

2012 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

編號：150013

作品名稱

高速鐵路差異沉陷的新測量方法

得獎獎項

大會獎：二等獎

作者姓名：吳承儒

就讀學校：新北市私立南山高級中學(附設國中)

指導教師：莊貴冠

關鍵字：差異沉陷、臺灣高鐵、

Quake Catcher Network (QCN)

作者簡介



我是就讀新北市私立南山高級中學附設國中部三年級的學生吳承儒，今年參加臺灣國際科學展覽會地球科學科。主要研究高速鐵路差異沉陷的新測量方法，從 2010 年開始，為了這個研究，我搭乘一百九十次的高鐵，搭到列車長和服務小姐都認識我，站裡的保全也和我打招呼。

一開始，我只是參加全國中小學科學展覽，但得名後，一心只想更精進，原本的研究因為時間的關係，並不是很完美，細細檢查後覺得破綻百出。因此，在同學都在準備基測時，唯獨我一人坐在教室後方分析數據，撰寫報告，感覺很奇怪，再加上，數據一直不如預期，重做了好幾次，算了幾百小時。不過，終於在繳件前三周成功了，我發現從事研究，都只有在數字符合預期、研究有意義、有用，那一瞬間是最快樂的，就算耗費數月乃至數年也都是值得的。

摘要

臺灣高速鐵路因差異沉陷而有行車安全的疑慮，每年耗費數千萬來嚴密監測沉陷。因此，我們希望能有一個可靠、簡便、便宜、及時的新測量方法。

本新測量方法利用商務筆記型電腦中的加速度感測器，來記錄列車行進差異沉陷處的電壓變化，透過 Quake Catcher Network Live 軟體轉換成加速度值，再經過傅立葉轉換以濾除雜訊的影響，而從加速度、速度、位移、時間之間的定義，得到高鐵於該處的沉陷值。

透過全線測量，訊號的可靠性，使我們得到台灣高鐵全台差異沉陷的分佈狀況。而高鐵苗栗麻園坑段的反覆驗證，沉陷值的正確性，也在誤差的合理範圍內。

由此顯示，此新測量法是可行的。尤其相對於傳統的人工測量方法，這個方法更有利於迅速地測量高速鐵路的差異沉陷，作到即時監測、即時預警，防範事故於未然，更可節省大量的人力與物力。

Abstract

Ever since there are concerns addressed on the safety of the operation of Taiwan High Speed Rail due to the differential settlement problem, a great fortune has been spent on monitoring the sinking process. With that in mind, we hope come up with a reliable, easy-to-use, cost-effective, and time-saving method to keep an eye on the sinking process.

This new measurement uses acceleration sensors that can be easily found in any commercial laptops today, to record the voltage changes when driving through the sinking problem sectors. The data will be then inputted and converted by Quake Catcher Network Live to obtain the acceleration, which will later be converted by Fast Fourier Transform to filter out the noise effect. A settlement will be calculated when the data is checked against with the definitions of acceleration, velocity, displacement and time.

The reliability of the raw data is ensured when the measurement has been done on the entire route, and consequently we get an overview of the island-wide distribution of the differential settlement issue. Repetitive examinations on the Maioli Mayuan pit sector proves that the accuracy of settlement measurement is within the reasonable error range.

Therefore, the feasibility of the measurement is established. Especially when contrasting with traditional human measuring method, the advantages on efficiency is beneficial for monitoring the sinking in a cost-effective manner, where real-time monitoring and real-time alarm systems can serve as means for preventive precautions. A great deal of manpower and resources will be saved.

目錄

摘要-----	2
壹、前言-----	3
貳、研究過程及方法-----	4
參、研究結果及討論-----	8
肆、結論與應用-----	29
伍、參考資料及文獻-----	31

壹、前言

近年媒體報導雲林地區，因超抽地下水，造成地層下陷，使得台灣高速鐵路產生差異沉陷。而西元 1998 年 6 月 3 日，德國高速鐵路 ICE 因車輪金屬疲勞損壞導致列車出軌，車廂彈起撞上橋梁，造成 101 人死亡，此次事故原因主要有兩點：其一，事故發生前 2 個月就有工作人員反應有不尋常的搖晃，但未改善，其二，駕駛未察覺轉向架車輪異常，仍持續以時速 200 公里以上行駛。

若台灣高速鐵路因為差異沉陷而導致列車出軌，其後果不堪設想。因此，台灣高速鐵路公司每年耗費數千萬來監測差異沉陷，受限於白天須商業運轉，測量人員只能在夜間使用經緯儀和水準儀，危險性高且又無法立即測量，更受天候影響。因此如何立即監測高速鐵路差異沉陷和轉向架的異常，是個值得省思的問題。

日前於國外網站 IRIS(Incorporated Research Institutions for Seismology)[1]，看到一項研究計畫--The Quake Catcher Network: Bringing Seismology to Homes and Schools[2]。文中描述如何利用全球志願者的筆記型電腦，建構一個全球最大、最便宜的強動地震監測網。

Quake Catcher Network[3]（簡稱 QCN）是一個監測全球的地震網，是由美國一位博士生 Elizabeth Cochran 所發展。她發現當商用筆記型電腦不慎掉落時，電腦會自動將硬碟關閉，以免造成資料毀損。而商用筆記型電腦的這種功能，稱為 APS(Active Protection System)。原理是利用加速度感測器，來偵測突發狀況的加速度。一旦加速度值過大，便自動將硬碟關閉以防止硬碟壞軌，保護資料。

這個偵測加速度的功能，好比一個小型的地震儀。因此若能在地震發生時，收集全球筆記型電腦的加速度感測器資料，不就能建構出一個全球最大、最便宜的強動地震監測網。但是，要建立起一個這樣的監測網，需要撰寫程式、設計資料庫等龐大工程，所以她尋求史丹佛大學的協助，建構出 QCN。而為了幫助學生認識地震儀，Elizabeth Cochran 則設計出 QCN Live 這套軟體，做為教學使用的程式。目前這項研究計畫，已被美國國家科學基金會(NSF) 在全世界極力推廣。

暑假與家人出遊，乘坐高鐵經過某些路段時，車身似乎有些劇烈震動。突發

靈光一現，既然筆記型電腦可以偵測地震時的加速度變化，那麼理論上，應該也可以用來偵測高鐵經過差異沉陷地區時，所產生的加速度變化。再運用加速度、速度、位移，三者與時間的關係，不就可回推各地的差異沉陷值。再把計算出來的數據，與台灣高速鐵路的測量值拿來作比較，就能知道整個方法的精確度及可靠性。更可以成為一個簡單、省錢、可隨車測量又能立即了解差異沉陷變化的新測量方法。

經過初步全線測量，發現雲林與苗栗都有較明顯的差異沉陷問題，與台灣高速鐵路公告地區相符，表示此測量方法的訊號具有相當的可靠性。

因苗栗縣後龍鎮麻園坑道的沉陷較嚴重，連乘客都可感覺得到，又是屬於土堤段而非橋樑段，所以以此特殊路段為例，密集測量 152 次，以 Excel 求取差異沉陷的沉陷值，並降低實驗的誤差，進一步完善測量方法，另與台灣高速鐵路比對測得的沉陷值。

貳、研究過程及方法

一、研究器材

【校正 QCN Live 時間測量的軌道與台車】



圖一、鋁製軌道全貌



圖二、軌道設計的高度落差



圖三、鋁製軌道近照



圖四、軌道側面（可彎曲）



圖五、放置筆電用台車（側面）



圖六、放置筆電用台車（俯視）



圖七、GPS 軌跡記錄器



圖八、商用筆記型電腦(內建加速度感測器)



圖九、捲尺



圖十、水平儀

二、研究方法：

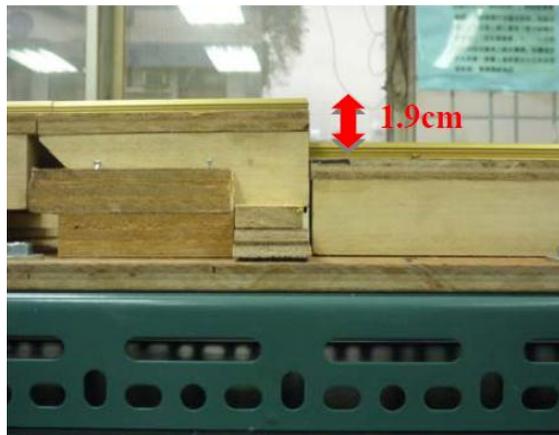
(一)、【測量平台的選擇】：

QCN Live 原始的開發平台是 ThinkPad，但是 ThinkPad 只有水平方向上 X、Y 軸的加速度感測器，所以一度考慮使用 Apple Mac book。卻發現當 Apple Mac book 處於靜止時，加速度感測器仍會偵測到加速度的數值變動，推測應該是該筆電所配備的壓阻式加速儀過於敏感，將電腦本身的震動也算進去。所以研究中使用 ThinkPad 筆記型電腦（內有電容式加速度感測器）做為測量平台。而為了達到測量垂直方向上的效果，把筆記型電腦垂直放置，並以台車輔助固定筆電（如圖十五）。

(二)、【實驗步驟】：

1. 實驗一：驗證 QCN Live 時間計算

(一)、 使用可調高度之軌道，並使用木片自製一個明顯的下陷段。下陷高度為 1.9 公分。



圖十一、軌道設計的下陷段(落差 1.9 公分)

(二)、 將台車置於模擬之軌道上，並調整平面至水平。

(三)、 筆記型電腦以 180 度展開，垂直放置於台車上並且固定。

(四)、 以繩子拉動台車前進，並記錄 QCN Live 實驗結果



圖十二、以繩索拉動台車，記錄加速度感測器在落下時的加速度值

2. 實驗二、驗證訊號之可靠性(2011/2 板橋到高雄全線測量)

- (一)、台車置於高鐵列車地板上，並調整平面至水平（如圖十四）。
- (二)、筆記型電腦以 180 度展開垂直置於台車上。(X 軸正向與列車前進方向相同)
- (三)、打開 GPS 軌跡記錄器，並記錄軌跡。
- (四)、記錄 GPS、QCN Live 記錄實驗結果。

3. 實驗三：校正 QCN Live 加速度值

- (一)、台車置於地上，並調整平面至水平。
- (二)、筆記型電腦置於台車上，X 軸正向朝下，記錄靜止時的實驗結果。
- (三)、筆記型電腦置於台車上，X 軸負向朝下，記錄靜止時的實驗結果。
- (四)、筆記型電腦置於台車上，Y 軸正向朝下，記錄靜止時的實驗結果。
- (五)、筆記型電腦置於台車上，Y 軸負向朝下，記錄靜止時的實驗結果。

4. 實驗四：測量台灣高鐵麻園坑口差異沉陷(2011/10 有效筆數 119 筆參閱附件一)

- (一)、台車置於高鐵列車地板上，並調整平面至水平（如圖十四）。
- (二)、筆記型電腦以 180 度展開垂直置於台車上。(X 軸正向與列車前進方向相同)
- (三)、打開 GPS 軌跡記錄器，並記錄軌跡。
- (四)、記錄 GPS、QCN Live 記錄實驗結果。



圖十三、Google Earth 擷取圖 24°35'6.87" N



圖十四、車內實驗裝置

5.實驗五：差異沉陷現地勘查

(一)、實際到「實驗四」中發現的嚴重差異沉陷地區(苗栗後龍鎮麻園坑道)進行勘查。

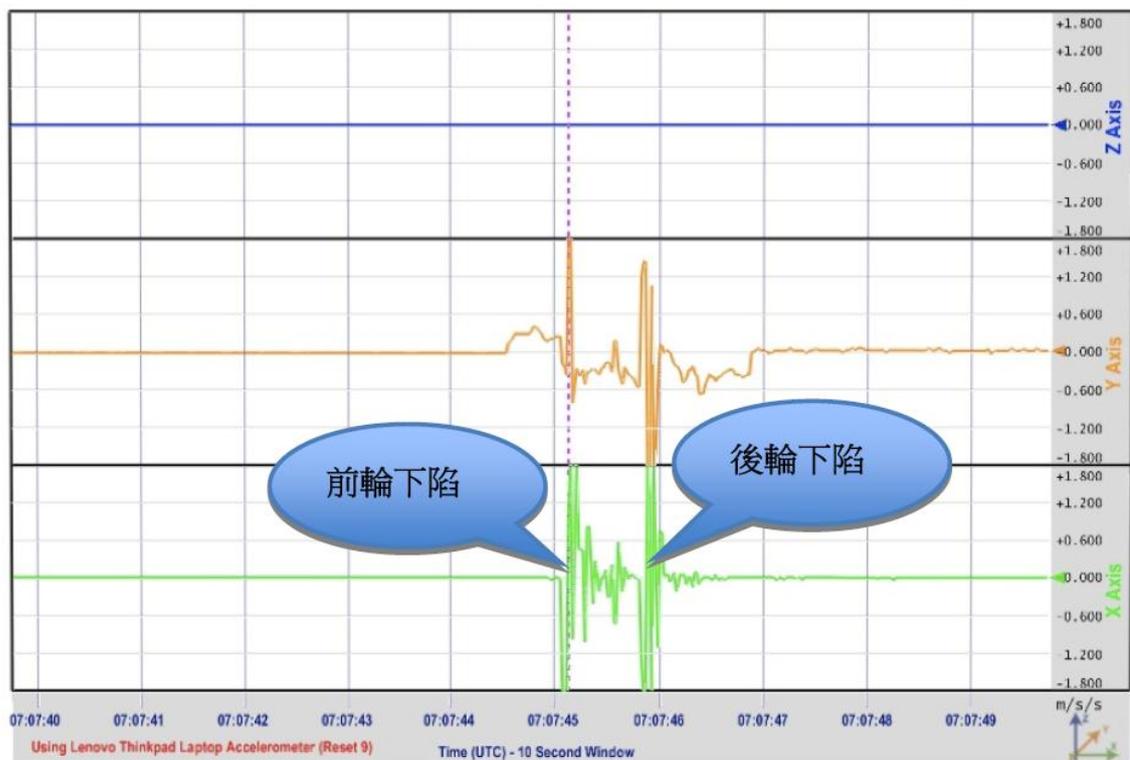
(二)、記錄觀察結果並現地拍照。

參、研究結果及討論

一、實驗結果

(一)、實驗一：驗證 QCN Live 時間計算

根據斜向拋射，加速度求距離的公式： $2021singttvh=-\theta$ 可以由時間與加速度算出距離。在本實驗中，預設 $h=-1.9$ 公分，所要計算的時間是由加速度值的原點至最低點之間的時間變量，實驗中 X、Y 軸皆保持水平，所以 $0\sin\theta=tv\theta$ ，則 $221gth=-$ ，相當於水平拋射。



圖十五、以繩索拉動台車時，台車前後輪下陷時的 QCN Live 記錄 120°47'16.68"E

以繩子拉動台車後，可以在 QCN Live 記錄中明顯看到前後輪分別下落的加速度變化（如圖十五）。此外 QCN Live 的好處是隨時可以將實驗結果「錄製」下來，並精確轉換成時間與加速度的 Excel CSV(逗點分隔值)檔，而且還能自行儲存到筆記型電腦當中。因此只要在拉動台車後，讀取下落的時間變量，並套入上述公式，即可算出下落的高度。

實驗結果如下表一，下落的時間變量約為 0.0624 秒，所以下落高度應約等於

1.9 公分，實驗結果證明 QCN Live 在時間的計算上並無錯誤。

表一、台車前輪落下的時間記錄與換算的高度落差

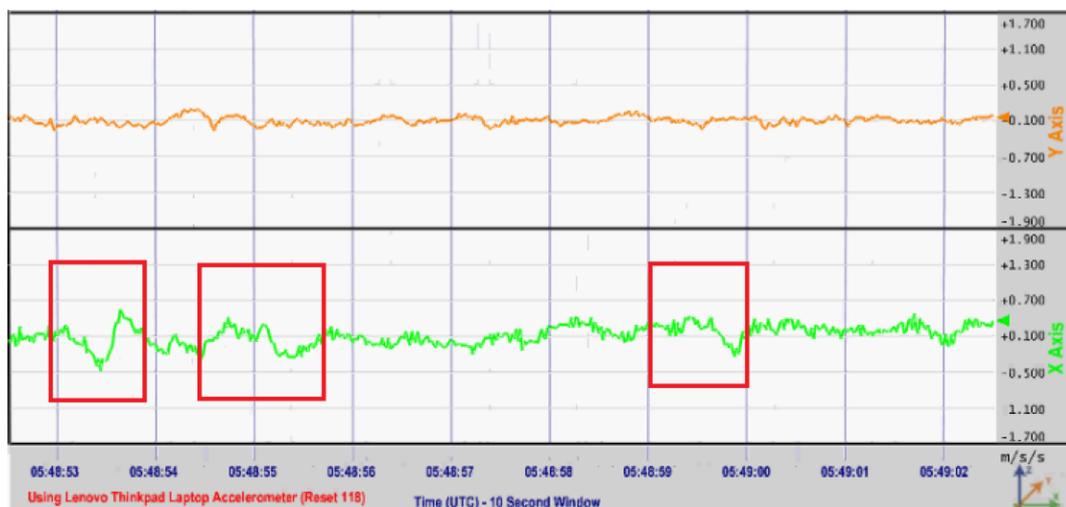
實驗	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
前輪在上層軌道正要落下的時間點 (t1)	2.387	1.886	3.297	2.698
前輪懸空的時間點 (t2)	2.402	1.918	3.338	2.730
前輪下陷到下層軌道的時間點 (t3)	2.449	1.950	3.360	2.761
前輪下陷的時間變量 $\Delta t = t3 - t1$	0.062	0.063	0.063	0.063
從 Δt 推算的下陷高度落差 (h)	-1.883cm	-1.944cm	-1.944cm	-1.944cm

(二)、實驗二：驗證訊號之可靠性

為驗證加速度感測器訊號之可靠性，測量台灣高鐵全線，自板橋至高雄。



圖十六、加速度感測器未偵測到差異沉陷



圖十七、加速度感測器偵測到差異沉陷



圖十八、台灣高速鐵路全線差異沉陷線分布圖(藍色表示高鐵全線、紅色表示差異沉陷仍在、紫色表示已改善)

上圖的差異沉陷的地點與台灣高速鐵路公告的地區相符，證明加速度感測器與 QCN Live 結合的測量平台訊號具有可靠性。

(三)、實驗三：校正 QCN Live 加速度值

實驗中的加速度感測器實際上是垂直擺放的，所以理當測到 1g 的重力加速度，卻發現 QCN Live 所測量到的加速度值與理論的加速度值不一樣，是因為 QCN Live 的原設計者並沒有想到，會有人把筆記型電腦垂直擺放。所以，以此研究中使用的加速度感測器(ADXL320)之製造商的校正方法[5]，來校正所測量到的加速度值。校正方法如下：

設 QCN Live 所輸出的加速度值為 A_{out} ，偏差值為 A_{off} ，實際加速度為 A_{actual} ，單位都是重力加速度，設 Gain 為加速度感測器的增益，單位是加速度。

$$\text{則 } A_{off}[g] = 0.5 \times (A_{+1g} + A_{-1g}) \quad \text{Gain} = 0.5 \times \left(\frac{A_{+1g} - A_{-1g}}{1g} \right) \quad A_{actual}[g] = \frac{A_{out} - A_{off}}{\text{Gain}}$$

實驗結果 $A_{off}=0.47755$ $\text{Gain}=5.635151$

則本實驗加速度感測器所測量之實際加速度值應為： $A_{actual}[g] = \frac{A_{out} - 0.47755}{5.635151}$

由於在校正時是使用重力加速度來校正，而地球上每個不同的地方重力加速度皆不相同，所以必須計算出校正實驗地點的重力加速度是多少，以降低實驗的誤差。

從中央氣象局[6]的資料可以得知地球上每一點的重力加速度計算方法為：

設 ϕ 為緯度之弧度，則

$$g=978.03185(1+0.005278895\sin^2\phi+0.000023462\sin^4\phi)(\text{cm/s}^2)$$

以校正實驗的實驗地點台北，北緯約 25 度做為本研究之重力加速度：

計算結果：北緯 25 度之重力加速度值約為：978.9547128(cm/s^2)

(四)、實驗四：實際測量台灣高鐵麻園坑口差異沉陷(2011/10)

1.分軌測量

每一次的測量會因為在列車左端、右端而異，南下、北上都如此，可以判定每條軌道差異沉陷不一致，為求精準，將每條軌道分開記錄，北上兩條為一、二軌，南下兩條為三、四軌，如圖十九。

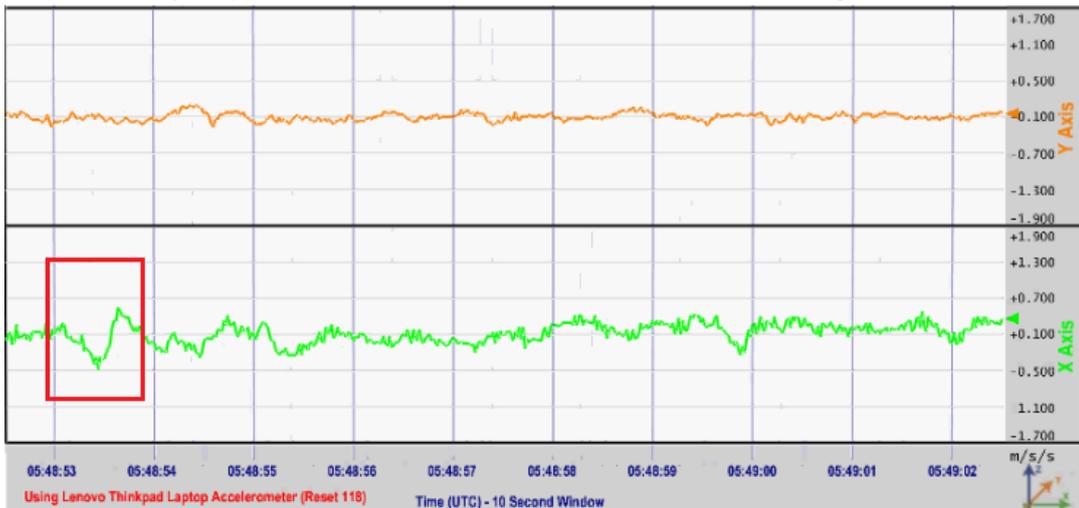


圖十九、軌道編號示意圖

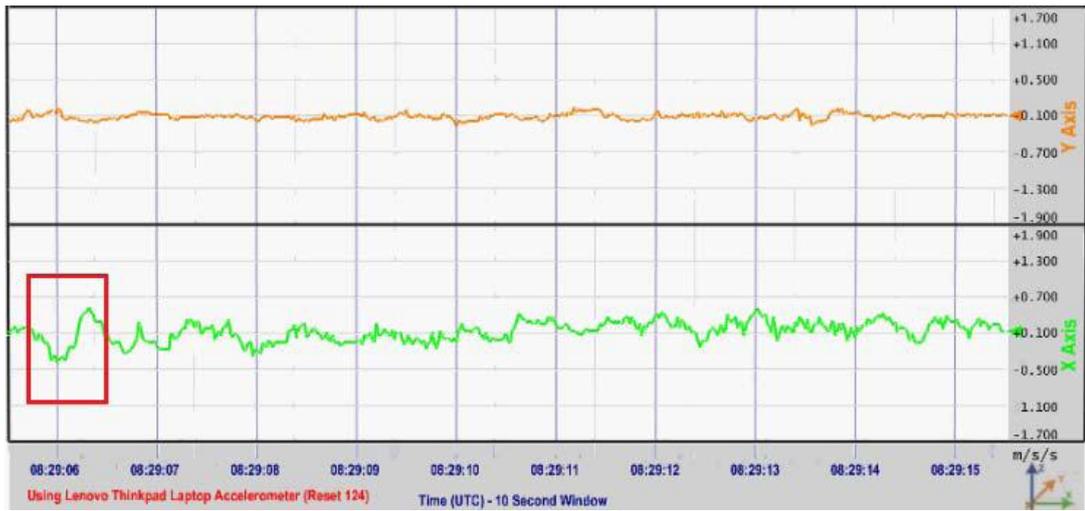
2. 選取資料計算範圍

從 QCN Live 原始資料中，選取到達差異沉陷地時，加速度的一個完整波。

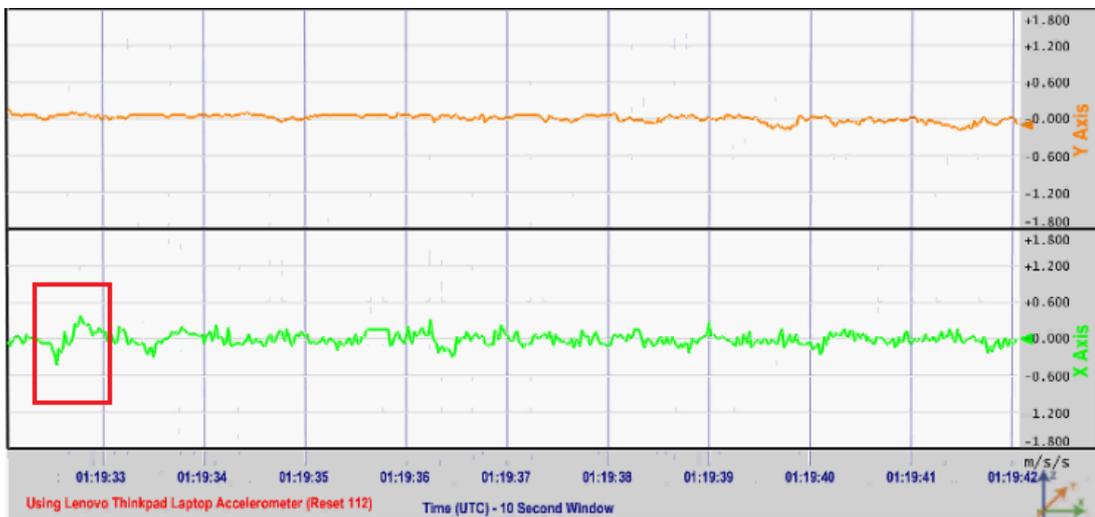
(下列為苗栗麻園坑口 TK109+386 土堤段沉陷 1~4 軌 QCN Live 擷取圖)



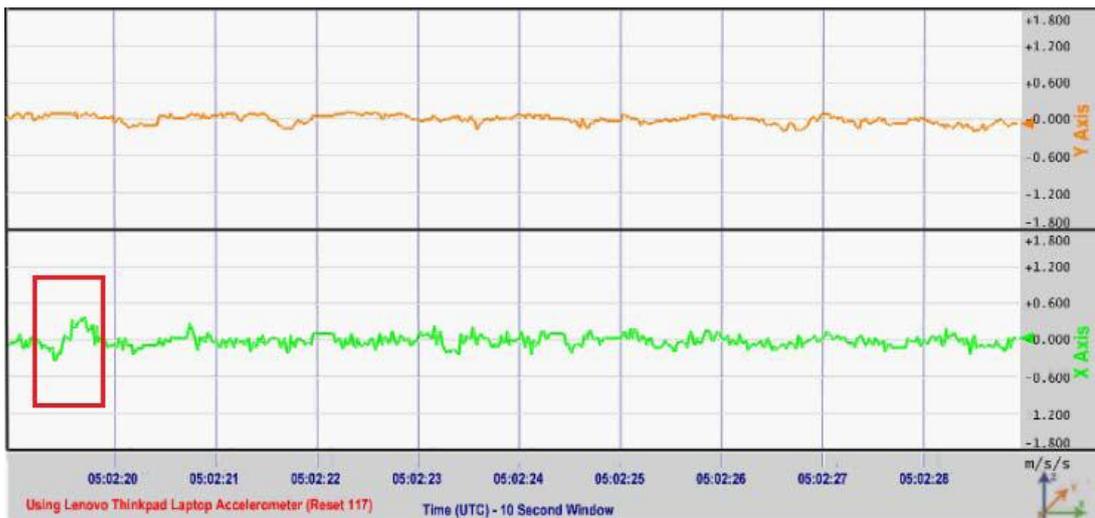
圖二十、一號軌



圖二十一、二號軌



圖二十二、三號軌



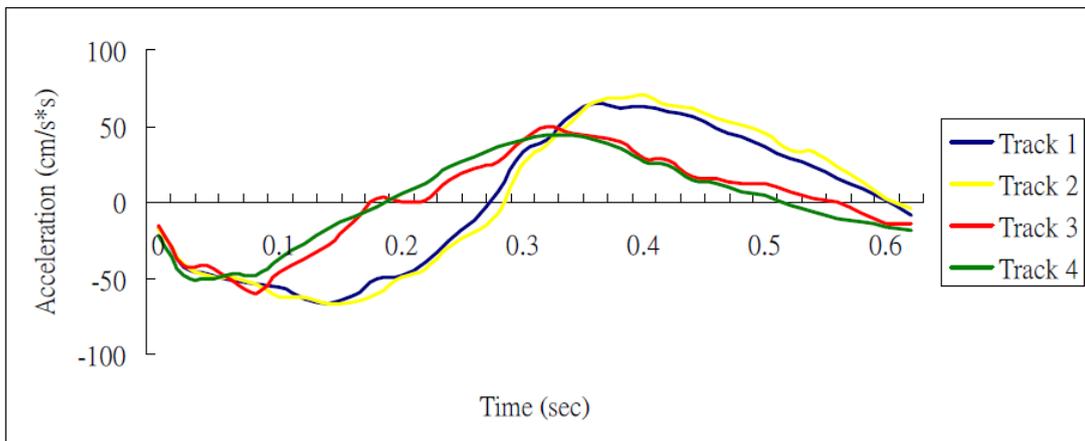
圖二十三、四號軌

3.加速度校正

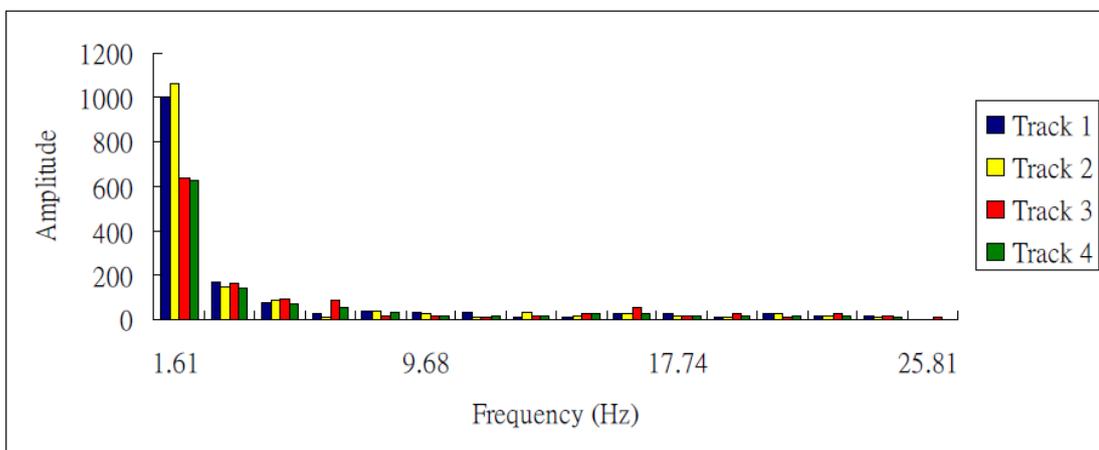
按實驗二之校正方法校正加速度值，並且減去靜止時的重力加速度得到加速度的差異值。

4.以傅立葉轉換濾除雜訊

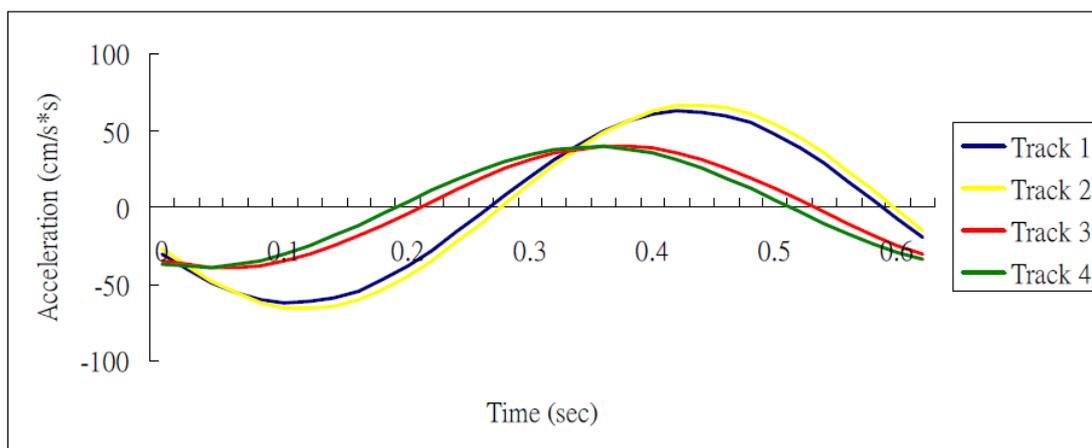
因高速鐵路列車時速超過 200km/hr 時，車體會有晃動，而 QCN Live 會將車體震動設為背景值 0，但是，經過差異沉陷地時，QCN Live 會把車體的震動與差異沉陷的震動疊加在一起，而車體震動包含轉向架(半自動式橫向減震系統、車身間止晃減震器以及無枕梁式轉向架)、空氣阻力以及環境影響，所以必須將之濾除才可由積分計算差異沉陷沉陷值。從 Excel 快速傅立葉轉換把差異沉陷與車體震動所造成的加速度變化分離。圖二十四為 QCN Live 測得之原始數據，經過傅立葉轉換後為圖二十五，該段資料之頻譜，基頻即為差異沉陷所造成，取該段反傅立葉轉換後即是過濾車體震動所造成的影響後的資料，如圖二十六。



圖二十四、原始資料 a-t 圖



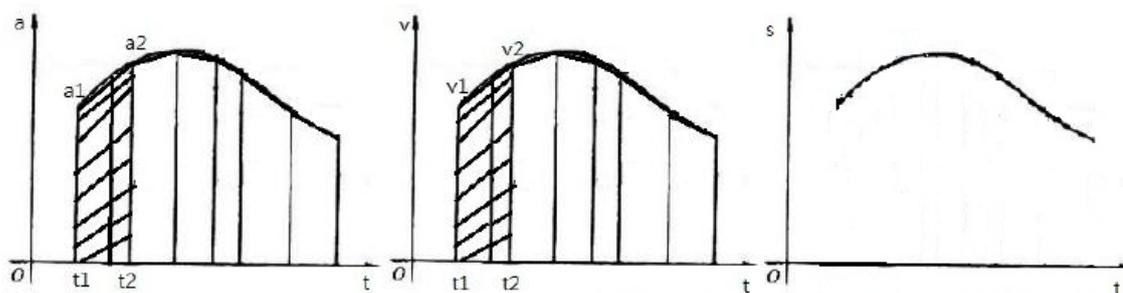
圖二十五、頻譜



圖二十六、基頻之 a-t 圖

5. 算法一：以梯形面積法數值積分原始資料計算沉陷值

數值積分的範圍是原始數據中加速度半個完整波的時間長度。計算方法如下：



圖二十七、a-t 圖

圖二十八、v-t 圖

圖二十九、s-t 圖

以在車內觀察者的座標系來看，在 Z 軸的初速度與初位移皆是零。

圖二十七：計算 Δa 底下的面積，可以得到 Δt 的 Δv 值，計算方法為：

$$\Delta v_n = \frac{1}{2}(a_n + a_{n+1}) \Delta t_n$$

得到 Δv 之後，可以計算時間軸上的速度值 v ，計算方法為： $v_n = (v_{n-1} + \Delta v_n)$

圖二十八：計算 Δv 底下的面積，可以得到 Δt 的 Δs 值，計算方法為：

$$\Delta s_n = \frac{1}{2}(v_n + v_{n+1}) \Delta t_n$$

得到 Δs 之後，可以計算時間軸上的距離 s ，如圖二十九，計算方法為： $s_n = (s_{n-1} + \Delta s_n)$ ，就是台灣高鐵差異沉陷的沉陷值。

6. 算法二：傅立葉分析後，以梯形面積法數值積分計算沉陷值

先以快速傅立葉轉換取得原始資料之頻譜，將振幅最大者反傅立葉轉換得基頻之 a-t 圖，再以梯形面積法數值積分，時間長度與原始資料相同。

7. 算法三：以運動方程式，計算其沉陷值

根據傅立葉級數： $F(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\omega t$ ，可以得知基頻的

加速度函數為： $a_z(t) = -a_1 \sin \omega_1 t$ 。

對時間積分一次可得速度對時間的函數：

$$v_z(t) = \int a_z = \int a_1 \sin \omega_1 t \cdot dt = \frac{a_1}{\omega_1} \cos \omega_1 t \text{。}$$

再積分一次可得位移對時間的函數：

$$x_z(t) = \int v_z = \int \frac{a_1}{\omega_1} \cos \omega_1 t \cdot dt = \frac{a_1}{\omega_1^2} \sin \omega_1 t \text{。}$$

a_1 是傅立葉轉換後的加速度，而 $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \frac{1}{T_1}$ ，以麻園坑道為例，

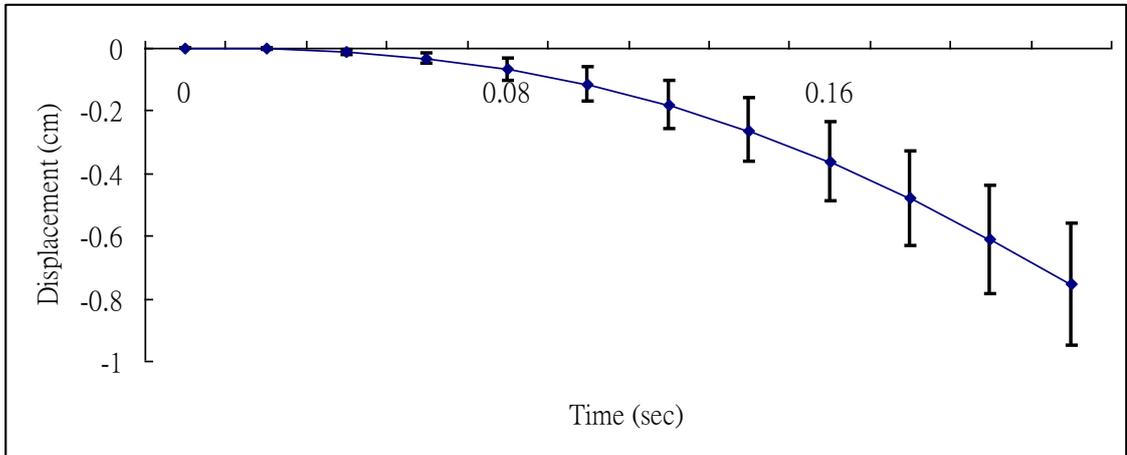
$$T_1 = 0.62 \text{ sec} \text{， } \omega_1 = 9.82 \text{ Hz}$$

從上述可以知道，在 $x_z(t) = \frac{a_1}{\omega_1^2} \sin \omega_1 t$ 中， $\frac{a_1}{\omega_1^2}$ 是位移對時間的函數之振幅，

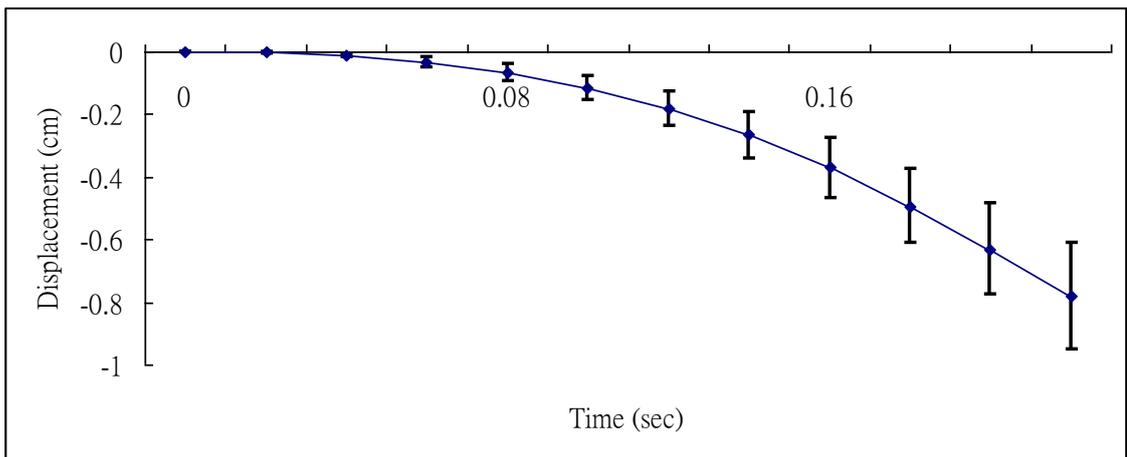
也就高速鐵路差異沉陷的沉陷值。

(下列為苗栗麻園坑口 TK109+386 土堤段沉陷 1~4 軌統計圖)

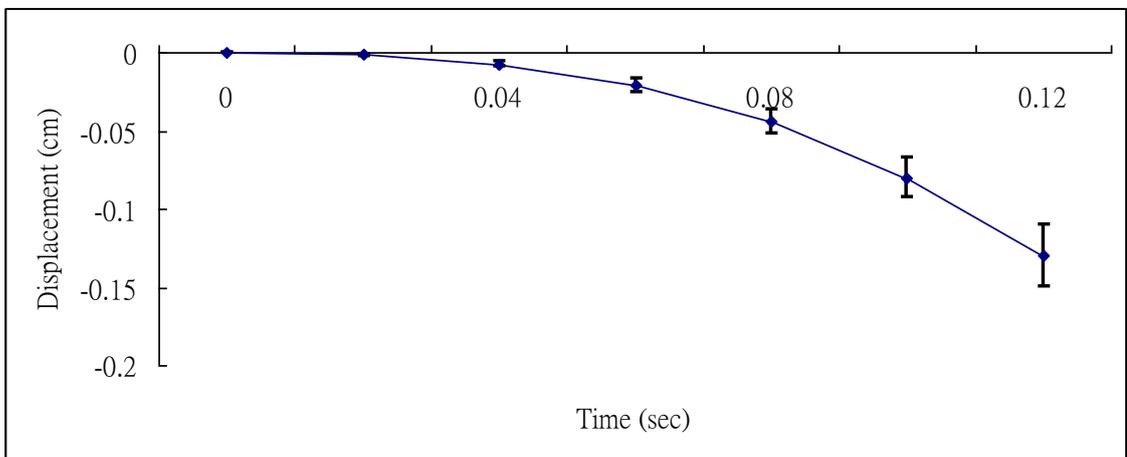
算法一：以梯形面積法數值積分原始資料計算沉陷值



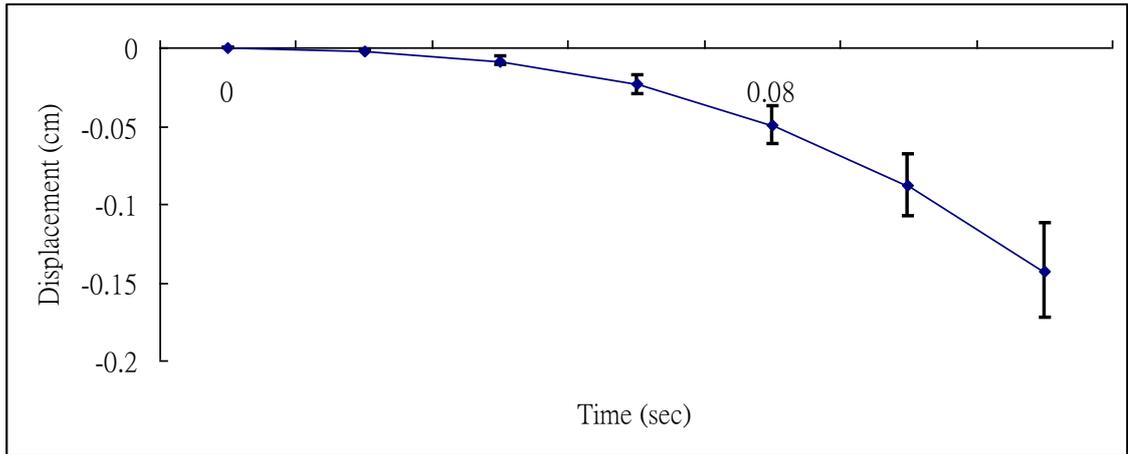
圖三十、一號軌 平均沉陷值：-0.753cm 標準差：0.195cm 與高鐵 8 月測量值相差：17.71%



圖三十一、二號軌 平均沉陷值：-0.781cm 標準差：0.170cm 與高鐵 8 月測量值相差：-14.49%

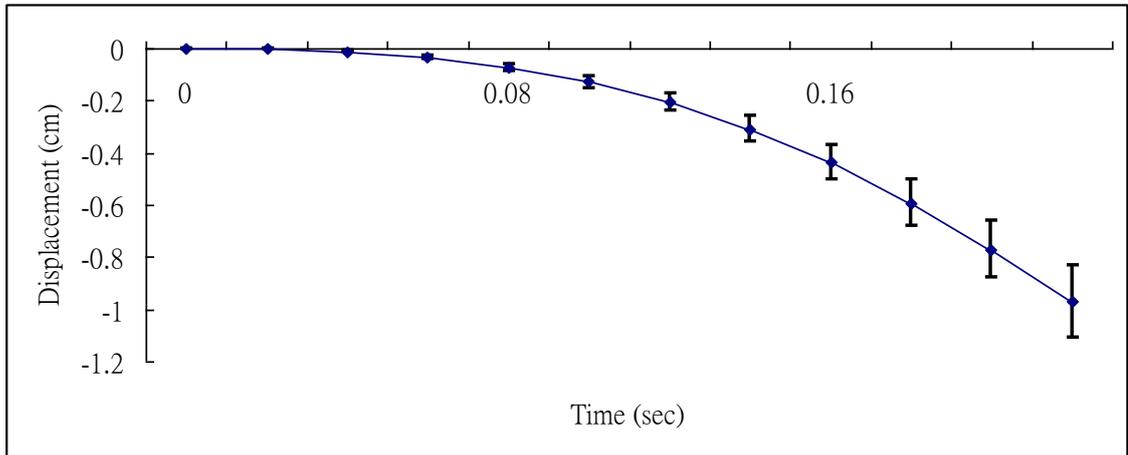


圖三十二、三號軌 平均沉陷值：-1.297cm 標準差：0.019cm 與高鐵 8 月測量值相差：-73.44%

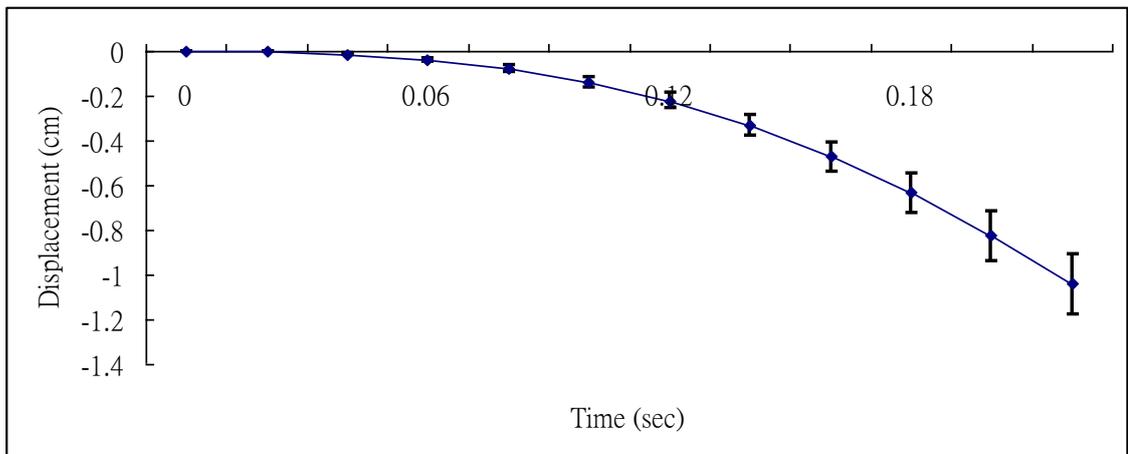


圖三十三、四號軌 平均沉陷值：-0.143 m 標準差：0.030cm 與高鐵 8 月測量值相差：-66.59%

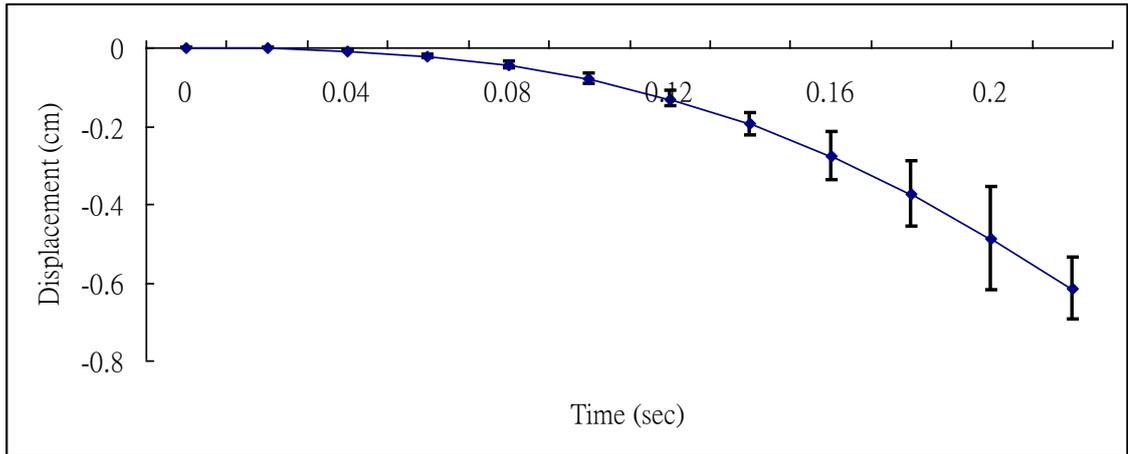
算法二：傅立葉分析後，以數值積分計算沉陷值



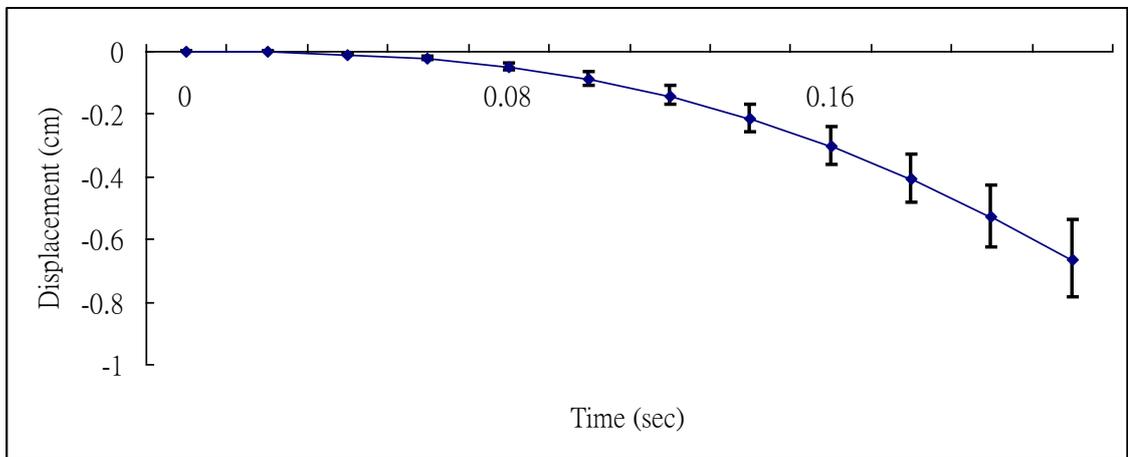
圖三十四、一號軌 平均沉陷值：-0.968cm 標準差：0.136cm 與高鐵 8 月測量值相差：51.44%



圖三十五、二號軌 平均沉陷值：-1.042cm 標準差：0.135cm 與高鐵 8 月測量值相差：52.72%

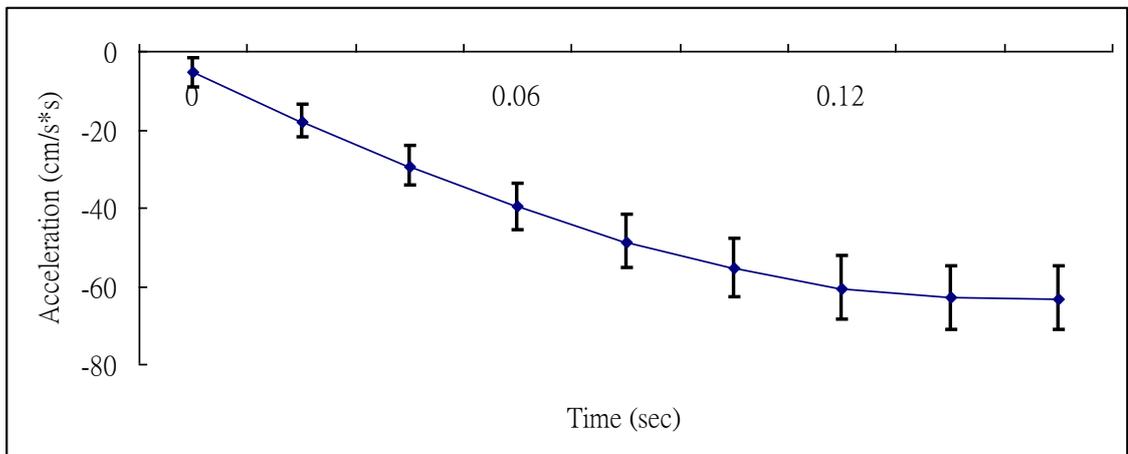


圖三十六、三號軌 平均沉陷值：-0.657cm 標準差：0.079cm 與高鐵8月測量值相差：13.18%

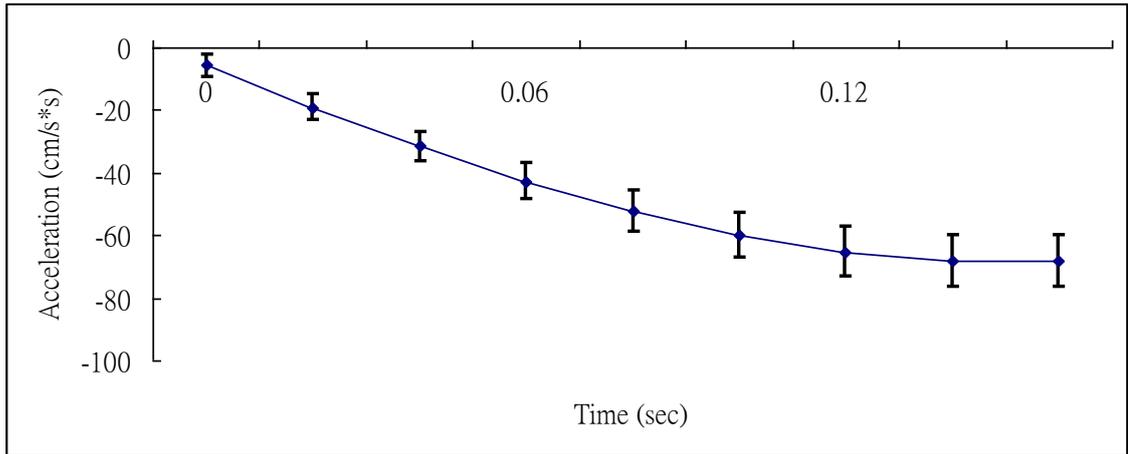


圖三十七、四號軌 平均沉陷值：-0.662cm 標準差：0.124cm 與高鐵8月測量值相差：36.34%

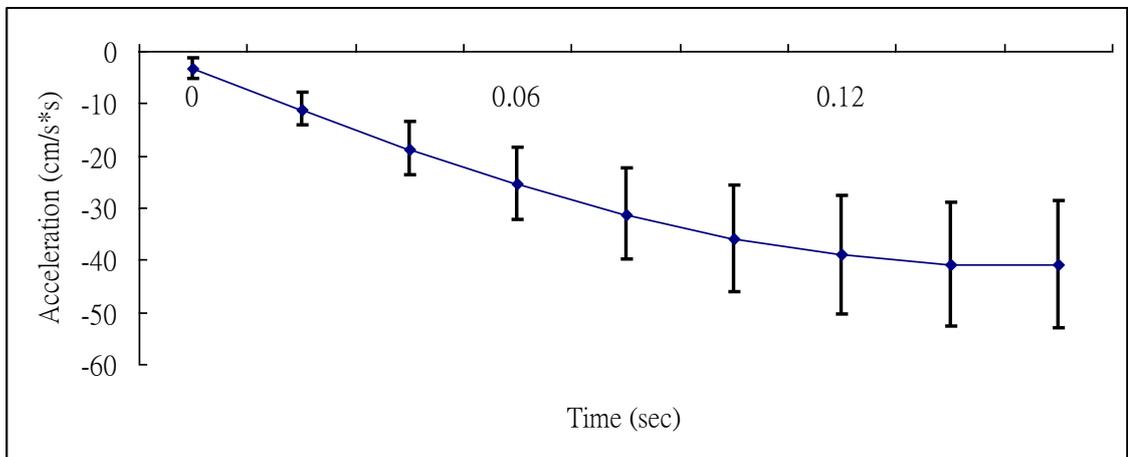
算法三：以運動方程式，計算其沉陷值



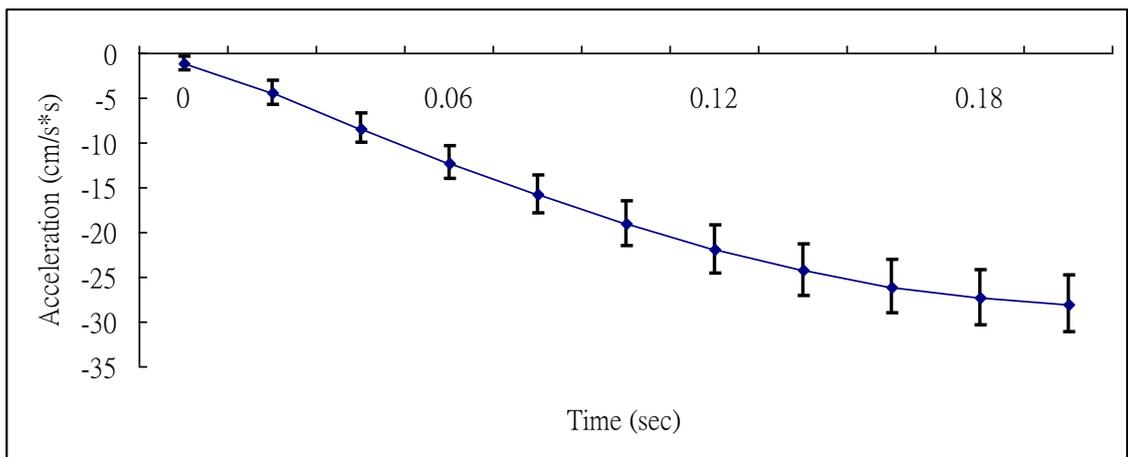
圖三十八、一號軌 平均沉陷值：0.654cm 標準差：0.084cm 與高鐵8月測量值相差：2.34%



圖三十九、二號軌 平均沉陷值：0.707cm 標準差：0.087cm 與高鐵8月測量值相差：3.71%



圖四十、三號軌 平均沉陷值：0.422cm 標準差：0.167cm 與高鐵8月測量值相差：-12.98%

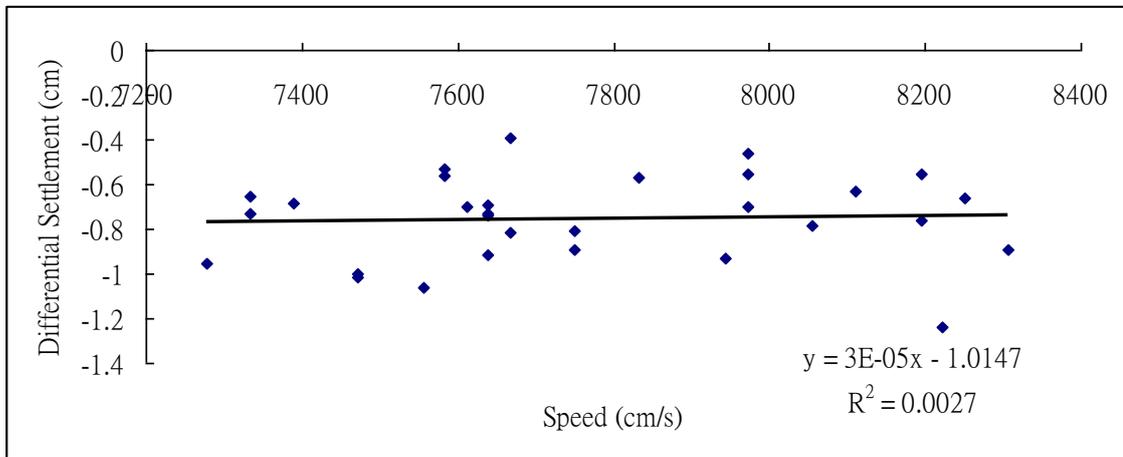


圖四十一、四號軌 平均沉陷值：0.549cm 標準差：0.061cm 與高鐵8月測量值相差：13.02%

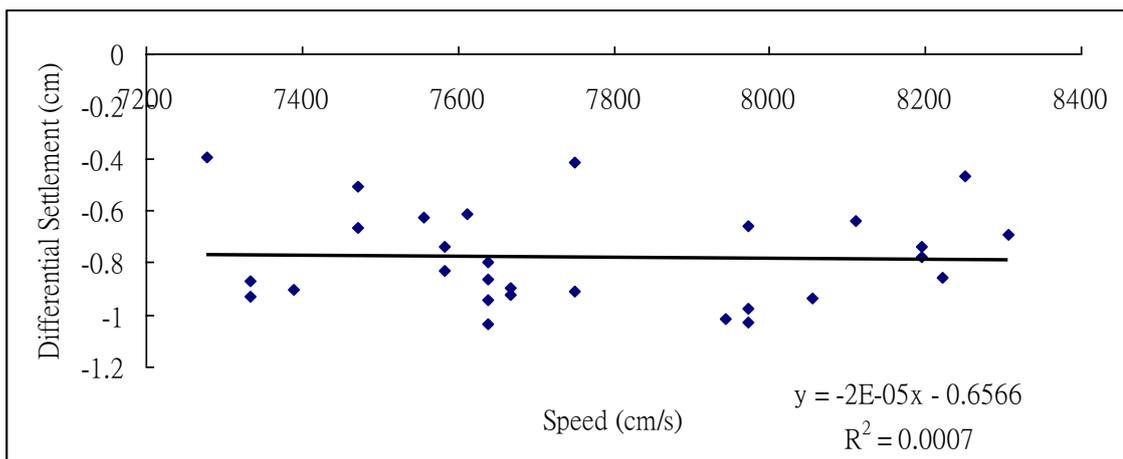
上列十二張圖中，黑線所囊括的範圍是一倍的標準差，表示測量的沉陷值有 68.3% 的機率會落在此範圍中。

(下列為苗栗麻園坑口 TK109+386 土堤段沉陷 1~4 軌線性回歸統計圖)

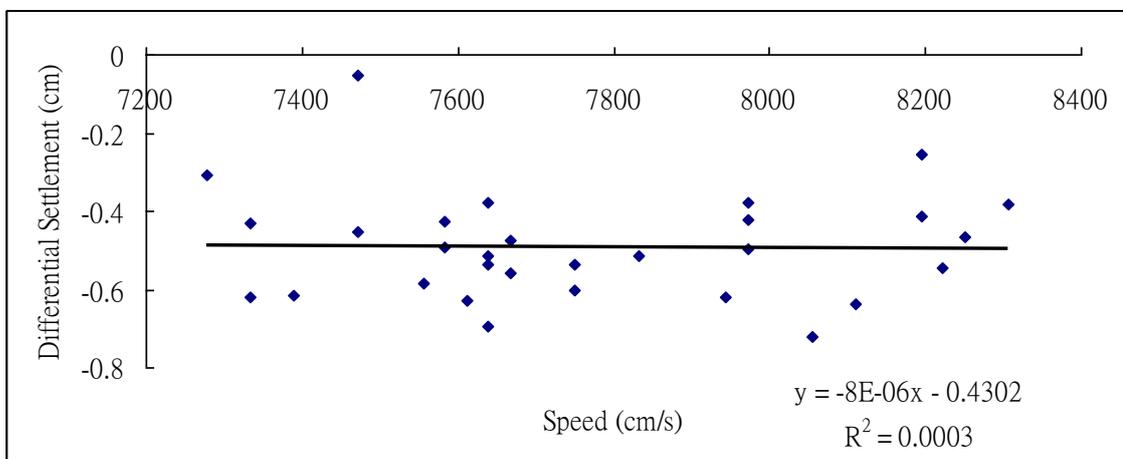
算法一：以梯形面積法數值積分原始資料計算沉陷值



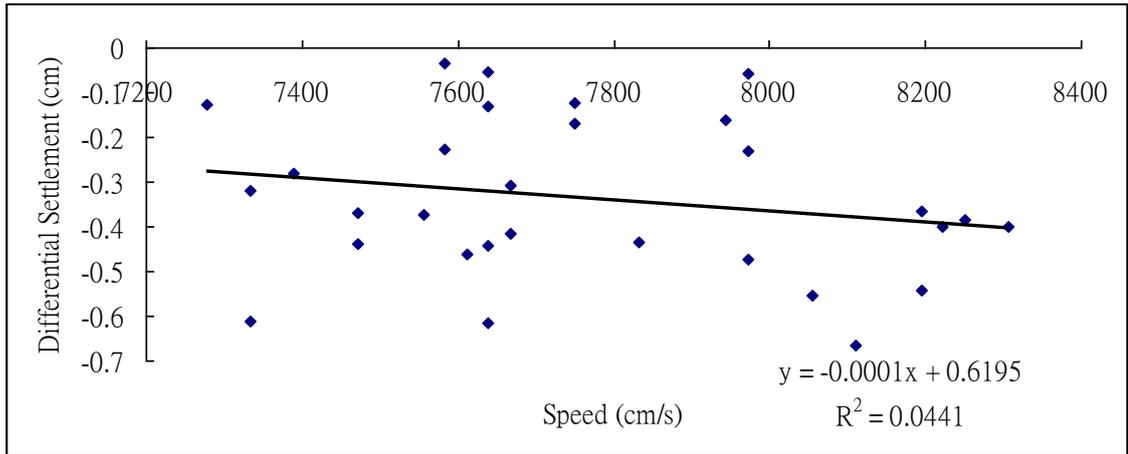
圖四十二、一號軌線性回歸



圖四十三、二號軌線性回歸

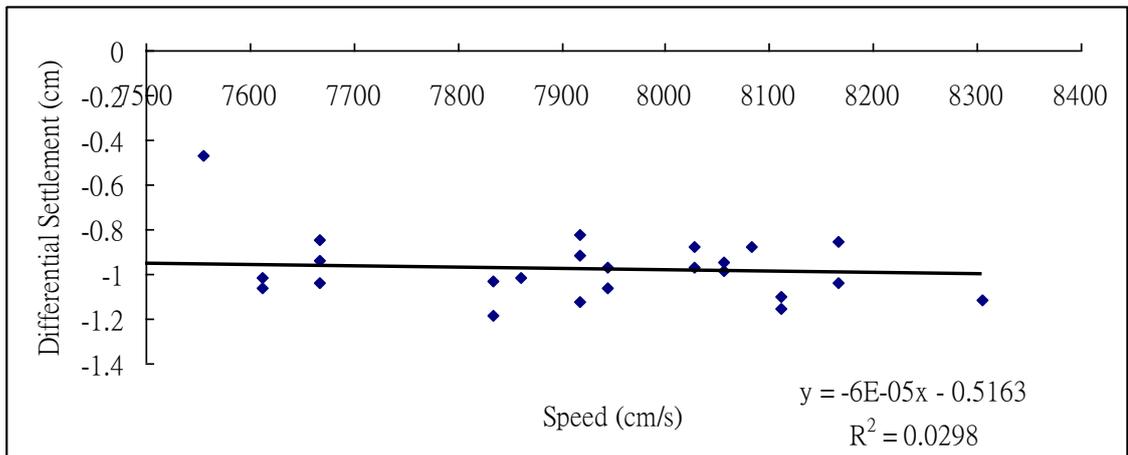


圖四十四、三號軌線性回歸

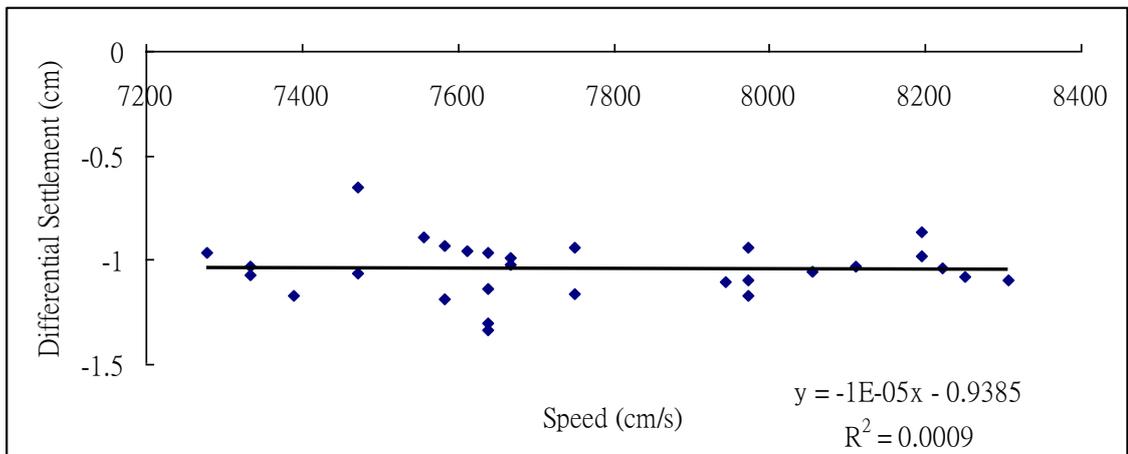


圖四十五、四號軌線性回歸

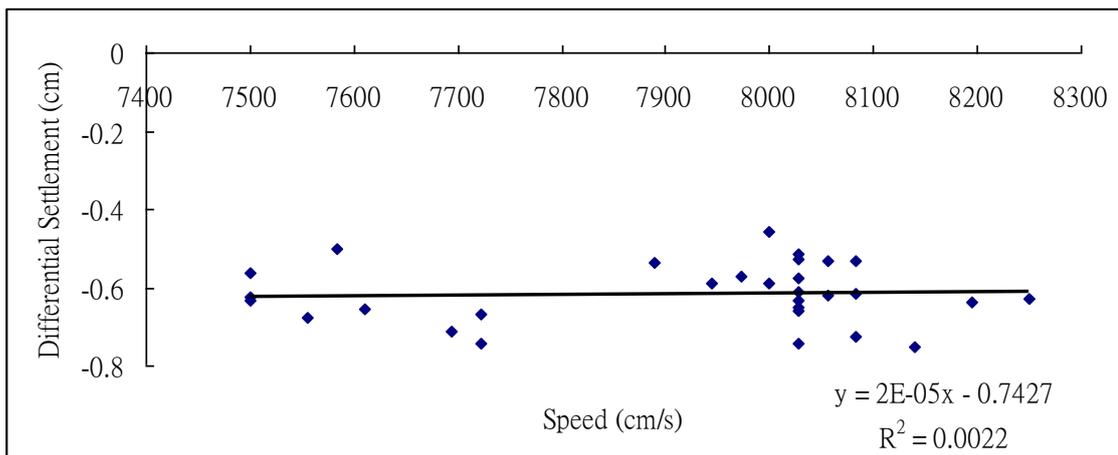
算法二：傅立葉分析後，以數值積分計算沉陷值



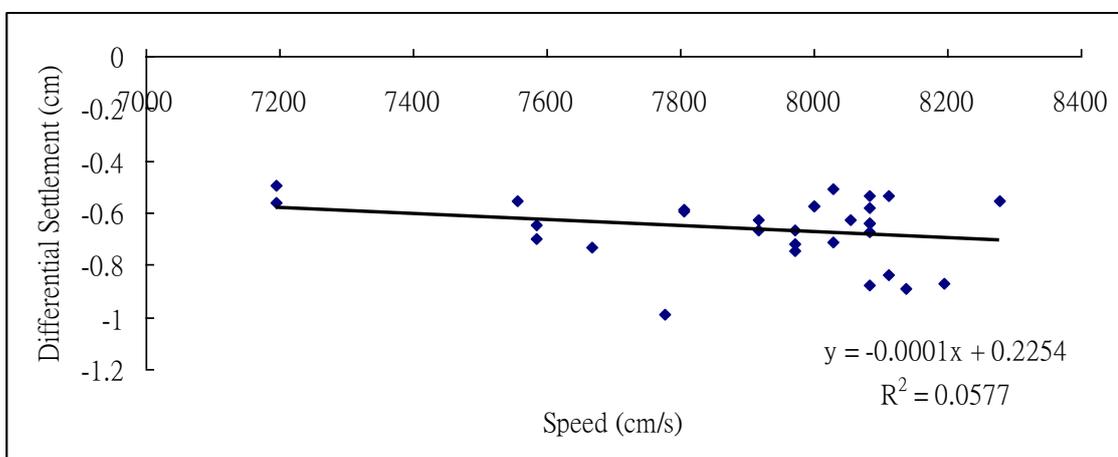
圖四十六、一號軌線性回歸



圖四十七、二號軌線性回歸

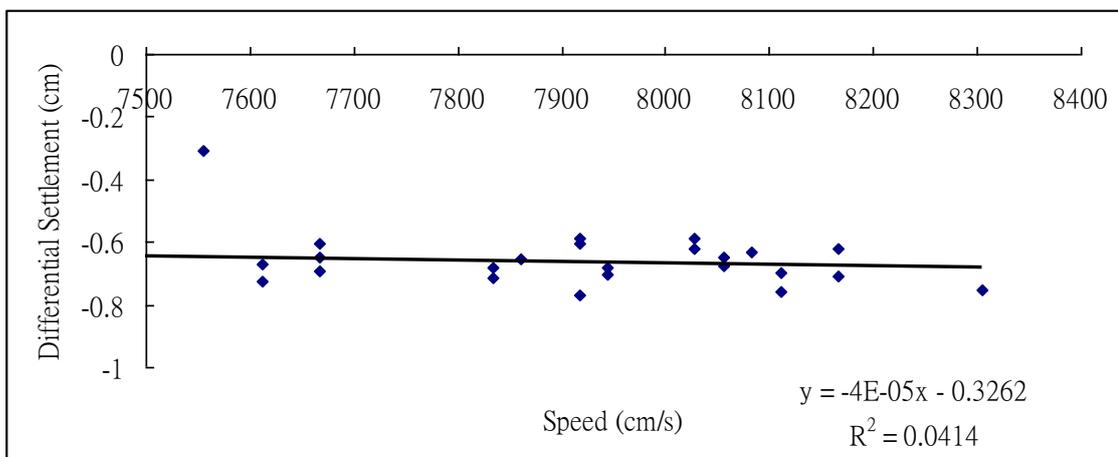


圖四十八、三號軌線性回歸

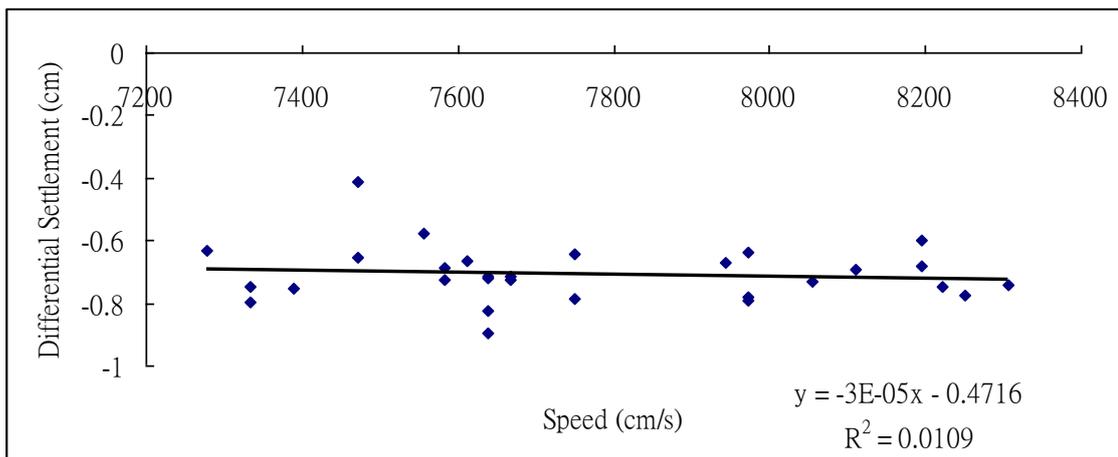


圖四十九、四號軌線性回歸

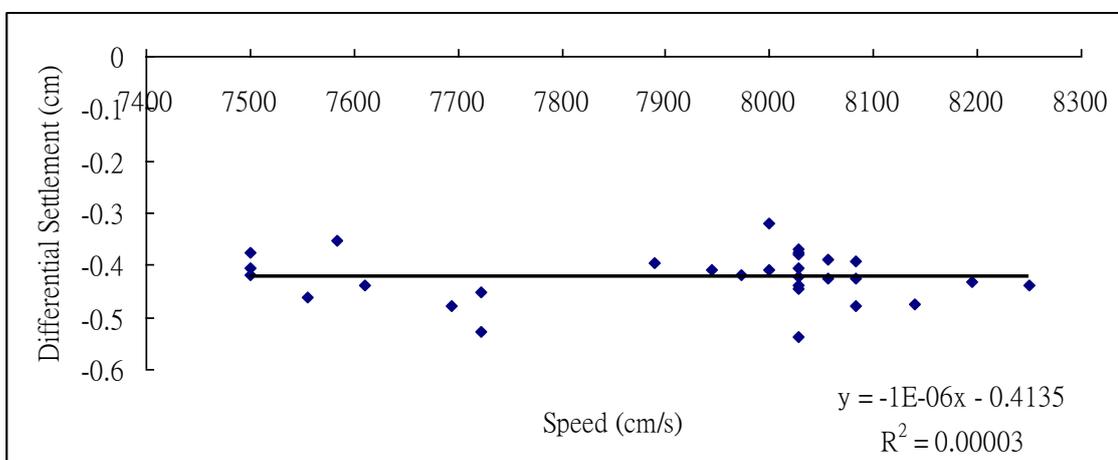
算法三：以運動方程式，計算其沉陷值



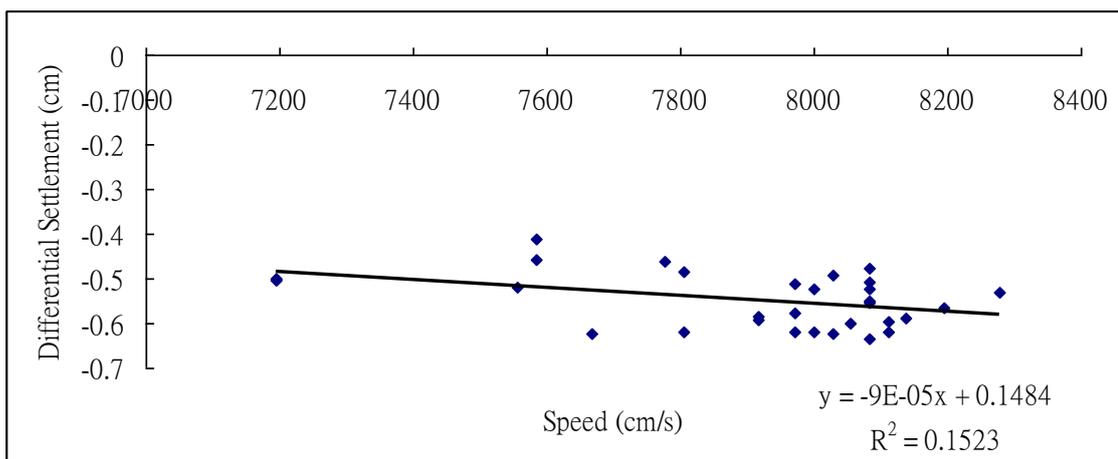
圖五十、一號軌線性回歸



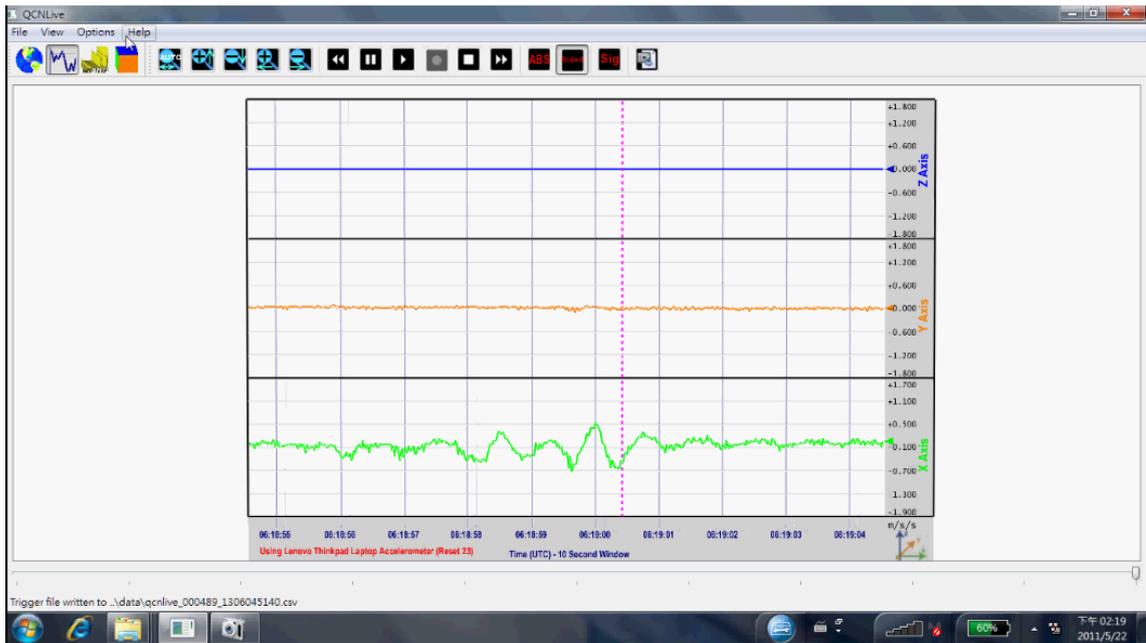
圖五十一、二號軌線性回歸



圖五十二、三號軌線性回歸



圖五十三、四號軌線性回歸



圖五十四、QCN Live 擷取圖 2011 年 6 月北上車尾

圖五十四是 2011 年 6 月在苗栗麻園坑道差異沉陷地區，北上車尾所測量的 QCN Live 擷取圖，圖中紫色虛線是差異沉陷所造成，原本在 QCN Live 中指的是地震，代表苗栗麻園坑道的差異沉陷在車尾的加速度已經大到使 QCN Live 誤判為地震，相當於中央氣象局地震強度分級五級強震。

8. 實驗對照：高鐵測量方法

根據我們查詢的資料，台灣高鐵測量苗栗後龍鎮麻園坑口沉陷的方法，是使用人工測量，花費約每年五百萬至六百萬，每月測量一次，使用的儀器有經緯儀及水準儀。

另外有詢問台灣高速鐵路 [8]所測量的差異沉陷沉陷值，已對照過，如圖三十~四十一、五十二~五十三底下說明。

(五)、實驗五：差異沉陷現地勘查



圖五十五、苗栗麻園坑道現地照



圖五十六、鐵軌下方墊片

苗栗麻園坑道高鐵里程 TK109+386 並非橋梁段，而是土堤，在高鐵鐵軌下方，明顯有用以改善差異沉陷的墊片，如圖五十五紅框處。



圖五十七、苗栗麻園坑的高鐵



圖五十八、苗栗麻園坑

二、討論

- (一)、在實驗一驗證 QCN Live 時間計算的實驗中，為了要讓 X、Y 軸的分量不影響到 Z 軸，所以需使 X、Y 軸保持水平($\sin \theta = 0$)，由此也可得知 X、Y 軸上的速度並不會影響實驗結果。
- (二)、實驗一中，拉動台車時，繩子需與台車水平，以免施力不均，且使用定滑輪，較能平穩的拉動，避免影響實驗結果。
- (三)、GPS 記錄器須在高鐵車站時就定位好，否則開車後會因車速過快，而使 GPS 無法準確定位。
- (四)、在高鐵上做實驗時，盡量避免在筆記型電腦附近走動，以免加速度感測器偵測到其他震動，而造成實驗誤差。
- (五)、在車尾測量時，可能因速度太快，而導致晃動幅度較車頭大，所以干擾較多。
- (六)、苗栗麻園坑道高鐵里程 TK109+386 沉陷地軌道有轉彎，沉陷在 Y 軸會有分量，所以在做計算前，須把 Z 軸、Y 軸向量合成。
- (七)、總結苗栗麻園坑道所有實驗結果，由 GPS 軌跡紀錄器的高度計上顯示，我們發現：

1. 高鐵南下(三、四軌)時，經過麻園坑地區為下坡，沉陷處的 QCN Live 數值積分的時間長度較短。

2. 高鐵北上(一、二軌)時，經過麻園坑地區為上坡，沉陷處的 QCN Live 數值積分時間長度較長。

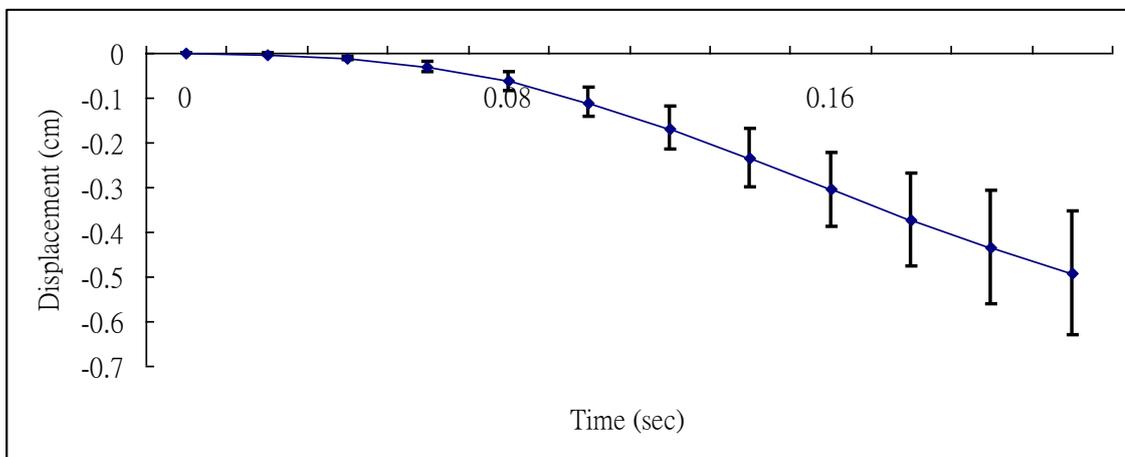
計算方法一數值積分在三、四軌的準確度非常低。

導致麻園坑北上(一、二軌)、南下(三、四軌)時間長度不同，是由於上、下坡的差異。下坡時，因為速度較快，沉陷對於加速度感測器只是另一個下坡，如圖五十九，加速度感測器的測量會延遲一段時間才能測到明顯的加速度變化，所以量到的明顯加速度變化時間長度就較短。反之，上坡則能立即測得明顯的加速度變化，因此時間長度較長。

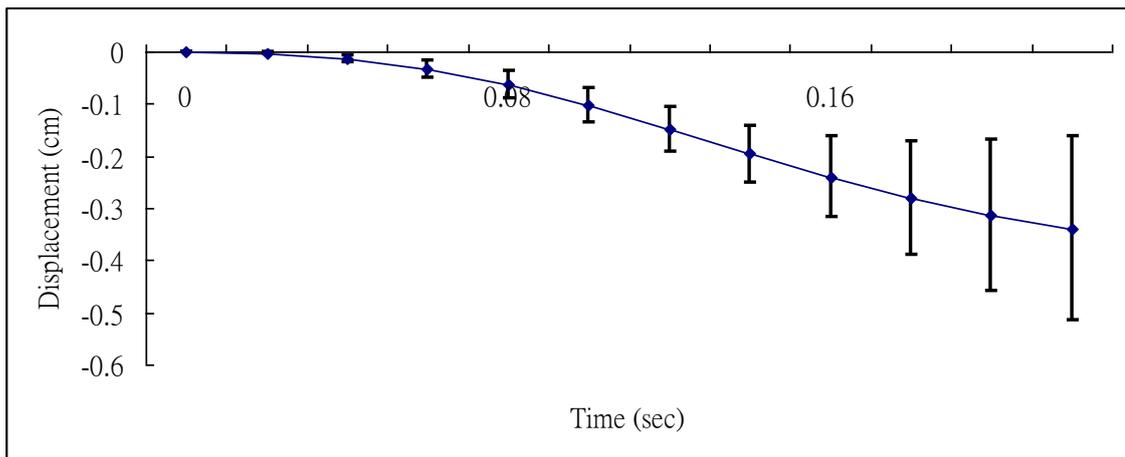
南下(三、四軌)與北上(一、二軌)都會因沉陷在 Y 軸上的分量而使 QCN Live 的 Y 軸固定朝一方向偏移,換言之,可以從 Y 軸偏移經過的時間得知沉陷的長度,因兩者 Y 軸所經過的時間一致,所以須修正三、四軌數值積分取的時間長度與一、二軌相同,修正後得到圖六十、六十一。



圖五十九、中間凹陷是代表差異沉陷



圖六十、三號軌 平均沉陷值：0.492cm 標準差：0.139cm 與高鐵 8 月測量值相差：1.20%



圖六十一、四號軌 平均沉陷值：-0.339 m 標準差：0.177cm 與高鐵 8 月測量值相差：-20.60%

(八)、QCN 有兩種繪圖的模式，一是直接將測得的加速度繪出，二會將靜止時的加速度值設為零，繪出其差異值，但是兩種繪圖方式在記錄成 Excel 檔時，

加速度的數值是相同的。

- (九)、從一次的實驗失誤中，發現原本用來固定台車的四根螺絲柱有過濾雜訊的效果。
- (十)、由於高鐵是許多車廂連結在一起，會互相干擾，並不是一個拋射體的運動，必須從數值積分來計算，不能使用斜向拋射來計算。
- (十一)、從一到四號軌的線性回歸統計圖，R 平方值顯示至少有 85% 測量值的變異無法以列車車速解釋，所以高速鐵路的列車車速對差異沉陷的測量值影響可以忽略不計，同時也證明初速度為零的假設是正確的。
- (十二)、在苗栗麻園坑道的差異沉陷車尾加速度值已達地震強度五級強震，如果車頭也有此現象，則應立即停駛或降至時速 200 公里以下，以策安全。
- (十三)、算法二和算法一同樣是數值積分，但是算法二傅立葉轉換後再積分誤差卻比較大，
- 是因為傅立葉轉換後的基頻只有車體的運動，而非整體合力的狀態，所以誤差較大。

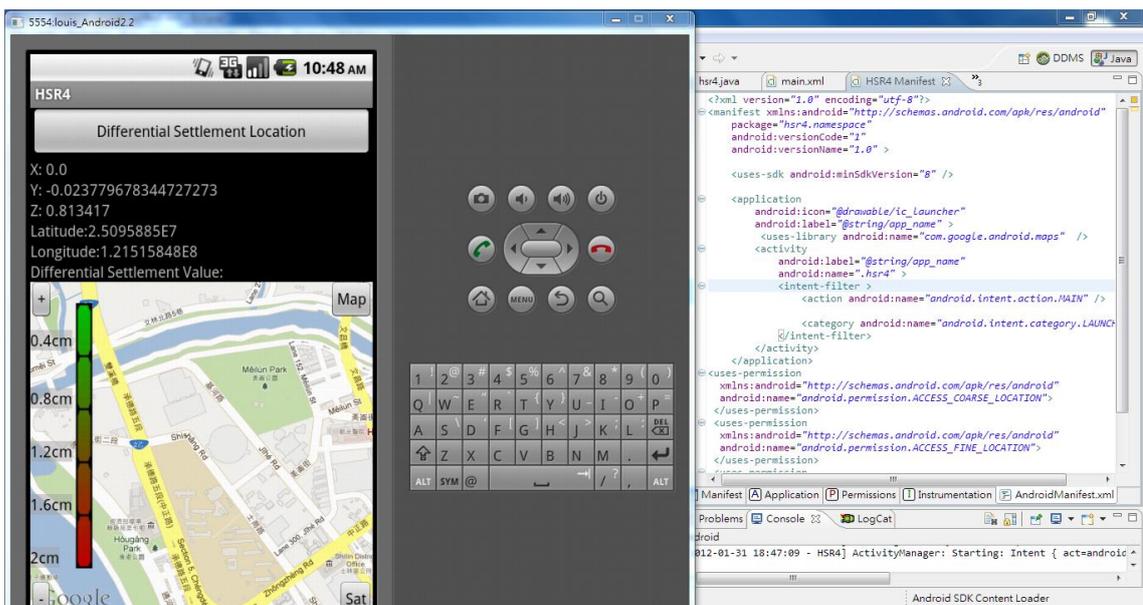
肆、結論與應用

總結所測得的結果，2011 年 10 月台灣高鐵在苗栗麻園坑道的差異沉陷值最嚴重為 0.689 公分，長度約 56 公尺，與台灣高鐵 2011 年 8 月所測量誤差最高 0.076 公分。

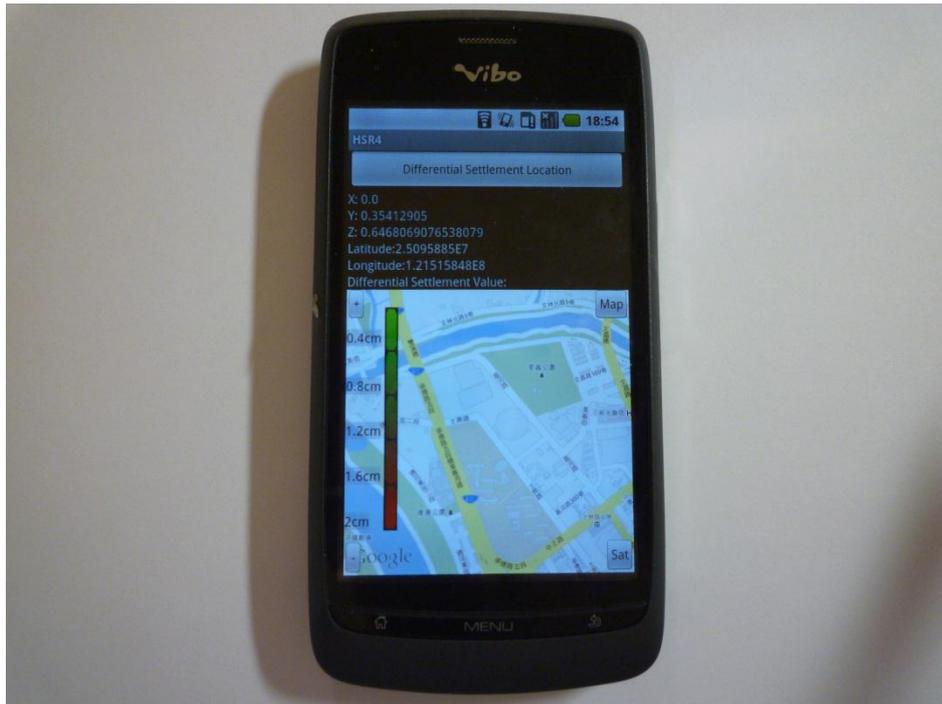
相對於臺灣高鐵的人工夜間測量，運用加速度感測器結合 QCN 來測量，更具安全可靠及立即性。

雖然使用筆記型電腦已經非常方便，但是體積仍然頗占空間，且需配合 GPS 來作定位，顯得不方便。因此，試圖找具有加速度感測器且比筆記型電腦更微小的裝置，從而想到有許多手機遊戲是以搖晃機身進行，藉由翻轉改變螢幕方向，都是加速度感測器的應用。我們嘗試在智慧型手機上開發差異沉陷偵測程式，而目前市面上的手機大部分都有三軸的加速度感測器，也有 GPS，改用手機測量可減少更多人力與物力。

因應 Android 系統為開放式平台，所以在此系統開發。圖六十二左半部為開發工具上模擬器初步結果，圖六十三為手機實機初步結果。圖中已有加速度以及經緯度，也有線上地圖，寫好的程式需匯出成 apk 檔方可在手機上執行，圖六十二右半部為開發工具 Eclipse(日蝕)，於 Windows 平台。



圖六十二、開發工具模擬器初步結果



圖六十三、手機實機初步結果

因此，若在高鐵駕駛室內，設置一內含加速度感測器的記錄裝置，如智慧型手機，在每班車進行測量，此測量方法可在測量後五分鐘內馬上算出沉陷值，配合台灣高速鐵路將在車廂內增設無線網路，測量到的沉陷值，能立即透過網路傳回行控中心，若發現測量到的差異沉陷值足以構成威脅，採取因應措施以提高行車安全。同時，也可做長期的觀測，觀察高速鐵路的差異沉陷值是否持續惡化，以做好預防的工作，避免造成危險，也能節省大部分的測量與監測費用。

另外，監測各列列車不同節車廂之轉向架加速度的差異性，此測量裝置也可用於偵測轉向架之穩定性。以德國高速鐵路事故為例，成因是車輪因金屬疲勞導致損壞，技師檢查未發現，另事故 2 個月前工作人員就有反應有不正常的晃動，而在德國慕尼黑機車維修廠，工程師僅以手電筒檢查缺口，無法偵測出細微裂縫與缺口。加上駕駛未得知車輪毀壞，仍以超過時速 200 公里行駛，方釀成此事故。所以，高速鐵路可在每列列車各節車廂轉向架上設置一加速度感測器，偵測轉向架之異常，由駕駛室統一接收各節車廂之訊號，再傳回列車行控中心，成為整列列車之監控系統，適時降速或停駛。

因台灣高速鐵路系統與其他國家之高速鐵路相似，所以這種測量方法也適用於其他國家的高速鐵路，例如日本的新幹線、法國的 TGV 及中國高速鐵路等。

伍、參考資料及文獻

- [1] <http://www.iris.edu/>
- [2] <http://www.iris.edu/hq/NSFProposal/Volume2/EO.pdf>
- [3] Quake Catcher Network Live : <http://qcn.stanford.edu/>
- [4] G-sensor 重力感測器的技術原理：
http://irisintw.blogspot.com/2010/05/g-sensor_8424.html
- [5] Using an Accelerometer for Inclination Sensing :
http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1057.pdf
- [6] 中央氣象局(地震百問) : <http://www.cwb.gov.tw/>
- [7] 實驗數據的處理與分析：
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=Notes/dataProcess>
- [8] 台灣高速鐵路股份有限公司
- [9] Where Am I ? (<http://www.dotblogs.com.tw/alonstar/archive/2011/05/26/26282>)

評語

本研究利用 QCN 軟體與商用筆電測量高速鐵路沿線差異沉降的地段，以及可能的高度差。本研究想法創新。研究結果定量上雖然還不夠嚴謹，但定性上絕對具有實用的價值。

優點：

目標明確、實驗數據充分、內容完整。

缺點：

重要物理量的求取方式並非完全正確。

建議改進事項：校正實驗應放在最前面。

1. 就實驗設計而言，若能考慮比例會更加引人入勝，例如真實輪徑為 L ，車廂長、輪距、軌道寬、單段軌道長、沉降差異量等，實驗設施均可之成比例。
2. QCN Live 取樣率每秒 50 點，時間間格為 0.02 秒，實驗一為何能出現 0.0624 秒的測量值？應呈現實驗所得的真實加速度歷時供比較。
3. 實驗一的拋射公式應明確圖示定義所有參數 (v_0, g, t, h, θ 等)。拉力可改懸吊重物。
4. 實驗四-3 是按實驗「三」而非「二」的校正法。實驗四-6 應為運動方程式的傅立葉展開式。 ω 圍角頻率，單位非 Hz。
5. 原始數據直接數值積分應取完整周期長，否則垂直速度無法歸零(見附圖)。
6. 僅以基頻訊號來近似加速度變化，噪訊是被忽略還是被濾除？
7. 感測器誤差與背景噪訊如何限制可偵測的沉降量？0.05cm 可被偵測出？
8. 車廂運動同時受雙軌影響，即使感測器擺放位置不同亦難以分離？
9. 應討論列車避震系統的影響。
10. 未來應可持續進一步研究，並建議未來可以轉換到應用工程科學領域。