

# 2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180001  
參展科別 地球與環境科學  
作品名稱 以繞射光柵進行建物震動測量之探討  
得獎獎項 四等獎

就讀學校 臺北市私立泰北高級中學  
臺北市立內湖高級工業職業學校  
臺北市私立薇閣高級中學

指導教師 葛士瑋、藍邦偉

作者姓名 陳語彤、陳品叡、陳品諺

關鍵詞 光柵、繞射、地震

## 作者簡介



我是陳語彤，臺北私立泰北高中普通科三年級。高中時，因緣際會下我接觸了科展，在這件作品中，包含了地球科學、物理光學中的繞射、數學、資訊工程，我學習了許多課本以外的知識。也從過程中發現實驗的樂趣，透過實驗中不斷修正改進，與教授、老師以及同學共同討論，學習找出解決問題的方法，忠實紀錄實驗的過程。每次的討論其實是不同的挑戰，我也從中獲得了很多成就感，對我來說，科展豐富了我的高中生活，並為我帶來了許多寶貴的經驗。



我是陳品叡，就讀於臺北市立內湖高級工業職業學校資訊科二年級。在進入內湖高工前，我對自己的興趣感到迷茫，對於未來也沒有任何規劃。但是，幸運地在選填志願時，父母建議我選擇資訊科，這開啟了我接觸程式設計的契機。由於我完全沒有接觸過任何程式設計，但是透過學校的課堂學習，我意外地發現自己的天賦，並開始對程式設計產生極大的興趣。在課餘時間也自學許多程式設計相關知識，更在學校老師的鼓勵下將程式設計應用於各種跨領域專題研究，包含了工程、科學、資訊的各種整合比賽，提升了自己在跨領域研究能力。一路上，有三個英文字母：ABC（Always Be Coding）是我所秉持的座右銘。很高興能在此次國際科展過程中發掘自己對於研究的興趣，期待著未來能夠繼續深入各領域程式應用的發展。



大家好！我是目前就讀薇閣高中高二庚國際班的陳品諺。我對我們這次所研發的地震測量儀有著極大的熱情，因為這件作品讓我受益良多！它不但讓我學到科學上的知識，更讓我學到了團隊合作的重要性。研究新型地震測量儀的道路雖然蜿蜒崎嶇，但正如 Winston S. Churchill 所說的：「Success is not final; failure is not fatal: It is the courage to continue that counts.」—成功不是終點；而失敗也不是致命的：重要的是繼續下去的勇氣。而這份對科學的熱衷，就一直以來支撐著我們，讓我們今天能夠走到這裡的動力。最後，希望在這次的科展中有機會跟各位分享我們這一年來的心血，謝謝大家！

## 摘要

本研究利用光柵繞射原理，結合慣性振盪之單擺，探究震動造成繞射光點間距變化關係，以光點振幅測量震動，建立以光學繞射變動結果顯示結構震動之響應關係。先確定光柵片旋轉、擺角改變對於繞射光點位置偏移，並以 GeoGebra 軟體分析函數關係，接著測量實際結構震動之加速度與光柵繞射光點位置的動態變化關係，藉此分析地震造成建物擺動時，光柵繞射光點間距變動的關係與趨勢函數，並由訊號反應建立結構震動之繞射光點振幅變動的響應關係。以標準震動訊號產生平台，量化之振動訊號強度，測量出本研究裝置在二維平面之地震訊號測量之表現，獲得二維震動訊號方向分量之關係。並以 OBSPY 程式分析裝置所測量之震動頻譜圖，確認繞射光點振幅變動可顯示地震訊號之特徵頻譜，更進一步採用 Python 開發繞射光斑即時影像追蹤軟體，成功透過裝置分析環境的震動響應。未來希望能微小化裝置，以監測建物震動，作為區域範圍測量地震對建物影響之發展基礎。

## Abstract

This research is based on grating diffraction and a simple pendulum for exploring the relationship between the distance vibration of diffraction light spots and structural vibration. According to the light spot vibration trend, the structural vibration response relationship can be obtained from the optical diffraction result, such as the amplitude of the light spot. Firstly, the relationship between the position shift of the diffraction spot and the rotation of the grating was determined and analyzed the function by GeoGebra software. After getting the function, we tried to measure the dynamic signal diffraction light spots, when the pendulum with grating was swinging under the shocking device. Based on the results of above experiments, we would connect the diffraction light spot amplitude with structure vibration for analyzing the vibration signal of the building, which was caused by the earthquake. In order to improve the analytical ability of the device, a standard vibration signal generator was used to quantify the vibration signal strength. The device of research could detect the magnitude of the simulated seismic signals in the two-dimensional plane. From the angle between the pendulum swinging direction of the device and the vibration direction of the generator, the sine function relationship of the two-dimensional can be obtained according to the vibration signal direction component. Then, the OBSPY program calculated the signal measured by the device of this research to analyze the vibration spectrogram of the simulated seismic signal. Therefore, the seismic measurement device based on diffraction light is confirmed useful, that the amplitude variation of the diffracted light spot can display the characteristic spectrum of the seismic signal in our research. In the future, we can further miniaturize the structure of the device for measuring the vibration trend of the building under earthquakes. By increasing the number of installations, it is possible to develop the regional earthquake impact measurement. The vibration spectrum measured by the OBSPY program is analyzed to confirm that the amplitude variation of the diffraction spot can display the characteristic spectrum of the seismic signal. Furthermore, the diffraction spot real-time image tracking software developed by Python is used to successfully analyze the vibration response of the environment through the device. In the future, it is hoped that miniaturization devices can be used to monitor the vibration of buildings as the development basis for measuring the impact of earthquakes on buildings in a regional scope.

## 壹、研究動機

台灣位處環太平洋地震帶上，由於板塊擠壓的因素，使得地震相當頻繁，根據統計每年平均有超過二百次的有感地震[1]，此外，鄰近台北市的大屯火山群，雖然已沉寂長久無劇烈活動，但地表的地熱活動仍相當明顯，故需持續監測大屯火山群活動，所以中央研究院地球科學研究所與陽明山國家公園管理處合作，於大屯山地區建立小型精密地震觀測網，如圖 1(a)，透過各個地震觀測站進行 24 小時連續記錄的方式(圖 1(b))，測量所有微小地震的時間與空間分佈，藉此有效的避免可能造成危害[2]。

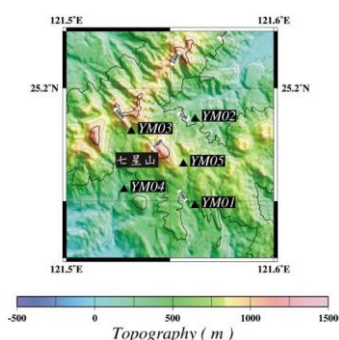


圖 1 (a)大屯山地震觀測站(三角形)分佈[2]

(b)地震觀測站外觀與主要儀器

近年台灣來很幸運的沒有發生較大的災害性地震，但是在經濟發展因素下，各都會區皆高樓大廈林立，這也提高了發生大型地震時的災害風險。基於上述因素，精準的地震監測與警示是重要的災害預警，而這必須仰賴精準與大量地震監測儀器才得以構建。目前常見的地震測量儀器，多採用基於半導體的微型加速度測量計，此類的元件是利用物體加速運動時，因慣性現象造成半導體材料的物理性質發生變化，進而使電訊號改變，如：電阻、電容，藉此進行個別方向的加速度的測量；此外，也有運用電磁感應的地震測量儀器，藉由中央擺錘因地震而擺動時，擺錘上的線圈感到磁場發生變化，進而產生感應電流的強弱訊號，藉此獲得地震的震動強度。上述兩種地震監測儀器，雖然設計原理不同，但都是利用電訊號來測量地震，然而在學校物理課時，老師提到了「光的非接觸式測量」，可利用光的繞射可以反應出微小的結構差異，而且參觀光學實驗室也發現為了提高光學實驗的精準度，光學平台都會架設在能夠抗震的光學桌上，避免各種震動造成光學繞射影像的變動。基於這樣的契機，開始思考這樣靈敏的光學特性是否能反過來偵測地震造成的震動，也展開了此次研究的主題，嘗試透過本研究設計出可利用光學方式測量地震的方法，並建構可測量三維空間震動的裝置，期望藉由簡易且可大量設置的微型地震監測系統，有效地

針對區域內不同建築物或不同高度之地震表現進行監測，以強化台灣的地震監測，此外，亦可裝置於建物或生產線機台，作為相關機械緊急停止的偵測裝置。

## 貳、研究目的及研究問題

### 一、研究目的

- (一) 分析一維穿透式光柵旋轉造成的繞射光點與旋轉角度之變化關係。
- (二) 分析一維穿透式光柵結合慣性單擺之結構，單擺擺動造成的繞射光點與擺動角度之變化關係變化。
- (三) 分析光柵片旋轉與慣性擺動之繞射光點的影像變動函數關係。
- (四) 分析結構震動造成的光柵系統擺動之動態變化。
- (五) 運用光柵繞射震盪連接實際結構震動之加速度反應。
- (六) 在連續震動平台下光柵繞射之震盪反應。
- (七) 震動測量裝置在二維平面震動之響應。
- (八) 光柵繞射震動測量裝置訊號處理與程式分析。
- (九) 三維空間光柵繞射震動感測裝置架設與裝置測。

### 二、研究設備及器材

- (一) 硬體：二極體雷射(紅光，波長 632 nm, 5 mW)、一維光柵片(50、100、300、500、600 條/mm)、Arduino UNO R3 開發板、加速度感測元件 GY-61 ADXL335(以上硬體如表 1 所列)、旋轉平台(精度 0.5 度)、自製單擺架(3D 列印、鋁擠料支架)、滑輪組、砝碼、電子秤、具陀螺儀功能手機、鋼軸、培林、Nikon D90 相機 18-105mm、IPEVO 4K 攝影機、可連續震動之模擬平台。

表 1 本實驗所使用之硬體

| 二極體雷射   | 加速度感測元件 ADXL335  | Arduino UNO R3 開發板  |
|---|--|---|
|  |  |  |





(二) 軟體：Photopea、Tracker、GeoGebra、Python。

### 參、研究設計

#### 實驗一、光柵旋轉之繞射變化

##### (一) 光柵片旋轉角度之影響

將光柵片置於精度  $\frac{1}{60}$  度之旋轉平台，使雷射光水平入射於垂直於旋轉平台之光柵片，如圖 2 所示，圖中 A 為紅光二極體雷射光、B 為旋轉平台、C 為光柵片、D 為投影屏幕，其中一維光柵片上的光柵刻紋方向為 y 方向，實驗裝置架設如圖 3 所示。

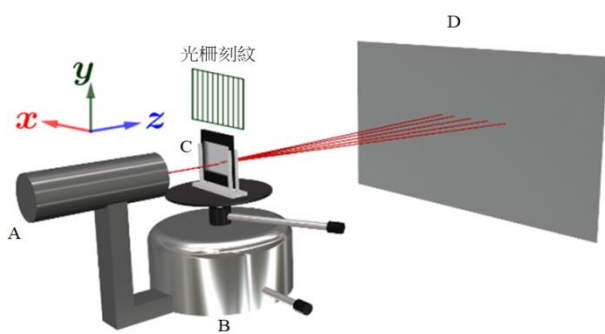


圖 2 光柵旋轉觀測平台



圖 3 光柵片安裝於旋轉平台之實驗架設

雷射光垂直入射旋轉平台上之光柵片，俯視圖如圖 4(a)所示，以平台中心為旋轉軸，逆時針方向旋轉光柵片，旋轉過程中，光柵片靠近雷射光源之一端稱為近端、反之旋轉過程中遠離雷射光源之一端稱為遠端，如圖 4(b)。

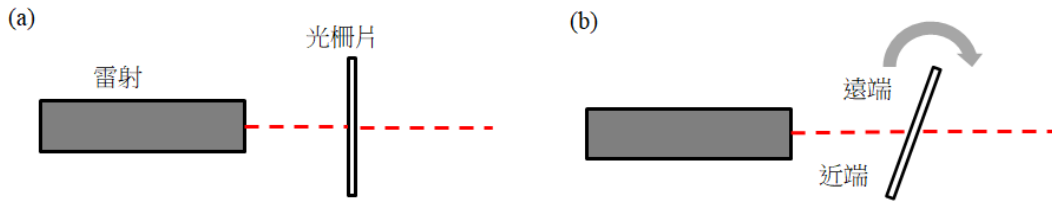


圖 4 (a)由旋轉平台俯視光柵片 (b)以平台中心為轉軸，順時針旋轉之區域定義雷射光經過光柵後繞射所得之光點，維持原雷射光行進方向之光點稱為零階繞射，於零階繞射左右兩側展開之光點依序稱為 1 階繞射(1<sup>st</sup>)、2 階繞射(2<sup>nd</sup>)、3 階繞射(3<sup>rd</sup>)...，如圖 5(a)，而對應前述光柵片旋轉時的近端與遠端，進一步將各階繞射定義如圖 5(b)所示。(近端：1 階、2 階...；遠端：1 階\*、2 階\*...)

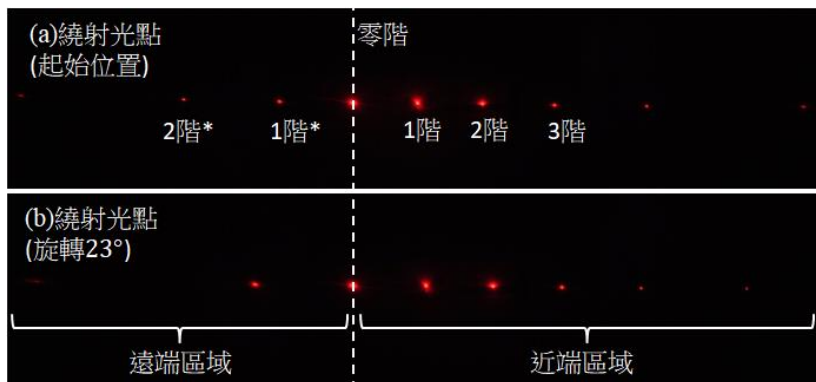


圖 5 (a)垂直入射 300 條/mm 光柵片之繞射光點與定義 (b)旋轉光柵片之變化

## (二) 光柵片旋轉角度與各階光點位置紀錄方法

1.先標記屏幕上中央零階繞射(如圖 6)，並記錄光柵片未旋轉時兩光點之間的距離(零階繞射到第一階繞射)，測量距離 1 公分與像素的換算標準，以此為影像分析之基準長度，將拍到的照片放到 photopea 測量每個點之間的距離，如圖 7。

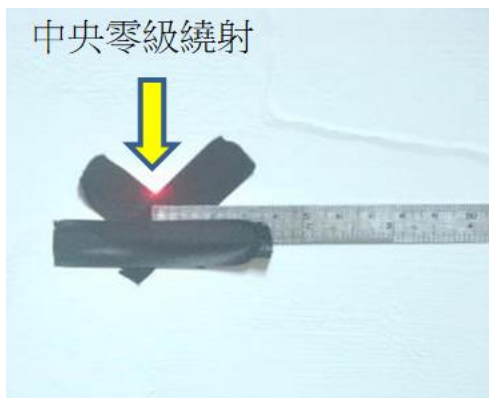


圖 6 標記中央零階位置與量測標準距離

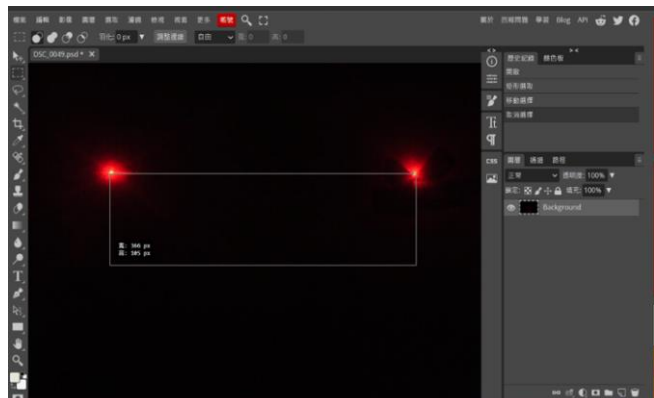


圖 7 以 photopea 軟體換算為實際距離

2.以上述方法分析照片中光點之間的距離，其定義如圖 8 所示，詳細說明於表 2 中，並將各

階繞射之間的距離數據整理於 Excel，如圖 9。為了讓資料整理更清楚，我們考慮使用 GeoGebra 的試算表功能，它可以一併輸出散布圖，並勾選需要呈現的資料。



圖 8 拍攝照片中光點之間的距離定義代號

表 2 以 500 條/mm 光柵片變動繞射光點之間的距離為例

| 分析代號 | 定義                              |
|------|---------------------------------|
| D1   | 光柵片變動時，近端區域零階繞射到第 1 階繞射光點之間的距離  |
| D2   | 光柵片變動時，近端區域第一階繞射到第 2 階繞射光點之間的距離 |
| D3   | 光柵片變動時，近端區域第一階繞射到第 3 階繞射光點之間的距離 |
| D1*  | 光柵片變動時，遠端區域零階繞射到第 1 階繞射光點之間的距離  |
| D2*  | 光柵片變動時，遠端區域第一階繞射到第 2 階繞射光點之間的距離 |
| D3*  | 光柵片變動時，遠端區域第一階繞射到第 3 階繞射光點之間的距離 |

| 照片編號  |         | 各間距畫素值  |        |         |        |         |           |             |             |
|-------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|-----------|-------------|-------------|
| 編號    | *D1(px) | *D1(cm) | D1(px) | D1(cm)  | D2(px) | D2(cm)  | D1+D2(px) | D1+D2(cm)   |             |
| 600mm |         |         |        |         |        |         |           |             |             |
| 49    | 363     | 23.0038 | 347    | 21.9899 | 567    | 35.9316 | 914       | 57.92141952 |             |
| 50    | 365     | 23.1305 | 346    | 21.9265 | 557    | 35.2978 | 903       | 57.2243346  |             |
| 51    | 367     | 23.2573 | 347    | 21.9799 | 547    | 34.6541 | 894       | 56.6539924  |             |
| 52    | 371     | 23.5108 | 344    | 21.797  | 536    | 33.967  | 880       | 55.76679341 |             |
| 53    | 372     | 23.5741 | 344    | 21.797  | 530    | 33.5368 | 874       | 55.38656527 |             |
| 54    | 376     | 23.8276 | 344    | 21.797  | 522    | 33.0798 | 866       | 54.87959442 |             |
| 55    | 379     | 24.0177 | 344    | 21.7997 | 515    | 32.6362 | 859       | 54.43599493 |             |
| 56    | 382     | 24.2079 | 344    | 21.7997 | 509    | 32.256  | 853       | 54.05576679 |             |
| 57    | 386     | 24.4613 | 各間距長度  |         |        | 3       | 31.8758   | 847         | 53.67553866 |
| 58    | 390     | 24.7148 |        |         |        | 8       | 31.5589   | 842         | 53.35868188 |
| 59    | 394     | 24.9683 | 345    | 21.8631 | 493    | 31.2421 | 838       | 53.10519645 |             |
| 60    | 398     | 25.2218 | 345    | 21.8631 | 489    | 30.9886 | 834       | 52.85171103 |             |
| 61    | 404     | 25.602  | 344    | 21.7997 | 486    | 30.7985 | 830       | 52.5982256  |             |
| 62    | 408     | 25.8555 | 346    | 21.9265 | 483    | 30.6084 | 829       | 52.53485425 |             |
| 63    | 413     | 26.1724 | 346    | 21.9265 | 480    | 30.4183 | 826       | 52.34474018 |             |

圖 9：以 Excel 整理各光點距離之數據資料

## 實驗二、光柵結合慣性單擺之繞射變化

### (一) 單擺角度對光柵片之影響

將光柵片置於一慣性單擺上，使雷射光水平入射於垂吊於慣性單擺之光柵片，如圖 10 所示，圖中 A 為雷射光、B 為慣性單擺、C 為光柵片、D 為投影屏幕，其中一維光柵片上的光柵之刻紋方向為  $y$  方向，實際實驗裝置架設與測量過程如圖 11 所示。

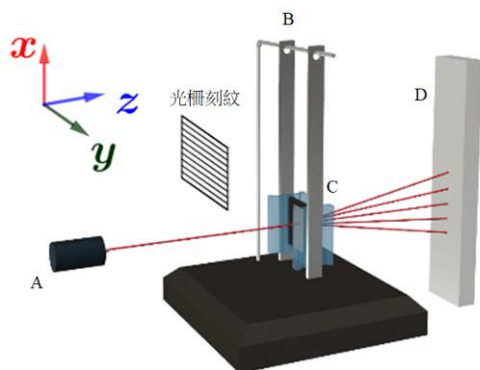


圖 10 光柵結合慣性單擺之觀測平台



圖 11(a)：實驗裝置架設



圖 11(b)：測量過程

慣性單擺與光柵片的側視圖如圖 12(a)所示，擺動過程中，光柵片相對靠近雷射光源之一端稱為近端、反之旋轉過程中相對遠離雷射光源之一端稱為遠端，如圖 12(b)。

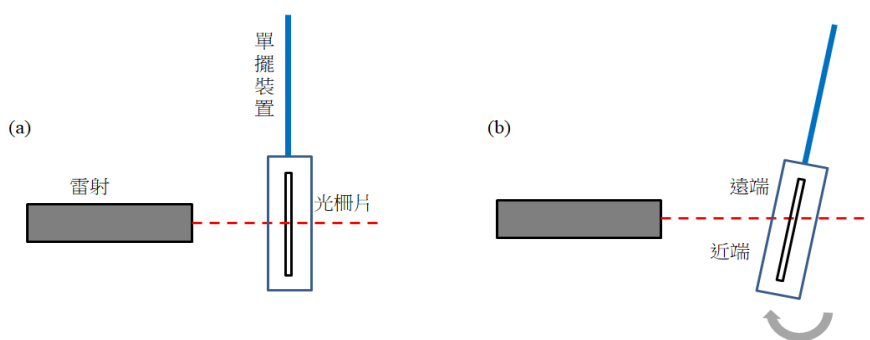


圖 12 (a)由  $y$  軸方向觀看裝有光柵片之單擺 (b)逆時針旋轉光柵片之方向定義

在光柵結合慣性單擺之觀測平台，光柵繞射所得之光點，維持原雷射光之光點稱為零階繞射，於零階繞射上下兩側展開之光點依序稱為 1 階繞射(1<sup>st</sup>)、2 階繞射(2<sup>nd</sup>)、3 階繞射(3<sup>rd</sup>)...，如圖 13(a)，而對應前述單擺擺動過程，造成光柵片的近端與遠端之方向，上述各階繞射定義如圖 13(b)所示(近端：1 階、2 階...；遠端：1 階\*、2 階\*...)，採用靜態測量過程是為了避免單擺

前後擺動造成干擾，故單擺角度由初始垂直(角度 $0^\circ$ )，以順時針方向擺動，如圖 12(b)。

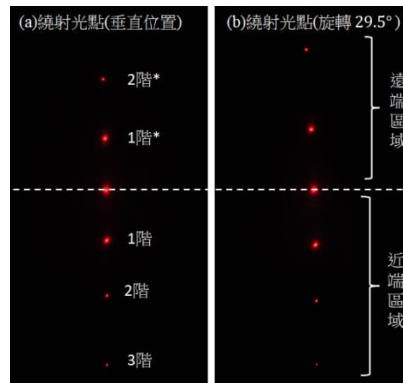


圖 13 (a)垂直入射 300 條/mm 光柵片之繞射光點與定義 (b)逆時針擺動之變化

## (二) 光柵片擺動角度與各階光點位置紀錄方法

所使用 Excel 整理各階光點位置紀錄數據，其之方法如前述選轉平台光柵片紀錄方法。

### 實驗三、光柵片變動之繞射光點影像函數分析

由於光柵繞射投影屏幕的最大寬度為 180 公分，且相機影像在焦距 18mm 下可紀錄屏幕範圍約為 140 公分。所以如果繞射光點跑到可記錄範圍外，我們就不記錄。

#### (一) 旋轉角度與各階光點位置變化之函數

以下是將實驗一旋轉台平測量之屏幕繞射光點間距，使用 GeoGebra 進行整合分析，希望透過數學方法分析其位置變化與光柵片旋轉角度之關係。其中  $x$  軸代表由起始度數開始，角度每次增加 $1^\circ$ ， $y$  軸單位為公分。

#### (二) 單擺擺動角度對各階光點位置變化之函數

以下是將實驗二光柵結合慣性單擺測量之屏幕繞射光點間距，使用 GeoGebra 進行整合分析，希望透過數學方法分析其位置變化與光柵片旋轉角度之關係。其中  $x$  軸代表由起始度數開始，角度每次增加 $0.5^\circ$ ， $y$  軸單位為公分。

### 實驗四、震動造成的光柵系統擺動之動態變化

#### (一) 以 Tracker 紀錄光柵系統擺動之光點動態變化

以相機記錄單擺運動過程中，光柵繞射光點的動態變化，並利用 Tracker 軟體分析光柵繞射光點之震盪影像，先將數據整理為 Excel 檔輸出(如圖 14)，在進行 GeoGebra 繪圖分析。

| D                        | E            | F            |
|--------------------------|--------------|--------------|
| 500條/mm ,D1* 初始長度 36.9公分 |              |              |
| t(s)                     | x(m)         | y(m)         |
| 0                        | -0.369005956 | 1.90E-04     |
| 0.041666667              | -0.368952894 | 1.90E-04     |
| 0.083333333              | -0.369       | 3.71E-04     |
| 0.125                    | -0.369524405 | -0.002326929 |
| 0.166666667              | -0.369642511 | -0.002733206 |
| 0.208333333              | -0.36921726  | -0.002676776 |
| 0.249999999              | -0.368831819 | -0.001951536 |
| 0.291666667              | -0.369234718 | -0.002347868 |

圖 14 Tracker 軟體分析繞射光點偏移量的數據整理(Excel 檔案畫面)

### 1、第 1 代慣性單擺震動光柵繞射動態量測

以鐵尺、3D 列印光柵台組裝成慣性單擺結構(如圖 15(a))，利用簡易支架與量角板進行實驗，分析繞射光點的動態變化。

### 2、第 2 代慣性單擺震動光柵繞射動態量測

以鋼軸、培林、3D 列印光柵台組裝成慣性單擺結構(如圖 15(b))，利用鋁擠框支架、與量角板進行實驗，分析繞射光點的動態變化。

## (二) 自製加速度測量裝置校正

為了後續研究所需，故設計容易安裝的自製加速度偵測裝置，但是需要透過物理方法驗證此自製加速度裝的數值與實際加速度之關係。所採用方式如下：

### 1、以阿特伍德機檢驗自製加速度測量裝置-固定加速度

阿特伍德機裝置如圖 16 所示，設左定滑輪左之質量為  $M_L$ ，右定滑輪之質量為  $M_R$ 。利用定滑輪左右兩側總質量相等(總質量 =  $M_L + M_R$ )，合力為左右重量之差異(合力 =  $M_L g - M_R g$ ， $g$

為重力加速度，設計  $M_L > M_R$ )，可算得加速度  $a = \frac{M_L - M_R}{M_L + M_R} g$ ，分析自製加速度偵測裝置測

得知數值與加速度  $a$  之關係。

### 2、以簡單諧振檢驗自製加速度測量裝置-變動加速度

簡單諧振裝置如圖 17 所示，利用彈簧的簡諧振盪中，彈力  $F = kx$ ， $k$  為彈力常數、 $x$  為距離平衡位置之伸長量，根據牛頓第二運動定律可之，在振盪質量為  $m$  時，加速度  $a = \frac{k}{m} x$ ，分析

自製加速度偵測裝置測得知數值與加速度  $a$  之關係。

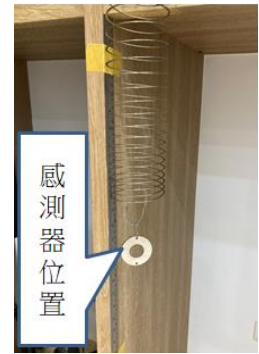
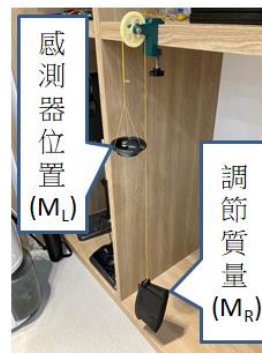
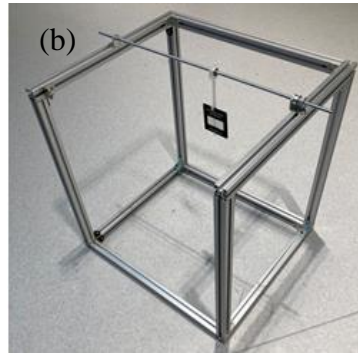


圖 15(a)第 1 代單擺 (b)第 2 代單擺

圖 16 阿特伍德機

圖 17 簡諧裝置

#### 實驗五、以光柵繞射光點震盪連接實際結構震動之加速度之反應

為了驗證光柵繞射震盪是否能對於結構震動加速度給予適當的反應，於鋁擠料框架上安裝自製加速度測量裝置，透過人工撞擊桌面，使慣性單擺發生擺動，並同時記錄繞射光點間距(D1\*)變動數據與自製加速度測量裝置之數值之關係。

#### 實驗六、以連續震動平台測試光柵繞射光點之震盪反應

為了檢驗光柵繞射震盪在連續地動搖擺下之反應，透過可連續震動之測試平台，搭配縮小結構第 3 代光柵繞射震動測量平台，如圖 18，以穩定的震動訊號來源進行測試。並針對平台造成之震動訊號加以記錄，所採用方法如下：

- 1、將加速度感測元件 ADXL335 固定於鋁擠料框結構上，利用晶片之微機電系統(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)，測量連續震動下平台表面之加速度與鋁擠料框結構之加速度訊號，並利用無線傳輸模組(NRF24L01+)將數據傳訊至電腦端紀錄。

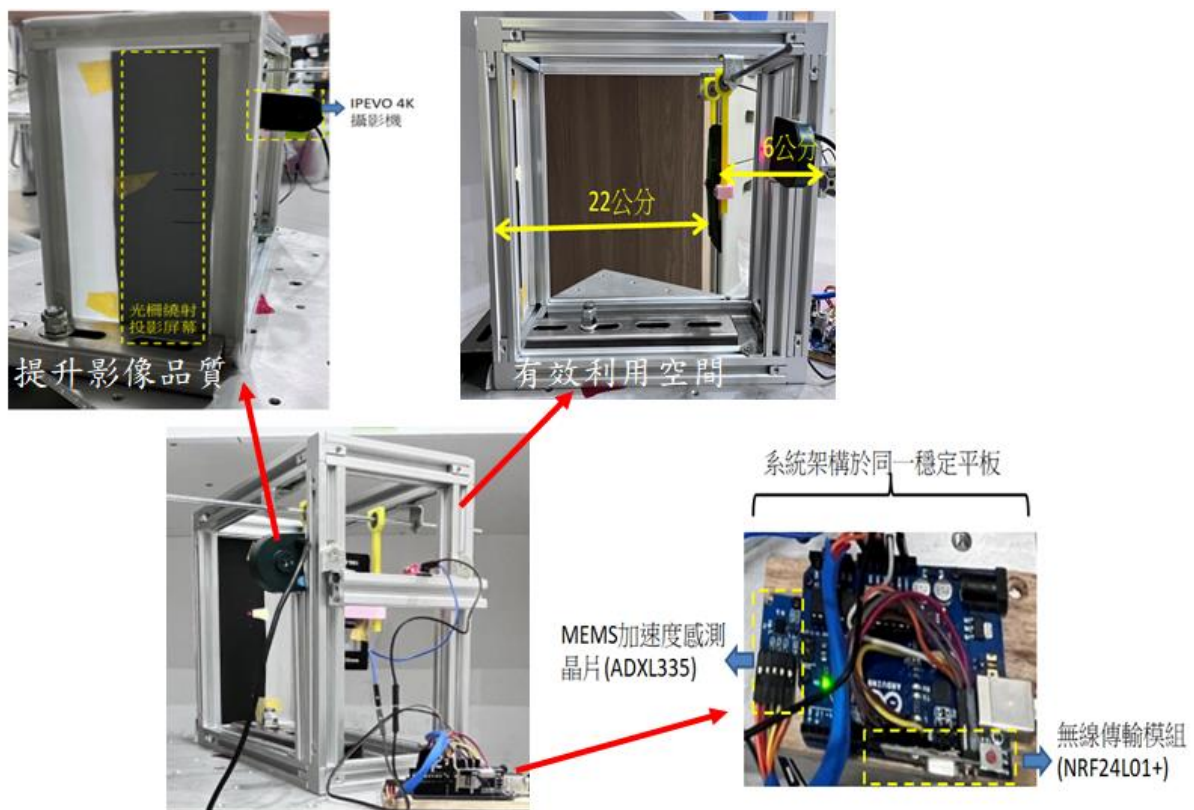


圖 18 第 3 代光柵繞射單擺測量裝置

2、將 IPEVO 4K 攝影機固定於鋁擠料框結構上，藉此降低測試平台往復震動下，因相對運動造成影像紀錄裝置之光學影響，並以 Tracker 分析繞射光點變動。

實驗七、以非平行軸向之震動訊號驗證光柵繞射裝置之訊號響應

將光柵繞射裝置單擺擺動方向與震動之測試平台震動方向設定夾角分別為 30 度(如圖 19)、45 度，進行不同強度震動，藉此驗證二維平面或多方向震動訊號下，光柵繞射裝置之響應訊號是否足以進行解析，同時驗證平面上夾角造成之振動訊號之分量關係。



圖 19 光柵繞射單擺測量裝置擺動方向與平台震動方向之夾角



## 實驗八、光柵繞射震動測量裝置訊號處理與 OBSPY 程式分析

接續實驗六、七之測量結果，以 Python 程式分析 Arduino 所紀錄之 MEMS 數據，以及繞射光點間距變動之 Tracker 數據，先將各項訊號數據整理為 Python 程式資料庫格式，透過專門針對地震領域所開發之 Python 程式(Ocean-bottom seismometer Python, OBSPY) 進行資料分析，此處所運用之 OBSPY 程式對地震學研究領域使用的多數檔案格式皆能提供讀寫支援，免去大量的檔案格式轉換，同時亦可將資料型態分析為一般地震學研究常用之各式專業圖表。在本研究中主要運用於將 MEMS 數據與 Tracker 分析資料，進行傅立葉變換 (Fourier Transform)，獲得在平台震動測量的時間內，所得頻率與強度分布之頻譜圖。頻譜圖是來自於週期與振幅訊號的轉換，波動的「振幅」是指訊號高低差距，「周期」是指完成往復運動一次所需的時間。1 秒內由波峰(波谷)到波峰(波谷)的循環次數稱為「頻率」，單位是赫茲(Hz)，如圖 20 為頻率 3Hz 的波訊號。其實複雜的波也可以由單純的波產生出來，構成複雜波形的單純波形稱為「頻率成份」，如圖 21，將每種頻率成份各以若干強度混合，這些關係圖形化，就是「頻譜」。

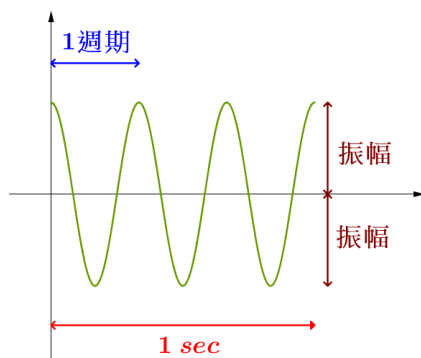


圖 20 頻率 3 Hz 的波訊號

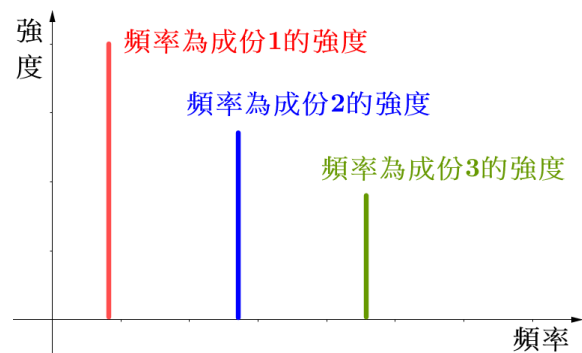


圖 21 個成分訊號強度之頻譜圖

若將上述意義推廣，即物理量與時間的關係轉換成強度對頻率，就是傅立葉變換，反之則為傅立葉反變換，其轉換關係如圖 22 所示。

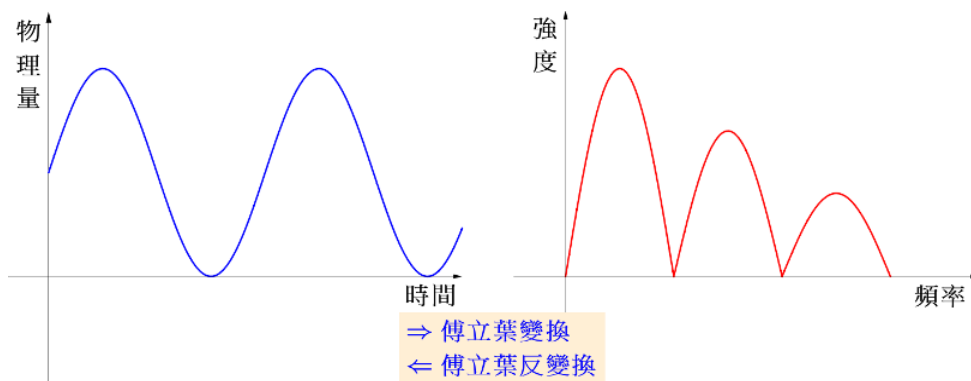


圖 22 物理量與時間的訊號透過傅立葉變換轉為成強度對頻率之關係

實驗九、三維空間光柵繞射震動感測裝置架設與裝置測。

基於上述實驗所得到的光柵繞射震動測量基礎，進一步設計垂直平面方向的結構震動測量方法，並將兩組一維方向與垂直方向的結構震動測量裝置整合，設計出可偵測三維空間的結構震動的測量裝置。

## 肆、研究結果

### (一) 光柵旋轉之繞射變化

在旋轉平台上不同規格之光柵片的繞射光點由起始旋轉位置開始，每 $1^\circ$ 記錄一次(下列照片僅取 10 張照片呈現繞射光點之變化趨勢)，各種光柵繞射光點如圖 23~圖 27，其中光柵片中心距離屏幕為 58.0 公分，由屏幕上可以明顯觀察到各階繞射光點的變化，然而隨著光柵密度愈低，光點也愈密集，不利觀察與分析。而各繞射點之間的測量數據，利用 photopea 軟體分析實際距離後，使用 GeoGebra 進行整合分析，方便判讀各數據與後續函數分析，各種光柵片所得光點間距變化之分析結果如圖 28 至圖 32 所示。其中在進行實驗攝影之前，考量到相機鏡頭可能造成拍攝區域的影像邊緣形變的問題，再經過確認後本實驗所採用之 Nikon D90 規格為 APS-C 感光片幅，即使在 18mm 的焦距下，在拍攝區域的影像邊緣仍不會發生明顯的形變。

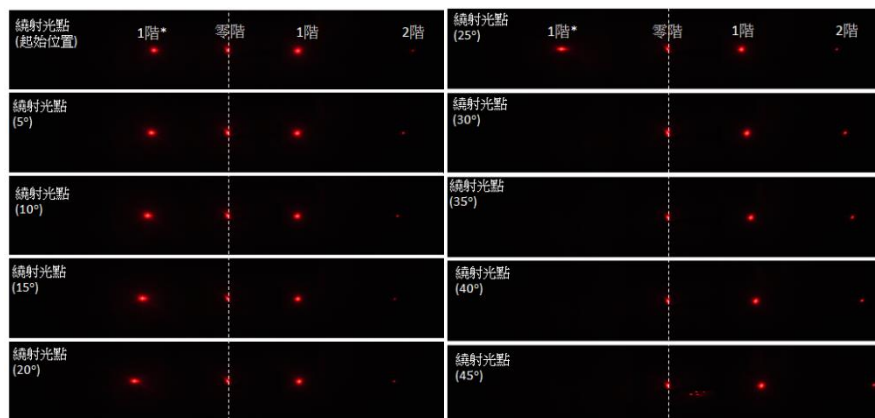


圖 23 600 條/mm 光柵繞射點隨光柵片旋轉角度之變化圖

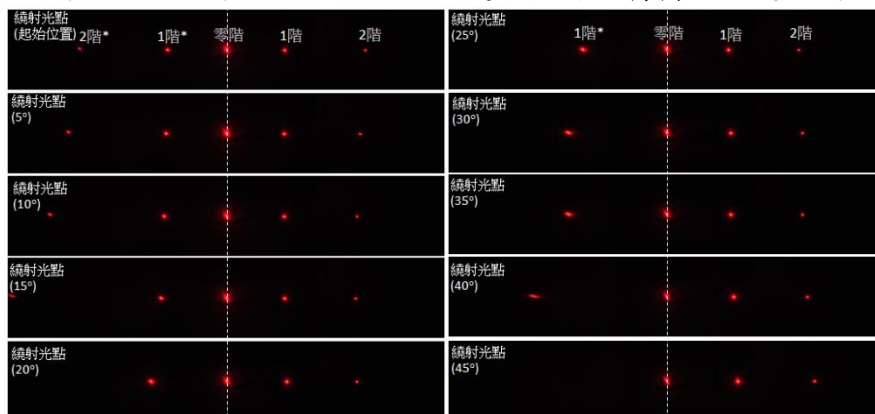


圖 24 500 條/mm 光柵繞射點隨光柵片旋轉角度之變化圖

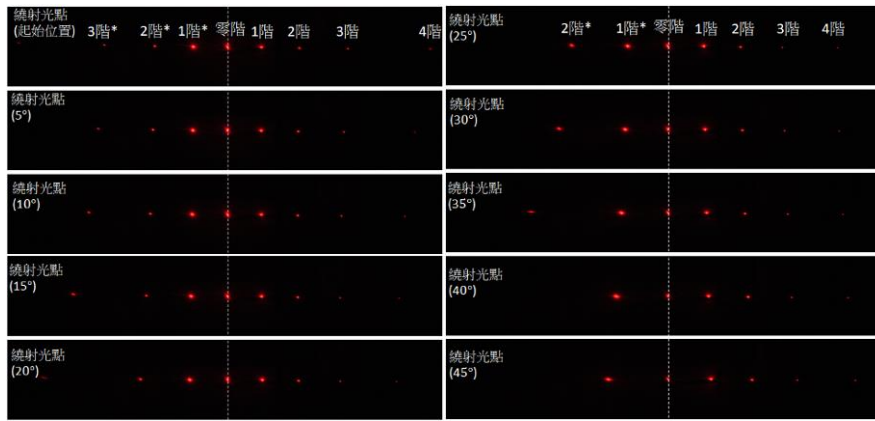


圖 25 300 條/mm 光柵繞射點隨光柵片旋轉角度之變化圖

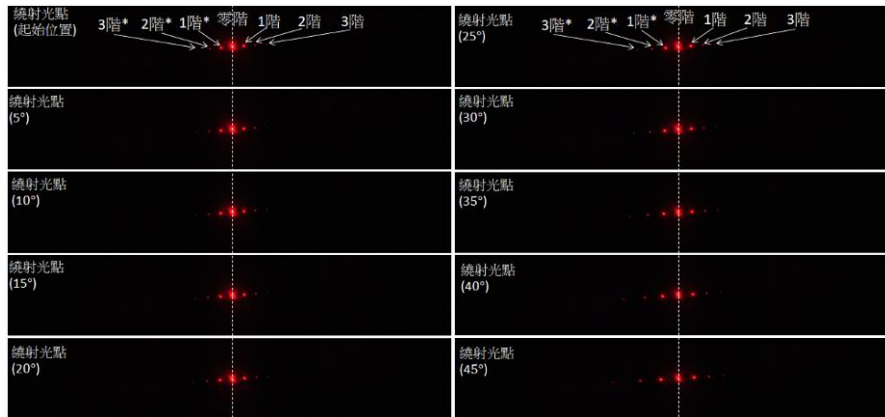


圖 26 100 條/mm 光柵繞射點隨光柵片旋轉角度之變化圖

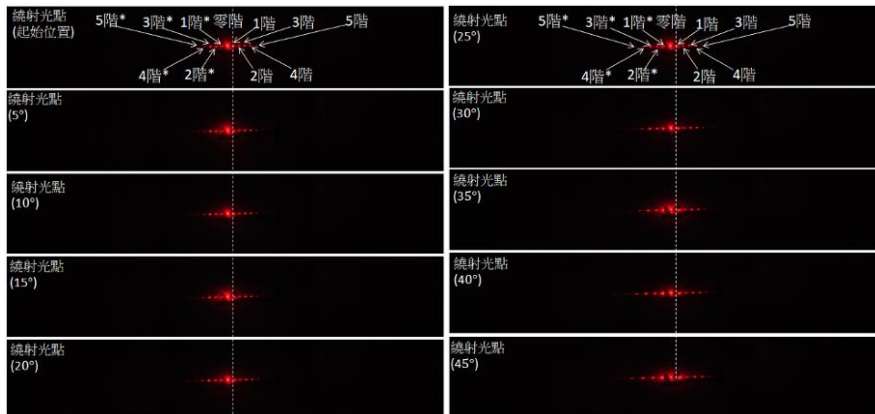


圖 27 50 條/mm 光柵繞射點隨光柵片旋轉角度之變化圖

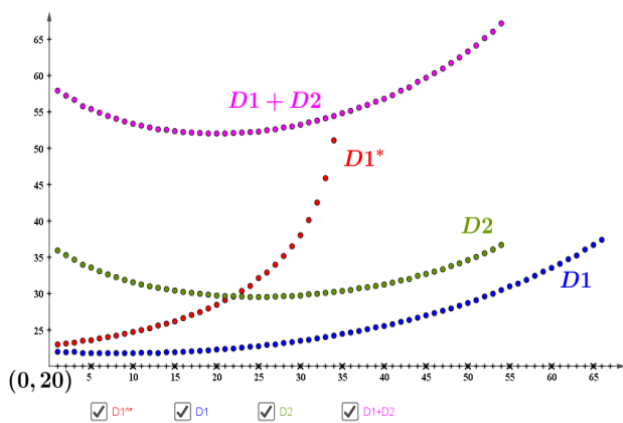


圖 28 600 條/mm 光柵片繞射點間距分析

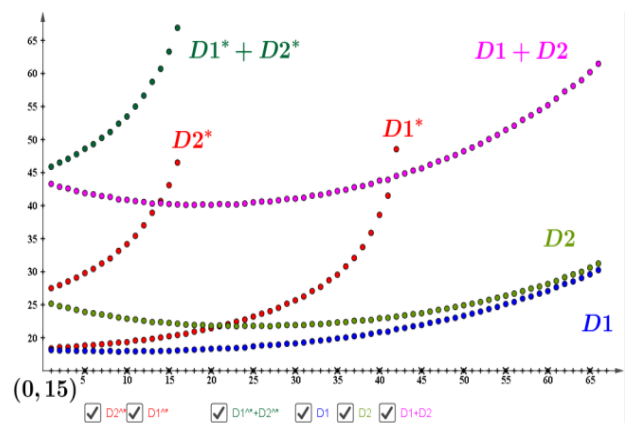


圖 29 500 條/mm 光柵片繞射點間距分析

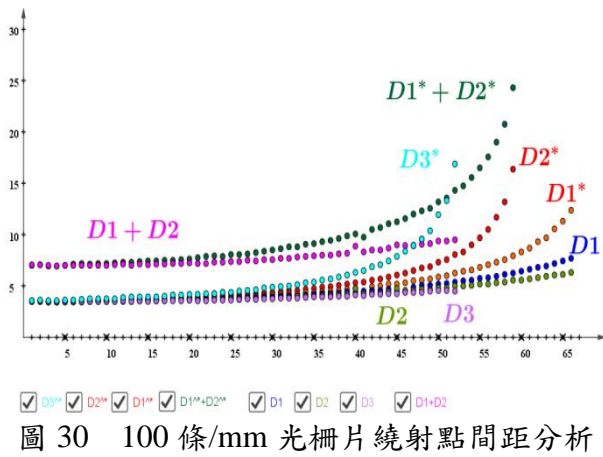


圖 30 100 條/mm 光柵片繞射點間距分析

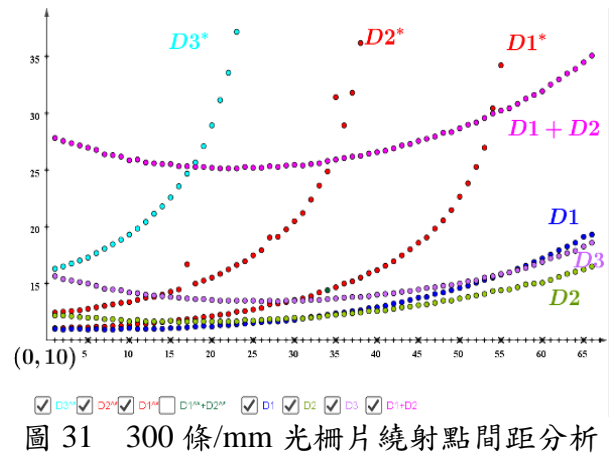


圖 31 300 條/mm 光柵片繞射點間距分析

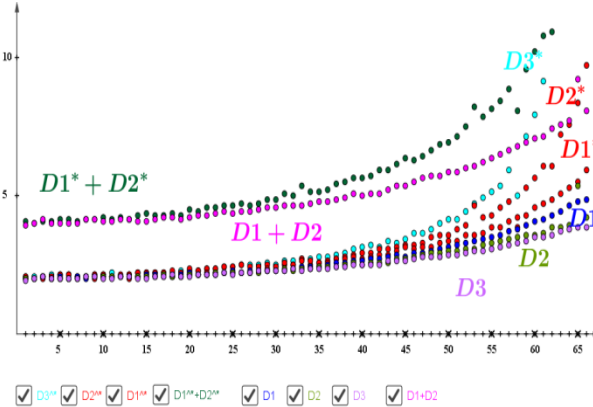


圖 32 50 條/mm 光柵片旋轉之繞射點間距分析

## (二) 光柵結合慣性單擺之繞射變化(靜態)

在光柵結合慣性單擺的實驗中，由單擺自然垂直位置開始記錄繞射光點，每 $0.5^\circ$ 記錄一次(下列照片僅取 10 張照片呈現繞射光點之變化趨勢)，各種光柵繞射光點如圖 33~圖 35，可以明顯觀察到隨著單擺角度變化，光柵片所形成的各階繞射光點之變化，考量光柵密度愈低，光點也愈密集，故此部分僅測量 600 條/mm、500 條/mm 與 300 條/mm 的光柵片。各繞射點之間的測量數據，利用 photopea 軟體分析實際距離後，使用 GeoGebra 進行整合分析，方便判讀各數據與後續函數分析，各種光柵片所得光點間距變化之分析結果如圖 36~圖 38。

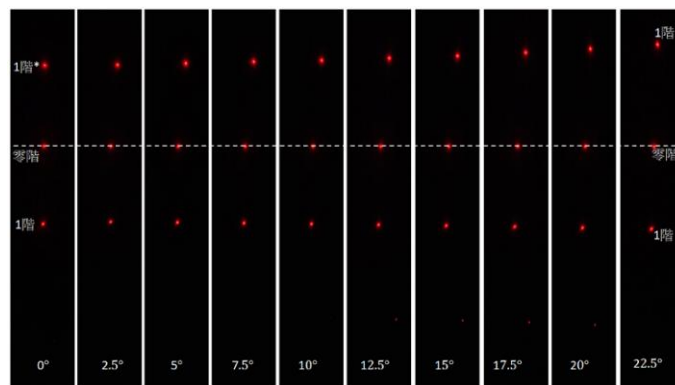


圖 33 600 條/mm 光柵繞射點隨光柵片擺動角度之變化圖

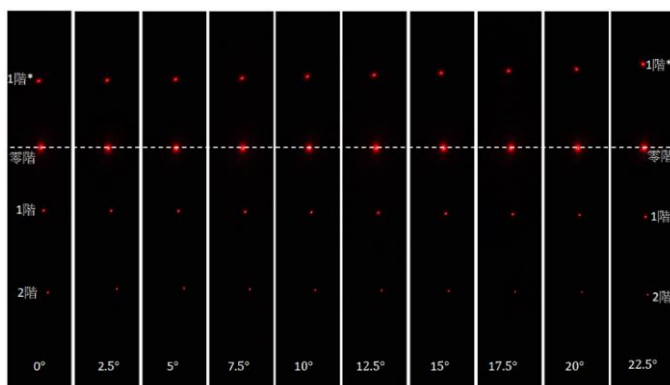


圖 34 500 條/mm 光柵繞射點隨光柵片擺動角度之變化圖

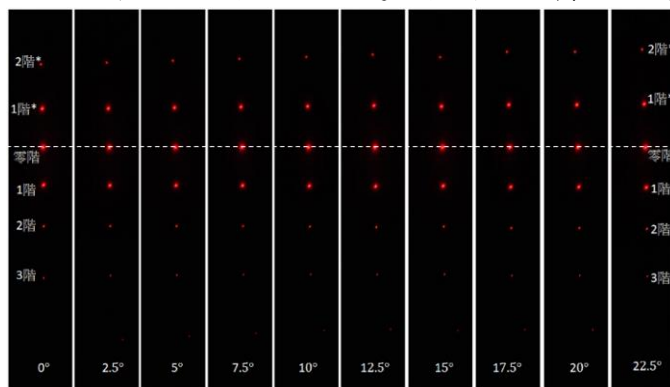


圖 35 300 條/mm 光柵繞射點隨光柵片擺動角度之變化圖

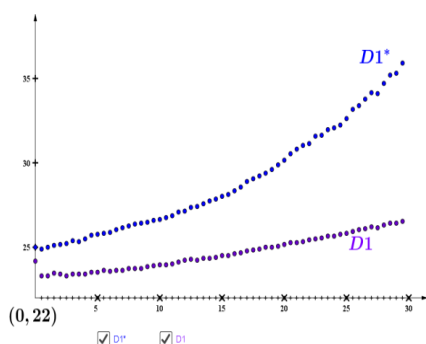


圖 36 600 條/mm 光柵片擺動之繞射點間距

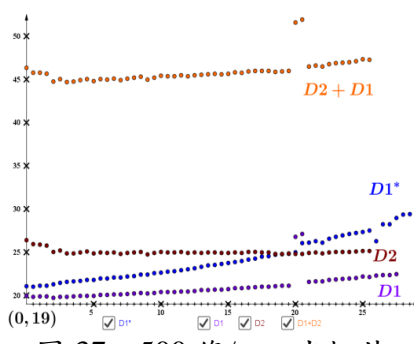


圖 37 500 條/mm 光柵片擺動之繞射點間距

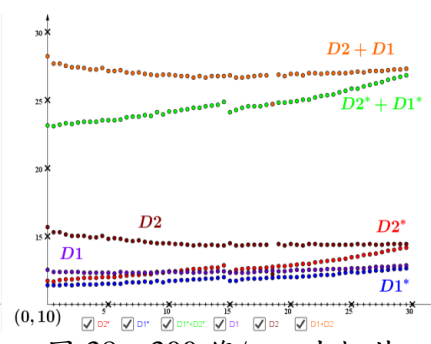


圖 38 300 條/mm 光柵片擺動之繞射點間距分析

### (三) 光柵片變動之繞射光點影像函數分析

我們以 GeoGebra 軟體，有效位數為小數點下第 5 位。以實驗 1 旋轉台 100mm 光柵片的  $D1^*$ (圖 39)與  $D1$ (圖 40)為例，共 66 筆資料。 $x$  軸代表起始度數，每次增加  $0.5^\circ$ ， $y$  軸單位為公分。我們使用最小平方法，找出常見函數的最小平方誤差總合(SSE)。首先從散布圖中(圖 39(a))，把不合理的資料去除(圖 39(b))， $D1^*$ 是第 41 筆，接著對剩下的資料做估計，並勾選需要呈現的結果。我們一開始使用高中課本學的一次近似(圖 39(c))，求出迴歸直線方程式為

$f(x) = 0.09302x + 2.06675$ ，最小平方誤差總合是 73.08569，因為一次近似是線性的，我們發現 SSE 太大，後來就採用其他常用的近似估計方法。二次近似的最適合函數(圖 39(d))為  $f(x) = 0.00288x^2 - 0.10005x + 4.24745$ ，此時最小平方誤差總合是 16.34201。三次近似(圖 39(e))的最適合函數為  $f(x) = 0.0008x^3 - 0.00511x^2 + 0.11481x + 3.00661$ ，此時最小平方誤差總合是 4.16259。指數近最適合函數(圖 39(f))為  $f(x) = 2.82052e^{0.01627x}$ ，此時最小平方誤差總合是 52.57059。而對數近似的平方誤差總合，並計算其 SSE。最後我們取誤差最小的三次近似的最適合函數。

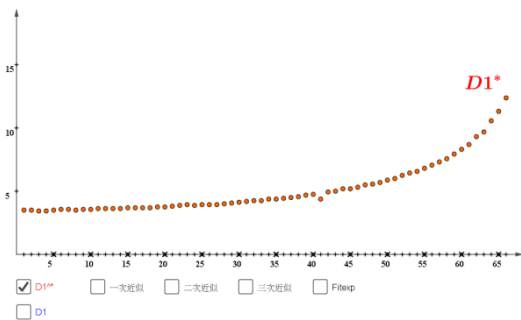


圖 39(a)旋轉台 100mm

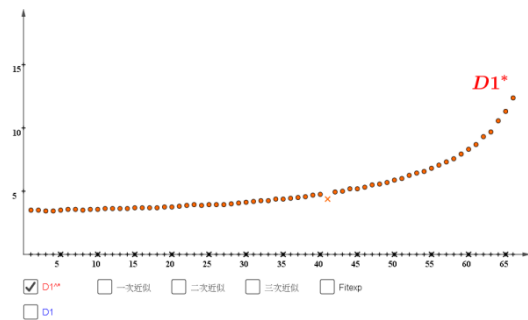


圖 39(b)刪除不合理資料

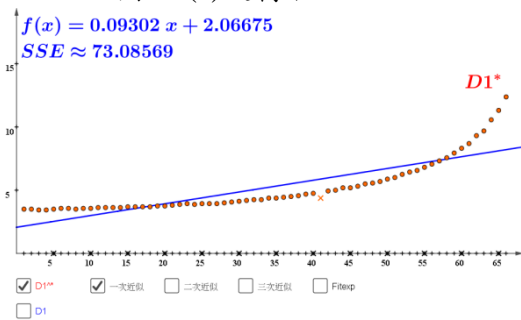


圖 39(c)一次近似

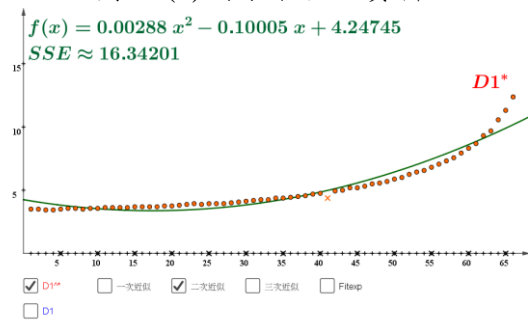


圖 39(d)二次近似

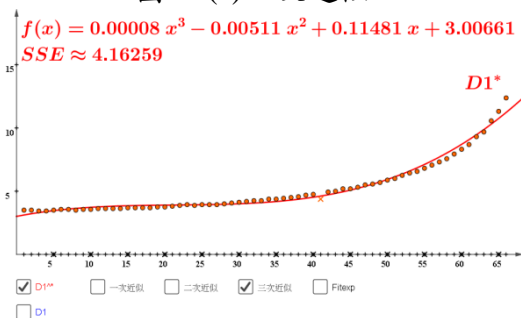


圖 39(e)三次近似

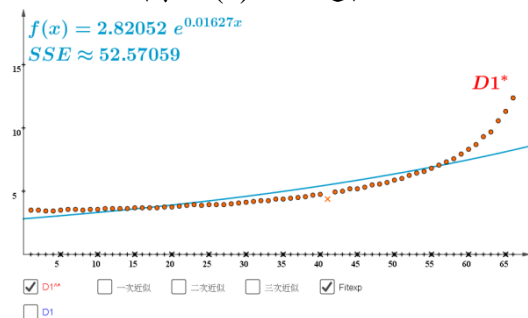


圖 39(f)指數近似

圖 40 為 D1 數據之分析，共 66 筆資料，刪除不合趨勢的第 45 筆與第 46 筆，再對剩下的資料做估計，並勾選需要呈現的結果。一次近似求出迴歸直線方程式為

$f(x) = 0.05581x + 2.6785$ ，最小平方誤差總合是 12.78535。二次近似的最適合函數為

$f(x) = 0.00131x^2 - 0.03247x + 3.67659$ ，此時最小平方誤差總合是 0.97445。三次近似的最適合函數為  $f(x) = 0.0002x^3 - 0.00075x^2 + 0.02289x + 3.35875$ ，此時最小平方誤差總合是 0.17961。指數近似的最適合函數為  $f(x) = 2.99063e^{0.01164x}$ ，此時最小平方誤差總合是 8.21671。最後我們取誤差最小的三次近似的最適合函數。

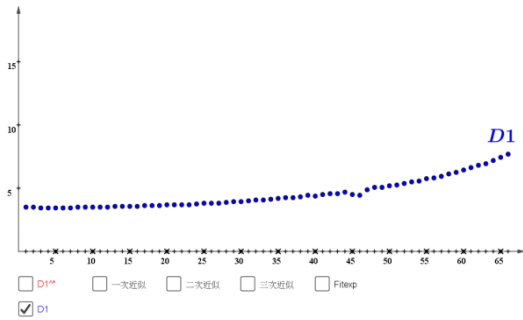


圖 40(a)旋轉台 100 條/mm

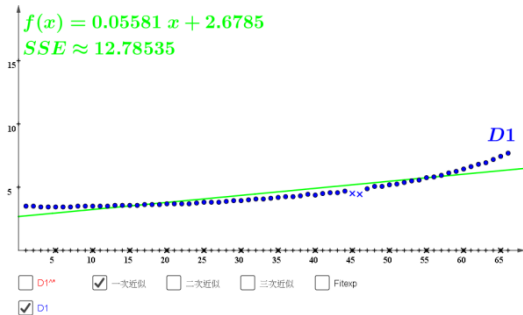


圖 40(c)一次近似

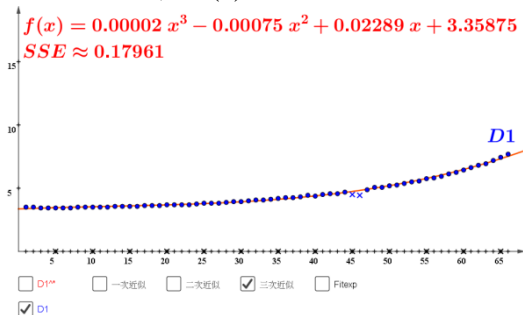


圖 40(e)三次近似

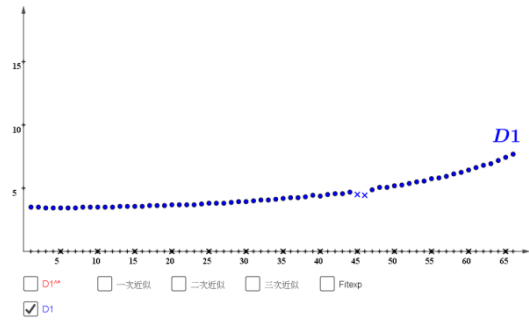


圖 40(b)刪除不合理資料

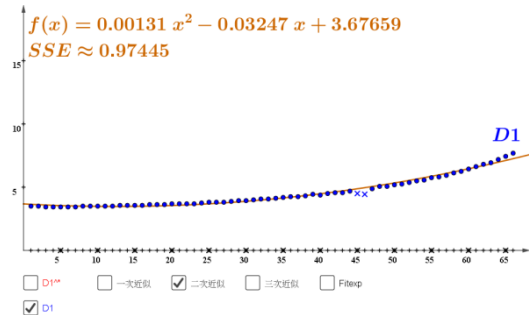


圖 40(d)二次近似

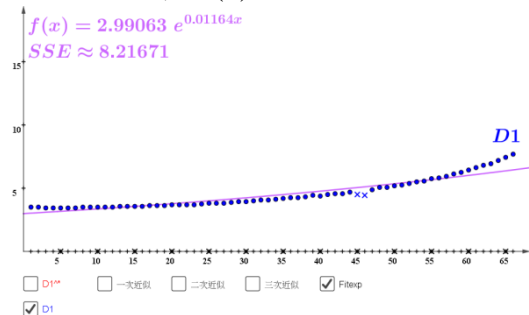


圖 40(f)指數近似

接著討論實驗 2 單擺 500mm 光柵片的 D1\*(圖 41)與 D1(圖 42)為例，共 60 筆資料，以下為有效位數為小數點下第 5 位。x 軸代表起始度數，每次增加 0.5°，y 軸單位為公分。我們使用最小平方法，找出常見函數的最小平方誤差總合(SSE)。首先從散布圖中，把不合理的資料去除，D1\*是第 53 筆，接著對剩下的資料做估計，並勾選需要呈現的結果。以一次近似求出迴歸直線方程式為  $f(x) = 0.28943x + 20.07889$ ，最小平方誤差總合是 22.41785。二次近似的最適合函數為  $f(x) = 0.00869x^2 + 0.03435x + 21.30798$ ，此時最小平方誤差總合是 2.28259。三次近似的

最適合函數為  $f(x) = 0.00024x^3 - 0.00173x^2 + 0.15625x + 21.02097$ ，此時最小平方誤差總合是 1.42166。指數近似的最適合函數為  $f(x) = 20.37531e^{0.01171x}$ ，此時最小平方誤差總合是 15.51793。最後我們取誤差最小的三次近似的最適合函數。

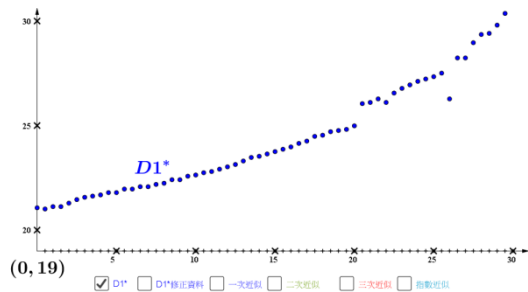


圖 41(a)單擺 500 條/mm

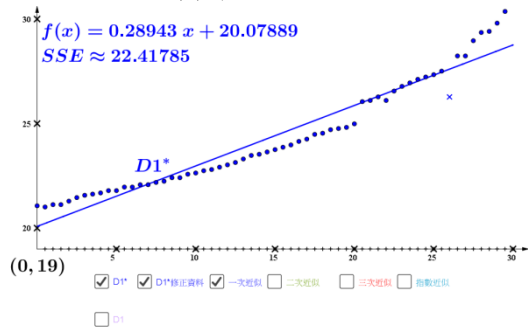


圖 41(c)一次近似

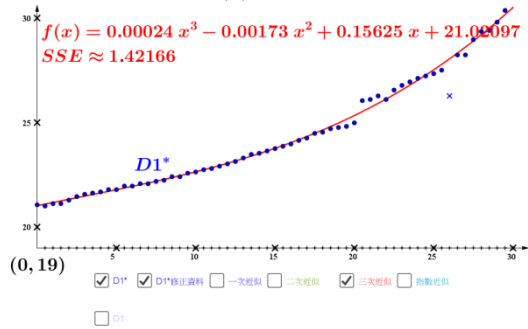


圖 41(e)三次近似

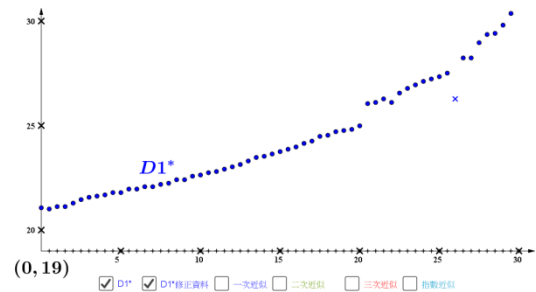


圖 41(b)刪除不合理資料

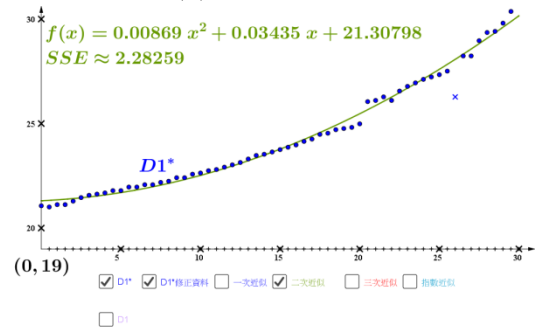


圖 41(d)二次近似

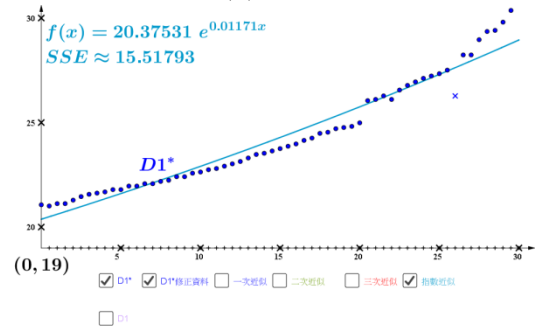


圖 41(f)指數近似

圖 42 為 D1 數據之分析，共 60 筆資料，刪除不合趨勢的第 41 筆與第 42 筆，再對剩下的資料做估計，並勾選需要呈現的結果。一次近似求出迴歸直線方程式為

$f(x) = 0.09797x + 19.47332$ ，最小平方誤差總合是 1.74285。二次近似的最適合函數為

$f(x) = 0.00286x^2 + 0.01914x + 19.82784$ ，此時最小平方誤差總合是 0.19324。三次近似的最適合函數為

$f(x) = 0.0001x^3 + 0.00246x^2 + 0.02348x + 19.81844$ ，此時最小平方誤差總合是



0.19237。指數近似的最適合函數為  $f(x) = 19.50928e^{0.000467x}$ ，此時最小平方誤差總合是 1.50763。最後我們取誤差最小的三次近似的最適合函數。

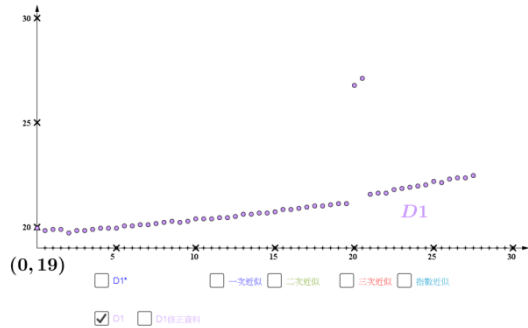


圖 42(a)單擺 500 條/mm



圖 42(c)一次近似

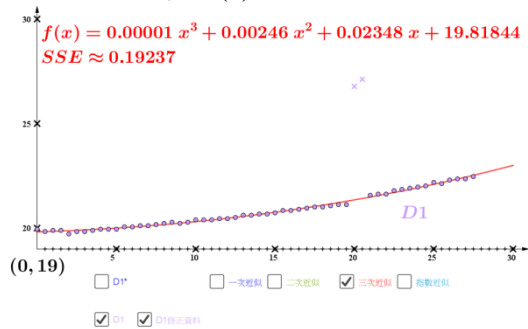


圖 42(e)三次近似

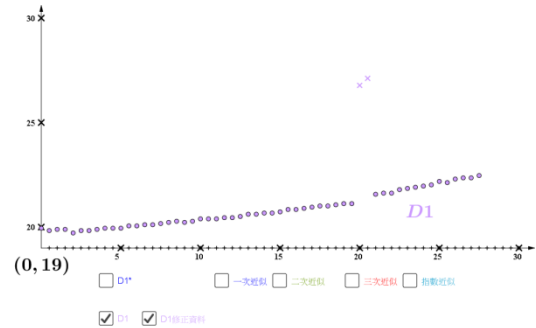


圖 42(b)刪除不合理資料

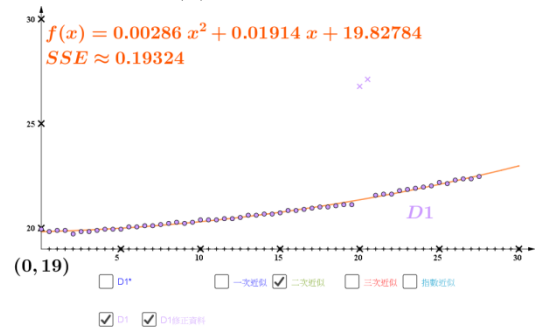


圖 42(d)二次近似

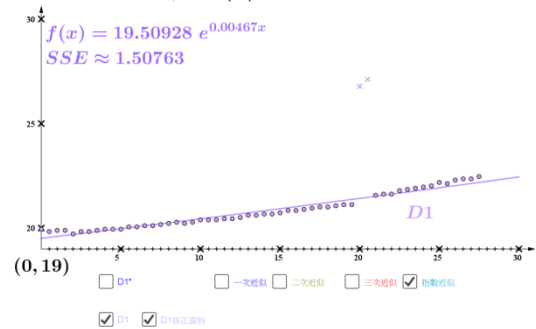


圖 42(f)指數近似

#### (四) 震動造成的光柵系統擺動之動態變化

##### 1. 以 Tracker 紀錄光柵系統擺動之光點動態變化

###### A、第一代慣性單擺震動光柵繞射動態量測

我們將 tracker 跑出的資料放到  $x-y-t$  散布圖， $x$  與  $y$  的刻度相同，縱軸為  $x$  方向位移，單位為公尺(m)，並以不同視角呈現觀察。發現  $y$  方向的變化跟  $x$  方向的變化是很小的。以下是各組數據，由於屏幕尺寸限制，第一代單擺 600 條/mm 的  $D1^*$  無法測得。

(1) 600 條/mm：分析結果如圖 43 所示

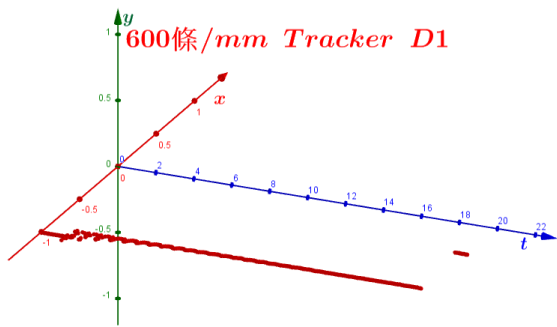


圖 43 (a)：單擺 600 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

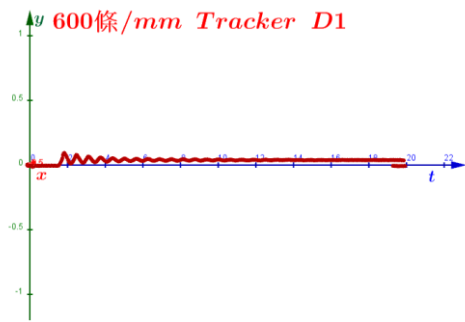


圖 43(b)：單擺 600 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

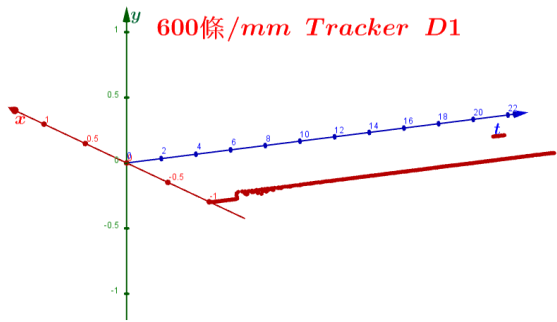


圖 43 (c)：單擺 600 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

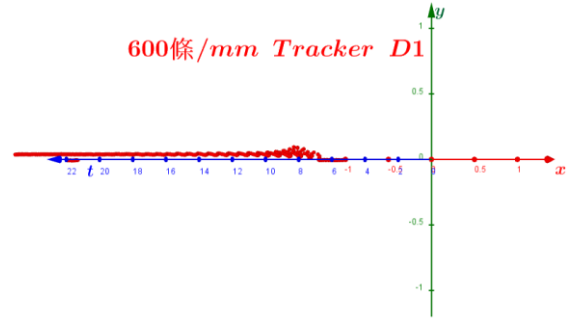


圖 43(d)：單擺 600 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

(2) 500 條/mm：分析結果如圖 44 所示

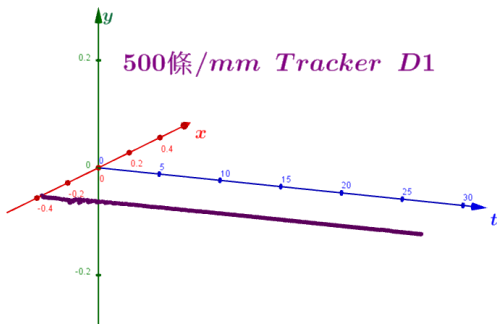


圖 44(a)單擺 500 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

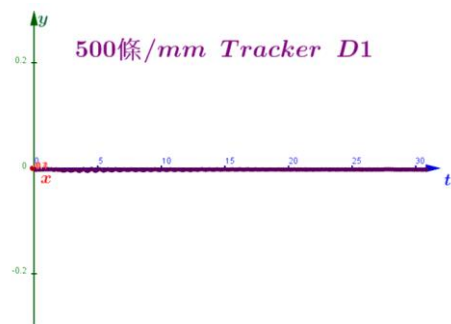


圖 44(b)單擺 500 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

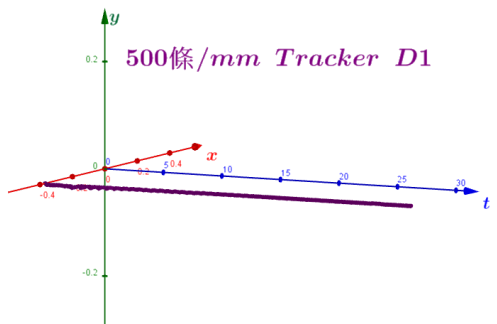


圖 44 (c)單擺 500 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

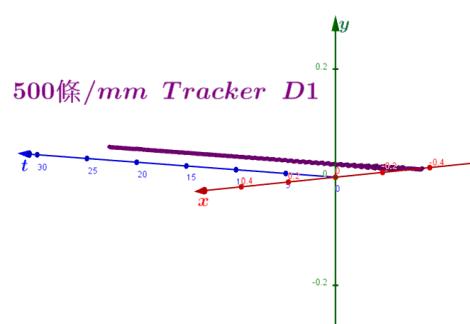


圖 44 (d)單擺 500 條/mm D1  
 $x-y-t$  散布圖

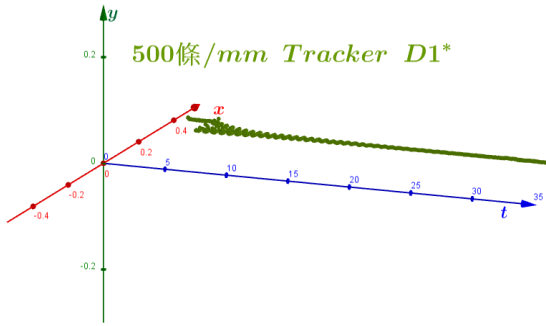


圖 44(e)單擺 500 條/mm D1\*  
x-y-t 散布圖

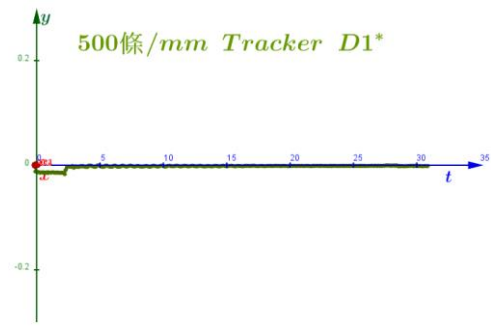


圖 44(f)單擺 500 條/mm D1\*  
x-y-t 散布圖

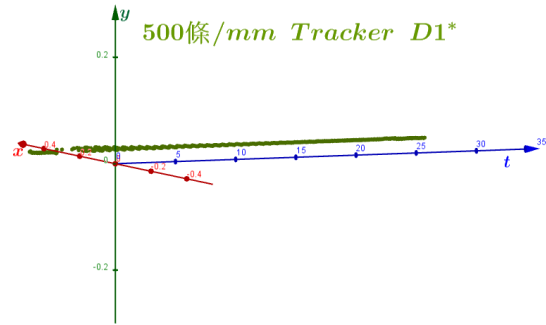


圖 44 (g)單擺 500 條/mm D1\*  
x-y-t 散布圖

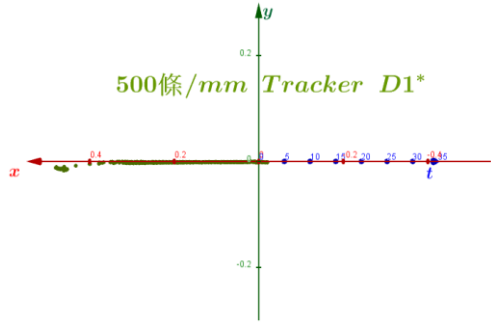


圖 44(h)單擺 500 條/mm D1\*  
x-y-t 散布圖

(3) 300 條/mm：分析結果如圖 45 所示

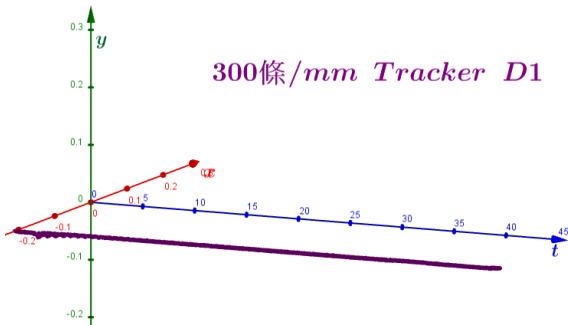


圖 45 (a)單擺 300 條/mm D1  
x-y-t 散布圖

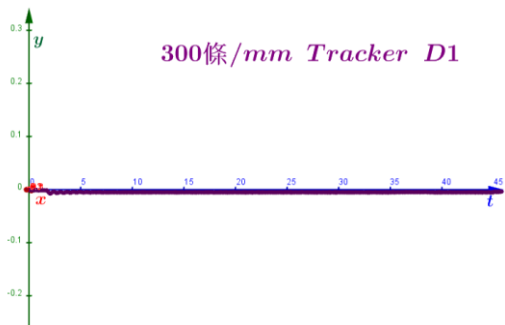


圖 45 (b)單擺 300 條/mm D1  
x-y-t 散布圖

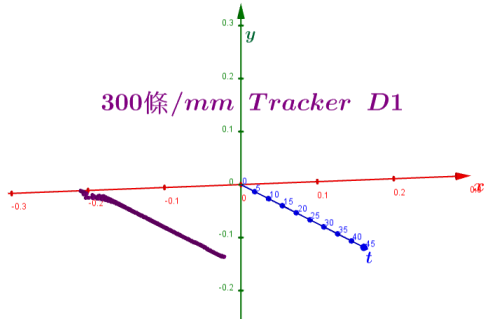


圖 45 (c)單擺 300 條/mm D1  
x-y-t 散布圖

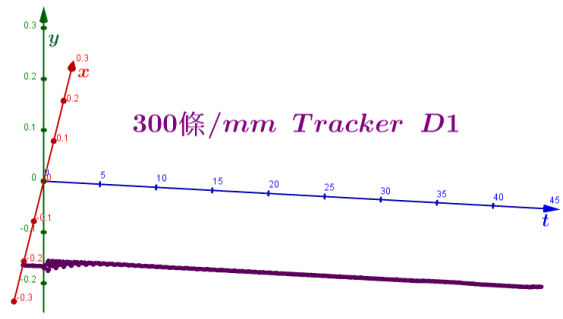


圖 45(d)單擺 300 條/mm D1  
x-y-t 散布圖

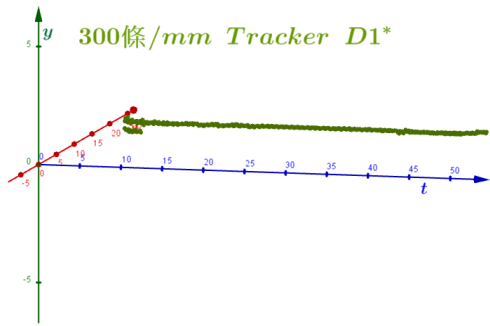


圖 45 (e)單擺 300 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

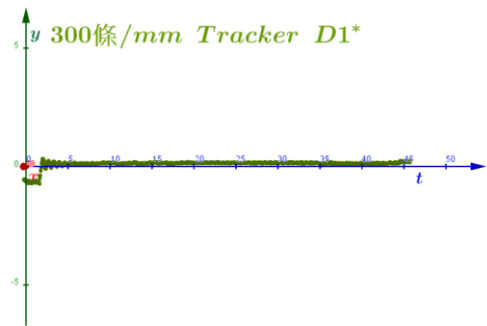


圖 45(f)單擺 300 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

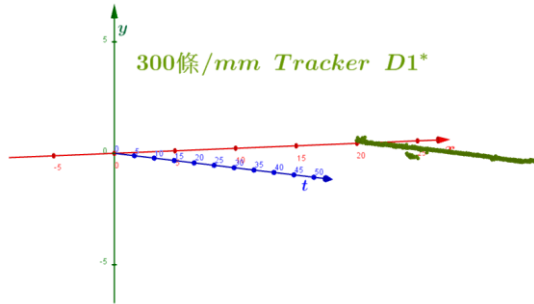


圖 45(g)單擺 300 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

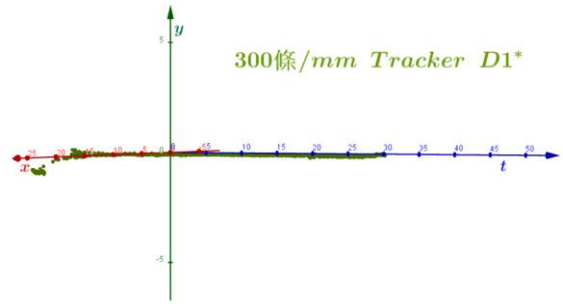


圖 45(h)單擺 300 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

(4) 100 條/mm：分析結果如圖 46 所示

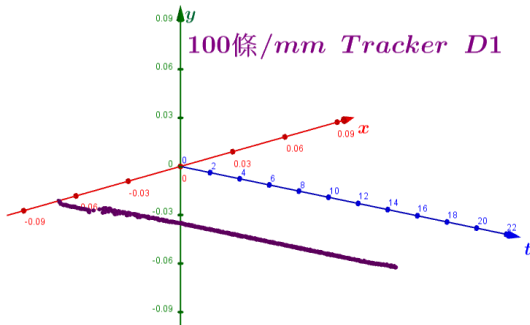


圖 46 (a)單擺 100 條/mm  $D1$   
 $x-y-t$  散布圖

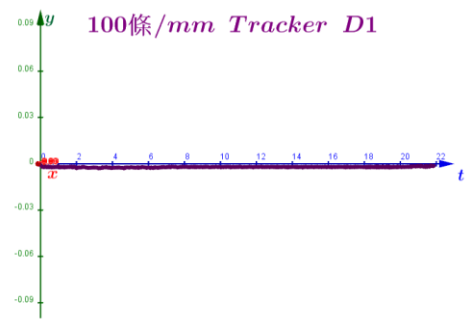


圖 46(b)單擺 100 條/mm  $D1$   
 $x-y-t$  散布圖

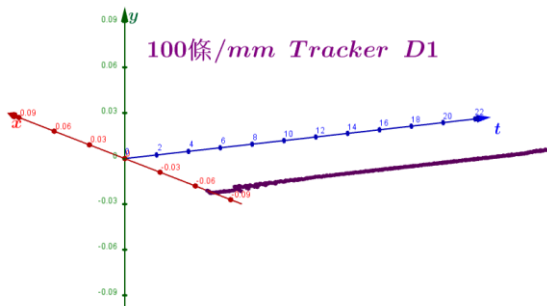


圖 46 (c)單擺 100 條/mm  $D1$   
 $x-y-t$  散布圖

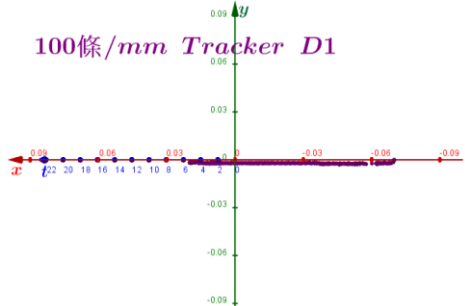


圖 46(d)單擺 100 條/mm  $D1$   
 $x-y-t$  散布圖

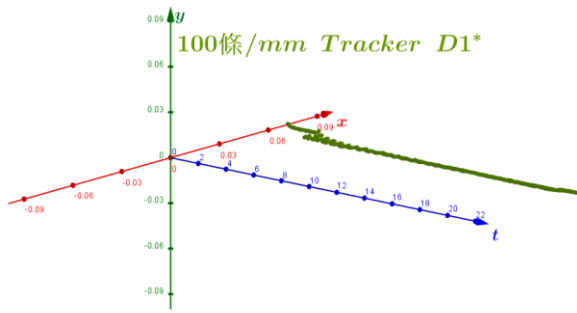


圖 46 (e)單擺 100 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

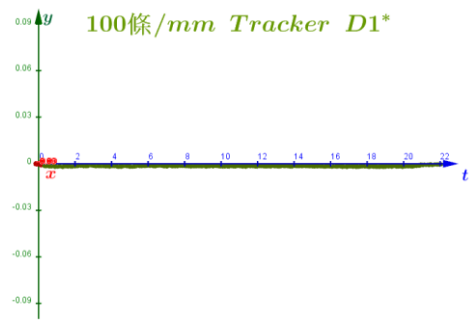


圖 46(f)單擺 100 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

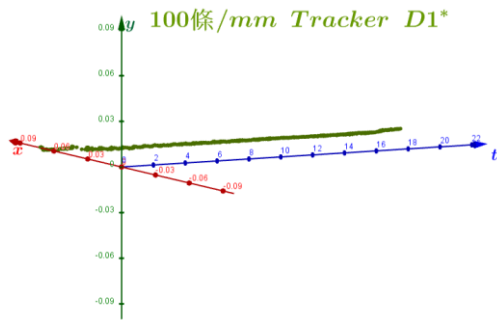


圖 46 (g)單擺 100 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

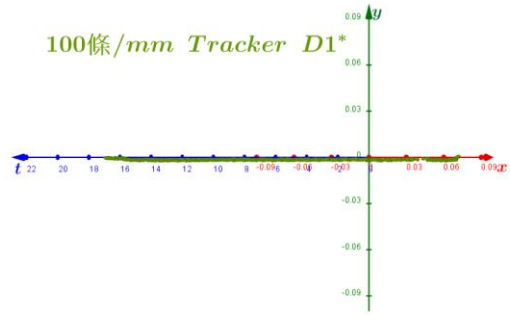


圖 46(h)單擺 100 條/mm  $D1^*$   
 $x-y-t$  散布圖

## B、第二代慣性單擺震動光柵繞射動態量測

### (1) 600 條/mm：

橫軸單位為秒，每 0.04 秒統計一次，共 636 筆資料。縱軸為  $x$  方向位移，單位為公尺(m)。我們先將 tracker 抓到的資料輸入，做出  $D1$  與  $D1^*$  的散布圖，如圖 47(a)，再分別取出  $D1^*$  的局部最大值與  $D1$  的局部最小值，如圖 47(b)與(c)。接著以最小平方方法找出滿足  $D1^*$  局部最大值且  $0 \leq t \leq 25.36$  的五次近似最適合函數

$f_1(x) = 0.00005x^4 - 0.00159x^3 + 0.02441x^2 - 0.19416x + 1.15507$ ；找出滿足  $D1$  局部最小值的

五次近似最適合函數  $f_2(x) = -0.00001x^4 + 0.00027x^3 - 0.00423x^2 + 0.03735x - 0.54486$ ，如圖

47(d)所示。

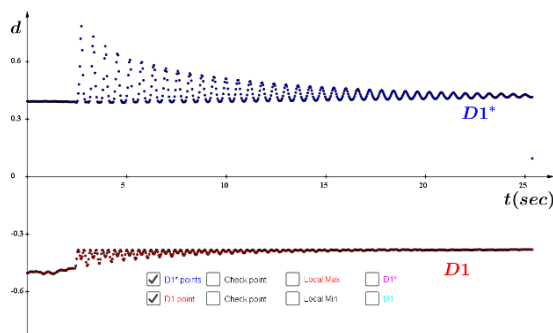


圖 47(a)  $D1$  與  $D1^*$  的  $x-t$  散布圖

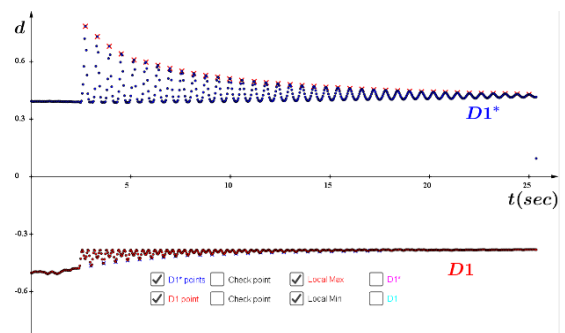


圖 47 (b)局部極值

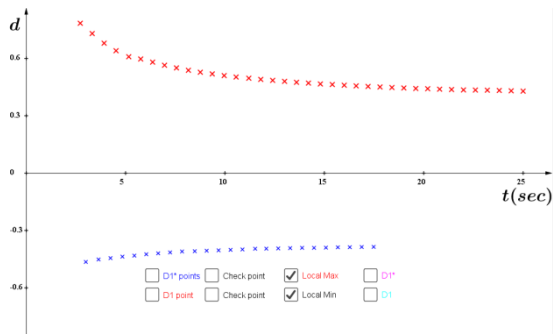


圖 47 (c)局部極值

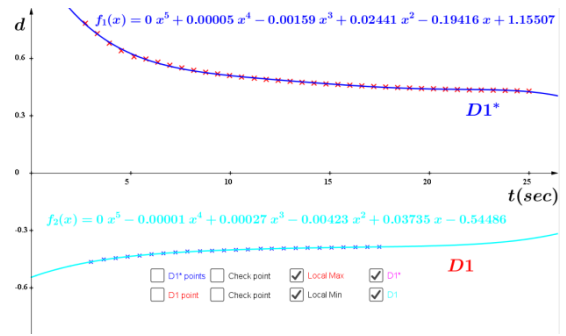


圖 47 (d)最適合函數

我們分別把  $D1$  與  $D1^*$  的三維  $x-y-t$  散布圖放在圖 48，這裡可以很清楚看到  $y$  方向的變化對應  $x$  方向的變化是很微小的。

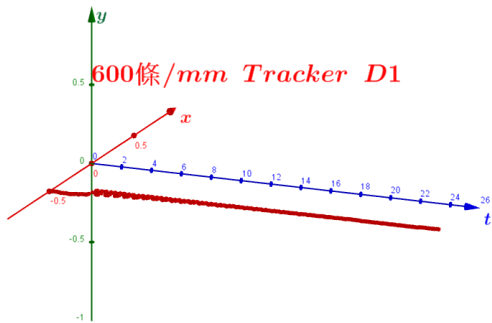


圖 48(a)  $D1$   $x-y-t$  散布圖

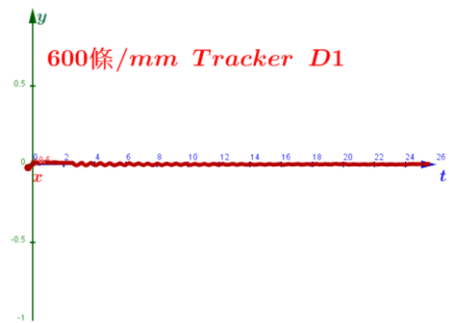


圖 48(b)  $D1$   $x-y-t$  散布圖

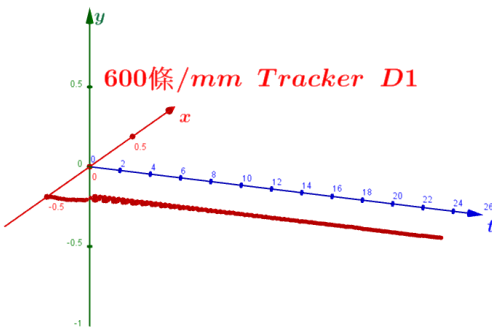


圖 48 (c)  $D1$   $x-y-t$  散布圖

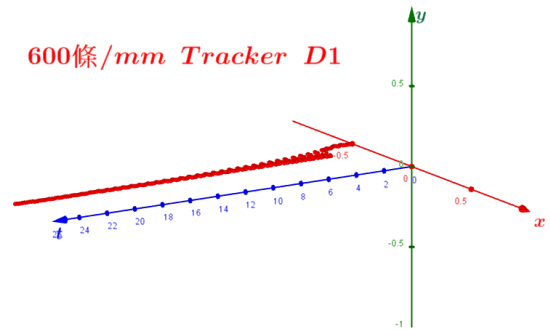


圖 48(d)  $D1$   $x-y-t$  散布圖

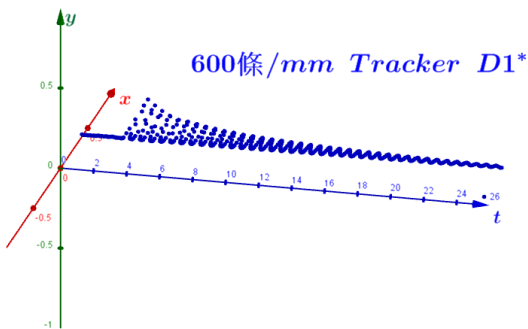


圖 48 (e)  $D1^*$   $x-y-t$  散布圖

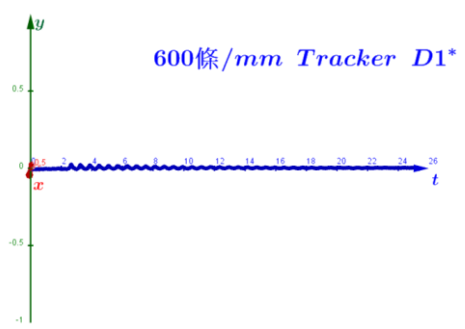


圖 48(f)  $D1^*$   $x-y-t$  散布圖

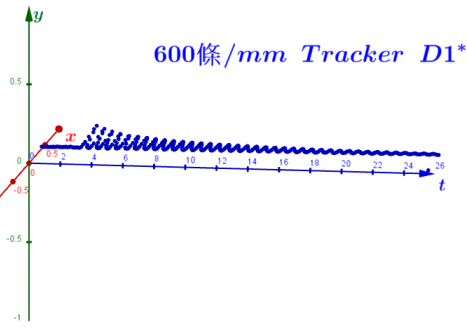


圖 48 (g)  $D1^*$   $x-y-t$  散布圖

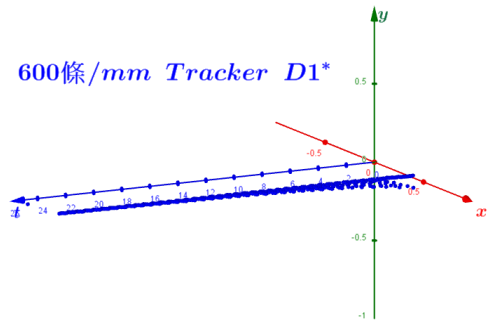


圖 48(h)  $D1^*$   $x-y-t$  散布圖

(2) 500 條/mm :

橫軸單位為秒，每0.04 秒統計一次， $D1$ 有 817 筆資料。縱軸為  $x$  方向位移，單位為公尺(m)。我們做出  $D1$ 的  $x-t$  散布圖，如圖 49(a)， $D1$ 的  $x-y-t$  散布圖 49(e)與 49(f)。再取出  $D1$ 的局部最小值，如圖 49(b)與(c)。接著以最小平方法找出滿足  $D1$ 局部最小值的五次近似最適合函數  $f(x) = 0.00004x^3 - 0.00082x^2 + 0.00859x - 0.34855$ ，如圖 49(d)所示。

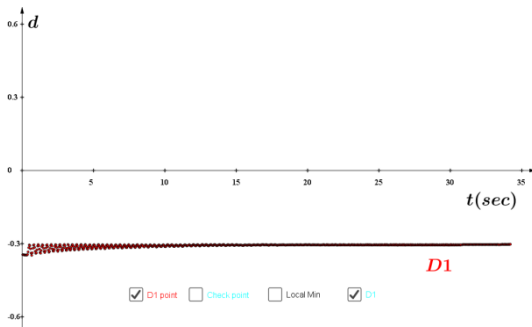


圖 49(a)  $D1$ 的  $x-t$  散布圖

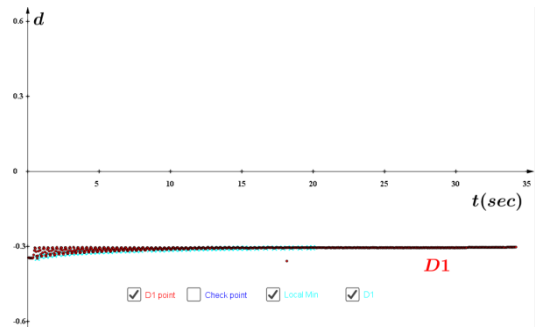


圖 49(b)局部極值

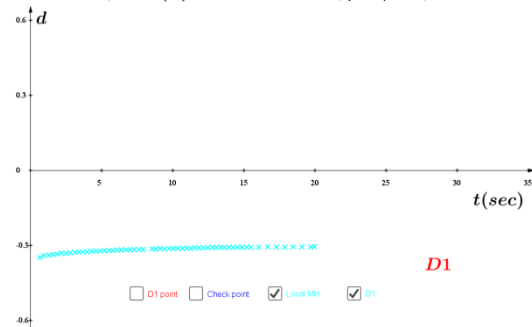


圖 49(c)局部極值

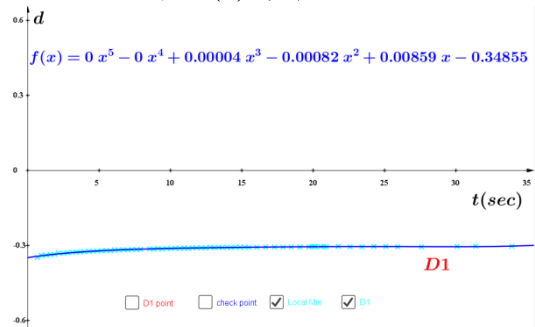


圖 49 (d)最適合函數

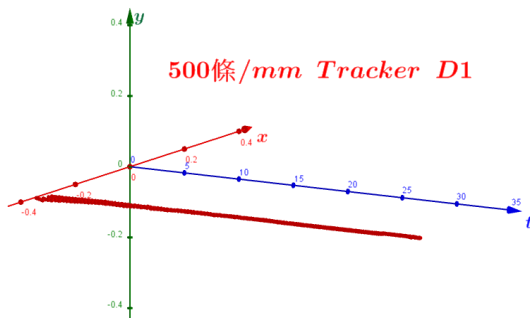


圖 49 (e)  $D1$ 的  $x-y-t$  散布圖

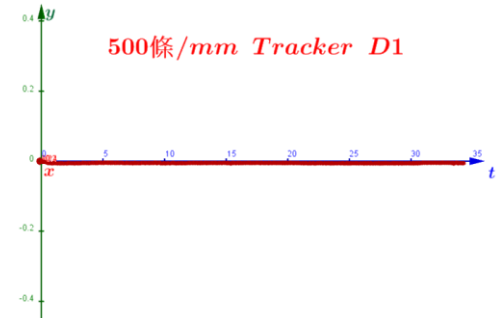


圖 49(f)  $D1$ 的  $x-y-t$  散布圖

(3) 300 條/mm :

橫軸單位為秒，每 0.04 秒統計一次， $D1^*$  有 1091 筆資料， $D1$  有 1087 筆資料。縱軸為  $x$  方向位移，單位為公尺(m)。我們做出  $D1$  與  $D1^*$  的散布圖，如圖 50 (a)，再分別取出  $D1^*$  的局部最大值與  $D1$  的局部最小值，如圖 50(b)與(c)。接著以最小平方法找出滿足  $D1^*$  局部最大值，且  $0 \leq t \leq 43.56$  的五次近似最適合函數： $f_1(x) = -0.00003x^3 + 0.00083x^2 - 0.01165x + 0.17527$ ；找出滿足局部最小值的五次近似函數  $f_2(x) = 0.00001x^3 - 0.00035x^2 + 0.00488x - 0.12613$ ，如圖 50(d)所示。

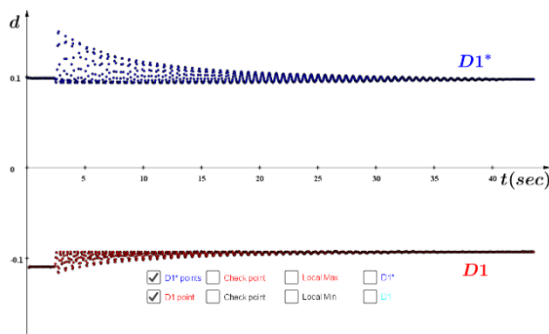


圖 50(a)  $D1$  與  $D1^*$  的  $x-t$  散布圖

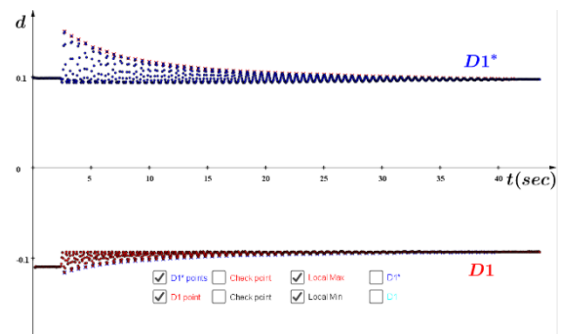


圖 50(b) 局部極值

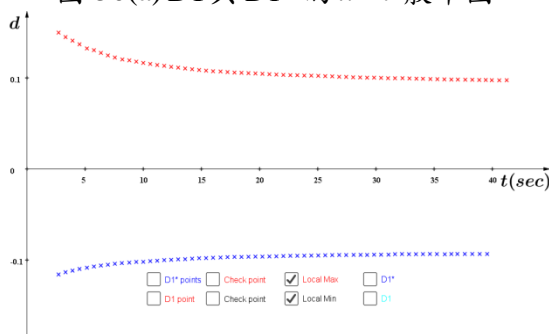


圖 50 (c) 局部極值

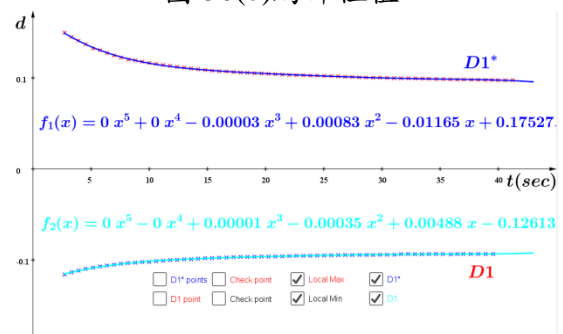


圖 50(d) 最適合函數

我們分別把  $D1$  與  $D1^*$  的三維  $x-y-t$  散布圖放在圖 51，這裡可以很清楚看到  $y$  方向的變化對應  $x$  方向的變化是很微小的。

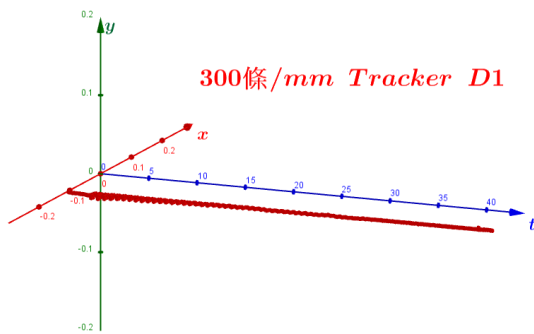


圖 51(a)  $D1$   $x-y-t$  散布圖

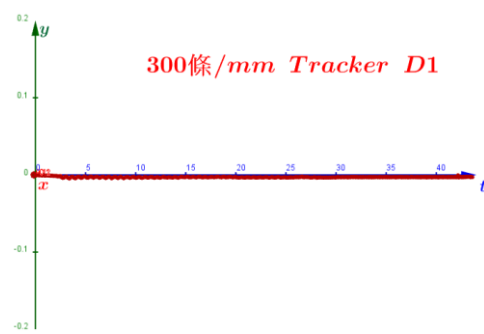


圖 51(b)  $D1$   $x-y-t$  散布圖



300條/mm Tracker D1

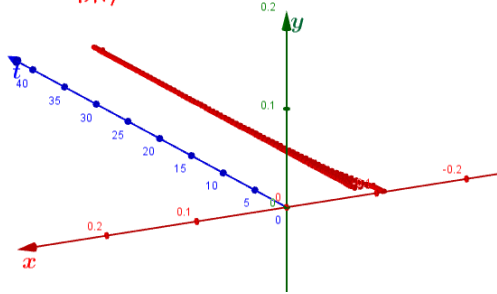


圖 51 (c) D1  $x-y-t$  散布圖

300條/mm Tracker D1

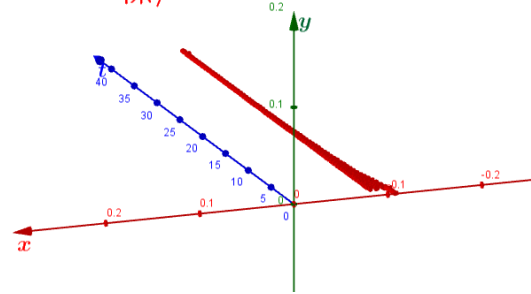


圖 51(d) D1  $x-y-t$  散布圖

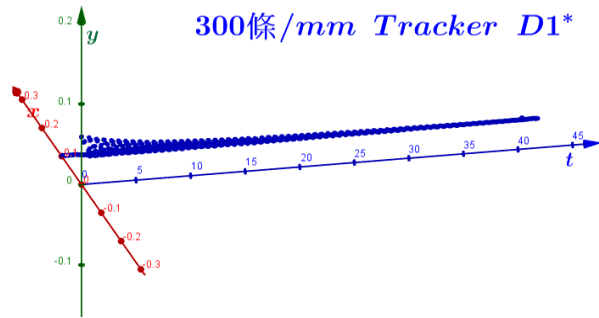


圖 51 (e) D1\*  $x-y-t$  散布圖

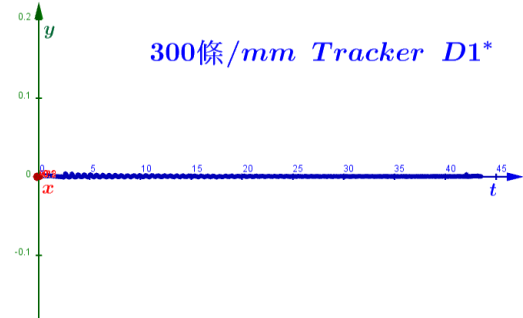


圖 51(f) D1\*  $x-y-t$  散布圖

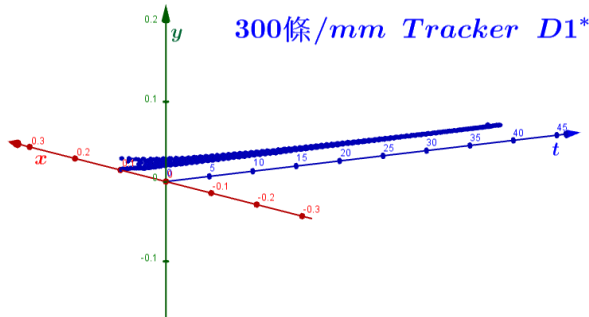


圖 51 (g) D1\*  $x-y-t$  散布圖

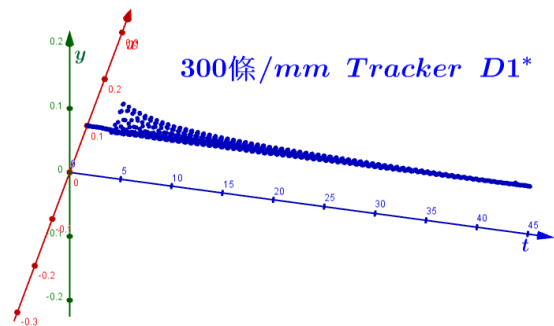


圖 51(h) D1\*  $x-y-t$  散布圖

(3) 100 條/mm :

橫軸單位為秒，每 0.04 秒統計一次，有 712 筆資料。縱軸為  $x$  方向位移，單位為公尺(m)。

我們做出  $D1$  與  $D1^*$  的散布圖，如圖 52，因為變動幅度太小，所以我們暫不分析此組資料。

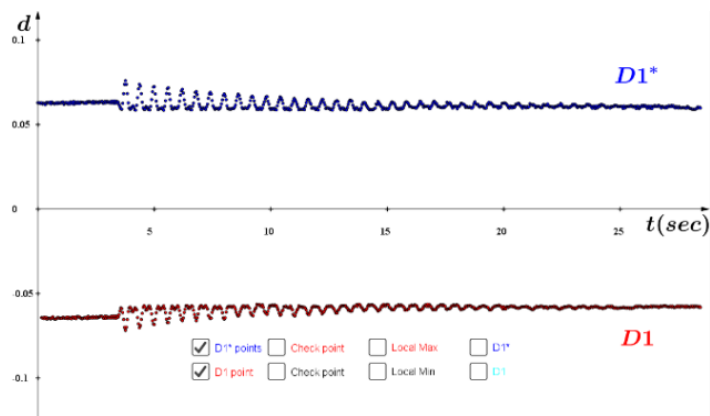


圖 52  $D1$  與  $D1^*$  的  $x-t$  散布圖

## 2. 自製加速度測量裝置校正

### A、以阿特伍德機檢驗自製加速度測量裝置—固定加速度

經調整配重與 7 次測量結果，發現自製加速度測量裝置所使用的感測器難以正確獲得阿特伍德機所產生的固定加速度量值，僅有在裝置撞擊地面軟墊時，會明顯記錄到瞬間衝擊力造成的加速度數值，如圖 53 所示。

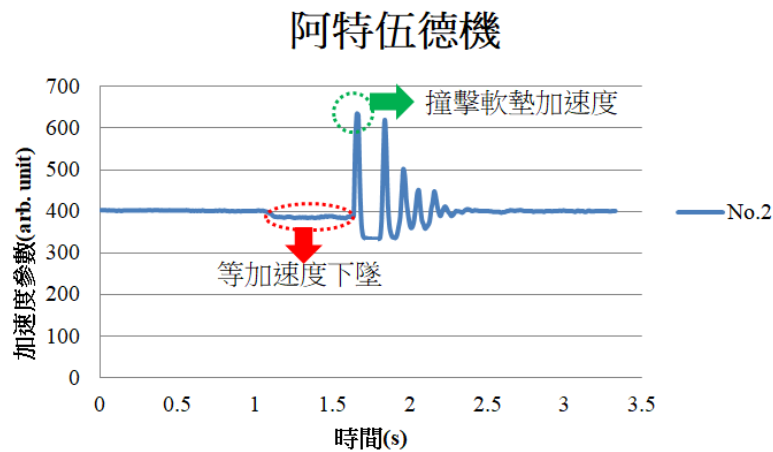


圖 53 阿特伍德機測量自製加速度測量裝置

### B、以簡單諧振檢驗自製加速度測量裝置—變動加速度

為了測量如同地震搖晃過程的變動加速度，改用彈簧的簡諧振盪來檢驗自製加速度測量裝置，如圖 54 所示。由實驗數據(振幅 0.06 m、週期 0.95 秒)可計算理論加速度極大值約為  $2.62 \text{ m/s}^2$ ，可換算出自製加速度測量裝置的參數換算比率為 0.187。

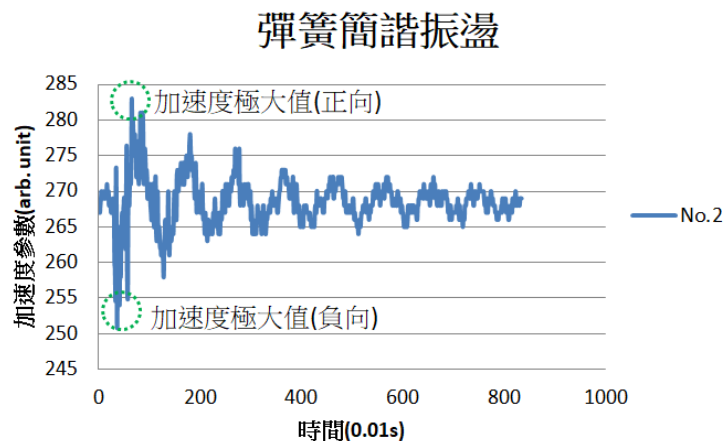


圖 54 彈簧簡諧振盪測量自製加速度測量裝置

### (五) 光柵繞射震盪連結實際結構震動之加速度反應

以人工方式震動鋁擠料框，使慣性單擺發生擺動，並將 Tracker 數據中繞射光點之間距變動數值與結構震動之加速度數值相比較，如圖 55，可以發現繞射光點之間距變動趨勢與結構震動之加速度數值趨勢相當一致。

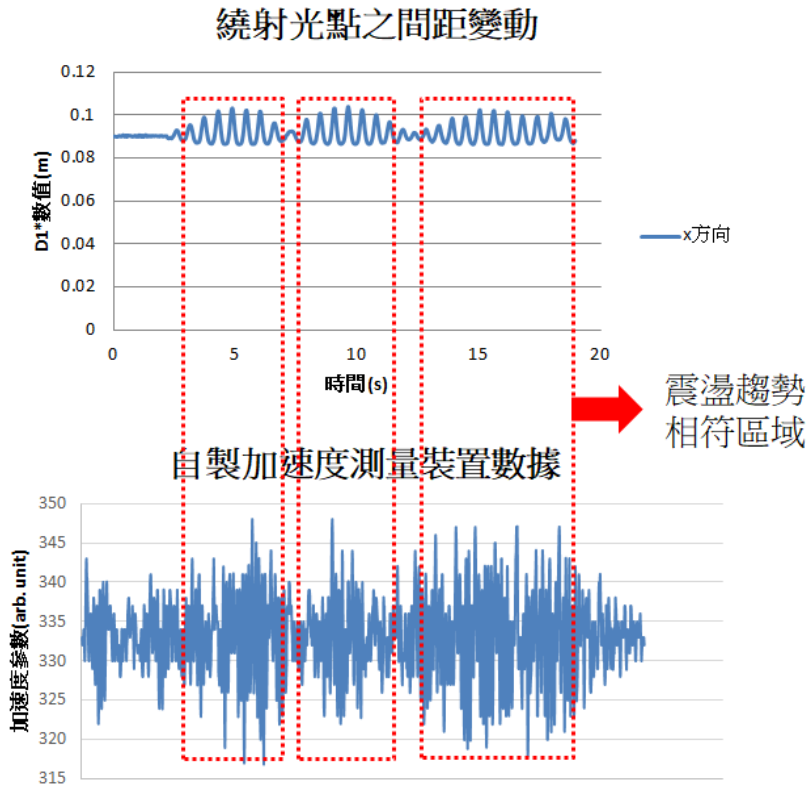


圖 55 繞射光點之間距變動與結構加速度變動關係比較圖

### (六) 以連續震動平台測試光柵繞射光點之震盪反應

#### 1. 以 Arduino 系統之無線傳輸方式紀錄連續震動平台之加速度

如圖 56 所示，為簡化系統之數據傳輸線，於 Arduino 系統加裝無線傳輸模組(NRF24L01+)，以無線傳輸方式將加速度感測 MEMS 晶片數據加以記錄，以檢驗平台表面與鋁擠料框結構之加速度訊號。第 3 代光柵繞射震動測量裝置與震動平台架設關係如圖 57 所示，第 3 代裝置外框結構長 28 公分、寬 12 公分、高 23 公分，單擺裝置以鋼軸及培林組成，並懸掛於內框上端，雷射光距離單擺裝置 6 公分，屏幕距離單擺裝置為 22 公分。加速度感測 MEMS 晶片在不同安裝位置下，可分別測量平台表面連續震動與鋁擠料框結構震動之加速度數據，其測量 5 種震動強度之結果如圖 58、圖 59 所示。由數據資料可以看出，平台表面與鋁擠料框結構之震動加速度兩者在同樣的儀器數值下，會有相近的加速度訊號(週期與 g

值)，表示第3代震動模型在震動平台上，可以反應出不同強度的平台震動加速度，不會出現明顯的鋁擠料框結構自然振動頻率之影響，顯見強化接點之穩固結構能有有效的維持結構剛性，並與震動測試平台達成同步連續震動。故後續討論結構上單擺運動造成繞射光點影像變動實驗中，Tracker 所測量之數據可反應出震動平台在不同強度之震動訊號。



圖 56 加裝無線傳輸模組之加速度感測 Arduino 系統

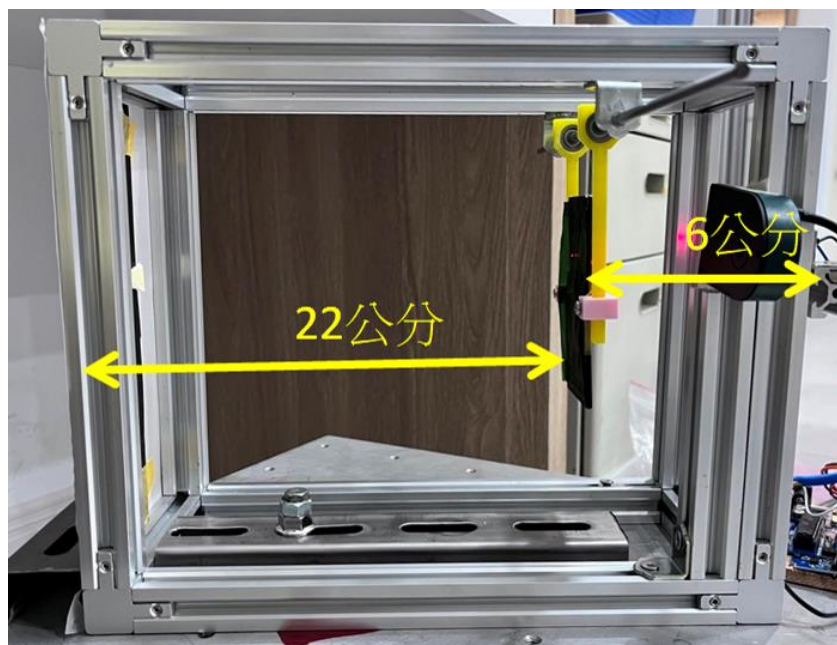


圖 57 安裝於震動平台之第3代光柵繞射震動測量裝置架設圖

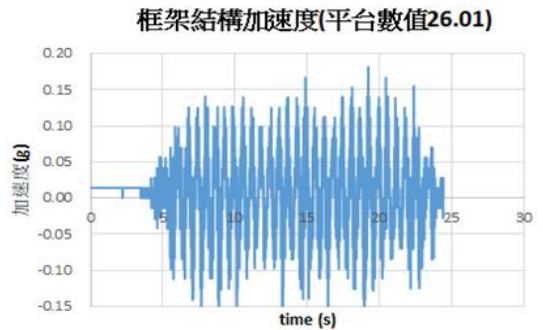
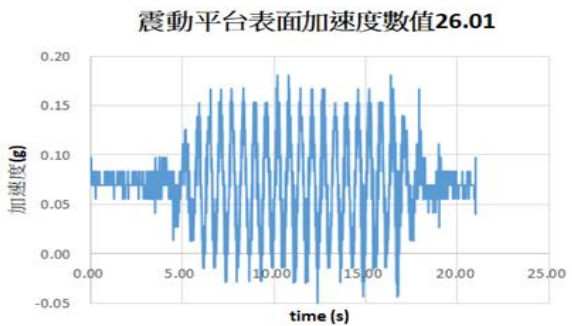
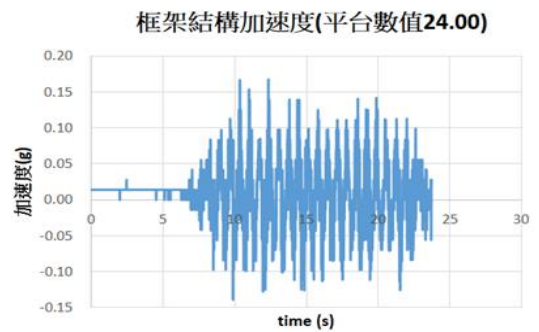
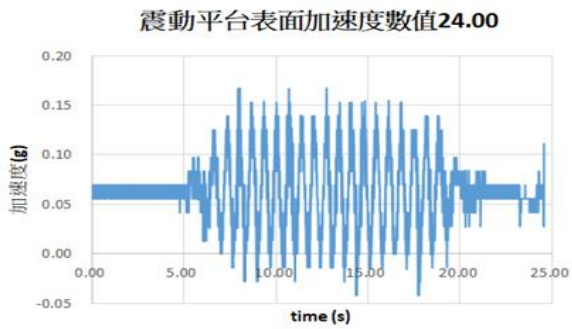
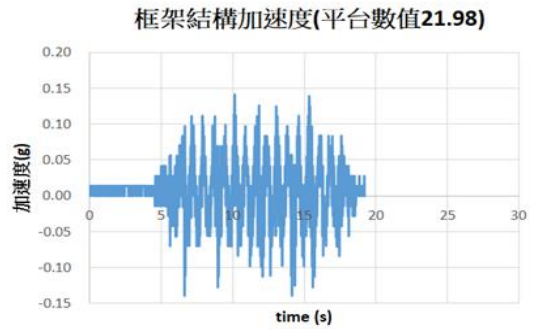
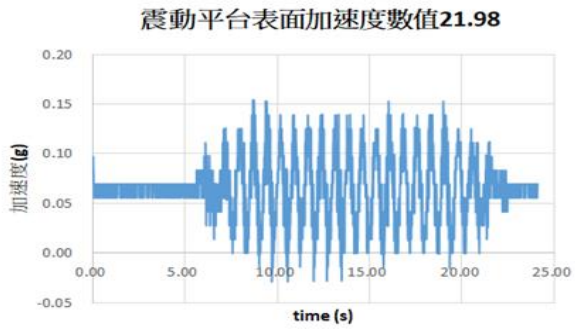
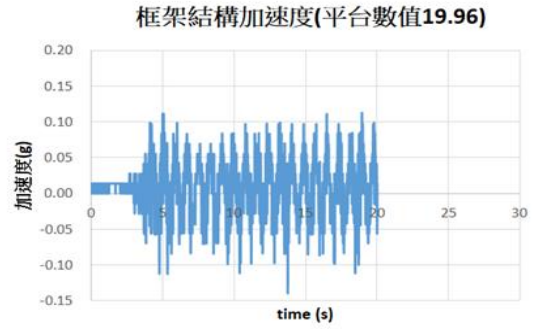
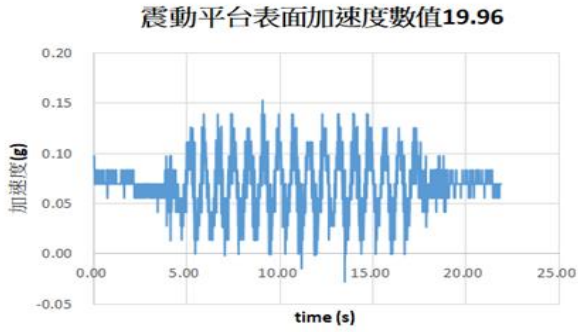
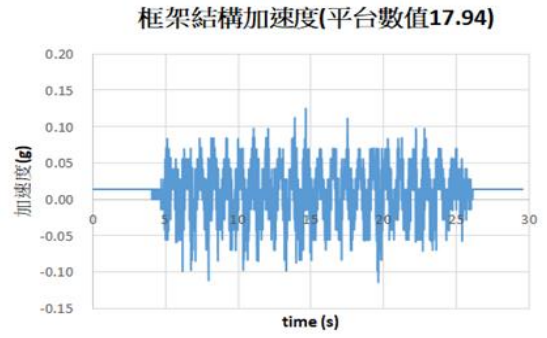
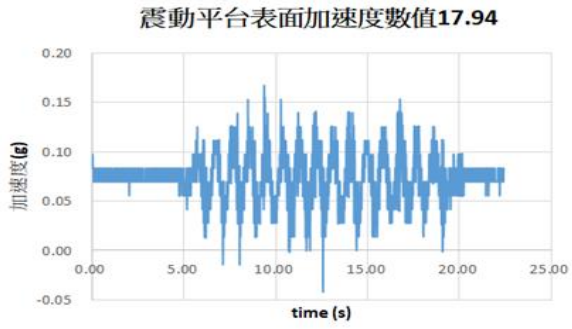


圖 58 MEMS 所紀錄之平台表面連續震動加速度數據

圖 59 MEMS 所紀錄之鋁擠料框結構連續震動加速度數據

## 2.消除影像紀錄裝置與結構之相對運動的光學影響及訊號分析

由於測試平台往復震動下，影像紀錄裝置與結構若有相對運動，則會產生光學上放大或縮小之影響，故將 IPEVO 4K 攝影機固定於鋁擠料框結構上，如圖 60 所示，降低後續 Tracker 分析繞射光點之影響。

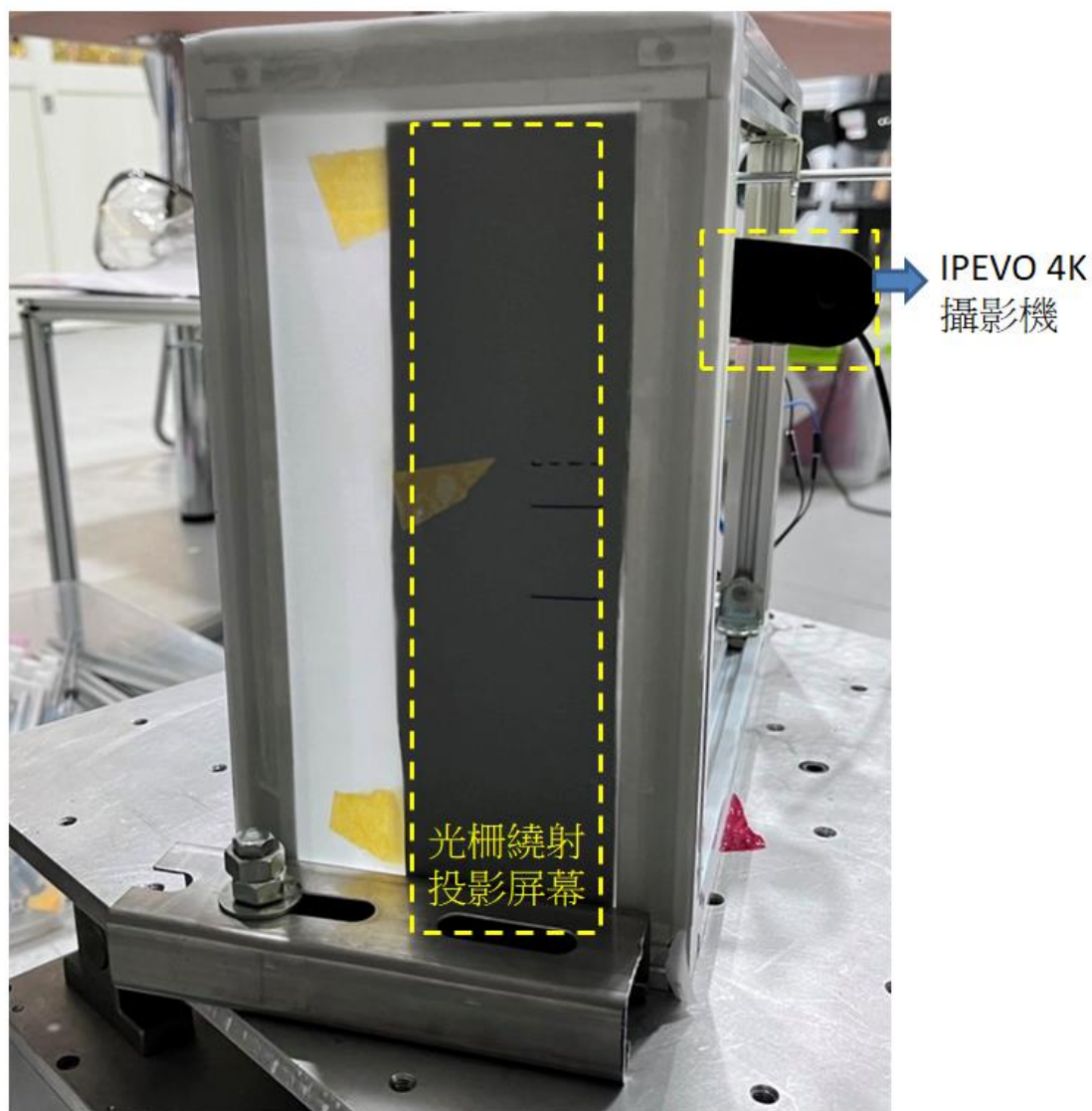
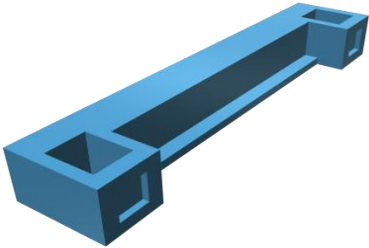
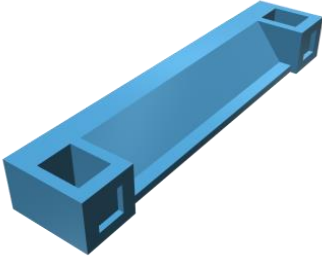
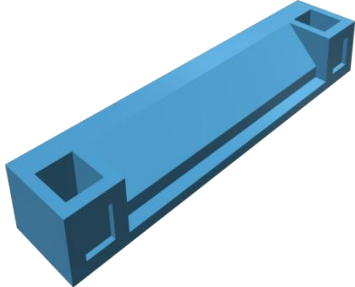
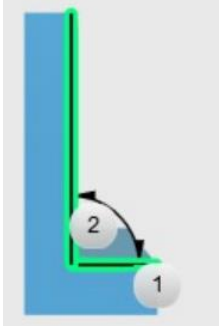
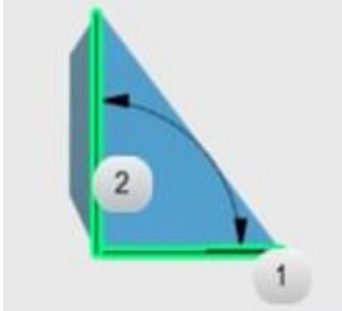
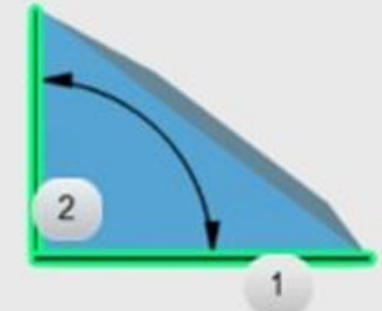


圖 60 繞射光點投影屏幕與 IPEVO 4K 攝影機皆固定於鋁擠料框結構上

將屏幕上繞射光點影像變化訊號以 IPEVO 4K 攝影機記錄，並利用 Tracker 進行分析。為了驗證第 3 代光柵繞射震動裝置震動響應效果，單擺結構可更換 3 種傾斜角度的光柵片載台，其規格圖如表 3 所示。以 3D 列印製作之光柵片載台成之斜面即可將光柵片安裝於斜面(垂直斷面)上，並可隨單擺穩定擺動。

表 3 單擺結構可更換之各種光柵片傾斜角度的載台

| 垂直光柵片   | 中角度傾斜光柵片  | 大角度傾斜光柵片  |
|---|---|---|
|  |  |  |
|  |  |  |
| <p>1 : 2.60 mm</p> <p>2 : 7.50 mm</p>   | <p>1 : 6.13 mm</p> <p>2 : 7.50 mm</p>   | <p>1 : 7.55 mm</p> <p>2 : 5.57 mm</p>   |
| <p>垂直面</p>  | <p>斜面底角 51.4°</p>   | <p>斜面底角 36.9°</p>   |

光柵片安裝於不同角度之載台，可以發現繞射光點間距有明顯差異，即光柵片愈傾斜，繞射光點的間距愈大，此部分結果與先前實驗一所得之實驗結果相同。利用此種光柵繞射之特性，在單擺因結構震動而發生擺動的情況下，可以形成較明顯的光點間距變化，藉此提升影像紀錄的解析能力。由實驗所紀錄的影像，可發現整體裝置與攝影機並無相對運動，可知實驗過程中攝影機所記錄的屏幕影像不會有發生相對距離改變之放大或縮小效應。將屏幕上繞射光點影像變化訊號以 Tracker 進行分析，檢驗在測試平台 5 種不同震動強度下，搭配不同傾斜角度的光柵造成之光柵繞射光點變動趨勢，其分析結果如圖 61~圖 63 所示。

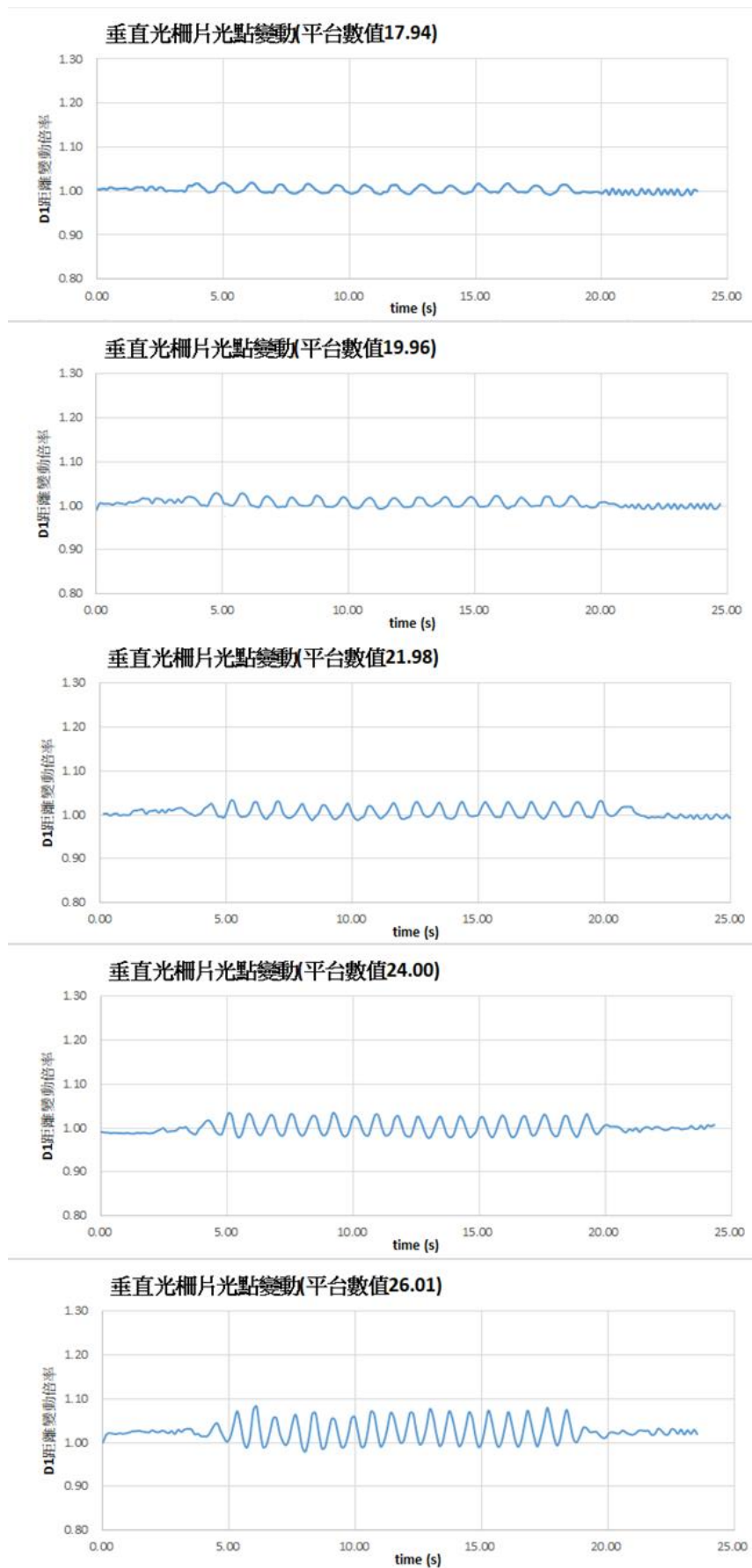


圖 61 垂直光柵片在不同震動強度下之繞射光點變動率



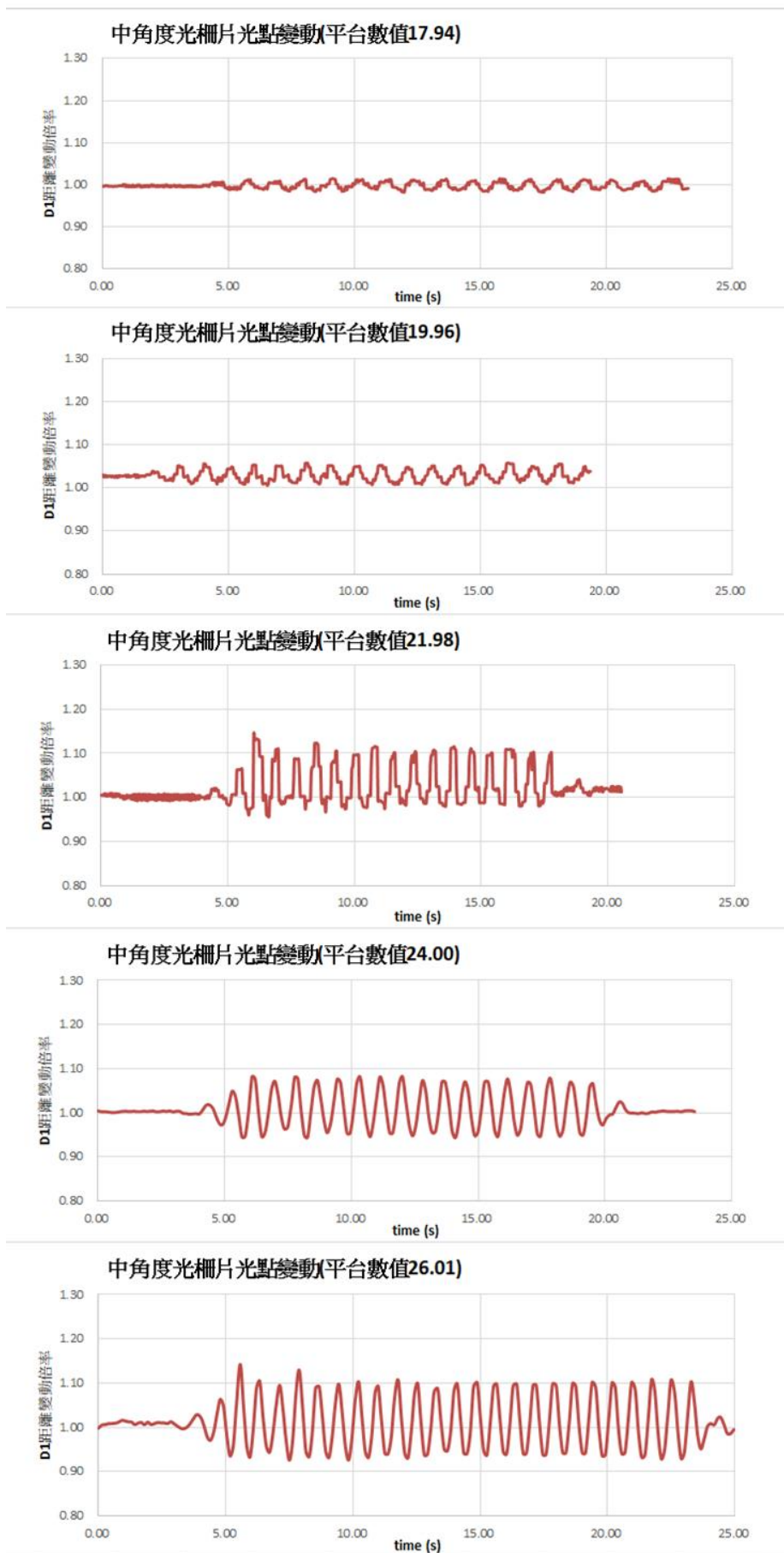


圖 62 中角度光柵片在不同震動強度下之繞射光點變動率

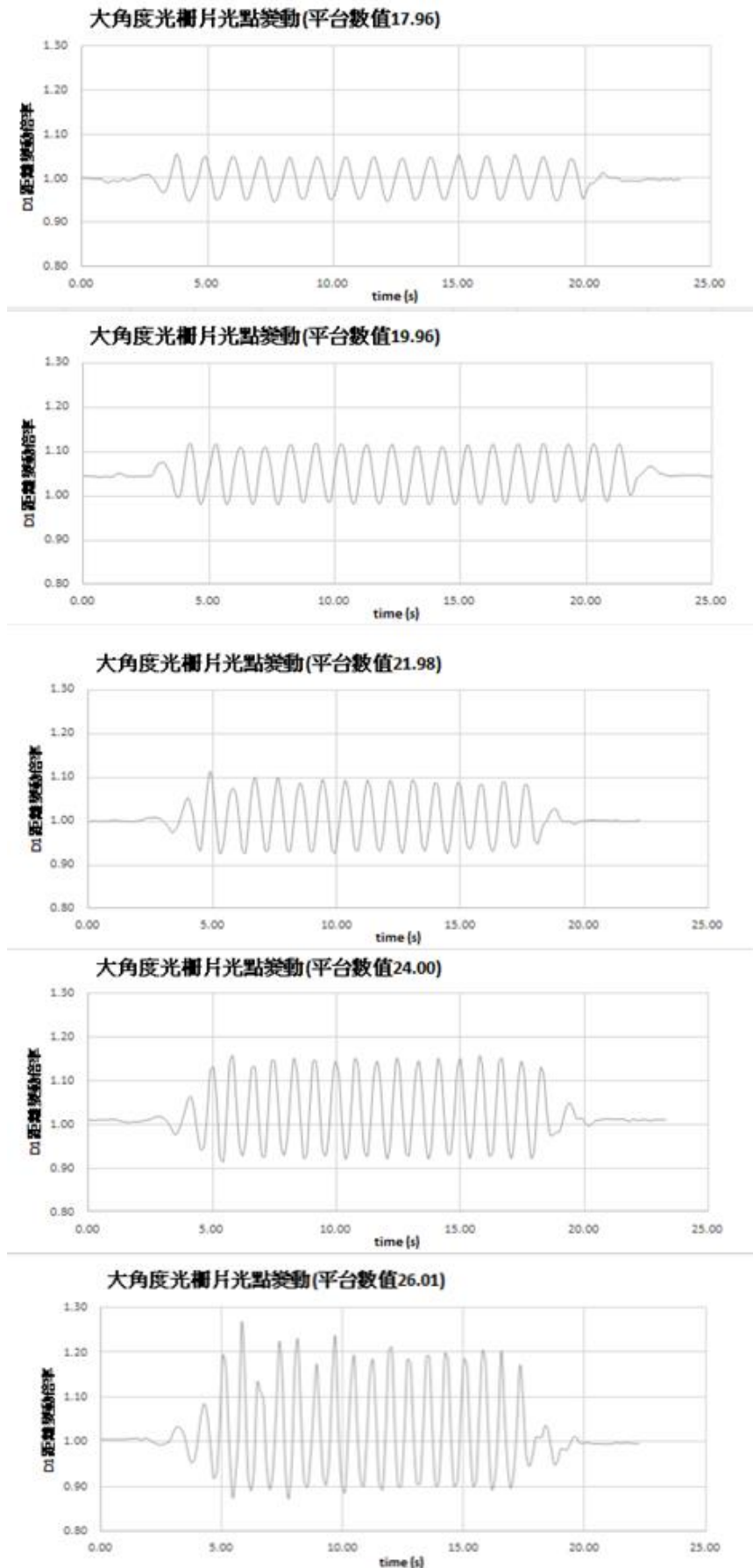


圖 63 大角度光柵片在不同震動強度下之繞射光點變動率

根據實驗所得的影片 Tracker 分析結果，可以明顯看到隨著光柵片的傾斜角度改變，光柵繞射光點變動趨勢亦隨著變化，當單擺所吊掛的光柵片載台斜面底角愈小(即光柵片平面愈接近平行)，其繞射光點變動幅度愈顯著，對於震動的解析能力也就愈強。比較圖 63 與圖 61，可發現大角度光柵片狀態下(光柵片愈傾斜)，即使在低強度的震動平台作用下，仍能保持 5%的繞射光點變動率(如圖 63)，相較於圖 61 的垂直光柵片狀態的實驗結果，僅有不到 2%的繞射光點變動率，證明適度的傾斜光柵片，可有助於提升光柵繞射震動裝置的測量能力。為了更有效的針對數據進行分析，利用 GeoGebra 軟體將圖 61-圖 63 分別將各條件下震動訊號的峰對峰值加以平均後，以此繪製各強度平台數值與峰對峰值(平均值)之關係圖，如圖 64。可以發現在影像可分析的要求下，適度的使光柵片傾斜，可獲得較靈敏的震動響應，此特性分析將有助於後續裝置設計與改良。

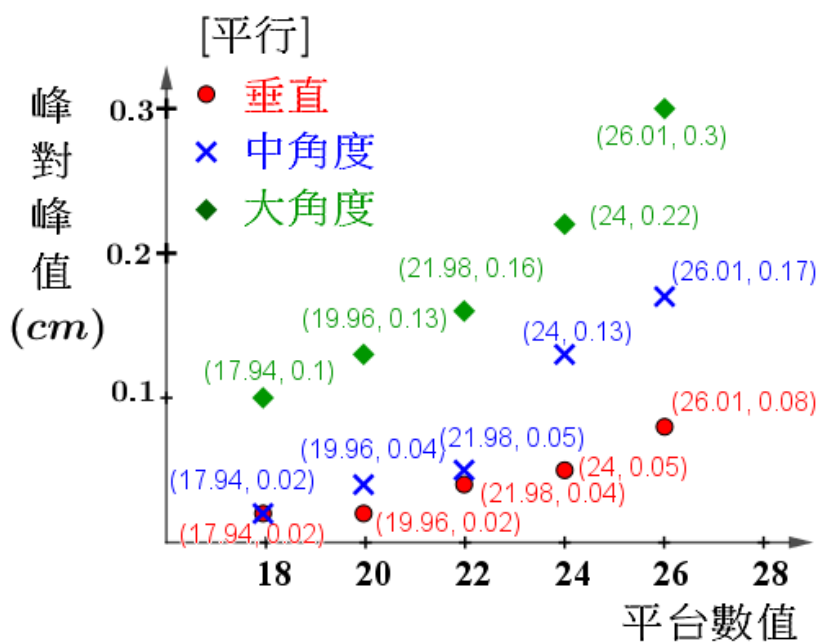


圖 64 各強度平台數值與峰對峰值(平均值)之關係

#### (七) 以非平行軸向之震動訊號驗證光柵繞射裝置之訊號響應

為了建構可測量二維平面震動訊號的光學繞射震動測量裝置，故需檢驗實驗裝置受到非平行單擺擺動方向震動訊號的變化趨勢，用以驗證裝置在二維方向震動的測量能力。實驗方

式是將平台震動方向與光柵繞射震動裝置上單擺擺動方向調整為 30 度、45 度兩種夾角，並分析所得之繞射光點震動變化的數據 Tracker 數據，實驗參數如表 4 所列，於裝置夾角為 30 度、45 度下，驗證 3 種光柵片模式在 5 種震動強度下的繞射光點變化趨勢。

表 4 非平行軸向之震動訊號實驗的實驗參數

| 裝置與震動方向夾角 | 單擺裝置上光柵片傾角 | 測試平台震動強度                 |
|-----------|------------|--------------------------|
| 30 度      | 垂直         | 數值分別為                    |
| 45 度      | 中角度        | 17.94、19.96、21.98、24.00、 |
|           | 大角度        | 26.01                    |

所得之實驗結果如圖 65~圖 70 所示，可以發現不論在何種震動方向夾角，繞射光點變化趨勢都會隨著測試平台震動強度增強而出現明顯的震盪趨勢，且訊號的振幅也會隨之增大。而且，如同實驗六的結果，大角度光柵片狀態下(柵片愈平行)，會有較明顯的繞射光點變動率，如圖 67、圖 70，相較於垂直的光柵片狀態(圖 65、圖 68)或中角度的光柵片狀態(圖 66、圖 69)。如同實驗六，將各條件下震動訊號的峰對峰值加以平均後，GeoGebra 軟體，以此繪製各強度平台數值與峰對峰值(平均值)之關係圖，與裝置擺動方向與振動平台震動方向夾角 30 度為圖 71、夾角 45 度為圖 72，可以知道隨著裝置擺動方向與振動平台震動方向夾角增加，所測得震動訊號的數值會隨之下降，即使在將光柵片傾斜仍可發現明顯的下降趨勢(如圖 72)。此部分數據的整合分析，有助於探討儀器測得知震動訊號，對於裝置擺動方向與振動平台震動方向夾角的變化關係。將實驗六與本實驗 30 度夾角之繞射光點變動率趨勢的峰對峰值的最大數值整理後進行比較，選取單擺裝置安裝大角度傾斜之光柵片所得之數據，如圖 73 所示，以確認測量所得之震動訊號強度受到震動方向夾角之影響關係。由圖 73 可看到，所標記的可以看到不論在任何強度下，平行方向的紅色數據點，其震動數據(第一階繞射光點與中央亮點距離之變動比例)之峰對峰值皆大於夾角 30 度方向的藍色數據點，進一步分析訊號關係，如圖 73 中方框數據，比較平行方向與夾角 30 度方向的數據點，發現兩數據接近  $\sin 30^\circ$  之比例關係(約 0.86)。

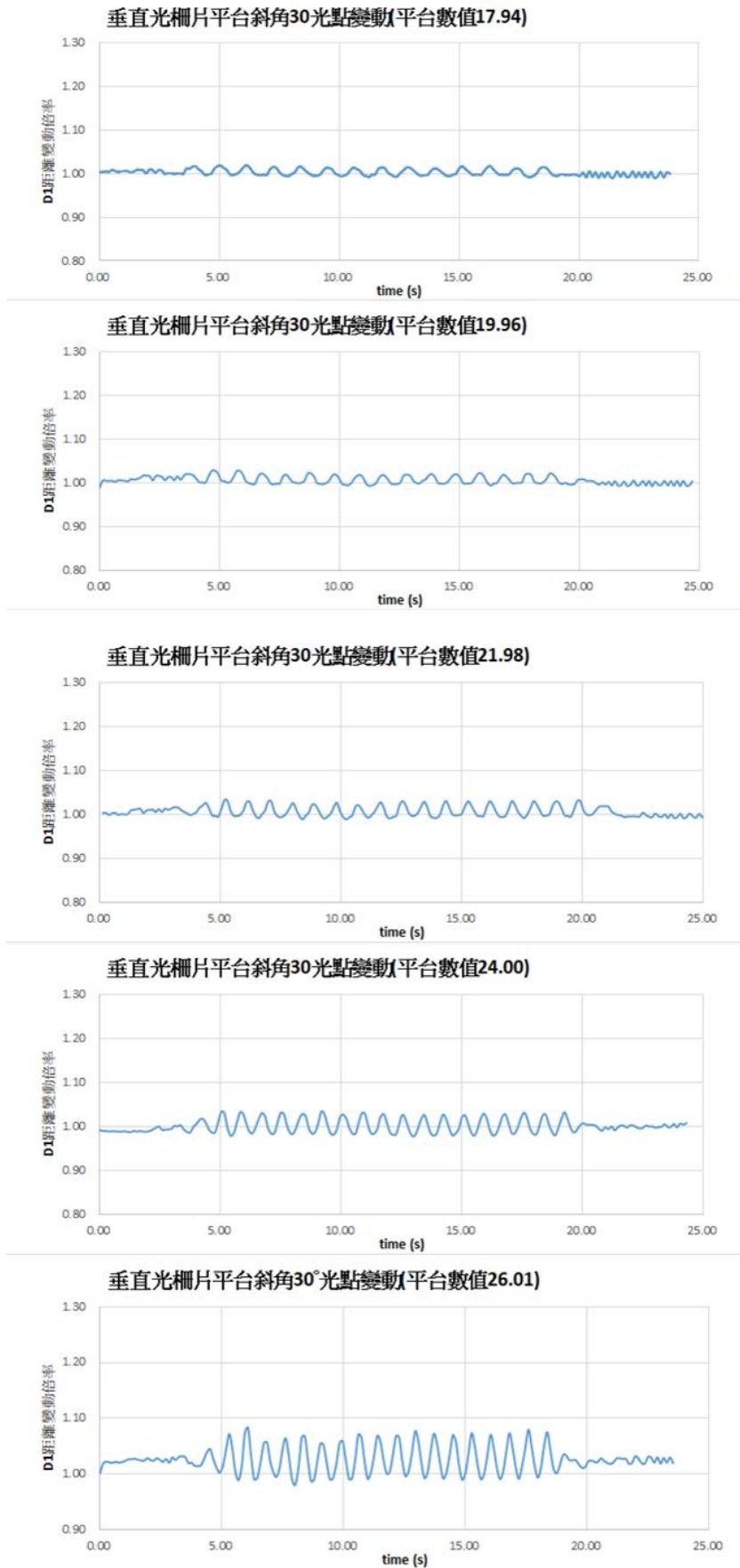


圖 65 震動方向夾 30 度時，垂直光柵片在各震動強度下之繞射光點變動率

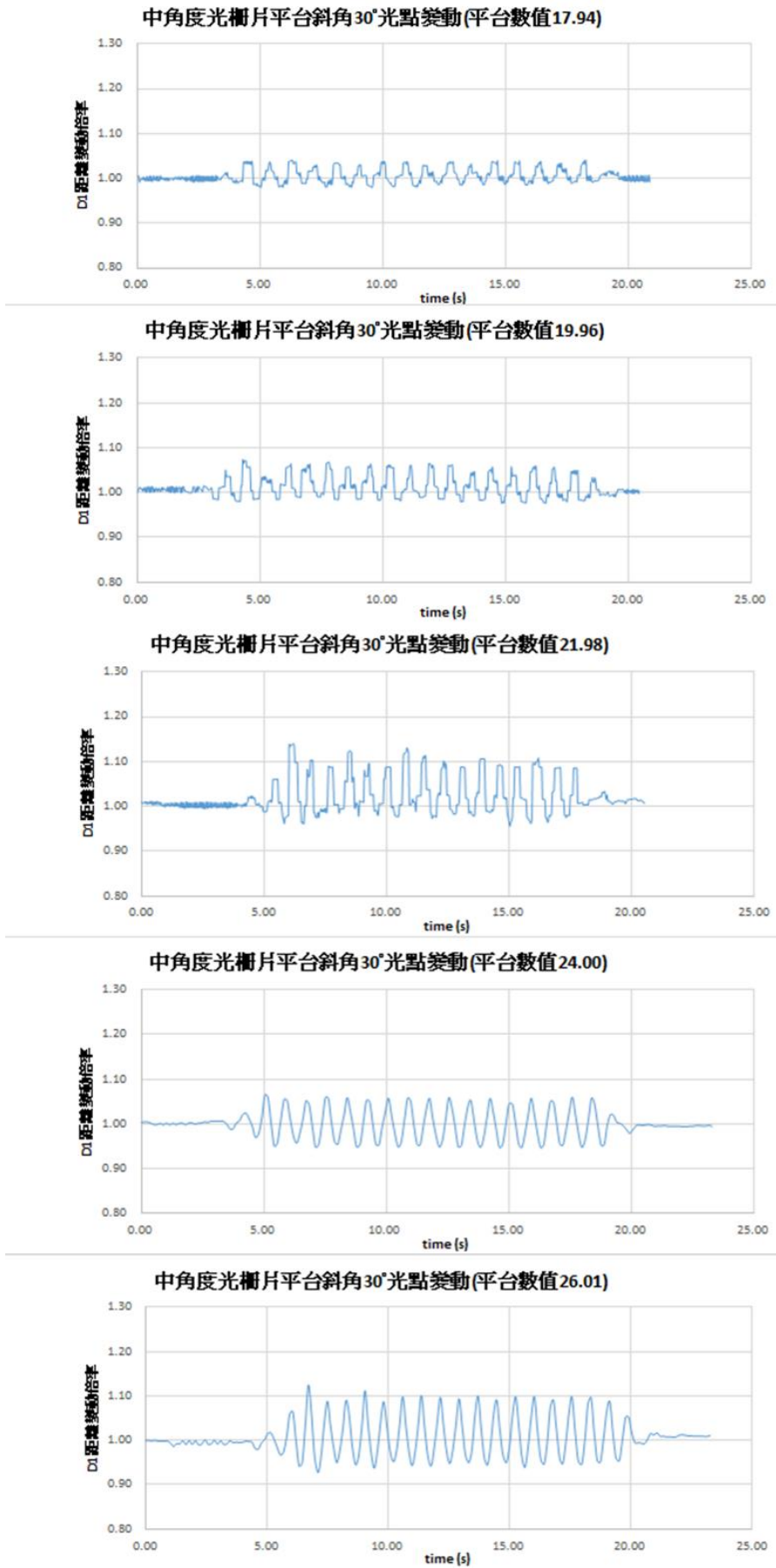


圖 66 震動方向夾 30 度時，中角度光柵片在各震動強度下之繞射光點變動率

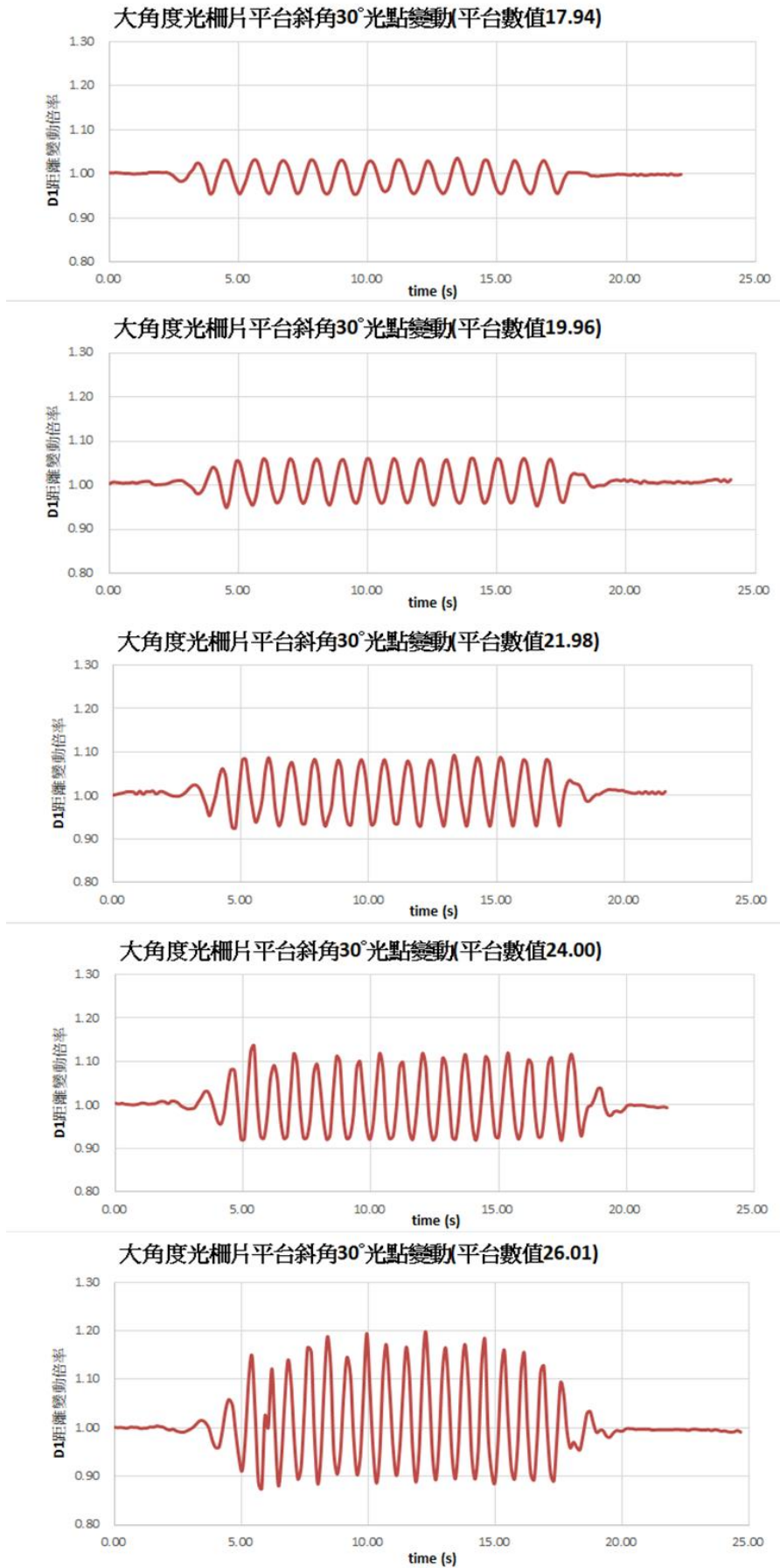


圖 67 震動方向夾 30 度時，大角度光柵片在各震動強度下之繞射光點變動率

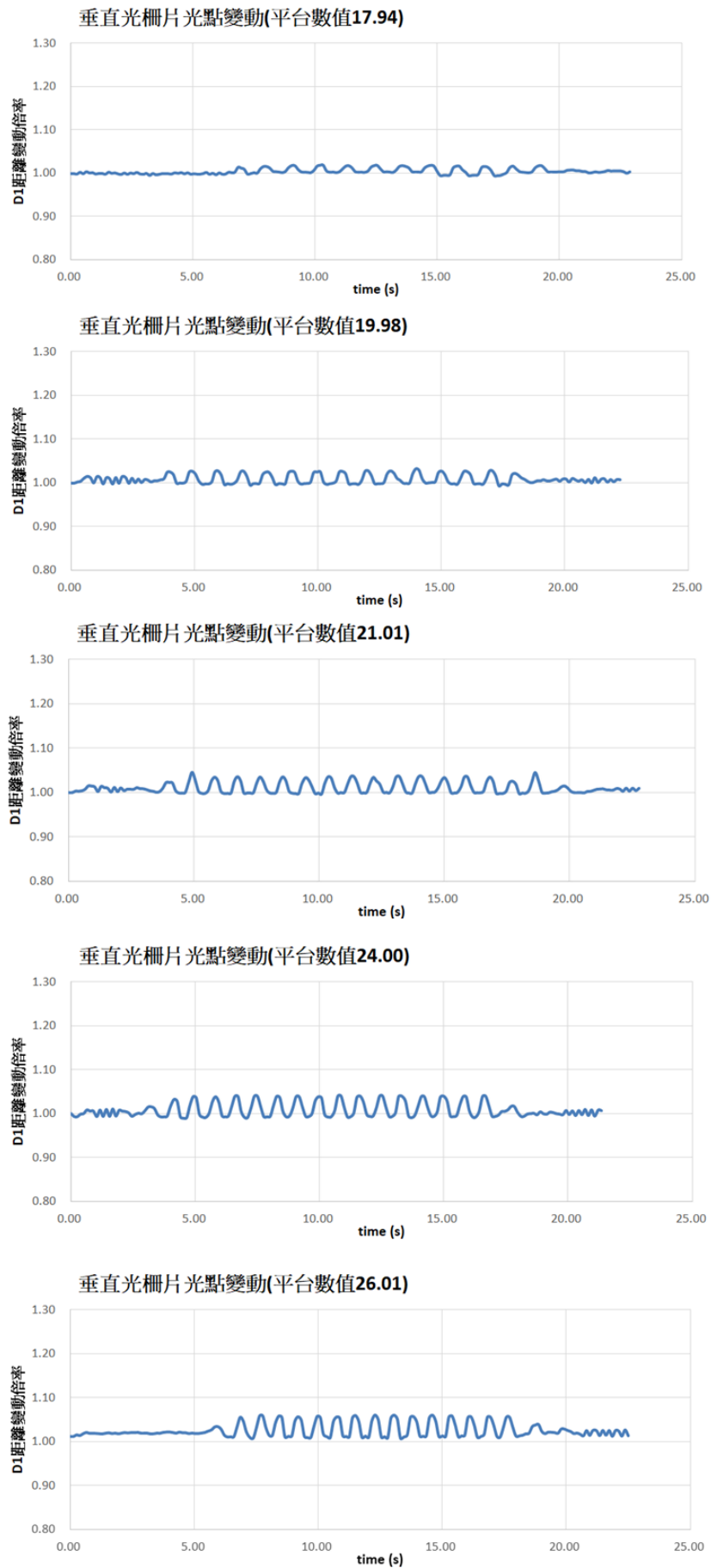


圖 68 震動方向夾 45 度時，垂直光柵片在各震動強度下之繞射光點變動率



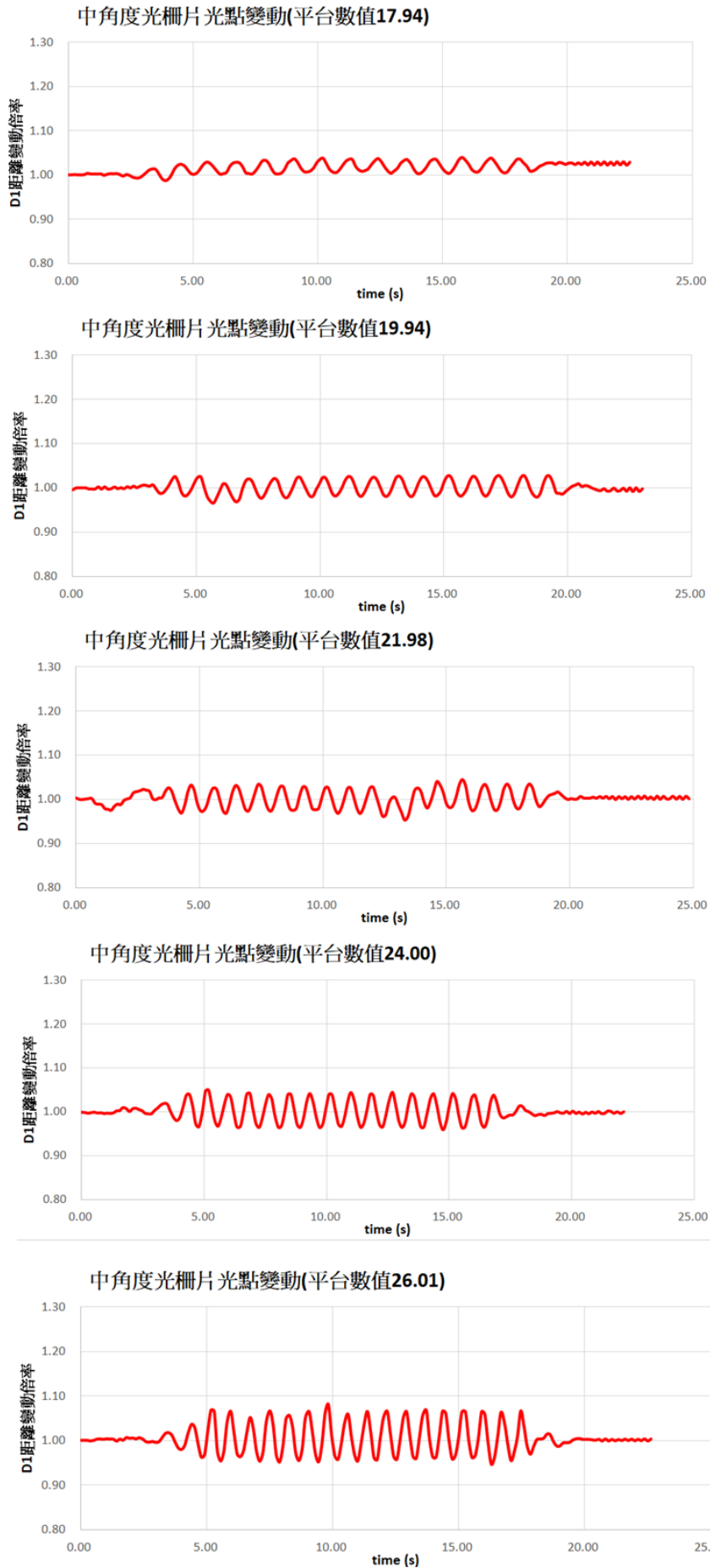


圖 69 震動方向夾 45 度時，中角度光柵片在各震動強度下之繞射光點變動率

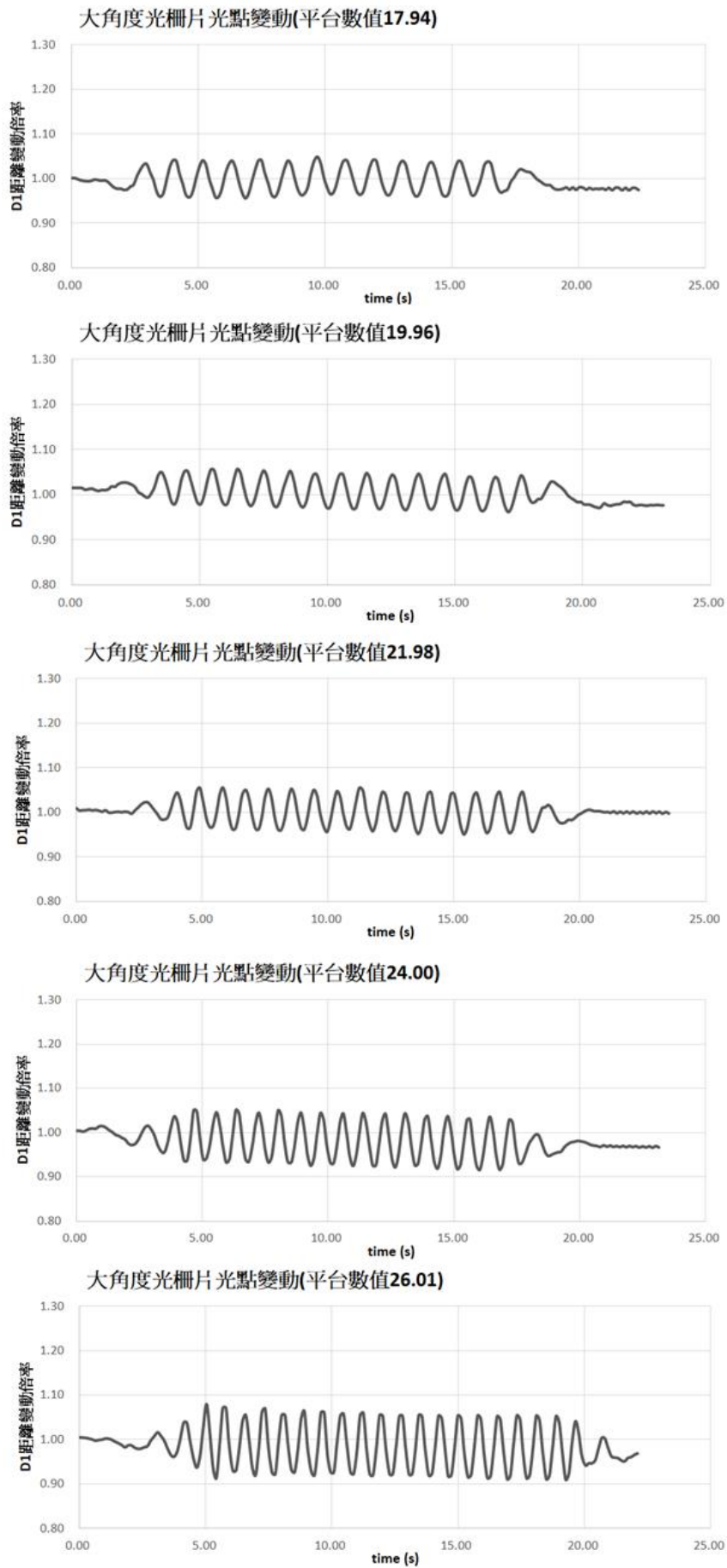


圖 70 震動方向夾 45 度時，大角度光柵片在各震動強度下之繞射光點變動率

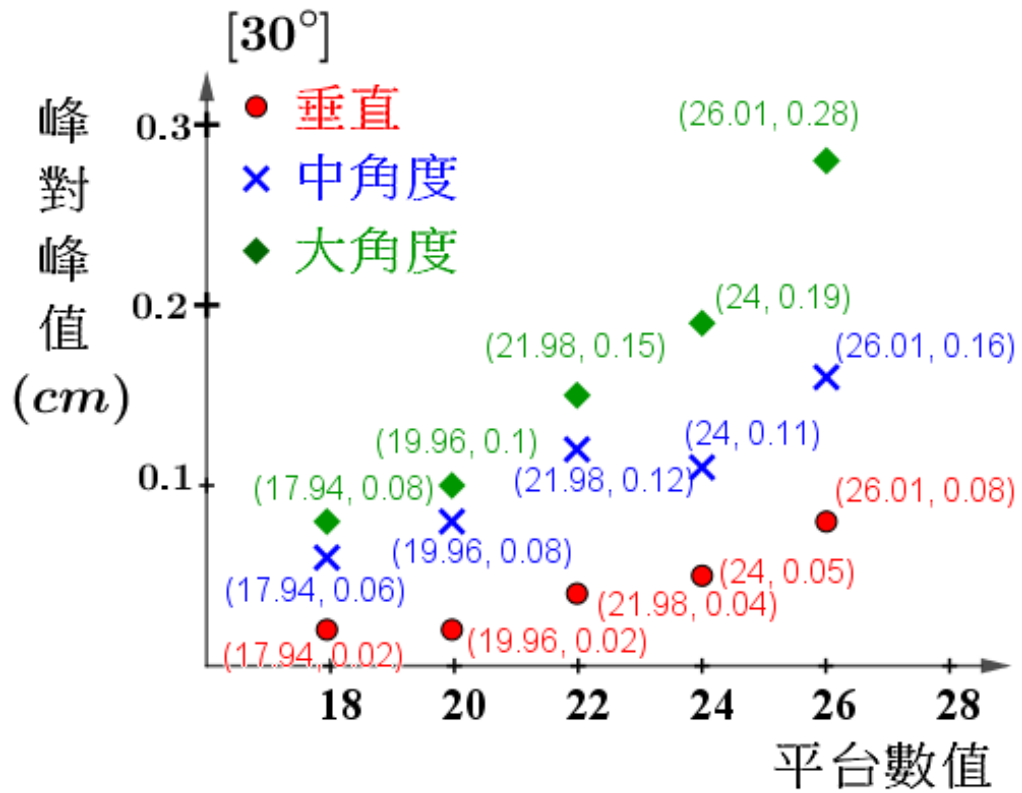


圖 71 夾角 30 度下，各強度平台數值與峰對峰值(平均值)之關係

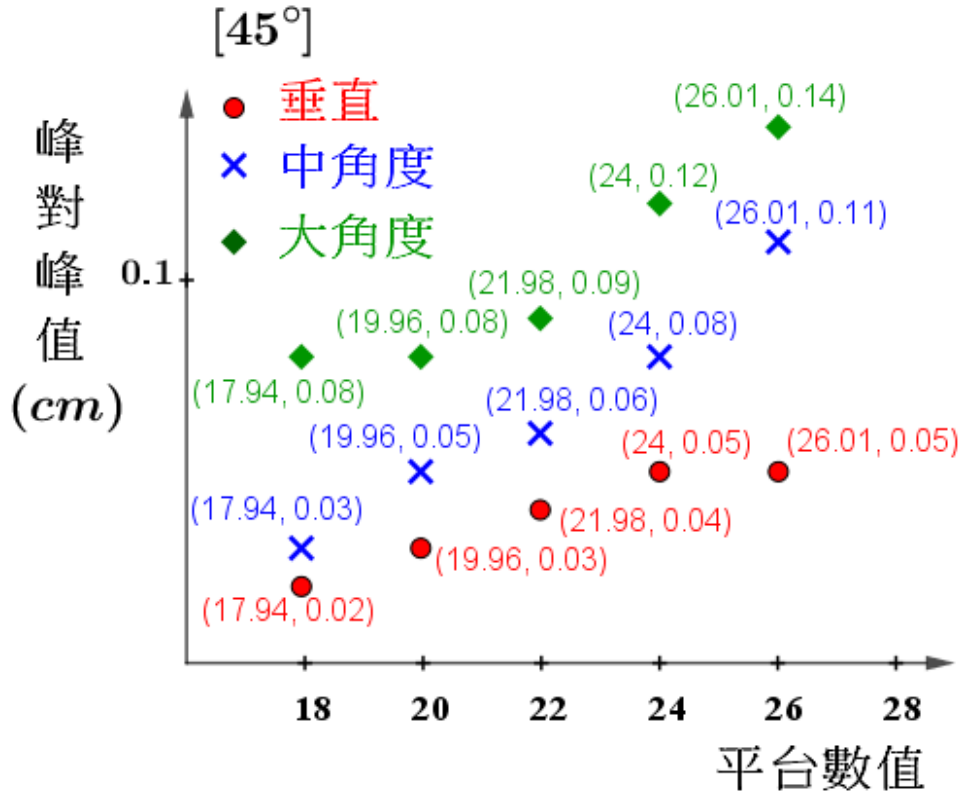


圖 72 夾角 45 度下，各強度平台數值與峰對峰值(平均值)之關係

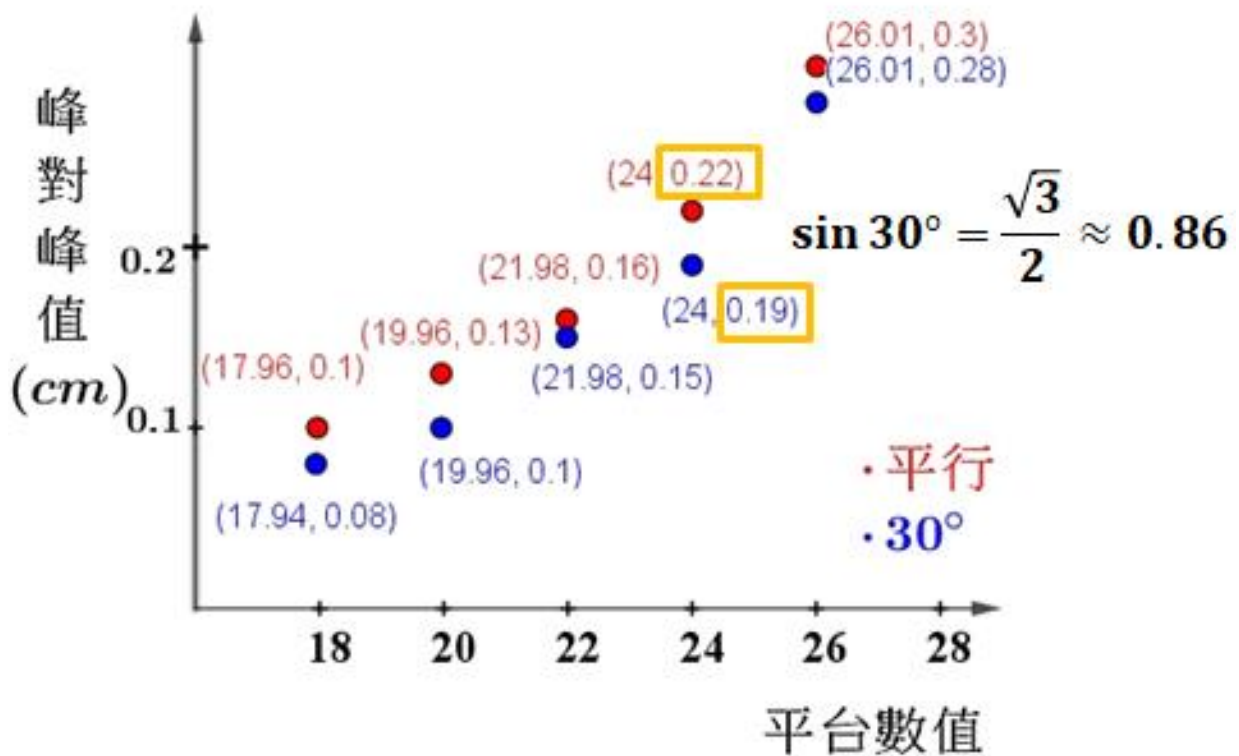


圖 73 與震動平台夾角 0 度與 30 度下各強度繞射光點變動率趨勢之峰對峰值變化

#### (八) 光柵繞射震動測量裝置訊號處理與 Python 程式分析

採用針對地震領域分析數據常用之程式 OBSPY 進行資料分析，將實驗六、七所得之資料轉換為地震頻譜圖，用以確認在測試時間內所偵測頻率與強度分布關係。為了符合本研究所需，程式碼亦由一般公版修改為符合研究所需之範圍，研究使用之程式碼與說明如表 5 所列：

表 5 OBSPY 程式碼與說明

| OBSPY 程式碼   | 說明            |
|---|---------------|
| <code>! pip install obspy</code>  | 引入 obspy 的安裝包 |
| <code>import numpy as np</code><br><code>import matplotlib.pyplot as plt</code> | 引入函式庫         |

|   |           |
|---|-----------|
| <pre>from obspy.core import read from obspy.signal.tf_misfit import cwt import pylab</pre>  |           |
| <pre>npts = tr.stats.npts dt = tr.stats.delta t = np.linspace(0, dt * npts, npts) f_min = 1.5 f_max = 10</pre>  | 設定極值及數值轉換 |
| <pre>scalogram = cwt(tr.data, dt, 8, f_min, f_max) #print(scalogram) fig = plt.figure(figsize=(12, 10), dpi=80) ax1 = fig.add_axes([0.1, 0.1, 0.7, 0.60]) ax2 = fig.add_axes([0.1, 0.75, 0.75, 0.2]) ax3 = fig.add_axes([0.83, 0.1, 0.03, 0.6])</pre> | 設定圖表位置及大小 |
| <pre>img = ax1.imshow(np.abs(scalogram)[-1::-1], extent=[t[0], t[-1], f_min, f_max],aspect='auto', interpolation="nearest")</pre>   | 初始畫圖表     |
| <pre>ax1.set_xlabel("time(s) Angle 30°_large angle_26.01_2_tracker") ax1.set_ylabel("Frequency [Hz]") ax1.set_yscale('linear') ax2.plot(t, tr.data, 'k') pylab.xlim([30,72])</pre>  | 寫入表名      |
| <pre>fig.colorbar(img, cax=ax3)</pre>   | 填入圖表顏色    |
| <pre>plt.show()</pre>   | 顯示圖表      |

經由 OBSPY 程式將 MEMS 資料與光柵片安裝於小底角(光柵片呈現大角度傾斜)之單擺載台的 Tracker 分析數據，有效的將波訊號轉換為頻譜圖進行分析，如圖 74~圖 75 所示，其中 OBSPY 程式所繪製之頻譜圖，其縱座標頻率範圍限制在 10Hz 以內，主要是一般地震波之頻率訊號皆在此範圍之內。在圖 74 中，可以看到 MEMS 晶片測量之平台表面連續震動訊號，可呈現出常見地震波之頻率，顯示此震動測量之平台足以用於模擬地震波之作用，在本研究中採用的 5 種震動強度皆在合理地震範圍之內。

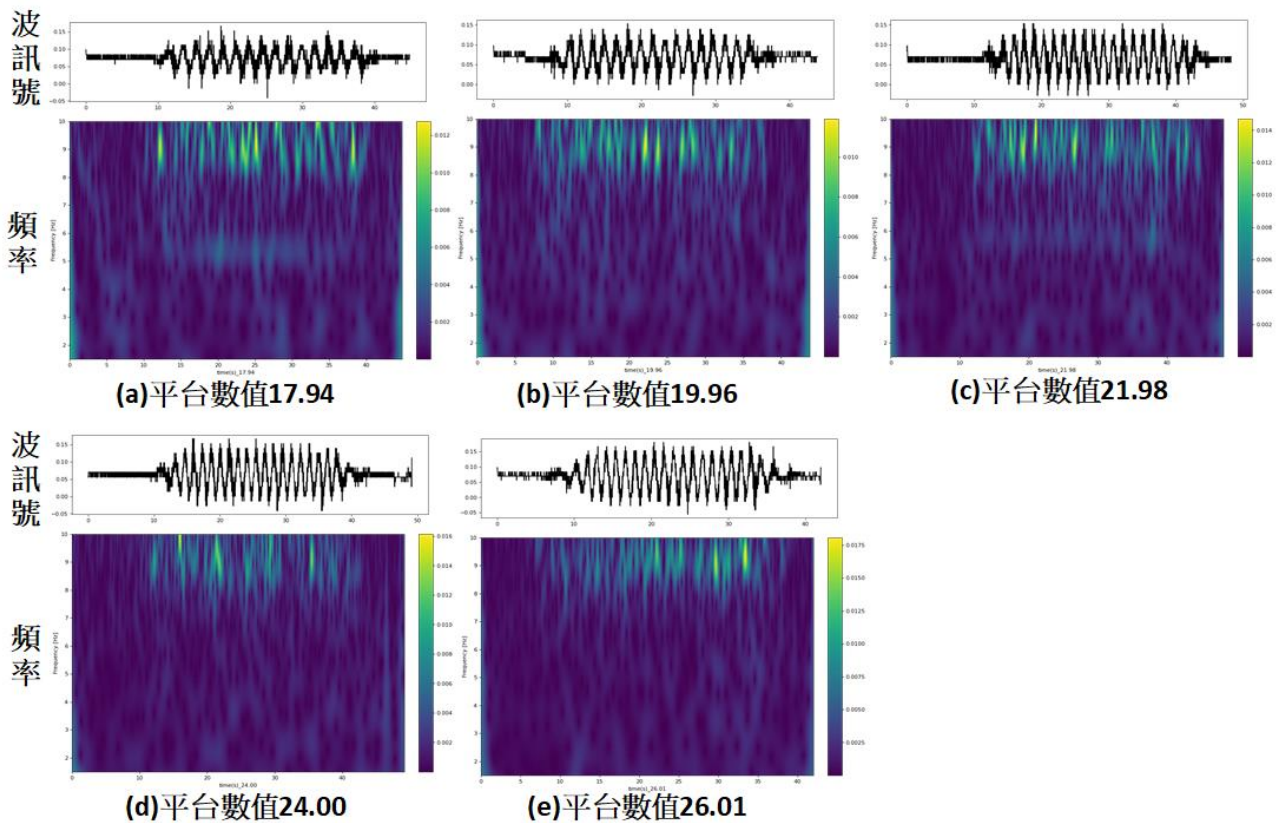


圖 74 平台表面連續震動之加速度感測元件 MEMS 晶片測量訊號頻譜圖

由實驗六可知，當單擺載台上之光柵片以大角度傾斜時，可以獲得較靈敏之振動響應，故將大角度傾斜之光柵片影像所得之 Tracker 分析數據，進行 OBSPY 轉換，分析結果如圖 75 所示。在各種不同振動強度的頻譜圖中間區域，可以看到帶狀區域的色彩分布，即表示在平台振動期間，個別波訊號之主要地震波頻率。比較圖 75(a)~(c)，可以發現其中帶狀區域的色彩分布頻率愈來愈高，符合震動平台是利用縮短往復運動時間來增強震動強度之操作方式，表示繞射光點變動之 Tracker 分析數據，可適用於地震波之頻譜圖。然而，在圖 75 中，都可以看到頻譜圖兩側在低頻部分有著極強的訊號，此部分在檢視 OBSPY 程式後，發現是來自於傅立葉變換訊號處理的過程，因為此部分 Tracker 數據所擷取之波訊號為短時間內之結果，在 OBSPY 轉換頻譜圖的分析過程中，取樣的時間區間兩端會出明顯的邊界影響，而且 Tracker 數據之時間間隔是非固定，與 MEMS 數據的固定取樣時間不同，這些因素造成的結果就造成頻譜圖在兩側部分有著極強的低頻訊號。

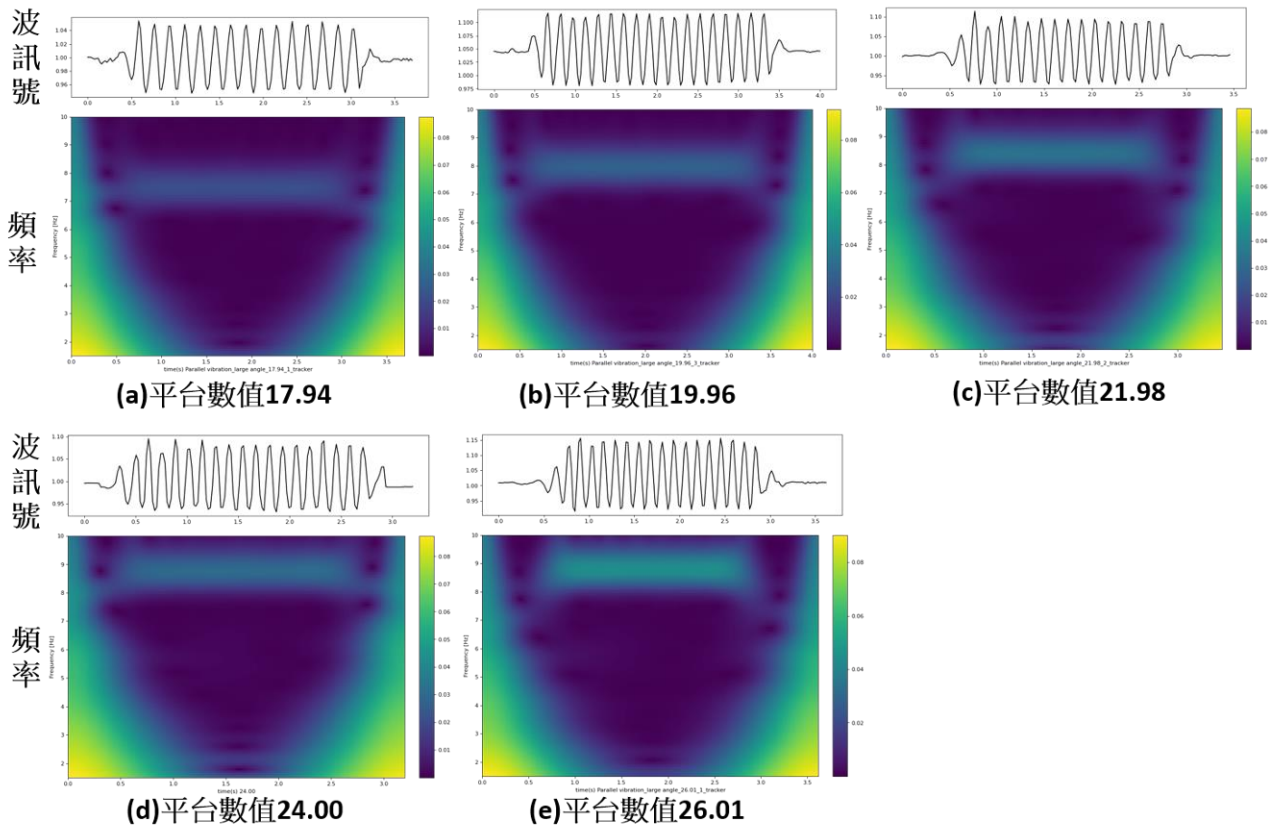


圖 75 大角度傾斜之光柵片影像所得之 Tracker 分析數據頻譜圖

為了驗證圖 75 數據的雜訊是否為 Tracker 數據之時間非固定間隔，進一步將其中一組數據進行數據處理，以內差法進行校正，將資料轉成等距的。採用之內差原理如圖 76 所示， $A, B$  兩點的水平距離不等於  $B, C$  兩點的水平距離，我們的作法是，找出  $P, Q$  兩點，其  $x$  坐標恰好為 1 與 2。我們使用 GeoGebra 軟體先將原始的數據  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、...、 $(x_n, y_n)$  放在一個集合  $\ell_1$  中，如圖 77 所示。再做出集合  $\ell_1$  的折線圖  $a$ ，如圖 78。再取我們要取出公差為 0.01 秒的數列，對應在折線圖  $a$  的  $y$  坐標，此即內插法的概念，如圖 79。得到新的點集合  $\ell_2 = \{(0.01, a(0.01)), (0.02, a(0.02)) \dots (n, a(n))\}$ ，如圖 80，此即為我們轉換後要的等距資料。

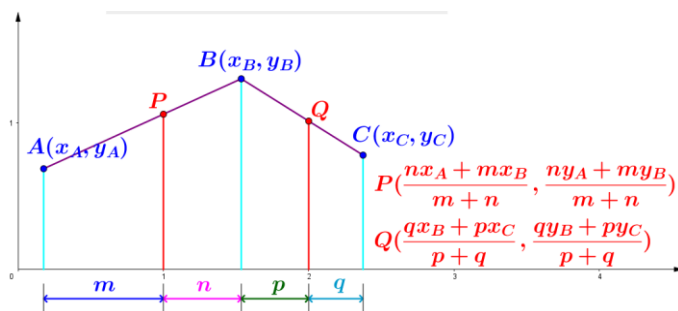


圖 76 內插原理說明

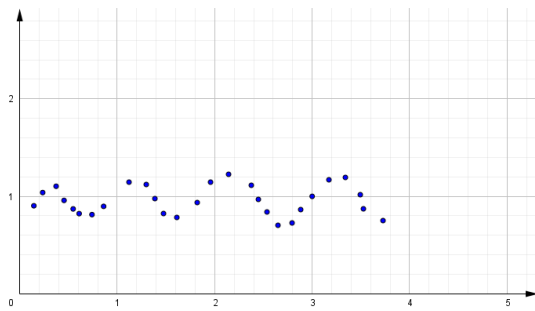


圖 77 原始數據

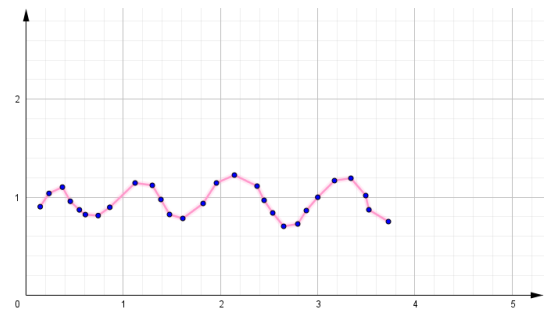


圖 78 做出折線圖

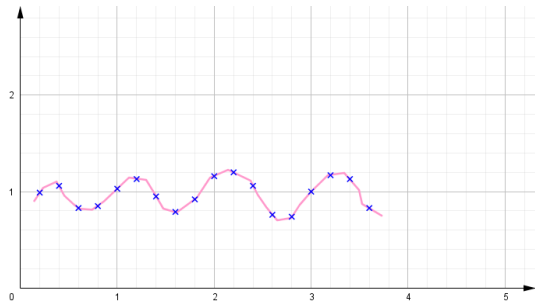


圖 79 內插取出等距點

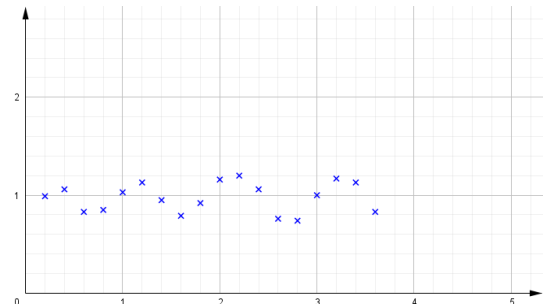


圖 80 轉換後等距圖

透過 GeoGebra 軟體執行內插法，以平行震動方向，光柵片傾斜大角度狀態下，平台數值參數為 17.94，驗證內插數值演算(時間間隔 0.01s、0.05s、0.1s、0.2s)，其結果如圖 81 所示。可以清楚發現內插演算的時間間隔愈精細，圖形中兩側底部的干擾頻率愈不明顯，如圖 81(b)~圖 81(d)，顯示數據的等時間距的整理是有其必要性。然而特徵頻率部分雖仍然落在合力地震頻率範圍內，但是其變動趨勢卻隨著時間間隔愈精細，圖中的帶狀特徵頻率卻愈來愈低，甚至消失，如圖 81(b)~圖 81 (e)所示。對比平台數值參數為 17.94 時，合理的儀器模擬頻率，認為內插演算的時間間隔取 0.05 秒，能夠將有效改善 OBSPY 繪製之地震時間頻率圖。

在確認內插演算的時間間隔為 0.05 秒後，以平行震動方向，光柵片傾斜大角度狀態下，各種平台數值參數震動強度之實驗測量的 Tracker 分析結果進行內插運算，並將結果帶入 OBSPY 繪製之地震時間頻率圖，如圖 82 所示。可以明顯看到圖形中兩側底部的干擾頻率大幅地降低，而且圖形中央的帶狀特徵頻率相當清楚，此外，隨著模擬測試平台震動強度增加，圖形中央的帶狀特徵頻率亦隨之增加，如圖 82(a)~圖 82 (d)符合地震平台之設定。由此部分實驗可知，將實驗測量的 Tracker 分析結果，透過內插演算為時間間隔為 0.05 秒之數據，能符合 OBSPY 程式繪製之地震時間頻率圖所需。



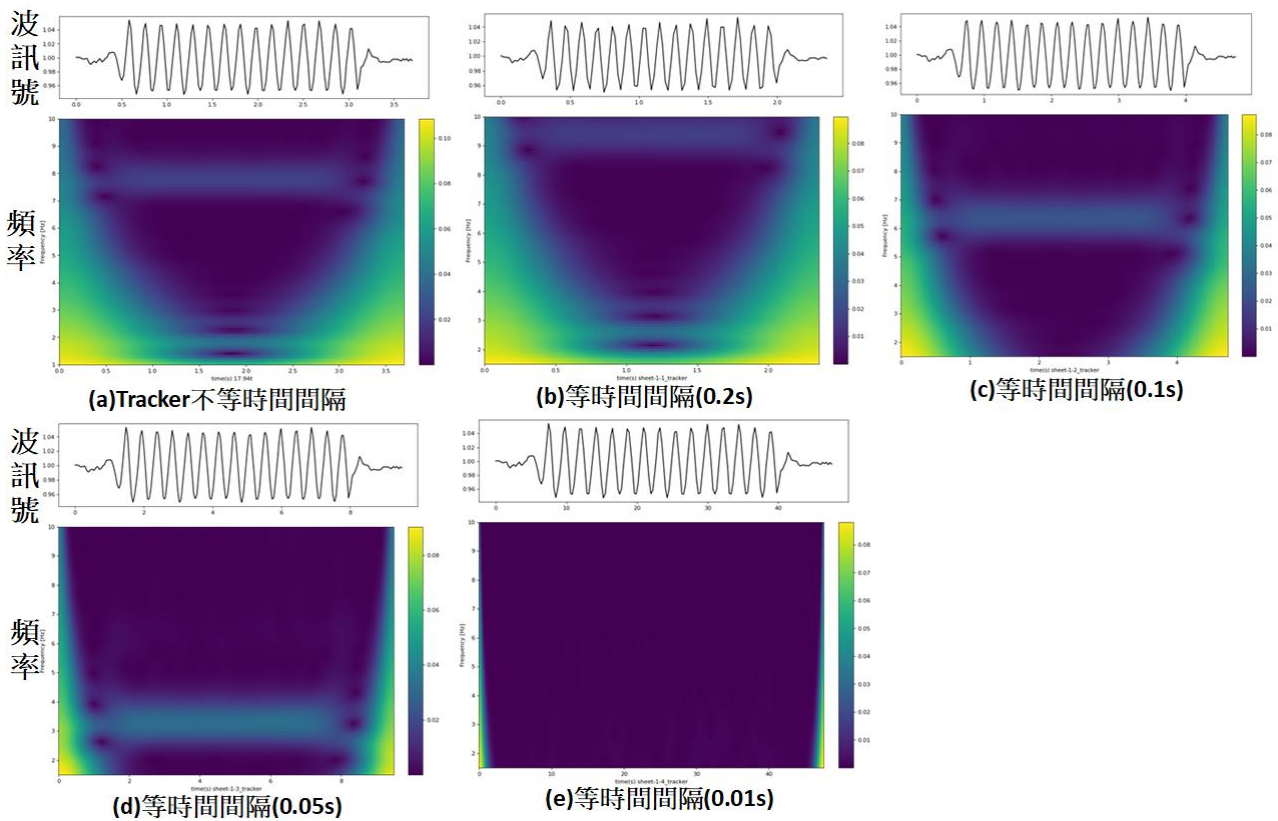


圖 81 (a)原始 Tracker 數據與驗證內插數值演算時間間隔(b) 0.2s、(c)0.1s、(d)0.05s、(e)0.01s

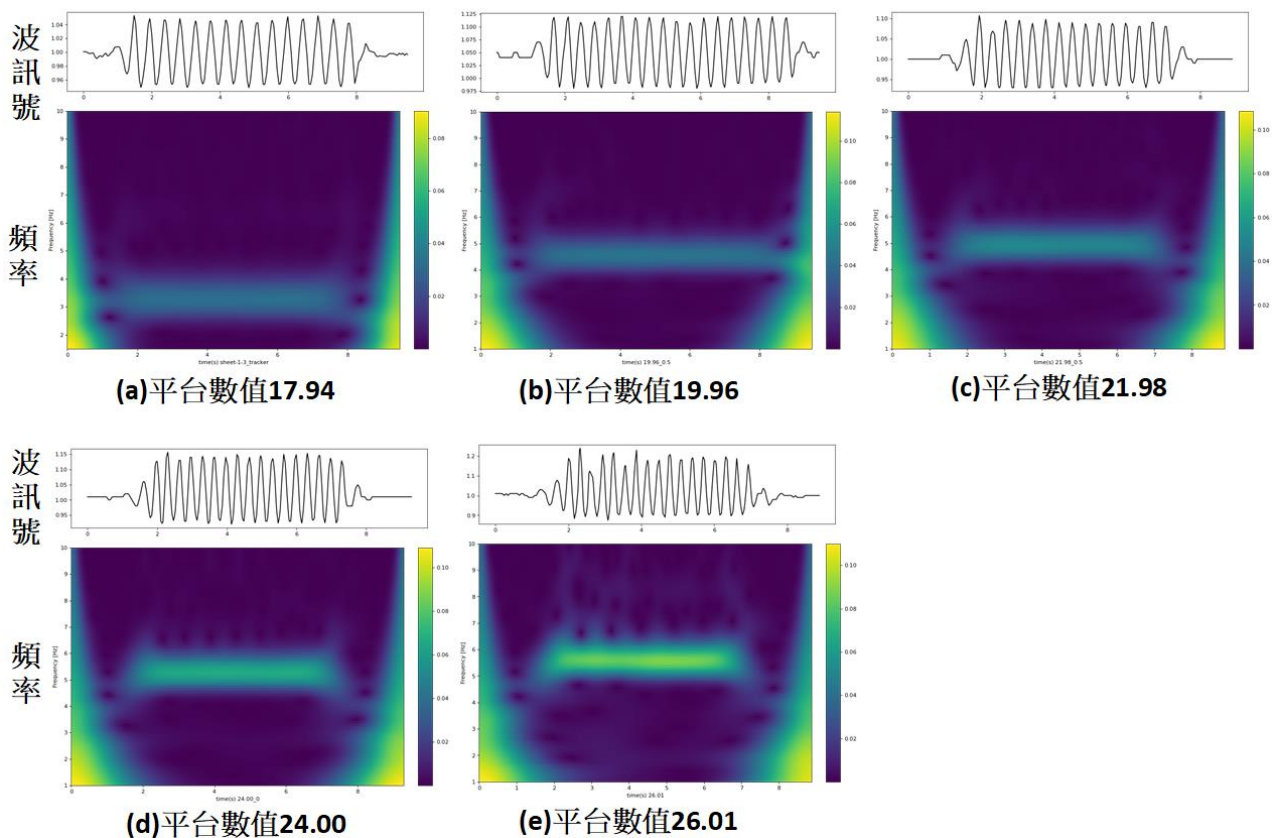


圖 82 內插演算時間間隔為 0.05 秒下各種震動強度 OBSPY 分析圖

### (九) 三維空間光柵繞射震動感測裝置架設與裝置測

後續將基於上述實驗所得到的光柵繞射震動測量基礎，進一步設計垂直平面方向的結構震動測量方法，並將兩組一維方向與垂直方向的結構震動測量裝置整合，設計出可偵測三維空間的結構震動的測量裝置。

## 伍、討論

(一)空間中光柵旋轉之繞射變化研究，可發現，隨著光柵條紋密度愈密，繞射光點的間距會

愈來愈大，如圖 23~27 所示，此結果符合光柵繞射關係  $\frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{D}{L}$  ( $\Delta x$  狹縫條紋間距、 $\lambda$  光

波長、 $L$  光柵片至屏幕的距離、 $D$  繞射光點間距)，當  $\lambda$  與  $L$  為固定數值時， $D \propto \frac{1}{\Delta x}$ 。以

600 條/mm 光柵片為例，當光柵片旋轉時，可觀察到遠端的繞射光點間距( $D^*$ )與近端的繞射光點間距( $D$ )的變化差異，發現遠端的繞射光點間距( $D^*$ )變化幅度較為明顯，如圖 28 的  $D1^*$  變化幅度比  $D1$  更明顯。而且，其他參數之光柵片也有相同的變化結果(圖 29~32)，因此遠端的繞射光點間距( $D^*$ )會較適合當作觀察目標。

(二)針對光柵結合慣性單擺之繞射變化進行靜態實驗，觀察單擺角度改變時，對照遠端的繞射光點間距( $D^*$ )與近端的繞射光點間距( $D$ )的變化，亦可發現遠端的繞射光點間距( $D^*$ )變化幅度較為明顯，如圖 29 所示，600 條/mm 的光柵片繞射光點間距  $D1^*$  隨著單擺角度變化幅度大於  $D1$ ，其分析結果如圖 36 所示，可以發現  $D1^*$  的變化超過初始值的 40%。而且此部分結果與實驗一所得之推論結果亦相符。由圖 37 可發現， $D1$  在  $20^\circ$  附近，出現數據雜點，其原因是由於第一代單擺裝置因為測量時固定擺動角度不慎造成光柵片平面歪斜，導致數據紀錄異常，故在後續實驗三函數分析時會將雜點數據刪除，以利進行趨勢分析。第 1 代光柵片平面歪斜造成的結果，使得測量數據上出現顯偏移，雖然整體趨勢仍可看出繞射光點之間距隨著擺動角度增加而變大。但是基於上述理由，後續實驗為了穩定單擺架構，降低實驗誤差，將改造慣性單擺實驗架構，設計第二代單擺裝置(如圖 15(b))進行後續動態實驗。

(三)針對光柵片變動之繞射光點影像數據進行函數分析，以 GeoGebra 軟體進行  $D1$  與  $D1^*$  之

變化趨勢函數分析，將不合理之數據刪除後(如圖 39(b))，並進行近似估計方法，發現三次近似是誤差最小的最適合函數，如圖 39(e)。在此部分實驗後，有討論過是否計算四次近似函數，但是發現以目前數據而言，四次近似函數與三次近似函數相比差異並不大，僅有在大角度的測量數據出現極小的差異。在加速度的實驗中，取出時間與  $x$  分量(如圖 47)，我們從  $D1$  與  $D1^*$  的散布圖，取出  $D1^*$  的局部最大值與  $D1$  的局部最小值，以最小平方法求出滿足這些極值的多項式函數。所得之多項式函數即可作為後須驗證單擺角度與繞射變化之分析工具。

#### (四) 探討震動造成的光柵系統擺動之動態變化

第 1 代慣性單擺震動光柵繞射動態量測的結果可以發現，由於支撐單擺的裝置結構的穩定性不佳、光柵放置平台兩側的 15 公分鐵尺厚度較薄、強度不足(圖 15(a))，在單擺裝置擺動時會發生自身彈性震動的現象，這些因素會造成單擺的擺幅減小，如同 101 大樓的阻尼器作用，使得繞射光點之間距( $D$  與  $D^*$ )失去明顯震動變化，如圖 43、44 的數值僅有小幅度的變動。基於這樣的結果，進行裝置改良研發加強單擺構造強度、穩定度的第二代慣性單擺裝置。第 2 代慣性單擺震動光柵繞射動態量測的結果相當穩定，如圖 48(e)，可以明顯看出  $x$  方向上繞射光點位置的變動量逐漸收斂，而且在  $y$  方向上的繞射光點震動幅度相當不明顯。由圖 47(a) 的數據所繪出的圖形可知，整體震盪符合阻尼正弦波的結果，因此可以找出各種光柵繞射光點變動量的函數關係，並將每一區域極大值之數據的趨勢線函數找出來，可作為後續驗證地震幅度之用。在阿特伍德機的實驗中，由於加速度感測器的限制，對於實驗設計之等加速度的測量，自製加速度偵測裝置難以明顯地找出受到加速度作用的數值關係，如圖 53，只有當裝置下落撞擊地面軟墊時，因衝擊造成明顯的加速度下，才會看到自製加速度偵測裝置有明顯的數值出現。在簡單諧振實驗中，可以產生連續變化且明顯的加速度，因此可以看到自製加速度偵測裝置的數值變化，如圖 54，經過數值計算亦可知道彈簧裝製作簡單諧振之加速度極大值，比較兩數值即可得到自製加速度偵測裝置與實際加速度的換算比率為 0.187，可作為未來自製加速度偵測裝置安裝於震動結構上偵測物體因地震而振動時的加速度量值。

#### (五) 以光柵繞射震盪連結實際結構震動之加速度反應

透過單擺裝置上光柵繞射光點間距( $D1^*$ )的震盪關係，可以對造成鋁擠料框架結構震動的加

速度給予適當的反應，如圖 52 所示，可以明顯的看出繞射光點之間距變動確實能夠反應結構震動之加速度趨勢，然而數值關係需進一步透過大量的測試，方能找出繞射光點與結構震動之函數正確的對應關係。

#### (六)以連續震動平台測試光柵繞射光點之震盪反應

透過加速度感測 MEMS 晶片測量之平台表面連續震動與鋁擠料框結構震動之加速度數值相近，顯見在足夠強度之鋁擠料框結構下，裝置結構體的自然振動頻率並未造成加速度數值強度之影響。但比較圖 58、圖 59，可以發現在數據變動雜訊上，在圖 59 中可以看到較明顯之雜訊，其原因可能來自於鋁擠料框結構在連續震動下的應力作用，震動能量造成結構體的微小震動，使 MEMS 晶片感受到持續不斷的雜訊，所幸訊號雜訊比仍在足夠判讀訊號之範圍。第 3 代光柵繞射震動測量裝置，透過縮小裝置尺寸與穩固攝影裝置、無線訊號模組等改良，配合單擺結構不同傾斜角度的光柵片載台，可有效提升震動訊號測量能力，由圖 61 至圖 63 可知，適度的改變光柵片傾斜角度，能夠提升 2.5 倍以上的繞射光點變動率，增強光柵繞射震動裝置的測量能力。但是，實驗中亦發現，光柵片傾斜角度會受限於光柵片尺寸與，而且愈傾斜的光柵片其繞射光點成像清晰度愈差，故在選擇單擺所吊掛的光柵片載台需考量多中因素之影響。實驗中亦發現，單擺受到波動干擾之後會持續擺動，這樣的情況可能會造成後續地震波紀錄的影響，所以將規劃增加電磁阻尼，讓單擺儘快穩定後接受下一次地震波動(一般地震波頻率約 3Hz~5Hz)。透過 GeoGebra 軟體將圖 61-圖 63 分別將各條件下震動訊號的峰對峰值加以平均後，繪製各強度平台數值與峰對峰值(平均值)之關係圖(如圖 64)。可確定適度的使光柵片傾斜，可獲得較靈敏的震動響應，此特性分析將有助於後續裝置設計與改良。

#### (七)以非平行軸向之震動訊號驗證光柵繞射裝置之訊號響應

在二維震動訊號分析上，光學繞射震動測量裝置仍能維持強度差異的測量能力，如圖 65~圖 70 所示，大角度光柵片狀態下(柵片愈平行)，仍然保有明顯的繞射光點變動率。透過 GeoGebra 軟體繪製各強度平台數值與峰對峰值(平均值)之關係圖，與裝置擺動方向與振動平台震動方向夾角 30 度為圖 71、夾角 45 度為圖 72。將平行震動平台(0 度)與 30 度夾角之繞射光點變動率趨勢的峰對峰值的最大數值整理後進行比較，如圖 73 所示，可以確認測量所得之震動訊號強度受到震動方向夾角之影響關係接近  $\sin 30^\circ$  之比例關係(約 0.86)。顯

見光柵繞射震動測量在平面訊號反應上具有方向可解析之能力，在設置規劃與傳統地震儀相同，可分別於平面上兩垂直方向個別設置一組進行運作。

#### (八)光柵繞射震動測量裝置訊號處理與 Python 程式分析

利用 OBSPY 程式分析平台之加速度感測 MEMS 資料，證明在適當的強度下，平台可模擬地震波之影響，如圖 74 所示。單擺之載台安裝大角度傾斜之光柵片的 Tracker 分析數據頻譜圖，如圖 75 所示，其變化趨勢符合震動平台是利用縮短往復運動時間來增強震動強度之操作方式，證明繞射光點變動之 Tracker 分析數據，可適用於測量與紀錄地震訊號。針對在 Tracker 分析數據的低頻雜訊，利用內插法運算，讓 Tracker 分析數據的時間間隔一致，並提高訊號取樣率，的確可有效降低取樣的時間區間兩端明顯的邊界影響，如圖 81 所示，而且內插演算的時間間隔取 0.05 秒，確實有效改善 OBSPY 繪製之地震時間頻率圖，如圖 82 所示。可明顯看到圖形中兩側底部的干擾頻率大幅地降低，而且圖形中央的帶狀特徵頻率隨著模擬測試平台震動強度增加，與測是地震平台之設定符合。

#### (九)三維空間光柵繞射震動感測裝置架設與裝置測

設計出可偵測三維空間的光學繞射震動測量裝置。並嘗試運用於紀錄地震訊號（例如：模擬真實地震之訊號的測試），期待能找出本研究所設計之立體空間的震動測量裝置的地震反應譜，作為建築物結構或區域振動監測之微單元設備。

## 陸、結論

在初期研究中，利用光柵繞射與光柵片的慣性擺動裝置，建立一套可偵測結構震動的裝置與數值分析方法。研究首先確認光柵片旋轉所造成各階繞射光點間距之變化關係具有明顯且穩定的特徵，接著進一步利用安裝於慣性單擺的光柵片擺動時繞射光點間距變動的關係，並透過 GeoGebra 軟體亦發現其明顯且穩定的函數關係。在確認光柵片擺動的繞射光點之間距的變化關係與函數後，即進行繞射光點的動態研究，並透過數據分析，找出可顯示震動的趨勢函數，而且為了能瞭解實驗設備受到震動的加速度，實際在結構上加裝自製加速偵測器來測量結構震動的實際加速度與繞射光點間距變動之趨勢，確實可以透過光柵繞射來反映出結構震動狀態。

截至目前的研究內容，已完成縮小尺寸的第 3 代光學繞射震動測量裝置製作，並實際

利用地震動平台，模擬地震波訊號進行記錄，並檢驗裝置能力，也成功驗證本裝置可有效解析在二維方向的震動訊號。此外，導入地震研究領域中常用之 OBSPY 程式，分析光學繞射震動測量裝置所得之地震波訊號的頻譜圖，並與 MEMS 晶片數據比較準確度，並輔以內插演算法，成功降低頻譜分析在傅立葉轉換時的邊界雜訊，成功透過本裝置獲得與測試地震平台震動強度趨勢相符合之測量地震波訊號的頻譜圖。

後續研究將進一步深入探究地震波訊號處理，聯繫相關地震研究領域之專家學者，了解 OBSPY 程式分析內容細節，並嘗試於光學繞射震動測量裝置上增加單擺裝置的阻尼構造，降低慣性震動對訊號紀錄之干擾。此外，也會增加微小震動訊號測量之能力(3 級~4 級)，期望藉此建立可作為測量建物震動與地震訊號紀錄之光學繞射震動測量裝置。

## 柒、參考資料

- [1] 呂佩玲(2022)。台灣的地震災害及其防護，中央氣象局地震測報中心。
- [2] 林正洪(2004)。大屯火山群潛在岩漿庫研究：微震監測之初步結果，國家公園學報 14(2):103-118。
- [3] 周啟(2022)。第十七章 繞射光柵,中山大學物理系開放式課程講義: 1-3
- [4] 普通物理實驗 干涉與繞射, 清華大學普通物理實驗手冊, 4
- [5] 中央大學應用地質研究所(2022)。工程地質與新興科技研究室,集集地震專輯-地震資料的處理首頁, <https://reurl.cc/g0pRep>
- [6] 中央大學應用地質研究所(2022)。地震定位。 <https://reurl.cc/Y9RYYo>。
- [7] 方維倫等(2019)。CMOS MEMS 微型加速度計，科儀新知第三十卷第一期 97.8。
- [8] 張文濤(2019)。基於干涉法的反射式光柵旋轉角度檢測方法 雷射與光電子學進展，56(11):110501。

## 【評語】 180001

本研究利用光柵繞射原理，建立光學繞射變動和結構物震動間的關聯性。並以 GeoGebra 軟體分析光柵片旋轉與繞射光點位移之函數關係。再以 OBSPY 程式分析測量之震動頻譜圖，並確認繞射光點振幅變動，可顯示地震訊號之特徵頻譜。設計光柵裝置並結合軟體程式開發逐步建立以光柵進行建物震動測量之可行性研究。整體實驗施作相當完整，有創意。但仍有待建立光柵繞射光點間距與結構物振動之加速度變化間的明確數值函數關係，因此現階段仍欠缺實際地震案例之測量與比對驗證結果。對於數值方法及數據分析方面仍需做較深度的理解。