，以得到其極值，如式(2.41)，將其移項展開後得式(2.42)，

$$\frac{\partial C_{ZNSSD}}{\partial \Delta \underline{P}} = 0 = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \frac{2}{\Delta g} \left[\nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\frac{f - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g - \bar{g}}{\Delta g} - \frac{1}{\Delta g} \nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \cdot \Delta \underline{P} \right] \quad (2.41)$$

$$\sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right] \cdot \Delta \underline{P} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\frac{\Delta g}{\Delta f} (f - \bar{f}) - (g - \bar{g}) \right] \quad (2.42)$$

由式(2.42)可求出 $\Delta \underline{P}$ ，如式(2.43)，其中 $\mathbf{H}$ 為海森矩陣，如式(2.44)。

$$\Delta \underline{P} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\frac{\Delta g}{\Delta f} (f - \bar{f}) - (g - \bar{g}) \right] \quad (2.43)$$

$$\mathbf{H} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\nabla g \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right] \quad (2.44)$$

比起原先的牛頓拉福森法，FA-NR 於每次迭代減少了 12 次相關性運算，計算效率有顯著的提升。

反向合成高斯牛頓法(Inverse compositional Gauss-Newton method, IC-GN)

IC-GN 改將 FA-NR 中設在搜尋子集合之變化量 $\Delta \underline{P}$ 設於樣本子集合中，能夠避免在疊代中重複計算搜尋子集合對變形函數之梯度與亞可比矩陣，以進一步提

升計算效率。IC-GN 中變形猜值為 $\tilde{P} = [u \ u_{,x} \ u_{,y} \ v \ v_{,x} \ v_{,y}]^T$ ，將其代入變形方程式，並將變形函數(Warping function)寫為 3×3 矩陣形式，得式(2.45)，其中 $W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{P})$ 即為變形函數。

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ 1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} + W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{P}) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+u_{,x} & u_{,y} & u \\ v_{,x} & 1+v_{,y} & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

同樣地，將變形代入零正規化總平方差公式，如式(2.46)。

$$C_{ZNSSD} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\frac{f(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{Q})) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{P})) - \bar{g}}{\Delta g} \right]^2 \quad (2.46)$$

在搜尋子集合中假設一微小變化量 $\Delta \tilde{P} = [\Delta u \ \Delta u_{,x} \ \Delta u_{,y} \ \Delta v \ \Delta v_{,x} \ \Delta v_{,y}]^T$ 使式(2.46)之相關係數有最小值，如式(2.47)。

$$C_{ZNSSD} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\frac{f(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \Delta \tilde{P})) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{P})) - \bar{g}}{\Delta g} \right]^2 \quad (2.47)$$

對式(2.47)中之變形參數 $\tilde{P}$ 進行泰勒級數展開，留下一階微分項得式(2.48)，

$$C_{ZNSSD} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\frac{f(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{Q})) - \bar{f}}{\Delta f} + \frac{1}{\Delta f} \frac{\partial f(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{Q}))}{\partial W_1} \frac{\partial W_1}{\partial \tilde{P}} \cdot \Delta \tilde{P} - \frac{g(W_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{P})) - \bar{g}}{\Delta g} \right]^2 \quad (2.48)$$



並將符號進行簡化，如式(2.49)、式(2.50)及式(2.51)。

$$f = f(\underline{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, 0)) \quad (2.49)$$

$$g = g(\underline{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, P)) \quad (2.50)$$

$$\nabla f = \frac{\partial f(\underline{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, 0))}{\partial \underline{W}_1} \quad (2.51)$$

令相關係數對變形函數微分值為零求其極小值，如式(2.52)，將其移項展開後可得式(2.53)，

$$\frac{\partial C_{ZNSSD}}{\partial \Delta \underline{P}} = 0 = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \frac{2}{\Delta f} \left[\nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\frac{f - \bar{f}}{\Delta f} + \frac{1}{\Delta f} \nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \cdot \Delta \underline{P} - \frac{g - \bar{g}}{\Delta g} \right] \quad (2.52)$$

$$\sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right] \cdot \Delta \underline{P} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[(f - \bar{f}) - \frac{\Delta f}{\Delta g} (g - \bar{g}) \right] \quad (2.53)$$

最後求得假設之變形參數變化量 $\Delta \underline{P}$ ，如式(2.54)，其中 $\mathbf{H}$ 為海森矩陣，如式(2.55)。

$$\Delta \underline{P} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[(f - \bar{f}) - \frac{\Delta f}{\Delta g} (g - \bar{g}) \right] \quad (2.54)$$

$$\mathbf{H} = \sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right]^T \left[\nabla f \frac{\partial \underline{W}_1}{\partial \underline{P}} \right] \quad (2.55)$$

若 k 次迭代後變形函數為 $\underline{W}_1(\underline{P}_k)$ ，則下次的變形函數 $\underline{W}_1(\underline{P}_{k+1})$ 以 $\Delta \underline{P}$ 進行修正，如式(2.56)。



$$\begin{aligned} \tilde{W}_1(\tilde{P}_{k+1}) &= \tilde{W}_1(\tilde{P}_k) \cdot \tilde{W}_1(\Delta \tilde{P}_k)^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 1+u_{,x} & u_{,y} & u \\ v_{,x} & 1+v_{,y} & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\Delta u_{,x} & \Delta u_{,y} & \Delta u \\ \Delta v_{,x} & 1+\Delta v_{,y} & \Delta v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

IC-GN 之詳細迭代過程如下：

預先計算：

1. 計算 $\tilde{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, 0)$ 時之 Δf ，如式(2.51)。
2. 計算 $\tilde{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, 0)$ 時亞可比矩陣 $\frac{\partial \tilde{W}_1}{\partial \tilde{P}}$ 。

$$\Delta f \frac{\partial \tilde{W}_1}{\partial \tilde{P}}。$$

3. 計算 $\Delta f \frac{\partial \tilde{W}_1}{\partial \tilde{P}}$ 。
4. 計算海森矩陣 $\mathbf{H}$ ，如式(2.55)。

迭代：

1. 使用變形函數 $\tilde{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{P})$ 變形樣板 g ，得 $g(\tilde{W}_1(x + \Delta x, y + \Delta y, \tilde{P}))$ ，如式(2.45)。

$$\frac{\Delta g}{\Delta f} (f - \bar{f}) - (g - \bar{g})。$$

$$\sum_{\Delta x=-M}^M \sum_{\Delta y=-M}^M \left[\nabla f \frac{\partial \tilde{W}_1}{\partial \tilde{P}} \right]^T \left[(f - \bar{f}) - \frac{\Delta f}{\Delta g} (g - \bar{g}) \right]。$$

4. 計算 $\Delta \tilde{P}$ ，如式(2.54)。
5. 計算新的變形函數猜值 $\tilde{W}_1(\tilde{P}_k)$ ，如式(2.56)。

反覆迭代直到誤差 $\|\Delta \tilde{P}\|$ 小於設定之閾值

藉由改變變形假設之位置，IC-GN 較 FA-NR 少了 4 次重複運算，使其計算效率進一步提升，是目前主流的迭代次像素演算法。

IC-GN 等迭代演算法除了有較高之精度外，由於變形函數之假設對變形後之特徵點會有較好的追蹤效果，另外能透過輸出變形函數直接得到樣本子集合中位移場的微分值，進一步計算樣板的應變，此特性會在本文後面的章節有所運用。然而，迭代演算法在使用上仍有一定的限制，首先其初始變形猜值 P 必須在一定的精度範圍中，才能有較好的收斂效果[10]，實務上會使用 CCPF 進行初始猜值，再使用 IC-GN 提高精度。另外，IC-GN 之計算速度 CCPF 及零正規化交叉相關低上許多，但對精度的提升卻有限，因此在本論文中，在需要高精度的變形量測及計算應變的量測實驗中會使用 IC-GN 進行運算，而在動態問題等影像總數較多時多使用 CCPF 進行追蹤。

2.2.3 二維數位影像相關法

二維數位影像相關法(Two-dimensional digital image correlation, 2D-DIC)使用單張數位影像量測特定平面上之面內位移，並由影像座標轉換為世界座標。理想的針孔成像模型(Pinhole camera model)呈現此轉換關係，如圖 2-7 所示，真實世界座標中的位置 (X, Y, Z) 會投影在影像座標 (u, v) 中，點 O 為相機投影終點， f 為影像之焦距，即點 O 與待測平面之距離， (c_x, c_y) 則是主軸(Principal axis)與影像的交點座標。座標之轉換關係由相似三角形特性求得，如圖 2-8 之上視圖與側視圖所示，影像座標與真實世界座標之關係表示為式(2.57)，

$$\frac{u - c_u}{f} = \frac{X}{Z}, \quad \frac{v - c_v}{f} = \frac{Y}{Z} \quad (2.57)$$

將式(2.57)移項得式(2.58)，在二維數位影像相關法中深度 Z 設為定值，故將其視為常數微分得到式(2.59)。

$$u - c_x = \frac{f}{Z} X, \quad v - c_y = \frac{f}{Z} Y \quad (2.58)$$

$$dX = \frac{Z}{f} du, \quad dY = \frac{Z}{f} dv \quad (2.59)$$



式(2.59)呈現世界座標變化量 dX 、 dY 與影像座標位置變化量 du 、 dv 之關係，兩者之比例關係(Z/f)即為二維數位影像相關法之空間參數。

在實際操作中，由於二維數位影像相關法深度固定之假設，實驗架設時應使待測平面與影像平面平行，否則 Z 會成為 (u, v) 的函數，使(2.59)式的微分不能成力，造成誤差發生。另外，真實情況下相機與理想針孔成像模型有些許差異，造成的誤差可分為徑向畸變(Radial distortion)及正切畸變(Tangential distortion)。

徑向畸變之成為真實情況下光線之折射角存在偏折，造成影像扭曲，其現象如圖 2-9 所示。透過式(2.60)之數學模型可描述徑向畸變前後之影像座標，

$$\begin{aligned} x_{distorted} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{distorted} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (2.60)$$

其中 $x_{distorted}$ 、 $y_{distorted}$ 是畸變影像座標， x 、 y 是理想影像座標，原點位置皆位於影像中心， r 為理想影像座標 (x, y) 與中心的距離， k_i 為徑向畸變係數，其中對徑向畸變主要貢獻在低階項 k_1 、 k_2 ，其他高階項在計算時可選擇性忽略。

正切畸變由感光元件與透鏡之不平行導致，如圖 2-10，其數學模型可表示為式(2.61)，

$$\begin{aligned} x_{distorted} &= x + [2p_1 xy + p_2(2x^2 + r^2)] \\ y_{distorted} &= y + [p_1(2y^2 + r^2) + 2p_2 xy] \end{aligned} \quad (2.61)$$

其中 $x_{distorted}$ 、 $y_{distorted}$ 是畸變影像座標， x 、 y 是理想影像座標， r 為理想影像座標

(x, y) 與中心的距離， p_i 為徑向畸變係數。徑向畸變與正切畸變係數可由相機校正得到，並將影像還原成畸變前之樣貌。Zhang[15]提出的校正法是目前主流的相機校正方式，本文中透過拍攝棋盤格校正版配合 MATLAB 之函式計算校正參數與空間參數，實驗使用之棋盤格校正版如圖 2-11 所示，會隨拍攝範圍大小選擇不同尺寸的校正版。

2.2.4 三維數位影像相關法

三維數位影像相關法，亦稱立體數位影像相關法(Stereo digital image correlation, Stereo DIC)透過複數的二維影像重建世界座標中的深度資訊，常用的方法使用兩台相機之二維數位影像相關法，透過三角量測(Triangulation)計算三維資訊。首先以理想的針孔成像模型將單相機成像表示為矩陣形式，得式(2.62)，

$$s\tilde{m} = \mathbf{K}\tilde{M} \quad (2.62)$$

式(2.62)中 s 為尺度因子， $\tilde{m}$ 為影像像素座標(u, v)， $\mathbf{K}$ 為相機內部參數(Intrinsic parameters)， $\tilde{M}$ 為相機座標，其中之矩陣如式(2.63)所示。

$$\tilde{m} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tilde{M} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

其中 f_x 與 f_y 分別為 x 、 y 方向的焦距，和主軸投影平面焦點(c_x, c_y)組成相機內部參數， $\tilde{M}$ 為相機座標，指以相機為原點的三維坐標系。假設世界座標系為 $\tilde{W}$ ，則兩座標間之轉換關係可分為旋轉及平移，如圖 2-12 所示，數學上表示為式(2.64)，

$$\tilde{M} = \mathbf{R}\tilde{W} + \tilde{T} \quad (2.64)$$



其中 $\mathbf{R}$ 為旋轉矩陣， $\tilde{\mathbf{T}}$ 為平移向量，兩者合稱相機外部參數(Extrinsic Parameter)。式(2.64)中之矩陣內容如式(2.65)。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{W}} = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

將式(2.64)代入式(2.62)，得到式(2.66)，

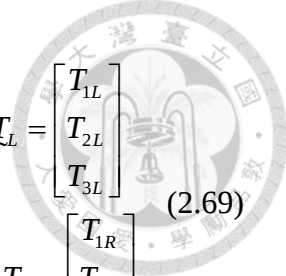
$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{K}(\mathbf{R}\tilde{\mathbf{W}} + \tilde{\mathbf{T}}) \quad (2.66)$$

式(2.66)包含三個未知數 $\tilde{\mathbf{W}} = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T$ ，在設定任意的世界座標， $\mathbf{R}$ 、 $\tilde{\mathbf{T}}$ 視為已知數下，展開仍只有兩條方程式，數學上有無限多組解，不足以求出該世界座標中的位置，如圖 2 - 13 中 $\overline{OR}$ 上任意點皆可能是 p 點的真实世界座標，此射線稱為對極線(epipolar line)。將圖 2 - 13 之拍攝系統加上第二台相機，雙相機拍攝下投影關係如圖 2 - 14，其中透過第二台相機拍攝得到之影像座標可確認該點在 $\overline{OR}$ 上之位置，得到其實際位置。圖 2 - 15 表示雙相機座標與世界座標間之轉換關係，兩台相機分別稱為左相機與右相機，個別透過二維數位影像相關法得到左影像座標 $\tilde{\mathbf{m}}_L$ 及右影像座標 $\tilde{\mathbf{m}}_R$ ，再個別改寫式(2.66)為式(2.67)及式(2.68)。

$$s\tilde{\mathbf{m}}_L = \mathbf{K}_L(\mathbf{R}_L\tilde{\mathbf{W}} + \tilde{\mathbf{T}}_L) \quad (2.67)$$

$$s\tilde{\mathbf{m}}_R = \mathbf{K}_R(\mathbf{R}_R\tilde{\mathbf{W}} + \tilde{\mathbf{T}}_R) \quad (2.68)$$

下標之 L 、 R 分別代表左、右相機之參數，其中的矩陣如式(2.69)。



$$\begin{aligned} \tilde{m}_L &= \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_L = \begin{bmatrix} f_{xL} & 0 & c_{xL} \\ 0 & f_{yL} & c_{yL} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_L = \begin{bmatrix} R_{11L} & R_{12L} & R_{13L} \\ R_{21L} & R_{22L} & R_{23L} \\ R_{31L} & R_{32L} & R_{33L} \end{bmatrix}, \tilde{T}_L = \begin{bmatrix} T_{1L} \\ T_{2L} \\ T_{3L} \end{bmatrix} \\ \tilde{m}_R &= \begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_R = \begin{bmatrix} f_{xR} & 0 & c_{xR} \\ 0 & f_{yR} & c_{yR} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_R = \begin{bmatrix} R_{11R} & R_{12R} & R_{13R} \\ R_{21R} & R_{22R} & R_{23R} \\ R_{31R} & R_{32R} & R_{33R} \end{bmatrix}, \tilde{T}_R = \begin{bmatrix} T_{1R} \\ T_{2R} \\ T_{3R} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.69)$$

為簡化計算，實際使用時會使世界座標與左相機座標重合，使 $\mathbf{R}_L$ 為單位矩陣， $\tilde{T}_L$ 為零向量，如式(2.70)，而 $\mathbf{R}_R$ 及 $\tilde{T}_R$ 改寫為右相機座標對左相機座標的旋轉矩陣 $\mathbf{R}_{L-R}$ 及平移向量 $\tilde{T}_{L-R}$ ，如式(2.71)。

$$s\tilde{m}_L = \mathbf{K}_L W \quad (2.70)$$

$$s\tilde{m}_R = \mathbf{K}_R (\mathbf{R}_{L-R} W + \tilde{T}_{L-R}) \quad (2.71)$$

將式(2.70)及式(2.71)展開，得到四條線性方程式，可求得相機座標對世界座標之轉換關係，如式(2.72)、式(2.73)、式(2.74)及式(2.75)。

$$f_{xL}X + (c_{uL} - u_L)Z = 0 \quad (2.72)$$

$$f_{yL}Y + (c_{vL} - v_L)Z = 0 \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} &[(u_R - c_{uR})R_{31} - f_{xR}R_{11}]X + [(u_R - c_{uR})R_{32} - f_{xR}R_{12}]Y \\ &+ [(u_R - c_{uR})R_{33} - f_{xR}R_{13}]Z = f_{xR}T_1 - (u_R - c_{uR})T_3 \end{aligned} \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} &[(v_R - c_{vR})R_{31} - f_{yR}R_{21}]X + [(v_R - c_{vR})R_{32} - f_{yR}R_{22}]Y \\ &+ [(v_R - c_{vR})R_{33} - f_{yR}R_{23}]Z = f_{yR}T_2 - (v_R - c_{vR})T_3 \end{aligned} \quad (2.75)$$

實際操作上座標轉換關係之取得與二維數位影像相關法之校正類似，透過雙相機

拍攝棋盤格校正版，基於 Zhang[15]提出之校正法分別計算兩台相機之內部參數 $\mathbf{K}_L$ 、 $\mathbf{K}_R$ ，同時計算兩相機間的旋轉矩陣與平移向量。雙相機由二維數位影像相關法得出之影像座標透過式(2.72)至式(2.75)轉換為世界座標。

2.2.5 逐點最小平方法

逐點最小平方法(Pointwise least squares, PLS)[33]為數位影像相關法中常用的應變計算方式之一，由欲計算應變之目標點向四周延伸出應變計算窗格，並由窗格內之分析點位移建立局部位移場，如圖所示，其中 M 為應變計算窗格之大小。將窗格中之局部位移進行一次最小平方擬合，得到區域內位移場的偏微分值，如式(2.76)所示。

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_0 + a_1x + a_2y \\ v(x, y) &= b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned} \quad (2.76)$$

其中 x 及 y 為應變計算窗格中之局部座標，其範圍在 $-M$ 至 M 間，而局部位移場 $u(x, y)$ 及 $v(x, y)$ 為數位影像相關法之量測結果。透過最小平方擬合得到 $a_{i=0,1,2}$ 及 $b_{i=0,1,2}$ ，最後將式(2.76)對 x 及 y 方向做偏微分求得應變場，如式(2.77)。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = a_1 \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = b_2 \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} (a_2 + b_1) \end{aligned} \quad (2.77)$$

比起由 IC-GN 之變形函數或透過差分進行之數值微分等方法，PLS 透過應變計算窗格中多點之位移，能濾除量測時之位移突變造成全場應變失真，具備優異的應變場平滑化效果。在實際應用時，應變計算窗格 M 越大會使 PLS 之平滑化程度

上升，但同時會濾除細節的應變資訊，因此使用時須設定適當的 M 值，才能在進行平滑化的同時保留高精度的應變量測結果。



2.3 實驗儀器介紹

本節將介紹本論文中用於量測之儀器，包括數位影像相關法的拍攝設備、進行定量驗證實驗之量測設備與研究中應用到的材料測試機台等。

2.3.1 數位工業相機

本論文使用數位工業相機作為數位影像相關法的拍攝設備，型號為 GS3-U3-23S6M-C，由加拿大 Point Grey Research Inc. 生產，其外觀如圖 2-17。此相機拍攝解析度為 1920×1200 像素的灰階影像，拍攝幀率最高為每秒 163 張，配合 USB 3.0 傳輸介面能快速拍攝動態影像並傳遞資料。此相機採用全局式快門(Global Shutter)，即所有像素擷取影像之時間同步，能避免拍攝動態物體時時間延遲導致的扭曲及變形。相機之詳細規格可參考表 2-1。

2.3.2 數位工業相機鏡頭

本論文使用為日本 Computar 公司生產之 V0814-MP 及 TEC-M55 鏡頭配合數位工業相機拍攝，兩者皆屬於定焦距鏡頭，透過 C-mount 接口與工業相機連接。其中 V0814-MP 為廣角鏡頭，外觀如圖 2-18 所示，其焦距為 8mm，光圈範圍為 F1.4~F16.0，詳細規格如表 2-2，使用於本論文中大多數的實驗。

TEC-M55 鏡頭具微距功能，外觀如圖 2-19 所示，其焦距為 55mm，光圈範圍為 F2.8~F32.0，詳細規格如表 2-3，在量測小尺度變形時使用。

2.3.3 雷射位移計

本論文使用日本 Keyence 公司生產之 LK-H055 雷射位移計，用於單點之動、靜態位移量測，其外觀如圖 2-20 雷射位移計-LK-H055 外觀圖，規格如表 2-4 所

示。最大量測範圍為 $\pm 10\text{mm}$ ，最佳量測距離為 50mm ，最大精度為 $4\mu\text{m}$ ，最高取樣頻率為 392kHz 。雷射位移計之實驗架設時架設容易，同時具備良好的精度及取樣頻率，本文中多用於數位影像相關法位移量測結果之驗證。



2.3.4 光纖位移計

本論文使用美國 MTI Instruments Inc. 生產之 MTI-200 光纖位移計，外觀如圖 2-21 所示。光纖位移計之原理如圖 2-22 所示，透過傳送光纖將光源照到目標表面，並由接收光纖將反射光傳回感測器，由接收光纖得到之反射光之強度得到感測頭與待測物間的距離。接收之光強度會以電信號輸出，其輸出電壓與距離之關係如圖 2-23 所示，量測範圍包括兩個線性區段：接近待測物表面之區段一 (Range 1) 和遠離待測物表面的區段二 (Range 2)，兩區段分別有不同的解析度與量測範圍。

MTI-200 之最高解析度為 2.5nm ，最高取樣頻率為 500kHz ，經校正後區段一斜率為 $0.018852\mu\text{m}/\text{mV}$ ，可量測範圍為 $98\mu\text{m}$ ；區段二斜率為 $-0.18231\mu\text{m}/\text{mV}$ ，可量測範圍為 $1102\mu\text{m}$ ，實驗時會依據精度與量測範圍之需求選擇不同的線性段。光纖位移計之精度與取樣頻率優於雷射位移計，但量測時需與極度靠近待測物表面，且實驗前需在待測物表面貼上反光膠帶並進行校正，故其使用較為受限，本文中用於高精度的振動量測。

2.3.5 萬能材料試驗機

本論文使用美國 MTS 生產之 C42.503 萬能材料試驗機進行材料拉伸試驗，外觀如圖 2-24 所示。其最低與最高拉伸速率分別為 $0.005\text{mm}/\text{min}$ 及 $2000\text{mm}/\text{min}$ ，位置精度為 50nm ，垂直測試空間為 820mm ，拉伸距離為 650mm ，最大負載為 5kN 。實際使用時最大拉伸距離會依據加裝之夾具和試片改變。

表 2 - 1 數位工業相機 GS3-U3-23S6M-C 規格表

*source from Point Grey Research Inc.

Video Output:	USB 3.0	Type:	Monochrome Camera
Manufacturer:	FLIR	Mounting Threads:	¼-20 with Tripod Mount Adapter #88-057
Image Buffer:	128MB	Camera Family:	Grasshopper®3
Model Number:	GS3-U3-23S6M-C	Imaging Sensor:	Sony IMX174
Type of Sensor:	Progressive Scan CMOS	Type of Shutter:	Global
Camera Sensor Format:	1/1.2"	Resolution (MegaPixels):	2.30
Pixels (H x V):	1,920 x 1,200	Pixel Size, H x V (µm):	5.86 x 5.86
Sensing Area, H x V (mm):	11.25 x 7.03	Frame Rate (fps):	162.00
Pixel Depth:	8/12/16 bit	Exposure Time:	30µs - 3.2s
Connector:	USB 3.1 Gen 1, Micro-B with Screw Locks	Power Supply:	Power over USB or via GPIO with #86-784
Power Consumption (W):	4.5	GPIOs:	1 opto-isolated input, 2 opto-isolated outputs, 2 non-isolated bi-directional ports
Synchronization:	Hardware Trigger (GPIO) or Software Trigger	Dimensions (mm):	44 x 29 x 57.5 (excludes connectors and lens mount)
Weight (g):	90	Mount:	C-Mount
Housing:	Full	Interface Port Orientation:	Back Panel
Dynamic Range (dB):	67.71	Operating Temperature (°C):	0 to +50
Storage Temperature (°C):	-30 to +60	GPIO Connector Type:	8-pin Hirose (HR25)
Machine Vision Standard:	USB3 Vision v1.0	Transfer Speed (Gbit/s):	5.00

表 2 - 2 數位工業相機鏡頭-V0814-MP 規格表

*soure from Computar

Model No.		V0814-MP		Effective	Front	φ 35.6mm	
Focal Length		8mm		Lens Aperture	Rear	φ 17.4mm	
Max. Aperture Ratio		1:1.4		Distortion	1 type	-7.07%(γ=8.0)	
Max. Image Format		12.8mm x 9.6mm(φ 16mm)			2/3 type		
Operation Range	Iris	F1.4 - F16.0					
	Focus	0.1m - Inf.		Back Focal Length		11.65mm	
Control	Iris	Manual		Flange Back Length		17.526mm	
	Focus	Manual		Mount		C-Mount	
Object Dimension at M.O.D.	1" Type	14.23 x 19.47cm		Filter Size		M55.0 P=0.75mm	
	2/3" Type			Dimensions		φ 57mm x 58mm	
				Weight		214g	
Angle of View	D	1 Type	92.41°	2/3 Type	70.68°		
	H		79.68°		58.28°		
	V		62.92°		44.68°		
Operating Temperature		-10°C - +45°C					

M.O.D. : Minimum Object Distance

表 2 - 3 數位工業相機鏡頭 TEC-M55 規格表

Model No.		TEC-M55		Effective	Front	Ø33.0mm	
Focal Length		55mm		Lens Aperture	Rear	Ø13.3mm	
Max. Aperture Ratio		1:2.8		Back Focal Length		29.8mm	
Max. Image Format		8.8mm x 6.6mm(Ø11mm)		Flange Back Length		17.526mm	
Operation Range	Iris	F2.8 - F32C		Mount		C-Mount	
	Focus	0.14m - Inf.		Filter Size		M43 P=0.75mm	
Control	Iris	Manual		Dimensions		Ø53mm x 92.9mm	
	Focus	Manual		Weight		320g	
Object Dimension at M.O.D.		17mm x 13mm					
Angle of View	D	2/3 type	11.5°	1/2 type	8.3°	1/3 type	6.2°
	H		9.2°		6.7°		5.0°
	V		6.9°		5.0°		3.7°
Operating Temperature		-20°C - +50°C					

M.O.D. : Minimum Object Distance

表 2 - 4 雷射位移計- LK-H055 規格表

Specifications

Model		LK-H055
Mounting mode		Diffuse reflective
Reference distance		50 mm
Measuring range		±10 mm ^{*1}
Light source	Type	Red semiconductor laser
	Wavelength	655nm
	Laser class	IEC 60825-1: Class 3R FDA(CDRH)21CFR Part 1040.10: Class IIIa
	Output	4.8mW
Spot diameter (at standard distance)		50 µm x 2,000 µm
Linearity		±0.02% of F.S. (F.S.= 20 mm) ^{*2}
Repeatability		0.025 µm ^{*3}
Sampling cycle		2.55/5/10/20/50/100/200/500/1000 µs (9 steps selectable)
Temperature characteristics		0.01% of F.S./°C (F.S.= 20 mm)
Environmental resistance	Enclosure rating	IP67
	Ambient light	Incandescent lamp or fluorescent lamp: 10,000 lux max.
	Ambient temperature	0 to +50 °C
	Relative humidity	35 to 85 % RH (No condensation)
Vibration resistance		10 to 55 Hz, Double amplitude 1.5 mm, 2 hours in each of the X, Y, and Z directions
Material		Aluminium die-cast
Weight		Approx. 260 g

^{*1} Measurement range when the sampling cycle is 20 µs or more.

^{*2} This value is obtained when the KEYENCE standard target (White diffuse workpiece or workpiece with a metal mirror surface only for the LK-H008/ LK-H008W) is measured in the normal measurement mode.

^{*3} This value is obtained when the KEYENCE standard target (White diffuse workpiece or workpiece with a metal mirror surface only for the LK-H008/ LK-H008W) is measured at the reference distance with the number of averaging measurements set to 16384. The value in parentheses is a typical example of a measurement with the number of averaging measurements set to 65536 and the sampling cycle to 200 µs.

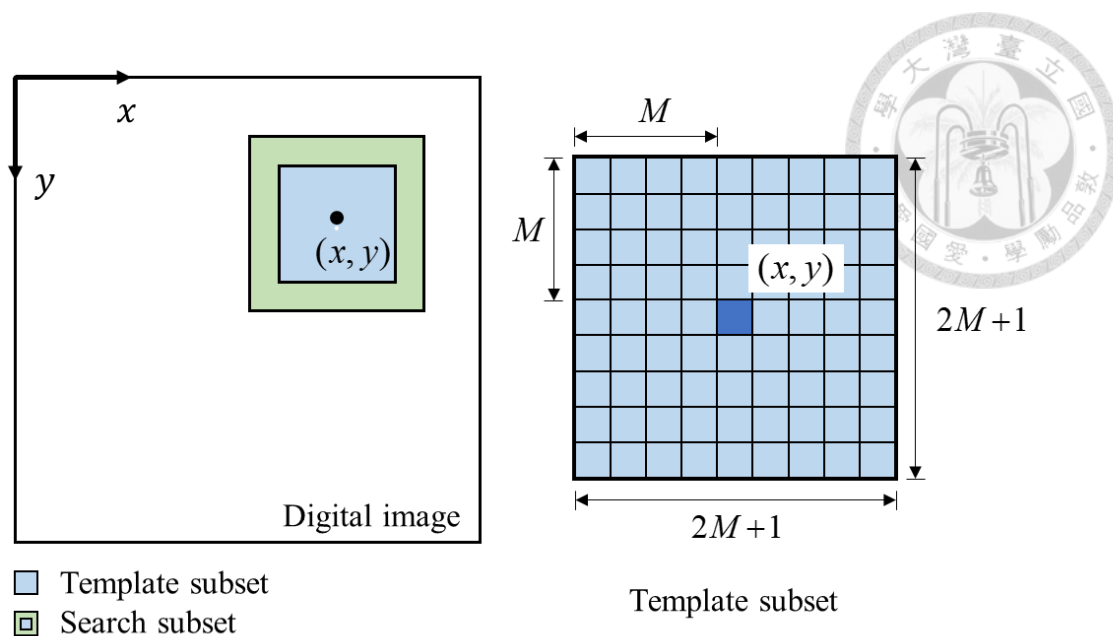


圖 2 - 1 樣本子集合示意圖

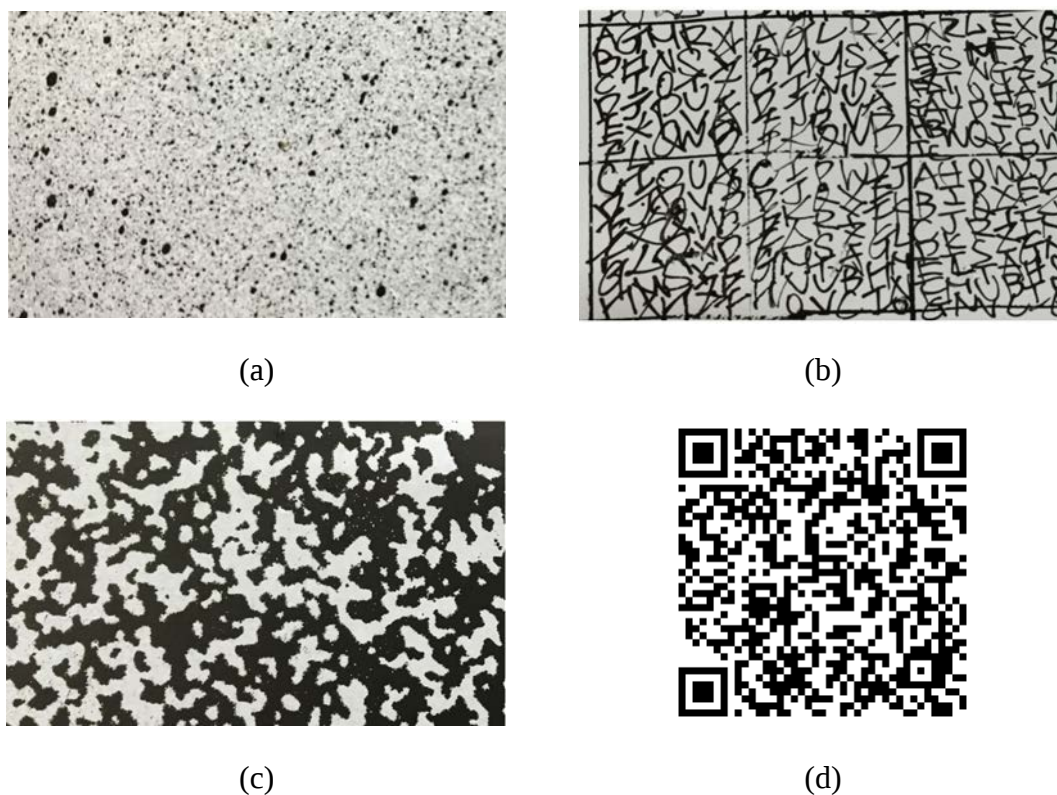


圖 2 - 2 常見數位影像相關法特徵：(a) 噴漆斑點特徵 (b) 手寫文字特徵 (c) 網版
印刷特徵 (d) QR-code 特徵

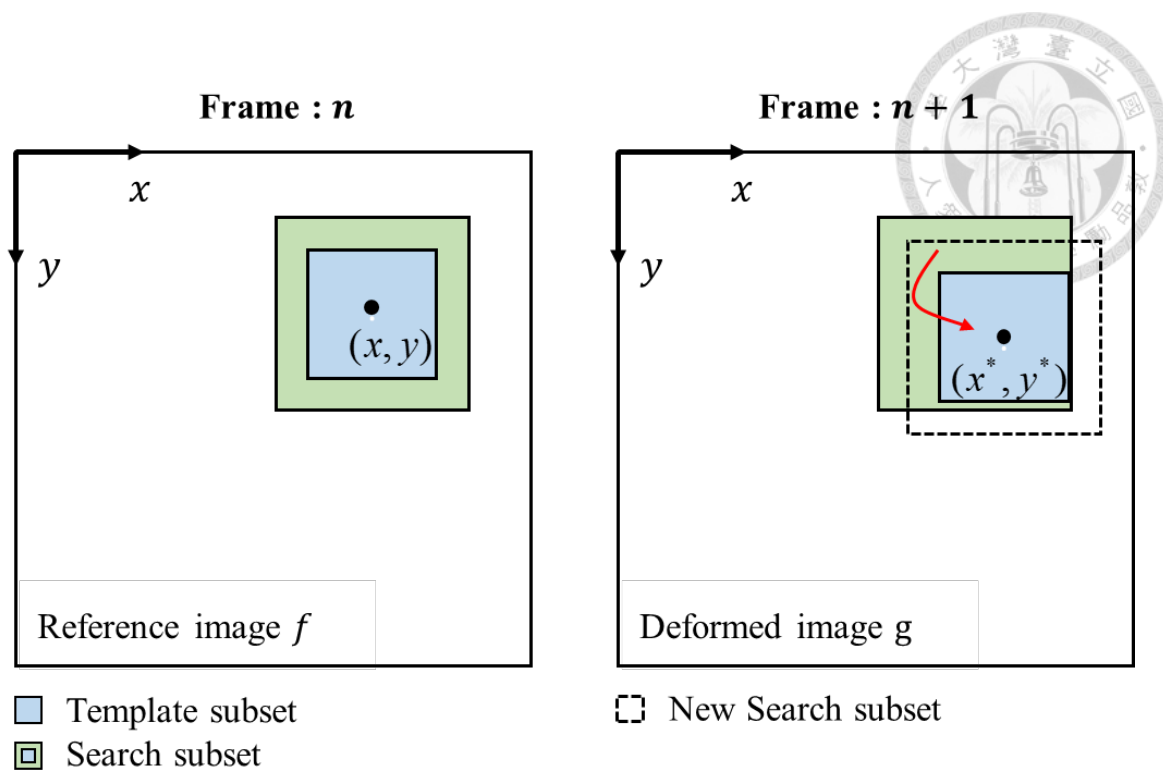


圖 2 - 3 數位影像相關法整像數求解示意圖

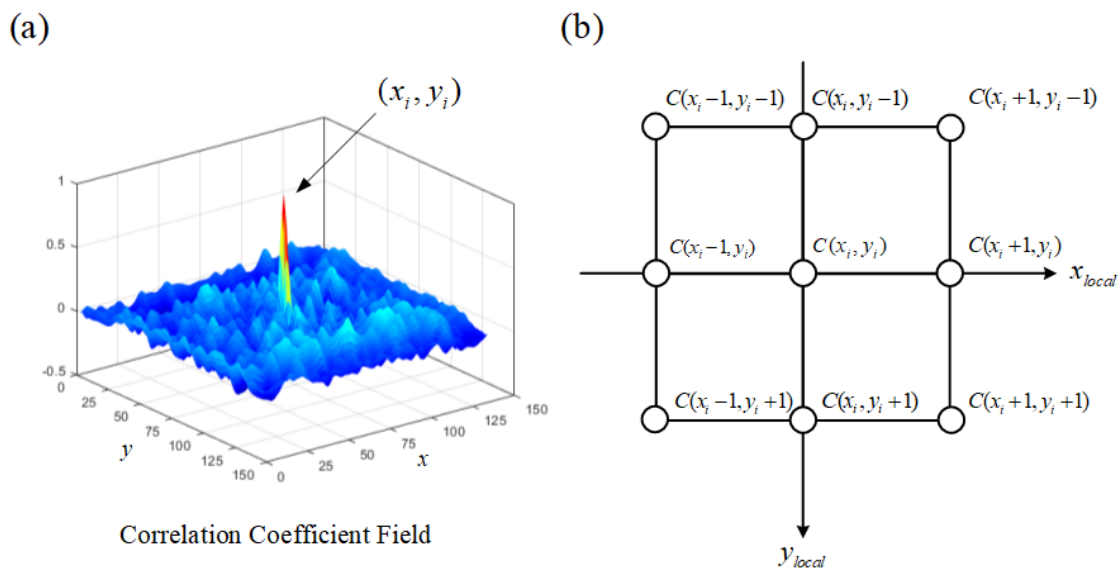


圖 2 - 4 (a)相關係數場與極大值 (b)CCPF 鄰像素示意圖

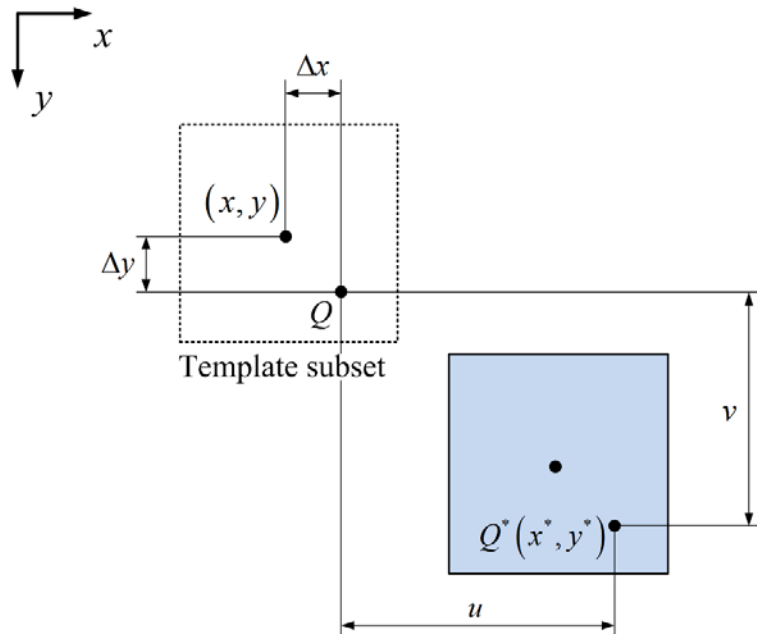


圖 2 - 5 形狀函數(Shape function)：剛體平移(Zero Order)

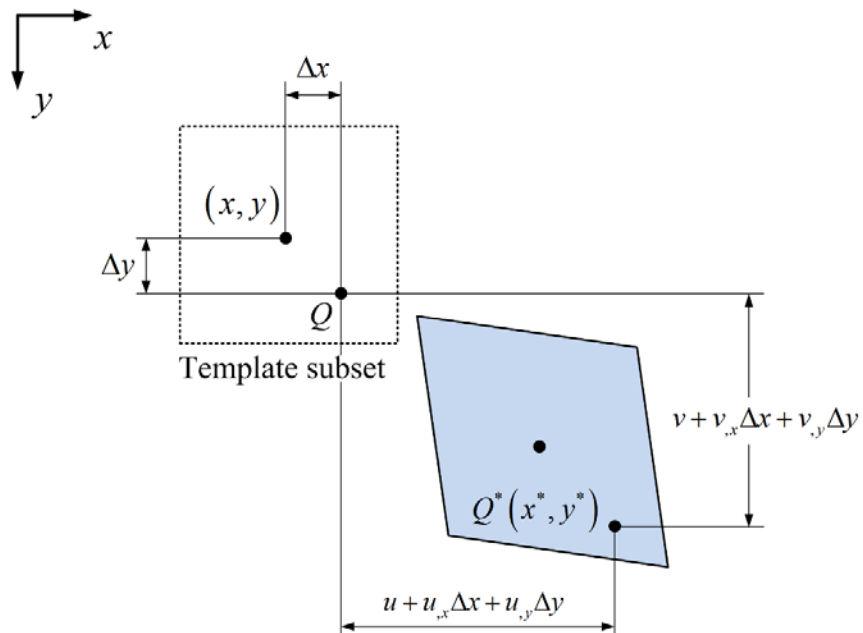


圖 2 - 6 形狀函數(Shape function)：一階變形(First Order)

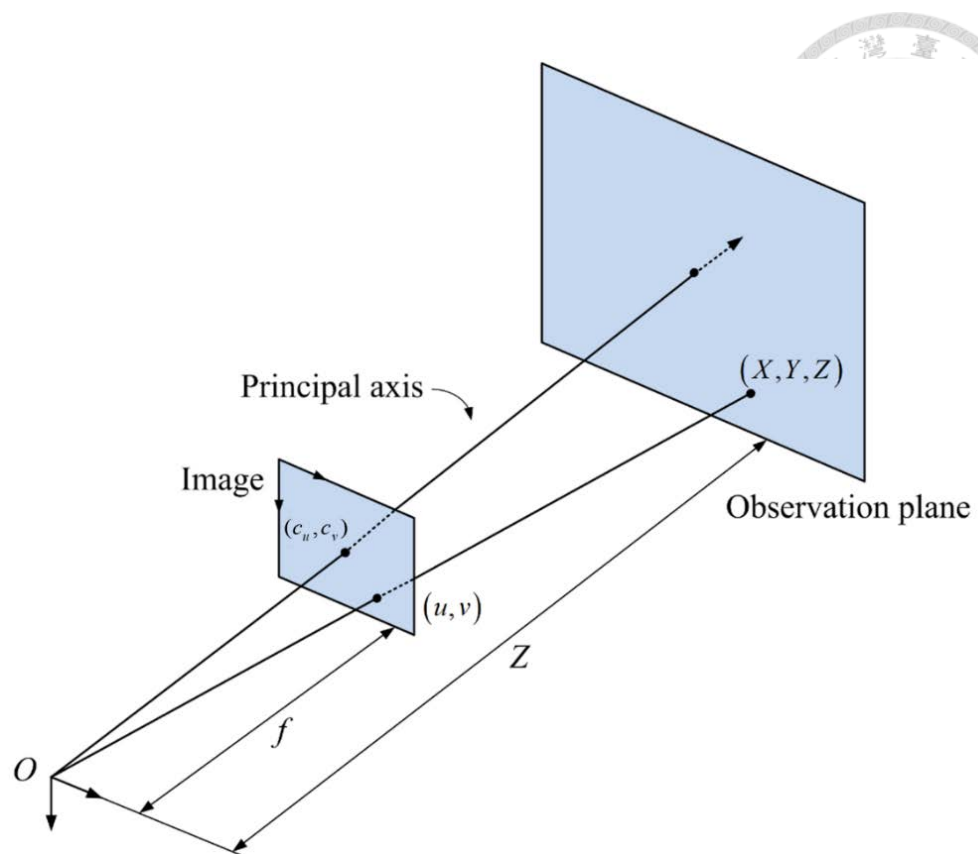


圖 2 - 7 理想針孔成像模型示意圖

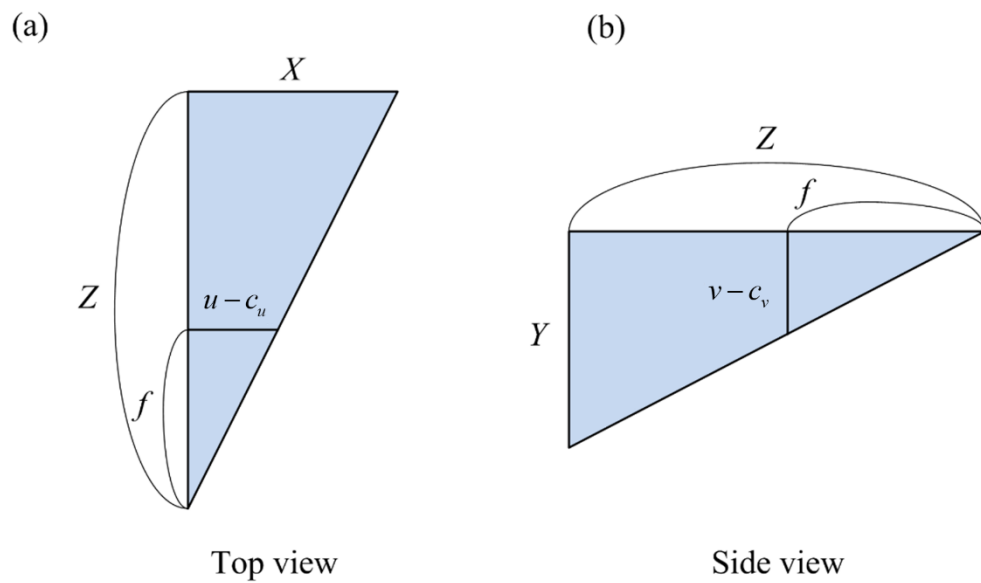


圖 2 - 8 理想針孔成像模型(a)上視圖 (b)側視圖

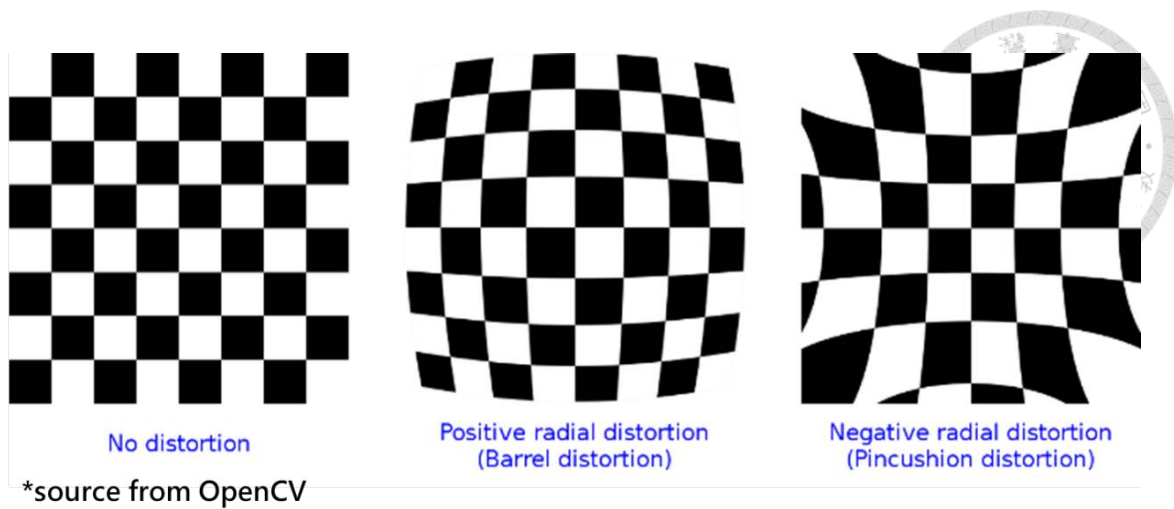
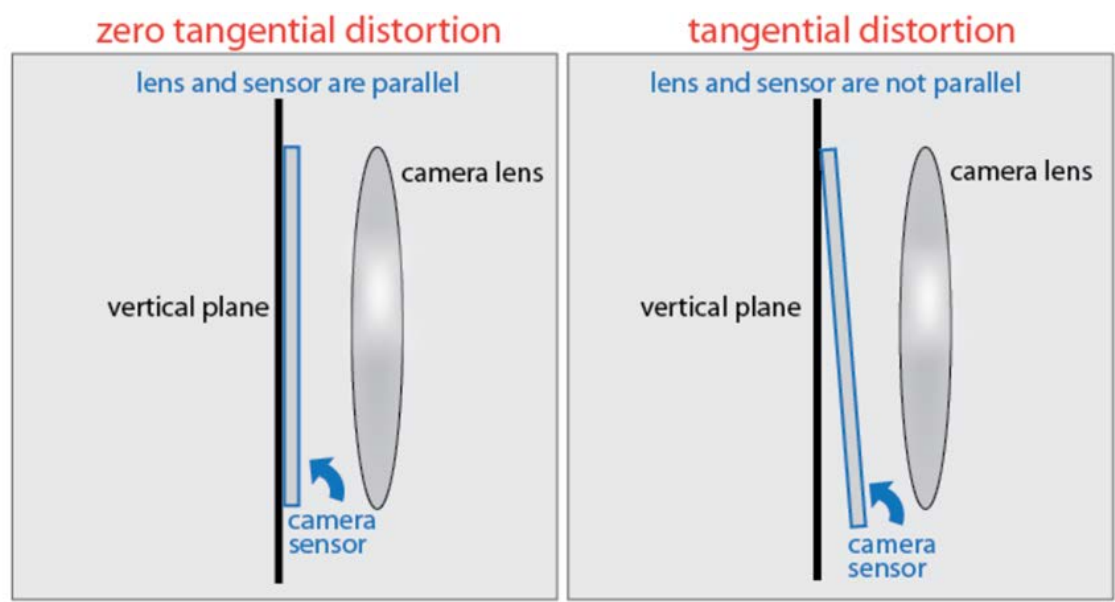


圖 2 - 9 相機徑向畸變 (取自 OpenCV 官方文件)



*source from MathWorks

圖 2 - 10 相機正切畸變 (取自 MATLAB 官方文件)

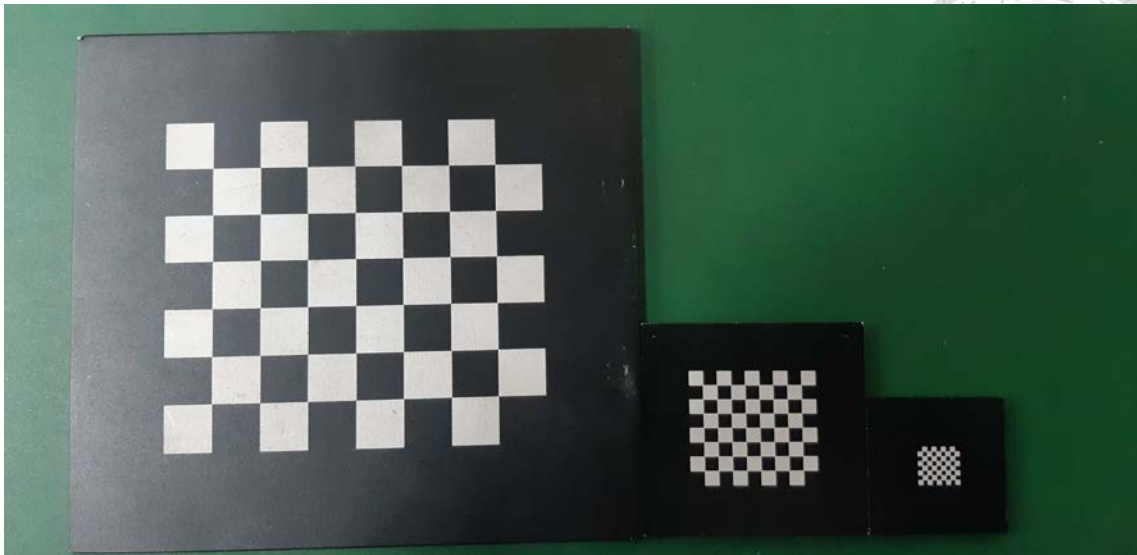


圖 2 - 11 三種尺寸之棋盤格校正版

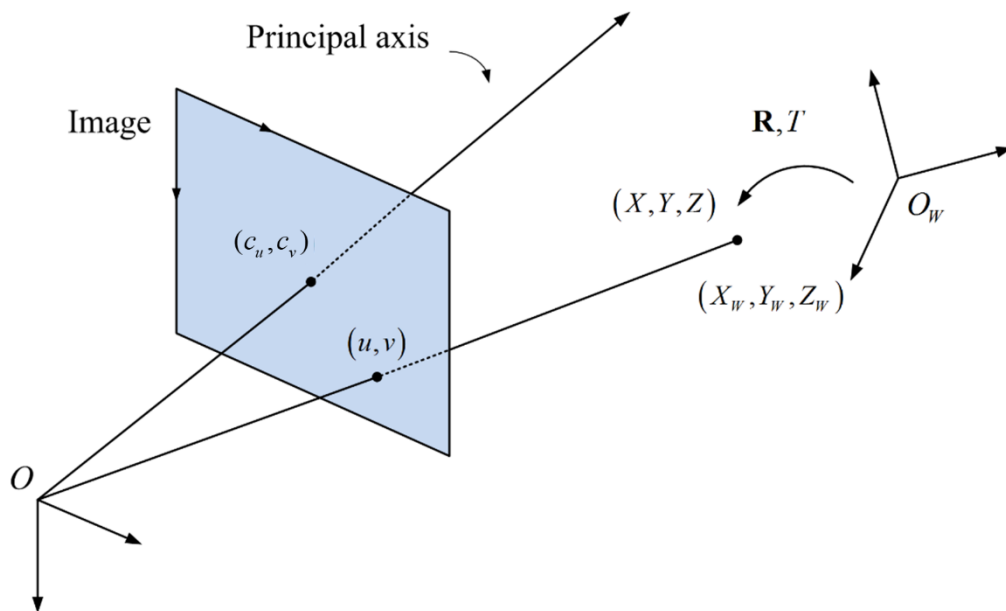


圖 2 - 12 三維座標轉換示意圖

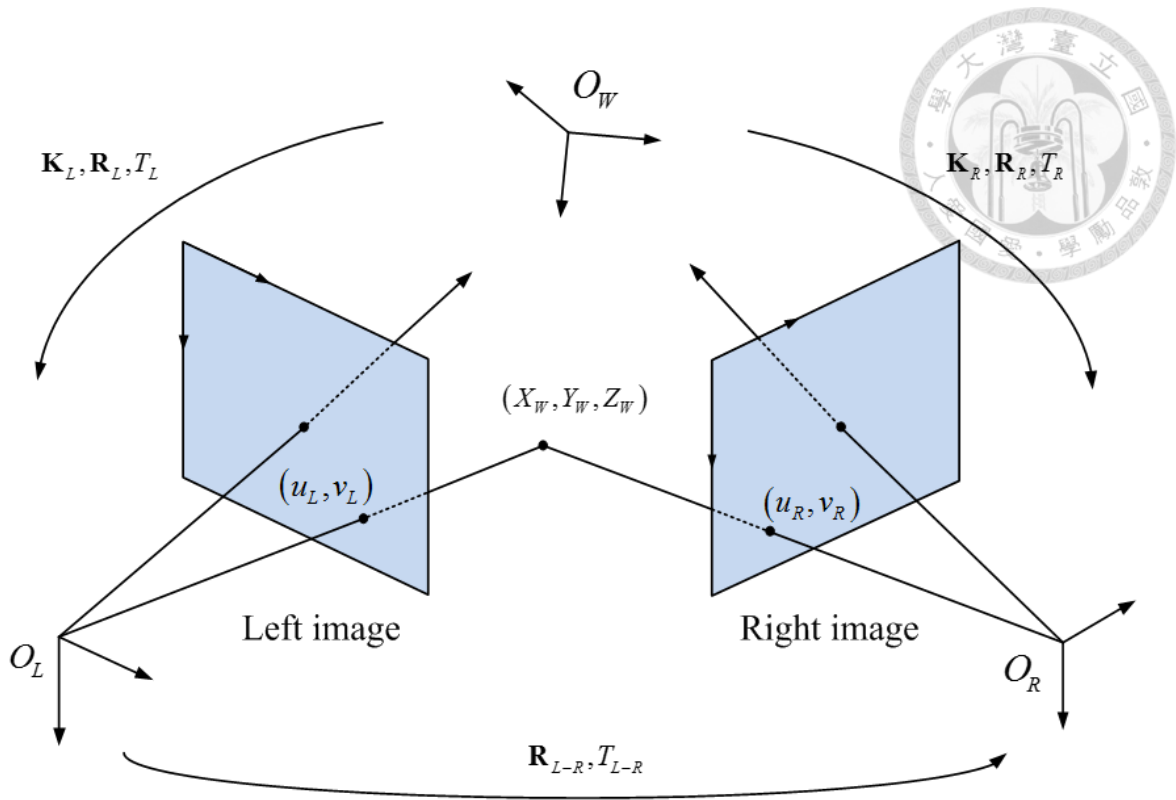
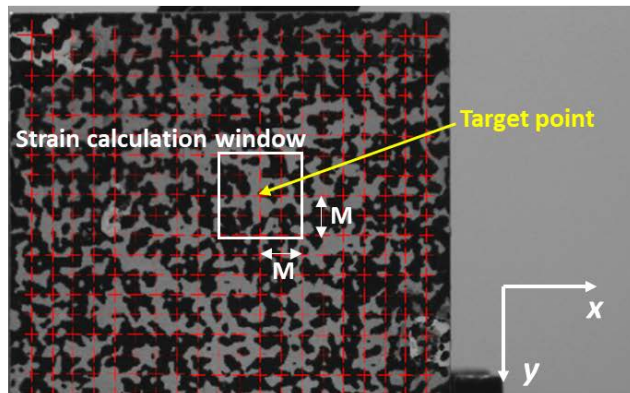


圖 2 - 15 雙相機座標與世界座標轉換關係圖



Local displacement field:

$$\begin{array}{ccc}
 u_1(-M, -M) & \cdots & u_1(0, -M) & \cdots & u_1(M, -M) \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 u_1(-M, 0) & \cdots & u_1(0, 0) & \cdots & u_1(M, 0) \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 u_1(-M, M) & \cdots & u_1(0, M) & \cdots & u_1(M, M) \\
 \\
 u_2(-M, -M) & \cdots & u_2(0, -M) & \cdots & u_2(M, -M) \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 u_2(-M, 0) & \cdots & u_2(0, 0) & \cdots & u_2(M, 0) \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 u_2(-M, M) & \cdots & u_2(0, M) & \cdots & u_2(M, M)
 \end{array}$$

圖 2- 16 PLS 原理示意圖



*source from Point Grey Research Inc.

圖 2 - 17 數位工業相機 GS3-U3-23S6M-C 外觀圖



圖 2 - 18 數位工業相機鏡頭-V0814-MP 外觀圖



圖 2 - 19 數位工業相機鏡頭-TEC-M55 外觀圖



圖 2 - 20 雷射位移計- LK-H055 外觀圖



圖 2 - 21 光纖位移計- MTI-200 外觀圖

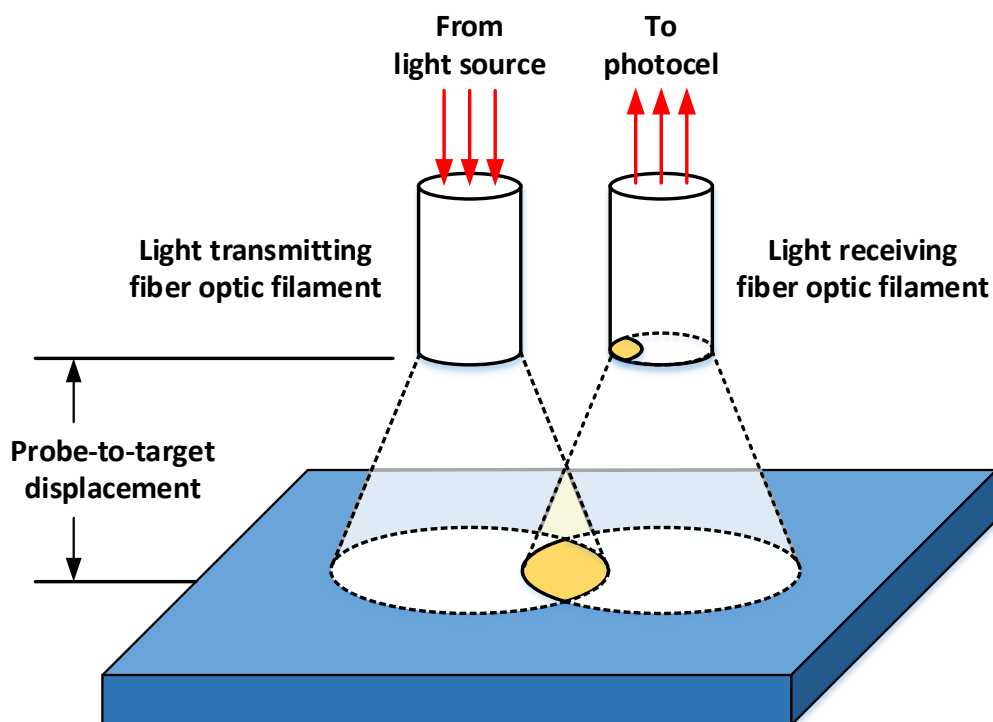


圖 2 - 22 光纖位移計原理示意圖

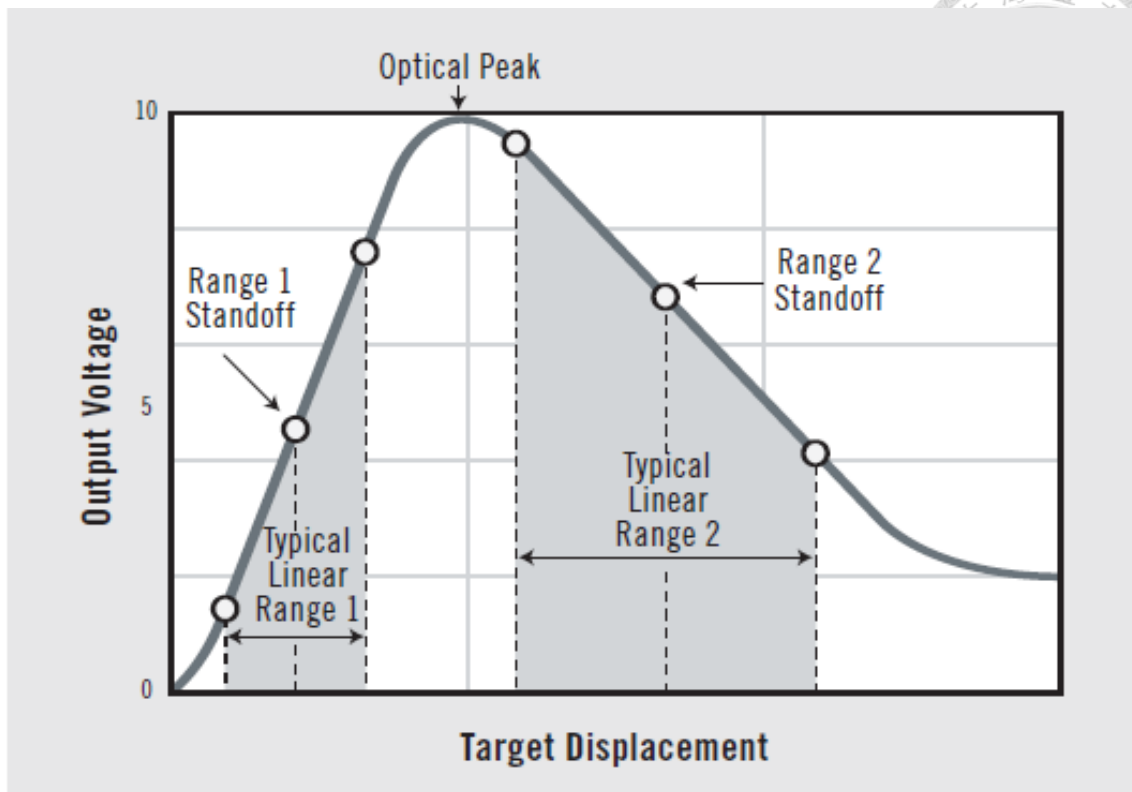


圖 2 - 23 光纖位移計輸出電壓與距離關係



圖 2 - 24 萬能材料試驗機- C42.503

第三章 提升數位影像相關法全場量測表現

全場量測(Full-field measurement)能夠最大化數位影像相關法多點量測的優勢，可用於形貌量測、三維變形量測等問題，為當今數位影像相關法的主要應用方向之一。

於全場量測中，分析點選取結果對量測結果之影響甚鉅，由於全場量測中分析點數量較大，選點難以手動完成，通常透過程式在量測範圍中網格狀自動散佈分析點。本章會簡述過去實驗室於全場數位影像相關法中採用的自動選點方式，並作為基礎進行改良，其中對於右影像中之自動選點誤差問題引入物差點篩選法以去除雜訊，另一方面使用 Distmesh 演算法進行三角形網格全場佈點，提升自動選點的泛用性，並以三維變形及形貌量測之實驗佐證其效果。

3.1 全場選點方法回顧

過往本實驗室完成許多全場數位影像相關法量測之應用，並針對不同問題開發出數種全場選點機制。本節將介紹全場數位影像相關法之量測流程與實驗室過去提出之全場選點方式，並於後續章節針對其限制提出改進方案。

3.1.1 全場數位影像相關法量測流程

全場數位影像相關法為 2.2.3 及 2.2.4 小節中單點二、三維數位影像相關法之延伸應用，透過全場選點方法選取分析點後針對各點進行單點數位影像相關法之分析，經過座標轉換後可輸出全場位移資料。

對於全場量測中見的選點步驟，過往實驗室常用四邊形均勻分布網格，其選點結果圖 3-1 所示，以下將簡介其操作過程：

於左影像中選取四角點

首先設定半窗格、搜尋窗格等參數與佈點之密度，並在左影像中透過選出四角



點選取進行全場佈點之區域，如圖 3 - 2 所示。選取完成後程式會自動生成均勻分佈之四邊形網格。

於右影像中搜尋分析點

進行三維全場數位影像相關法時，完成左影像上分析點選取後需要在右影像中找出其對應點。通常使用相關係數找出與左影像中分析點對應之位置，並以 CCPF 與 IC-GN 得到次像素解提高精度。完成後每個左影像中的分析點會與右影像中的分析點成對，後續透過三角化計算世界座標時右影像分析點之搜尋結果對量測精度有很大的影響。

3.1.2 方法回顧:中空圓環形網格生成

王盛儀[24]的論文中進行了中空圓環之全場位移量測，其中針對圓環區域使用隨機灑點後進行三角化建立出同心圓環佈點，選點結果如圖 3 - 3 所示。此方法進行簡單的修改後能進行不規則幾何外形的佈點，並使用總點數定義佈點之密度，於該論文中得到良好的全場量測結果。但此方法得到之網格密度較不均勻，且無法直接設定網格大小。

3.1.3 方法回顧:對極幾何應用於三維自動選點

李霽儒[28]的論文中提出基於對極幾何(Epipolar geometry)之三維數位影像相關法自動選點。其核心概念為 2.2.4 小節提到的對極線，如圖 2 - 13 及圖 2 - 14 所示，若在左影像中選取一個分析點，該點在右影像中之位置可能落在圖 2 - 14 中直線上任一點。此直線之方程式可由雙相機之座標轉換關係求得，透過在直線上搜尋與左影像中分析點相關係數較高之位置，可避免在整張右影像中進行搜尋，能夠提高自動選點的精度與計算效率。



3.1.4 方法回顧:利用特徵圖像匹配改善圖像變形問題

在樣本子集合有較大的旋轉或變形時，相關係數之峰值位置無法直接代表樣板之位移，使傳統的數位影像相關法必須透過樣板更新法等方式解決此問題。吳冠甫[32]的論文中引入特徵圖像匹配算法，其核心概念為檢測影像中的特徵點 (Feature points)，包含平坦(Flat)、邊界(Edge)、角點(Corner)、斑點(Blob)等，透過在不同影像中匹配特徵點計算變形及位移，並可作為 IC-GN 之初始猜值。

特徵圖像匹配具有計算效率高及適用於大變形及旋轉問題的優勢，但在影像中特徵點不足或品質不佳時會有匹配的困難，在良好的實驗架設下適用於旋轉及大變形量測問題。

3.2 透過誤差點刪除增加三維全場量測精度

本論文使用之全場選點方式以 3.1.1 中之四邊形網格選點配合 3.1.3 小節中的對極幾何方法為基礎，在左影像中進行四邊形均勻佈點後透過對極幾何在右影像中建立全場分析點。然而在實際量測中，右影像中會產生明顯偏差的自動選點結果，如圖 3-4 所示，其可能成因包括影像品質不佳、待測物表面特徵不足等，於全場位移及形貌重建實驗中這些誤差點是誤差的主要來源。

本節透過選點後對分析點進行篩選，從量測資料中去除誤差點造成之雜訊增加全場量測精度。本節首先介紹篩選誤差點之機制，其次為進行刪點後補足被刪除分析點資料之擬合方法，最後以三為全場靜態位移實驗驗證此方法對精度之改進效果。

3.2.1 誤差點篩選機制-均勻四邊形網格

本小節專注於探討三維全場量測中均勻四邊形網格之誤差點篩選，並假測分析點分佈平面上，而雙相機之拍攝方向與平面接近垂直，如圖 3-5 所示，其中 θ_L

及 θ_R 趨近於 0。在此條件下，雙相機之影像座標與世界座標之關係可近似為二維數位影像相關法之狀況，如式(2.57)至式(2.59)所示，其中世界座標與影像座標之長度比例關係固定為 $\frac{Z}{f}$ 。在三維數位影像相關法中，由式(2.70)及式(2.71)可以將左右影像中影像座標之轉換關係改寫為式(3.1)，

$$s_R \tilde{m}_R = \mathbf{K}_R \left(\mathbf{R}_{L-R} \mathbf{K}_L^{-1} s_L \tilde{m}_L + \mathbf{T}_{L-R} \right) \quad (3.1)$$

其中 $\tilde{m}_L$ 、 $\tilde{m}_R$ 為左、右影像之影像座標， s_L 、 s_R 為左、右相機之尺度因子，於前述的假設條件下， s_L 及 s_R 之值可視為常數 $\frac{Z}{f}$ ，使左右影像中影像座標之距離比例關係不變。於多數的三維全場數位影像相關法實驗架設中，左右相機架設之夾角與分析點在深度方向的分布不大，此時左影像中建立之等間距四邊形網格於右影像中的自動選點結果應接近等間距分布，運用此特性能透過右影像中相鄰分析點之距離篩選出偏差的自動選點結果。

在程式中，均勻四邊形網格之排列以行(Row)及列(Column)表示，位於第 i 行、第 j 列之點表示為 P_{ij} ，其影像座標為 (x_{ij}, y_{ij}) ，如圖 3-6 所示。於右影像中決定特定分析點 P_{ij} 是否為誤差點篩選之機制如圖 3-7 之流程，首先以該點為中心取出上方、下方、左側及右側四個相鄰點，分別表示為 P_{i-1j} P_{i+1j} P_{ij-1} 及 P_{ij+1} ，如圖 3-8 所示，該分析點與上、下相鄰點之距離分別為 d_U 及 d_D ，與左、右相鄰點之距離分別為 d_L 及 d_R 。理想情形下，右影像中分析點和左影像中同為均勻分布，此時該點距離兩側相鄰點之距離相等，和上、下、左、右相鄰點之距離關係如式(3.2)，

$$\begin{aligned} d_U &= d_D \\ d_L &= d_R \end{aligned} \quad (3.2)$$

考量實際拍攝時分析點深度不完全一致、圖像扭曲和特徵搜尋等因素造成誤差，針對式(3.2)設定一閾值作為篩選分析點自動選取結果之依據，當分析點與兩側相鄰點之距離差距大於閾值 ϵ 時，程式將判斷該自動選點結果不佳，經篩選後可接受的選點結果與四周相鄰點之距離關係應符合式(3.3)。

$$\begin{aligned} |d_U - d_D| &< \epsilon \\ |d_L - d_R| &< \epsilon \end{aligned} \quad (3.3)$$

對於邊緣的分析點，其四周相鄰點會缺少其中一側，因此無法完整靠前述機制判斷其選點結果。針對此情形，額外限制分析點座標落在四角點於右影像中構成的長方形以確保邊緣分析點之正確性，此限制可表示為式(3.4)，

$$\begin{aligned} x_{\min} - \epsilon &\leq x_i \leq x_{\max} + \epsilon \\ y_{\min} - \epsilon &\leq y_i \leq y_{\max} + \epsilon \end{aligned} \quad (3.4)$$

其中 $x_{\min}$ 、 $y_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 及 $y_{\max}$ 代表四角點圍出之長方形邊界，如圖 3-9 所示，透過外加此限制能提升篩選邊界分析點的效果。於本節之實驗中， ϵ 預設為右影像中分析點間距的10%，其數值可依需求進行調整，增加 ϵ 會保留更多的原始資料，而降低 ϵ 會濾除更多的資訊，並得到較為平滑的全場位移結果。

3.2.2 刪點資料計算方式

本小節將敘述篩選不良分析點後補足刪除誤差資料之方式，其流程圖如圖 3-7 所示，首先由 3.2.2 小節之篩選機制得到誤差點，並在計算多點位移時將其忽略，最後由剩餘的點進行全場位移之連續化，得到誤差點位移之近似值。

將離散資料連續化之方法分為插值(Interpolation)及近似(Approximation)，其中插值得到之連續資料通過所有的已知資料點，常見之插值方法包含如線性內插(Linear interpolation)、雲行線(Spline)等。近似則允許連續資料與已知點有所誤差，

常見之方法包含最小平方回歸(Least-square regression)、加權餘量法(Method of Weighted Residuals)等。相較於插值方法，近似允許連續資料不完全與已知點重合，能夠濾除更多的雜訊或依需求選取特定之近似方程式，但在計算時會犧牲部分精度。

本節中將使用線性內插與局部加權回歸(Locally Weighted Scatterplot Smoothing, LOWESS)兩種方法進行計算被刪除點之位移資料，並比較其結果。線性內插為計算最簡單的插值方法之一，在一維資料中直接將各已知點間以直線相連，於二維資料中則進一步在資料點構成的網格中建立平面，如圖 3-10 及圖 3-11 所示。線性內插由於運算簡單具備良好之計算效率，但得到之連續資料較不平滑。LOWESS 屬於近似方法，相較於針對所有資料進行之迴歸分析，僅針對附近的位置進行局部回歸(Local regression)。對於一維資料，LOWESS 之局部權重如式(3.5)，

$$w_i = \left(1 - \left| \frac{x - x_i}{d(x)} \right|^3 \right)^3 \quad (3.5)$$

其中 x 為未知點之位置， x_i 為第 i 個已知點之位置，進行回歸之範圍能夠自行設定， $d(x)$ 為 x 位置至範圍端點之距離，範圍和權重如圖 3-12 所示。 w_i 為計算第 i 個已知點之權重計算結果，最後使用此權重進行加權最小平方線性回歸。LOWESS 之優勢在於能夠得到較平滑的結果，並依據需求設定回歸範圍決定平滑化的程度。但 LOWESS 之計算較為複雜，且在平滑化時可能將細微的位移資訊濾除。

3.2.3 懸臂薄板靜態位移實驗

本小節將透過三維全場數位影像相關法量測懸臂薄板之全場變形，並套用誤差點篩選法驗證其可行性及量測精度提升效果。



實驗架設

本實驗之架設如圖 3-13 所示，使用兩台工業相機配合 TEC-M55 鏡頭拍攝鋁合金 1050 製懸臂版之靜態位移，位移由一螺旋位移桿施加，懸臂板之尺寸及位移施加位置如圖 3-14 所示。

實驗參數設定

本實驗施加之靜態位移為 5mm，在施加位移前後分別以工業相機拍攝影像，並以三維全場數位影像相關法計算鋁板之變形。全場選點為 30×20 共 600 點，半窗格與搜尋窗格皆為 20 pixel，雙相機自動選點如圖 3-15 所示，右影像中綠色叉號表示由篩選機制選出的不良選點。

本實驗以 ZNCC+CCPF 計算 ICGN 之初始猜值，並使用 ICGN 配合一階形狀函數計算懸臂薄板之變形位移。

實驗結果

本實驗之結果分為未使用誤差點篩選、誤差點篩選配合線性內插、誤差點篩選配合 LOWESS 計算誤差點位移及使用 LOWESS 計算全場位移四種，後兩者之差距在 LOWESS 計算誤差點位移之分誤差點是使用原始之位移資料，而使用 LOWESS 計算全場位移則是右影像中全部的皆使用平滑化結果。局部回歸之計算範圍為總點數的 10%。

四種方法得出懸臂薄板之 x 、 y 及 z 方向位移分別如圖 3-16 至圖 3-18 所示，其中四種方法得到之位移場幾乎相同，推測是本實驗自動選點偏差不大，使位移之偏差較不明顯。若改將分析點經三角化得到之世界座標作圖，分析點進行誤差點篩選前後之位置如圖 3-19 所示，其中進行篩選後成功濾除多數偏離平面的選點結

果，證實此方法能過濾偏差的選點結果。另外將在施加 5mm 靜態位移後分析點之 z 座標進行作圖，進一步觀察不同方法量測變形場之效果，其結果如圖 3-20 所示，其中誤差點篩選前有數個明顯偏差的分析點之 z 座標在小於 990mm 及大於 1025mm 的位置，能發現雖從圖 3-16 至圖 3-18 的全場位移場看不出篩選前後有明顯差距，改以位置座標表示量測結果時印行誤差點篩選能有效地提升量測精度，證實此方法能有效提升數位影像相關法的形貌重建能力。

有限元素模擬

本實驗配合有限元素法進行變形場的結果驗證，懸臂薄板之鋁合金 1050 材料參數如表 3-1 所示，有限元素法軟體使用 COMSOL，固定條件、模型尺寸、設定靜態位移皆與實驗相同，可參考圖 3-14。網格使用六面體網格，邊長為 0.5mm，如圖 3-21 所示，模型共有 43200 個六面體元素。

有限元素法模擬得到之 x 、 y 及 z 方向位移如圖 3-22 所示，與圖 3-16 至圖 3-18 的數位影像相關法結果進行對照，兩者在 y 和 z 方向上具有良好的對應性。由 COMSOL 得到之 x 方向由於位移量值約在 4 μ m 以下，其位移場與數位影像相關法之結果差距較大，推測其數值可能小於數位影像相關法之量測精度，或在實驗架設時靜態位移之施加點略為偏離懸臂版之中心，造成兩側位移不對稱。

極端選點狀況測試

為了進一步驗證誤差點篩選對全场位移精度之提升效果，將本實驗之半窗格改為 12 pixel，使樣板過小無法捕捉鋁板上的特徵，造成自動選點結果出現更多誤差點，如圖 3-23 所示，透過篩選機制去除 114 個誤差點。全场數位影像相關法得到之 x 、 y 及 z 方向位移分別如圖 3-24 至圖 3-26 所示，其中未使用篩選機制之位移場有明顯的誤差，而加入篩選機制後三種計算刪點資料的方法都能有效改善



全場位移結果。

3.2.4 風力發電機葉片形貌重建實驗

於實際工程問題中，有時難以在表面上外加噴漆或 QR Code 等較好的特徵點，使過去數位影像相關法在工程應用中有所限制。本小節對無額外製作表面特徵之風機葉片進行形貌重建，並以誤差點篩選去除表面特徵不佳造成的誤差，使全場數位影像相關法有更廣泛的應用。

實驗架設

本實驗進行形貌重建之風機表面如圖 3-27 所示，除其他實驗中零星貼附的黑色圓點及布拉格光纖光柵(FBG)外並未額外製作表面特徵。實驗以雙相機由上方拍攝並由全場自動選點結果進行風機葉片的形貌重建，架設如圖 3-28 所示。風機葉片之總長為 210cm，並在距離自由端 75cm 之直線上以雷射位移計量測五個點之高度作為精度的驗證，量測點之位置以風機葉片中央的 FBG 為中心設置，整體之俯視圖與雷射位移計量測點之位置如圖 3-29 所示。

實驗參數設定

本實驗於左影像中選擇 50×80 共 4000 個分析點，半窗格設為 11 pixel，於左影像進行四邊形均勻選點後使用對極幾何與 IC-GN 於右影像中尋找對應的分析點，選點結果如圖 3-30 所示。其中綠色方型框出的分析點為誤差點篩選機制篩選出之誤差點。

實驗結果

本實驗中刪去的誤差點共有 3048 個，佔所有分析點的 76.2%，進行篩選前後的型貌重建結果如圖 3-31 所示，原先於世界座標中散布的分析點經篩選後能看出

風力發電機葉片表面之曲面形貌，但其中部分區域由於表面特徵較差沒有分析點通過篩選。

為了得到完整的形貌重建結果，使用二次曲面擬合近似出風力發電機葉片表面之高度值，擬合方程式如式(3.6)所示。

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (3.6)$$

將進行誤差點篩選後之世界座標資料以式(3.6)進行擬合，得到平滑曲面如圖 3-32 所示，其中擬合結果的優劣可以均方根誤差(Root-mean-square error, RMSE)表示，其計算如式(3.7)，

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{z}_i - z_i)^2}{N}} \quad (3.7)$$

其中 $\hat{z}_i$ 為二次曲面擬合中第 i 點之高度值， z_i 為數位影像相關法形貌重建得到第 i 點高度之原始資料， N 為進行篩選後的總點數。經過誤差點篩選後原始資料與擬合曲面間的 $RMSE$ 為 2.735mm。

為了進一步提升形貌重建的效果，根據世界座標中的 z 座標進行第二次誤差點篩選。首先將經過第一次篩選後分析點之 z 座標進行標準化，並以 MATLAB 中之 `thselect` 含式建立 z 座標之閾值，其中閾值選取方法設為 `rigrsure`。進行標準化後之 z 座標及閾值如圖 3-33 所示，閾值外之分析點共有 4 個，占剩餘分析點的 0.42%，將其刪去進行第二次的曲面擬合結果如圖 3-34 所示，其中 $RMSE$ 降為 1.940mm。

最後使用分析點與擬合曲面之誤差值進行第三次的誤差點篩選，將與擬合曲面之高度誤差最大的 10% 分析點進行刪除擬合結果如圖 3-35 所示，其 $RMSE$ 降為 0.302mm，三次誤差點篩選與擬合曲面之 $RMSE$ 及刪除誤差點之數量如表 3-2 所示，其中第三次篩選對 $RMSE$ 之改善效果相當顯著。然而，第三次篩選會刪去大量

與原擬合曲面誤差不大的分析點，可能喪失較多的原始量測資料，因此嘗試在保有降低誤差能力的前提下降低第三次篩選中刪除的點數。改變第三次篩選中刪除的點數與 $RMSE$ 之關係如圖 3-36 所示，其中只要刪除少量的點即能大幅改善與擬合曲面的誤差，因此第三次篩選之刪除量應盡可能降低，於本實驗中 0.01% 的刪除比例即可將 $RMSE$ 降至 0.5mm 以下。

最後，將數位影像相關法之形貌重建結果與雷射位移計量測風力發電機葉片表面高度之結果進行對照，其結果如圖 3-37 所示。其中擬合結果(Fit result)為進行第三次篩選後之二次曲面擬合結果於圖中雷射位移計量測線上的剖面，而數位影像相關法點座標(DIC points)為位在該直線兩側 2mm 內的分析點。兩者的結果皆與雷射位移計量測結果有良好的對應性，顯示數位影像相關法配合誤差點篩選具備良好的形貌重建能力，並可針對表面特徵不良的待測物進行量測。

3.3 建立泛用性三角形網格全場選點方法

過去本實驗室用於數位影像相關法之全場選點方法大多侷限於四邊形待測區域，雖有 3.1.2 小節中針對中空圓環進行佈點的案例，但在特殊幾何外觀的待測物上進行均勻不點仍是一大考驗。

本節透過引入撒點演算法 Distmesh，建立能應用於多種幾何外觀之三角形網格全場佈點方法，並進一步將 3.2 節中之誤差點篩選機制與應變計算方法擴展至三角形網格中，使透過 Distmesh 建立之全場分析點具備和過去四邊形網格相同的量測能力，且經過簡單調整後即能針對不同幾何外觀之待測物進行佈點。

3.3.1 Distmesh 簡介

Distmesh 由 Persson 及 Strang 所提出[34]，為一種簡單、易於控制及修改的網格生成演算法，最初發行於 MATLAB 平台，能在二維空間中生成三角形網格或在三維空間中生成四面體網格。程式中以符號距離函數(Signed distance function, SDF)

表示欲產生網格區域的幾何外觀，區域內部及外部至邊界之距離於符號距離函數中分別以負值及正值表示，而邊界上之函數值為零。此外，Distmesh 中以網格密度函數(Mesh density function)表示灑點之密度，其值越小代表該區域灑點密度越高。

圖 3 - 38 為使用 Distmesh 生成三角形網格之範例，透過定義符號距離函數及網格密度函數可自由調整生成網格之幾何外觀及密度分布。由於符號距離函數之特性，程式中可使用最大值及最小值等方式呈現幾何形狀間的布林運算關係，包括聯集、交集及差集，能更容易的建造需要的幾何外觀，圖 3-38 中的網格即是由正方形與圓形的差集建構而成。

作為一種相對簡單的網格生成演算法，Distmesh 之運算速度及網格品質可能不如其他進階的演算法，但能簡單的融入各種需要生成網格之應用中，於有限元素法等領域中極具實用價值。

3.3.2 整合 Distmesh 與全場數位影像相關法選點系統

本小節將 Distmesh 與全場數位影像相關法選點系統整合，取代原先的四邊形選點方式。新的三角形全場選點流程圖如圖 3-39 所示，其操作步驟與 3.1.1 小節中之四邊形全場選點方法類似，但在選取參考點前會設定佈點區域的幾何外觀，並在左影像中選取參考點確認佈點區域。目前程式中能自動建立出任意多邊形、圓形與長方形等簡單幾何圖型之符號距離函數，並將各種幾何圖型進行布林運算，於左影像中建立各種形狀的全場佈點區域，最後使用 3.1.3 小節中對極幾何之方法於右影像中尋找對應的分析點，於兩邊影像建立出三角形網格。此方法使全場數位影像相關法之佈點不再侷限於特定幾何外型，並能自由調整佈點之區域及密度，圖 3 - 40 至圖 3 - 42 分別為使用 Distmesh 建立之任意四邊形、五邊形及帶圓孔長方形全場選點範例。



3.3.3 逐點最小平方法應用於三角形網格應變計算

於 2.2.5 小節中介紹了 PLS，為全場數位影像相關法中常用的應變計算方式之一。於正方形全場佈點下，PLS 之應變計算窗格能簡單的由包含分析點之行數與列數表示，例如圖 2-16 中，原先操作時會將應變計算窗格之大小設為正方形網格邊長的整數倍，若應變計算窗格為 M ，正方形佈點間距為 d ，可直接由目標點向四周取出 $\frac{M}{d}$ 行、 $\frac{M}{d}$ 列的分析點建立應變計算窗格。對於其他形狀的網格此操作會較為複雜，為了將此方法應用至 Distmesh 建立之三角形網格之應變計算，首先將應變計算窗格之大小改以影像座標中之距離設定，單位為像素，如圖 3-43 所示，再篩選出未再應變計算窗格中之分析點，其座標條件如式(3.8)所示。

$$\begin{aligned} x_i - M &\leq x \leq x_i + M \\ y_i - M &\leq y \leq y_i + M \end{aligned} \quad (3.8)$$

其中 x_i 、 y_i 為欲計算應變值之分析點座標， M 為應變計算窗格，由(3.8)式找出窗格內的分析點後將局部位移場進行擬合，得到目標點之位移偏微分值，方法可參考式(2.76)及式(2.77)。

3.3.4 誤差點篩選應用於三角形網格全場佈點

於 3.2.1 小節中介紹了用於均勻四邊形網格的誤差點篩選機制，本小節將類似的方法拓展應用至 Distmesh 產生的三角形網格。考量三角形網格無法像四邊形網格單由距離關係篩選誤差點，其誤差點篩選方式改由網格元素之面積進行判斷包含誤差點之元素，再進一步找出誤差點。若將單一三角形元素以三角形 $P_1P_2P_3$ 表示，如圖 3-44，三角形之面積可由向量外積計算，如式(3.9)，

$$A = \frac{1}{2} \left| \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3} \right| \quad (3.9)$$



其中向量外積可表示為式(3.10)，

$$\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3} = [x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)] \hat{k} \quad (3.10)$$

$\hat{k}$ 為 z 方向單位向量。此外積之正負號代表三角形網格之指向(orientation)，以三角形 $P_1P_2P_3$ 為例，若其為逆時針方向排列其指向為正方向，外積為正值，反之則為負方向，外積結果朝 $-z$ 方向，如圖 3-45 所示。由於 Distmesh 所產生的三角形網格指向固定為正，且每個網格元素之面積大小相近，式(3.10)之外積量值可用於判斷個別元素之指向及面積是否正確，進而建立用於三角形網格之誤差點篩選機制。

由向量外積量值可篩選出可能帶有誤差點之三角形元素，篩選誤差元素之方式如式(3.11)所示，

$$|A_i - \text{Median}(A)| \leq \varepsilon \quad (3.11)$$

其中 A_i 為第 i 個三角形元素帶有三角形指向之面積，如式(3.12)，其中 $\text{Median}(A)$ 為所有 A_i 之中位數，

$$A_i = \frac{1}{2} [x_{i1}(y_{i2} - y_{i3}) + x_{i2}(y_{i3} - y_{i1}) + x_{i3}(y_{i1} - y_{i2})] \quad (3.12)$$

(x_{i1}, y_{i1}) 、 (x_{i2}, y_{i2}) 及 (x_{i3}, y_{i3}) 為第 i 個三角形元素之節點座標，當該元素之 A_i 值不符合(3.11)式之標準，認定該網格元素為誤差元素。

選出可能帶有誤差點之誤差元素後，需進一步篩選出誤差點。在三角形網格中，若單一節點偏離原本位置，將影響周圍元素的面積及指向，如圖 3-46 所示，若點 2 偏離原本位置，周圍兩個元素將被篩選為誤差元素，但點 1、點 3 及點 6 皆非誤差點，因此唯有特定分析點周圍之網格元素皆為誤差元素時才能確認該點有所偏差。



應用於三角形網格的誤差點篩選流程圖如圖 3 - 47 所示，使用 Distmesh 建立網格後會輸出網格的連結列表，代表每個網格包含的節點，如圖中的網格連結列表可表示為式(3.13)，

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 2 & 3 & 6 \\ 3 & 4 & 6 \\ 4 & 5 & 6 \\ 1 & 5 & 6 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

將誤差元素之連結列表刪除後，剩餘之連結列表如式(3.14)，

$$\begin{bmatrix} 3 & 4 & 6 \\ 4 & 5 & 6 \\ 1 & 5 & 6 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

由於點 2 周圍之元素皆為誤差元素，該點被從連結列表中刪除，由式(3.14)中缺少的點擊能找出需刪除的誤差點。此方法利用網格之連結性資訊，比起分別針對各分析點進行分析更有效率。

3.4 泛用性三角形網格選點方法實際應用

於 3.3 節中建立了能夠應用至不同幾何形狀之三角形全場選點方法，本節首先透過實驗力學學會(Society of Experimental Mechanics, SEM)提供之實驗影像，並與彈性力學理論計算出之變形場比較，驗證透過 Distmesh 全場數位影像相關法分析的精度，並進一步將其投入 3D 列印試片拉伸試驗與球體形貌重建之實驗應用。

3.4.1 SEM: 圓孔試片拉伸試驗

本小節使用 SEM DIC Challenge Sample 12 之實驗影像[35]，驗證三角形網格全場選點方法之可行性及量測精度。此系列影像共有 12 張，為圓孔試片拉伸試驗

過程的連續影像。本小節將使用三角形網格直接建立帶圓孔的全場佈點，並進行全場變形位移與應變分析，再與過去文獻中針對此系列影像進行數位影像相關法分析之結果比較，驗證透過 Distmesh 建立之三角形網格應用於數位影像相關法之可行性。

參數設定

三角形網格之參考邊長為 5 pixel，半窗格及搜尋窗格設為 15 pixel，選點結果如圖 3-48 所示，共有 11716 個分析點。搜尋演算法為 CCPF+IC-GN，並使用 3.3.3 之逐點最小平方法計算全場應變。

結果討論

本測試取位移最大的第 12 張影像作為參考，其 x 及 y 方向位移場如圖 3 - 49 所示，而應變場 ε_{xx} 、 ε_{yy} 與 ε_{xy} 如圖 3 - 50 所示。另外使用有限元素法軟體 Comsol 模擬之結果與其進行比較，其設定參考文獻中之實驗架設及材料參數[35]-[37]，試片測量段為 $30 \times 150 \text{ mm}$ ，中央圓孔直徑為 10mm，試片厚度為 1.26mm，詳細尺寸如圖 3 - 51 所示。底部設為固定邊界，上方施力 5kN，網格為 34896 個六面體元素，並輸出位移場及應變場，如圖 3 - 52 及圖 3 - 53，將其與數位影像相關法之結果比較，兩者有良好的對應性，但 x 方向位移於實驗量測中由於邊界固定條件難以達到完美，位移場未能達到左右對稱，而應變場也因為精度限制，未能呈現出理論結果中所有的細節。本測試證實使用 Distmesh 建立三角形網格於定性及定量上皆能達到良好的量測精度，且相較於過去透過後處理刪除圓孔區域之結果，由 Distmesh 產生之網格在中央圓孔位置相當平滑，顯示此方法於複雜幾何形狀之全場佈點上有很好的應用。



3.4.2 3D 列印拉伸試片全場變形量測

本實驗使用萬能材料試驗機針對 3D 列印試片進行拉伸試驗，並使用數位影像相關法量測過程中的變形，以全場變形量測觀察拉伸過程中試片的損傷情形，並測試新方法於實際實驗量測中的表現。

實驗架設

本實驗使用的 3D 列印試片由陳祈維[38]製作，材質為 PLA，測試規範採用 ASTM D638[39]，試片為 Type I，其尺寸如圖 3-54 及表 3-3 所示。試片實體如圖 3-55，表面使用噴漆製作斑點特徵以利數位影像相關法量測。實驗使用萬能材料試驗機配合氣壓夾頭夾持試片，並以工業相機配合 TEC-M55 鏡頭進行拍攝，實驗架設如圖 3-56 所示，拉伸速率為 5mm/min，相機 fps 設為 2。

數位影像相關法設定

本實驗之網格參考間距設為 15 pixel，半窗格與搜尋窗格為 15 pixel，選點結果如圖 3-57 所示，透過全場選點量測之變形場，分析點共 2973 點，搜尋演算法為 CCPF，得到位移場後透過逐點最小平方方法計算全場應變。

結果討論

實驗中試片在第 72 幀斷裂，取第 21、41、61 及斷裂前的 71 幀之全場變形進行討論。拉伸過程之 x 方向位移場(u)、 y 方向位移場(v)、應變場 ε_{xx} 及 ε_{yy} 如圖 3-58 至圖 3-61 所示，其中 y 方向之位移場相當平滑，試片上方之位移值較大，而 x 方向位移場隨拉伸過程逐漸呈現出朝中間方向收縮。應變場方面， ε_{xx} 及 ε_{yy} 在拉伸初期大致均勻，試片接近斷裂時 ε_{yy} 在試片中央偏下的位置出現較大的應變，若將

應變場與相片疊圖，如圖 3 - 62，並與試片斷裂後的第 71 幀進行比較，其中在第 61 幀即可發現明顯的高應變區域，其位置與最後試片斷裂之位置相符，證實透過全場應變量測能檢測結構損傷。

3.4.3 球體形貌重建實驗

本小節使用 Distmesh 建立圓形區域的全場選點，對未外加特徵的球體進行形貌重建，測試三角形網格於三維數位影像相關法量測之應用，同時採用 3.3.4 小節中之誤差點篩選提高形貌重建的精度，驗證該方法在三角形網格下的可行性。

實驗架設

圖 3-63 之棒球為本實驗進行形貌重建之目標，其表面未進行額外加工製作利於量測的特徵。實驗以兩台工業相機配合 V0814-MP 鏡頭進行拍攝，進行校正後取單張影像進行形貌重建。

數位影像相關法設定

本實驗之樣板子集合設為 15 pixel，三角形網格之參考邊長為 15 pixel，佈點區域為圓形，於左影像中設定 45 個分析點，並透過 CCPF+IC-GN 配合對極幾何於右影像中選取對應的分析點，選點結果如圖 3-64 所示。以三維數位影像相關法得到分析點之空間座標後透過最小平方法擬合球面，並將得到之球直徑與使用游標卡尺得到之量測值比較。此外，為測試誤差點刪除於三角形網格之應用，於另一次計算中額外選取包含球體邊緣的分析點製造右影像自動選點偏差，如圖 3 - 65 所示，於右影像中有三個分析點明顯偏離球體範圍。

實驗結果

由數位影像相關法重建之球體如圖 3 - 66 所示，其直徑為 71.591mm，而使用



游標卡尺量測得到之直徑為 73.31mm，數位影像相關法之直徑誤差為-2.33%，顯示此方法在未額外製作特徵之條件下，能夠達到良好的形貌重建效果。另一方面，右影像中帶有選點偏差之重建結果如圖 3-67 所示，其中紅色又又為透過誤差點篩選刪除掉的分析點，進行去除後定性上能夠重建球面形貌。此結果進行球面擬合得到之直徑為 64.3648mm，誤差為-12.2%，顯示此結果仍受到選點偏差影響，在定量上未能有良好的重建精度。

此實驗顯示透過 Distmesh 建立全場選點能讓數位影像相關法在形貌重建上的應用更為方便，能針對不同幾何外觀之待測物建立全場選點。其中誤差點篩選能濾除右影像中明顯偏差的選點結果，使形貌重建能更容易地達到定性上的成功，然而若要求更高的重建精度，由於目前的誤差點篩選機制只能去除明顯偏差的選點，依然需要良好的表面特徵與選點結果才能達到更高的量測精度。

表 3 - 1 懸臂薄板靜態位移實驗材料係數

密度 ρ	楊氏模數 E	蒲松比 ν
2705 kg/m ³	69GPa	0.33

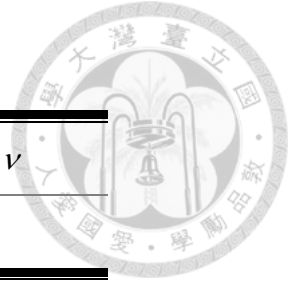


表 3 - 2 風機葉片形貌重建誤差分析

	RMS error (mm)	Points deleted
1 st point-delete	2.735	3048/4000 (76.2%)
2 nd point-delete	1.940	4/952 (0.42%)
3 rd point delete	0.302	95/948 (10.0%)

表 3 - 3 ASTM D638 Type I 試片規格表

	Dimensions (mm)
W—Width of narrow section	13
L—Length of narrow section	57
WO—Width overall, min	19
LO—Length overall, min	165
G—Gage length	50
D—Distance between grips	115
R—Radius of fillet	76
T—Thickness	3.2

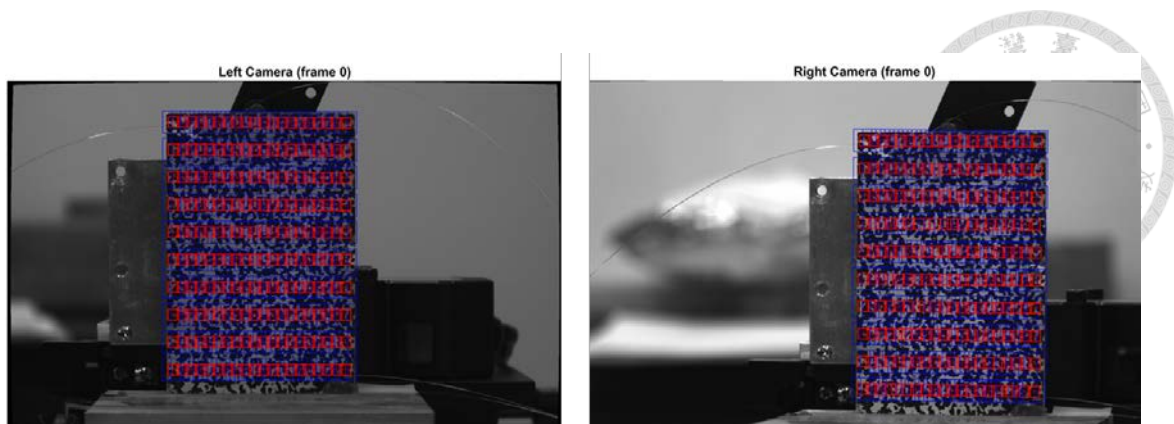


圖 3 - 1 均勻四邊形網格佈點結果示意圖



圖 3 - 2 選取四角點示意圖

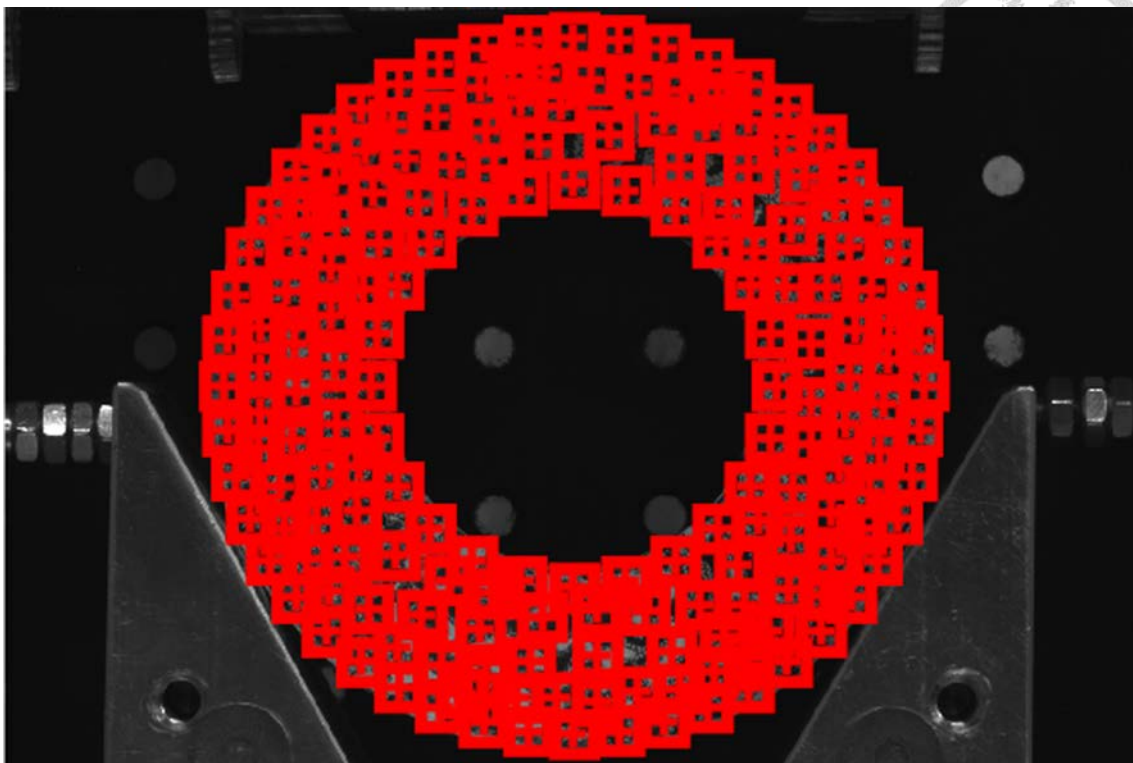


圖 3-3 中空圓環全場佈點結果(取自王盛儀論文)

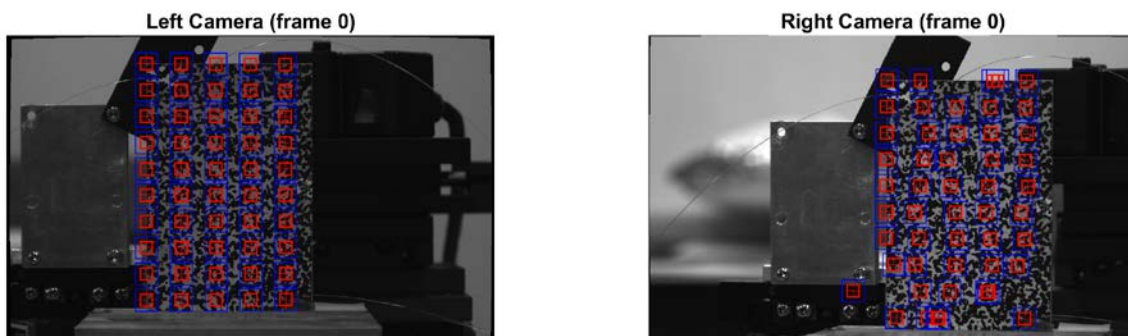


圖 3-4 偏差選點結果範例

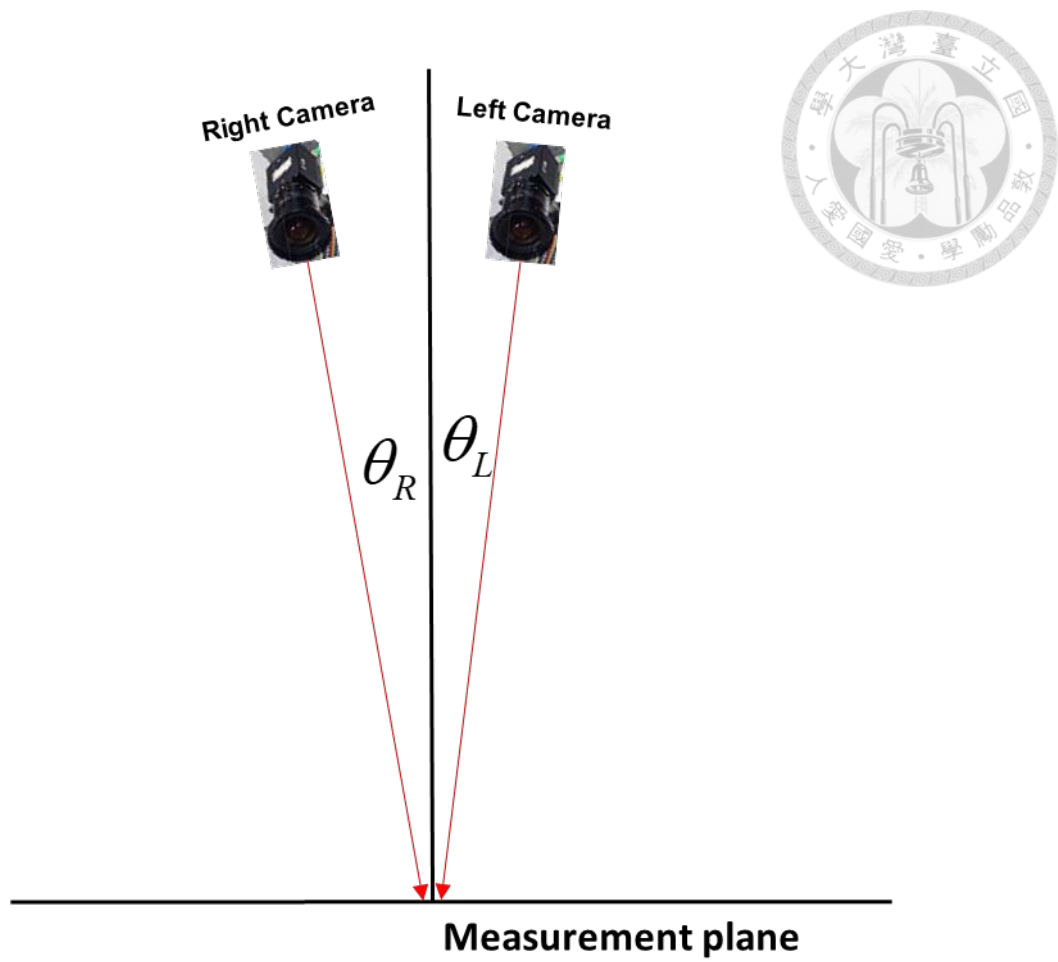


圖 3 - 5 均勻四邊形網格誤差點篩選假設條件示意圖

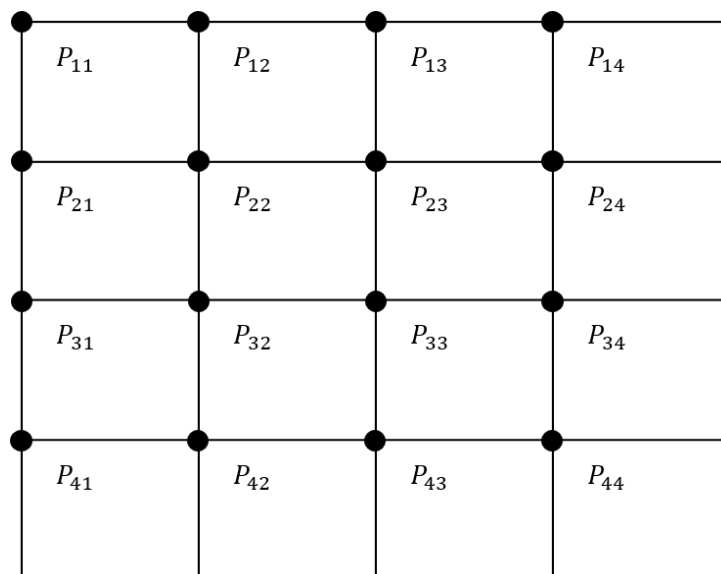


圖 3 - 6 四邊形網格行列示意圖

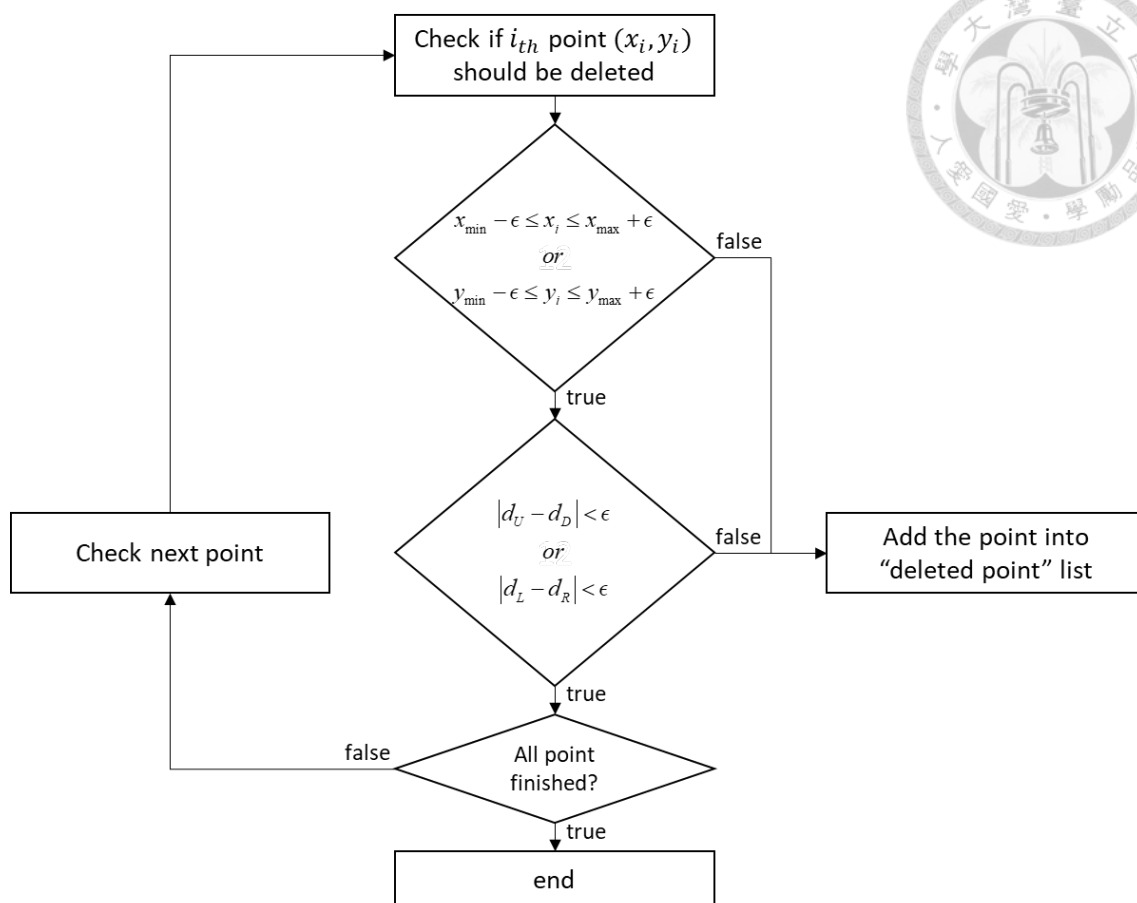


圖 3 - 7 均勻四邊形網格誤差點篩選流程圖

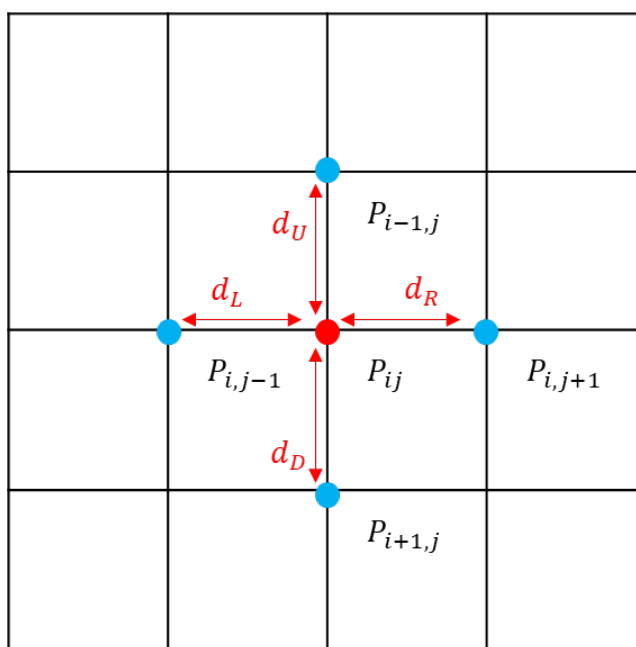
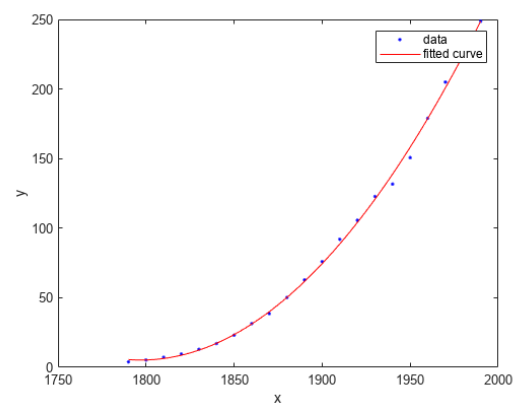


圖 3 - 8 相鄰點關係示意圖



 : 四角點
 : 長方形邊界



(a) (b)

圖 3-10 一維資料插值與近似(取自 Mathwork 官方網站)

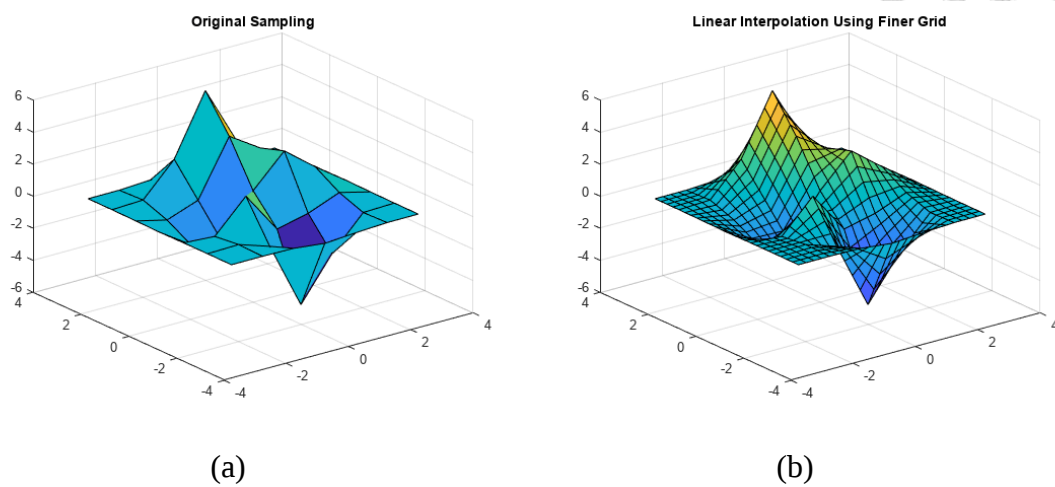


圖 3 - 11 二維資料插值與近似(取自 Mathwork 官方網站)

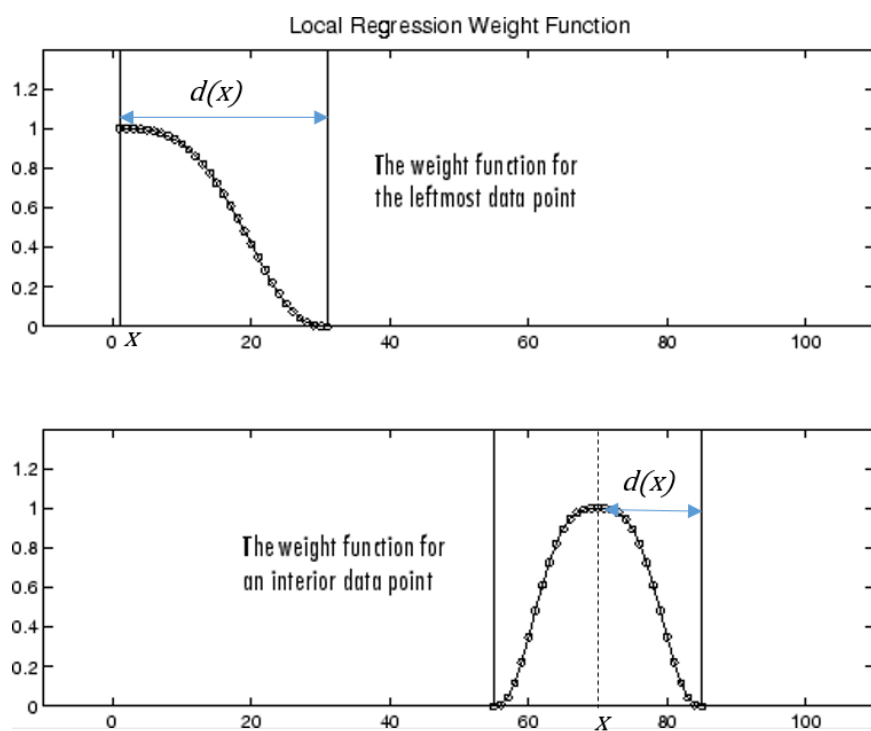


圖 3 - 12 LOWESS 原理示意圖(取自 Mathwork 官方網站)

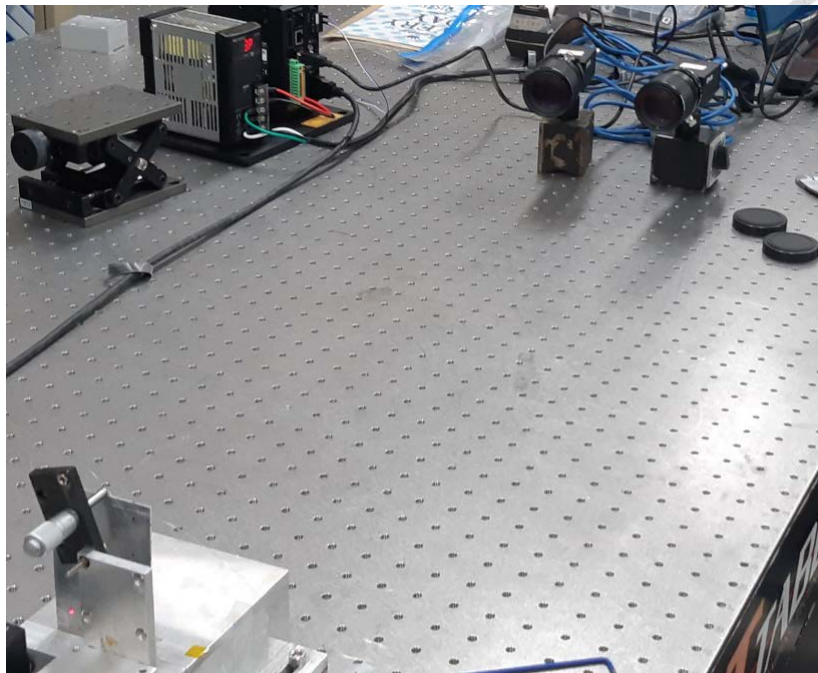


圖 3 - 13 懸臂薄版靜態位移實驗架設

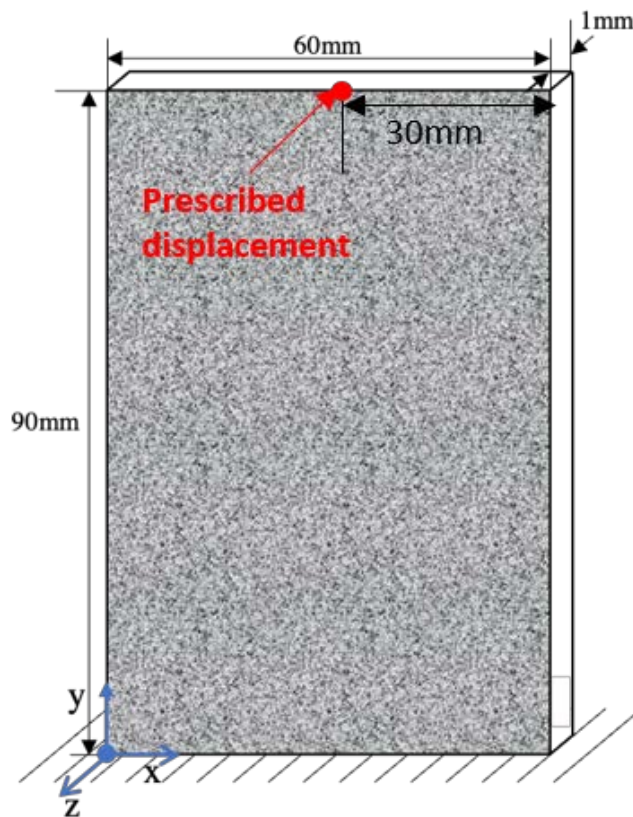


圖 3 - 14 懸臂版尺寸及施力位置圖

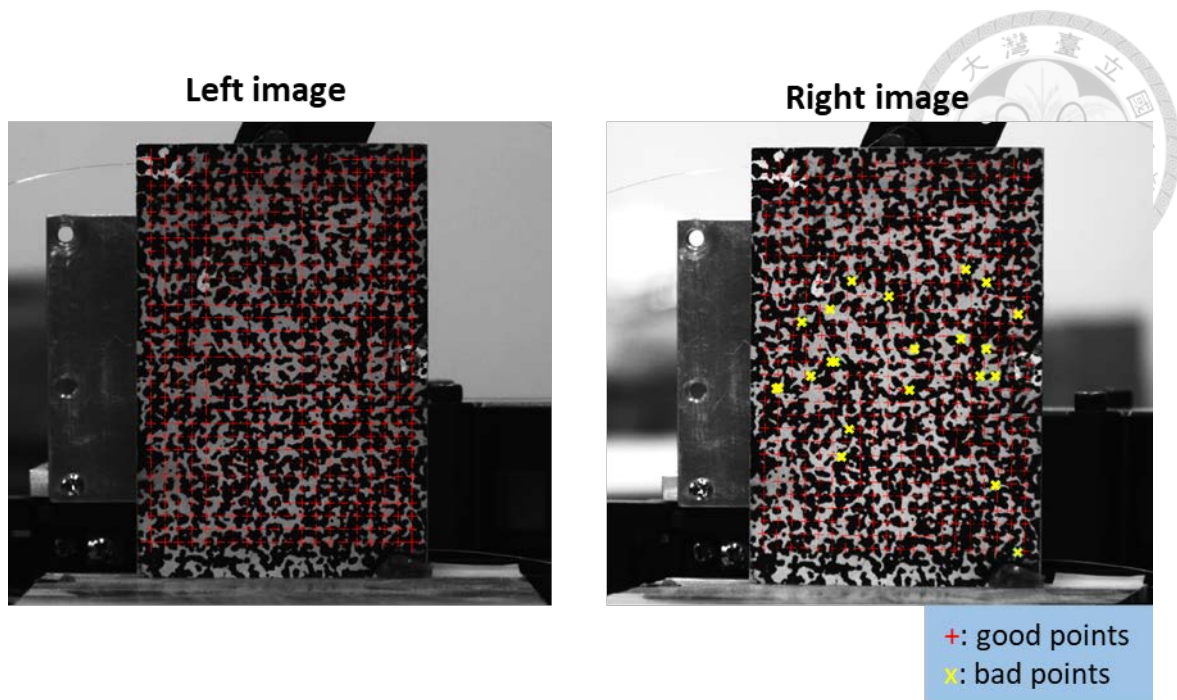
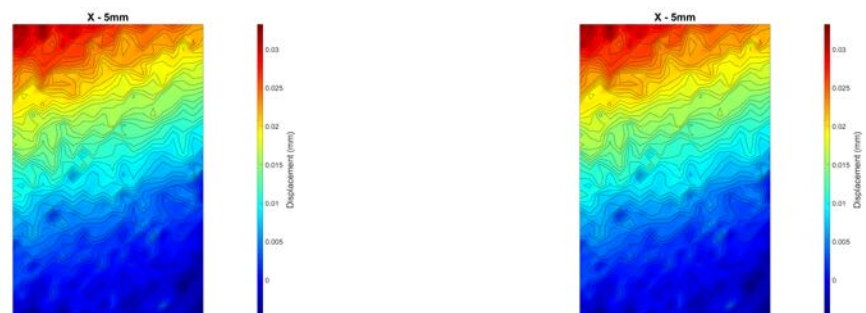
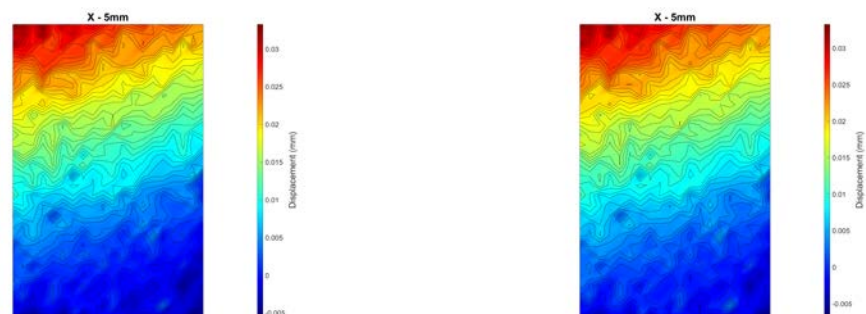


圖 3 - 15 懸臂薄板靜態位移實驗選點結果



(a) 未使用誤差點篩選

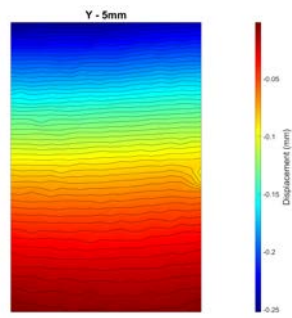
(b) 線性內插計算誤差點位移



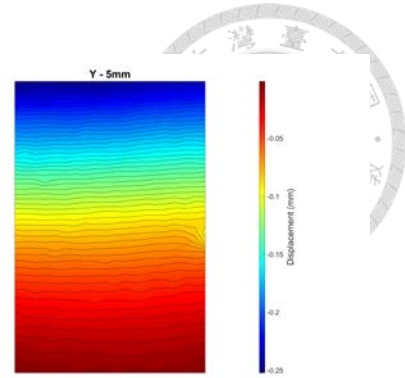
(c) LOWESS 計算誤差點位移

(d) LOWESS 計算全場位移

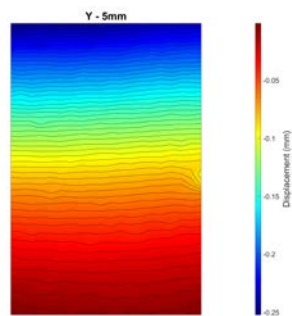
圖 3 - 16 懸臂薄板靜態位移實驗結果-x 方向



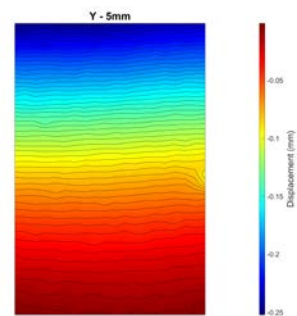
(a) 未使用誤差點篩選



(b) 線性內插計算誤差點位移

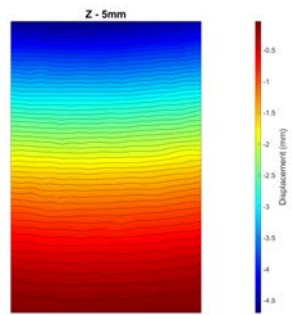


(c) LOWESS 計算誤差點位移

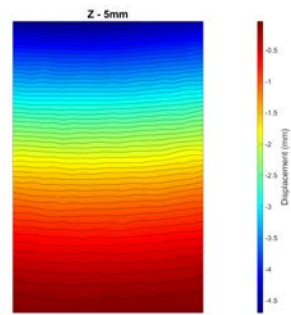


(d) LOWESS 計算全場位移

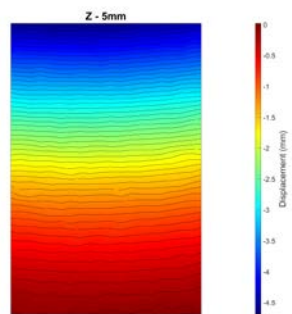
圖 3 - 17 懸臂薄板靜態位移實驗結果-y 方向



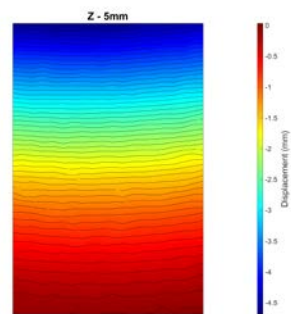
(a) 未使用誤差點篩選



(b) 線性內插計算誤差點位移



(c) LOWESS 計算誤差點位移



(d) LOWESS 計算全場位移

圖 3 - 18 懸臂薄板靜態位移實驗結果-z 方向

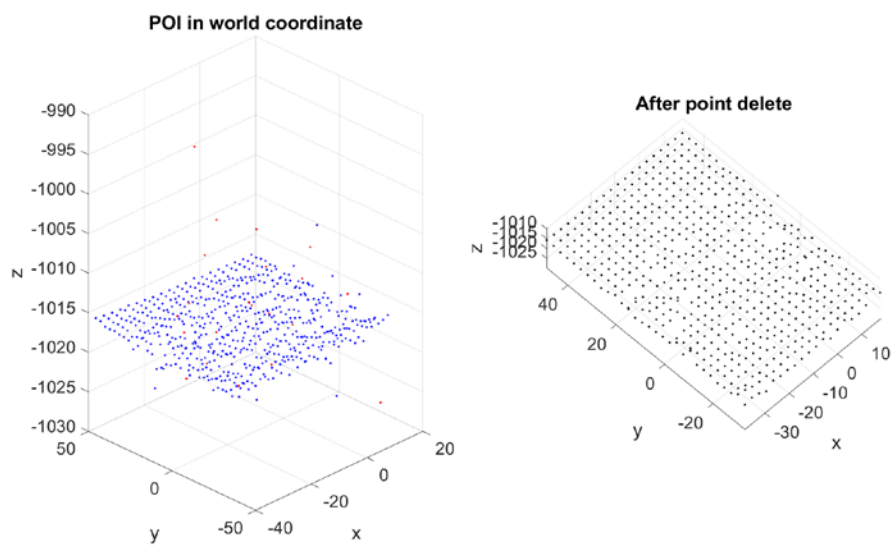


圖 3 - 19 分析點世界座標位置圖

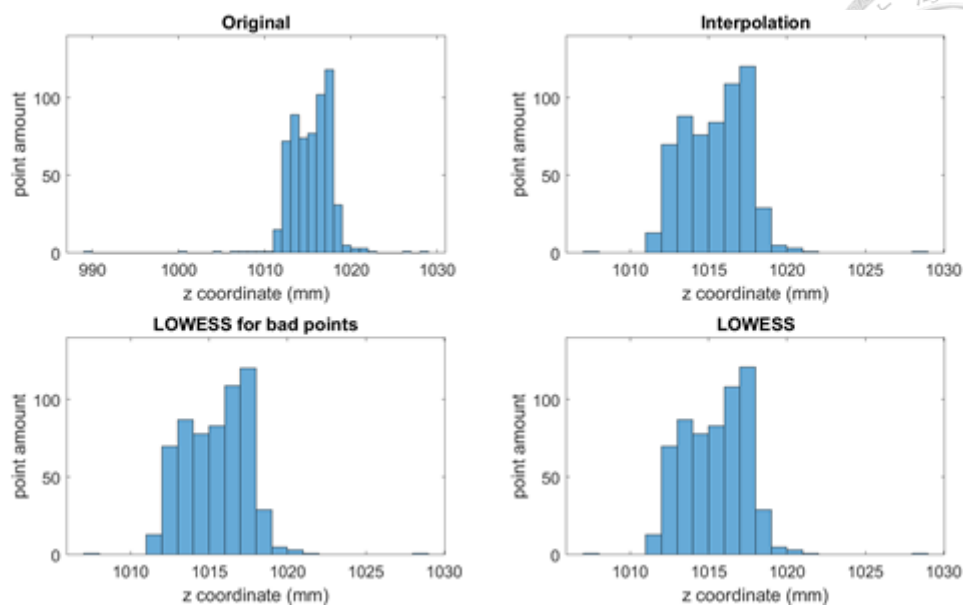


圖 3 - 20 分析點 z 座標分布

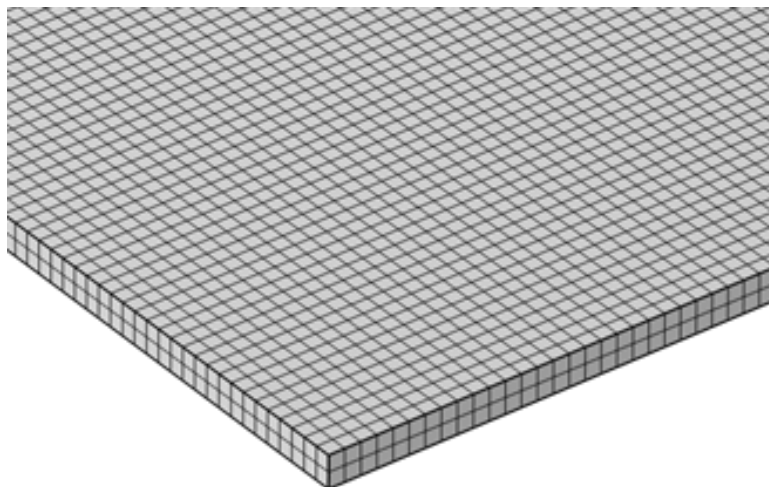


圖 3 - 21 懸臂薄版有限元素法模型網格

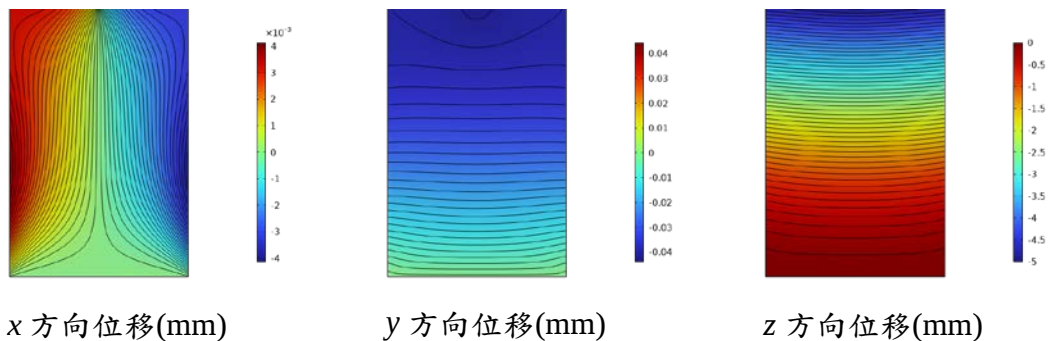


圖 3 - 22 懸臂薄版靜態位移有限元素法結果

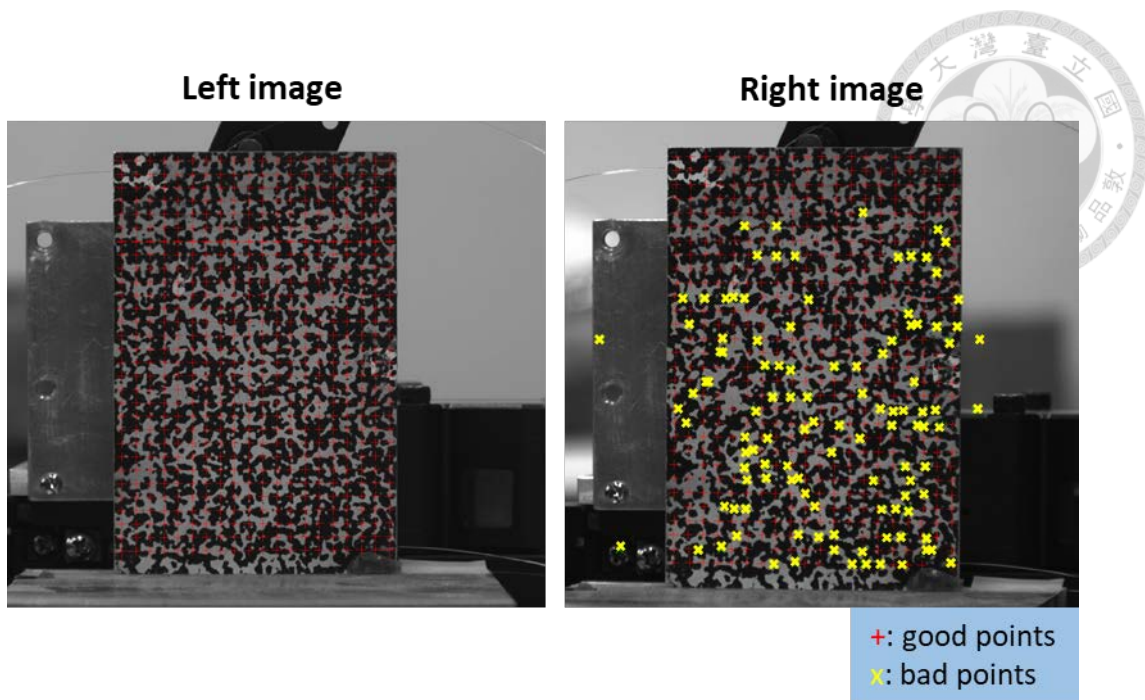
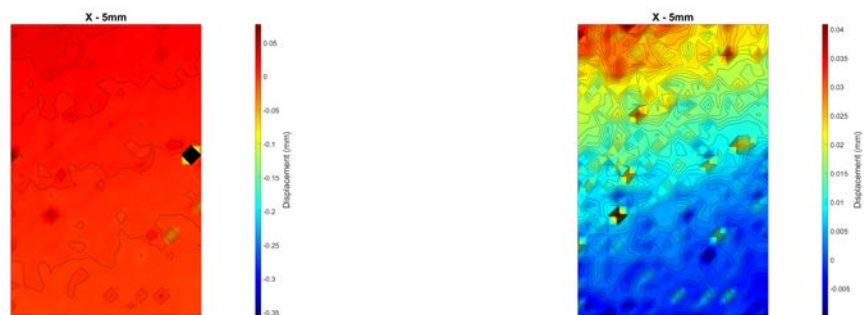
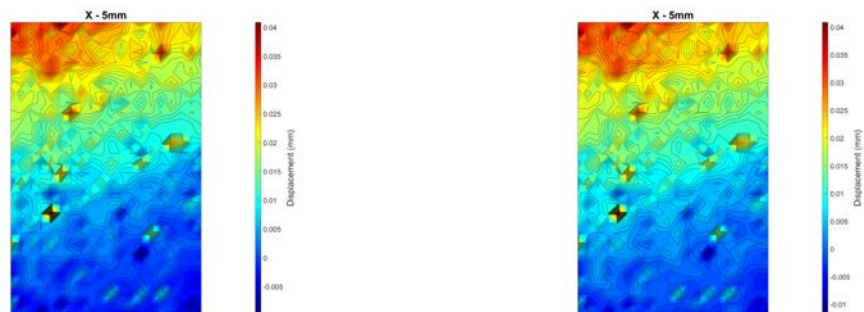


圖 3 - 23 極端選點狀況測試佈點結果



(a) 未使用誤差點篩選

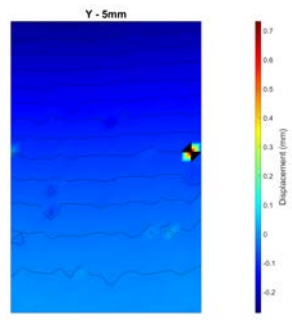
(b) 線性內插計算誤差點位移



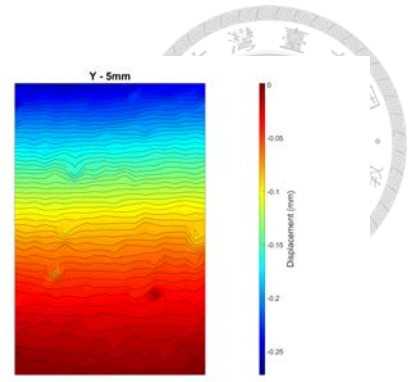
(c) LOWESS 計算誤差點位移

(d) LOWESS 計算全場位移

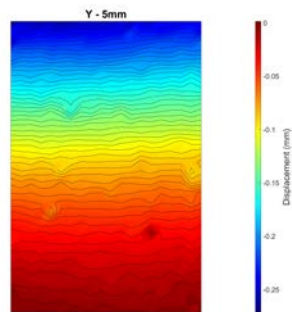
圖 3 - 24 極端選點狀況測試位移結果-x 方向



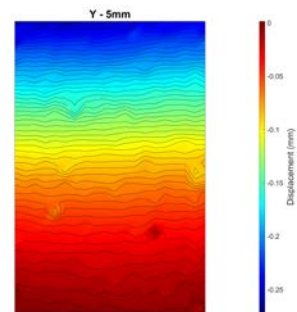
(a) 未使用誤差點篩選



(b) 線性內插計算誤差點位移

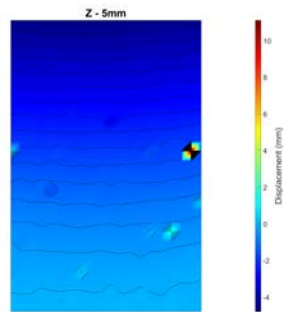


(c) LOWESS 計算誤差點位移

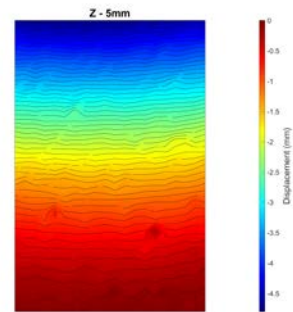


(d) LOWESS 計算全場位移

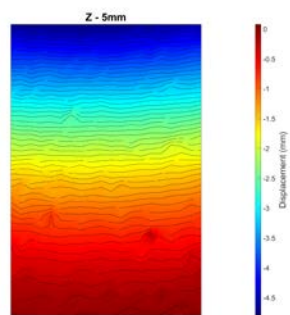
圖 3 - 25 極端選點狀況測試位移結果-y 方向



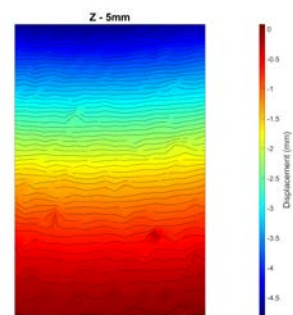
(a) 未使用誤差點篩選



(b) 線性內插計算誤差點位移



(c) LOWESS 計算誤差點位移



(d) LOWESS 計算全場位移

圖 3 - 26 極端選點狀況測試位移結果-z 方向

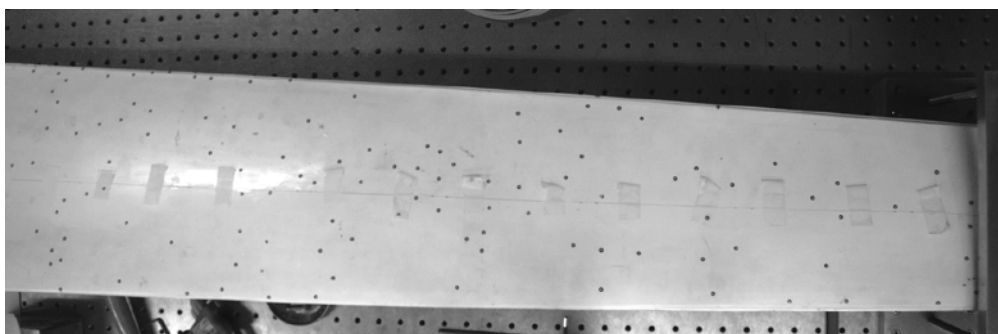


圖 3 - 27 風力發電機葉片表面圖



圖 3 - 28 風力發電機葉片形貌重建實驗架設

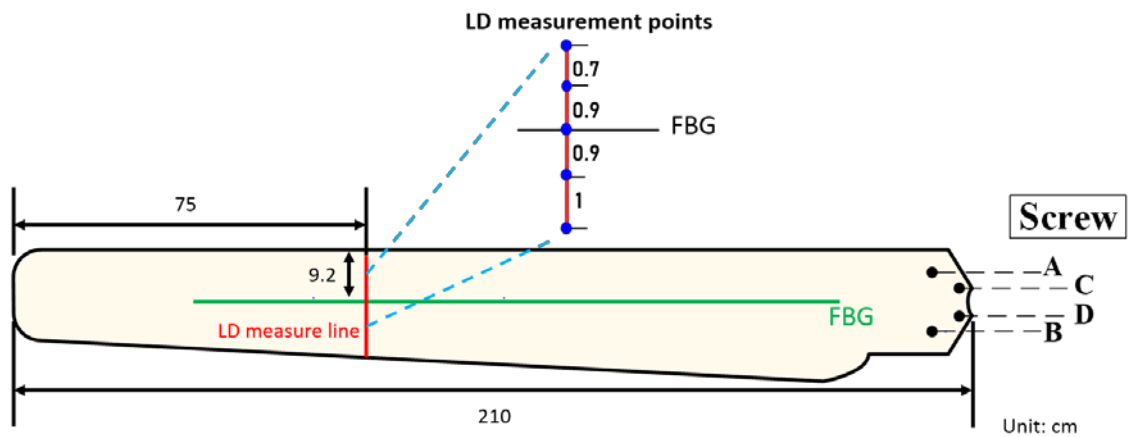


圖 3 - 29 風機葉片形貌重建實驗雷射位移計量測點位置圖

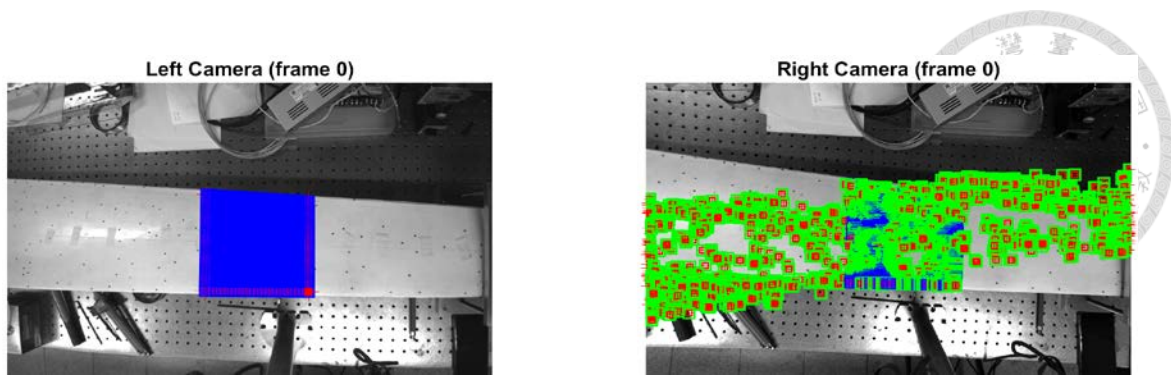


圖 3 - 30 風機葉片形貌重建實驗選點結果

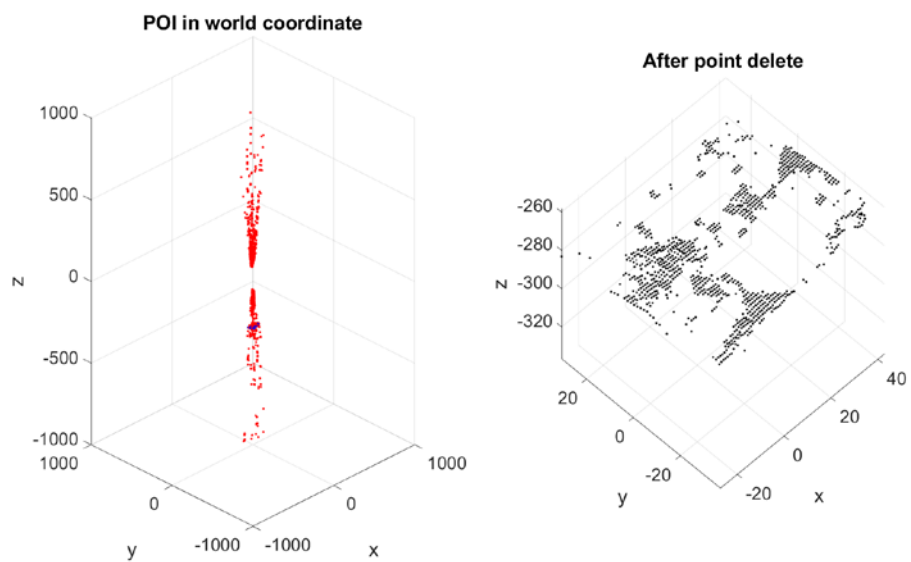


圖 3 - 31 風機葉片形貌重建結果

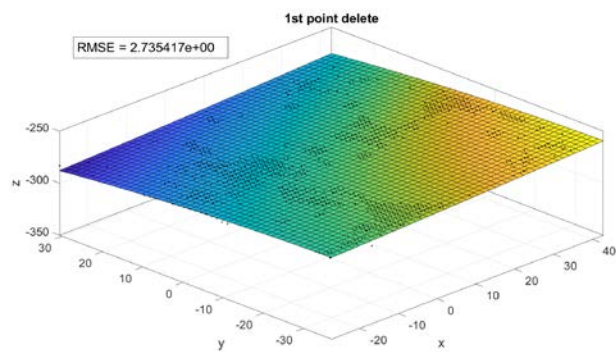


圖 3 - 32 第一次誤差點篩選曲面擬合結果

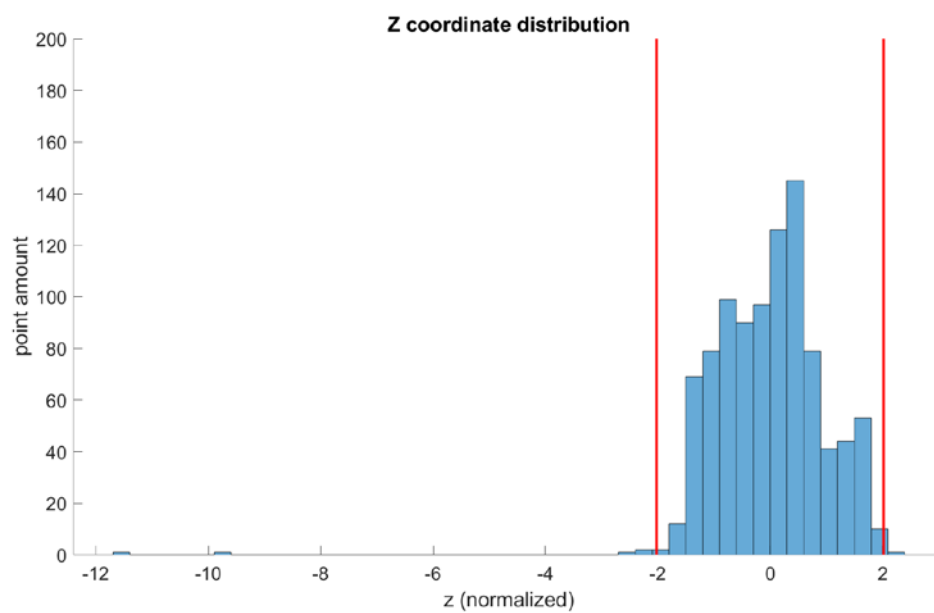


圖 3 - 33 第一次誤差點篩選標準化 z 座標分布及閾值

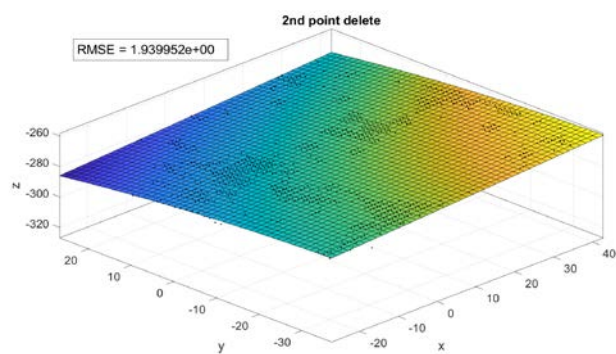


圖 3 - 34 第二次誤差點篩選曲面擬合結果

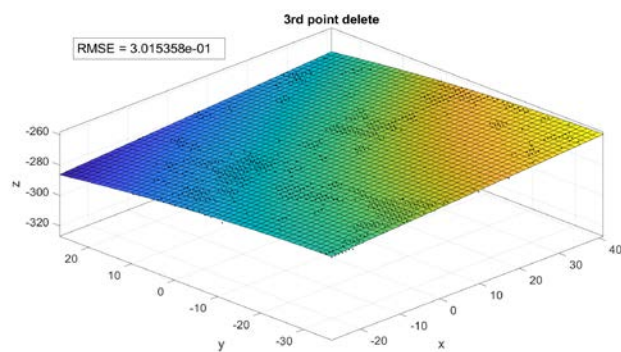


圖 3 - 35 第三次誤差點篩選曲面擬合結果

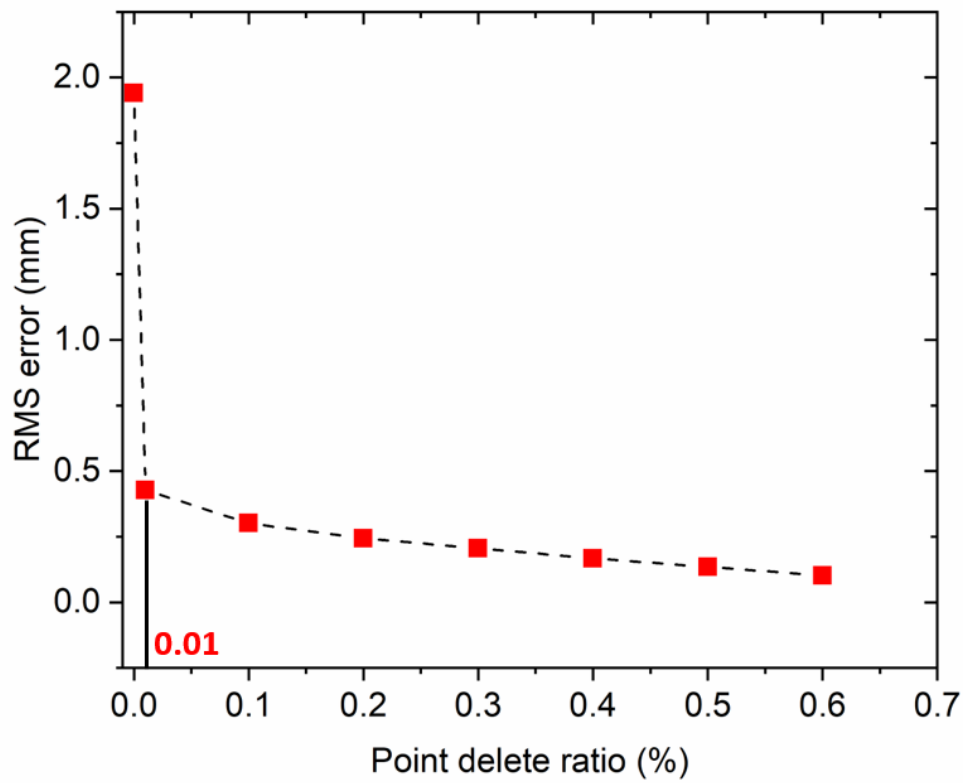


圖 3 - 36 第三次誤差點篩選比例與誤差關係圖

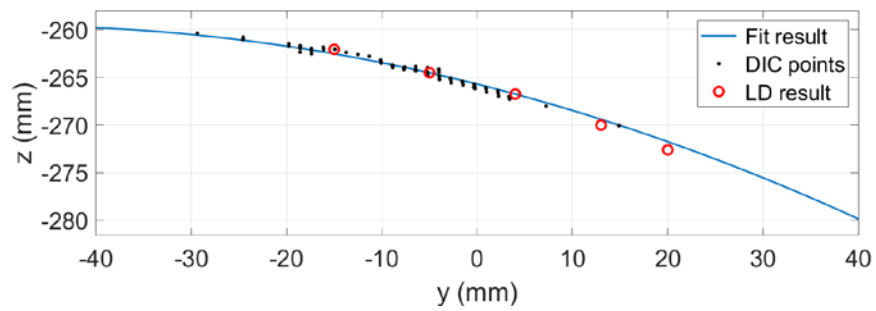


圖 3 - 37 風機葉片形貌重建實驗精度驗證結果

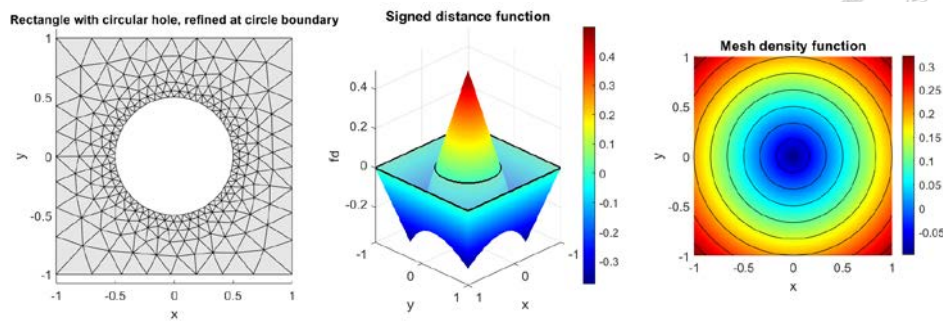


圖 3 - 38 Distmesh 原理示意圖

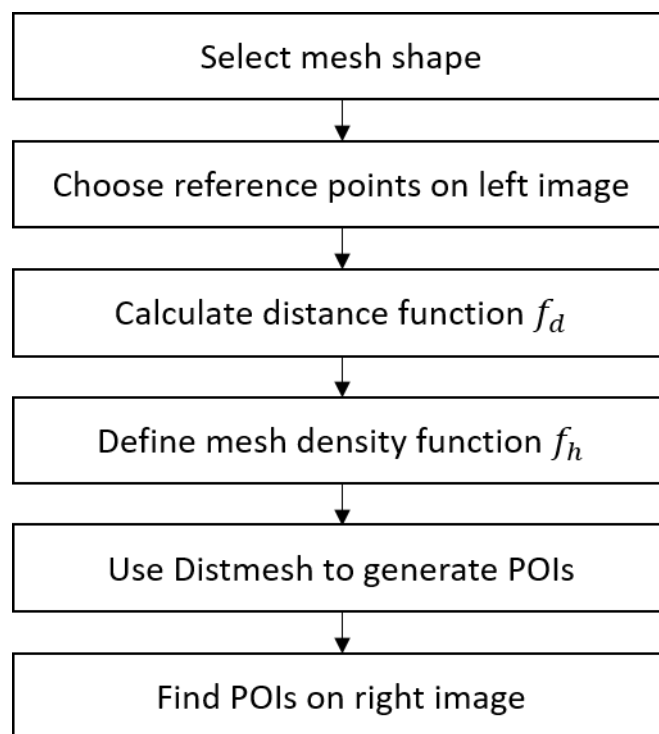


圖 3 - 39 Distmesh 三角形網格全場選點流程圖



圖 3 - 40 Distmesh 三角形網格自動選點範例-任意四邊形

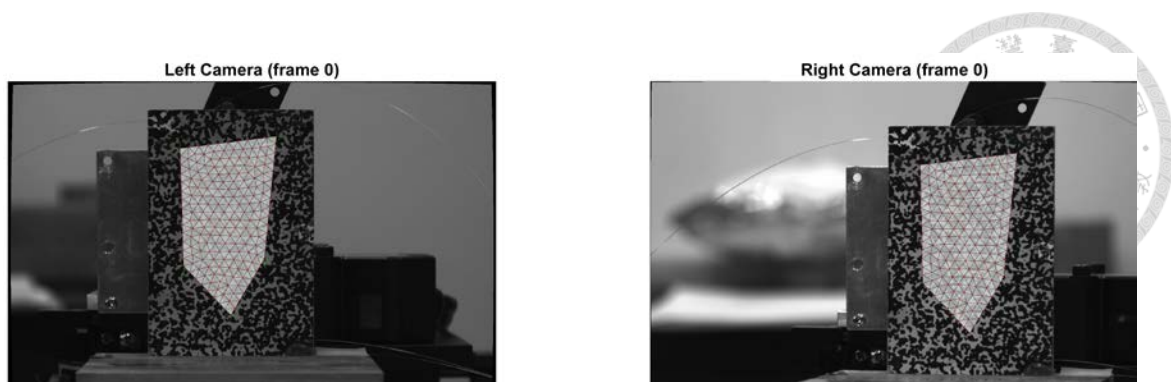


圖 3 - 41 Distmesh 三角形網格自動選點範例-任意五邊形

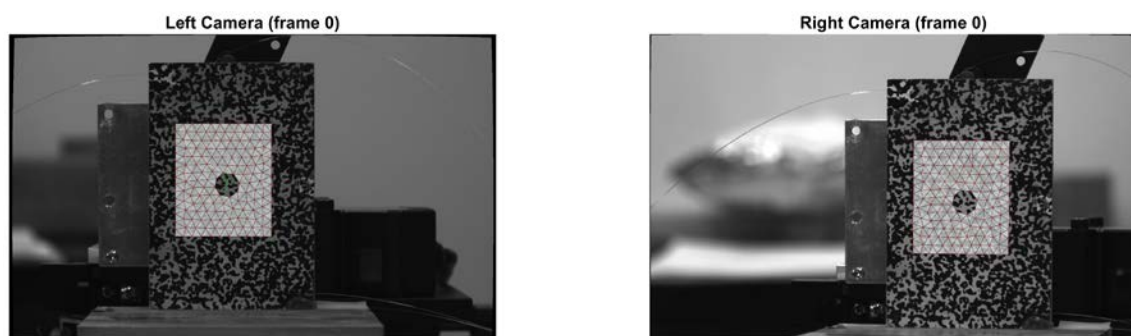


圖 3 - 42 Distmesh 三角形網格自動選點範例-帶圓孔長方形

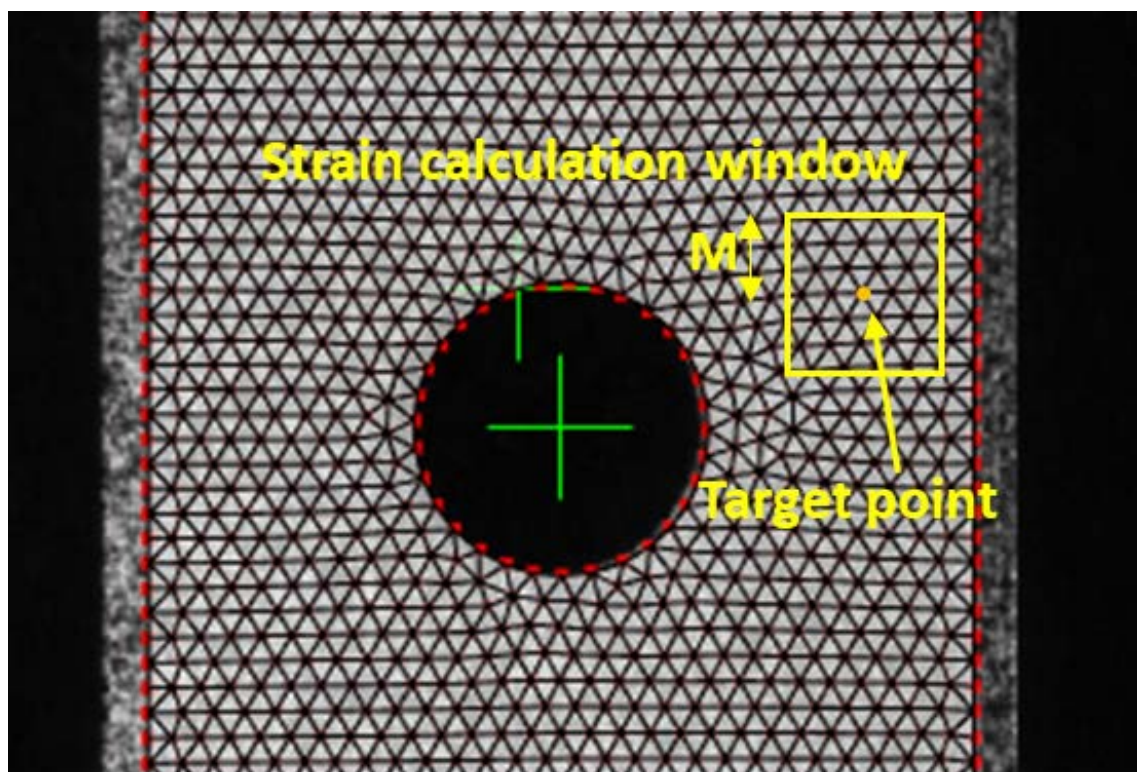


圖 3 - 43 PLS 應用於於三角形網格示意圖

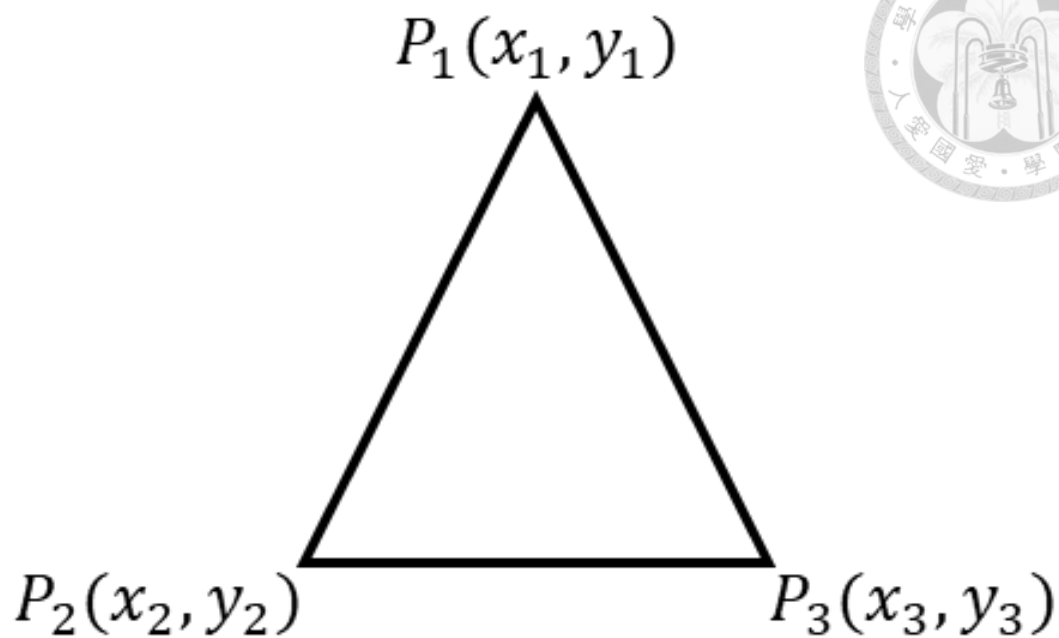


圖 3 - 44 單一三角形元素與節點標號

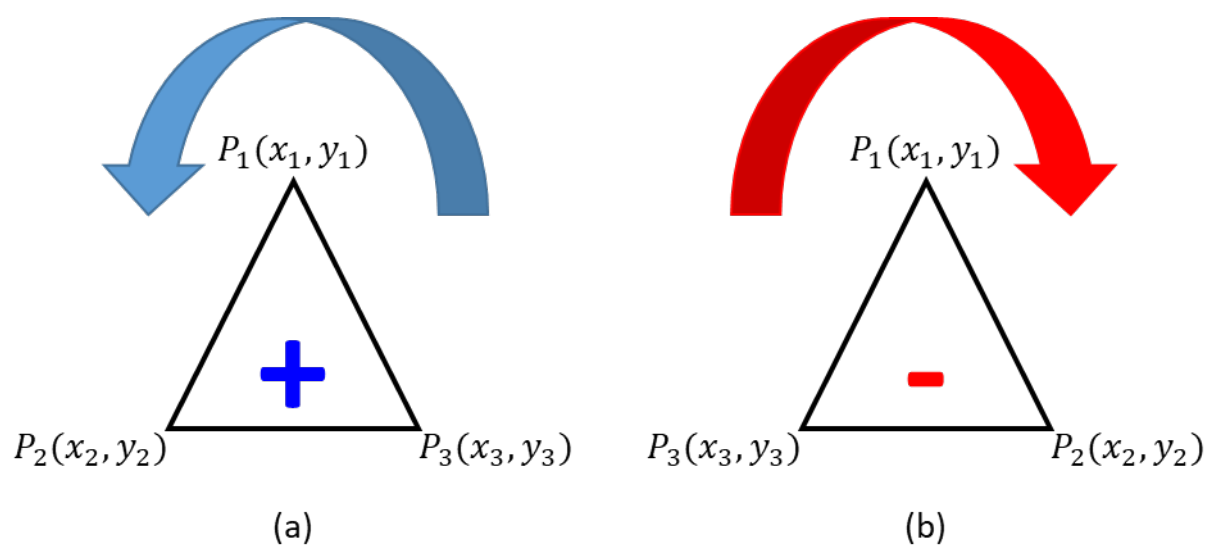


圖 3 - 45 三角形元素指向示意圖

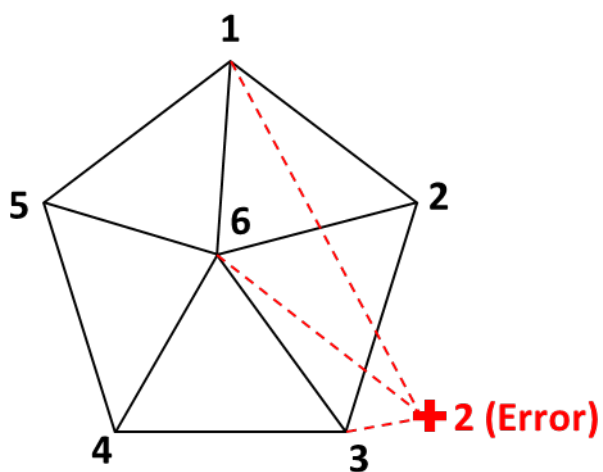


圖 3 - 46 三角形網格選點誤差範例

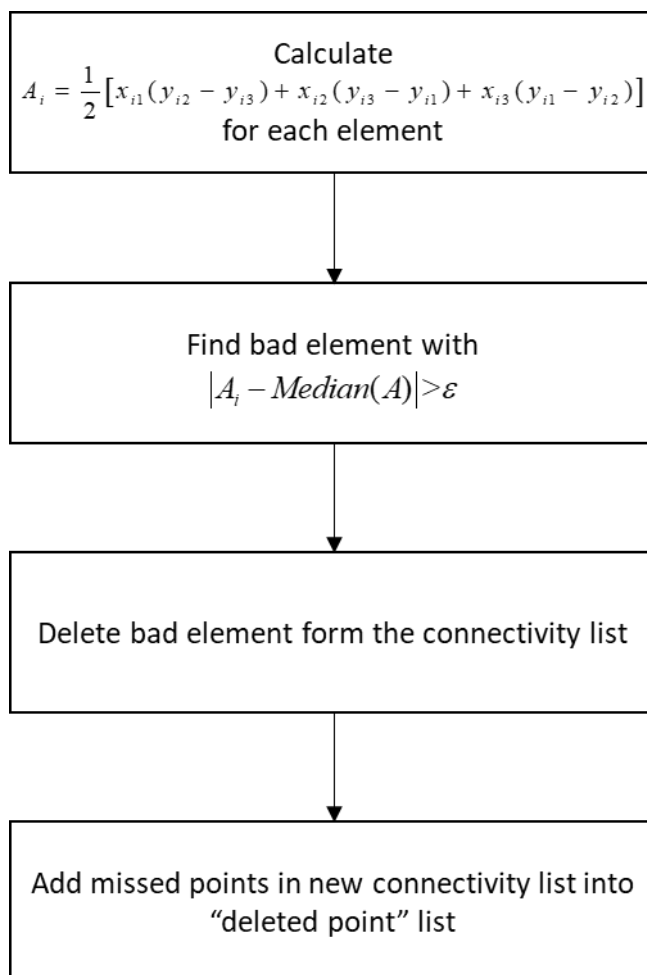


圖 3 - 47 誤差點篩選應用於三角形網格流程圖

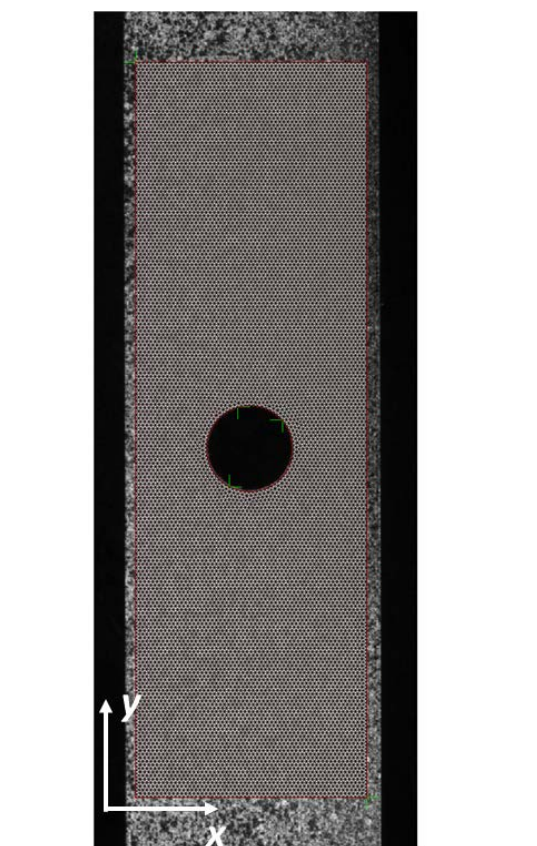


圖 3 - 48 SEM 圓孔試片拉伸試驗選點結果

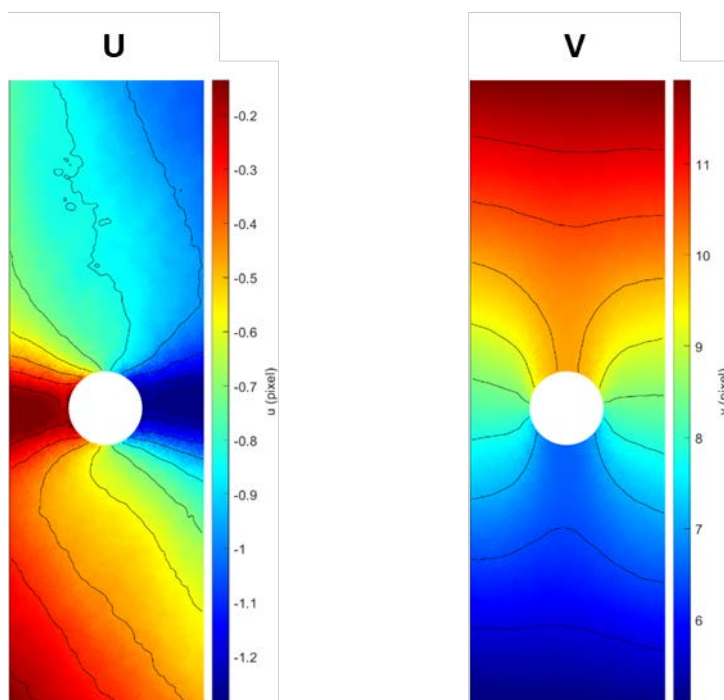


圖 3 - 49 SEM 圓孔試片拉伸試驗位移場

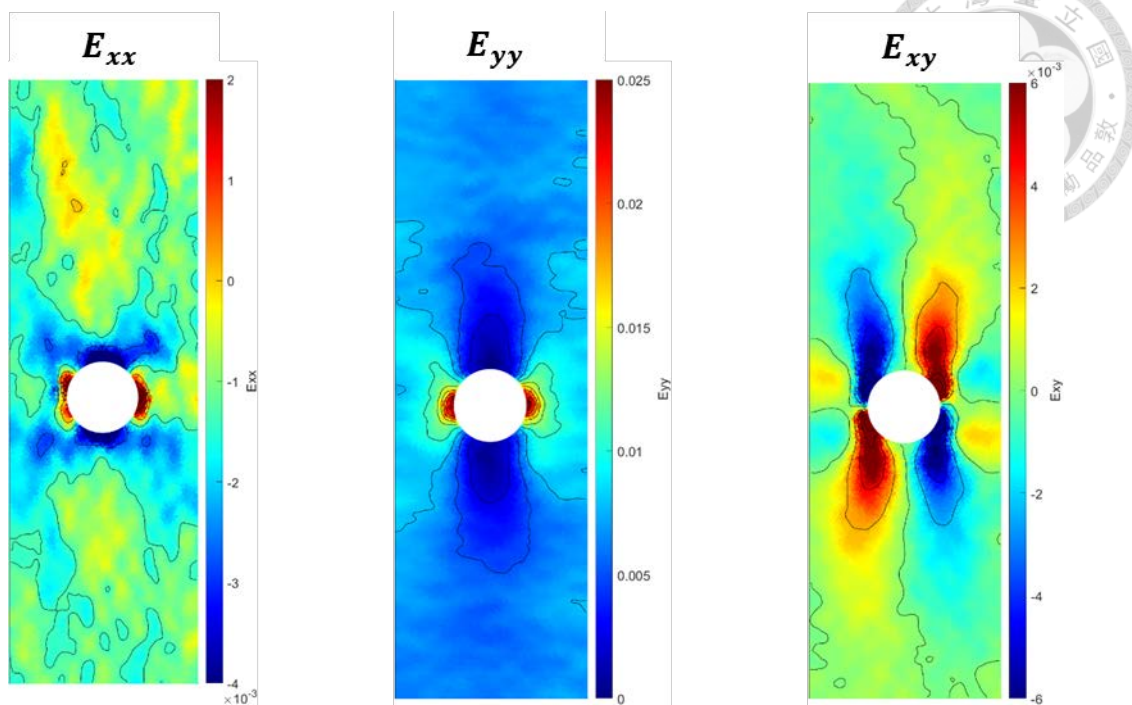


圖 3 - 50 SEM 圓孔試片拉伸試驗應變場

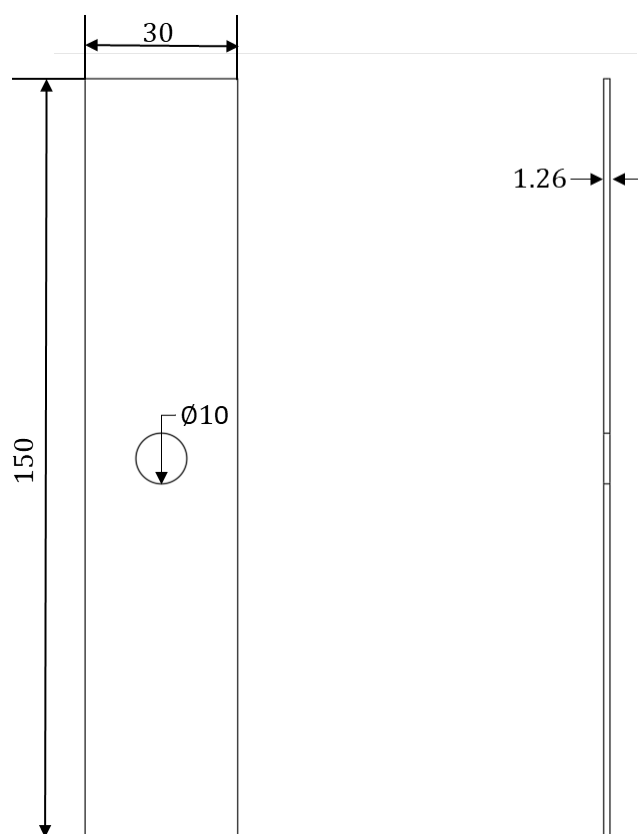


圖 3 - 51 SEM 圓孔試片拉伸試驗試片尺寸圖

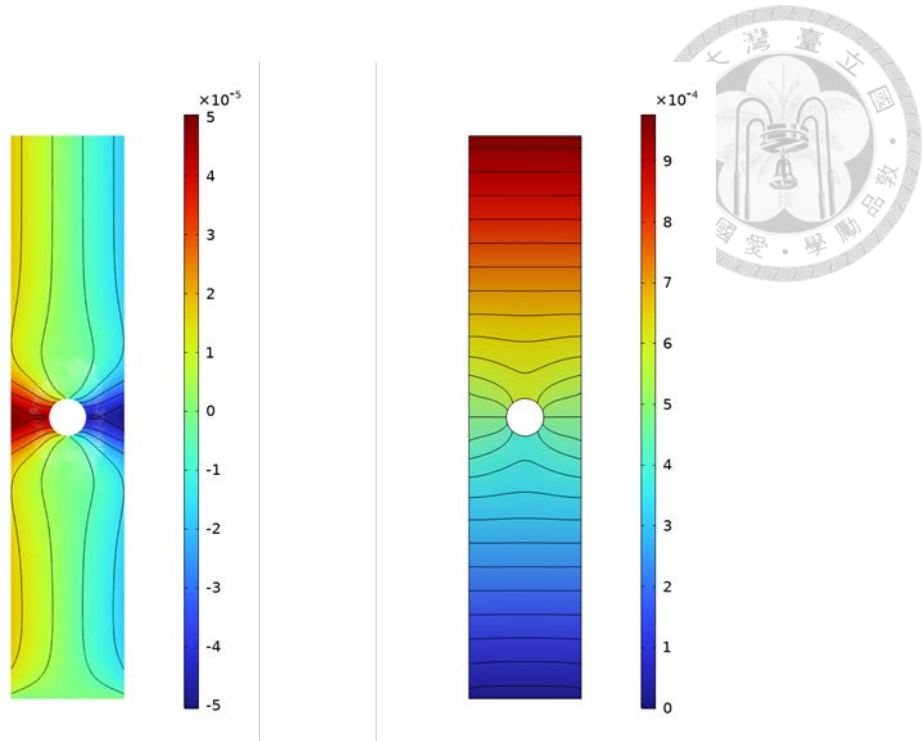


圖 3 - 52 SEM 圓孔試片拉伸試驗有限元素法位移場

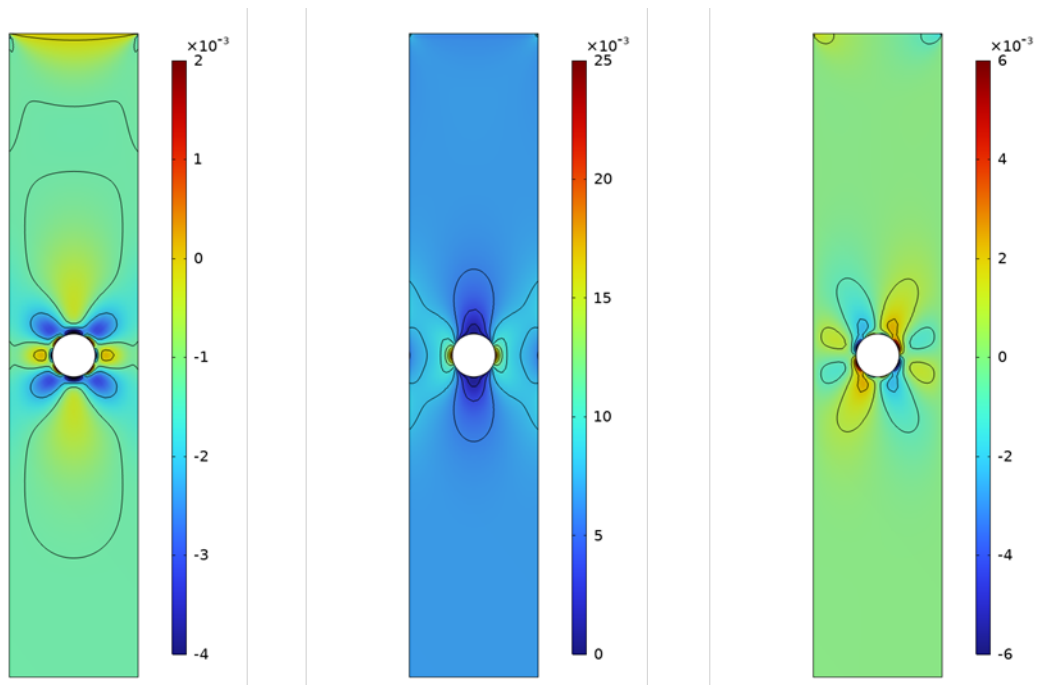


圖 3 - 53 SEM 圓孔試片拉伸試驗有限元素法應變場

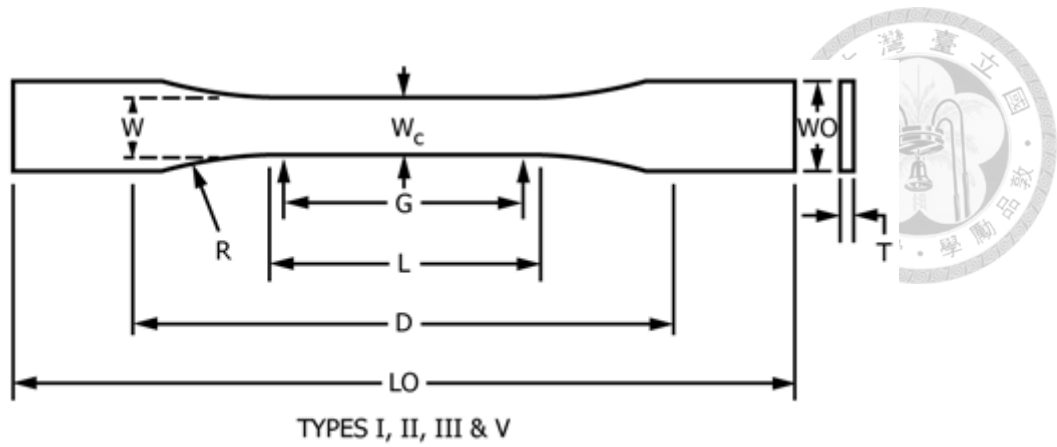


圖 3 - 54 ASTM D638 試片尺寸規範圖(取自 ASTM D638 規範文件)



圖 3 - 55 3D 列印拉伸試片實體圖

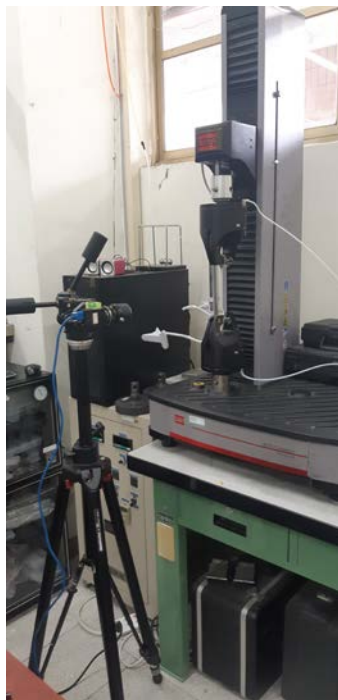


圖 3 - 56 3D 列印拉伸試片全場變形量測實驗架設

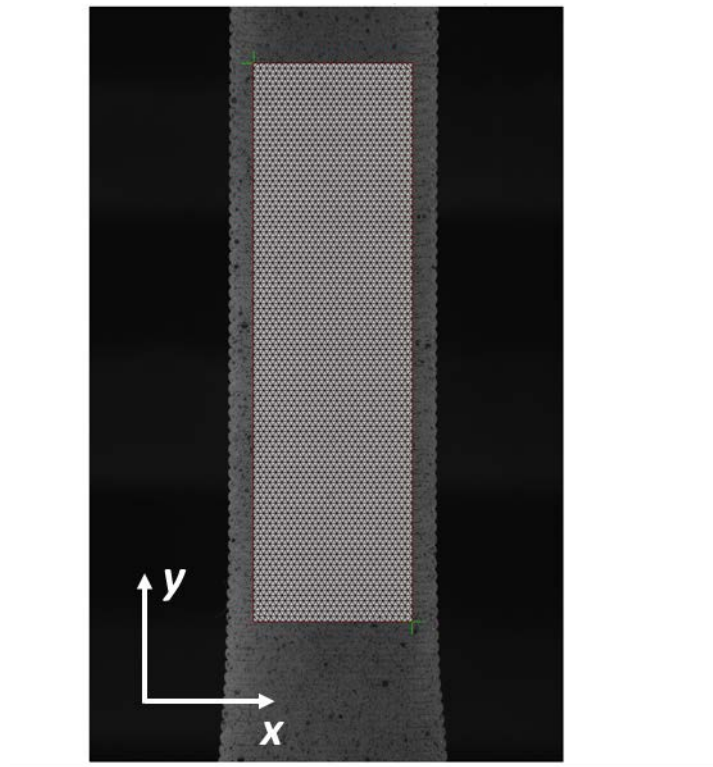


圖 3 - 57 3D 列印拉伸試驗選點結果

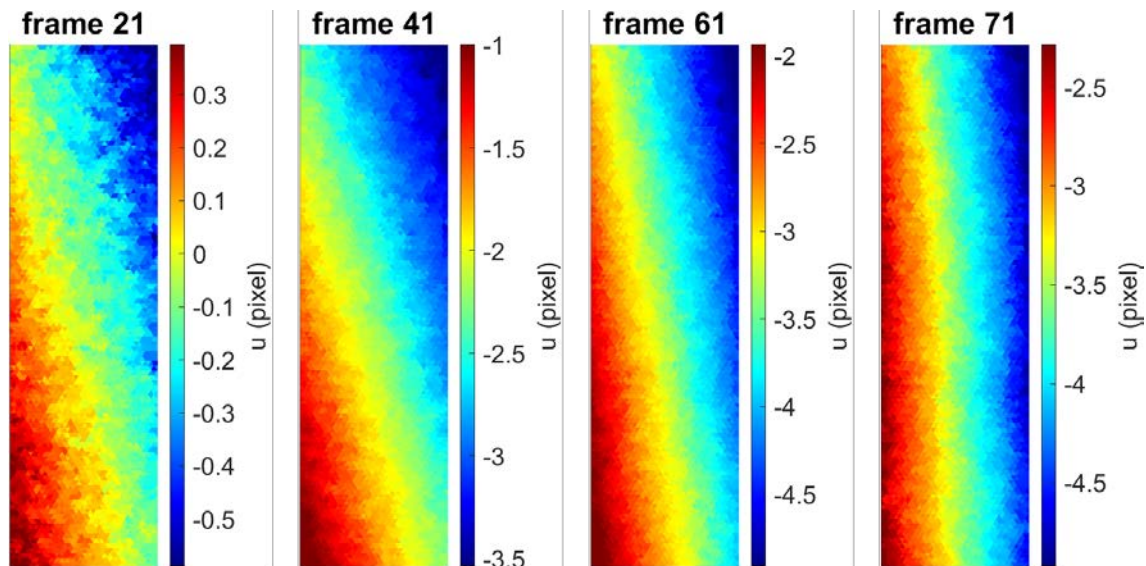


圖 3 - 58 3D 列印拉伸試驗位移場-x 方向

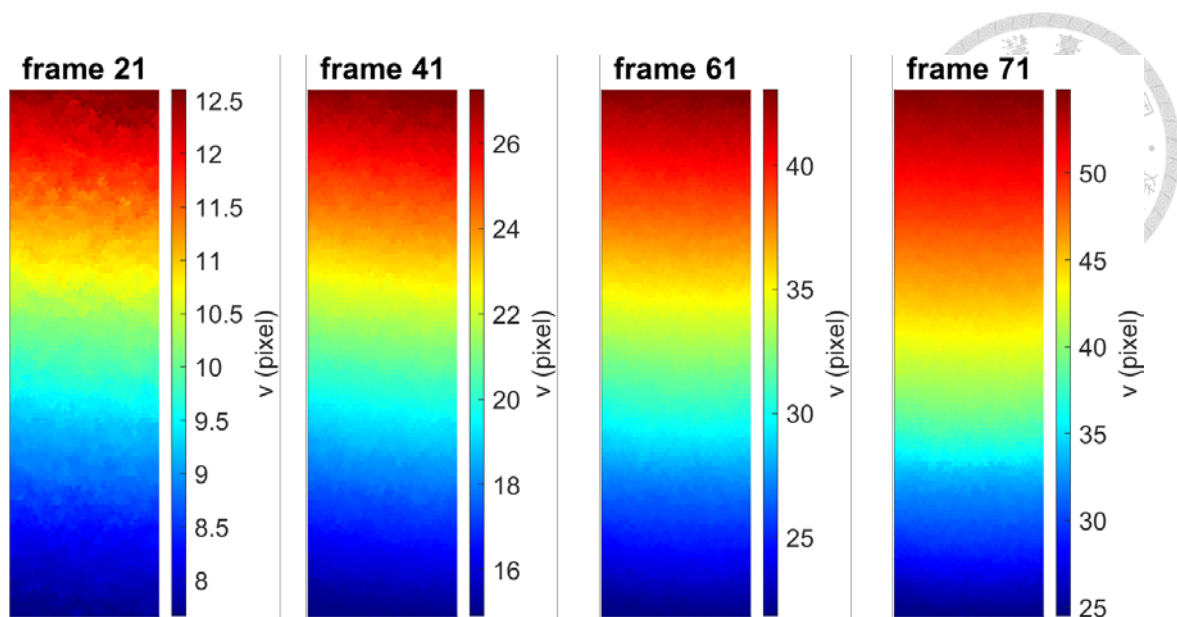


圖 3 - 59 3D 列印拉伸試驗位移場- y 方向

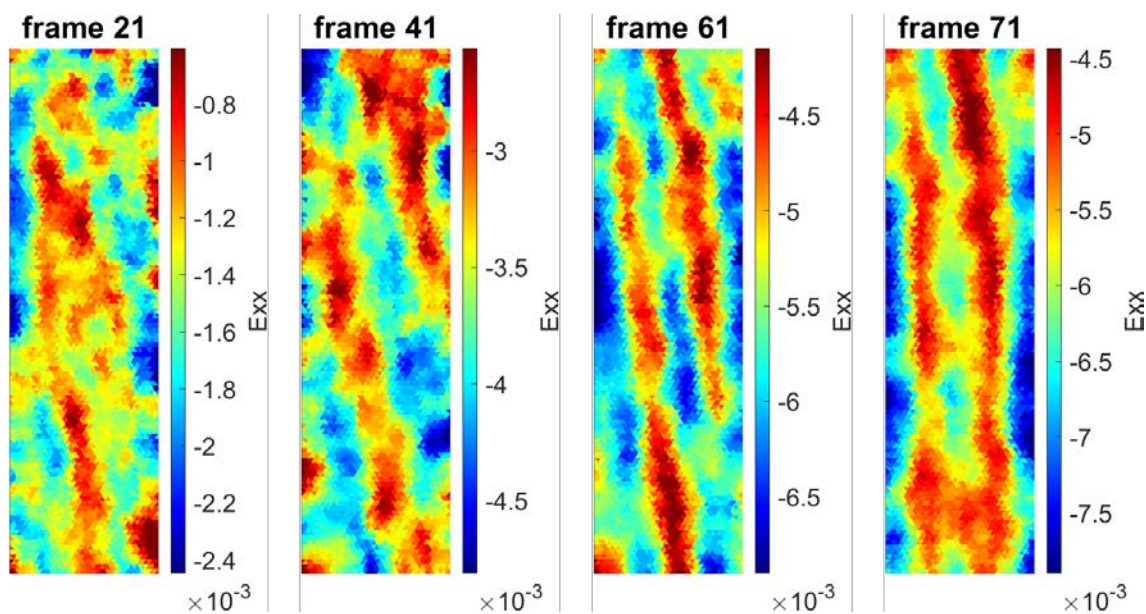


圖 3 - 60 3D 列印拉伸試驗應變場- E_{xx}

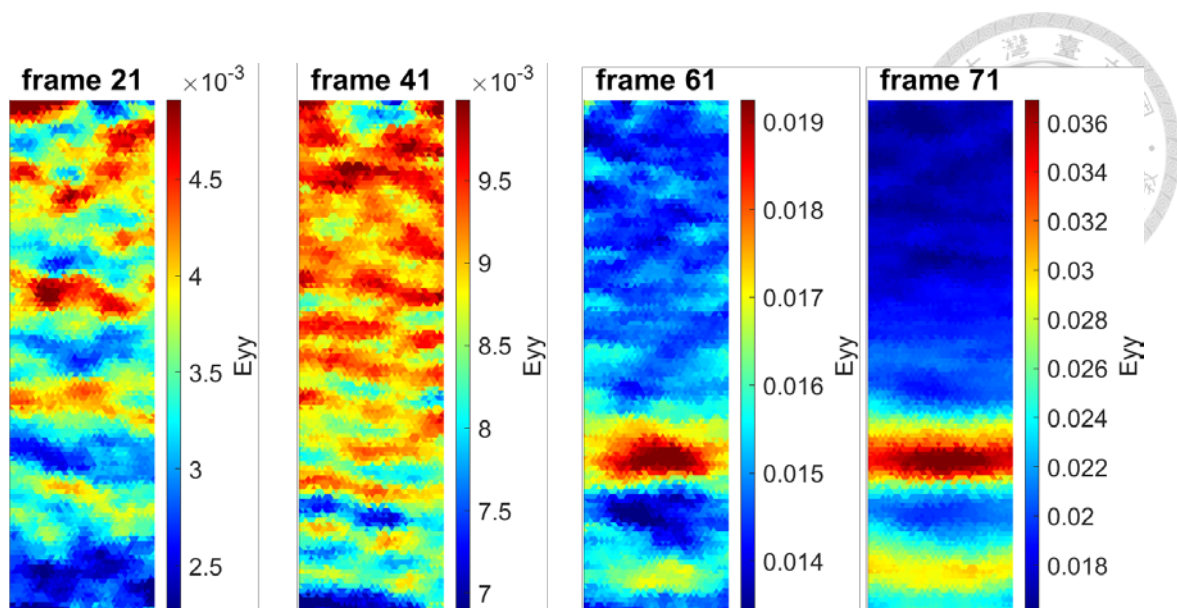


圖 3 - 61 3D 列印拉伸試驗應變場- E_{yy}

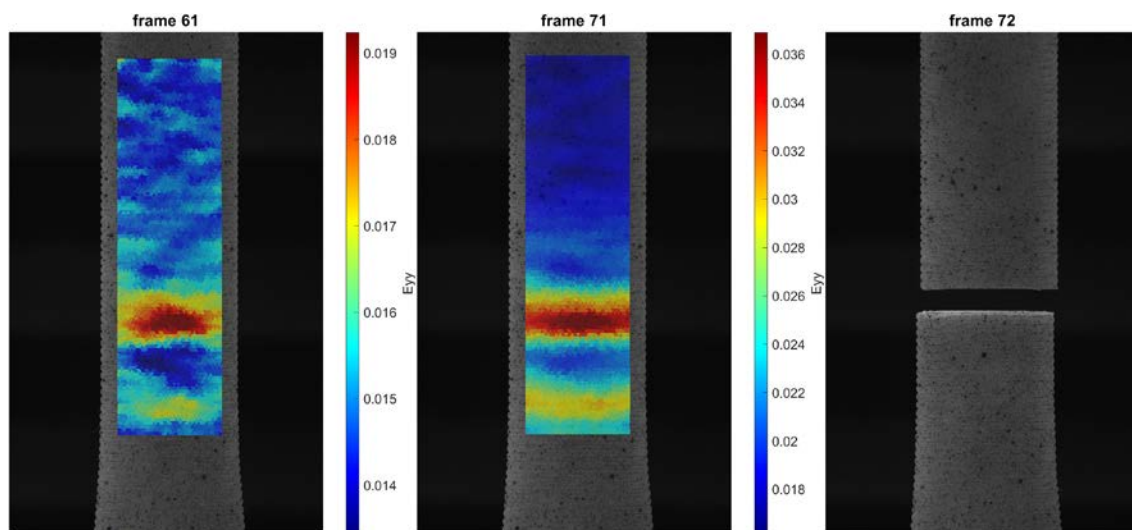


圖 3 - 62 3D 列印拉伸試驗 E_{yy} 疊圖分析



圖 3 - 63 球體形貌重建目標物

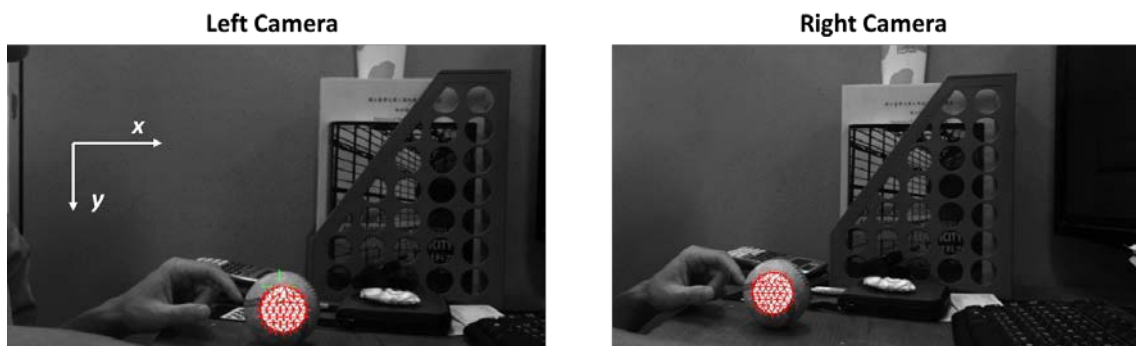


圖 3 - 64 球體形貌重建選點結果

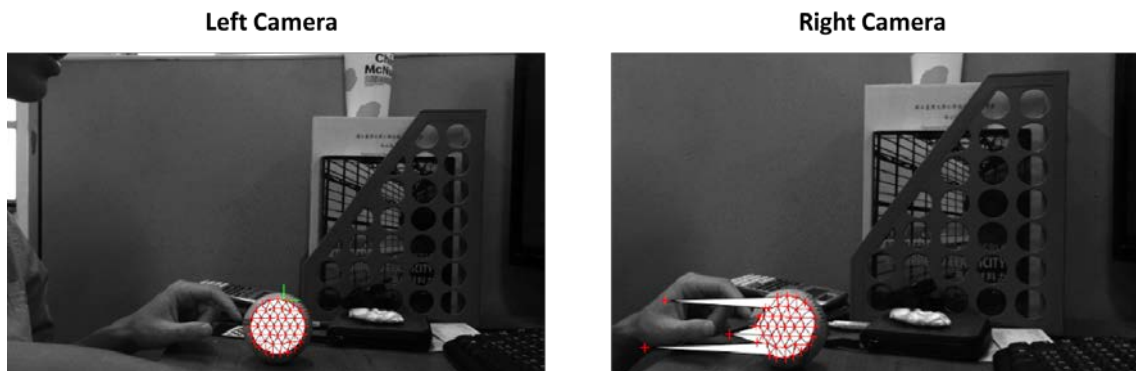


圖 3 - 65 球體形貌重建實驗誤差點篩選測試

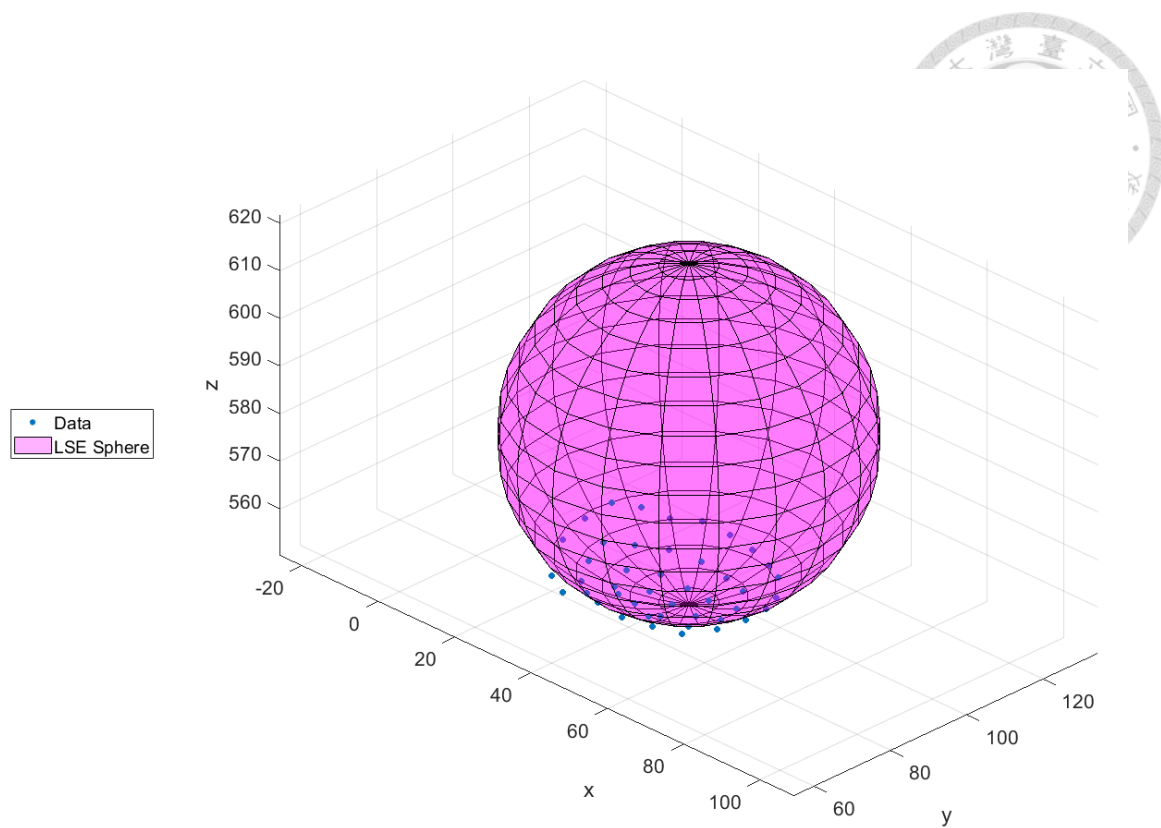


圖 3 - 66 球體形貌重建結果

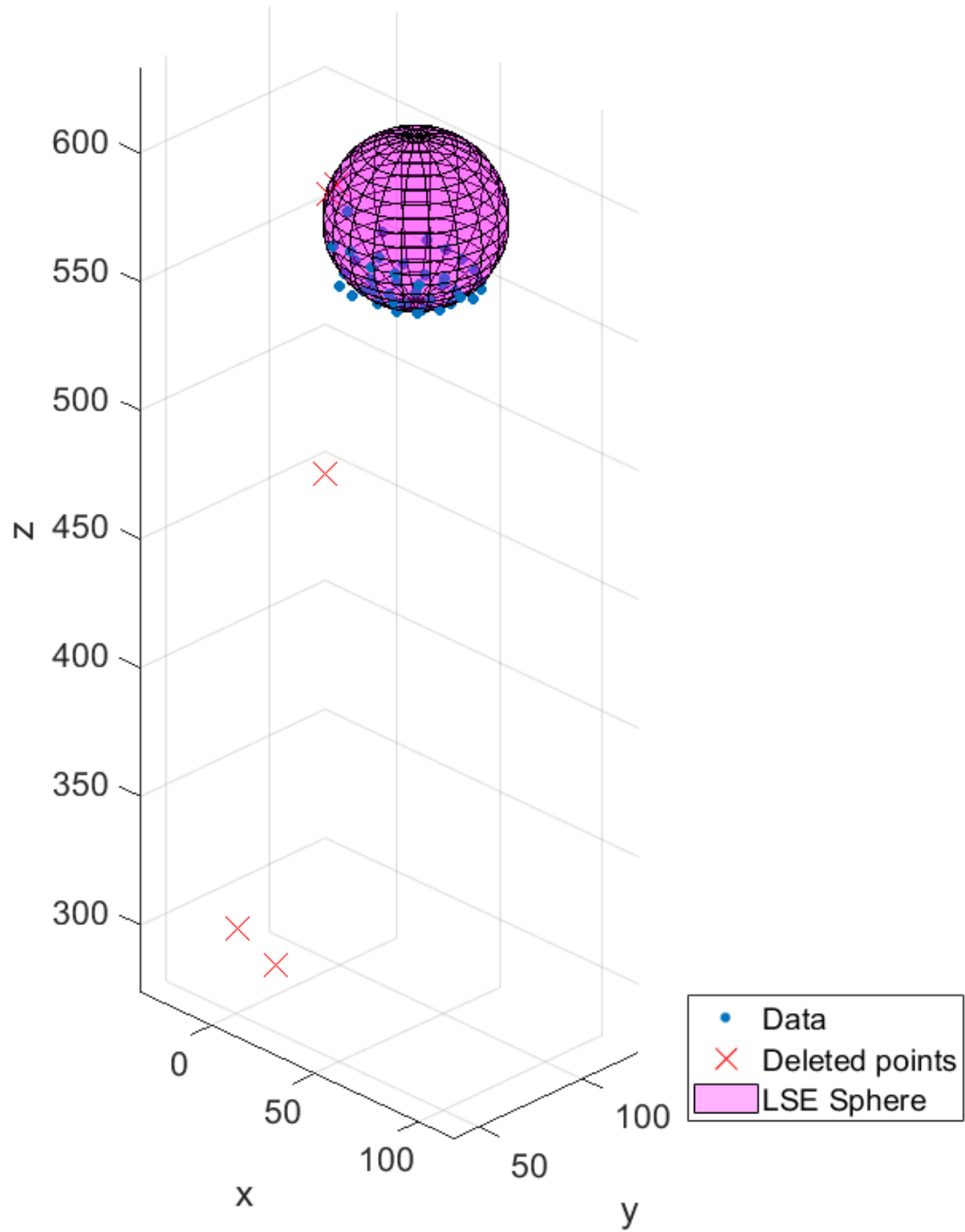


圖 3 - 67 球體形貌重建實驗誤差點篩選結果

第四章 風力發電系統動態變形量測與全場位移重建

隨著淨零碳排、永續發展的趨勢，風力發電之需求日益增加，其中檢測及監測系統是風機運維的關鍵要素。本章發揮數位影像相關法動態量測、全場量測及架設簡單的優勢，針對風力發電機葉片及離岸風力發電機底座進行動態量測，並由全場動態位移進行變形場重建，取得完整的風機系統變形資訊。

本章第一部份針對風力發電機葉片進行單點振動量測，並改變其螺栓鎖固條件，透過快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)得到系統的共振頻率，由其變化觀察變因對風力發電機葉片動態特性之影響，同時與雷射位移計量測之位移比較以驗證精度。第二部分將分析點改為密集均勻分布的全場選點，配合誤差點篩選重建風機葉片之振動變形，並將各點位移數據經 FFT 分析重建特定共振頻率之模態振形。第三部分將量測離岸風力發電機底座模型之振動位移，與前兩部分結合完成對風力發電機整體結構之動態變形量測。

4.1 風力發電機葉片振動位移量測實驗

本實驗透過二維數位影像相關法對風力發電機葉片進行多點量測，作為後續進行全場分析之基礎。實驗中將改變風力發電機葉片之邊界鎖固條件，模擬實際風機之結構破損，並觀察此變因對風機葉片振動之影響，並展示數位影像相關法用於風機系統檢測的潛力。

4.1.1 實驗架設及參數設定

本實驗使用數位工業相機配合 V0814-MP 鏡頭拍攝，fps 設為 150，並使用圖 4-1 的敲擊槌隨機敲擊風機葉片觸發其振動，實驗架設、量測點與敲擊位置可參考圖 4-2，於葉片邊緣有四個鎖固用的螺絲，分別稱為 A、B、C 及 D。實驗中葉片邊界的螺絲鬆弛情形共有 4 種：(1)全螺栓鎖固、(2)鬆弛螺栓 A、(3)鬆弛螺栓 A 及

B 及(4)鬆弛螺栓 A、B 及 C。

由於雷射位移計及風機葉片皆架設於光學桌上，而工業相機為了拍攝範圍固定於另一張光學桌，使進行敲擊時桌面相對相機有相對位移，會使雷射位移計與數位影像相關法之位移結果不同，因此除了風機葉片外，於雷射位移計上另貼附有 QR Code，如圖 4 - 3 所示，進行計算時能將風機葉片之位移減去雷射位移計之位移進行校正。數位影像相關法之選點如圖 4 - 4 所示，point 1 為風機葉片上追蹤的目標點，point 2 為進行位移校正用的參考點，半窗格設為 10，搜尋窗格設為 30。

4.1.2 實驗結果

位移校正前

於全螺栓鎖固條件下，進行位移校正前由數位影像相關法及雷射位移計量測得到之振動位移如圖 4-5 所示，兩者具有相同的趨勢，但在量值上有明顯的不同。若觀察 point 1 及 point 2 之位移，如圖 4-6，point 2 受到光學桌上下震盪影響有明顯的位移，連帶影響雷射位移計及數位影像相關法之結果未能有良好的對應性。因此，必須將 point 1 之位移減去 point 2 之位移值，才能使數位影像相關法之結果與雷射位移計之量測值更接近。

位移校正後

將數位影像相關法得到 point 1 之位移減去 point 2 之位移後，四種鎖固條件下之量測結果如圖 4-7 至圖 4-10 所示。於全螺栓鎖固條件下由圖 4-5 及圖 4-7 比較進行誤差校正前後之結果，其中進行校正後數位影像相關法與雷射位移計之結果有更好的對應性。



共振頻率變化

將風機葉片之振動位移進行 FFT，得到其頻率響應並能得出其主要模態之共振頻率。全螺栓鎖固、鬆弛螺栓 A、鬆弛螺栓 A 及 B 及鬆弛螺栓 A、B 及 C 四種鎖固條件下之頻率響應如圖 4-11 至圖 4-14 所示，其中有三個主要的共振模態，於全螺栓鎖固條件下共振頻率分別為 7.94Hz、27.19Hz 及 35.44Hz，分別將其稱為 mode 1、mode 2 與 mode 3。由數位影像相關法及雷射位移計量測得到不同鎖固條件下，三個模態之共振頻率如表 4-1 及表 4-2 所示，其中兩種量測方法得到之頻譜及共振頻率皆有良好的對應性。此外，隨著鬆弛的螺栓數量增加，風機葉片之共振頻率有下降的趨勢，其中第三模態之頻率變化量最為明顯，而第二模態之共振頻率受到螺栓鬆脫之的影響較小，且鬆弛螺栓 A 及 B 與鬆弛螺栓 A、B 及 C 之頻率差異不大。

此結果證實數位影像相關法具備良好的動態量測能力，並發揮多點量測的優勢區分風機葉片及光學桌的位移，透過校正避免量測結果受到基座位移之影響。隨著鬆弛螺栓降低的共振頻率顯示結構缺失降低了風機葉片系統的剛性，顯示數位影像相關法能應用於風力發電機系統之結構檢測，將頻率變化作為結構損傷的預兆。

4.2 風機葉片全場振動位移量測及變形重建

本實將以 4.1 節之由單點量測延伸為針對風機葉片的全場振動位移量測，取得葉片整體的振動位移場，並透過 FFT 進一步分析風機葉片系統之模態振型，以更完整的了解此系統之動態特性。本節第一部分為全場量測的實驗架設之細節，再介紹數位影像相關法計算中使用的誤差點篩選、位移校正與模態重建等數據處理方法，最後由實驗結果分析風機葉片系統之動態特性，包括其模態振型及阻尼比等資訊。



4.2.1 實驗架設

本實驗之架設與 4.1.1 小節中之實驗架設類似，將風機葉片上之 QR code 特徵改為貼上報紙以利全場追蹤，另外於光學桌上貼附五個 QR code 特徵，用以追蹤桌面位移，進行位移之校正，圖 4-15 為架設示意圖，圖 4-16 為實際拍攝之相片。

實驗中以敲擊槌單次敲擊葉片自由端點，量測其振動位移並由振幅衰減計算阻尼比。

4.2.2 參數設定與數據處理

參數設定

本實驗使用單台工業相機配合 V0814-MP 鏡頭拍攝，fps 設為 150，半窗格設為 10 pixel、搜尋窗格為 20 pixel，沿著風機葉片平均分布 100 個分析點，如圖 4-17 所示，其中靠近固定端處為 point 1，自由端為 point 100，使用之追蹤演算法為 ZNCC+CCPF。

誤差點篩選

本實驗於風機葉片上貼附報紙建立可拆卸的表面特徵，簡化實驗架設的同時使量測條件更貼近於實際應用，在未能添加良好特徵點的狀況下進行量測。在此情形下，位移結果會產生明顯的雜訊，本實驗中透過誤差點篩選處理此問題。

進行篩選的條件為相關係數及量測之位移值，首先將相關係數小於 0.9 之分析點進行刪除，再去除 y 方向位移上下各 2% 的離群值，最後對風機葉片之變形進行擬合，如式(4.1)，

$$v(x,t) = ax(t)^2 + bx(t) + c \quad (4.1)$$

其中 $v(x)$ 為風機葉片在 t 時刻 y 方向之位移，將風機葉片之變形視為二次曲線，並



以近似值取代誤差點之位移資料。實際應用時篩選結果如圖 4-18 所示，其中明顯偏差的點成功被濾除。

桌面位移校正

由於實驗架設與 4.1 節類似，本實驗之量測結果亦會受到光學桌位移影響，因此計算時亦須考量此條件，透過減去光學桌位移進行校正。與 4.1.1 小節之校正機制不同的是，在多點量測時額外考量光學桌的傾斜，透過光學桌側面的五個點擬合桌面位移 $\delta_y(x)$ ，如圖 4-19 及式(4.2)。

$$\delta_y(x) = ax + b \quad (4.2)$$

在小角度傾斜之假設下，桌面位移與 x 座標為線性關係，其中 a 代表桌面傾斜之斜率。實驗中透過數位影像相關法得到之風機葉片原始位移，並由桌面上的五個點之位移擬合得到 $\delta_y(x)$ ，針對各分析點之 x 座標減去該位置的桌面位移即完成位移之校正。

阻尼比計算

得到風機葉片受敲擊激振後之暫態位移後，透過振動學理論能計算出系統之阻尼比。由於風機葉片受敲擊後位移逐漸遞減，可推測此系統在次阻尼 (underdamping) 條件下，其位移函數可寫為式(4.3)。

$$x(t) = X_0 e^{-2\pi\xi_i f_n t} \cos(\omega_d t - \theta) \quad (4.3)$$

其中 $x(t)$ 為暫態位移、 X_0 為初始振幅、 ξ_i 為阻尼比、 f_n 為自然頻率、 ω_d 為阻尼自然頻率。對於低阻尼系統， f_n 及 ω_d 之值相近，能透過波峰出現之間隔或 FFT 近

似系統之阻尼自然頻率，並由振幅衰減推估阻尼比。由式(4.3)取出振幅得到式(4.4)，其中 $X(t)$ 為 t 時刻之振幅。

$$X(t) = X_0 e^{-2\pi\xi_i \omega_d t} \quad (4.4)$$

實驗中透過數位影像相關法量測數個時刻下的振幅值 $X(t_i)$ ，並使用式(4.4)進行最小平方擬合，得到振幅與時間之關係式，即可推算系統之阻尼比。

模態振型重建

根據模態正交性(Normal mode)，風機系統之振動位移能視為各模態之疊加，如式(4.5)，

$$u_2(x_1, t) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t) W_i(x_1) \quad (4.5)$$

其中 $u_2(x_1, t)$ 為 x_1 位置上，風機於 y 方向震盪之位移， $q_i(t)$ 為時間函數，代表第 i 模態以其共振頻率進行簡諧震盪， $W_i(x_1)$ 為第 i 模態之變形函數。

本實驗首先通過敲擊激發帶有多個模態振動的暫態位移，並由 FFT 得到其主要的共振頻率。透過這些頻率之共振頻率下的帶通濾波器(bandpass filter)能過濾出各模態下風機葉片之振動位移，如圖 4-20 所示。本節使用之帶通濾波器以 FFT 得到之峰值頻率為中心，頻寬為 0.2Hz。

4.2.3 實驗結果

本小節首先會比較進行數據處理前後之結果，驗證 4.2.2 小節中之方法的效果，再以數據處理前後之資料呈現風機葉片之阻尼比和變形及模態重建結果，完整分析風機葉片系統之動態特性。



數據處理效果驗證

透過 ZNCC+CCPF 計算得到之原始位移資料及進行誤差點篩選後之結果如圖 4-21 所示，原始資料除了有明顯的雜訊外，在敲擊前本應靜止的風機葉片受桌面位移影響有上下擺動的現象。進行誤差點篩選後，多數的雜訊成功被濾除，使位移訊號較連續，顯示誤差點篩選方法於本實驗有良好的效果。

光學桌側面五個點之位移與扣除桌面位移進行校正之結果如圖 4-22 所示，其中桌面最大位移約為 2mm，造成風機葉片在敲擊前已有明顯的位移產生，同時使風機葉片振動的中心位置偏離 $y=0$ 處。經過位移相減校正後，成功濾除了數位影像相關法追蹤及桌面位移造成的誤差，驗證了 4.2.2 小節中的數據處理方法之有效性。

頻域訊號及阻尼比分析

將 1.2 至 3.8 秒間之位移訊號進行 FFT，結果如圖 4-23 及圖 4-24 所示，其中有兩個較明顯的共振頻率，分別為 8.06Hz 及 35.29Hz，與 4.1.2 小節中，全螺栓鎖固條件下單點量測之結果有所對應。不同的是，於前一節的實驗中能觀測到共振頻率為 27.19Hz 的第二模態，於本實驗中沒有明顯的峰值，推測是本實驗使用單次敲擊峰激自由端進行激振，使該模態較難被激發。

由 FFT 得到之頻譜得知本實驗中風機葉片之暫態位移以第一共振頻為主導，因此可忽略其他模態之影響，由暫態位移之峰值計算第一模態的阻尼比。針對 point 20、point 40、point 60、point 80 及 point 100 五個點進行阻尼比分析之結果如圖 4-25 所示，由各點之位移計算之阻尼比整理得表 4-3，其阻尼比皆在 0.022 至 0.03 間，較靠近固定端之 point 20 及 point 40 有較大的阻尼比，而 point 60、point 80 與 point 100 之阻尼比相近。由於靠近固定端之位移量值較小，其結果受到雜訊的影響較大，同時第三模態之量值在 point 20 及 point 40 較自由端處更為明顯，也使該

位置之擬合結果參考性較低，因此系統第一模態之阻尼比應在 0.022 至 0.023 間。



振動位移及模態振型重建

透過全場位移量測能重建各時刻下風機葉片之變形，如圖 4-26 所示，其中黑色圓圈為分析點之位移，經過二次曲線擬合後得到紅色曲線，除了用於補回被刪除誤差點之位移資料外，亦可作為風機葉片變形之近似值，以連續曲線表現各時刻葉片之變形外貌。此結果顯示數位影像相關法能完整量測風機葉片系統的動態行為，於風機監測系統上有優異的應用價值。

使用帶通濾波法針對 8.06Hz 及 35.29Hz 兩個共振頻率進行濾波，得到各點位移如圖 4-27 及圖 4-28 所示。其中取出位移值最大的時刻將各點位移進行做圖，如圖中紅色虛線位置，得到兩個共振頻率之模態重建結果如圖 4-29 及圖 4-30 所示。由結果可確認第一模態為應為第一彎曲(bending)模態，隨著靠近自由端其振幅增加，而第三模態由於量值較小，其模態重建結果有較多的雜訊。由重建結果得知在 point 85 附近有節線存在，由外型判斷此模態為風機葉片第二彎曲模態

4.3 離岸風機基座振動量測

4.3.1 實驗簡介

除了風機葉片外，基座亦是風力發電系統中重要的結構。本節使用數位相關法量測離岸風機基座模型之暫態位移，配合 FFT 得到系統之共振頻率，同時藉由改變敲擊位置，觀察風機基座在不同受力下的動態行為。

本節量測之基座模型如圖 4-32 所示，其結構與離岸風機之基座相似，總高度為 2158mm，上方橫梁長度為 1m，為使用螺栓固定之金屬骨架。本實驗分為兩個部分進行，第一部分量測基座之中央圓柱之振動，第二部分由下方拍攝橫梁之振動。



4.3.2 中央圓柱振動量測

實驗架設與參數設定

本實驗之架設、激振敲擊位置及分析點位置如圖 4-32 所示，使用工業相機配合 V0814-MP 鏡頭拍攝，fps 為 150，並使用木製球棒敲擊三個不同位置進行激振，其中前兩次敲擊方向與橫梁方向垂直，分別為橫梁中央與外側位置，第三次由橫梁下方向上敲擊。於基座模型之圓柱表面上貼上九個 QR Code 進行追蹤，計算之半窗格設為 12 pixel，搜尋窗格為 12 pixel，並使用 ZNCC+CCPF 進行追蹤。

實驗結果與討論

三次敲擊得到之 x 方向位移訊號如圖 4-33 至圖 4-35 所示，其中第三次敲擊朝上方敲擊造成之位移較小外，也使圖 4-35 中有較明顯的雜訊。三筆暫態位移除了量值大小外並無明顯差異，與 0 小節中風機葉片得到之結果相比，基座之振幅遞減現象較不明顯。

將位移訊號進行 FFT 後得到系統之頻率響應，如圖 4-36 至圖 4-38 所示，其中前兩敲擊之頻遇訊號最大峰值皆在 6.36Hz，而第三次敲擊之最大峰值在 6.73Hz，推測此系統之第一共振頻率在此範圍中，並主導風機基座之振動。此外，前兩次敲擊之結果終能觀察到頻率為 19.45Hz 之峰值，而在第二次敲擊中能看出 13.19Hz 之峰值。三個峰值之共振頻率與第一共振頻率之比值如表 4-4 所示，其中有明顯的倍頻關係，因此推測除了第一共振頻外，其他峰值是在 FFT 過程中造成的頻譜失真所導致。



4.3.3 橫梁振動量測

實驗架設與參數設定

本實驗之架設如圖 4-39 所示，使用單台工業相機與 V0814-MP 鏡頭由下方拍攝橫梁之振動位移，fps 為 150。於橫梁底部貼有 QR Code 進行追蹤，搜尋演算法為 ZNCC+CCPF，半窗格設為 10 pixel，搜尋窗格為 20 pixel。實驗中選取四個分析點進行追蹤，選點位置如圖 4-40 所示，激振方式與前一小節相似，使用木製球棒敲打三個不同位置觸發暫態振動，敲擊位置為：(1)橫梁之側面、(2)橫梁下方及(3)橫梁端點，如圖 4-41 所示。

實驗結果與討論

圖 4-42 至圖 4-53 為三次敲擊下的位移結果，其中八個分析點得到之位移結果差異不大，顯示上方橫梁受敲擊時沒有明顯變形。另外在暫態位移中能看到明顯的波包，顯示系統有兩個相近的共振頻率，於後續的 FFT 分析中能進一步看出此現象。

將兩個方向的位移進行 FFT 後得到頻遇訊號如圖 4-54 至圖 4-59 所示，其中能看出在 6Hz 附近有兩個相近的共振頻率，其頻率及振幅如表 4-5 所示，前兩個峰值之平均共振頻率分別為 5.87Hz 及 6.58Hz，振幅值分別在 x 及 y 方向較大。由此結果可以推論頻率為 5.87Hz 之模態之變形位移主要在 x 方向，頻率為 6.58Hz 的模態則在 y 方向上振動。這同時也呼應到 4.3.2 小節對中央圓柱的量測無法觀察到明顯的波包及前兩個相近的峰值，由於該實驗之架設無法明確觀察出兩個方向的振動，因此只有 6.58Hz 的第二模態較為明顯。



4.4 小結

本章使用數位影像相關法完成了對風力發電機系統之重要結構的實驗量測，並在定性及定量上得到良好的結果。針對風力發電機葉片，透過減去桌面位移使數據與雷射位移計有良好的對應性，並進一步延伸至多全場量測中，完成風機葉片的動態變形及模態重建。另一方面，本章中對於離岸風機基座模型進行了完整的振動量測，其中從不同部位的頻率響應結果中能初步瞭解系統之共振模態，也展現數位影像相關法對風機系統中不同部位結具備良好的量測能力。

本章的實驗中，數位影像相關法在多點、全場及動態量測上的優勢得到最大程度的發揮，其動態位移結果經過妥善的數據處理能快速、精準的重建風機部件的變形、檢測結構損傷並能分析其複雜幾何結構的振動模態等特性。由於數位影像相關法具備架設限制小、跨尺度量測等優勢，未來可配合無線通訊技術及空拍機、衛星影像等平台進行拍攝，進行即時監測或故障預警，在風機運維上做實際應用。

表 4 - 1 不同螺栓鎖固條件下風機葉片共振頻率變化- DIC

DIC	Origin	A	Dif.	A,B	Dif.	A,B,C	Dif.
Mode 1	7.94	7.79	-1.89%	7.56	-4.79%	7.37	-7.18%
Mode 2	27.19	26.62	-2.10%	25.58	-5.92%	25.64	-5.70%
Mode 3	35.44	34.74	-1.98%	33.72	-4.85%	31.53	-11.03%

表 4 - 2 不同螺栓鎖固條件下風機葉片共振頻率變化- LD

LD	Origin	A	Dif.	A,B	Dif.	A,B,C	Dif.
Mode 1	8.09	7.92	-2.10%	7.43	-8.16%	7.39	-8.65%
Mode 2	27.29	26.41	-3.22%	25.71	-5.79%	25.85	-5.28%
Mode 3	35.39	34.63	-2.15%	33.71	-4.75%	31.53	-10.91%

表 4 - 3 風機葉片阻尼比

Point	20	40	60	80	100
Damping Ratio	0.0296	0.0241	0.0229	0.0223	0.0226
ξ					

表 4 - 4 風機底座峰值頻率

Peak	1	2	3
Frequency (Hz)	6.36	13.19	19.45
f_n/f_1	1	2.07	3.14

表 4 - 5 風機底座共振頻率與 x 、 y 方向振幅

Test	1	2	3	Average
Peak 1 Frequency (Hz)	5.91	5.94	5.75	5.87
x direction amplitude (mm)	0.367	0.398	0.679	
y direction amplitude (mm)	0.179	0.335	0.527	
Peak 2 Frequency (Hz)	6.61	6.56	6.57	6.58
x direction amplitude (mm)	0.249	0.144	0.285	
y direction amplitude (mm)	0.471	0.227	0.490	



圖 4 - 1 敲擊錘實體圖

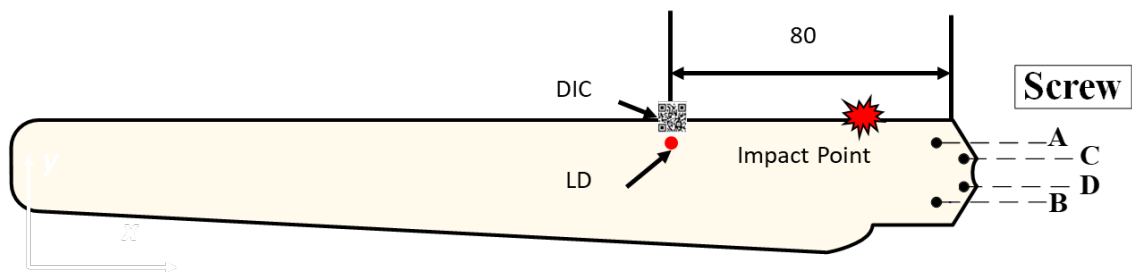


圖 4 - 2 風機葉片振動位移量測實驗架設及敲擊點位置圖



圖 4 - 3 風機葉片振動位移量測實驗量測點近照

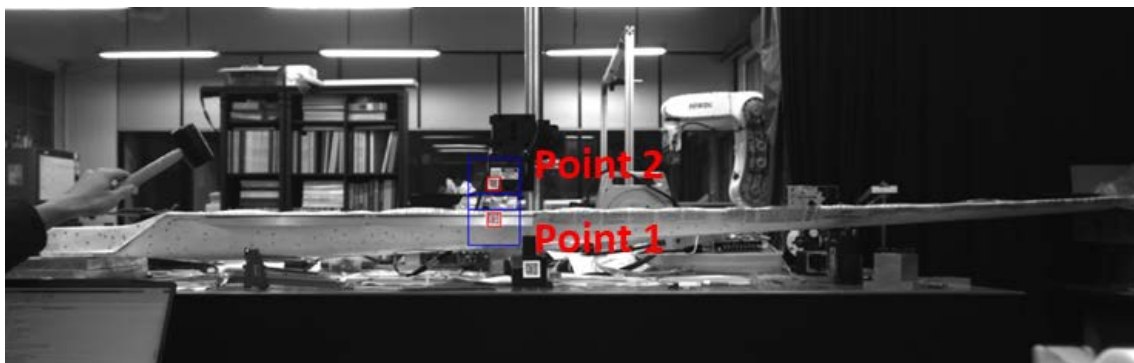


圖 4 - 4 風機葉片振動位移量測實驗選點位置

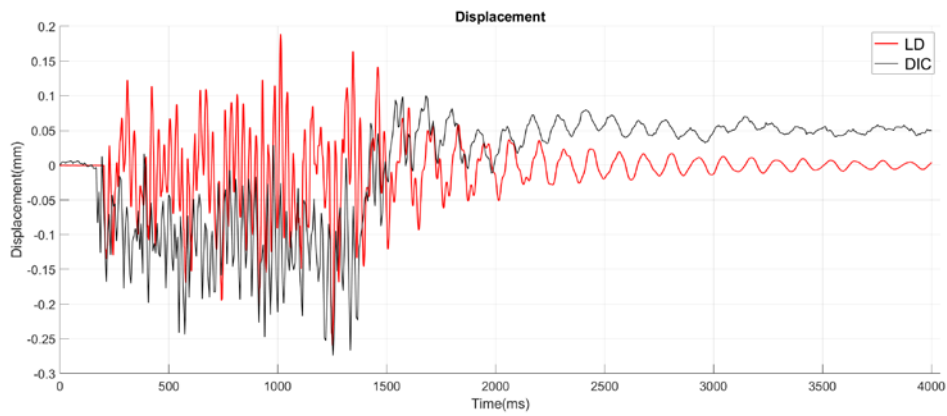


圖 4 - 5 風機葉片振動位移量測實驗結果-位移校正前

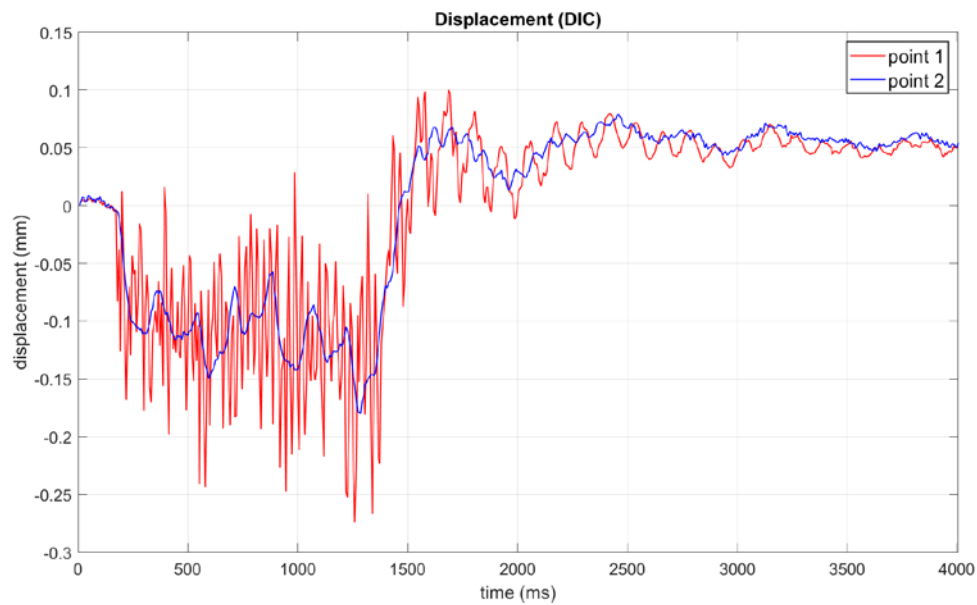


圖 4 - 6 風機葉片振動位移量測實驗結果-量測點與桌面位移

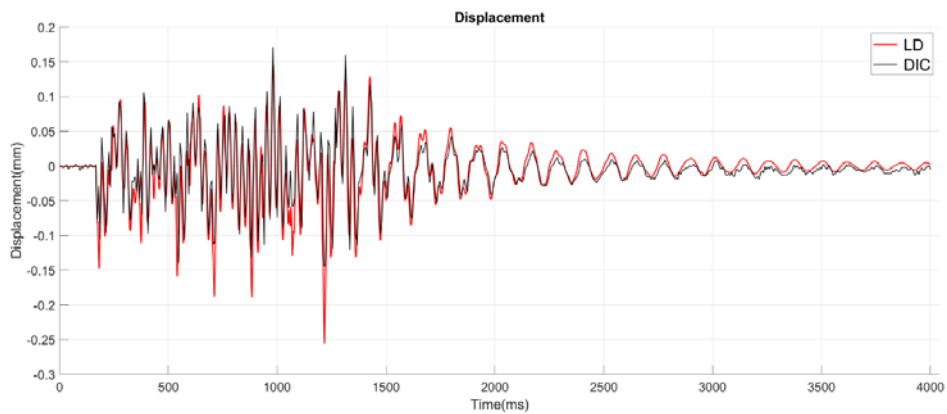


圖 4 - 7 風機葉片振動位移量測實驗結果-全螺栓鎖固

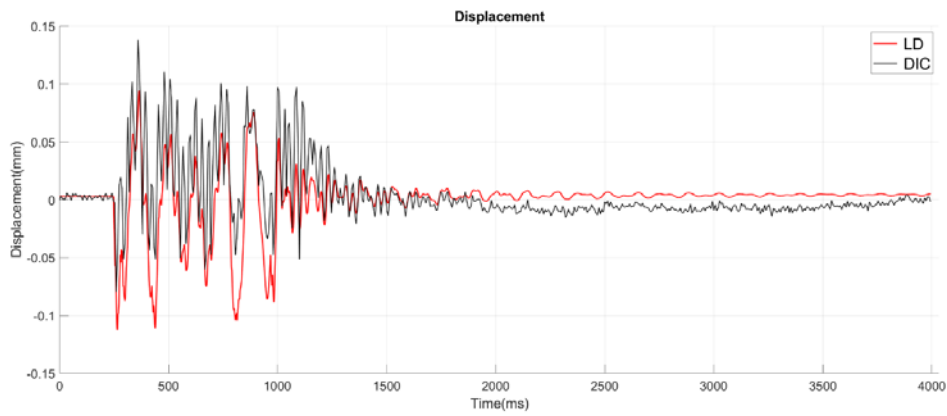


圖 4 - 8 風機葉片振動位移量測實驗結果-鬆弛螺栓 A

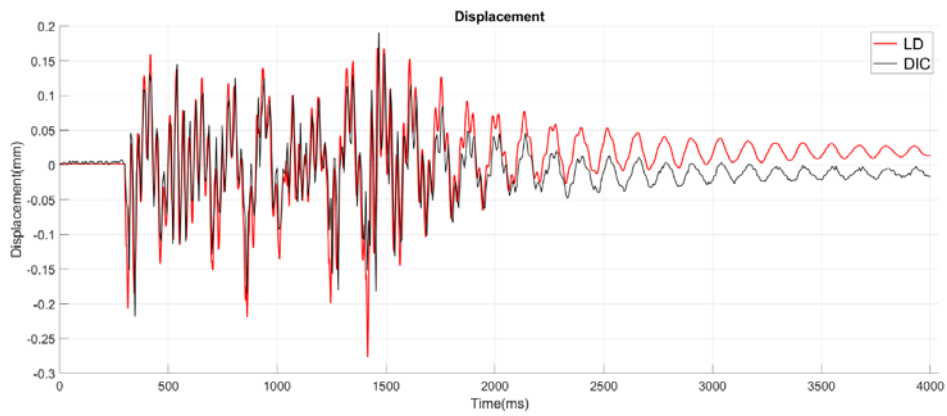


圖 4 - 9 風機葉片振動位移量測實驗結果-鬆弛螺栓 A、B

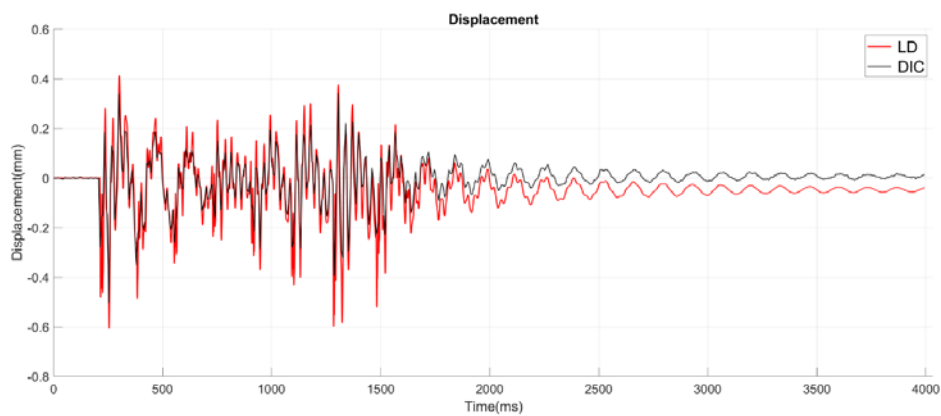


圖 4 - 10 風機葉片振動位移量測實驗結果-鬆弛螺栓 A、B、C

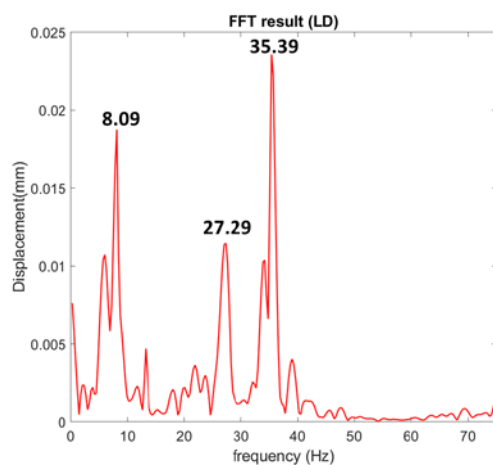
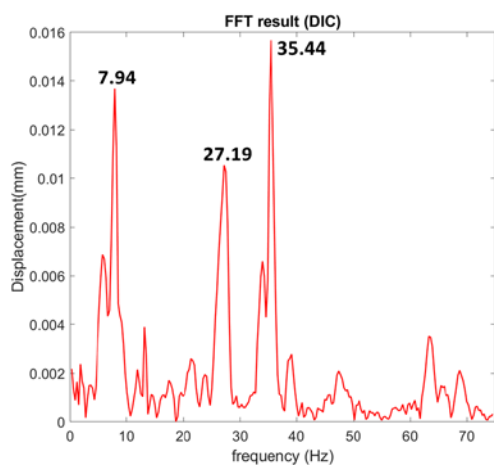


圖 4 - 11 風機葉片振動位移量測頻域訊號-全螺栓鎖固

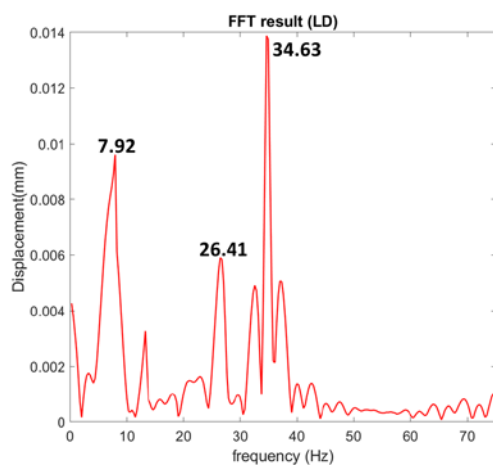
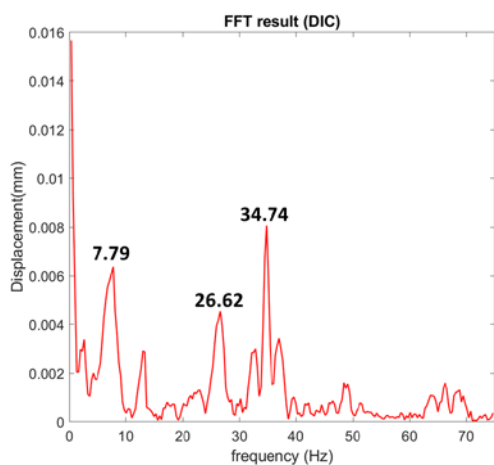


圖 4 - 12 風機葉片振動位移量測頻域訊號-鬆弛螺栓 A

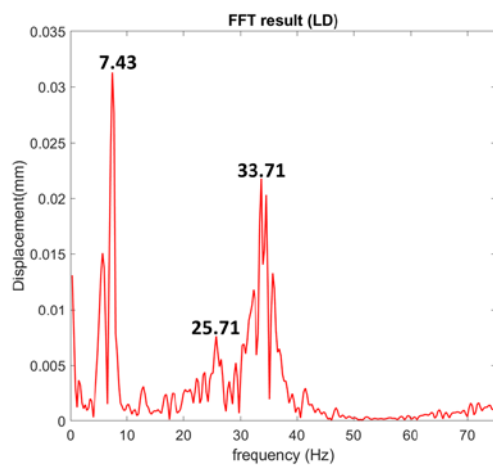
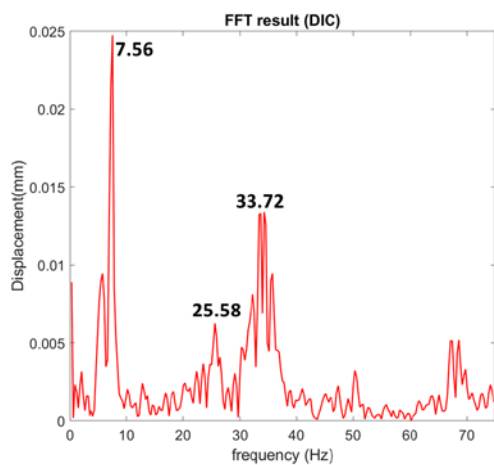


圖 4 - 13 風機葉片振動位移量測頻域訊號-鬆弛螺栓 A、B

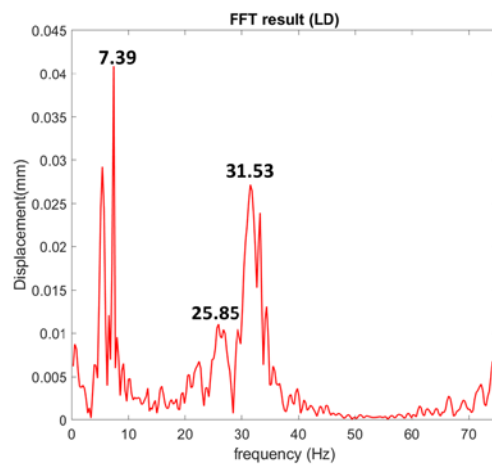
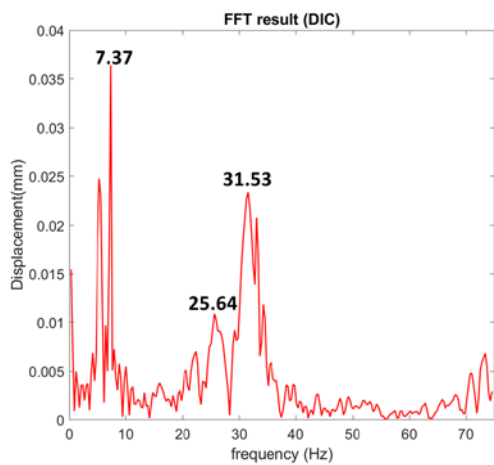


圖 4 - 14 風機葉片振動位移量測頻域訊號-鬆弛螺栓 A、B、C

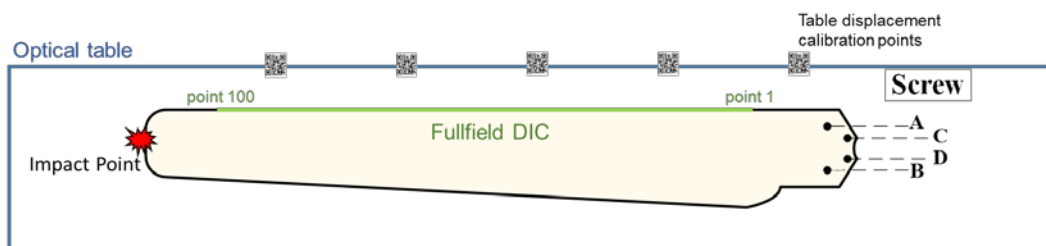


圖 4 - 15 風機葉片全場振動位移量測實驗架設

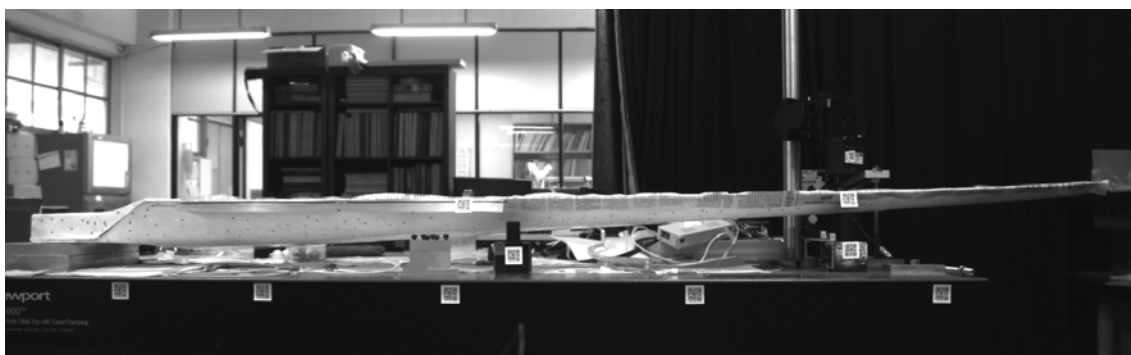


圖 4 - 16 風機葉片全場振動位移量測實驗架設-相機視角

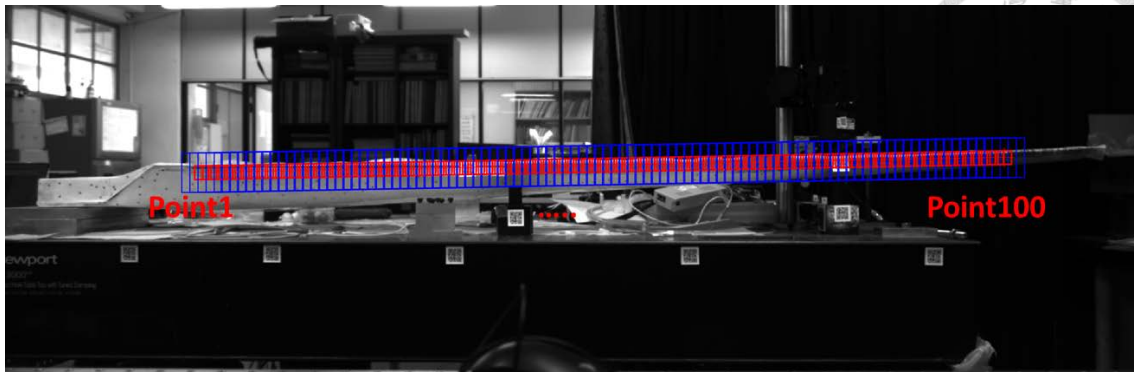


圖 4 - 17 風機葉片全場振動位移量測實驗架設選點結果

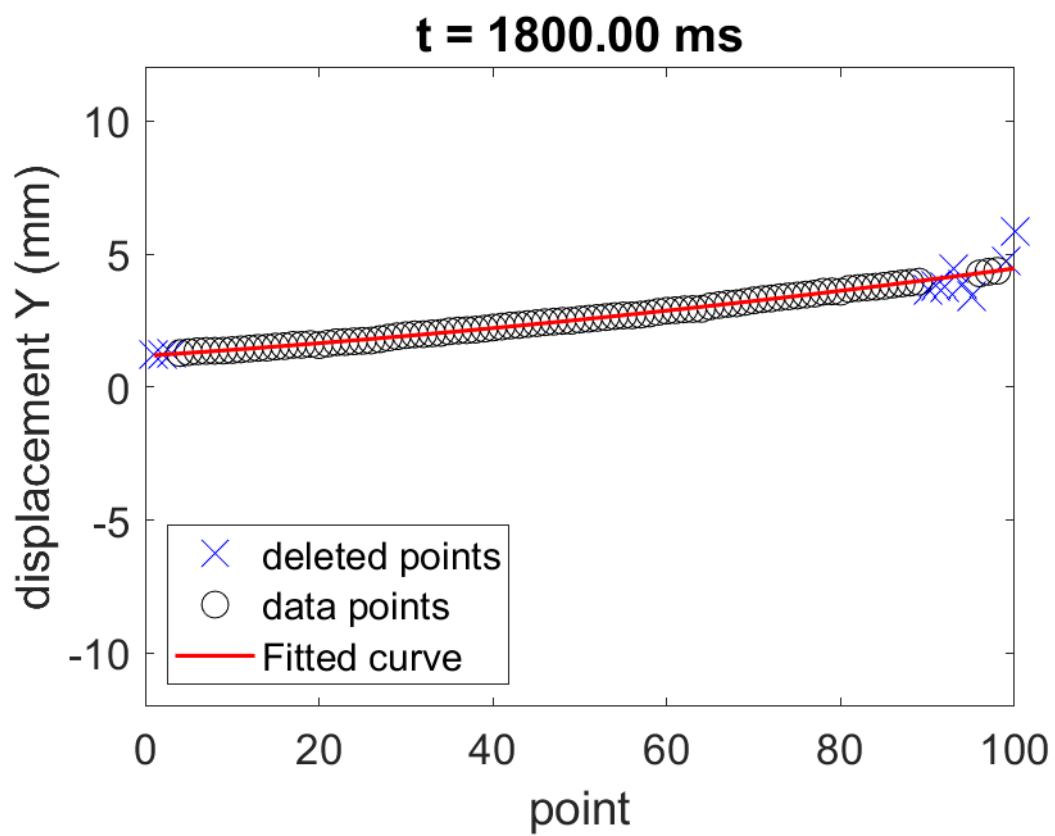


圖 4 - 18 風機葉片全場振動位移量測誤差點篩選示意圖

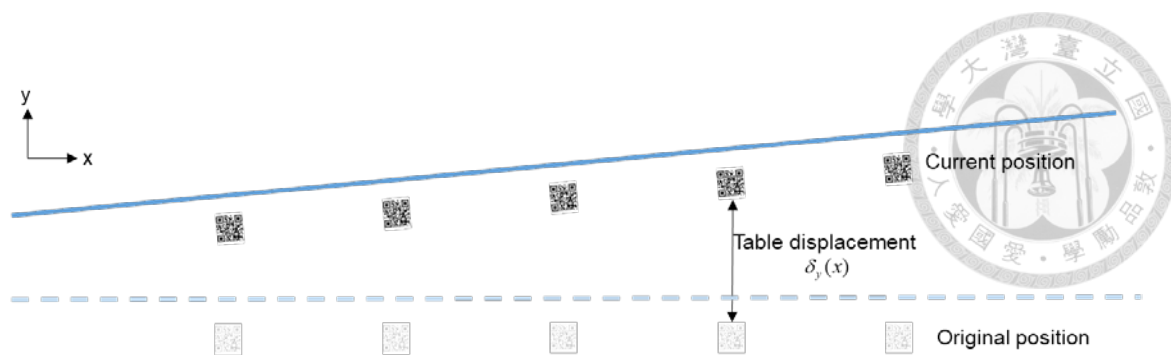


圖 4 - 19 桌面位移校正方法示意圖

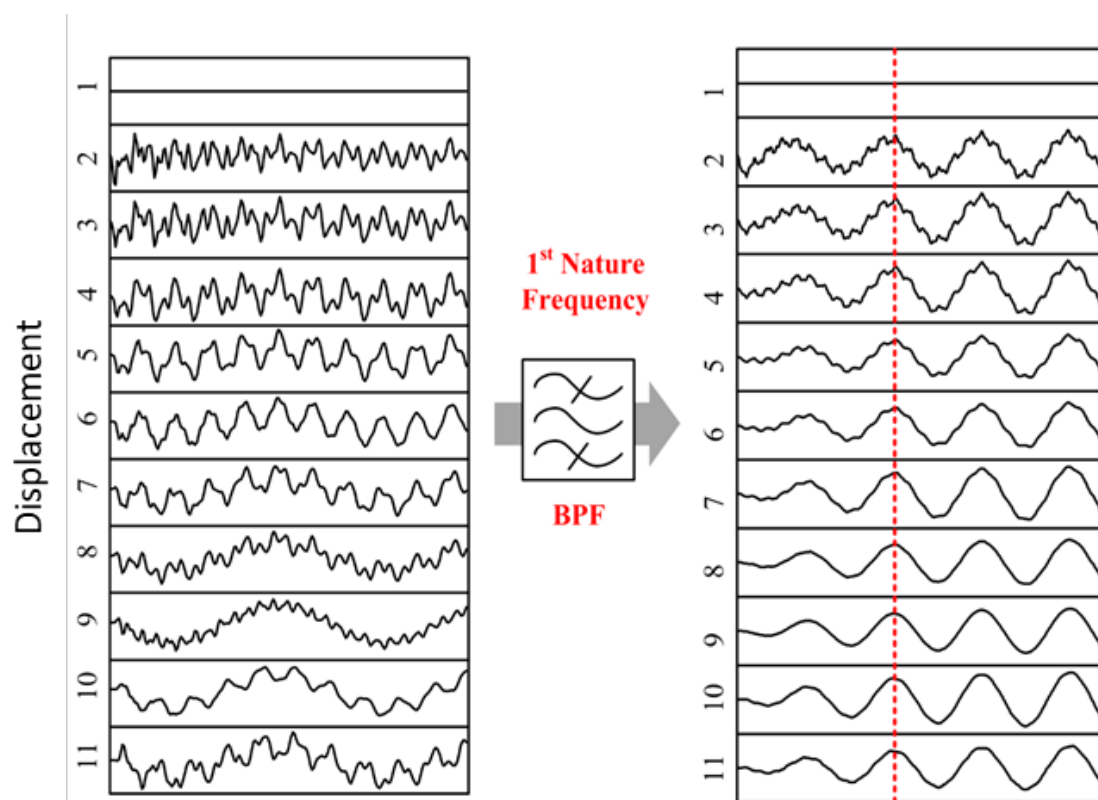
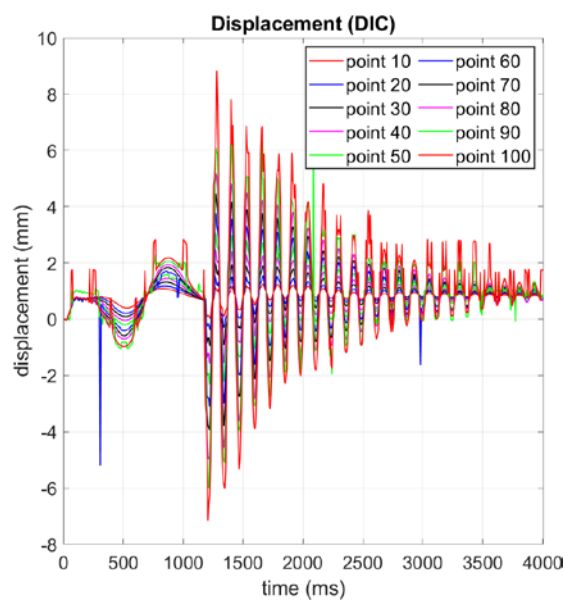
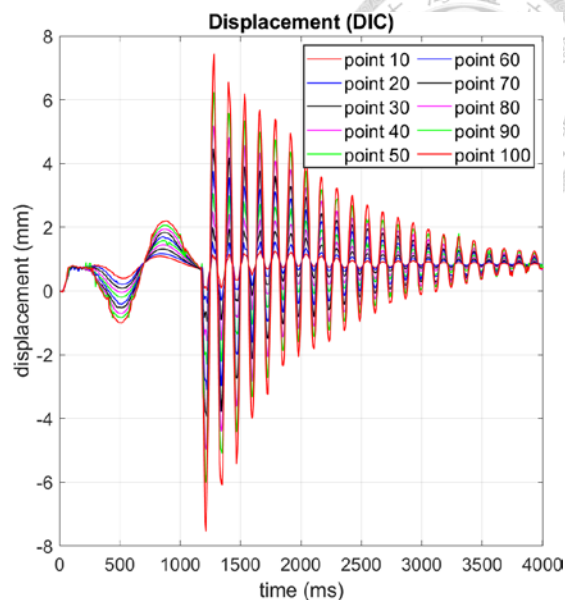


圖 4 - 20 帶通濾波法示意圖

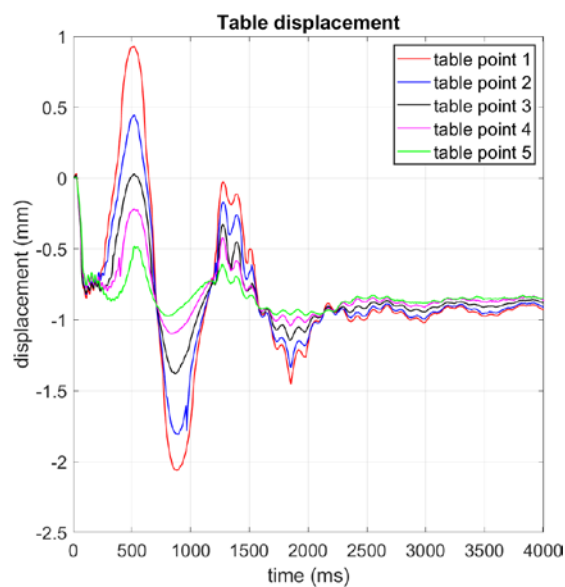


(a)

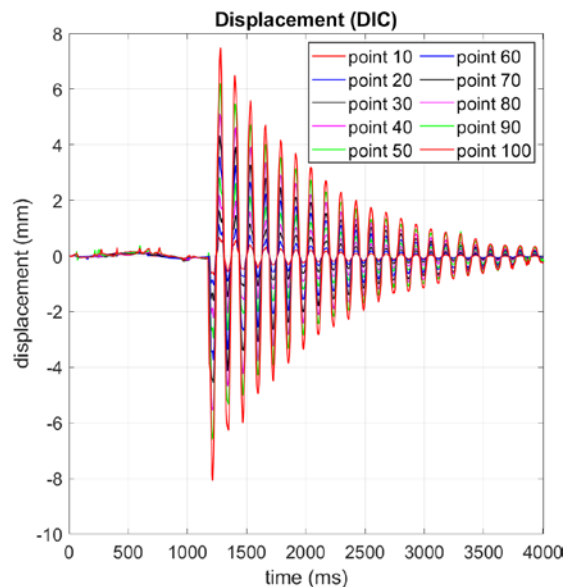


(b)

圖 4 - 21 風機葉片全場振動位移量測結果: (a)原始訊號 (b)誤差點篩選後



(a)



(b)

圖 4 - 22 風機葉片全場振動位移量測結果: (a)桌面位移 (b)位移校正後

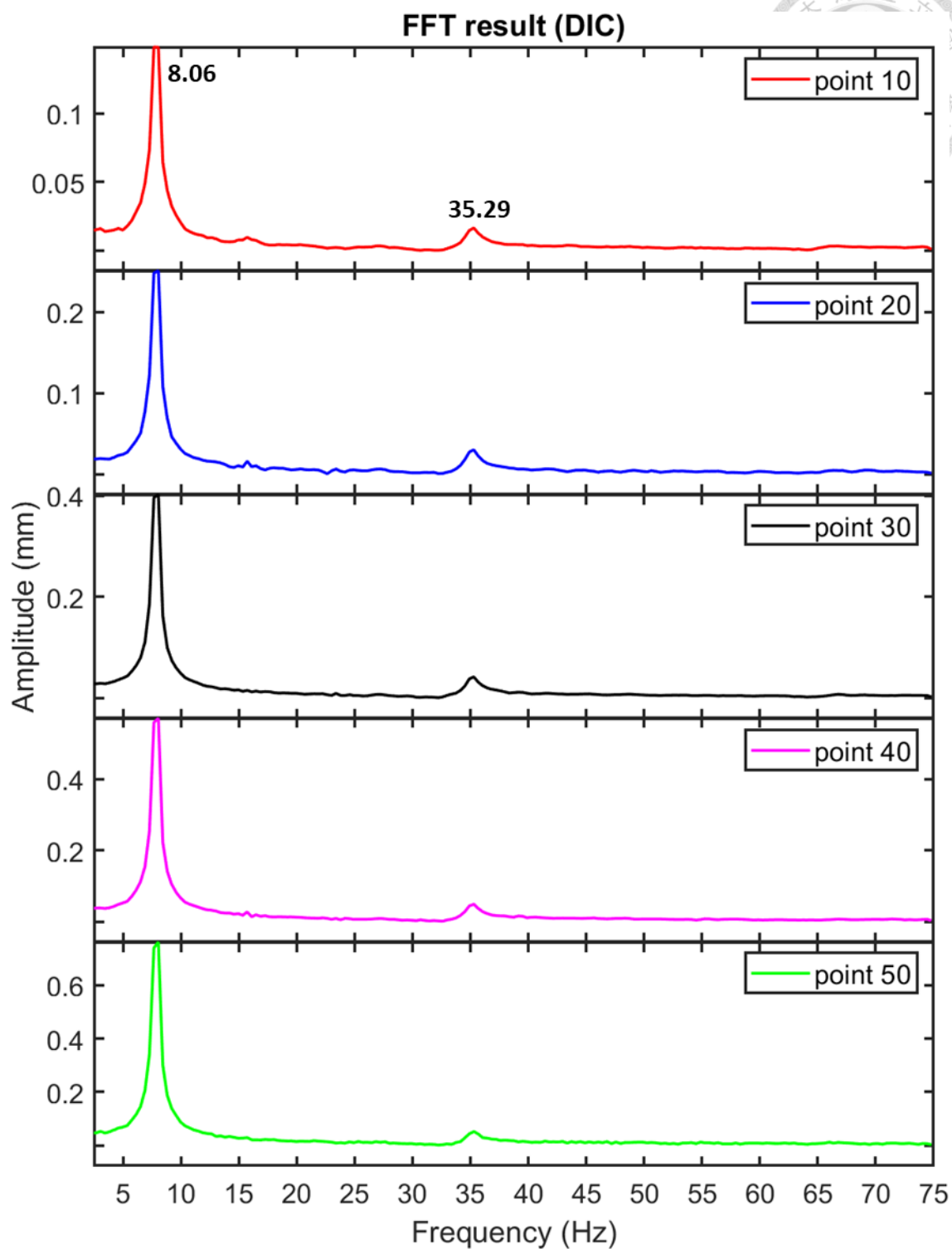


圖 4 - 23 風機葉片全場振動位移頻域訊號- point 10~ point 50

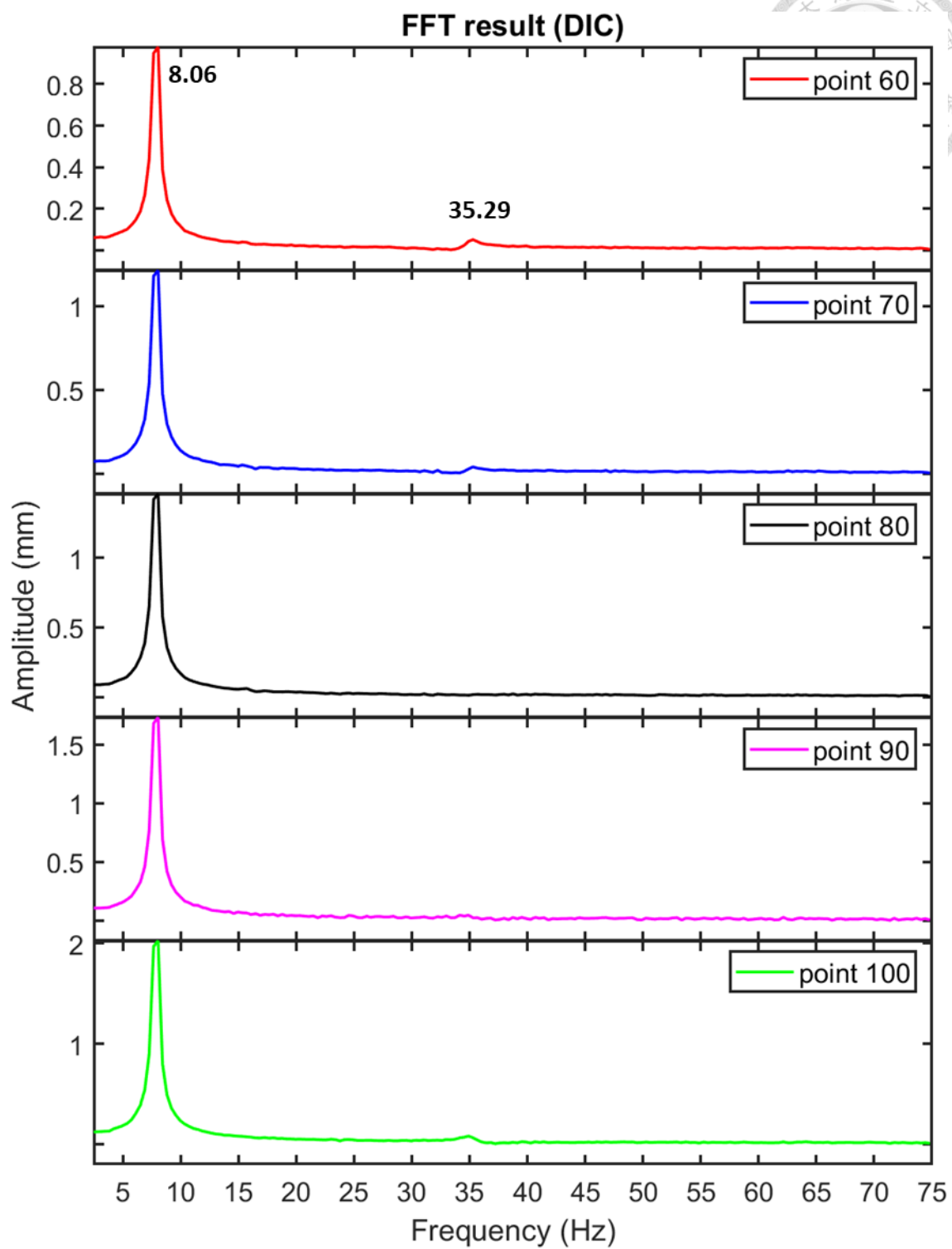


圖 4 - 24 風機葉片全場振動位移頻域訊號- point 60~ point 100

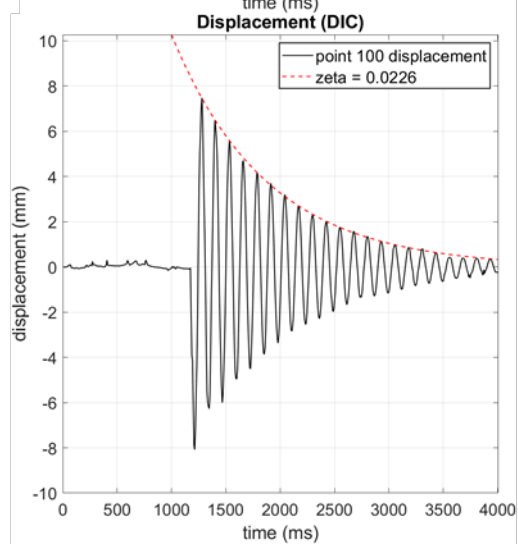
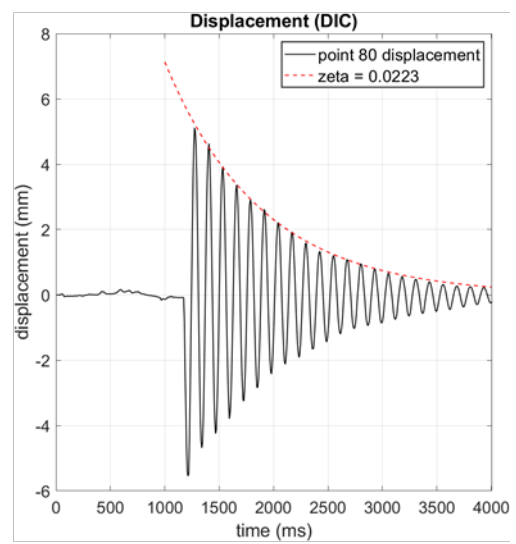
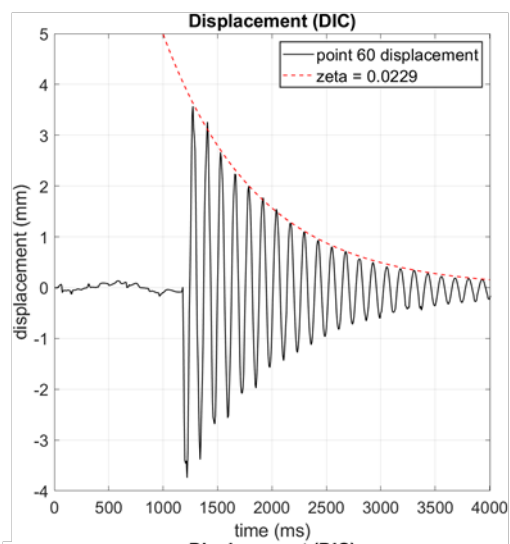
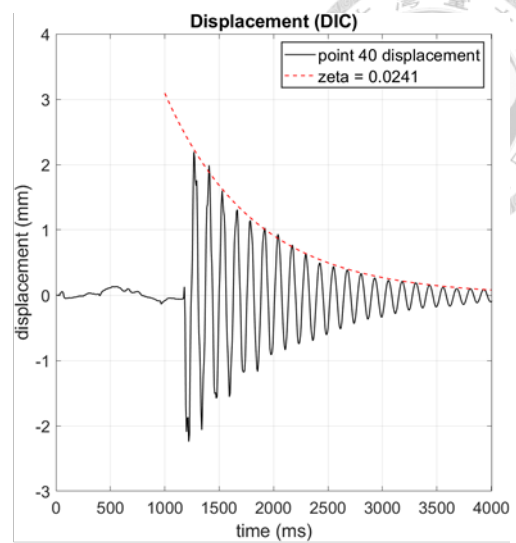
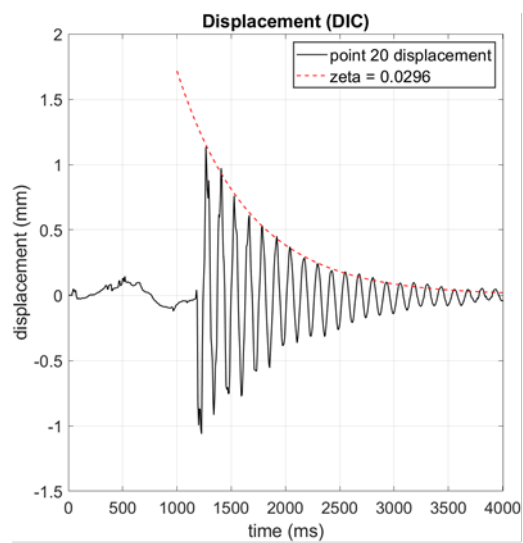


圖 4 - 25 風機葉片阻尼比分析結果

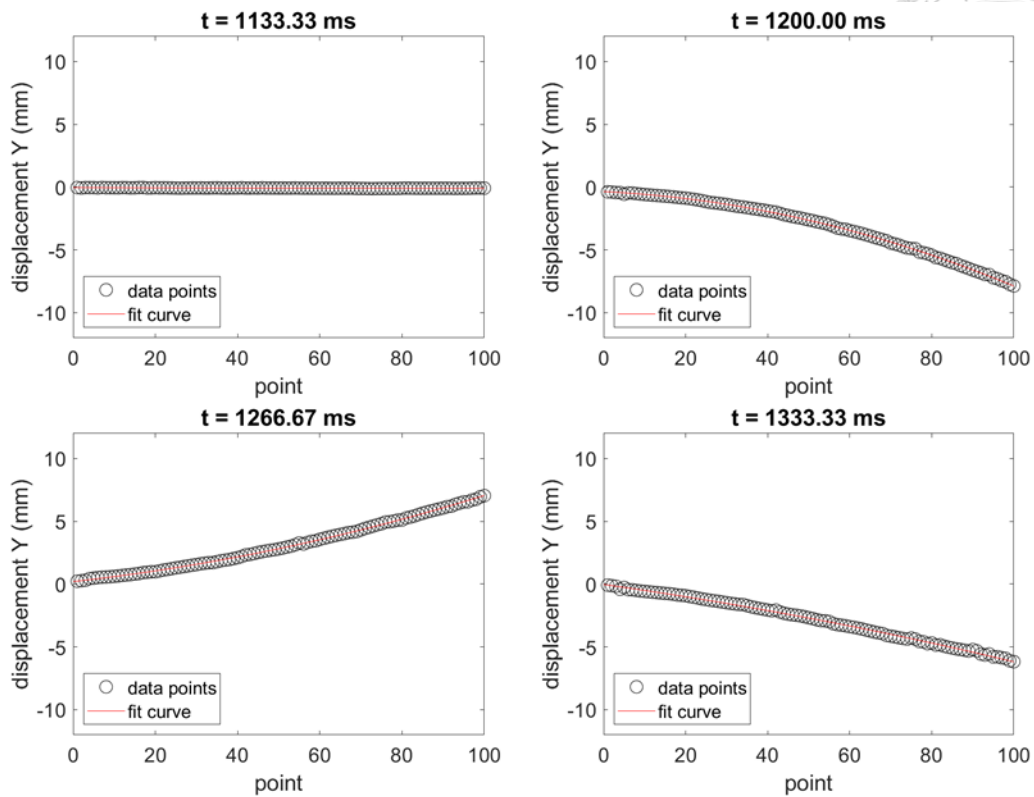


圖 4 - 26 風機葉片振動位移重建結果

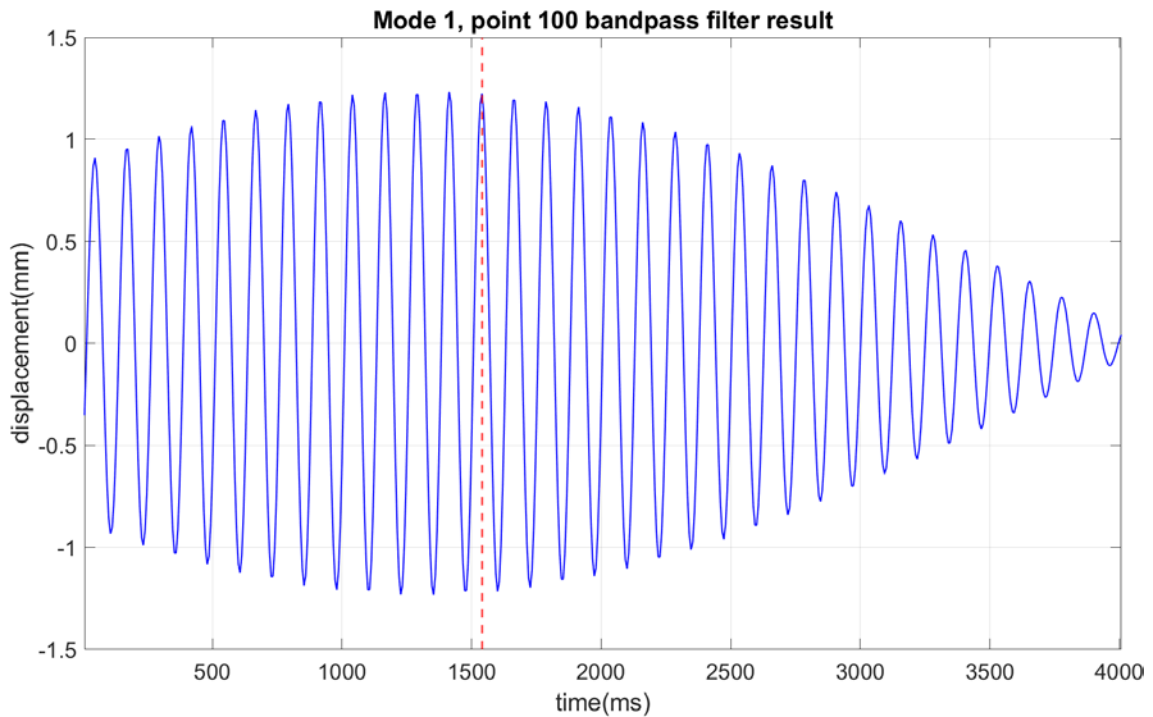


圖 4 - 27 帶通濾波結果- 第一模態

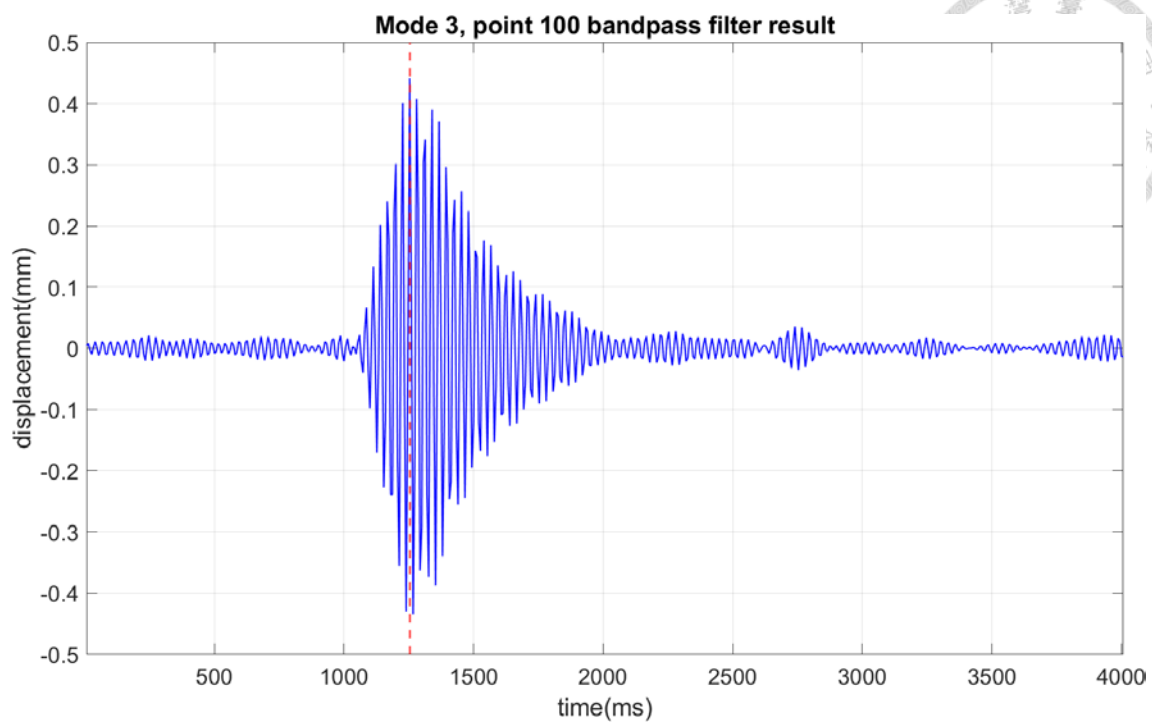


圖 4 - 28 帶通濾波結果- 第三模態

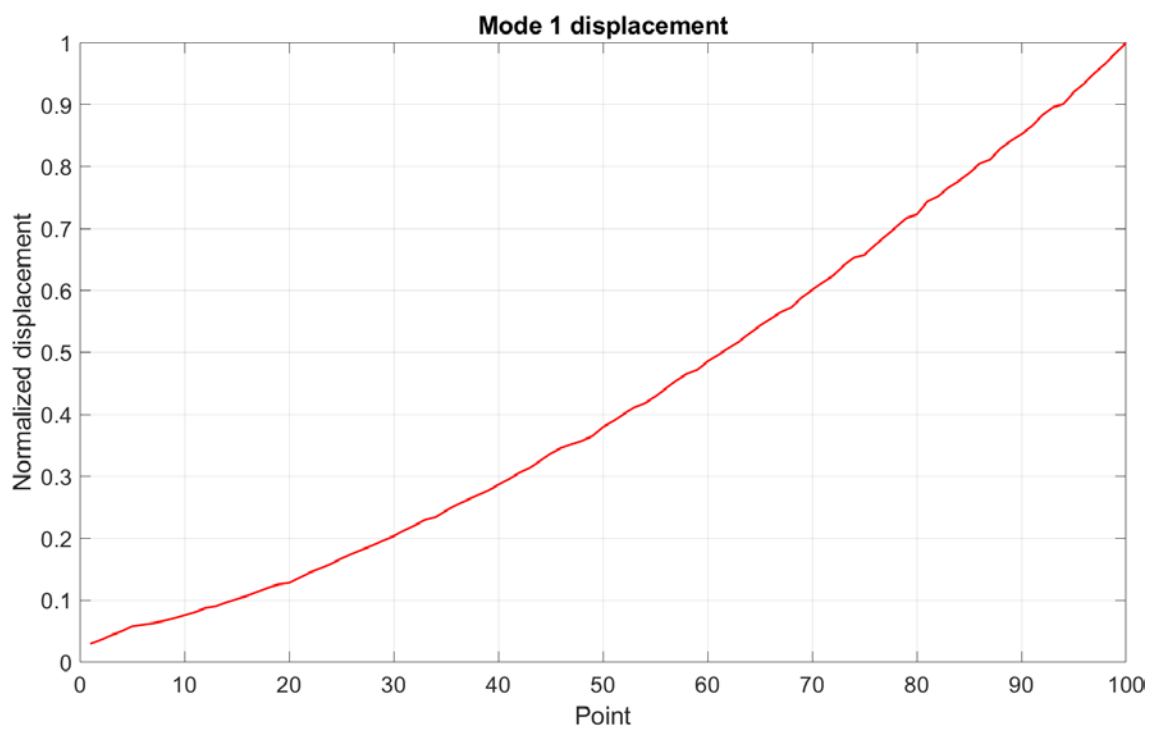


圖 4 - 29 風機葉片模態重建結果- 第一模態

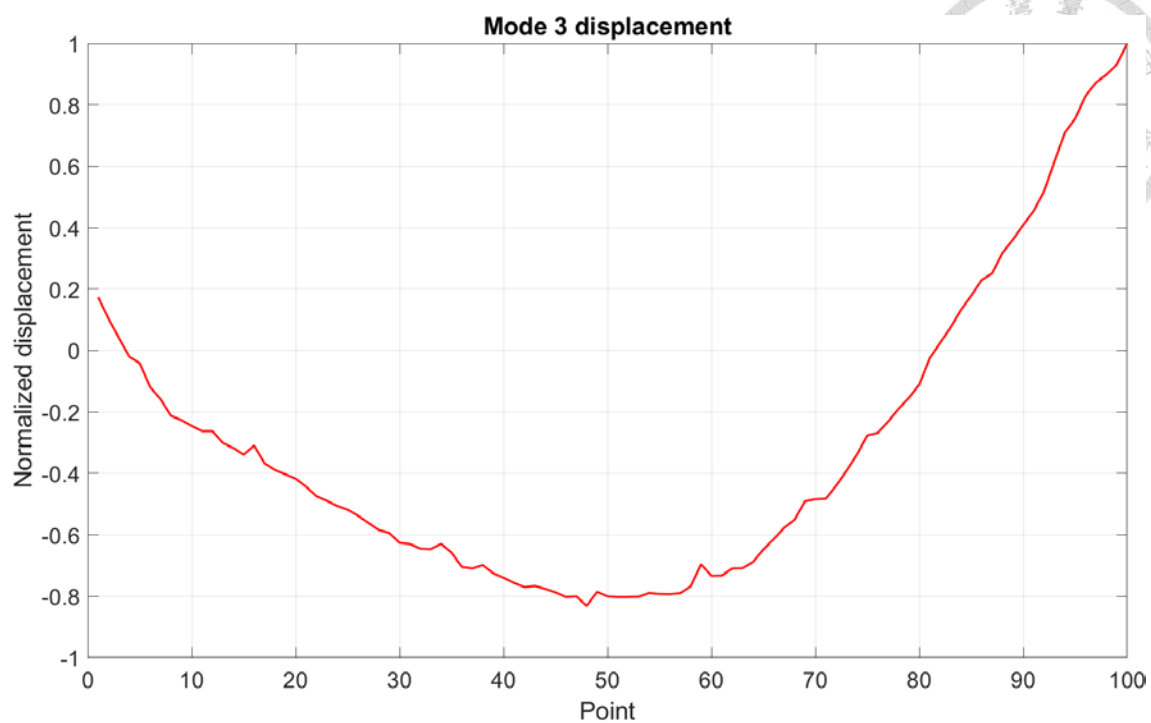


圖 4 - 30 風機葉片模態重建結果- 第三模態

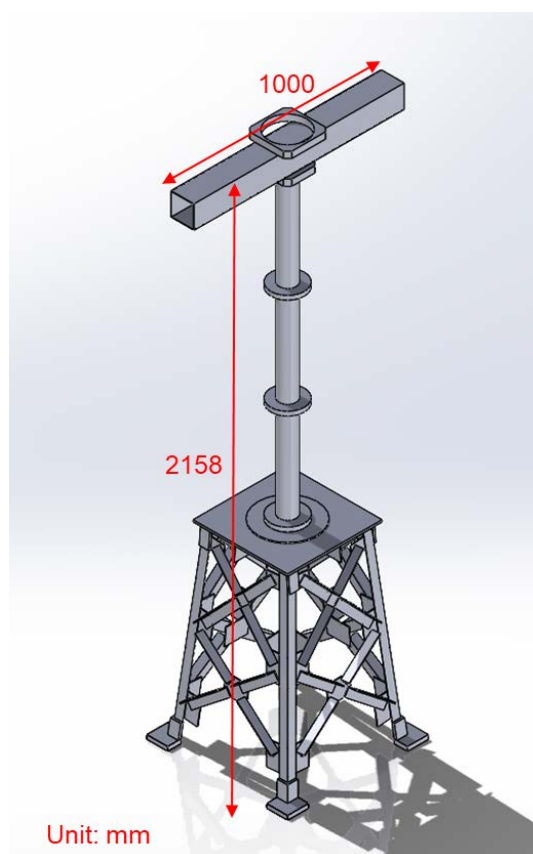


圖 4 - 31 離岸風機基座模型外觀及尺寸

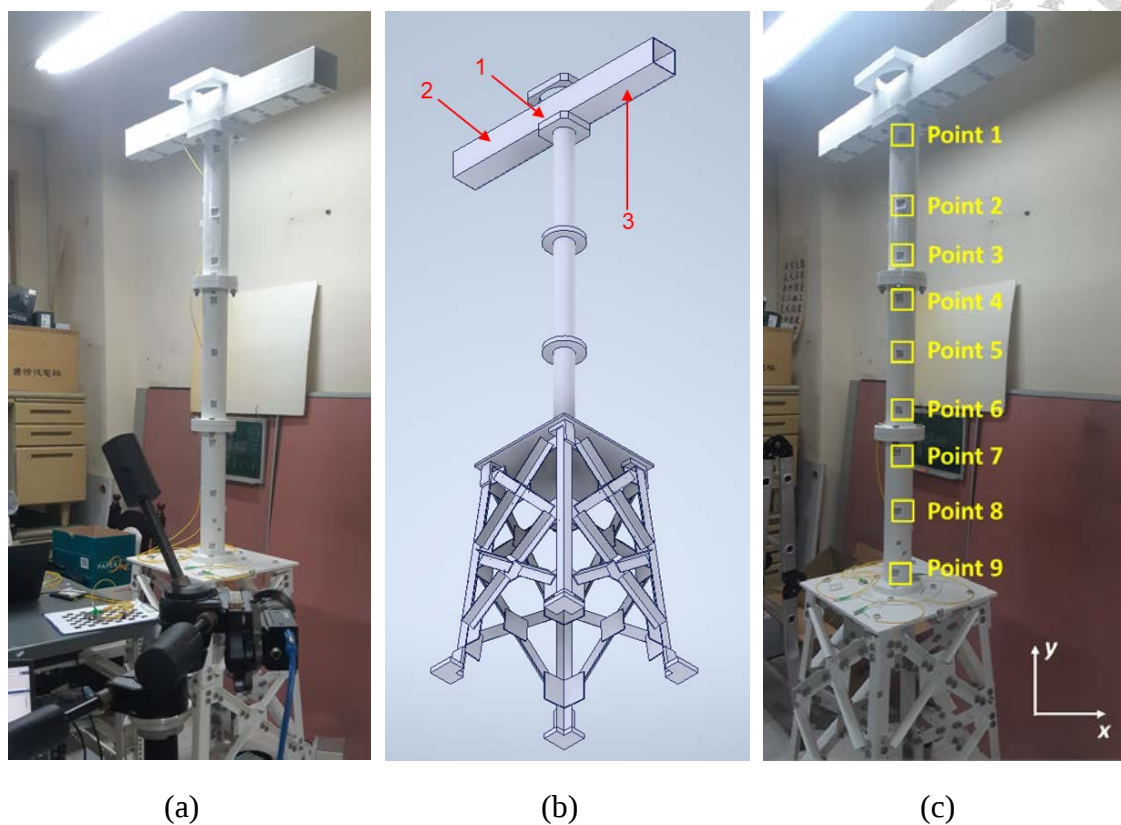


圖 4 - 32 離岸風機基座中央圓柱振動量測: (a)實驗架設 (b)敲擊位置 (c)分析點位置

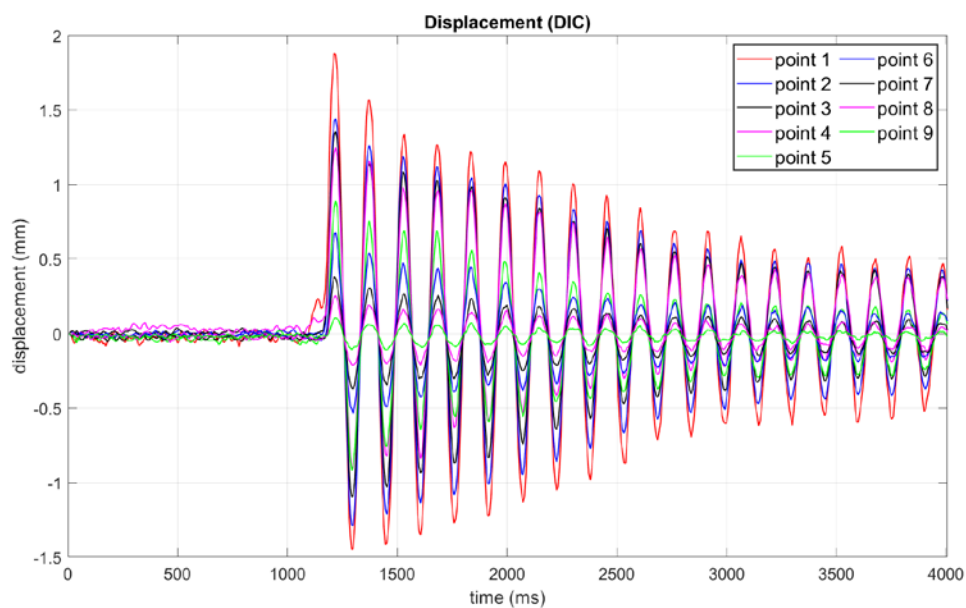


圖 4 - 33 中央圓柱振動量測結果-第一次敲擊

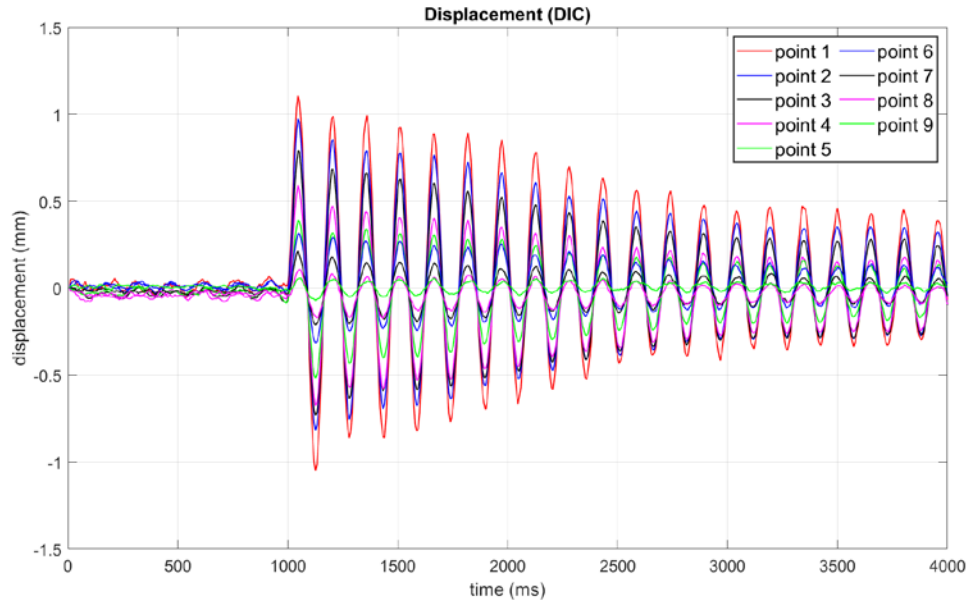


圖 4 - 34 中央圓柱振動量測結果-第二次敲擊

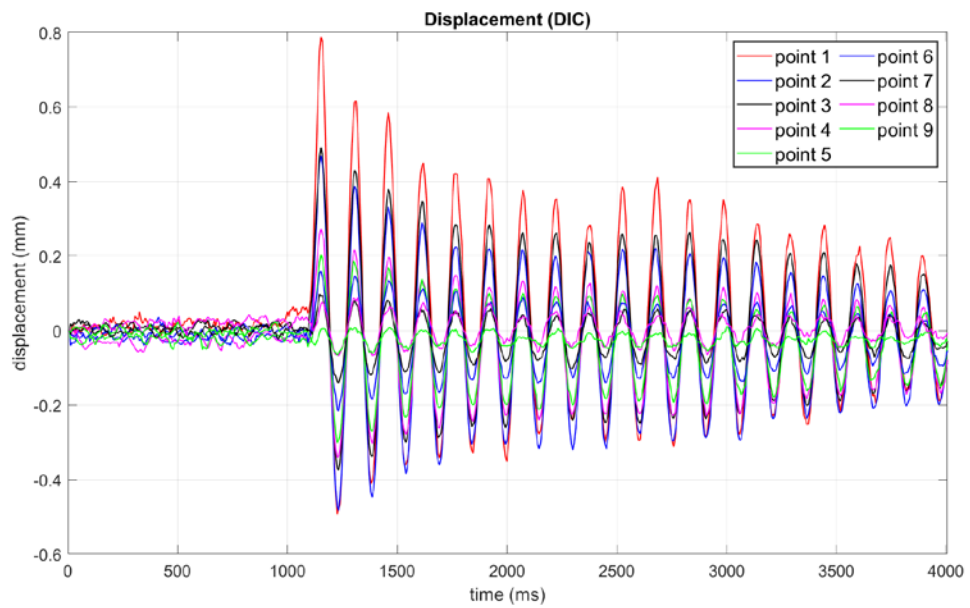


圖 4 - 35 中央圓柱振動量測結果-第三次敲擊

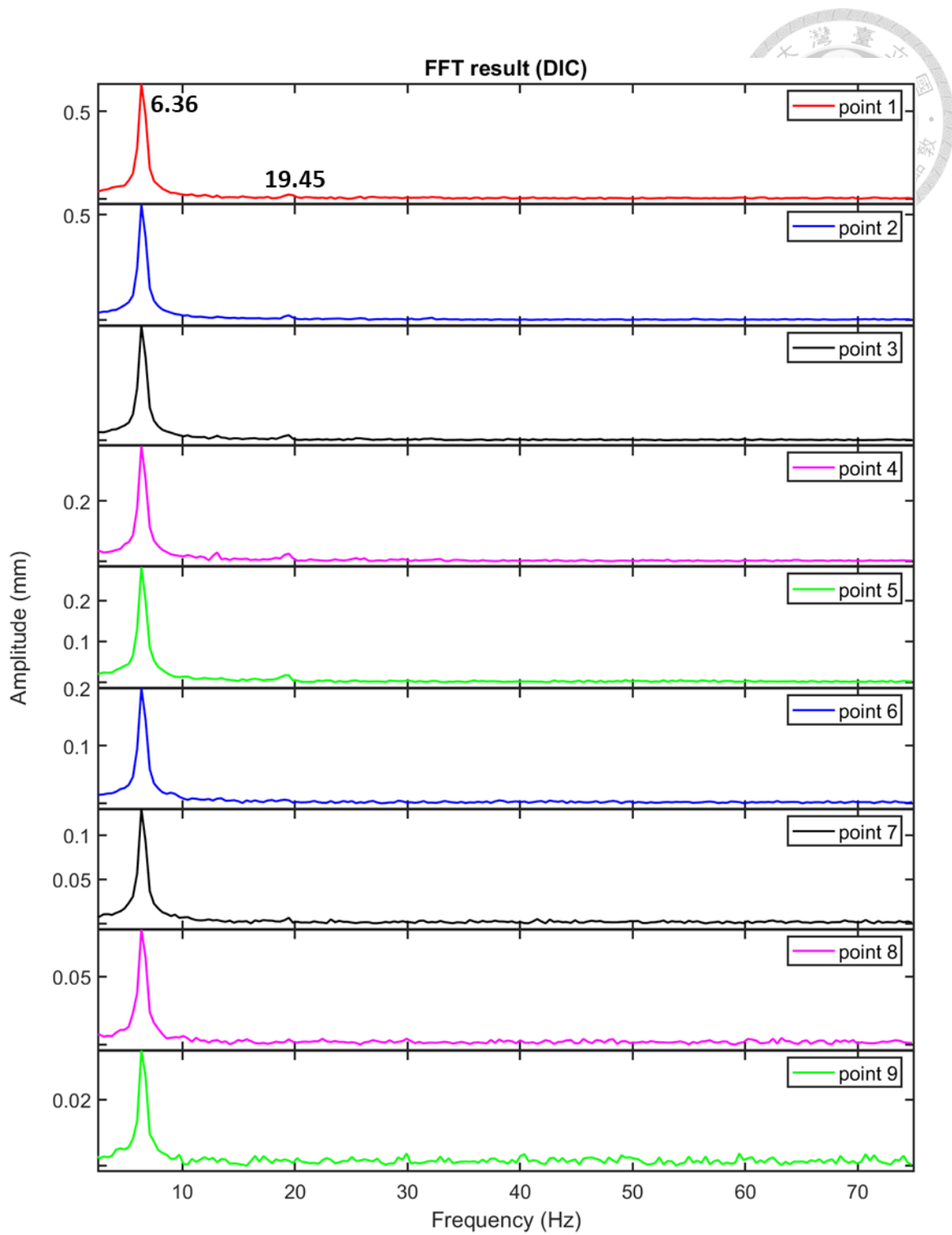


圖 4 - 36 中央圓柱振動頻域訊號-第一次敲擊

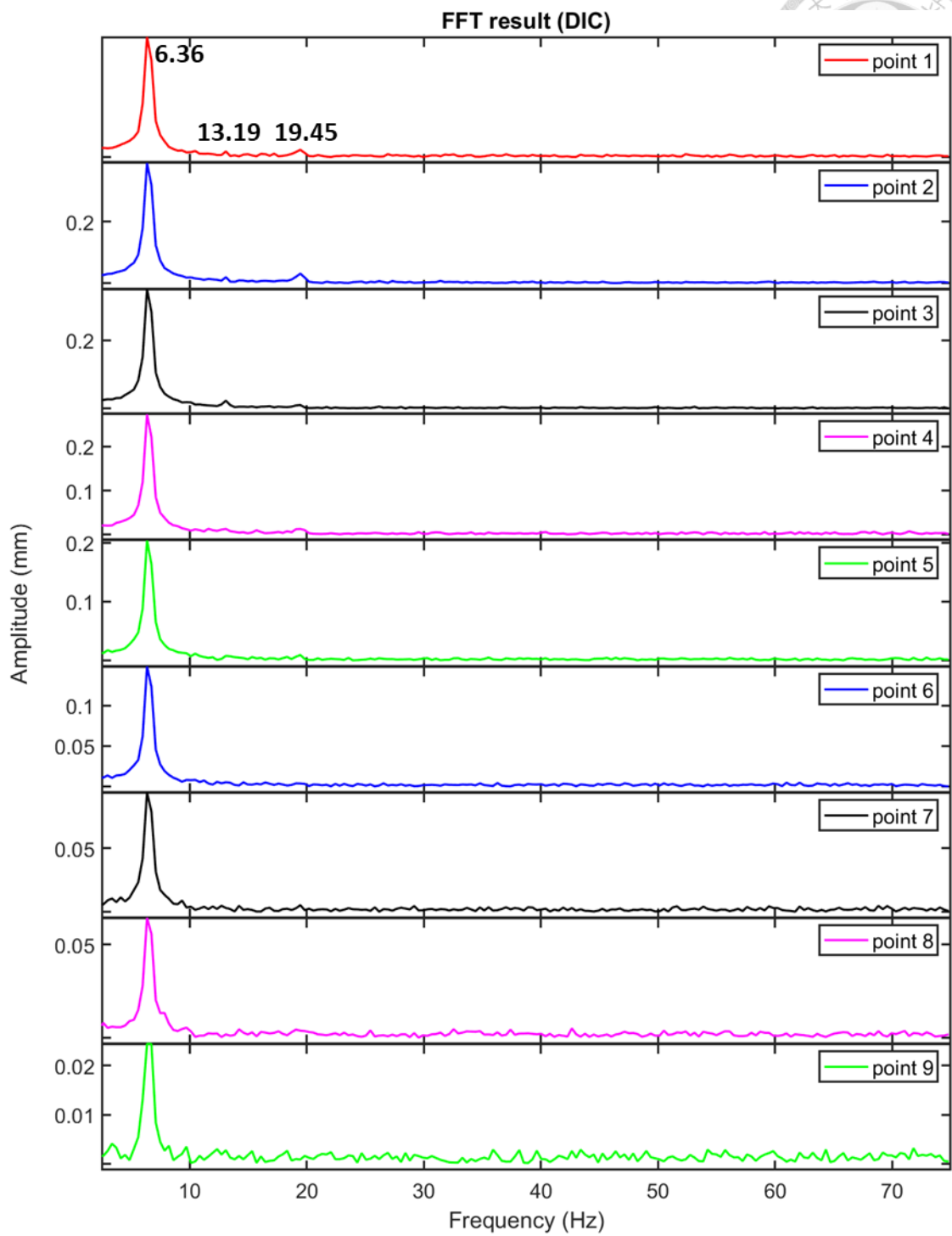


圖 4 - 37 中央圓柱振動頻域訊號-第二次敲擊

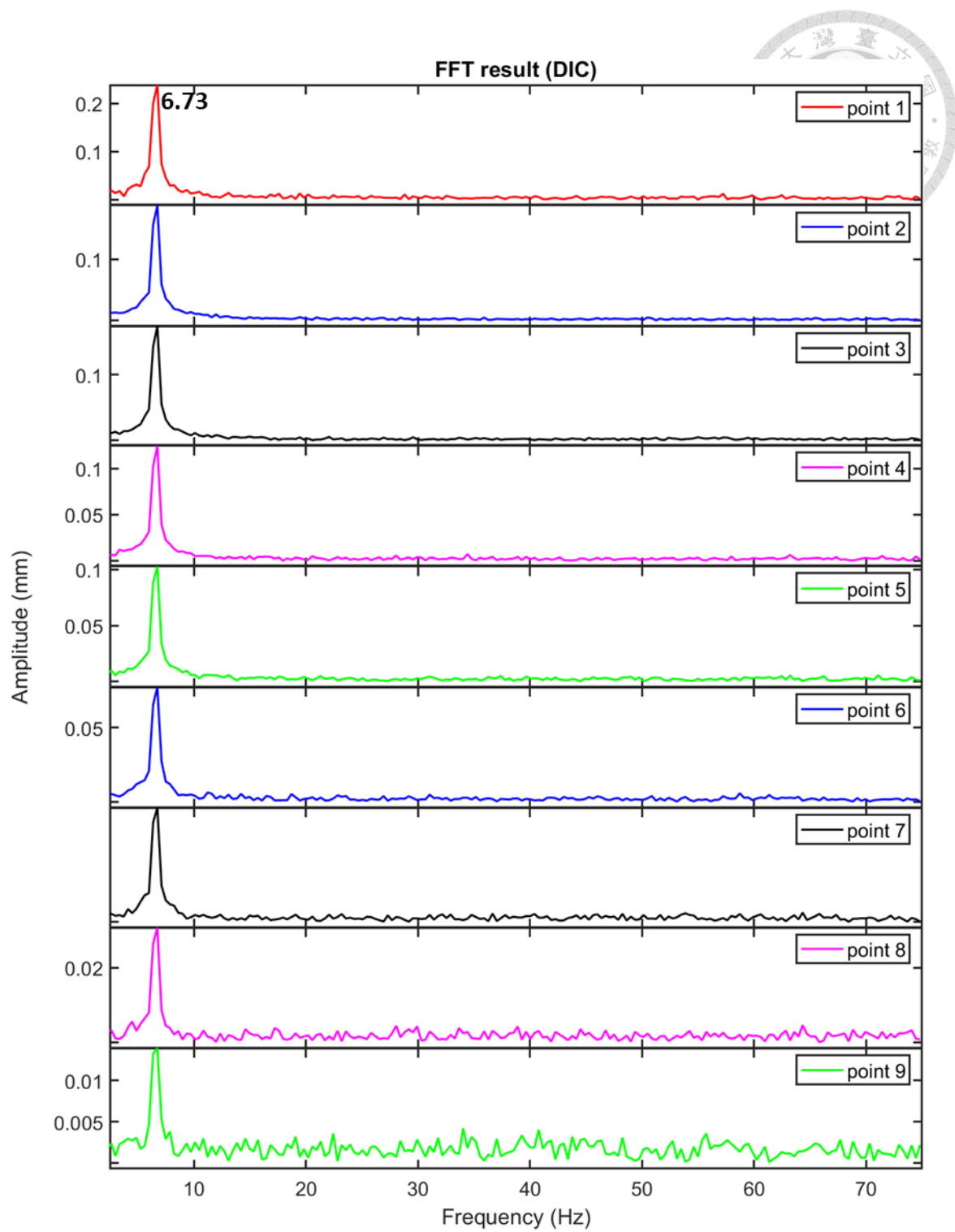


圖 4 - 38 中央圓柱振動頻域訊號-第三次敲擊



圖 4 - 39 橫梁振動量測實驗架設

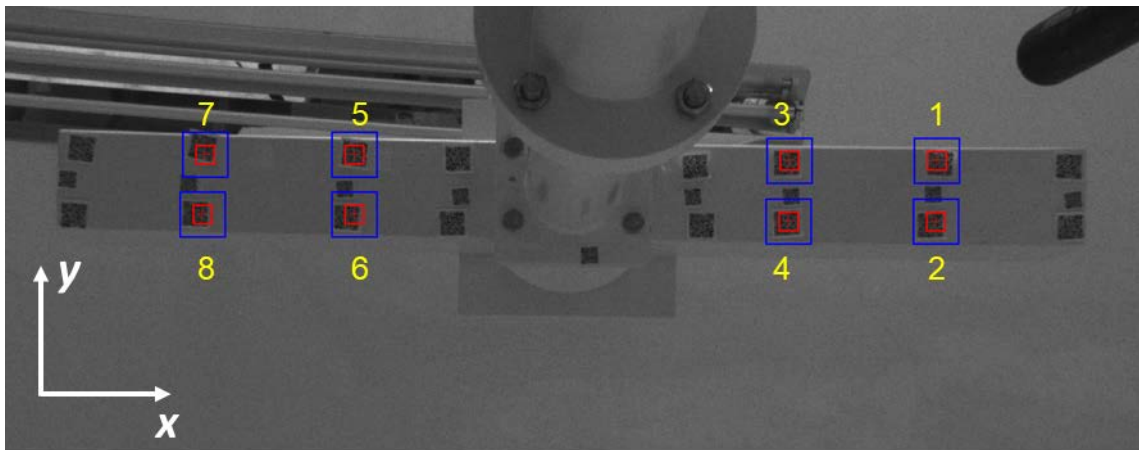


圖 4 - 40 橫梁振動量測選點位置

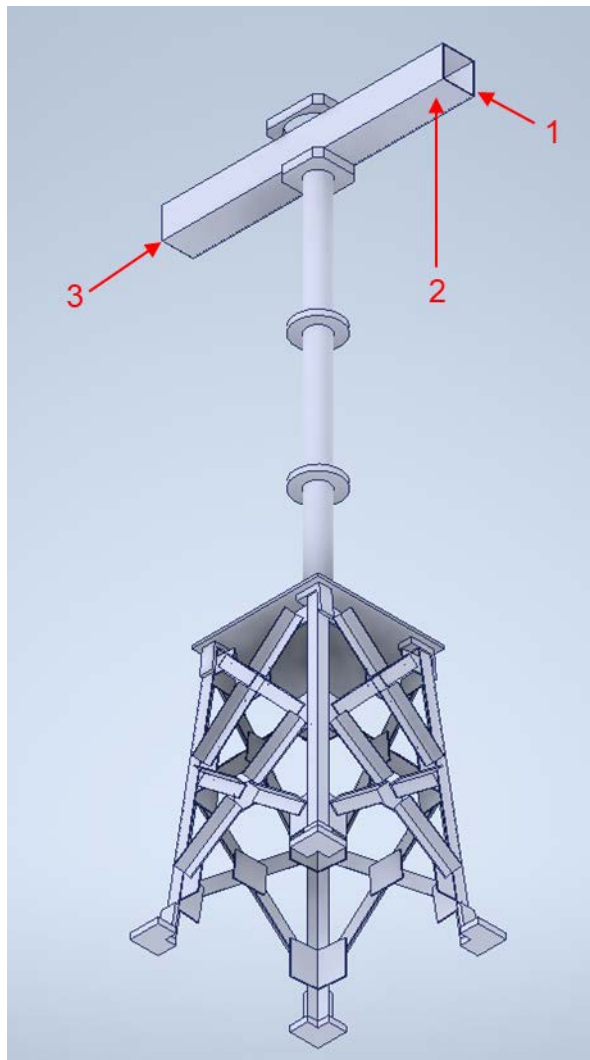


圖 4 - 41 橫梁振動量測敲擊位置

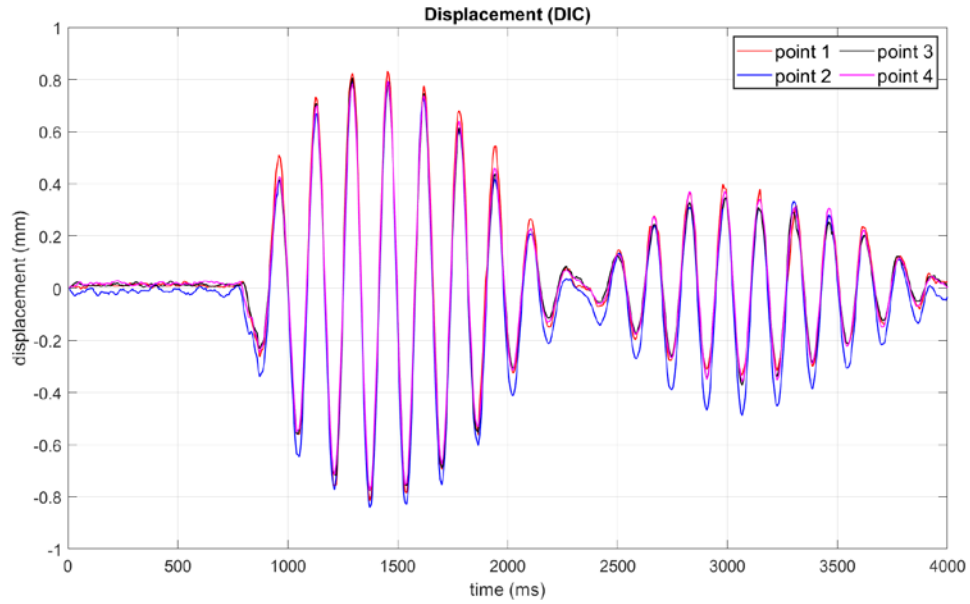


圖 4 - 42 橫梁振動量測-第一次敲擊 x 方向位移(point 1~ point 4)

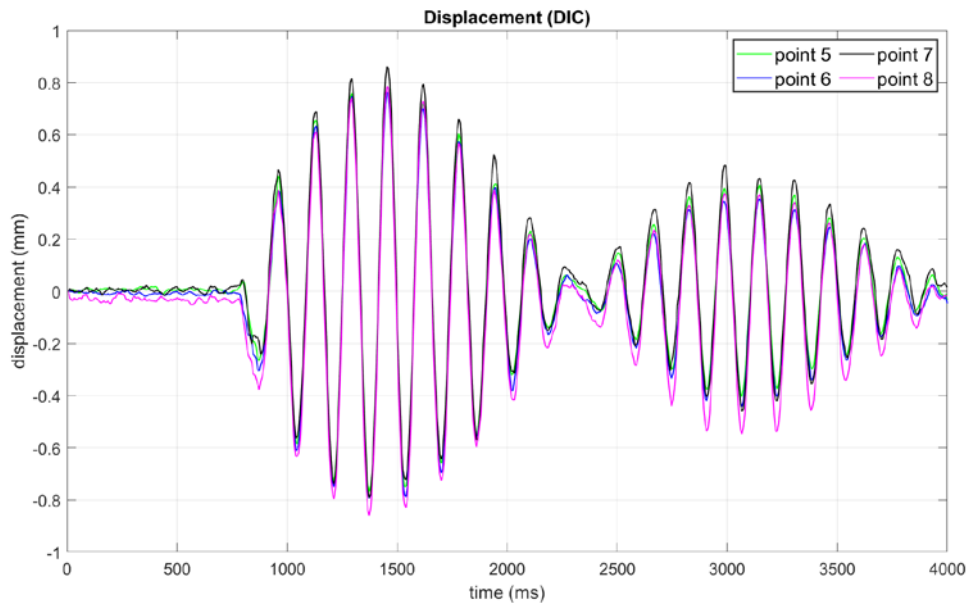


圖 4 - 43 橫梁振動量測-第一次敲擊 x 方向位移(point 5~ point 8)

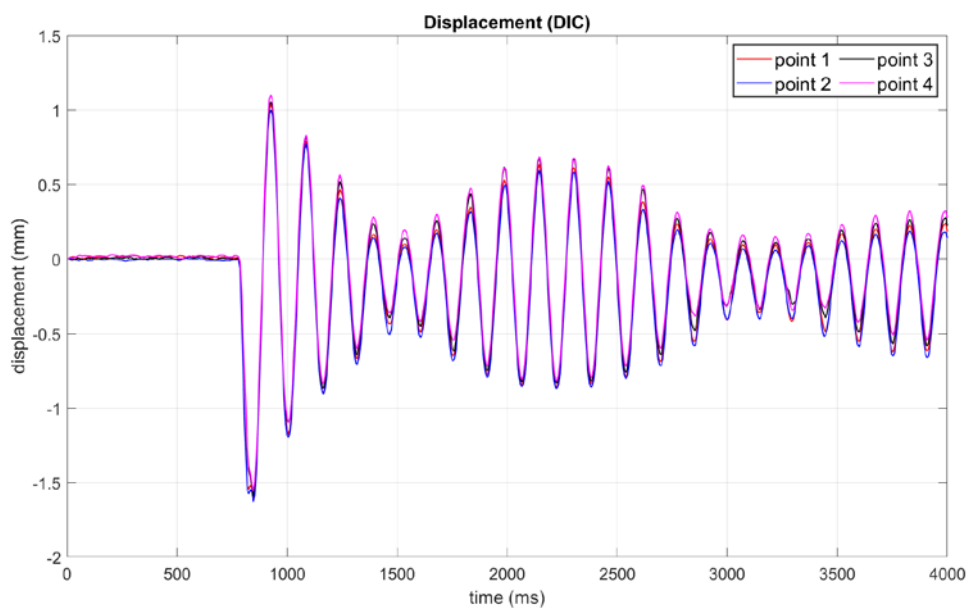


圖 4 - 44 橫梁振動量測-第一次敲擊 y 方向位移(point 1~ point 4)

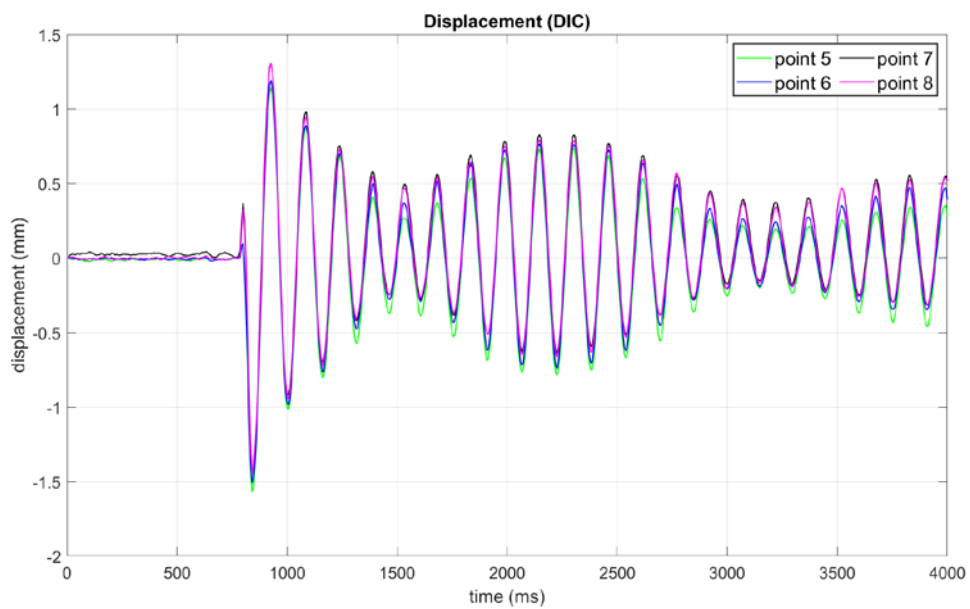


圖 4 - 45 橫梁振動量測-第一次敲擊 y 方向位移(point 5~ point 8)

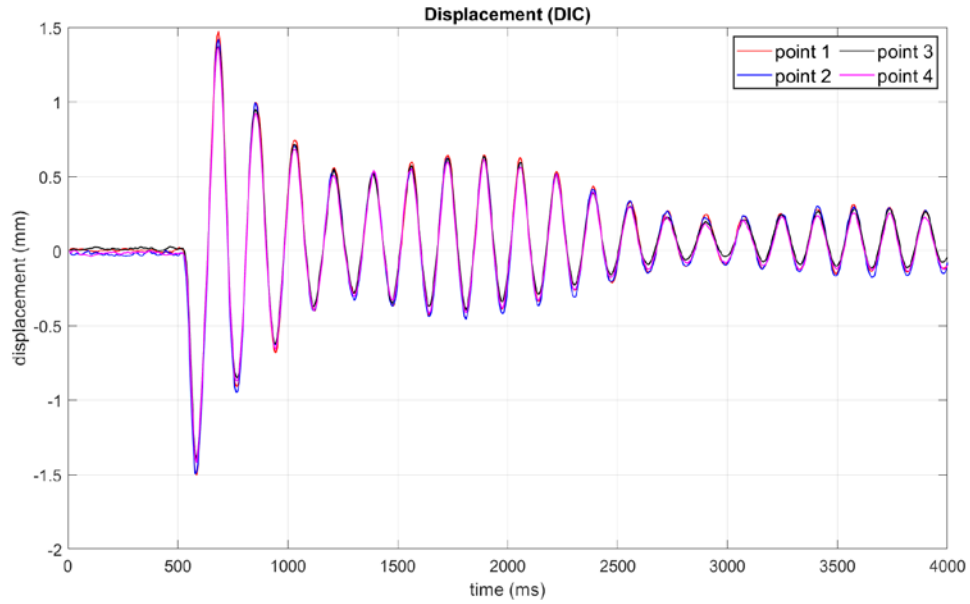


圖 4 - 46 橫梁振動量測-第二次敲擊 x 方向位移(point 1~ point 4)

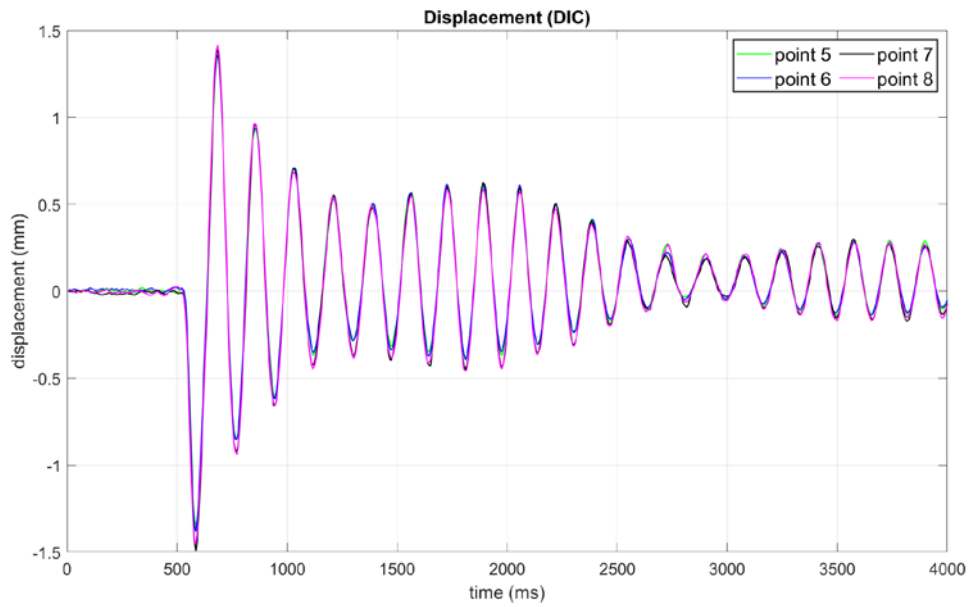


圖 4 - 47 橫梁振動量測-第二次敲擊 x 方向位移(point 5~ point 8)

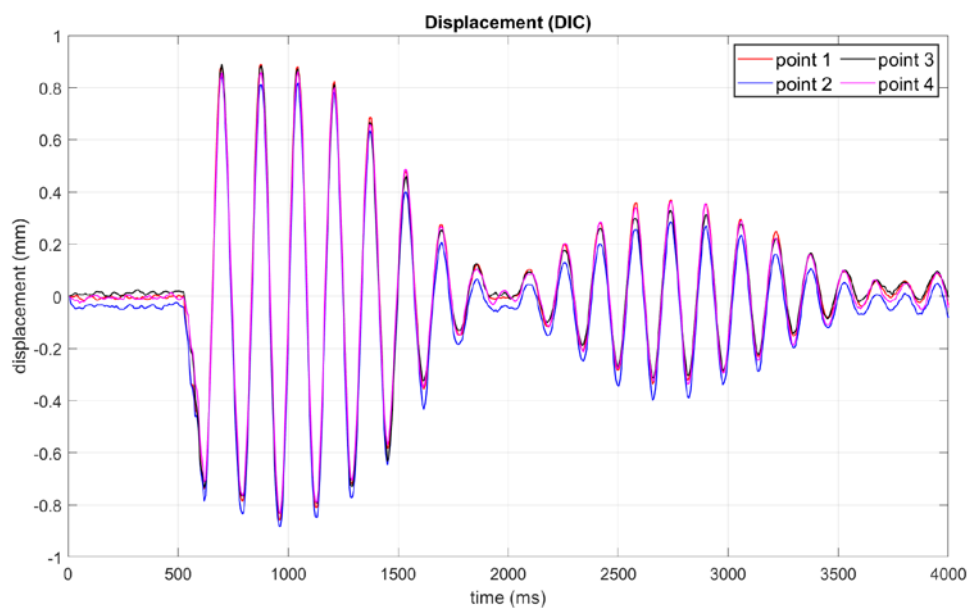


圖 4 - 48 橫梁振動量測-第二次敲擊 y 方向位移(point 1~ point 4)

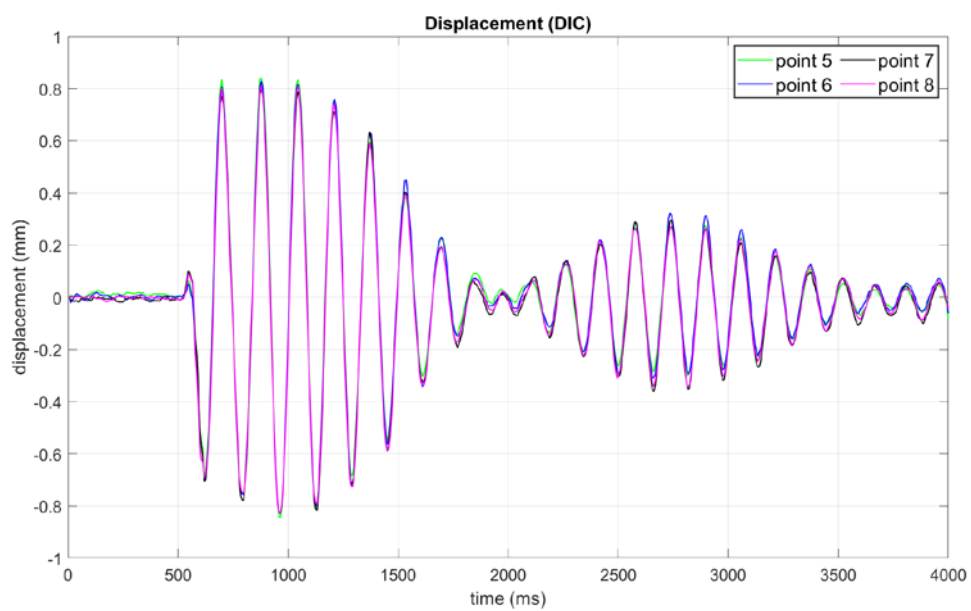


圖 4 - 49 橫梁振動量測-第二次敲擊 y 方向位移(point 5~ point 8)

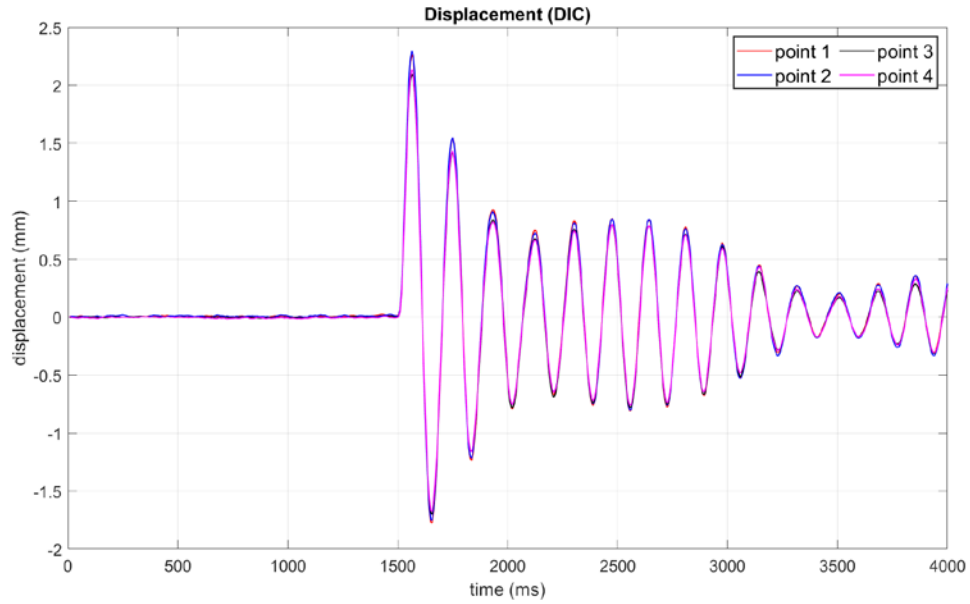


圖 4 - 50 橫梁振動量測-第三次敲擊 x 方向位移(point 1~ point 4)

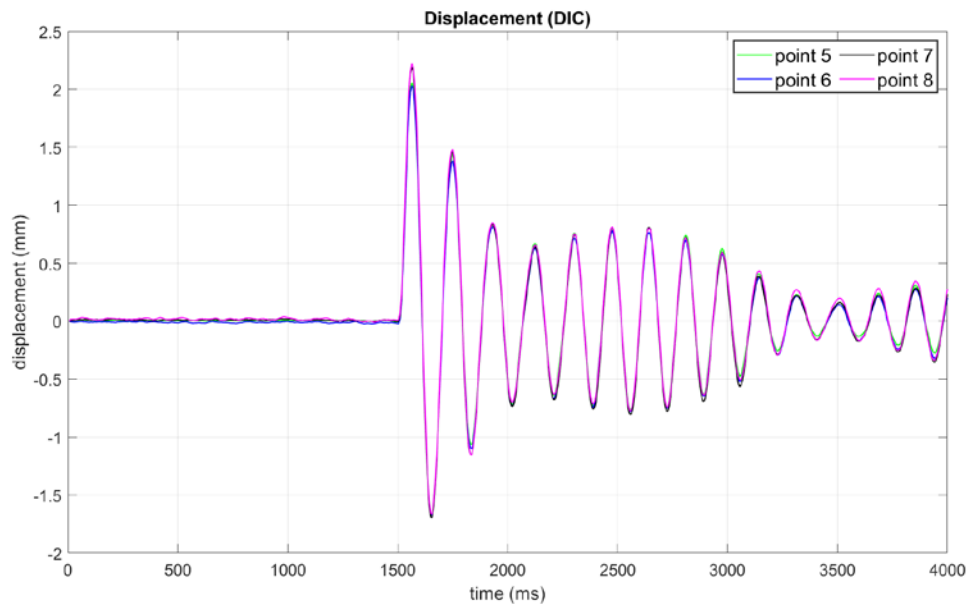


圖 4 - 51 橫梁振動量測-第三次敲擊 x 方向位移(point 5~ point 8)

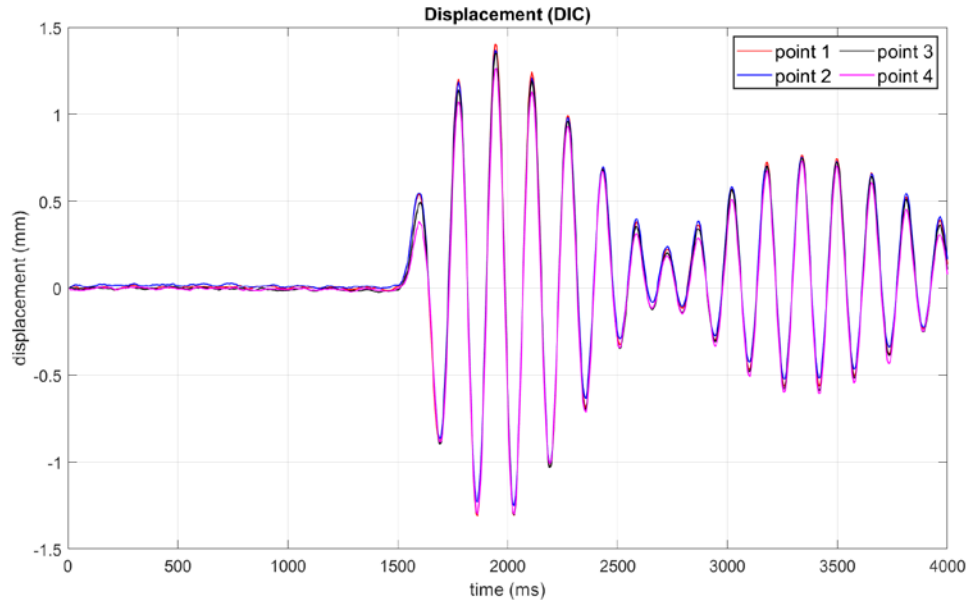


圖 4 - 52 橫梁振動量測-第三次敲擊 y 方向位移(point 1~ point 4)

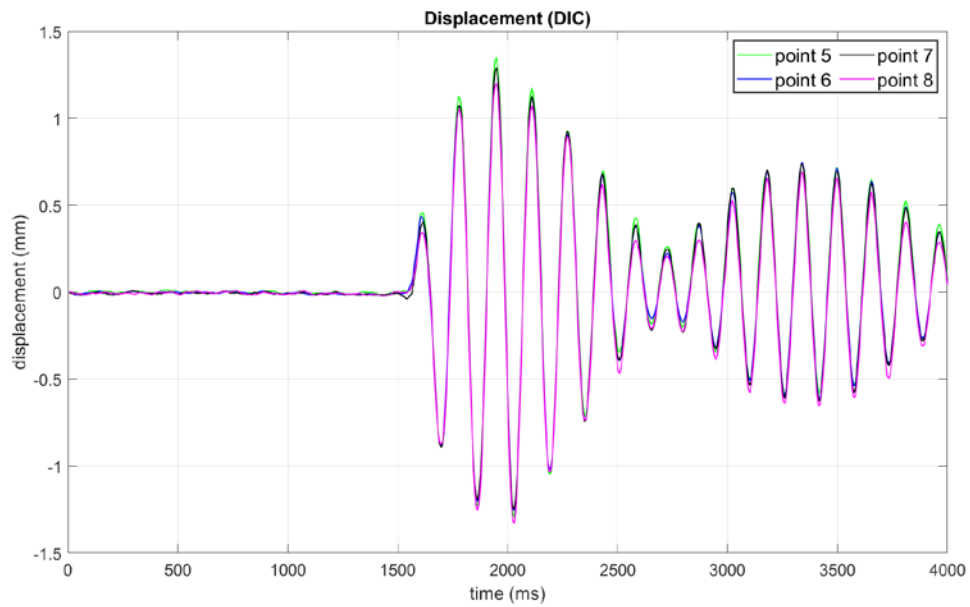


圖 4 - 53 橫梁振動量測-第三次敲擊 y 方向位移(point 5~ point 8)

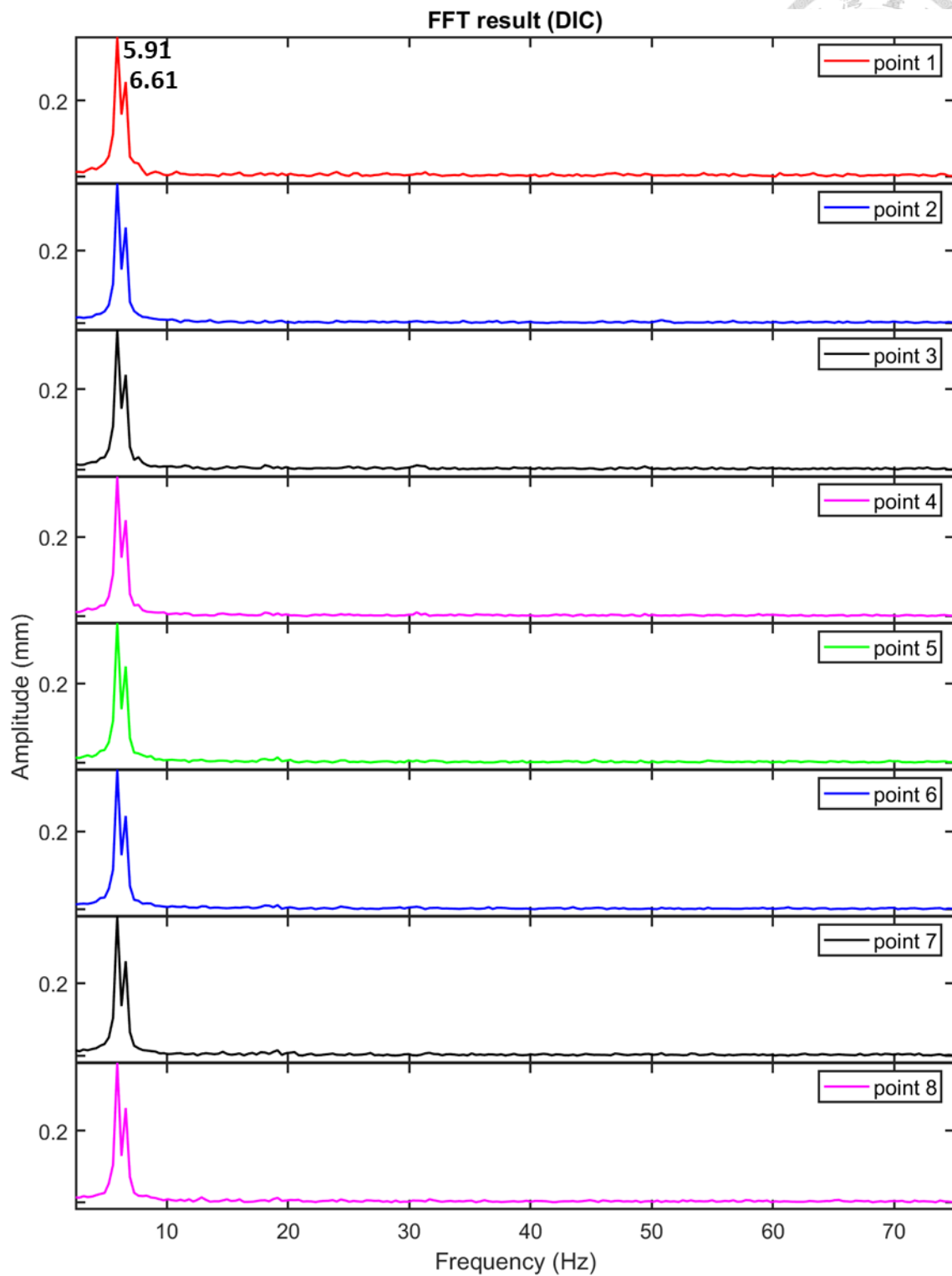


圖 4 - 54 橫梁振動頻域訊號-第一次敲擊 x 方向

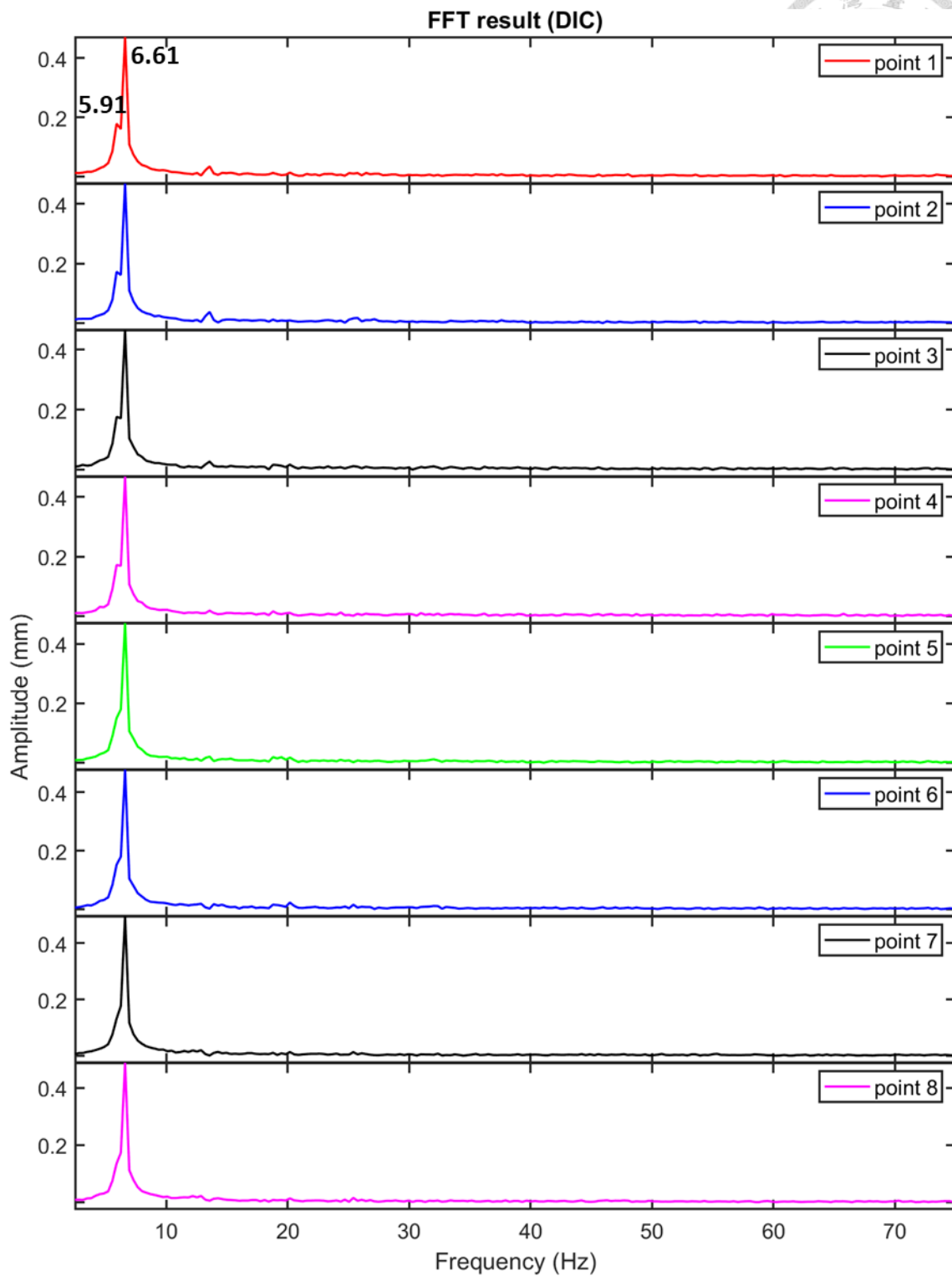


圖 4 - 55 橫梁振動頻域訊號-第一次敲擊 y 方向

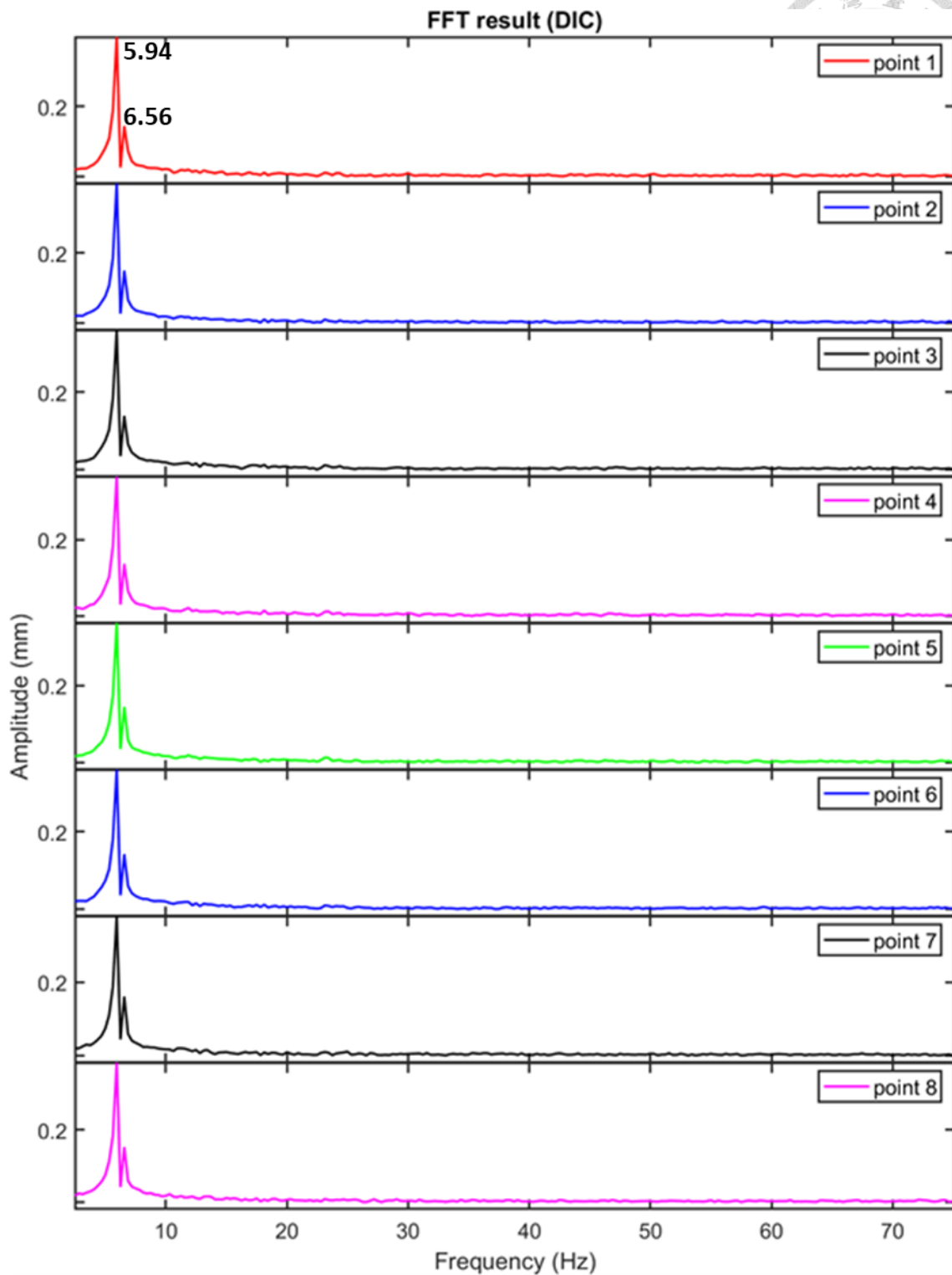


圖 4 - 56 橫梁振動頻域訊號-第二次敲擊 x 方向

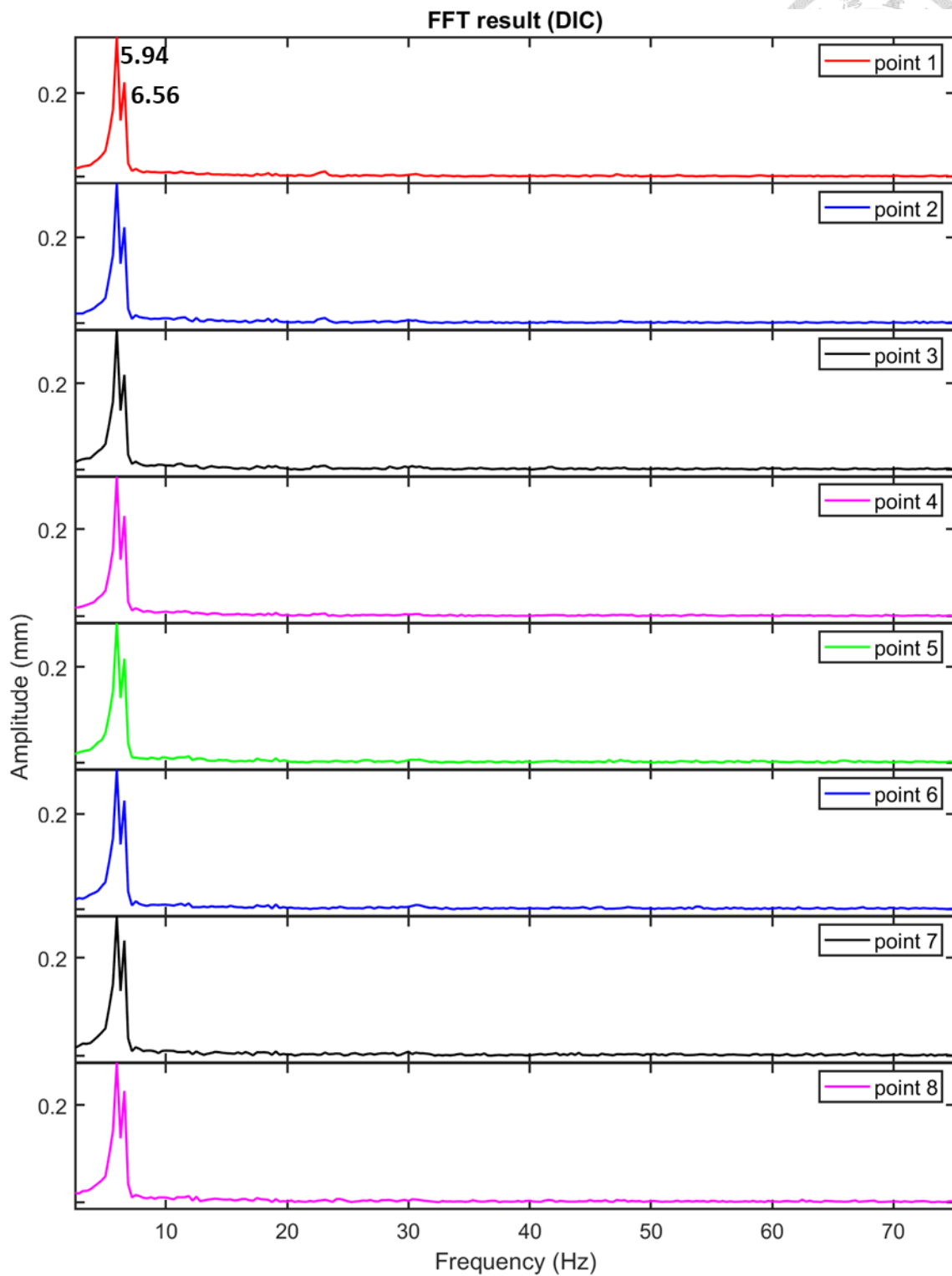


圖 4 - 57 橫梁振動頻域訊號-第二次敲擊 y 方向

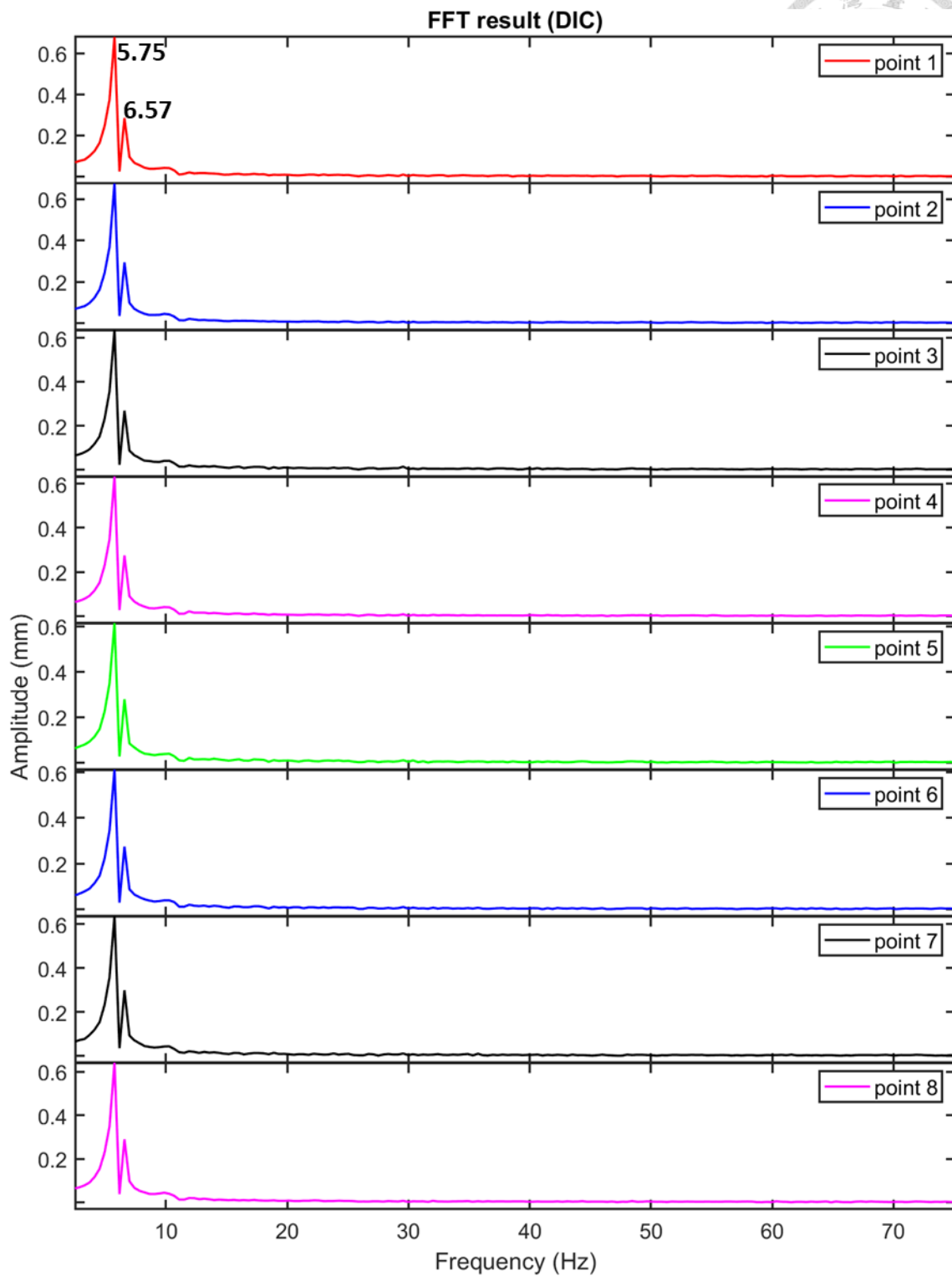


圖 4 - 58 橫梁振動頻域訊號-第三次敲擊 x 方向

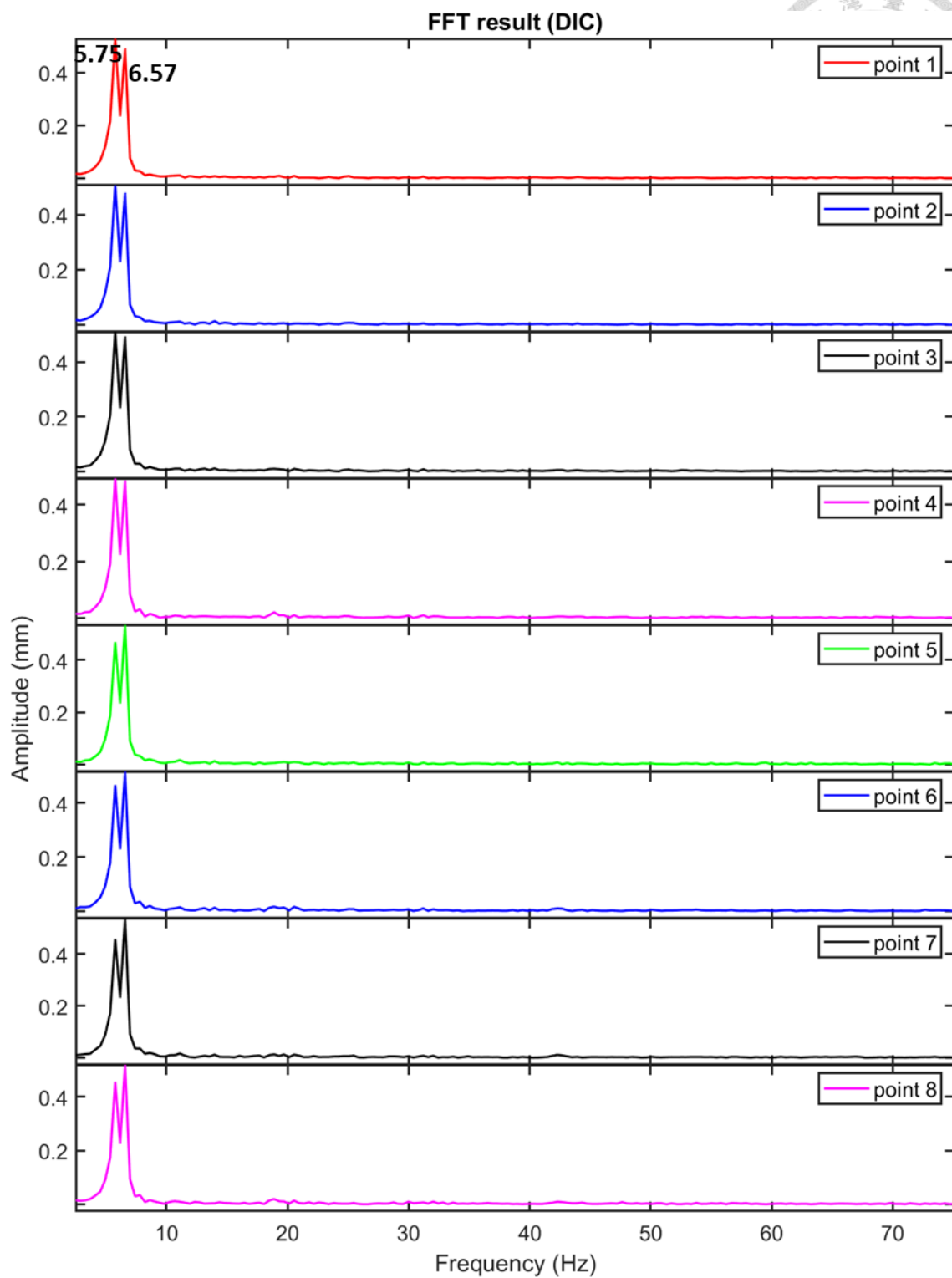


圖 4 - 59 橫梁振動頻域訊號-第三次敲擊 y 方向



第五章 揚聲器緩衝圈減振效果實驗及理論分析

本章內容為與西伯股份有限公司(Sable)之產學合作計畫，旨在分析筆記型電腦中之揚聲器單體。在合作方提供之揚聲器原型中，加入了緩衝圈設計以抑制振動傳遞到外殼及筆記型電腦，避免機械損耗及額外的雜音。本章首先由實驗分析緩衝圈之材料性質，並配合線黏彈性(viscoelastic)理論建立適當的模型進行有限元素法分析，以期建立揚聲器系統之 CAE 模型，透過模擬分析減少多次製作實體測試的開發成本。

5.1 相關原理及分析流程

5.1.1 動圈式揚聲器原理簡介

本章研究之筆電揚聲器屬於動圈式揚聲器(moving-coil speaker)，為最常見的揚聲器種類之一，其主要發聲結構如圖 5 - 1 所示，其中與運作有關的零件是音圈(voice coil)、振膜(diaphragm)及永久磁鐵(magnet)三個部份。運作時傳送電訊號給音圈上纏繞的線圈，使其在永久磁鐵之磁場中產生勞倫茲力(Lorentz force)，如式(5.1)所示，

$$f = Bli \quad (5.1)$$

其中 B 為永久磁鐵之磁場， l 為線圈長度， i 為通過線圈之電流。輸出特定的音訊號後，音圈會受勞倫茲力 f 影響產生對應的加速度，並使相連的振膜產生震動發出聲音。

5.1.2 線黏彈性理論

對於線性彈性材料，其應變與應力呈線性關係，受單軸應力下可寫為式(5.2)，

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.2)$$

其中 σ 為該軸向之應力， E 為楊氏模數， ε 為軸向應變。另外，受剪切應力下剪切應變與應力之關係如式(5.3)。

$$\tau = G\gamma \quad (5.3)$$

其中 τ 為剪應力， G 為剪切模數， γ 為剪應變。

對於部分具有黏性(viscosity)的材料，其應力與應變無法單由式(5.2)及式(5.3)之正比關係表示。其中材料黏性、應力與應變間之關係以牛頓定律(Newton's law)表示，如式(5.4)，

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (5.4)$$

其中 η 為材料之黏度，黏性代表剪應力與剪應變率 $\dot{\gamma}$ 成正比關係，亦即材料不易高速變形。

同時具彈性及黏性之材料稱為黏彈性(viscoelastic)材料，通常使用彈性項與黏性項之組合近似其機械性質，其中最簡單的模型有馬克斯威爾模型(Maxwell model)及凱文-佛伊格模型(Kelvin-Voigt model)兩種，分別將材料模擬成彈簧及阻尼的串聯及並聯組合，如圖 5 - 2 所示。但對於現實中之材料，這兩種模型無法描述較複雜的材料性質，故通常透過會更多項來更好的擬合出應力應變關係。本章中使用的廣義馬克斯威爾模型(generalized Maxwell model)[40]為多個馬克斯威爾模型的並聯，如圖 5 - 3 所示。進行材料測試時，將施加固定應變後使材料進行應力鬆弛，此時應力與應變如式(5.3)之關係，但剪切模數 G 會隨時間變化，寫為 $G(t)$ 。各個馬克斯威爾模型對剪切模數之貢獻如式(5.5)。

$$G_i(t) = G_i e^{-t/\tau_i} \quad (5.5)$$

其中， τ_i 為鬆弛時間，與單一馬克斯威爾模型之黏度 η_i 的關係如式(5.6)。

$$\tau_i = \eta_i / G_i \quad (5.6)$$

廣義馬克斯威爾模型中，黏性性質由多條式(5.5)組合而成，其造成的應力在靜止狀態下逐漸降至零，留下彈性性質產生之常數項。完整的廣義馬克斯威爾模型之剪切模數如式(5.7)，此級數稱為 Prony Series。

$$G(t) = G_e + \sum_{i=1}^N G_i e^{-t/\tau_i} \quad (5.7)$$

其中常數項 G_e 代表材料之彈性性質，經過長時間後，應力會收斂至 $G_e \gamma$ 。本章中透過實驗量測黏彈性材料的應力鬆弛，並進行擬合得到 Prony Series，以在有限元素模擬中表示材料之黏彈性值。

5.1.3 緩衝圈減振效果分析流程

合作廠商提供之揚聲器單體結構如圖 5-4 所示，其結構分為永久磁鐵(magnet)、音圈(coil)、振膜(diaphragm)、軟鐵片(soft iron)、懸邊(edge)、外殼(box)、內部支撐(Inner support)及緩衝圈(cushion ring)，其中緩衝圈為本章主要分析的部分，於圖中以橘色標示。

本研究首先由實驗量測數種緩衝圈使用的橡膠材料的材料性質，包括透過拉伸試驗得到楊氏模數及蒲松比及使用迴轉流變儀得到材料之 Prony Series，其中迴轉流變儀之實驗量測由歐佳怡[41]完成。得到材料常數後，使用 COMSOL Multiphysics 進行有限元素法模擬，由外殼之振幅比較不同緩衝圈材料之減振效果，在使用雷射都卜勒測振儀(laser Doppler vibrometer, LDV)及光纖位移計量測實際揚聲器單體運作時之振動，驗證有限元素模型得到的結果。

5.1.4 緩衝圈材料種類

本章中測試的緩衝圈之材料為軟值橡膠材料，其種類以邵氏硬度(Shore hardness)表示，分為 Shore 30、Shore 40 及 Shore 50 三種硬度，每種硬度又分為標

準及發泡兩種材料，其中發泡試片之結構中有細小的氣泡，使其楊氏模數較標準試片稍低。於 Gent 的著作[43]中提到楊氏模數與邵氏硬度之關係寫為式(5.8)之經驗公式，

$$E(\text{MPa}) = \frac{0.0981(56 + 7.66s)}{0.137505(254 - 2.54s)} \quad (5.8)$$

其中 E 為楊氏模數， s 為邵氏硬度。由此方程式可推斷 Shore 30、Shore 40 及 Shore 50 三種硬度之楊氏模數分別在 1.14MPa、1.70MPa 及 2.47MPa 附近。

5.2 數位影像相關法應用於緩衝圈橡膠材料拉伸試驗

本節使用萬能材料試驗機進行 5.1.4 小節中提到的六種橡膠試片進行拉伸試驗，以得到其楊氏模數之精確值。除了透過萬能試驗機輸出之拉伸距離與施力值計算軸向應變外，配合二維數位影像相關法能得之試片之橫向應變，由兩者能進一步計算試片的蒲松比，同時數位影像相關法得到之軸向應變亦能與機台輸出的結果互相驗證，確保數據的可靠性。

5.2.1 實驗規範及架設

與 3.4.2 小節之拉伸試驗相同，本實驗依據 ASTM D638 規範進行，由於橡膠試片屬於軟性材料，試片選擇 Type IV，其尺寸如圖 5 - 5 及表 5 - 1 所示。實驗之架設如圖 5 - 6 所示，使用氣壓夾頭夾持試片，並以工業相機配合 TEC-M55 鏡頭進行數位影像相關法之拍攝。萬能試驗機之拉伸速率設為 50mm/min，相機之 fps 設為 5。

5.2.2 追蹤機制與應變計算方法

在本實驗中，由於橡膠材料具有極高的延展性，拉伸試驗最大將持續至 250mm 的拉伸距離，也讓試片變成原本的數倍長度，造成數位影像相關法追蹤過程中遇到

難以追蹤的大變形及分析點超出照片範圍等問題。由於原始的數位影像相關法多應用在小變形或剛體位移之量測，在樣板子集合有大變形時可能使計算時相關係數降低，使追蹤結果產生明顯的誤差。林家雋[42]提出之更新樣板法改善了數位影像相關法對於大變形應變追蹤的量測效果，其原理是每當追蹤時 ZNCC 之相關係數低於設定之閾值，將觸發樣板更新，將追蹤位置回到初始選點位置持續追蹤應變，其概念與流程圖分別如圖 5-7 及圖 5-8 所示。

在應變計算上，與 3.4.2 小節不同，由於樣板更新需多次將分析點移回影像中央，使用多點量測會難以進行樣板更新，因此本實驗使用 CCPF+IC-GN 進行追蹤，同時由 IC-GN 得到之變形函數可得到位移場的微分值，並由式(5.9)計算應變。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= u_x + \frac{1}{2}[u_x^2 + v_x^2] \\ \varepsilon_{yy} &= v_y + \frac{1}{2}[u_y^2 + v_y^2] \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2}[u_y + v_x + u_x u_y + v_x v_y]\end{aligned}\quad (5.9)$$

其中 u 與 v 分別為 x 及 y 方向位移， u_x 、 u_y 、 v_x 與 v_y 為其對 x 及 y 方向的偏微分。

由於本實驗為大變形，計算時後方的二次項不進行忽略。

為了使樣板更新前後之應變值能夠接續，基於橡膠材料在拉伸時變形均勻，假設拉伸試驗中時試片之變形均勻，使樣板更新前後分析點位置之應變值相同，更新後接續先前的應變值持續追蹤，如式(5.10)。

$$\varepsilon' = (1 + \varepsilon_p)(1 + \varepsilon_d) - 1 \quad (5.10)$$

其中 ε' 為樣板更新後，相對於初始狀態之應變， ε_p 為進行樣板更新當下之應變， ε_d 為當前影像相對於樣板更新時之應變。針對本實驗的大變形應變追蹤問題，此

方法能夠透過不斷進行樣板，同時解決樣板變形與分析點超出邊界的困難點，並透過(5.10)式持續得到應變值

另一方面，由萬能試驗機得到的資訊為隨拉伸時間變化的拉伸力量值，經過計算可推估試片當下的應力及應變值。在試片變形均勻的假設下，根據定義工程應力及工程應變分別如式(5.11)及式(5.12)所示，

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0} \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_E = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (5.12)$$

其中 σ_E 為工程應力， ε_E 為工程應變， F 為當下的拉伸力， L 為當下之拉伸長度， A_0 為初始截面積， L_0 為試片之初始長度，其中試片之長度以夾頭間之距離為標準，於本實驗中初始長度為65mm。

在實際拉伸過程中，試片之截面積及長度會有所變化，故試片之真實應變會與工程應變有所差異，在大變形下尤為明顯。將試片尺寸變化納入考量後，工程應變能以式(5.13)換算為真實應變，

$$\begin{aligned} \varepsilon_T &= \int_{L_0}^L dL/L \\ &= \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \\ &= \ln(1 + \varepsilon_E) \end{aligned} \quad (5.13)$$

其中 dL 為當下之伸長增量，如圖5-9所示。

5.2.3 樣板更新法之累計誤差問題與解決方法

透過前一小節中提到的樣板更新法，能使用數位影像相關法得到整個拉伸過程中的應變值，但與萬能試驗機之數據相比，其結果隨著樣板更新次數增加產生明

顯的累積誤差，其主因是更新當下 ZNCC 之相關係數低於閾值，造成每次更新時應變值皆有少量的誤差，此應變值又在式(5.10)做為 ε_p 使後續的 ε' 皆產生誤差，使應變值隨著每次更新樣板逐漸產生偏差。本小節將針對此問題對樣板更新法提出兩種修改，提升數位影像相關法在大變形問題中的表現。

雙閾值樣板更新法

解決累積誤差問題的方式之一為選取適當的樣板更新閾值。選擇值罰值過低會使進行更新時應變產生明顯的誤差，是產生累積誤差的主因，反之閾值過高將使計算過程中頻繁地更新樣板，除了拖慢運算速度外，在更新後一兩個影格內受限於數位影像相關法的極限精度無法得到準確的應變值。

通常樣板更新法之相關係數閾值設定在 0.8 至 0.9 間，但試片樣式、特徵噴塗和實驗架設等變因都會影響相關係數，導致時常需要透過多次嘗試來設定適當的閾值，使分析效率低下且充滿變數。本方法透過在相關係數閾值外增設位移閾值來改善此問題，其概念為當追蹤的特徵點與原先設定的樣板位置之距離超出閾值時也會觸發樣板更新，流程如圖 5-10 所示。藉由位移閾值的設定，可以在特徵點在拉伸試驗過程中離開畫面中心時直接觸發更新樣板，再結合相對寬鬆的相關係數閾值，可以改善因為閾值設定不佳導致的累計誤差問題。

圖 5-11 與圖 5-12 為在不恰當的相關係數閾值設定下，套用雙閾值樣板更新法前後的應變計算結果。只採用相關係數閾值時，由於閾值設定太小，在觸發樣板更新前已經追丟特徵點，導致樣板更新前應變值開始下降，應變-時間曲線出現明顯的鋸齒。在套用雙閾值樣板更新法後，在觸發過低的相關係數閾值前位移閾值被觸發，成功避免頻繁追丟特徵點的問題，得到較好的量測結果。



重設初始猜值

除了閾值設定外，原先的樣板更新機制在觸發更新時相關係數時常遠低於所設定的閾值，本方法藉由改變優化更新的機制來改善此問題。新的樣板更新流程如圖 5-13 所示，在位移或相關係數達到閾值後，改以上一個影格作為樣板進行樣板更新，並在當前影格重新用 CCPF 進行 IC-GN 的初始猜值。

若觀察整個拉伸過程中追蹤之相關係數波動，過往的樣板更新法之相關係數變化如圖 5-14 所示，其中在追蹤特徵點到追丟點的過程中相關係數的變化並非平滑下降，而是在追丟的瞬間相關係數會迅速降低，與閾值設定過低的情況類似，更新時偏低的相關係數代表更新當下的應變值並不準確，在進行樣板更新後接續該值進行計算時將產生累積誤差。

重設初始猜值的做法能夠在相關係數低於閾值前進行樣板更新，使整個追蹤過程中相關係數維持在閾值以上，如圖 5-15 所示。此方法讓原本不時掉到 0.8 以下的相關係數改善成長時維持在 0.9 以上。在圖 5-16 及圖 5-17 中將兩中方法得到的應變-時間圖與拉伸試驗機的數據做比較，可以看出採取重設初始猜值的應變-時間曲線明顯有更好的對應性。

5.2.4 實驗結果

軸向應變

標準 30、標準 40、標準 50、發泡 30、發泡 40 及發泡 50 六種試片由拉伸試驗機之及數位影像相關法得到之軸向工程及真實應變如圖 5-18 至圖 5-23 所示，其中兩種量測方法得到之應變有量好的對應性，但在接近極限拉伸距離時仍可能產生少量的誤差，可能是數位影像相關法多次樣板更新後誤差累積或在大變形下試片變形不均勻導致。



橫向應變

透過數位影像相關法得到六種之橫向工程及真實應變如圖 5-24 至圖 5-29 所示，在小應變時大致為向下的斜直線，隨著拉伸時間其變化速度逐漸平緩。其中部分試片之橫向應變結果在拉伸初期有雜訊發生，推測是拉伸時試片之橫向變形較小，接近數位影像相關法之極限精度，加上人工夾持試片時不完全垂直造成。

應力-應變曲線與楊氏模數

六種試片的應力-應變曲線如圖 5-30 至圖 5-35 所示，其中由於兩種方法得到之應變值具良好對應性，使用數位影像相關法及萬能試驗機之應變值做圖得到之應力-應變曲線幾乎重合。在楊氏模數計算上，以萬能試驗機得到之應力及應變為基準，透過 MATLAB 中之 ischange 含式找出應力應變曲線中初始等斜率之線性段，其中選擇線性(linear)選項，容許之誤差值設為 0.01MPa，再透過此線性段中的資料進行線性擬合，擬合結果的直線方程式之斜率即為所求之楊氏模數。圖 5-36 及圖 5-37 分別為標準及發泡試片之應力-應變曲線，其中邵氏硬度越高的試片在相同應變下拉伸力越大。進行擬合後得到標準 30、標準 40 及標準 50 之楊氏模數分別為 1.201、1.728、4.365MPa，發泡 30、發泡 40 與發泡 50 之楊氏模數分別為 1.037、1.567、3.056MPa，而由式(5.8)之經驗公式得到邵氏硬度 30、40 及 50 之楊氏模數為 1.147、1.697、2.466MPa，如表所示。其中在邵氏硬度 30 及 40 之試片楊氏模數皆與經驗公式相當接近，硬度 50 試片之楊氏模數則有明顯的差距。

蒲松比

蒲松比 ν 能夠由數位影像相關法所量測到橫向應變及縱向應變直接計算，如式 (5.14)，

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{axial}} \quad (5.14)$$

其中 ε_{trans} 為橫向應變， ε_{axial} 為軸向應變。此時薄松比之數值會隨拉伸過程變化，六種試片之結果如圖 5-38 至圖 5-43 所示。

由於受力較小時應變雜訊較大，故薄松比在小應變時雜訊較為明顯，但隨著受力增加，由真應變計算出之薄松比漸漸收斂，可由拉伸結束時之收斂數值得到確切的薄松比。然而，揚聲器振動時緩衝圈材料應在小變形範圍，若取薄松比之收斂值使用，其數值為材料大變形下的表現，可能與實際情所差異。

為了得到小變形下的薄松比，與楊氏模數相同透過 MATLAB 的函式 `ischange()` 搭配 `linear` 選項找出橫向應變曲線與軸向應變曲線中初始等斜率之線性段得到應變率，並由比值計算小變形下的薄松比，如式(5.15)，

$$\nu = -\frac{\dot{\varepsilon}_{trans}}{\dot{\varepsilon}_{axial}} \quad (5.15)$$

其中 $\dot{\varepsilon}_{trans}$ 及 $\dot{\varepsilon}_{axial}$ 分別為橫向與軸向應變對時間的微分，即拉伸時之應變率。由此方法計算標準 30、標準 40 及標準 50 之薄松比分別為 0.3477、0.33、0.3645，發泡 30、發泡 40 與發泡 50 之薄松比分別為 0.3916、0.4001、0.4332。

5.3 揚聲器系統有限元素分析與驗證實驗

完成材料參數之量測後，使用合作廠商提供之 CAD 模型配合前一節中量測的材料參數，透過 COMSOL Multiphysics 建立揚聲器系統之有限元素分析模型。本節首先將介紹有限元素分析模型之設定，再對使用不同緩衝圈材料之揚聲器單體進行振動分析，比較其減振效果。最後使用雷射都卜勒測振儀及光纖位移計量測揚聲器實際運作時外殼之振動，驗證有限元素模型之結果。



5.3.1 模型與材料參數設定

於 5.1.3 小節中對本計畫分析之揚聲器單體結構有簡單的介紹，其結構由圖 5-43 中的七個元件組成。除了緩衝圈外，其他部件之材料參數由合作廠商提供，如表 5-1 所示。緩衝圈之材料參數如表 5-2 所示，其中楊氏模數與蒲松比使用 5.2 節拉伸試驗之量測結果，黏彈性質使用歐佳怡[41]透過迴轉流變儀量測橡膠材料之應力鬆弛數據，以式(5.7)擬合三項之 Prony series 係數。

由於揚聲器模型在兩條軸上幾乎對稱，在模型中可依兩條對稱軸將其切成 1/4 模型，並在力學設定對稱條件對模型進行簡化，最後結果可鏡射回完整模型，透過此方法能夠簡化網格的生成並大幅減少計算時間。

5.3.2 固體力學基本設定

模型的固體力學設定對模擬結果的影響相當顯著，邊界條件需盡可能按照內部零件間之組裝和與外部零件的交互作用進行設定，以求模型計算結果之真實性。首先揚聲器短邊上有 C 型扣環之結構作為鎖固使用為固定邊界，如圖 5-44 所示。另外，揚聲器模組在外殼與緩衝圈和內部發聲結構分別組合成聯合體，而緩衝圈和內部結構間採取連續條件，聯合體設定可參考圖 5-45 及圖 5-46。最後，音箱在運作時透過線圈通過電流，受到電磁力產生振動進行發聲，故設定施加特定頻率的力於線圈上進行激振。為求模擬時音箱振幅與驗證實驗相同，參考驗證實驗中雷射都卜勒測振儀量測得到的振幅大小，將線圈單位體積受力設為 $2.1826 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

除了採衝圈設為黏彈性材料並套用實驗量測得到之黏彈性質外，其他材料皆設定為線性彈性材料，由於模擬採用簡化的 1/4 模型，在完成各種條件設定後需要再定義對稱面之對稱性，設定之對稱面如圖 5-47 及圖 5-48，所示，才能以簡化後的模型模擬完整的音箱，最後建立全域四面體網格如圖 5-49 所示，元素數量為 331255。



5.3.3 有限元素分析結果

本小節於有限元素模型中選取兩點分析其頻率響應，其位置如圖 5-50 中 A、B 兩點，振動分析方向為圖 5-4 中的 z 方向。模擬中透過掃頻分析音箱發出不同頻率聲響時外殼的振動，掃頻之範圍設為人耳能聽到的 20Hz-20000Hz，間距設 1/12 八度音頻率。

使用六種不同緩衝圈材質下，A 與 B 兩點在不同頻率激振下之振幅大小如圖 5-51 所示，加速度量值如圖 5-52 所示。其中由於加速度為位移經過兩次數值微分得到，其量值在高頻時會被明顯放大。

模型的主要共振頻率為 560Hz，其他共同的共振頻率為 132Hz 及 4750Hz。圖 5-53 為這三個頻率下不同緩衝圈單體之樣外殼振幅，其中在 132Hz 及 560Hz 兩個頻率中楊氏模數與振幅大小呈負關係，其中發泡 30、標準 30 及標準 40 緩衝圈之減振效果明顯較差。而 4750Hz 之振幅大小則以發泡 40、發泡 50、標準 30 及標準 40 四種緩衝圈材料之結果較為明顯。

於有限元素分析結果中，不同緩衝圈材料對共振頻率沒有明顯的影響，其中針對 560Hz 處的主要共振頻率，減振效果最佳的緩衝圈應為標準 50 及發泡 50 材料，而發泡 40 次之。另外，此模型中不同緩衝圈材料對揚聲器之模態振型相同，結果如圖 5-54 所示，在 132Hz 時主要為懸邊振動，560Hz 時為振模及懸邊振動，而 4750Hz 時外殼亦有明顯的振動發生。

5.3.4 參數化掃描

透過實驗量測得到緩衝圈之材料常數，並將模擬邊界設定至與實際情況相符，但不可避免地複雜系統中有少量的誤差產生，從模擬結果與驗證實驗也可發現有所差異。本小節透過簡化系統的變因，固定材料參數中影響較少的蒲松比和密度並去除黏彈性值，利用 COMSOL 中參數化掃描的功能改變緩衝圈的楊氏模數，以



求得到減振效果較佳的楊氏模數範圍。

參數化掃描設定中，以楊氏模數為變數，掃描範圍為 0.75MPa 至 4.5MPa，間隔設為 0.25MPa，現有的六種緩衝圈材料之楊氏模數皆在掃描範圍中。掃頻範圍為 20Hz 至 5000Hz，間距 1/12 八度音，參數化掃描會對每個掃描的楊氏模數值進行一次掃頻，掃描中忽略材料的黏彈性值，並固定緩衝圈材料之蒲松比為 0.4、密度為 $1140\text{kg}/\text{m}^3$ ，激振力設定於線圈上，量值為 $1\text{N}/\text{m}^3$ 。

由於緩衝圈之楊氏模數對此系統的共振頻率值沒有影響，取平均振動量最大的五個共振頻之位移與加速度量值分析不同楊氏模數的減振效果。A、B 兩點之位移參數化掃描結果如圖 5-55 及圖 5-56 所示，平均峰值最高的五個共振頻分別位於 132Hz、530Hz、560Hz、710Hz 和 900Hz，其中 560Hz 之峰值明顯隨楊氏模數增加而降低，710Hz 之峰值則在 1.5MPa 附近有較高的峰值，900Hz 之峰值在 3.5MPa 至 4MPa 間峰值極大，而剩下兩個頻率的峰值則相對不明顯。由此結果可以推論在忽略黏彈性值等因素下，減振效果較好的緩衝圈楊氏模數 1.5MPa 至 3.5MPa 間。

在加速度方面，由於模擬結果的數值在高頻有發散的現象，故去除高於 3350Hz 的峰值後再取平均峰值最高的五個共振頻進行分析，圖 5-57 及圖 5-58 分別為 A、B 兩點之加速度參數化掃描結果，其趨勢大致與位移之結果相同，但較為高頻的 1600Hz 與 3350Hz 出現在五個主要個共振頻中，取代了頻率較低的 132Hz 與 530Hz 峰值。

5.3.5 揚聲器單點振動驗證實驗

為了驗證 5.3.3 及 5.3.4 小節中有限元素分析之結果，本小節使用合作廠商提供之揚聲器實體，在實際運轉下進行單點振動量測實驗。實驗中應用的量測設備為光纖位移計及雷射都卜勒測振儀，其中後者賴德源操作。



實驗架設及流程

本實驗使用兩種方法量測揚聲器在不同發聲頻率下之外殼振動，量測點與有限元素分析中輸出之 A 及 B 兩點相同，位置可參考圖 5 - 50。光纖位移計及雷射都卜勒測振儀之實驗架設分別如圖 5 - 59 及圖 5 - 60 所示，實驗時將量測設備對準量測點後，對揚聲器輸入 20Hz-20000Hz 之訊號進行掃頻，間距與有限元素分析中相同，為 1/12 八度音。

合作廠商提供之揚聲器實體為使用發泡 30、發泡 40 及發泡 50 三種不同緩衝圈材料與不包含緩衝圈設計之原始(Original)版本四種。本小節將對於發泡 30、發泡 40 及發泡 50 三種不同緩衝圈材質，比較透過有限元素模型及兩種實驗量測得到之減振效果，作為有限元素模型之驗證。

實驗結果

本小節將都卜勒測振儀得到之速度訊號換算成位移，以方便與光纖位移計及有限元素法之結果進行比較。兩種實驗方法得到發泡 30、發泡 40、發泡 50 及原始版本揚聲器之外殼 A、B 兩點振幅如圖 5 - 61 至圖 5 - 64 所示，其中除了使用發泡 30 緩衝圈之共振頻率較低，其他揚聲器單體之共振頻在 450Hz 至 530Hz 間，與有限元素法之結果接近。在振幅大小上，原始版本及發泡 30 之振動位移最大，而發泡 40 版本於實驗中有最佳的減振效果。

圖 5 - 65 至圖 5 - 70 將實驗結果與對應之有限元素模型計算結果進行比較，其中兩種實驗量測方法得到之共振頻率有良好的對應性，振幅大小則有所差異，推測此差距是雷射都卜勒測振儀與光纖位移計之實驗量測並非同時進行導致。發泡 30 及發泡 40 版本之振幅與雷射都卜勒測振儀有良好的對應性，但發泡 50 版本中有限元素法得到之振幅小於實驗量測結果。由於 5.3.2 小節中有限元素模型之施力大

小是以雷射都卜勒測振儀之振幅為基準設定，該方法量測到之位移大小會更接近於有限元素法的結果。



5.4 小結

本章首先透過拉伸試驗量測了六種橡膠材料的材料參數，其中配合數位影相關法驗證實驗結果，並計算是片的蒲松比。對於拉伸試驗中遇到的大變形問題，於 5.2.2 及 5.2.3 小節中介紹了使用的樣板更新法及其改良，於數位影像相關法中成功得到與萬能試驗機相近的軸向應變值。

於 5.3 節中成功建立揚聲器系統之有限元素分析模型，並在驗證實驗中模擬得到之共振頻率與實驗結果有所對應。對於發泡 30、發泡 40 及發泡 50 三種緩衝圈材質的減振效果，於有限元素分析中發泡 30 振幅最大，與實驗結果相同，但發泡 50 之結果中模擬得到之振幅大小明顯低於實驗結果，使模擬中發泡 40 及發泡 50 之減振效果相近，而實驗中發泡 40 具最好的減振效果。由於有限元素分析模型中各種條件之設定難以達到與實體相同，在整合多種零件及材料的系統中誤差難以避免，於 5.3.4 小節中將問題簡化為緩衝圈楊氏模數變化的單變因問題，得到減振效果最佳的材料楊氏模數在 1.5MPa 至 3.5MPa 間，呼應了實驗中發泡 40 及發泡 50 版本有較低的振幅。

表 5 - 1 ASTM D638 Type IV 尺寸規格表

	Dimensions (mm)
W—Width of narrow section	6
L—Length of narrow section	33
WO—Width overall, min	19
LO—Length overall, min	115
G—Gage length	25
D—Distance between grips	65
R—Radius of fillet	14
RO—Outer radius	25
T—Thickness	4



表 5 - 2 橡膠試片楊氏模數(MPa)

Shore hardness	30	40	50
Imperial equation	1.147	1.697	2.466
Standard	1.201	1.728	4.365
Foam	1.037	1.567	3.056



表 5 - 3 揚聲器有限元素模型材料表

Component	material	Density(kg/m^3)	Young's modulus	Poisson's ratio
Box	ABS	1120	2 GPa	0.394
Inner Support	ABS	1120	2 GPa	0.394
Diaphragm	PEEK + Others	450	5.6 GPa	0.4
Edge	PEEK	1280	6080 Pa	0.4
Voice coil	Copper/Aluminum	3320	126 GPa	0.35
Magnet	NdFeB	7500	206 GPa	0.24
Soft Iron	Low Carbon Steel	7850	160 GPa	0.26
Cushion Ring	Rubber	From experiment	From experiment	From experiment



表 5 - 4 緩衝圈材料參數表

Parameter	Standard			Forming		
	30	40	50	30	40	50
$E(MPa)$	1.201	1.728	4.365	1.037	1.567	3.056
ν	0.3477	0.33	0.3645	0.3916	0.4001	0.4332
$G_1(MPa)$	0.023670	0.01959	0.101997	0.00171	0.026329	0.05737
$G_2(MPa)$	0.070350	0.057531	0.426027	0.011705	0.109481	0.27368
$G_3(MPa)$	0.121592	0.099853	1.152142	0.052388	0.792101	0.835103
$\tau_1(s)$	0.0423	0.0426	0.0399	0.2221	0.0402	0.0450
$\tau_2(s)$	36.581	153.380	28.355	59.933	52.417	36.983
$\tau_3(s)$	3147.900	3664.200	6236.900	7940.200	16050.000	12944.000
$\rho(kg / m^3)$	1084	1133	1206	1110	1130	1177

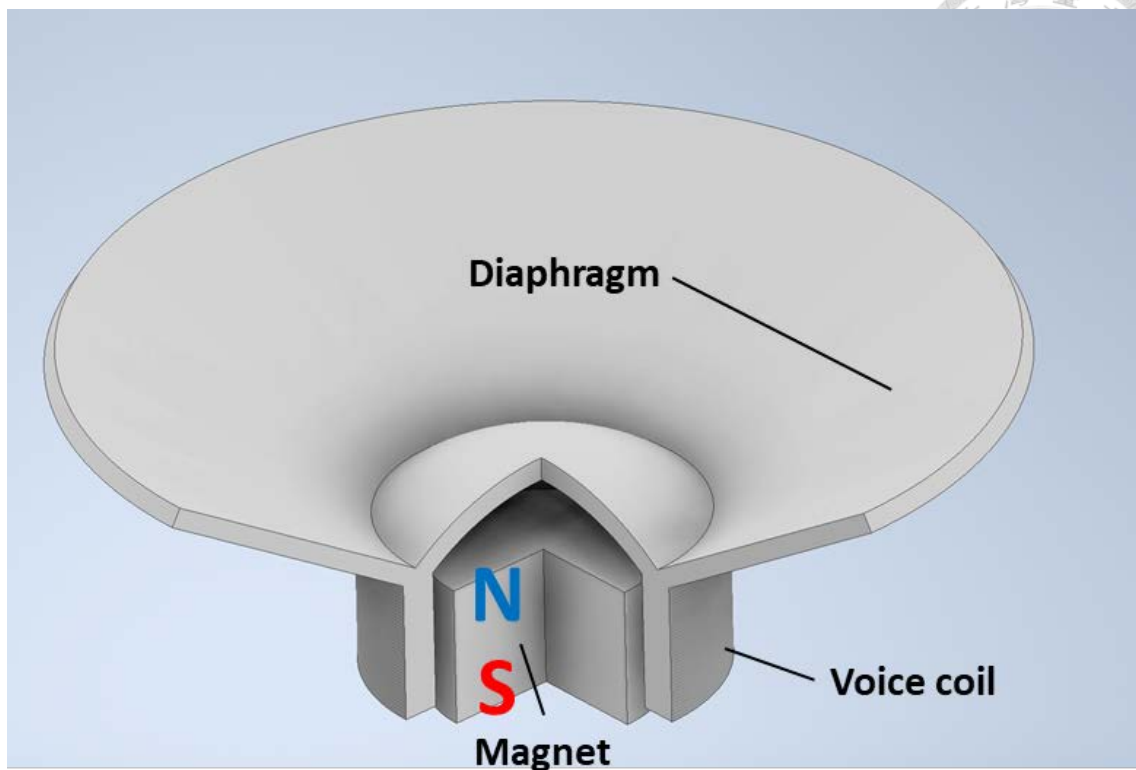
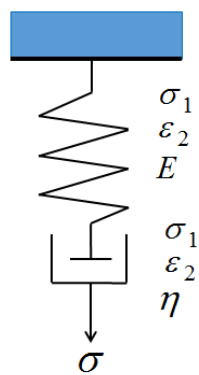
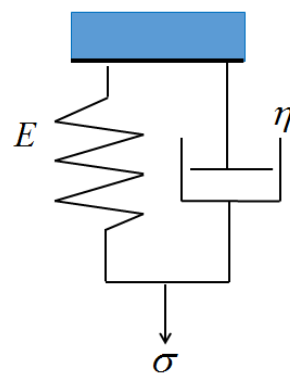


圖 5 - 1 動圈式揚聲器運作原理示意圖



Maxwell model



Kelvin-Voigt model

圖 5 - 2 黏彈性材料馬克斯威爾模型與凱文-佛伊格等效模型示意圖

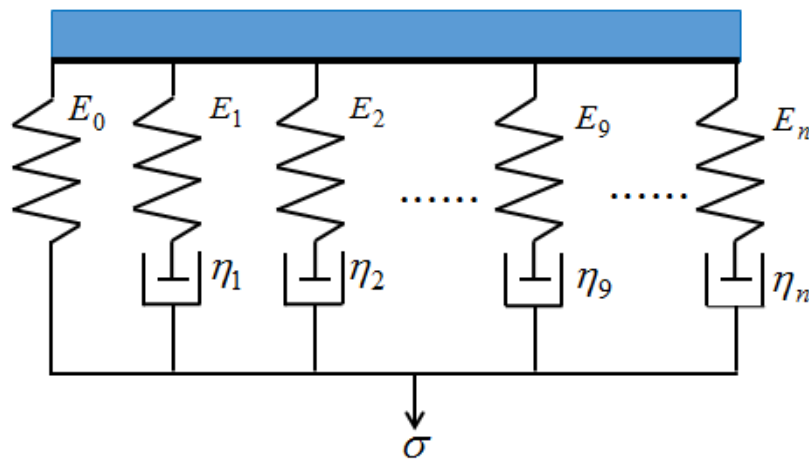


圖 5 - 3 黏彈性材料廣義馬克斯威爾等效模型示意圖

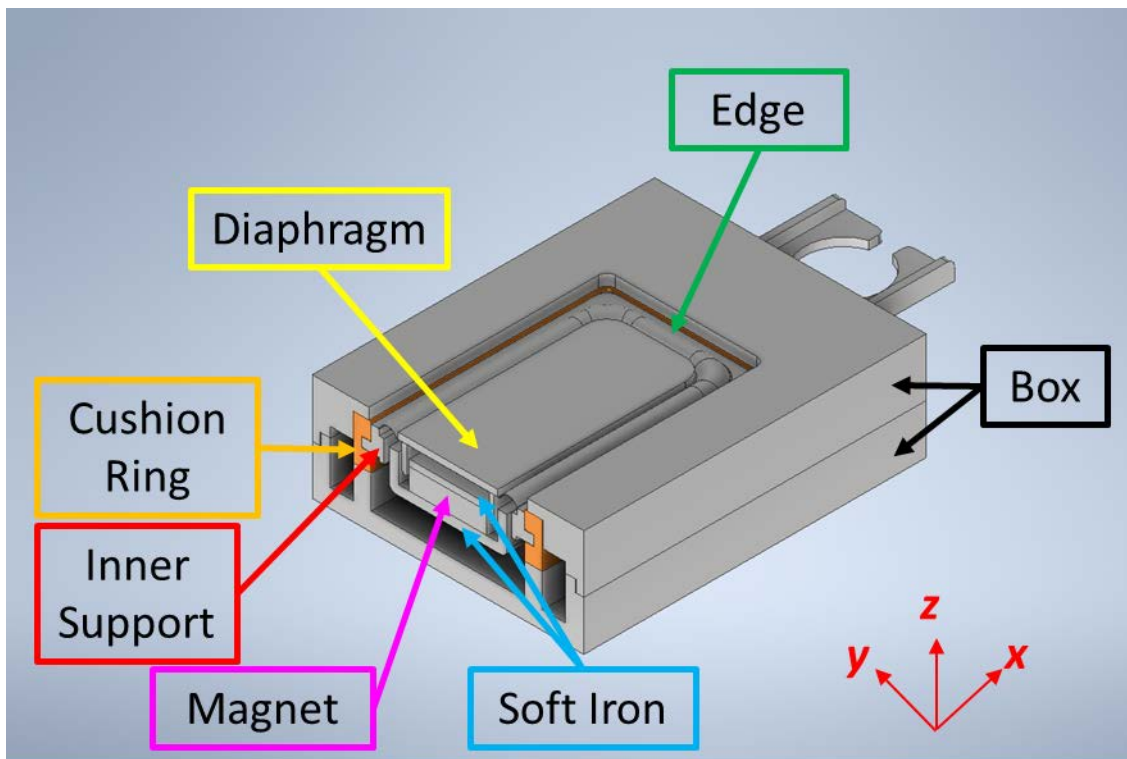


圖 5 - 4 揚聲器結構圖

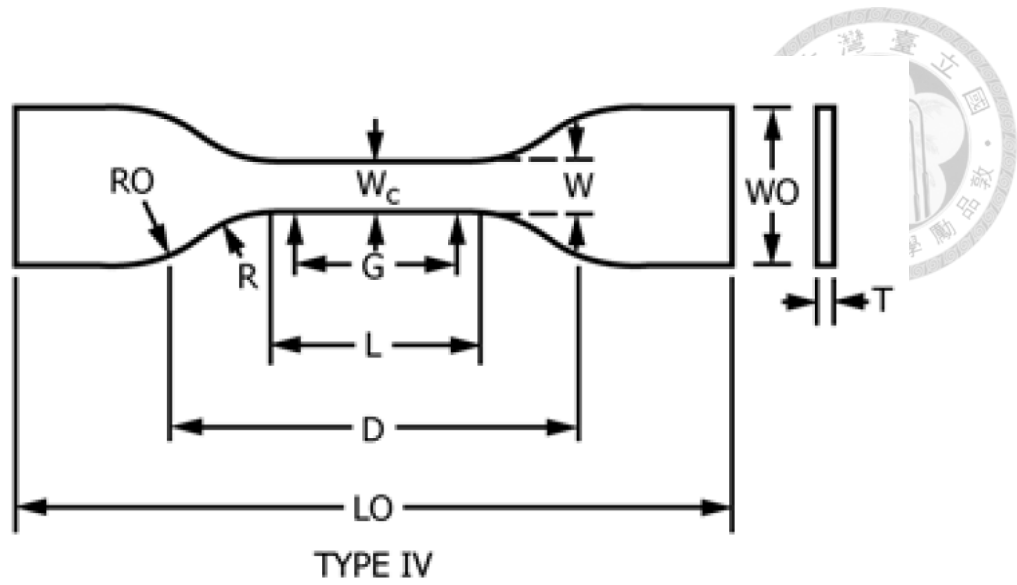


圖 5 - 5 ASTM D638 Type IV 規格圖(取自 ASTM D638 規範文件)

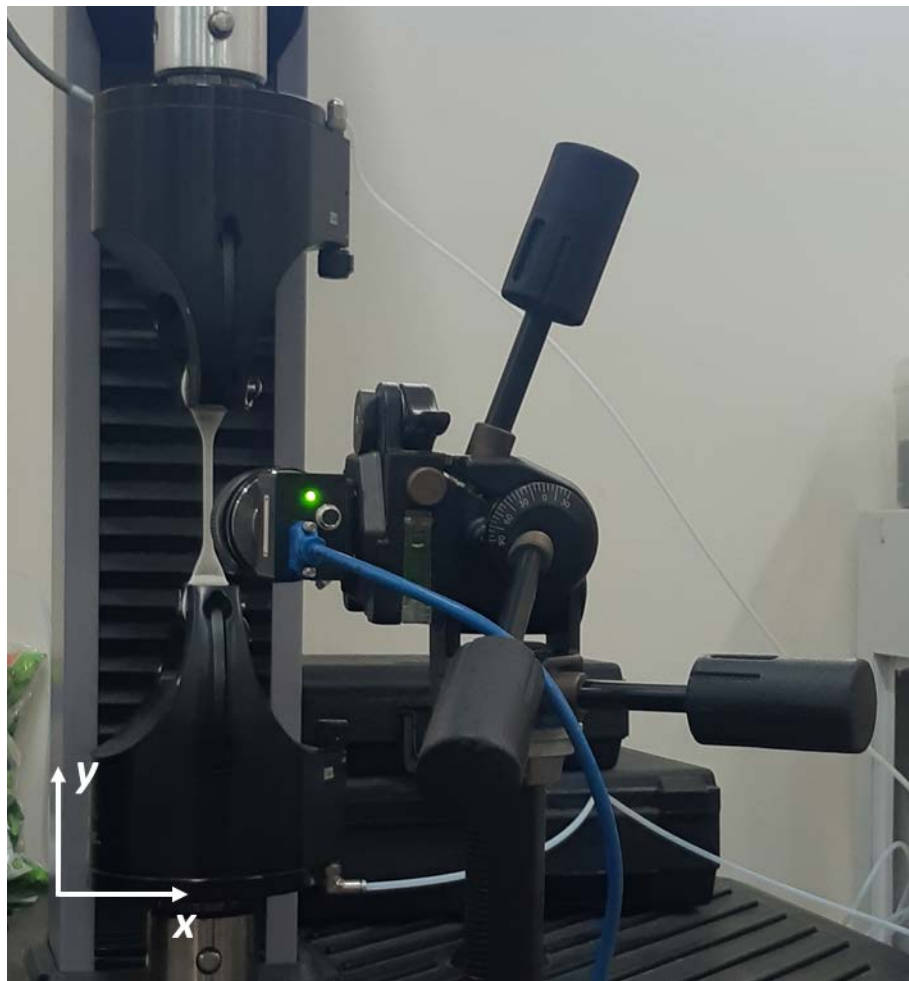


圖 5 - 6 橡膠試片拉伸試驗架設圖

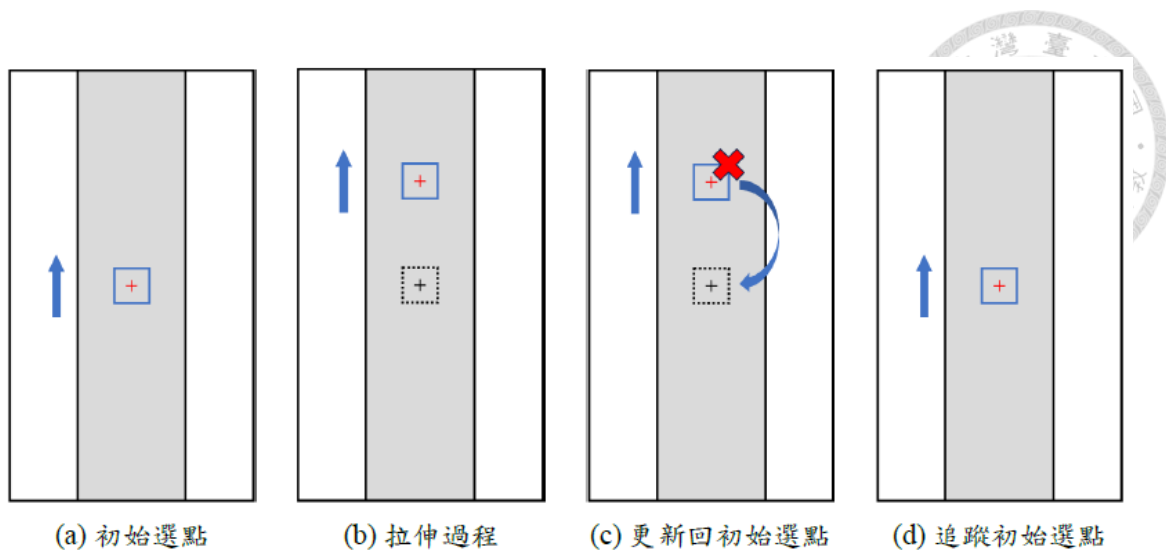


圖 5 - 7 樣板更新法示意圖

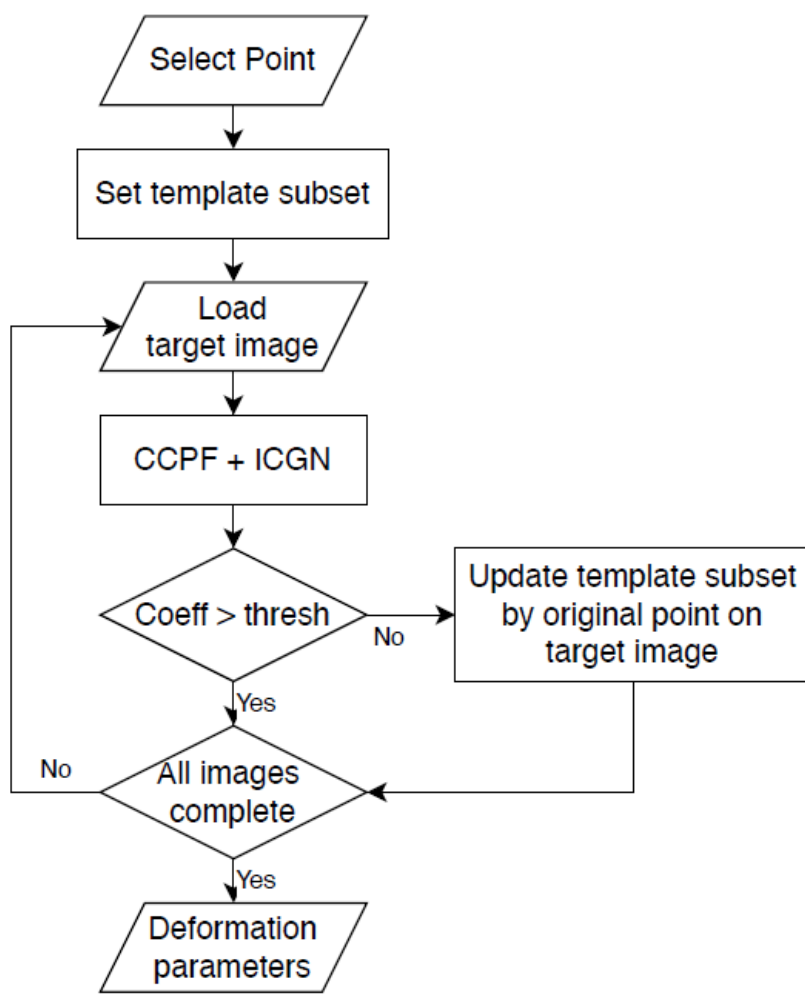


圖 5 - 8 樣板更新法流程圖

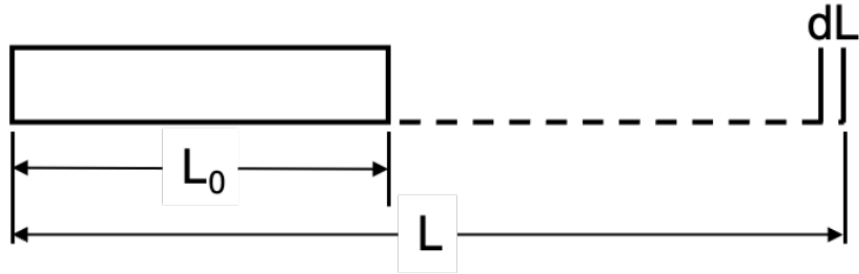


圖 5 - 9 真實應變示意圖

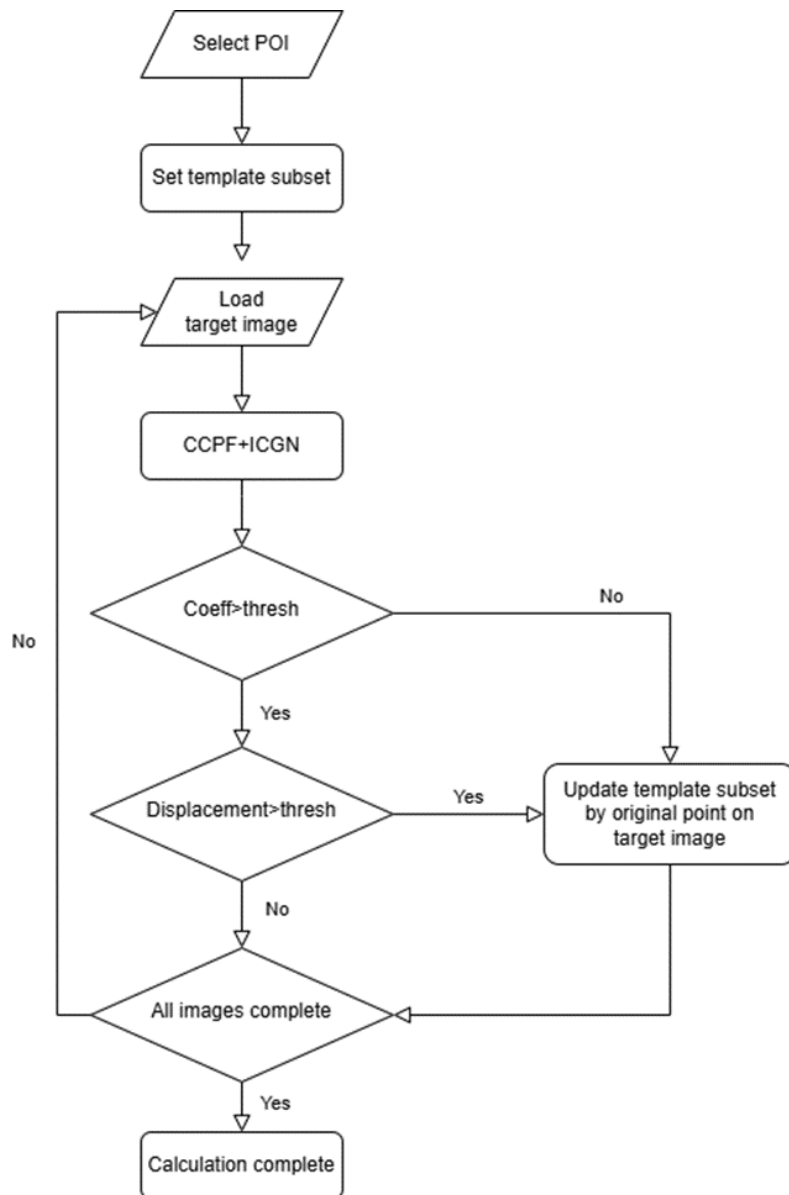


圖 5 - 10 雙閾值樣板更新流程圖

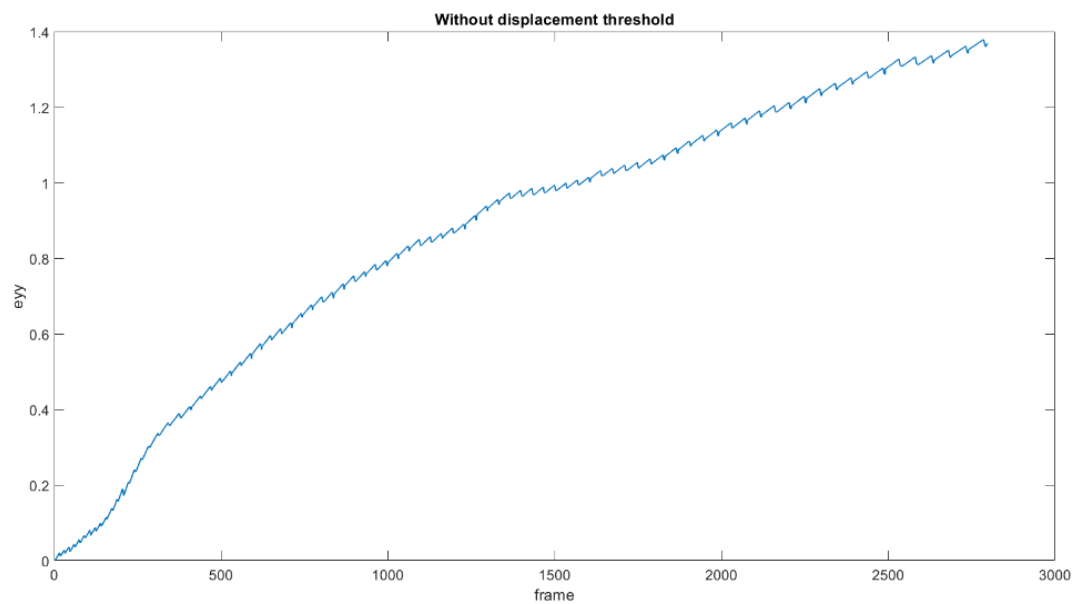


圖 5 - 11 未使用雙閾值樣板更新應變量測結果

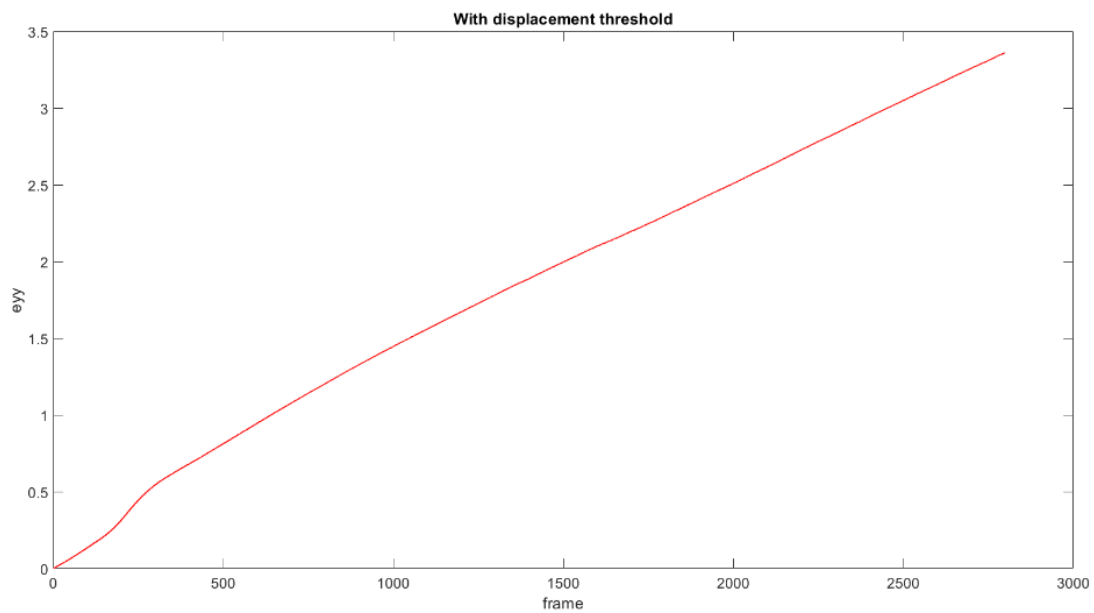


圖 5 - 12 使用雙閾值樣板更新後應變量測結果

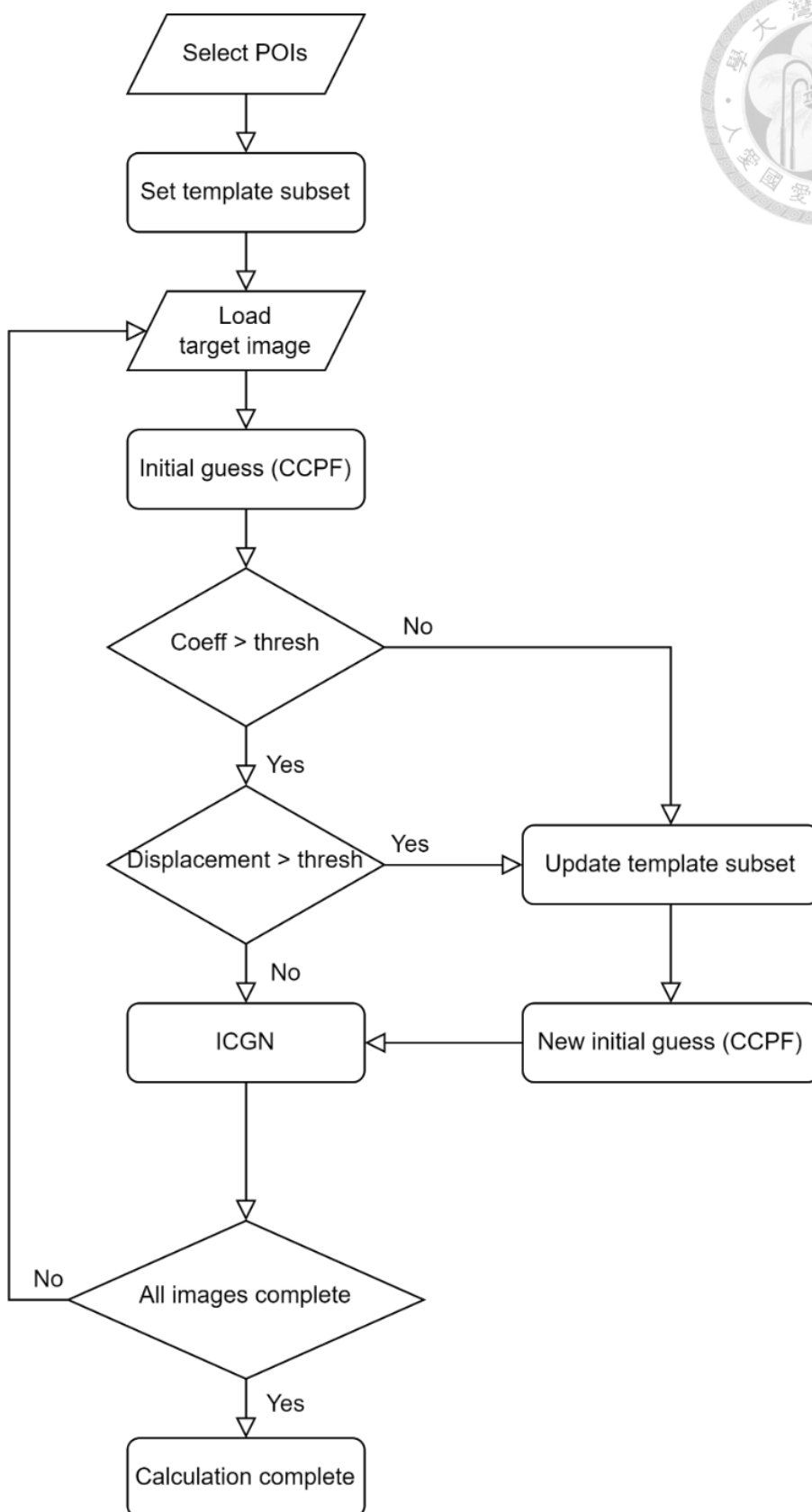


圖 5 - 13 重設初始猜值流程圖

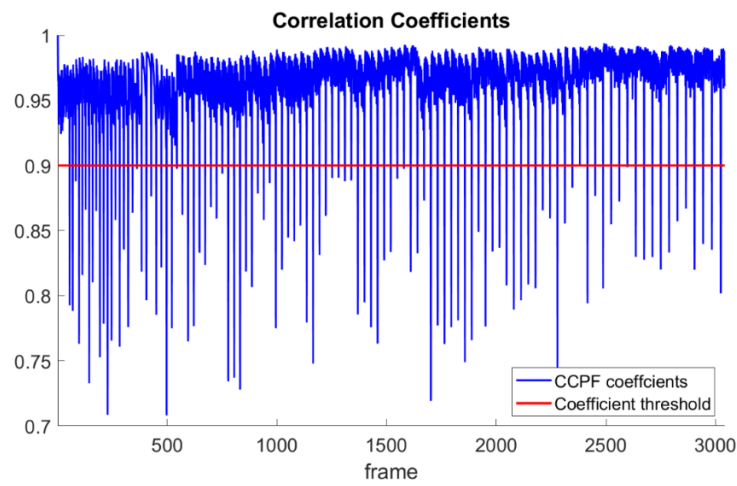
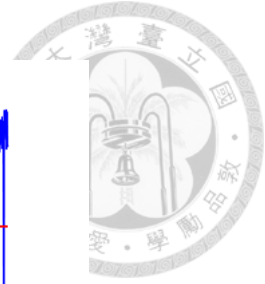


圖 5 - 14 未使用重設初始猜值相關係數波動

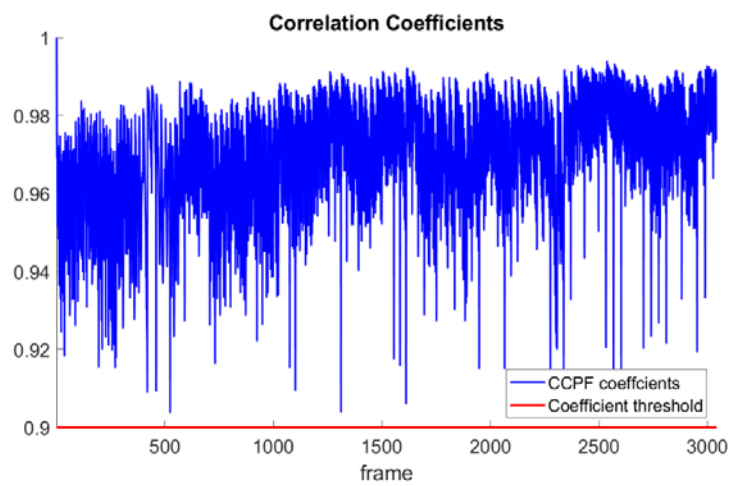


圖 5 - 15 使用重設初始猜值相關線數波動

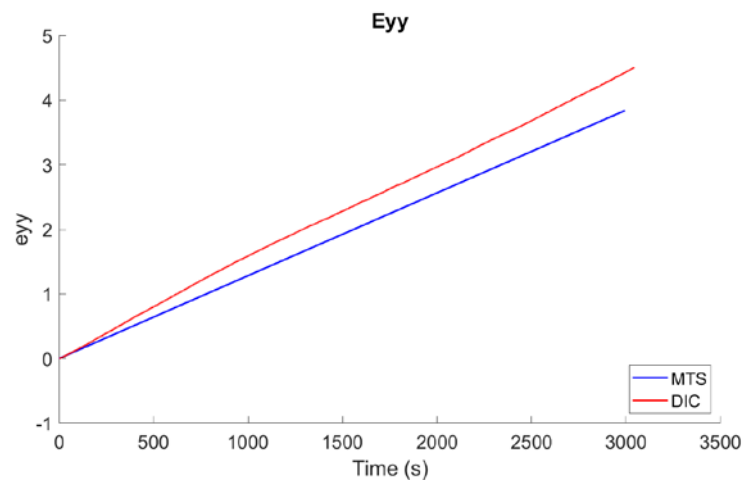


圖 5 - 16 未使用重設初始猜值應變量測結果

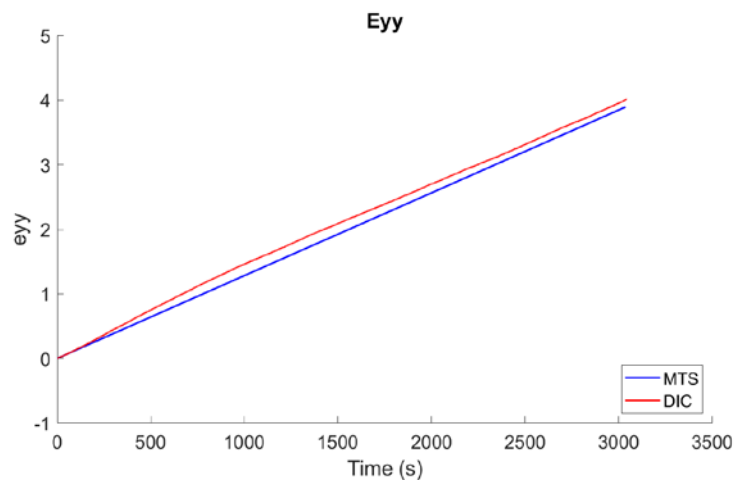


圖 5 - 17 使用重設初始猜值後應變量測結果

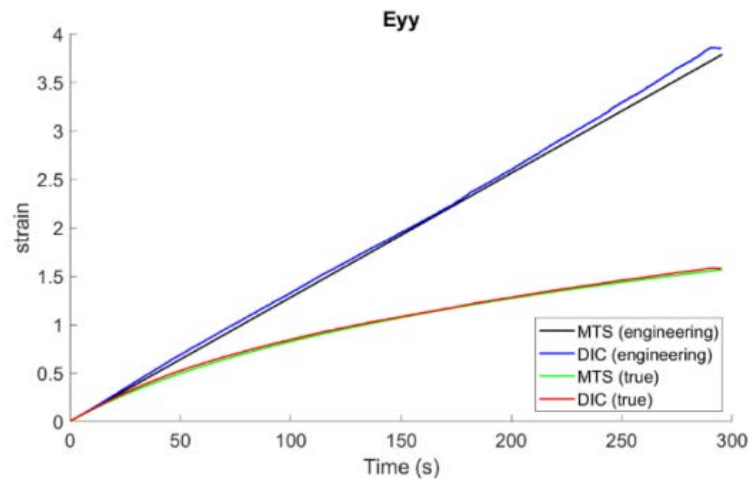


圖 5 - 18 標準 30 試片拉伸試驗軸向應變

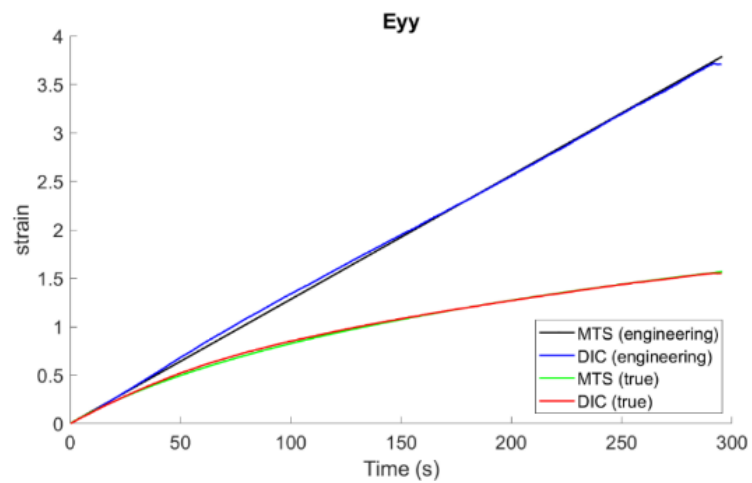


圖 5 - 19 標準 40 試片拉伸試驗軸向應變

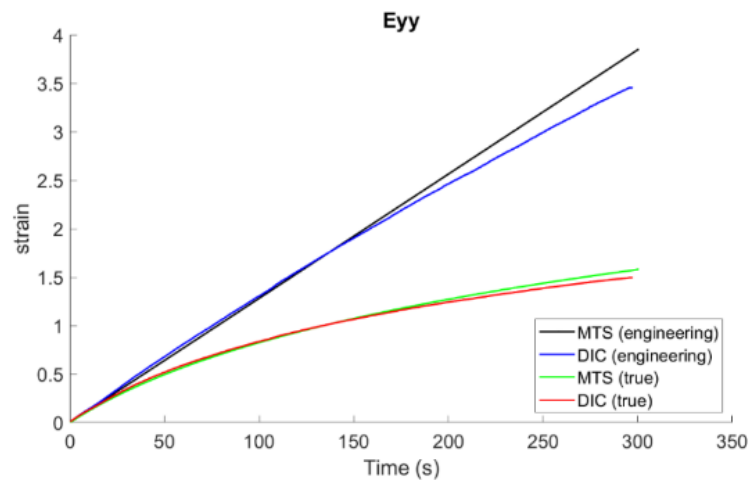


圖 5 - 20 標準 50 試片拉伸試驗軸向應變

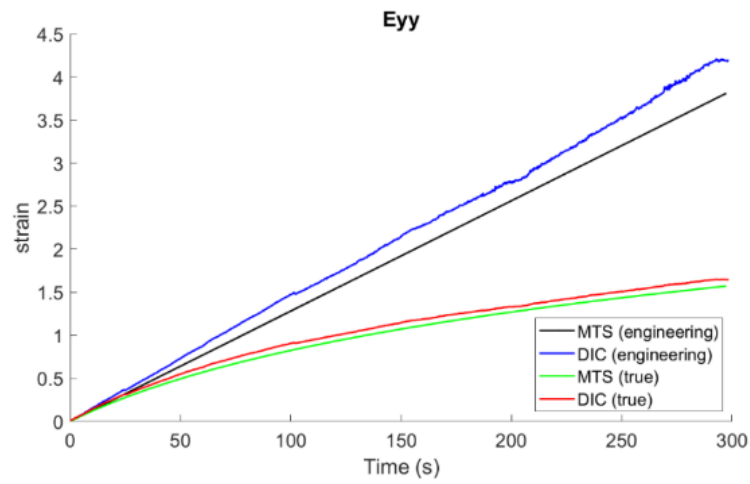


圖 5 - 21 發泡 30 試片拉伸試驗軸向應變

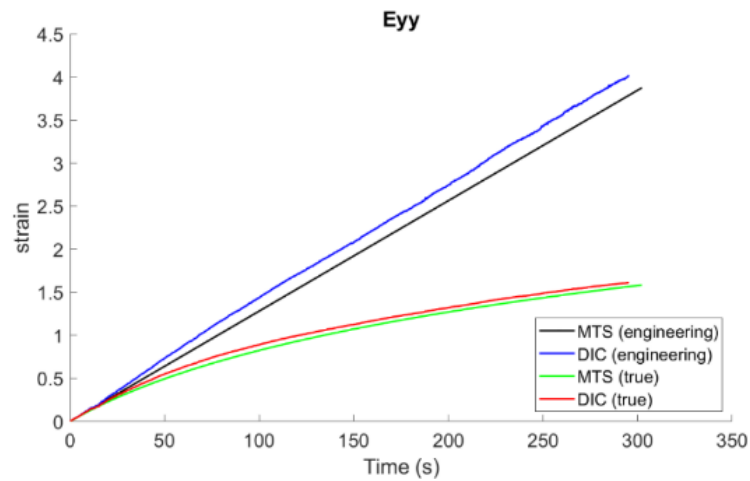


圖 5 - 22 發泡 40 試片拉伸試驗軸向應變

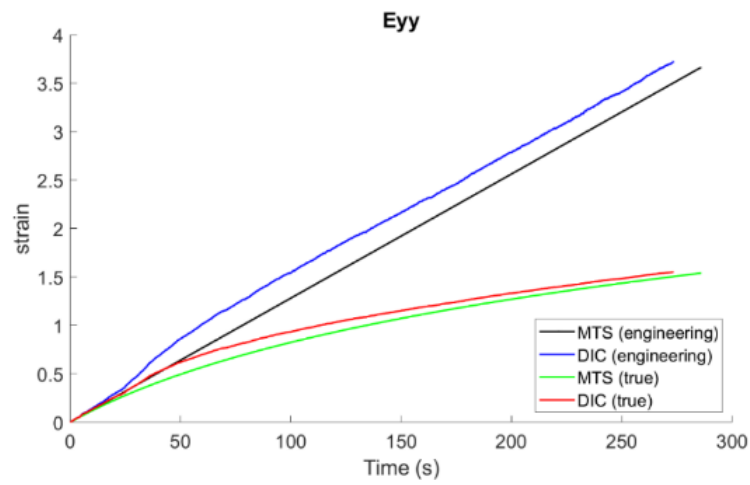


圖 5 - 23 發泡 50 試片拉伸試驗軸向應變

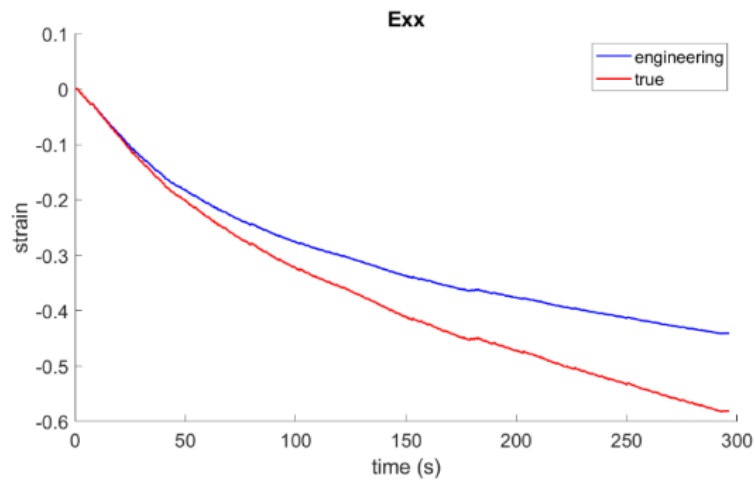


圖 5 - 24 標準 30 試片拉伸試驗橫向應變

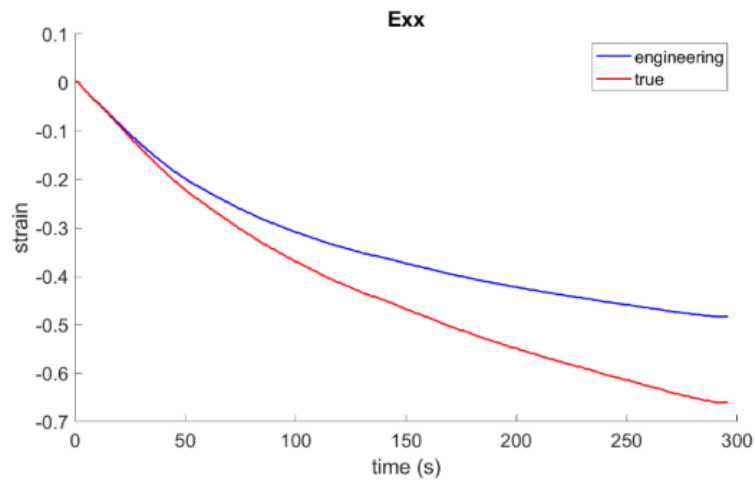


圖 5 - 25 標準 40 試片拉伸試驗橫向應變

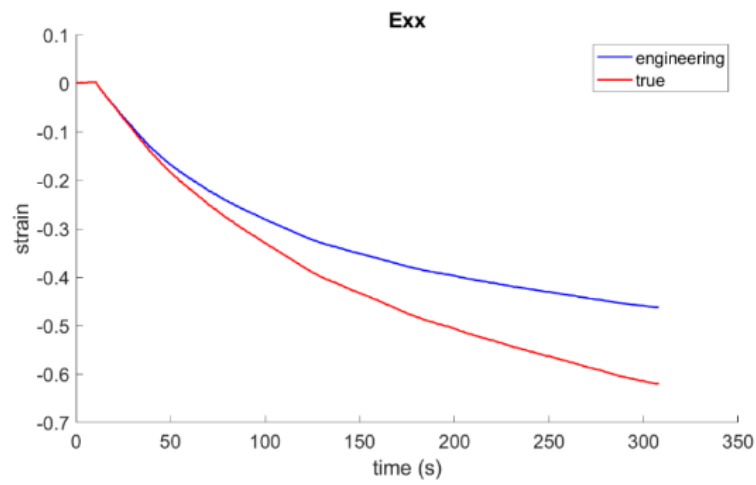


圖 5 - 26 標準 50 試片拉伸試驗橫向應變

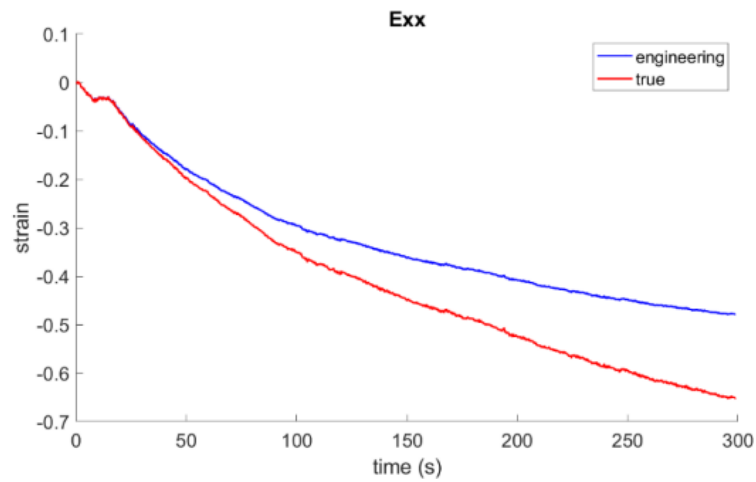


圖 5 - 27 發泡 30 試片拉伸試驗橫向應變

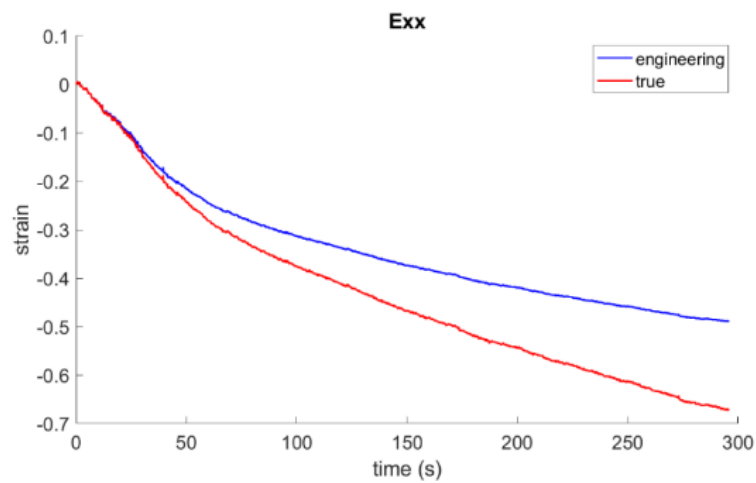


圖 5 - 28 發泡 40 試片拉伸試驗橫向應變

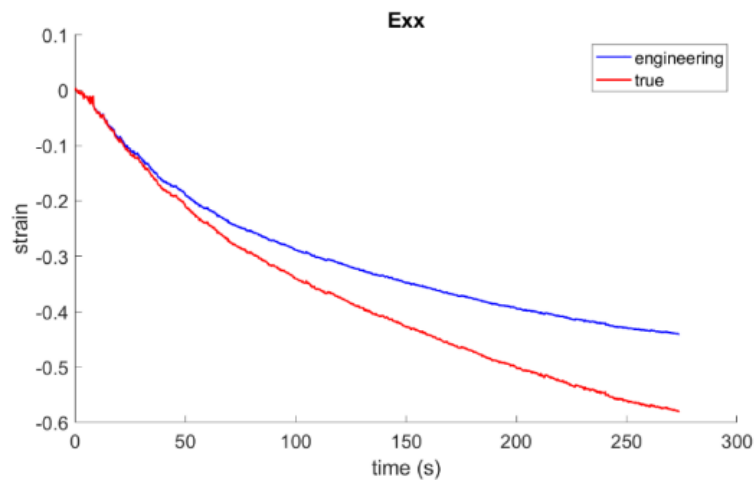


圖 5 - 29 發泡 50 試片拉伸試驗橫向應變

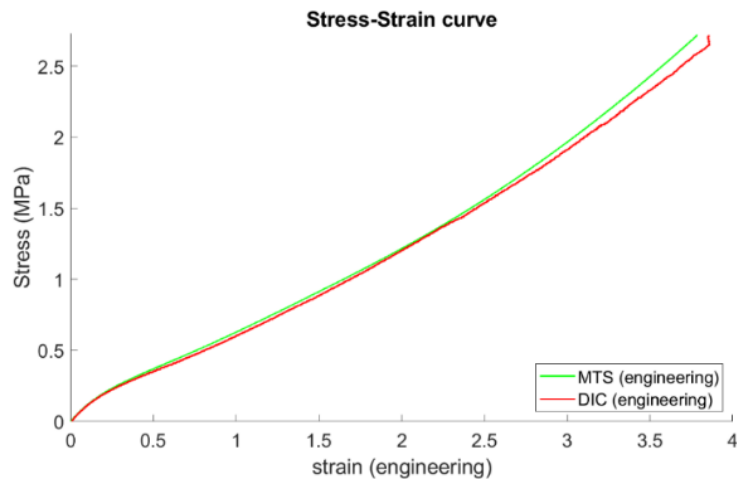


圖 5 - 30 標準 30 試片拉伸試驗應力-應變曲線

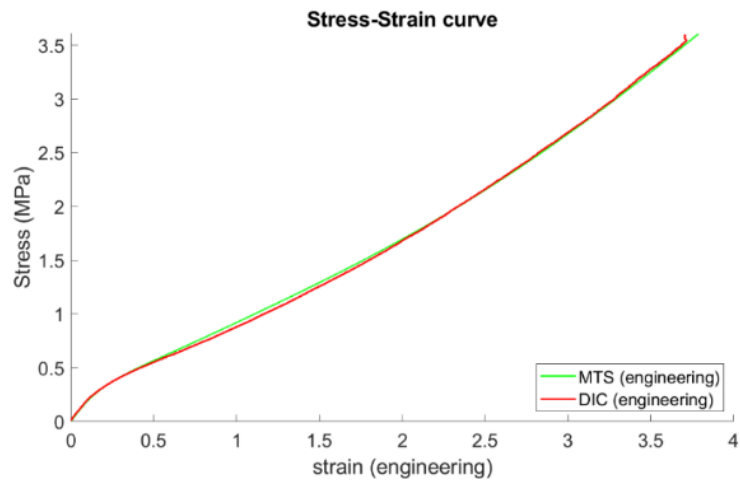


圖 5 - 31 標準 40 試片拉伸試驗應力-應變曲線

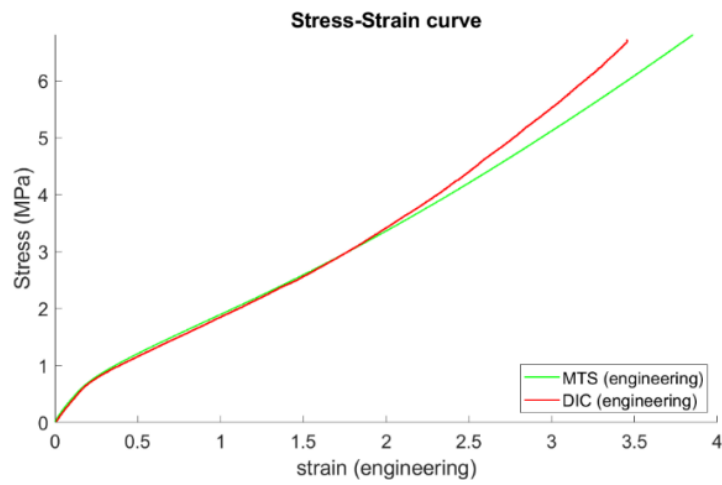


圖 5 - 32 標準 50 試片拉伸試驗應力-應變曲線

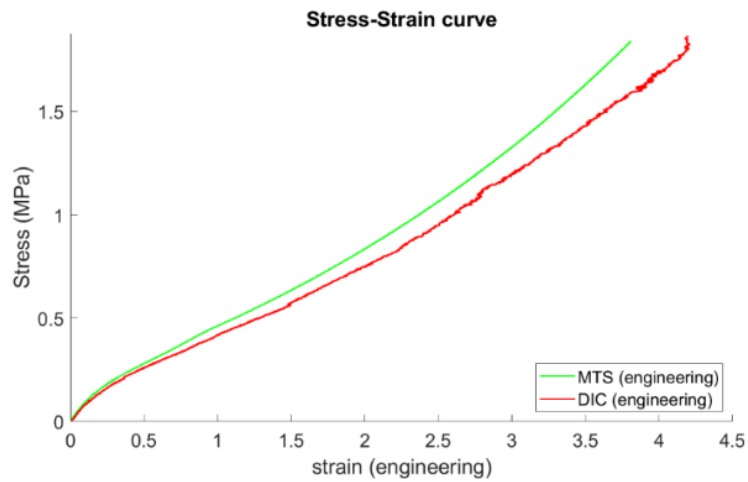


圖 5 - 33 發泡 30 試片拉伸試驗應力-應變曲線

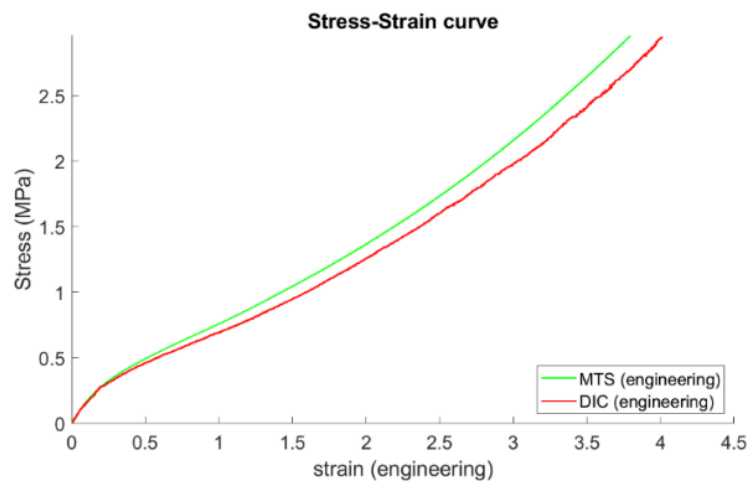


圖 5 - 34 發泡 40 試片拉伸試驗應力-應變曲線

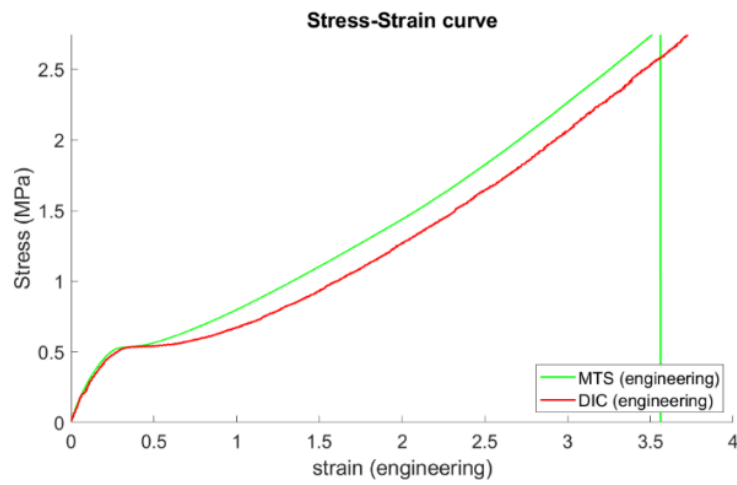


圖 5 - 35 發泡 50 試片拉伸試驗應力-應變曲線

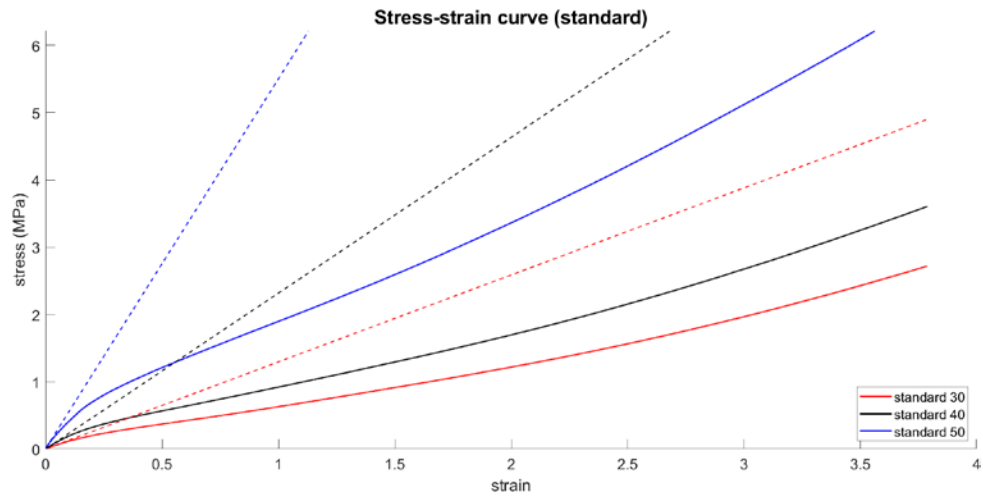


圖 5 - 36 標準試片應力-應變曲線及線性段擬合結果

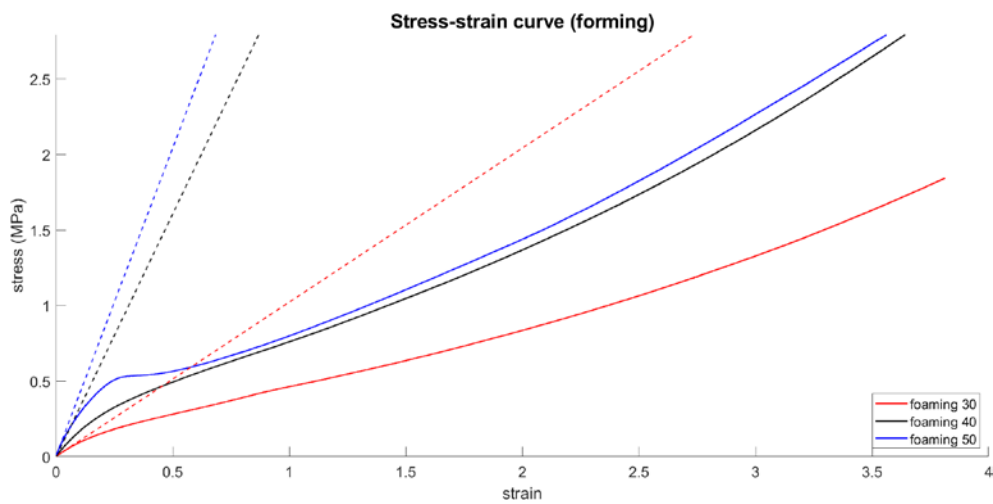


圖 5 - 37 發泡試片應力-應變曲線及線性段擬合結果

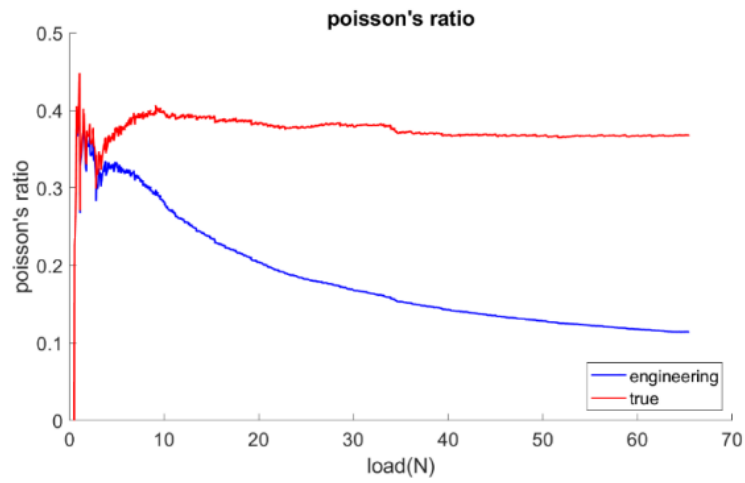


圖 5 - 38 標準 30 蒲松比直接計算結果

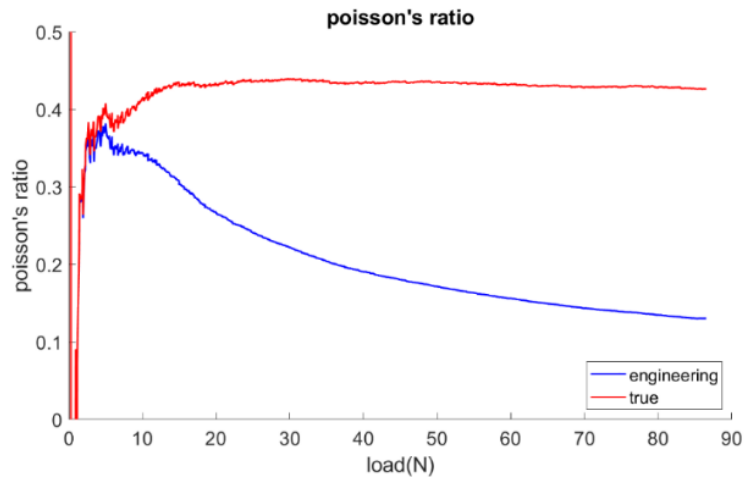


圖 5 - 39 標準 40 蒲松比直接計算結果

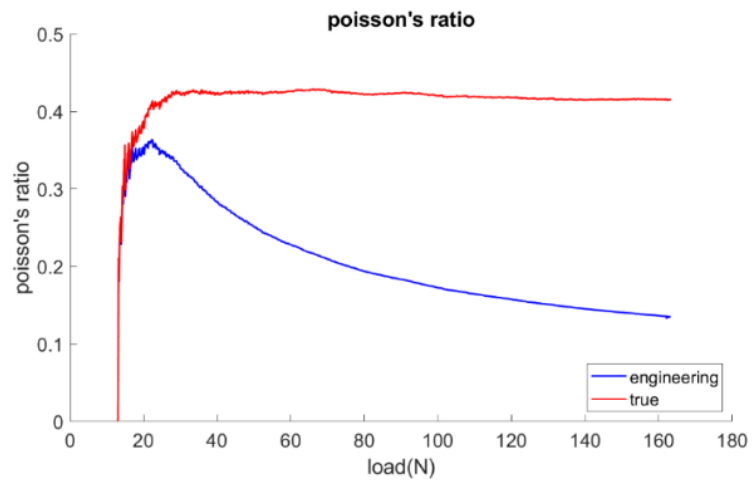


圖 5 - 40 標準 50 蒲松比直接計算結果

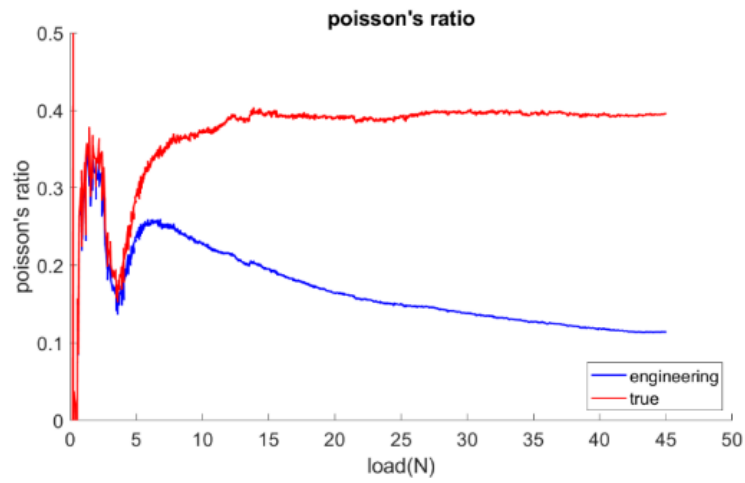


圖 5 - 41 發泡 30 蒲松比直接計算結果

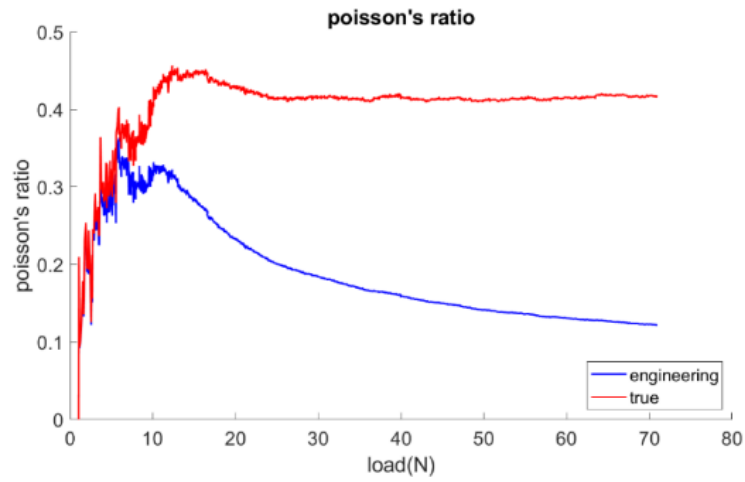


圖 5 - 42 發泡 40 蒲松比直接計算結果

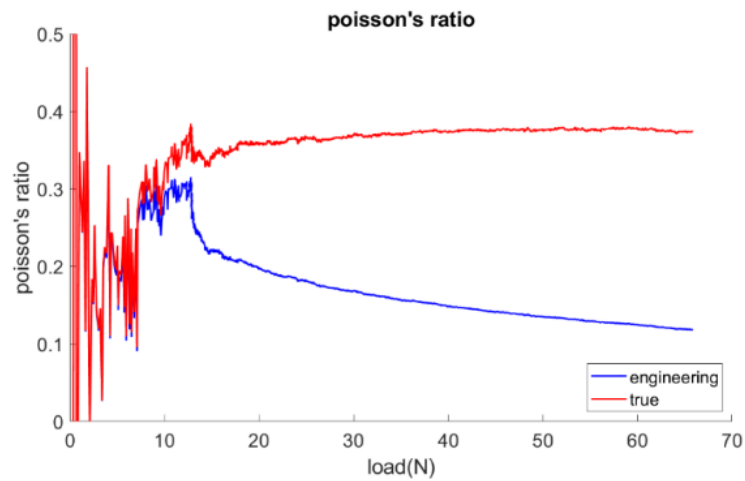


圖 5 - 43 發泡 50 蒲松比直接計算結果

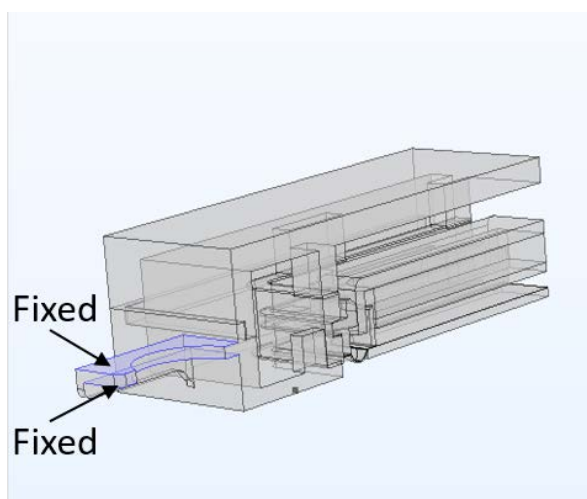


圖 5 - 44 C 型扣環邊界條件設定圖

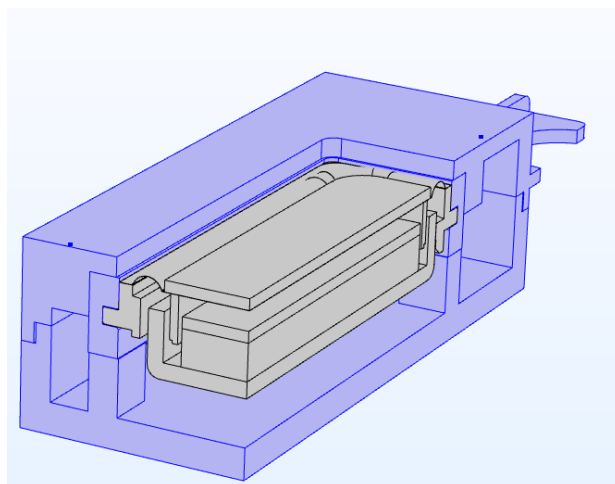


圖 5 - 45 聯合體 1 設定圖

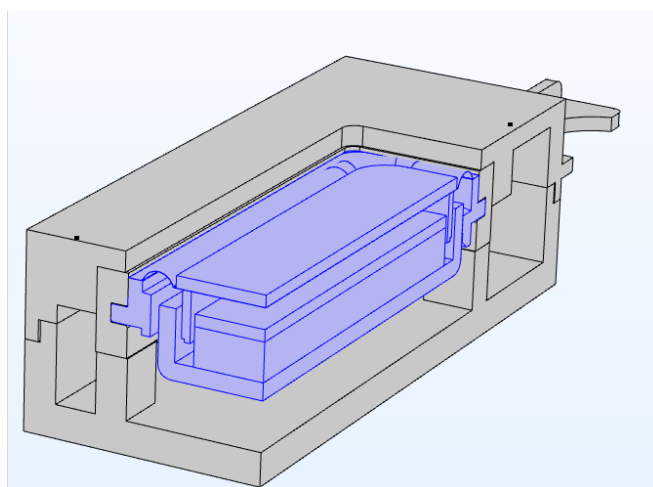


圖 5 - 46 聯合體 2 設定圖

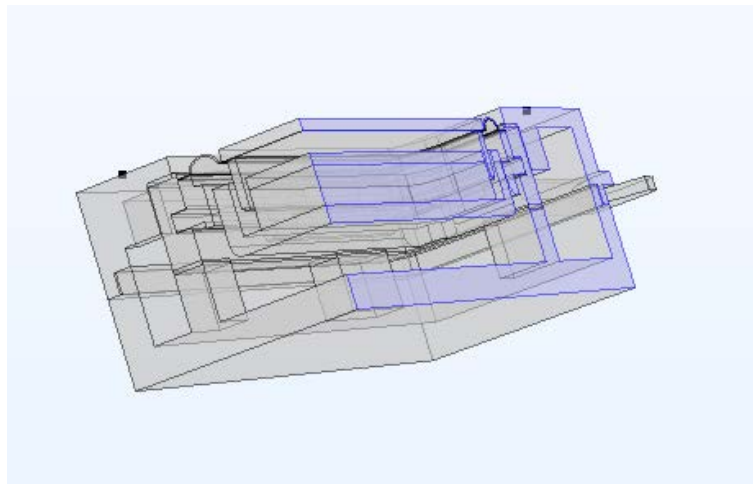


圖 5 - 47 對稱條件 1 設定圖

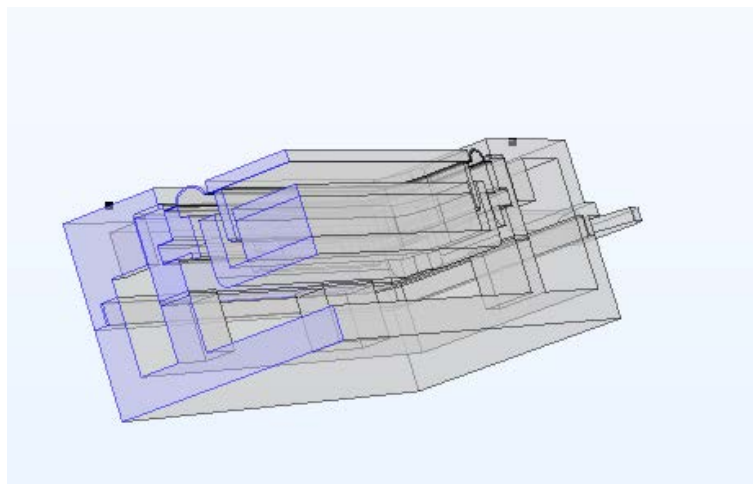


圖 5 - 48 對稱條件 2 設定圖

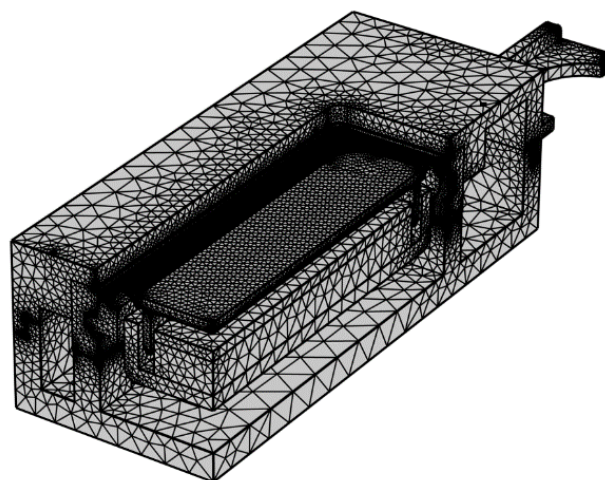


圖 5 - 49 揚聲器有限元素模型網格

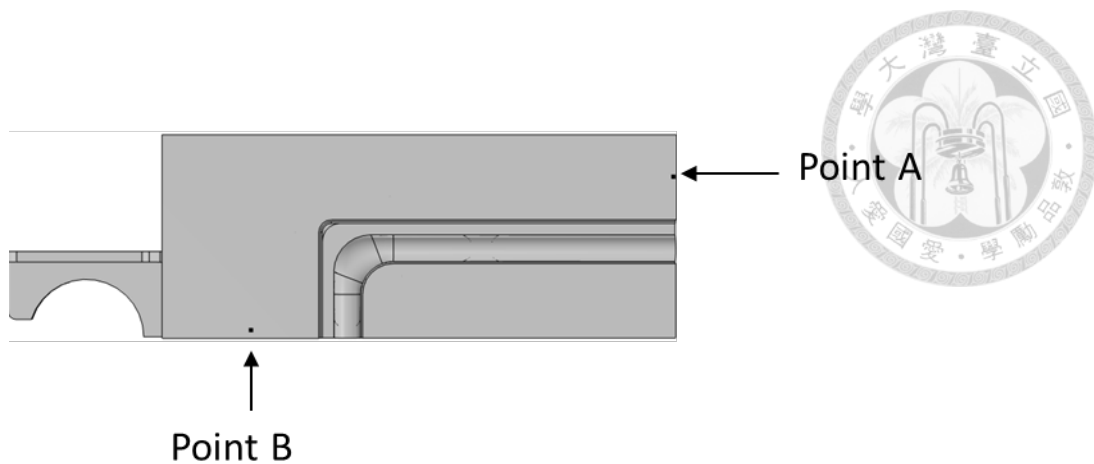


圖 5 - 50 振動分析點位置

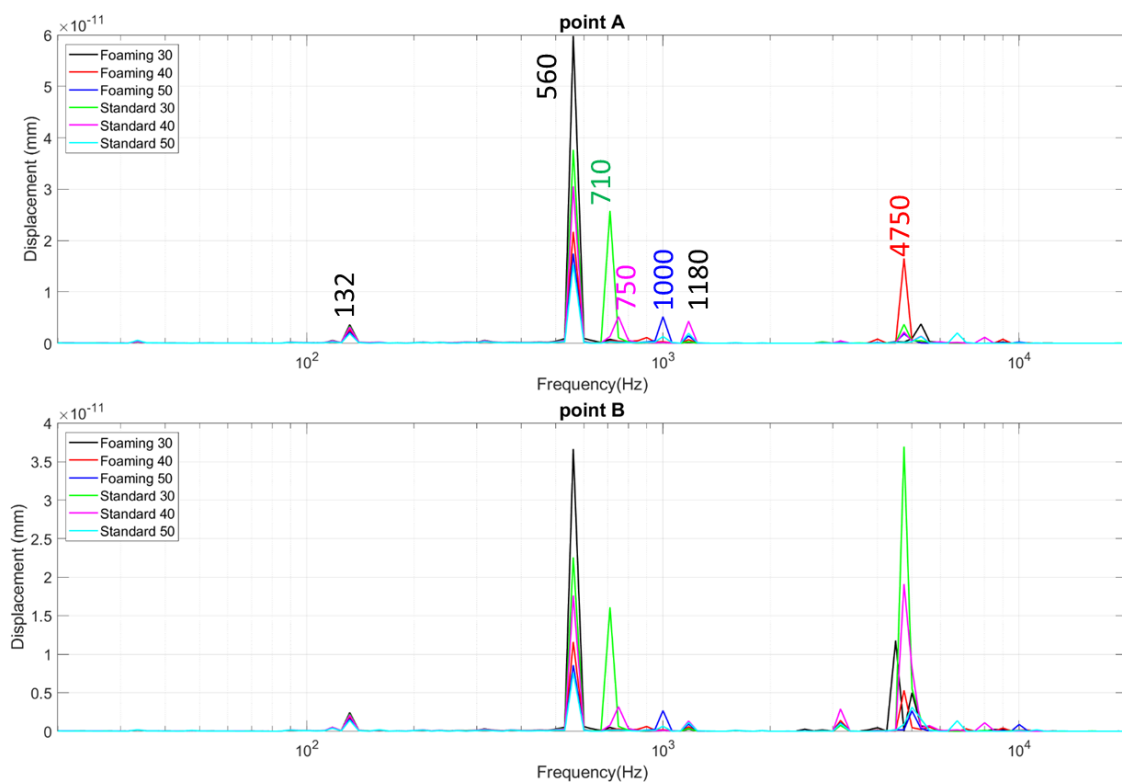


圖 5 - 51 揚聲器有限元素分析振動位移結果

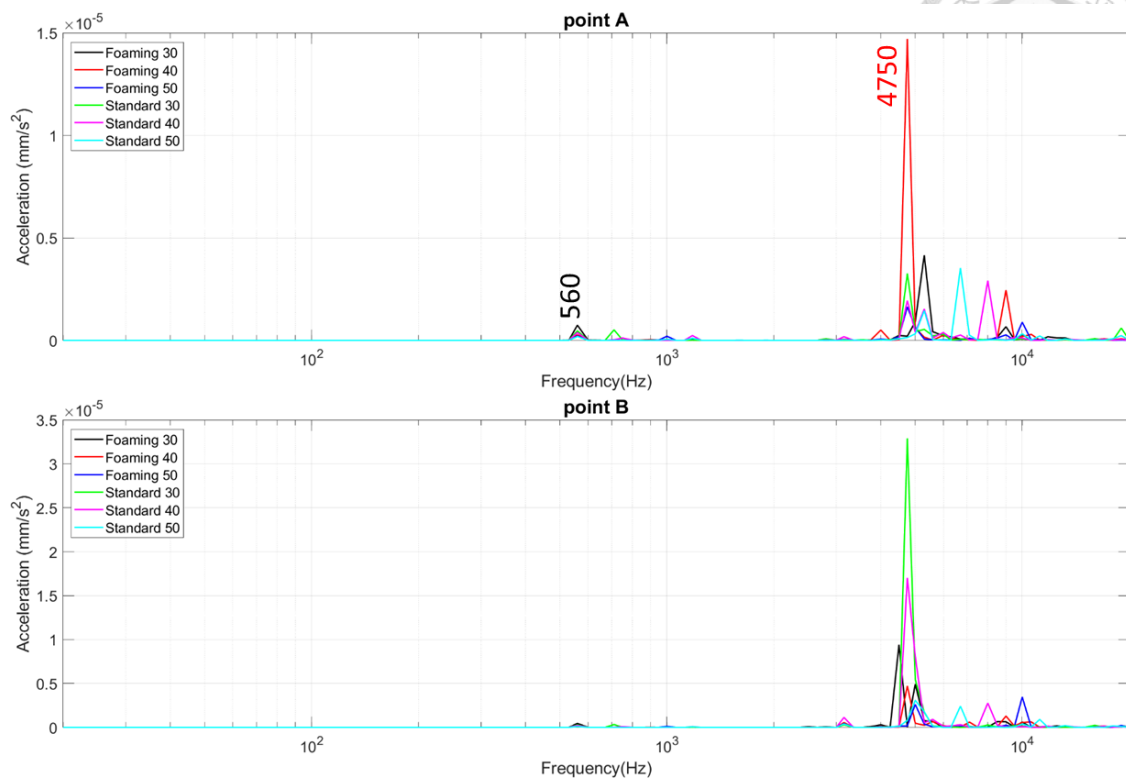


圖 5 - 52 揚聲器有限元素分析振動加速度結果

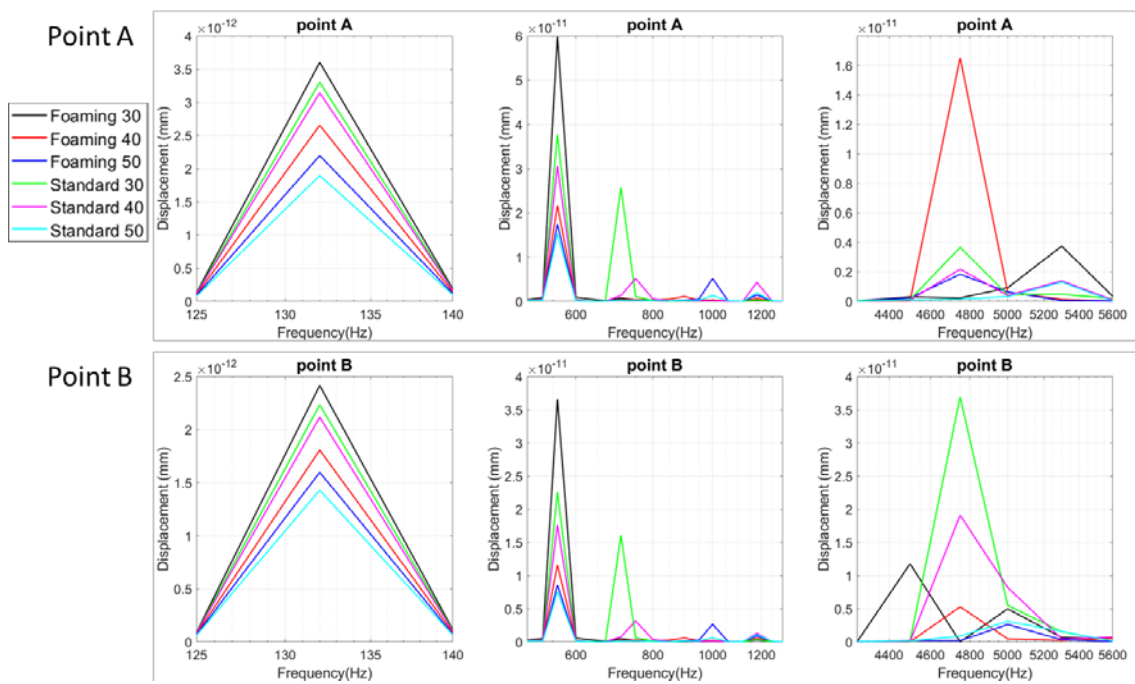


圖 5 - 53 揚聲器有限元素分析振動位移量值比較

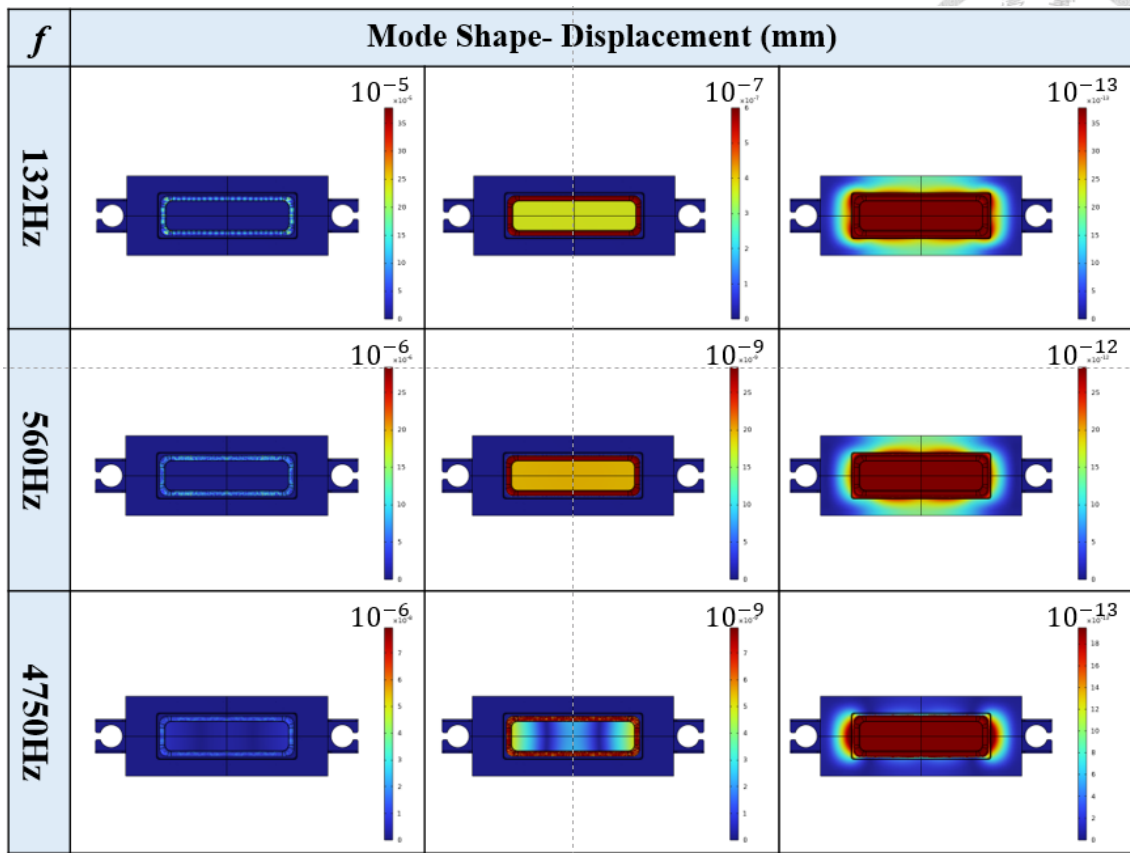


圖 5 - 54 揚聲器共振模態結果

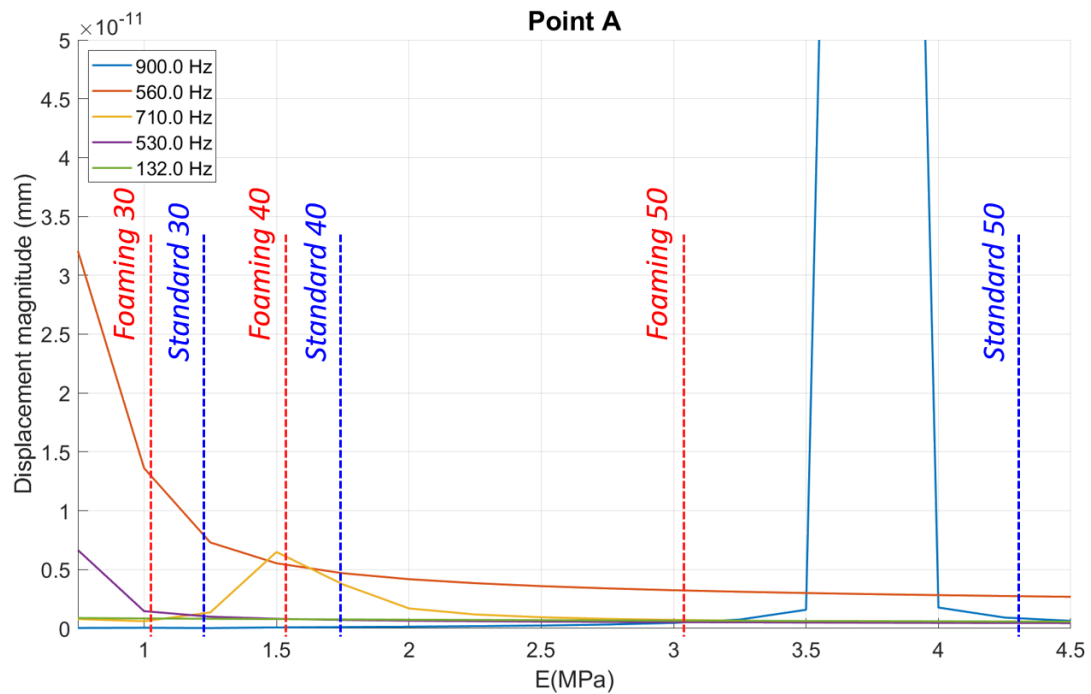


圖 5 - 55 參數化掃描結果-A 點位移

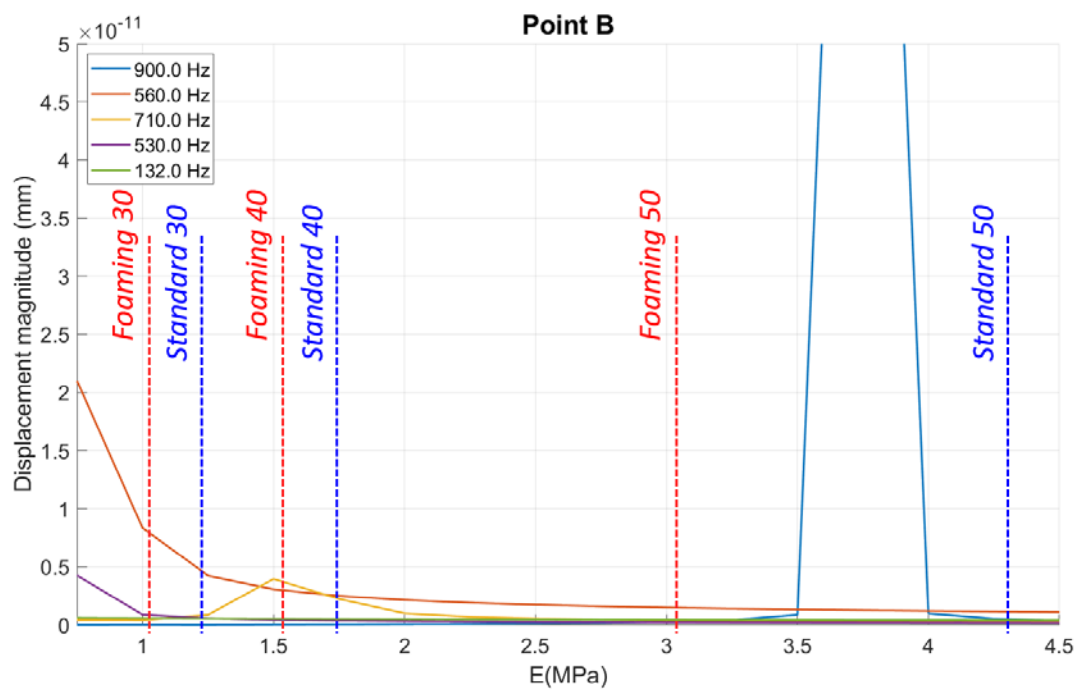


圖 5 - 56 參數化掃描結果-B 點位移

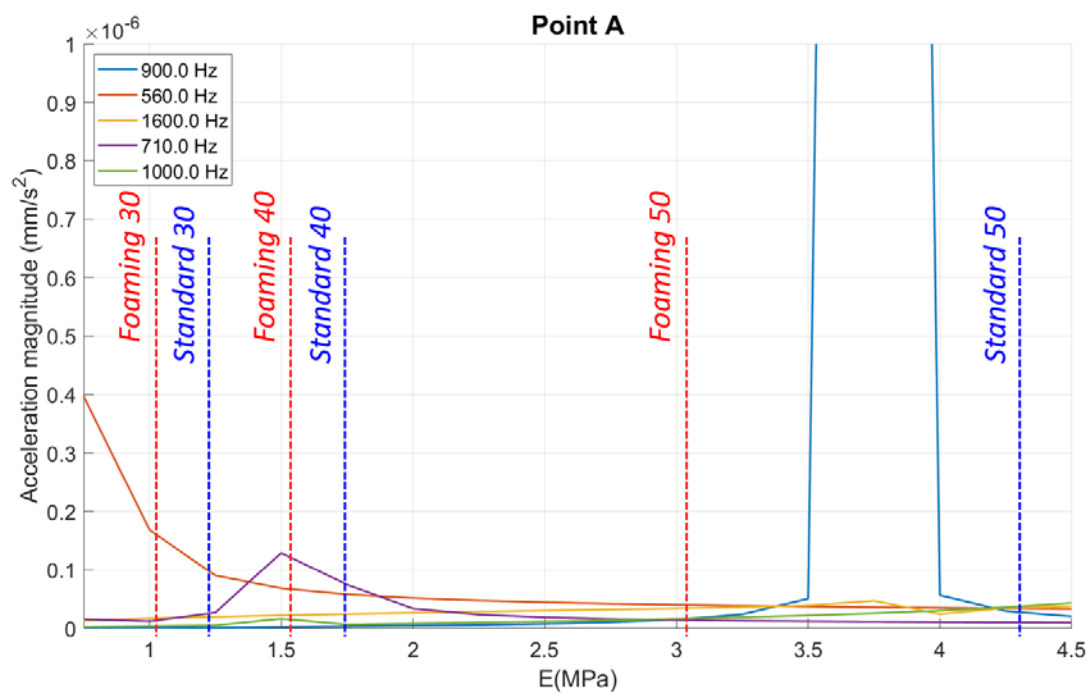


圖 5 - 57 參數化掃描結果-A 點加速度

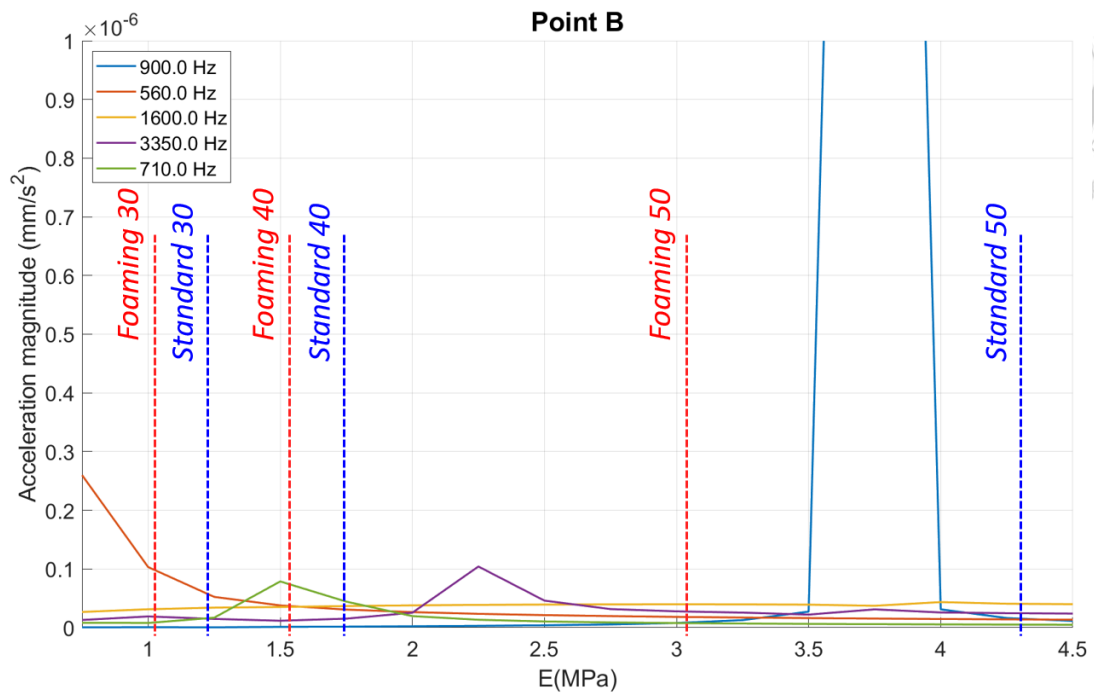


圖 5 - 58 參數化掃描結果-B 點加速度

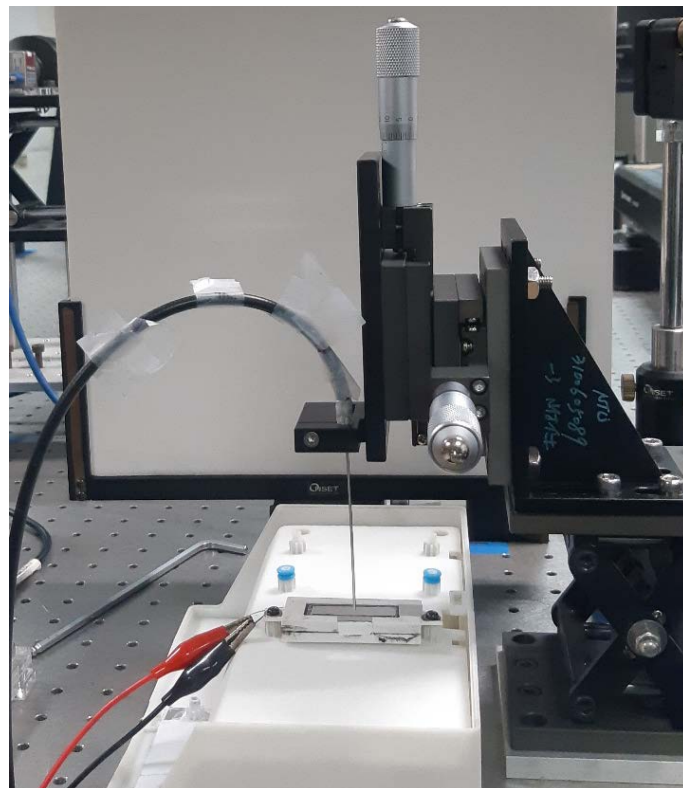


圖 5 - 59 揚聲器單點振動位移驗證實驗架設- 光纖位移計

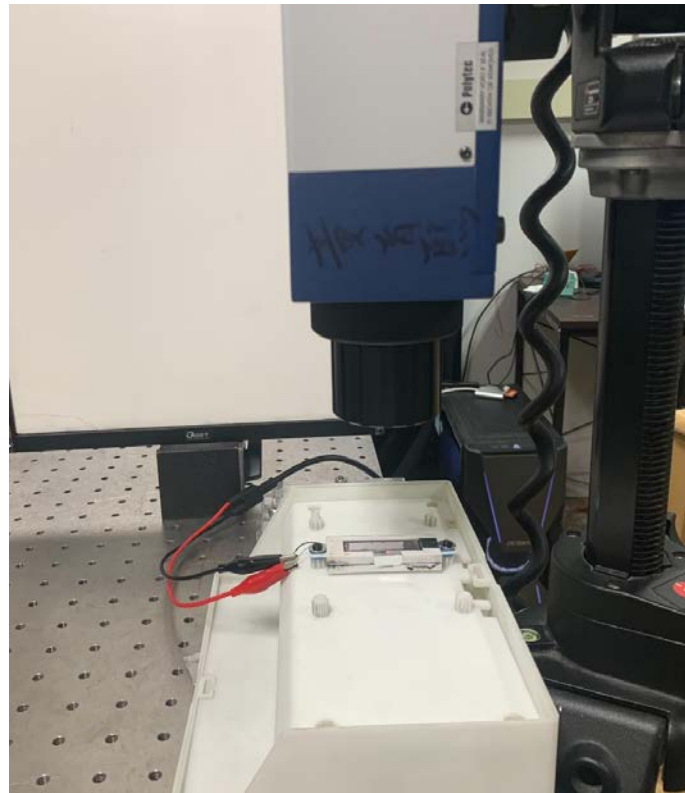


圖 5 - 60 揚聲器單點振動位移驗證實驗架設- 雷射都卜勒測振儀

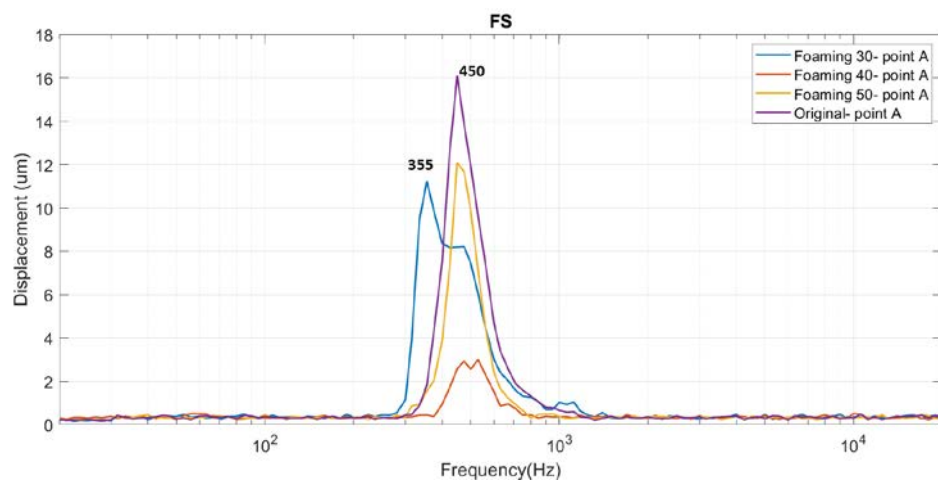


圖 5 - 61 光纖位移計揚聲器單點振動位移量測結果- A 點

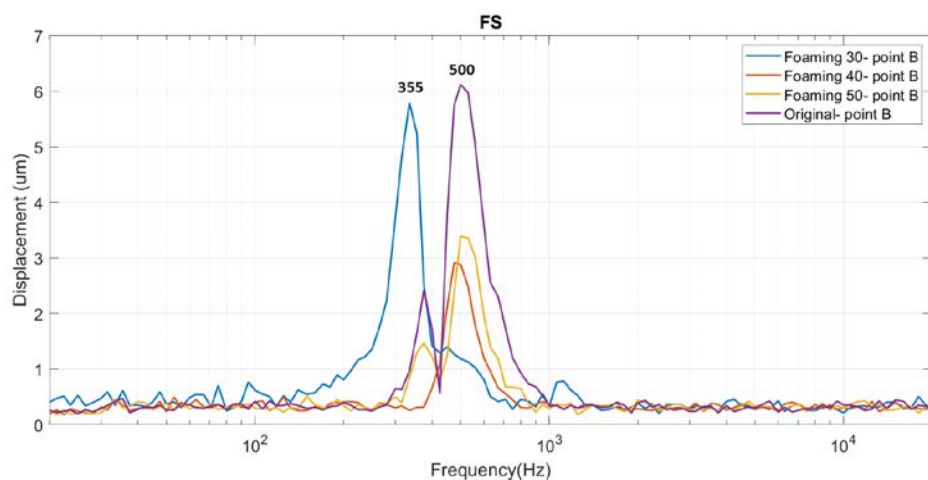


圖 5 - 62 光纖位移計揚聲器單點振動位移量測結果- B 點

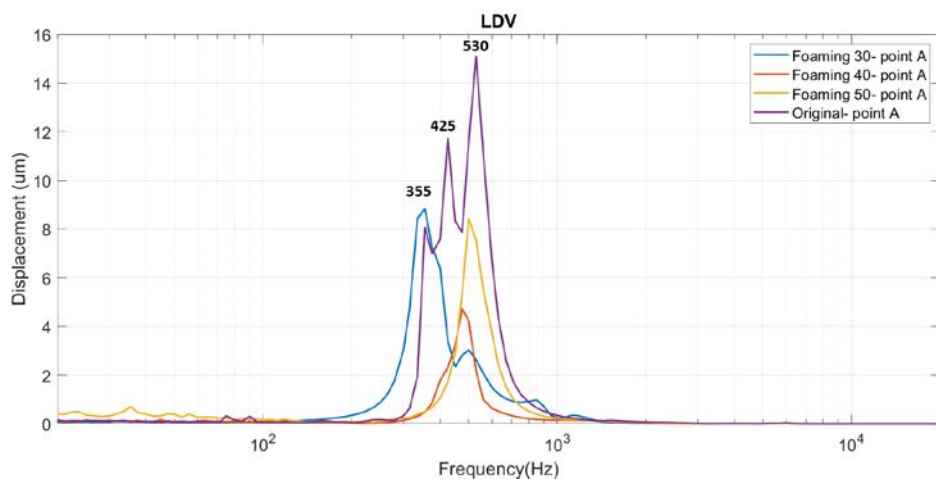


圖 5 - 63 雷射都卜勒測振儀揚聲器單點振動位移量測結果- A 點

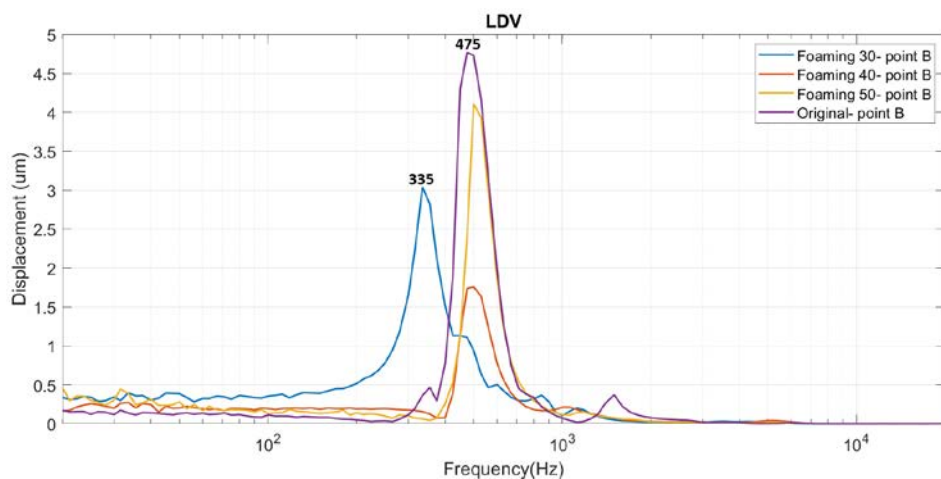


圖 5 - 64 雷射都卜勒測振儀揚聲器單點振動位移量測結果- B 點

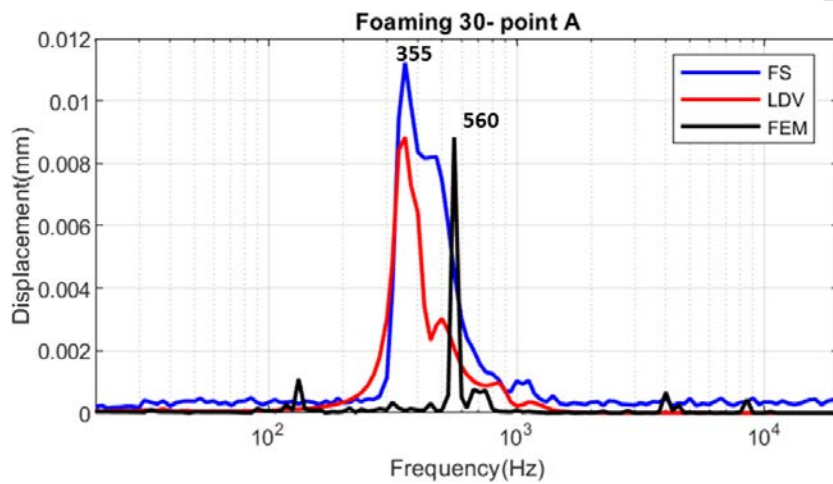


圖 5 - 65 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 30 A 點

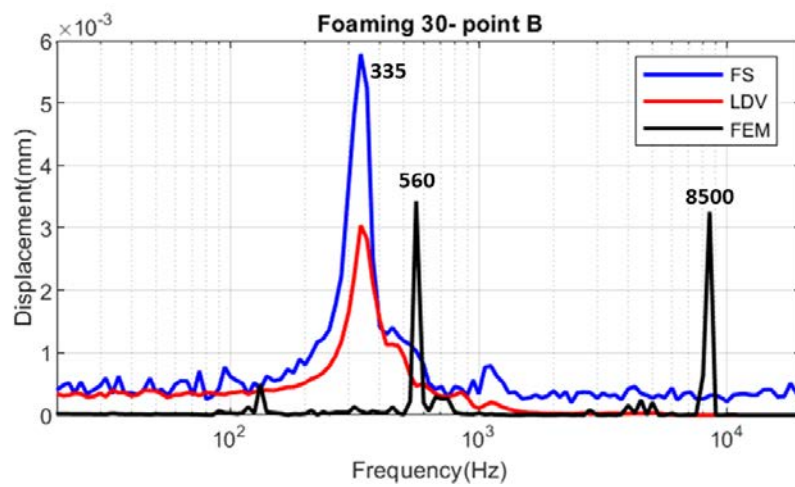


圖 5 - 66 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 30 B 點

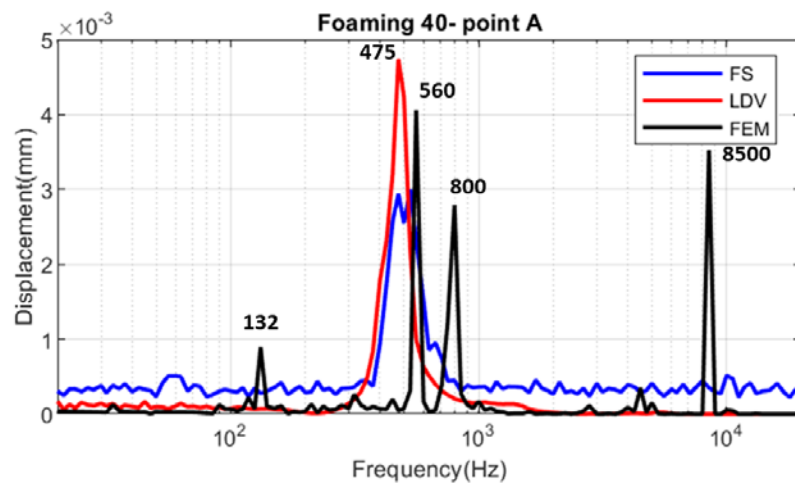


圖 5 - 67 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 40 A 點



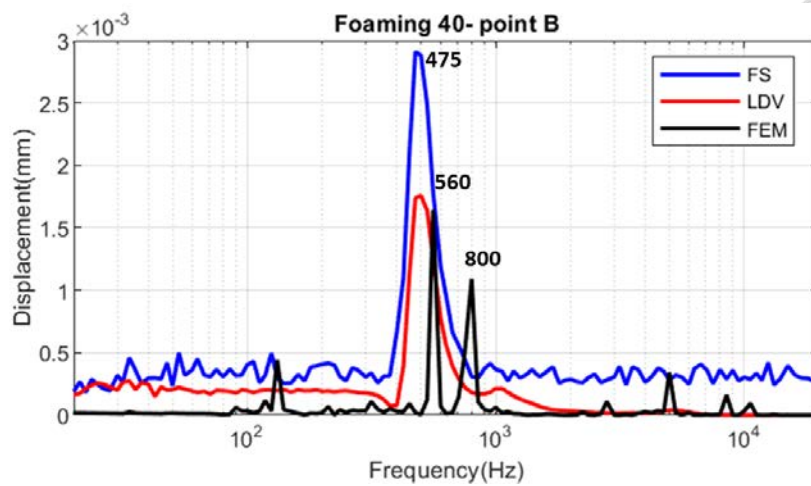


圖 5 - 68 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 40 B 點

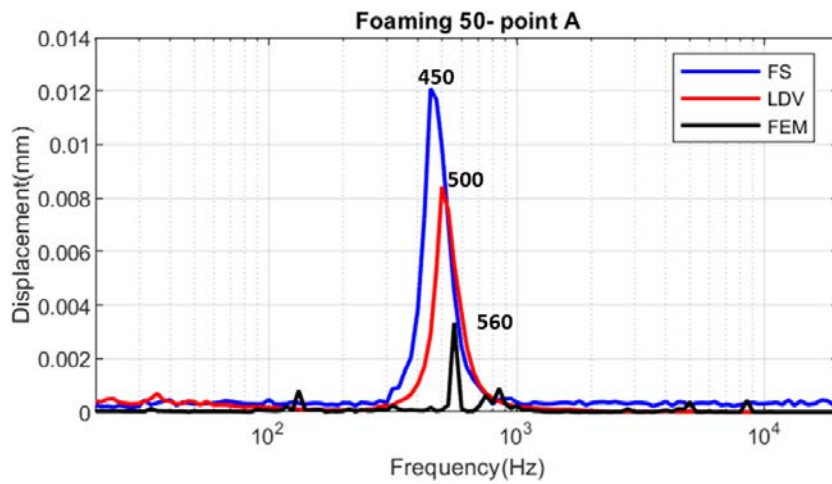


圖 5 - 69 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 50 A 點

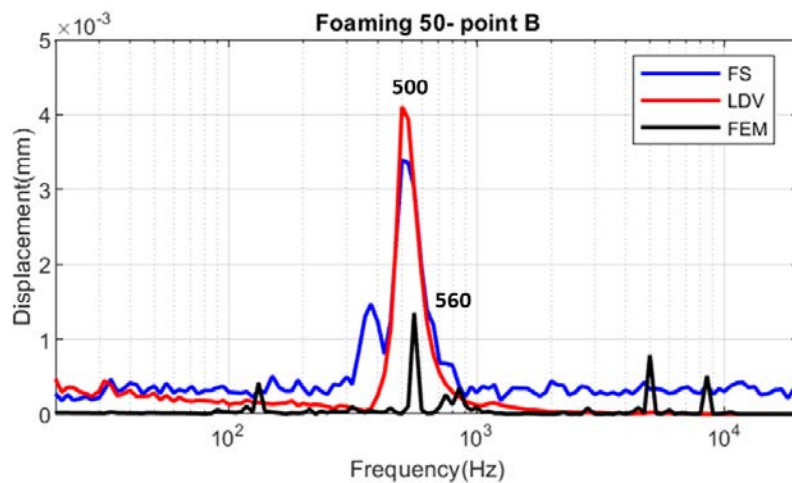


圖 5 - 70 揚聲器振動分析結果驗證- 發泡 50 B 點

第六章 結論與未來展望



本論文以數位影像相關法為核心，針對實驗中的便利性及量測誤差問題進行改良，並應用至動態及全場量測的實驗，在風力發電機及揚聲器減振設計等實用性問題中得到了良好的實驗結果。本章將歸納本論文各章節之成果，並提出未來能進一步探討或改善的方向。

6.1 結論

本論文第二章簡介了數位影像相關法的量測流程及基礎理論，並介紹專有名詞定義、整像素搜尋演算法、次像素搜尋演算法、二維及三維數位影像相關法。由數位影像相關法的理論基礎出發，解釋在影像中對待測物進行追蹤，並轉換為世界座標的量測流程。最後介紹本論文實驗使用的各種設備之規格及運作原理。

本論文第三章著重於提升數位影像相關法於全場量測上的表現。首先簡述本實驗室過去針對全場量測開發的方法及其優勢與問題，並針對選點誤差及佈點自由度兩個方面分別提出誤差點篩選及引入 Distmesh 建立三角形網格進行改善。其中對於均勻四邊形網格全場選點，使用誤差點篩選在懸臂板靜態位移實驗及風機葉片形貌重建實驗中能有效改善選點結果不佳造成的誤差。第二部分中，首先介紹 Distmesh 演算法，再將該方法與本實驗室之全場選點方法結合，同時修改逐點最小平方法及誤差點篩選法使其能應用於 Distmesh 產生的全場選點。最後透過 SEM Challenge 中的圓孔試片拉伸試驗影像、3D 列印試片拉伸試驗實驗及球體形貌重建實驗驗證 Distmesh 三角形網格全場選點、配合的應變計算方法及誤差點篩選法有良好的量測精度，同時提升數位影像相關法在全場量測上的泛用性，使其能應用於各種幾何外觀的待測物。

本論文第四章為風力發電系統中關鍵結構的振動量測，其中發揮數位影像相關法在全場及動態量測上的優勢，再透過數據處理提高量測精度並進一步分析系



統之動態特性。在風機葉片單點量測實驗中，透過扣除桌面位移進行校正，數位影像相關法之結果與雷射位移計有量的對應性，同時實驗中藉由改變螺栓鎖固條件，證實能透過共振頻率的變化檢測結構的損傷。在風機葉片全場振動實驗中，透過誤差點篩選能大幅降低原始資料中的雜訊，使用振動學理論得到葉片之阻尼比，最後以帶通濾波器過濾出特定共振頻之訊號，成功重建出風機葉片的共振模態。在離岸風機基座振動量測中，利用數位影像相關法量測了風機基座模型不同位置及不同敲擊點之振動位移，其中量測上方橫梁時能額外觀測到 5.87Hz 的頻率峰值與兩個相近共振頻造成的波包現象，與風機葉片之量測結合，顯示數位影像相關法能對於風機系統進行完整的動態量測。

本論文第五章的產學合作計畫對揚聲器緩衝圈之減振效果進行了完整的分析。對於橡膠材料拉伸試驗之大變形應變量測，成功應用並優化了樣板更新法，使數位影像相關法之軸向應變結果與萬能試驗機有良好的對應性。由實驗得到緩衝圈之材料參數後，使用 COMSOL Multiphysics 建立揚聲器之 CAE 模型，分析不同緩衝圈材料之減振效果。另外也在簡化問題後，使用參數化掃描尋找減振效果最佳的楊氏模數值。將驗證實驗之結果與模擬結果進行比較，在發泡 30、發泡 40 及發泡 50 三種緩衝圈材料中發泡 30 之減振效果皆最差。在模擬結果得出發泡 50 緩衝圈具有最佳的減振效果，而驗證實驗中發泡 50 與發泡 40 之減振效果相近，其中發泡 40 稍佳。在參數化掃描中，當緩衝圈之楊氏模數在 1.5MPa 至 3.5MPa 時具有較好的減振效果，與驗證實驗之結果有所對應。本章節將數位影像相關法應用至實驗與理論分析並重的產學合作計畫，展現此技術於工程實務上良好的應用價值。有限元素分析方面，成功建立出揚聲器系統的分析模型，並與驗證實驗有相似的分析結果。考量系統的複雜性，邊界條件及模型難以達到完美，但透過參數化掃描能有效地簡化問題，預估減振效果較佳的楊氏模數範圍。



6.2 未來展望

本論文將數位影像相關法應用至全場動態的量測中，發揮其特色及優勢，同時針對數位影像相關法系統之量測精度及佈點方法提出了改良方案。以本文內容做為出發，本節將提出數個未來能接續發展的研究方向：

1. 第三章中提出對於全場量測的精度及選點方法改善，並以數個簡單的實驗驗證其效果，為來能以誤差點篩選或 Distmesh 三角形全場選點為基礎進行進一步的實驗，比如針對有曲面地待測物進行全場佈點進行形貌重建或變形量測，其中配合 Distmesh 能更方便的在表面建立分析點，再透過誤差點篩選提高量測精度及使用逐點最小平方法量測應變值。
2. 近年來 YOLO 等電腦視覺技術逐漸成熟，Distmesh 能結合類似的邊緣檢測功能自動檢測欲進行全場佈點的區域，將選取參考點及計算距離函數等步驟進一步省略，使全場佈點達到自動化，全面提升該方法的便利性。
3. 第四章中風力發電機系統之量測目前僅有二維的量測結果，且取樣頻率最高只能觀察到前兩三個模態。雖然在高取樣頻率的三維量測中會面臨取像同步性、實驗架設及設備上的困難，但進行三維量測並提高取樣頻率能觀測到更多的共振模態，配合全場量測則能完整重建其變形。
4. 風力發電機量測的另一個發展方向是將多個取像設備及其他量測方法進行整合，同時結合數據分析建立完整的監測系統。於風機葉片單點量測實驗中，透過改變螺栓鎖固條件成功得到對於結構損傷檢測的初步結果。未來若結合應變規、加速規或布拉格光纖光柵感測器，並結合無線通訊系統，能在風力發電系統或其他工程領域中建立高效的無人監測系統。
5. 第五章對揚聲器系統之模擬分析中，能增加 Prony series 之項數使應力鬆弛擬合結果與實驗結果更為接近，並增加對標準 30、標準 40 及標準 50 緩衝圈揚聲

器的驗證實驗，進一步確認分析的精度。最後為使分析結果更為精準，能嘗試改變零件間的固定條件、音圈受力及電、磁場耦合等相關參數，並透過有限元素法模擬揚聲器之音場及組合進筆電後的振動情形。



參考文獻



- [1] Peters, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical engineering*, 21(3), 427-431.
- [2] Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1(3), 133-139.
- [3] Chu, T. C., Ranson, W. F., & Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental mechanics*, 25, 232-244.
- [4] Lu, H., & Cary, P. D. (2000). Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. *Experimental mechanics*, 40, 393-400.
- [5] Sutton, M. A., Mingqi, C., Peters, W. H., Chao, Y. J., & McNeill, S. R. (1986). Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3), 143-150.
- [6] Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., & Peters, W. H. (1989). Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Experimental mechanics*, 29, 261-267.
- [7] Vendroux, G., & Knauss, W. G. (1998). Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation. *Experimental mechanics*, 38, 86-92.
- [8] Baker, S., & Matthews, I. (2001, December). Equivalence and efficiency of image alignment algorithms. In *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001* (Vol. 1, pp.

I-I). IEEE.

- 
- [9] Baker, S., & Matthews, I. (2004). Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework. *International journal of computer vision*, 56, 221-255.
- [10] Pan, B., Li, K., & Tong, W. (2013). Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations. *Experimental Mechanics*, 53, 1277-1289.
- [11] Pan, B. (2014). An evaluation of convergence criteria for digital image correlation using inverse compositional Gauss–Newton algorithm. *Strain*, 50(1), 48-56.
- [12] Gao, Y., Cheng, T., Su, Y., Xu, X., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2015). High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 65, 73-80.
- [13] Kahn-Jetter, Z. L., & Chu, T. C. (1990). Three-dimensional displacement measurements using digital image correlation and photogrammic analysis. *Experimental Mechanics*, 30, 10-16.
- [14] Luo, P. F., Chao, Y. J., Sutton, M. A., & Peters, W. H. (1993). Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision. *Experimental mechanics*, 33, 123-132.
- [15] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(11), 1330-1334.
- [16] Schreier, H. W., & Sutton, M. A. (2002). Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Experimental mechanics*, 42, 303-310.
- [17] Yan, J. H., Sutton, M. A., Deng, X., Wei, Z., & Zavattieri, P. (2009). Mixed-mode crack growth in ductile thin-sheet materials under combined in-plane and out-of-

plane loading. International journal of fracture, 160, 169-188.

- 
- [18] 張敬源, 馬劍清. 數位影像處理及叢集電腦於電子斑點干涉術及數位影像相關法全場分析技術之開發. 博士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2012.
- [19] 周宛萱, 馬劍清. 建構高精度數位影像相關法並應用於土木結構動態系統及奈米材料微系統的變形量測. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2014.
- [20] 簡宸煜, 馬劍清. 應用數位影像相關法於土木結構及碳纖維性質與電池表面變化之量測. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2015.
- [21] 彭柏勳, 馬劍清. 應用數位影像相關法於機械系統與土木結構之變形及動態特性量測. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2016.
- [22] 陳亮至, 馬劍清. 建構立體數位影像相關法之基礎理論並應用於結構靜態與動態三維變形精密量測. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2016.
- [23] 陳義翔, 馬劍清. 優化數位影像相關法並應用於跨尺度問題的精密量測與系統整合. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2020.
- [24] 王盛儀, 馬劍清. 數位影像相關法於二維軌跡及變形量測和應用於建構立體形貌. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2018.
- [25] 黃右年, 馬劍清. 建立即時立體數位影像相關法於三維工程問題的動態量測. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2018.
- [26] 李宇倫, 馬劍清. 提升數位影像相關法的量測精度並應用於車輛追蹤與機械手臂的三維量測. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2020.
- [27] 吳俊賢, 馬劍清. 建立數位結構光量測系統並應用於三維形貌與變形量測和機械手臂手眼校正及取放任務. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2020.
- [28] 李霽儒, 馬劍清. 提升數位影像相關法效能並應用於跨尺度動態問題量測與機械手臂之系統整合. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2021.

- 
- [29] 謝佳軒, 馬劍清. 數位影像相關法於精密量測與人機共工系統的整合應用. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2022.
- [30] 余鎧, 馬劍清. 提升數位影像相關法計算效能並應用於機械手臂三維動態性能的即時量測與系統整合. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2023.
- [31] 陳彥霖, 馬劍清. 立體數位影像相關法與深度學習系統整合應用於三維量測、姿態辨識、手臂控制. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2023.
- [32] 吳冠甫, 馬劍清. 應用特徵圖像匹配於數位影像相關法之三維全場形貌及變形量測. 碩士論文, 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2023.
- [33] Pan, B., Xie, H., Guo, Z., & Hua, T. (2007). Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation. *Optical Engineering*, 46(3), 033601-033601.
- [34] Persson, P. O., & Strang, G. (2004). A simple mesh generator in MATLAB. *SIAM review*, 46(2), 329-345.
- [35] Reu, P. L., Toussaint, E., Jones, E., Bruck, H. A., Iadicola, M., Balcaen, R., ... & Simonsen, M. D. I. C. (2018). DIC challenge: developing images and guidelines for evaluating accuracy and resolution of 2D analyses. *Experimental Mechanics*, 58, 1067-1099.
- [36] Passieux, J. C., Bugarin, F., David, C., Périé, J. N., & Robert, L. (2015). Multiscale displacement field measurement using digital image correlation: Application to the identification of elastic properties. *Experimental Mechanics*, 55, 121-137.
- [37] Bizeul, M., Bouvet, C., Barrau, J. J., & Cuenca, R. (2010). Influence of woven ply degradation on fatigue crack growth in thin notched composites under tensile loading. *International Journal of Fatigue*, 32(1), 60-65.
- [38] 陳祈維, 馬劍清. 應用光纖光柵感測器於積層製造之材料性質量測及風力發

電機基座之多點動態特性量測 碩士論文，機械工程學研究所，臺灣大學，
2024

- 
- [39] Zainab, R. (2019). Standard test method for tensile properties of plastics 1. Eng Mater Technol.
- [40] Tapia-Romero, M. A., Dehonor-Gómez, M., & Lugo-Urbe, L. E. (2020). Prony series calculation for viscoelastic behavior modeling of structural adhesives from DMA data. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(2).
- [41] 歐佳怡, 趙振綱, 黃育熙. 應用黏彈性材料設計抑制揚聲器單體振動分析 碩士論文, 臺灣科技大學, 2024
- [42] 林家雋, 黃育熙. 數位影像相關法之自動特徵擷取及計算效能提升 碩士論文, 臺灣大學, 2023
- [43] Gent, A. N. (1958). On the relation between indentation hardness and Young's modulus. *Rubber Chemistry and Technology*, 31(4), 896-906.



附錄

中英文名詞對照表



中文	英文	英文簡稱
電子斑點干涉術	Electronic Speckle Pattern Interferometry	ESPI
光彈法	Photoelasticity	
有限元素法	Finite Element Method	FEM
數位影像相關法	Digital Image Correlation	DIC
交叉相關	Cross Correlation	
雙線性插值法	Bilinear Interpolation Method	
粗細迭代法	Coarse-fine Iteration Method	
多項式插值法	Polynomial Interpolation	
牛頓拉福森法	Newton-Raphson Method	NR method
正向疊加牛頓拉福森法	Forward additive Newton-Raphson method	FA-NR
反向合成高斯牛頓法	Inverse Compositional Gauss-Newton Method	IC-GN
三維數位影像相關法	Stereo DIC	
逐點最小平方法	Pointwise least squares	PLS
電腦輔助工程	Computer Aided Engineering	CAE
像素	pixel	
強度量質	intensity	
感興趣影像區域	Region of interest,	ROI

中文	英文	英文簡稱
樣板子集合	Template subset	
幀率	Frame rate	
每秒拍攝張數	Frame per second	fps
空間參數	Gauge factor	
半窗格	Half window	M
感興趣點	Point of interest	POI
搜尋子集合	Search template	
搜尋窗格	Search window	N
整像素求解	Integer pixel level solution	
次像素求解	Subpixel level solution	
正規化相關係數	Normalized cross correlation	NCC
零正規化交叉相關	Zero-normalized cross correlation	ZNCC
歐幾里德範數	Euclidean norm	
總平方差	Sum of squared differences	SSD
正規化總平方差	Normalized sum of squared differences	NSSD
零正規化總平方差	Zero Normalized sum of squared differences	ZNSSD
形狀函數	Shape function	
海森矩陣	Hessian Matrix	H
變形函數	Warping function	
亞可比矩陣	Jacobian matrix	
二維數位影像相關法	Two-dimensional digital image correlation	2D-DIC
理想的針孔成像模型	Pinhole camera model	

中文	英文	英文簡稱
主軸	Principal axis	
徑向畸變	Radial distortion	
正切畸變	Tangential distortion	
三角量測	Triangulation	
相機內部參數	Intrinsic parameters	K
相機外部參數	Extrinsic Parameter	
全局式快門	Global Shutter	
對極幾何	Epipolar geometry	
特徵點	Feature points	
平坦	Flat	
邊界	Edge	
角點	Corner	
斑點	Blob	
行	Row	
列	Column	
插值	Interpolation	
近似	Approximation	
線性內插	Linear interpolation	
雲行線	Spline	
最小平方回歸	Least-square regression	
加權餘量法	Method of Weighted Residuals	
局部加權回歸	Locally Weighted Scatterplot Smoothing,	LOWESS



中文	英文	英文簡稱
局部回歸	Local regression	
均方根誤差	Root-mean-square error	RMSE
符號距離函數	Signed distance function	SDF
網格密度函數	Mesh density function	
指向	orientation	
實驗力學學會	Society of Experimental Mechanics	SEM
快速傅立葉轉換	Fast Fourier Transform	FFT
模態正交性	Normal mode	
帶通濾波器	bandpass filter	
彎曲	bending	
西伯股份有限公司	Sable	
線黏彈性	viscoelastic	
動圈式揚聲器	moving-coil speaker	
音圈	voice coil	
振膜	diaphragm	
永久磁鐵	magnet	
勞倫茲力	Lorentz force	
黏性	viscosity	
牛頓定律	Newton's law	
馬克斯威爾模型	Maxwell model	
凱文-佛伊格模型	Kelvin-Voigt model	
廣義馬克斯威爾模型	generalized Maxwell model	



中文	英文	英文簡稱
雷射都卜勒測振儀	laser Doppler vibrometer	LDV
邵氏硬度	Shore hardness	

