

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

建置慣性式平坦儀認證程序與人員教育訓練制度

**Development of Certifying Process for the Inertial
Profiler and Guideline of Operator Training**

賴怡樺

Lai, Yi-Hua

指導教授：周家蓓 教授

Major Advisor: Chou, Chia-Pei

中華民國 98 年 8 月

July 2009

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

建置慣性式平坦儀認證程序
與人員教育訓練制度

**Development of Certifying Process for the
Inertial Profiler and Guideline of Operator
Training**

本論文係賴怡樺君 (R96521505) 在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 98 年 6 月 16 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員： 周家蓓 教授

周家蓓 (簽名)

(指導教授)

陳建旭 教授

陳建旭

李英豪 教授

李英豪

系主任

張國鎮

(簽名)

誌謝

好快，兩年過去了。

想當初我斬釘截鐵地心想不唸研究所，在戴老師一番話後心念一轉踏入研究所。最感謝的人當然是我可愛的媽媽，您總是讓我自己決定人生許多重要的抉擇，含辛茹苦又讓我多讀了兩年的書。

這兩年研究所學習期間，首先感謝周家蓓老師耐心的傳授我們專業知識，教導我們該如何做研究。讓我獲益最多、啟發最大的莫過於老師待人處世的風範，盡心盡力投入公眾事務的熱情與正直正義的態度，老師帶給我們極為正面的學習模範。另外，別感謝陳建旭老師與李英豪老師細心的針對論文逐字斧正，更在口試時給我難忘的震撼教育，提供非常多寶貴的意見，讓我的論文內容更加充實與完整。再來感謝交通組龍老師、大周老師、曹老師、大張老師、小張老師、許老師及賴老師，尤其是學問淵博、氣勢磅礴又不失風趣的曹老師，無形中激發自己對運輸領域的興趣。

這兩年來，小周家族優秀可靠的學長姐們讓我慢慢成長，謝謝艾懃學姐、怡先學長、詩瑩學姐、小紅學姐、鎮宇學長及李寧學姐，每次你們都不厭其煩地告訴我文章該怎麼寫、實驗該怎麼做，當我快要犯錯時適時指正，當我已經犯下錯時全力cover我。接著是小周家族同窗夥伴們：孝萱、國軒、小明、日新，不管是學業、情感及計畫案都幫助我很多，在自己都水深火熱時拔刀相助，讓我順利完成各項實驗；還有一群好學弟妹們：力維、君凱、中庭、雅君及彥文，任勞任怨的支援各項實驗及其他拉拉雜雜的瑣事，讓我可以順利完成論文。另外，謝謝R96級所有夥伴，常常讓我笑到流眼淚又說我愛哭，謝謝你們容忍我的低笑點與那麼直接，為這兩年的確較單調的研究生生活增添歡笑的氣氛。

謝謝同樣帶給我畢生難忘的夏天的kona，一起上課、作研究、吃飯、跑步、玩樂，踩著勺一尤 勺一尤鐵馬說載著我彷彿載著陽光。謝謝之薇小朋友在我內心極度煎熬時放下作業帶著巧克力來陪我；謝謝惠君以專業口吻說那很簡單來替我寫程式；謝謝同樣是國中生的室友大鈺聽我胡言亂語，還教我佛學與人生。當然不會忘記的小人國姐妹妍方、聖聖、小菊，謝謝你們帶給我來自遠方的打氣。

總之，感謝大家對我這麼好！

好不容易，來到這裡

這是，永恆的長跑

明天，仍要繼續追逐

把自己角色扮演好

全力以赴每一秒

我們，一起走到

怡樺 謹誌於研一舍與土木館
民國九十八年八月三日

摘要

國內已開始利用慣性式平坦儀進行平坦度檢測，但對於儀器、軟體之校正方式及流程卻尚未徹底落實，且操作人員對於儀器操作原理、輸出指標及檢測過程所產生之量測誤差缺乏相關認知與專業知識；相較於美國等其他國家，國內之鋪面平坦度發展與人員素質稍顯落後，有鑑於此，本研究提出慣性式平坦儀認證程序及人員教育訓練制度。

本研究首先蒐集國內外慣性式平坦儀相關認證規範，並以 AASHTO PP49 之規範為參考依據，研擬慣性式平坦儀認證程序。利用臺灣大學土木系自有之慣性式平坦儀進行室內實驗室單一零件校正，並於一特定之試驗道路，進行距離感測器校正、參考剖面之建立及慣性式平坦儀重複性試驗。將所有蒐集的資料透過三種比對方式進行評估，以瞭解試驗進行之穩定性，以及操作人員搭配臺大慣性式平坦儀之重現性與準確性。而在研究期間內進行多次重複性試驗也發現，人為因素為室外認證過程中最常遭遇且最難避免之問題，故本研究針對不同車速下速度控制、瞬時加速度變化及車輛橫向偏移量進行試驗並分析。

此外，於人員教育訓練制度方面，本研究以平坦度檢測與認證相關規範為基礎，研擬人員教育訓練教材，範圍則涵蓋平坦度指標、各種剖面量測儀器、認證程序、影響慣性式平坦儀量測之環境、設備及人為操作誤差與訊號處理等，並以 AASHTO PP 49 為基礎，針對人員認證部份研擬相關流程，希望藉此強化操作人員之正確認知與專業知識，並有助於提升國內道路鋪面平坦度之檢測品質。

關鍵字：慣性式平坦儀認證、AASHTO PP49、人為因素、瞬時加速度、橫向偏移

Abstract

Recently, many academic authorities and government organizations have been utilizing inertial profilers to measure pavement smoothness. However, there is no proper and complete certification process and methods for inertial profilers. In addition, the operators do not have enough professional knowledge and skill to measure the pavement smoothness correctly. Therefore, the operational quality in Taiwan is lower than other countries such as America and Canada. For the sake of increasing the quality of measurements, the certifying process for the inertial profiler and guideline of operator training has been developed in this study.

First, the certification standards in Taiwan and other countries were collected. Then the certification process for the inertial profiler was established following the AASHTO PP49 specification. The certification includes two main procedures which are the calibration procedure in the laboratory and the field test procedure. In this study, a laser-type inertial profiler was certificated in the specific road. Furthermore, the three methods in the AASHTO PP49 specification were utilized to evaluate the repeatability and accuracy of the inertial profiler. During the field test of the certification procedures, operational factors are unavoidable source of error. Therefore, the variation in speed and transient acceleration as well as the lateral positioning were discussed in order to understand the vehicular operating conditions during the procedure.

In addition, the guideline of operator training was established that was based on standards of smoothness and inertial profiler certification. The handbook of operators training includes the smoothness index, devices for smoothness measurement, certification process, factors affecting inertial profiler measurements and signal process. By developing the handbook and guideline of operator training, the quality of smoothness measurements utilizing inertial profilers can be promoted in Taiwan.

Key Words: Inertial Profiler, Certification Process, AASHTO PP49,
Operational Factor, Transient Acceleration, Lateral Positioning

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	III
表目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究內容與方法.....	2
1.4 研究流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 平坦度指標介紹—國際糙度指標.....	5
2.2 鋪面平坦度檢測儀器.....	9
2.2.1 儀器分類[7].....	9
2.2.2 國內現行平坦度驗收儀器.....	12
2.2.3 慣性式平坦儀.....	18
2.2.4 自動水準儀 (Auto Rod and Level, AR&L).....	22
2.3 國內外認證規範探討與比較.....	25
2.3.1 中華民國國家標準 CNS 15046 規範.....	25
2.3.2 美國 AASHTO PP49 規範.....	27
2.3.3 美國各州認證規範.....	30
2.3.4 綜合比較.....	36
第三章 慣性式平坦儀認證程序與人員教育訓練制度.....	38
3.1 認證程序之研擬.....	38
3.1.1 室內試驗.....	39
3.1.2 室外試驗.....	40
3.2 人員教育訓練制度之研擬.....	42
3.2.1 國外人員教育訓練課程.....	43
3.2.2 人員教育訓練課程與教材.....	44
3.2.3 人員認證制度.....	45
第四章 臺大慣性式平坦儀認證結果分析.....	48
4.1 試驗場地.....	48
4.2 參考剖面建立與慣性式平坦儀重複性試驗.....	48
4.3 重現性與準確性分析.....	53
第五章 人為誤差影響分析.....	58
5.1 影響慣性式平坦儀量測之人為操作因素[29].....	58
5.2 不同速度下加速度變化與速度控制分析.....	62
5.3 橫向偏移分析.....	67
第六章 結論與建議.....	72
6.1 結論.....	72
6.2 建議.....	73
參考文獻.....	75

附件一「慣性式剖面儀精準度認證試驗法」
附件二「慣性式平坦儀人員教育訓練教材」



表目錄

表 2.1 國工局施工技術規範之基層與底層平坦度規定.....	14
表 2.2 新建道路檢驗標準 單位：m/km.....	16
表 2.3 重鋪道路檢驗標準(原始 IRI 小於 4.0 m/km) 單位：m/km.....	16
表 2.4 重鋪道路檢驗標準(原始 IRI 介於 4.0~6.5 m/km) 單位：m/km.....	16
表 2.5 重鋪道路檢驗標準(原始 IRI 大於 6.5 m/km) 單位：m/km.....	17
表 2.6 國內平坦度驗收規範之檢測儀器、參考指標與檢驗標準彙整.....	18
表 2.7 縱向量測間距 單位：mm.....	26
表 2.8 垂直量測之解析度 單位：mm.....	26
表 2.9 各等級儀器精密度要求標準 單位：mm.....	26
表 2.10 各等級儀器偏差要求 單位：mm.....	26
表 2.11 美國各州位移感測器校正要求.....	31
表 2.12 美國各州距離感測器校正要求.....	31
表 2.13 美國各州試驗道路要求及速度限制.....	32
表 2.14 美國各州參考剖面建立與試驗次數.....	33
表 2.15 美國各州數據比對方式與門檻值要求.....	35
表 2.16 美國各州數據比對方式.....	37
表 4.1 AR&L 交叉相關重現性.....	51
表 4.2 距離感測器校正結果.....	52
表 4.3 臺大慣性式平坦儀 IRI 值 單位：m/km.....	53
表 4.4 交叉相關重現性 單位：%.....	55
表 4.5 交叉相關準確性 單位：%.....	55
表 4.6 逐點高程重現性及準確性比對結果.....	57
表 5.1 不同速度下交叉相關重現性與準確性.....	62
表 5.2 速度變化標準差、變異係數及全距.....	64
表 5.3 加速度值落入一個標準差之比例 單位：%.....	67
表 5.4 平均橫向偏移及絕對橫向偏移標準差.....	70

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	4
圖 2.1 四分車模型[6].....	6
圖 2.2 國際糙度指標於柔性鋪面之評估圖[6].....	6
圖 2.3 IRI 四分車濾波器的波數反應圖[6].....	8
圖 2.4 三米直規示意圖[7].....	10
圖 2.5 高低平坦儀示意圖[7].....	10
圖 2.6 梅式儀[7].....	11
圖 2.7 步進式平坦儀[7].....	12
圖 2.8 ARAN 道路檢測車[7].....	19
圖 2.9 南達科達州縱剖面量測系統[7].....	19
圖 2.10 ARRB 雷射平坦儀(後保險桿)[7].....	20
圖 2.11 ARRB 雷射平坦儀(前保險桿)[7].....	20
圖 2.12 系統架構[7].....	21
圖 2.13 感測箱內部構造[7].....	21
圖 2.14 儀器外部架構[7].....	21
圖 2.15 代步車式輕量型平坦儀[7].....	22
圖 2.16 雷射發射器及三角架.....	23
圖 2.17 AR&L 推車.....	23
圖 2.18 儀器組成及基本操作.....	24
圖 2.19 現場操作 AR&L.....	25
圖 3.1 慣性式平坦儀認證流程圖.....	39
圖 3.2 加速度規校正振動平台.....	40
圖 3.3 慣性式平坦儀操作人員認證流程圖.....	46
圖 4.1 淡海新市鎮試驗替代路段實景.....	48
圖 4.2 AR&L 量測示意圖.....	49
圖 4.3 AR&L 三次量測高程數據.....	50
圖 4.4 AR&L 三次量測高程數據經高通濾波處理圖.....	50
圖 4.5 AR&L 三次量測高程數據經 IRI 濾波處理圖.....	50
圖 4.6 距離感測器校正方式示意圖.....	51
圖 4.7 慣性式平坦儀十次檢測示意圖.....	52
圖 4.8 慣性式平坦儀起始點定位.....	53
圖 4.9 慣性式平坦儀十次試驗原始高程數據.....	54
圖 4.10 慣性式平坦儀十次試驗高程數據經高通濾波處理圖.....	54
圖 4.11 慣性式平坦儀十次試驗高程數據經 IRI 濾波處理圖.....	55
圖 4.12 慣性式平坦儀與 AR&L 逐點高程比對.....	56
圖 5.1 起始位置偏移[29].....	59
圖 5.2 減速對剖面量測之影響[34].....	60
圖 5.3 加速對剖面量測之影響[34].....	60
圖 5.4 時間域轉距離域.....	63
圖 5.5 速度變化圖.....	63
圖 5.6 瞬時加速度變化圖.....	66
圖 5.7 數位相機架設圖.....	68

圖 5.8 AVT Marlin 黑白數位相機 68
圖 5.9 判斷標線中心線之位置 69
圖 5.10 偏移軌跡圖 70



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

國內各級公路工程單位目前所公佈之鋪面平坦度驗收規範多以三米直規為主，而三米直規所測得之單點高低差或量測標準差並不能完全表示用路人對於平坦度的感受，且由於檢測速度緩慢，須耗費大量時間與人力資源。目前美國、加拿大及歐洲許多先進國家已廣為採用速度快、準確度高之慣性式平坦儀進行鋪面平坦度之檢測，其輸出之國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI) 可與其他指標進行轉換，較具代表性。慣性式平坦儀除了可蒐集大規模路網之平坦度資料，用以評估道面之使用狀況並納入鋪面管理系統之中，並可透過養護維修之概念，降低工程之生命週期成本，提供用路人良好之行駛環境。

慣性式平坦儀具有檢測速度快與輸出指標具代表性之特色，然而儀器是否能精確量測鋪面平坦度更為一值得探討的課題。美國已針對儀器、軟體及人員認證制定相關認證規範，諸如美國材料試驗協會 (America Society for Testing and Materials, ASTM) 所訂定之 ASTM E950[1] 規範，以及美國州公路暨運輸官員協會 (America Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 所制定之 ASHTO PP49[2] 之慣性式平坦儀認證規範，以作為各州政府制訂認證規範之依循準則。美國數州政府參考上述兩規範，並依據環境條件等加入自行訂定之校正方式或流程，並且執行州內所有儀器廠商與工程單位之慣性式平坦儀認證作業。

目前國內雖然逐漸有學術及工程單位採用慣性式平坦儀進行大規模路網平坦度檢測，且在平坦度驗收規範方面，也有部份公路主管機構開始增修其條文，將慣性式平坦儀納入平坦度驗收之標準；然而，有關慣性式平坦儀精準度與可靠度之評估，不論在儀器校正及認證，和操作人員資格認證方面，則尚未有一完善之評估流程與標準可循，導致各單位目前校正方式不一，且僅針對單一零件進行校正，不僅無法瞭解設備檢測結果之正確性，更因而難以推動慣性式平坦儀廣泛應用於各級道路平坦度驗收規範中。為能提升慣性式平坦儀之公信力及其應用範圍，當務之急則須建置一套可靠、完善且可行性高的認證程序，並且配合專屬機構執行認證作業，藉此評估慣性式平坦儀儀器、軟體乃至操作人員之重現性與準確性，以提升國內鋪面平坦度檢測之效率與平坦度驗收之水準。

1.2 研究目的

國內對於儀器、軟體之校正方式及流程卻尚未徹底落實，且操作人員對於儀器操作原理、輸出指標及檢測過程所產生之量測誤差卻沒有相關認知與專業知識；相較於美國等其他國家，國內之鋪面平坦度發展與人員素質稍顯落後，為改善此一現象，本研究提出慣性式平坦儀認證程序及人員教育訓練制度，其研究目的如下：

1. 配合室內各零件校正流程與室外實地試驗，評估認證程序之正確性與可行性，藉此提升慣性式平坦儀設備之準確性，以期作為未來認證機構執行認證作業之參考，並擴大慣性平坦儀應用於各道路等級之平坦度驗收。
2. 藉由探討影響慣性式平坦儀量測之誤差，包括鋪面因素、環境因素、設備因素及人為操作因素，以避免慣性式平坦儀在認證或檢測過程中產生不必要之人為誤差，提升數據之準確性與可靠性。
3. 強化操作人員對於鋪面平坦度量測之正確認知與專業知識，作為慣性式平坦儀人員認證之基礎，確保平坦度檢測之可靠度，藉此提升國內道路鋪面平坦度之檢測品質。

1.3 研究內容與方法

根據本研究前述之三項研究目的，其研究內容與方法亦分別從為三個部份討論之，第一部分為慣性式平坦儀認證程序之建置，包括室內各零件校正流程與室外實地試驗。第二部份為影響慣性式平坦儀量測誤差之探討，並針對人為誤差因素，以相關實驗設計與分析來說明其影響程度。第三部份則為研擬人員教育訓練制度，藉由人員教育訓練課程安排與人員教育訓練教材，強化操作人員平坦度量測之正確認知與專業知識；配合室外實地操作過程，瞭解操作人員是否具備足夠之專業知識與技能。以下將針對兩部分概略說明其內容與方法：

1. 建置慣性式平坦儀認證程序

本研究首先蒐集國內外慣性式平坦儀相關認證規範，並以 AASHTO PP49 之

規範為參考依據，研擬慣性式平坦儀認證程序。利用臺灣大學土木系自有之慣性式平坦儀進行室內實驗室單一零件校正，並於一特定之試驗道路，進行距離感測器校正、參考剖面之建立及慣性式平坦儀重複性試驗。將所有蒐集的資料透過三種比對方式進行評估，以瞭解試驗進行之穩定性，以及操作人員搭配臺大慣性式平坦儀之重現性與準確性，藉由程序研擬及實地試驗，最後提出「慣性式剖面儀精準度認證試驗法」(附件一)之標準。

2. 人為誤差影響之分析

人為操作因素為室外認證過程中最常遭遇且最難避免之問題，本研究同樣使用臺大慣性式平坦儀針對不同車速下速度控制、加速度變化及車輛橫向偏移量設計實驗流程，並且搭配自動化檢測設備之攝影機於特定道路進行試驗，分析試驗中所蒐集之數據，並深入探討誤差產生之原因與應如何避免之。

3. 人員教育訓練制度之研擬

本研究以平坦度檢測與認證相關規範為基礎，研擬人員教育訓練教材，範圍則涵蓋平坦度指標、各種剖面量測儀器、認證程序、影響慣性式平坦儀量測之環境、設備及人為操作誤差與訊號處理等，並以 AASHTO PP 49 為基礎，針對人員認證部份研擬相關流程。

1.4 研究流程

確立研究目的、內容與方法之後，本研究之流程參照圖 1.1。首先進行相關文獻回顧，包括平坦度指標與檢測儀器、國內外相關認證規範比較及慣性式平坦儀量測誤差因素；接著研擬慣性式平坦儀認證程序，並透過認證試驗與人為誤差因素試驗探討儀器、軟體及人員之重現性與準確性。人員教育訓練教材部分，則以鋪面平坦度檢測與認證程序為研擬之基礎，於本研究附件二中詳述之。

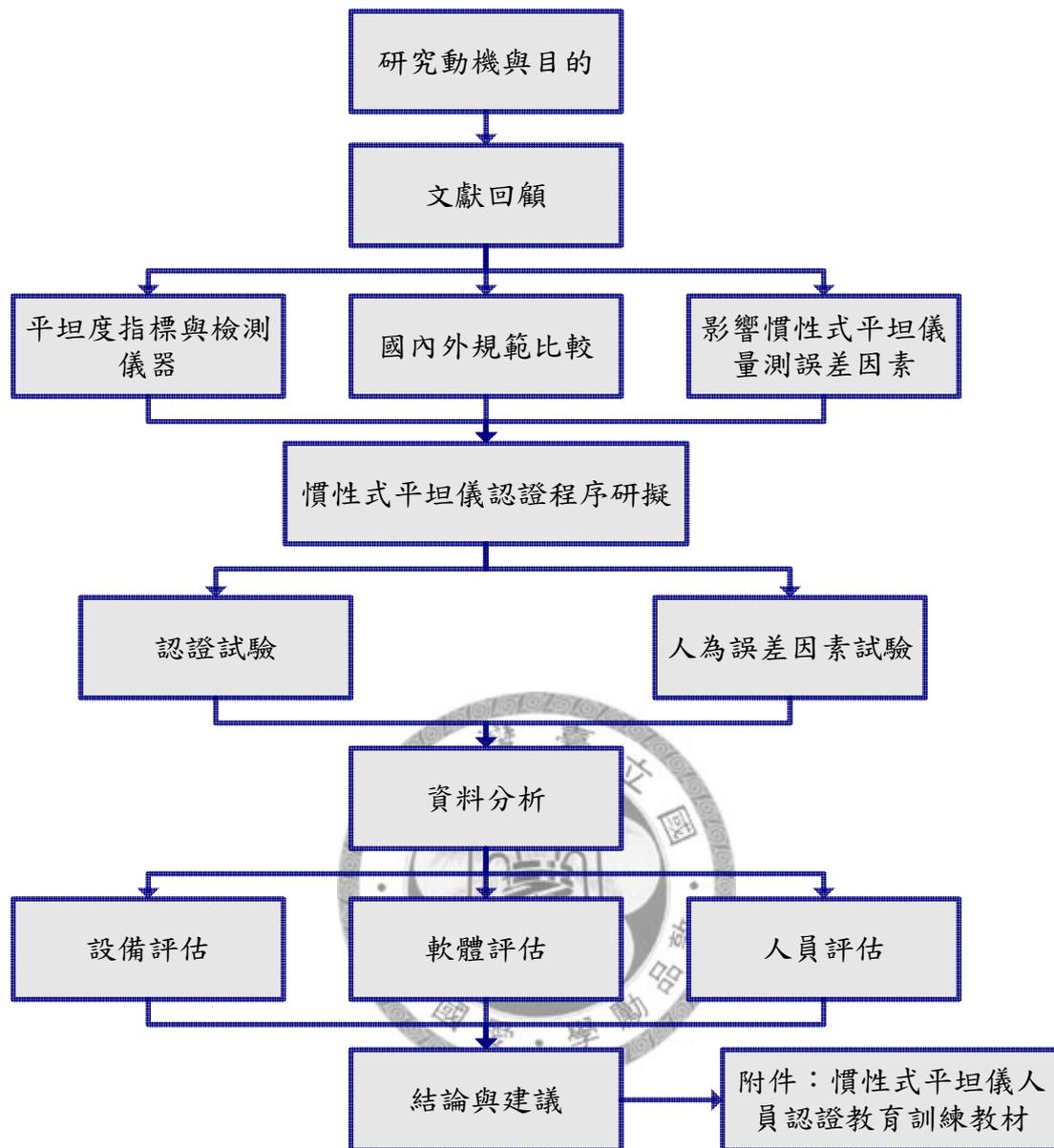


圖1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章首先介紹國際間最廣為應用之平坦度評估指標—國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI)，接著依據不同量測原理及特性，分別簡介不同類型之鋪面平坦度檢測儀器，並以臺大所擁有之慣性式平坦儀與自動水準儀進一步說明其設備組成、量測原理及其特性。最後探討國內外與慣性式平坦儀認證相關之規範，並比較不同規範之異同，藉由完整回顧平坦度指標、檢測儀器及慣性式平坦儀認證相關之文獻，了解國外之規範訂定及研究成果，使本研究更趨完善。

2.1 平坦度指標介紹—國際糙度指標

近幾年來，美國、加拿大及歐洲部份國家已利用電腦化之儀器規模連續檢測方式取代原始人工尺規抽樣檢測，隨科技進步，於期間也陸陸續續研發出各類型的平坦度量測儀器。然而，不同儀器所輸出之指標也因計算原理之差異而有所不同，有些指標無法與其他指標進行轉換，或無法隨時間增加而有相同的檢測穩定性，而導致鋪面養護管理沒有可依循之標準。

有鑑於此，世界銀行在 1982 年首先於巴西進行國際糙度試驗 (International Road Roughness Experiment, IRRE) [3] 之研究，試圖建立國際性通用之平坦度指標，最後發展出國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI)。國際糙度試驗 (IRRE) 參與之研究機構包括巴西運輸規劃局、巴西公路研究所、英國運輸與道路研究實驗室、美國密西根大學運輸研究所及比利時道路研究中心等。在 49 處之試驗區段 (包含瀝青混凝土、表面處理、礫石及泥土四種鋪面)，分別使用人工操作之平坦儀、反應式平坦儀、慣性式平坦儀及主觀評分進行平坦度量測，在擷取所有量測資料後，進一步分析其結果，最後推導出符合時間軸上具穩定性 (time-stable)、不同指標之間可移轉性 (transportable)、顯著且具代表性 (relevant) 及效力性 (valid) 四項準則之國際糙度指標[4]。

國際糙度指標之原理詳述於 ASTM E1170-92[5]，運用電腦模擬四分車於 80 km/hr 下之車體運動量及加速度之反應方程式。四分車意即車輛四個輪子中單一車輪之機械系統裝置，可用來模擬駕駛或乘坐車輛時的反應。而四分車的裝置包含垂直彈簧 (用以表示輪胎)、以輪胎支撐車軸質量、懸吊彈簧與阻尼，以及輪

胎懸吊系統支撐車體質量，如圖 2.1 所示。第一階段量測行駛中車輛之非彈性車體與彈性車體互相之累積運動量距離與該檢測之距離比值，其紀錄單位為公尺/公里 (m/km)；第二階段則量測車體之加速度，可評估模擬行車時的舒適程度。一般而言，鋪面平坦度 IRI 值範圍可由最平坦 0 m/km 到最粗糙 20 m/km，圖 2.2 顯示國際糙度指標在不同範圍內其柔性鋪面之可能狀況[6]。

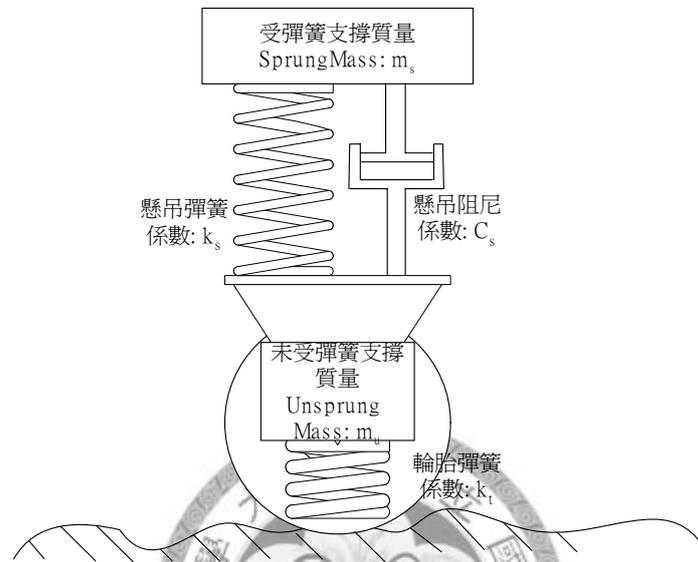


圖2.1 四分車模型[6]

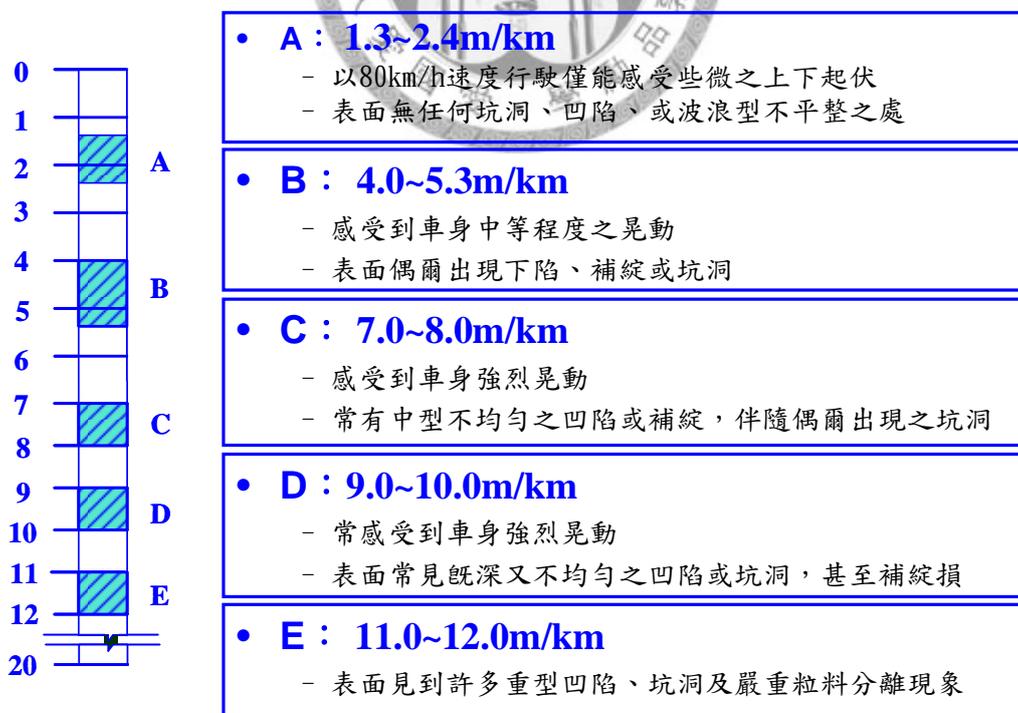


圖2.2 國際糙度指標於柔性鋪面之評估圖[6]

國際糙度指標目前已被廣泛運用於各種儀器，且該指標也被美國材料試驗協會 (American Society for Testing and Materials, ASTM)與美國州公路暨運輸官員協會 (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)納入其規範之中。美國、加拿大及歐洲許多國家也採用國際糙度指標作為平坦度驗收規範。國際糙度指標具有以下優點[6]：

1. 與大部分車型受震動時之反應變數具有相關性

IRI 值是以四分車模擬，利用車輛行駛時之振動情形表示路面之變化，計算而得平坦度結果；其資料呈現結果非常相似於一般車輛行駛於公路時的真實情況。因 IRI 對於大部分車型受震動時之反應變數有很大的相關性，尤其是其與路表反應(具歷史資料連貫性)、乘客的垂直加速度感受(行駛品質)以及輪荷重(車輛的可控制性與安全性)具有高度相關性，遂使之成為一般公眾所認定的平坦度指標。

2. 對於平坦度的量測呈線性比例

亦即當平坦儀所測得的高程差，是以某固定百分比持續增加，則 IRI 也會依此相同比例持續增加；換言之，若高程差增加兩倍，IRI 也會增加兩倍。

3. 採用不同平坦度量測儀器亦有近乎相等之 IRI 值

IRI 值並非第一個平坦度指標，在它被提出之前已有許多不同的量測儀器與方法，且各國於量測平坦度時有其獨特的量測區間；綜合以上兩點因素，容易造成計算結果產生誤差。根據世界銀行所公佈的計算程式測試發現，若以 IRI 為平坦度指標，於計算平坦度量測結果時，有近乎相等之 IRI 值，因此其為第一個在空間軸上具移轉性、時間軸上具穩定性的平坦度指標。

4. 可考量波長為 3 公尺以上之各種波長對路面平坦度之影響

圖 2.3 為 IRI 四分車濾波器的波數反應圖，輸出正弦波的振幅等於輸入的振幅再乘以圖 2.3 之得點數（無因次單位）。由圖 2.3 中可顯示波數接近 0.065 cycles/m(波長長度約 15.4 公尺)與 0.42 cycles/m (波長長度約 2.4 公尺)時，有最大的敏感度，人體會有最敏感的不舒適性產生。但因不舒適度介於 2.4 公尺及 15.4

公尺之間亦相當高，因此當使用三米直規或高低平坦儀作為量測平坦度驗收規範之工具，其僅可量測到 3 公尺內之道路平坦度變化，而忽略波長為 3 公尺以上之各種波長時用路者之感受，故採用 IRI 為平坦度評估指標，較可直接連續量測真實剖面之剖面行為。

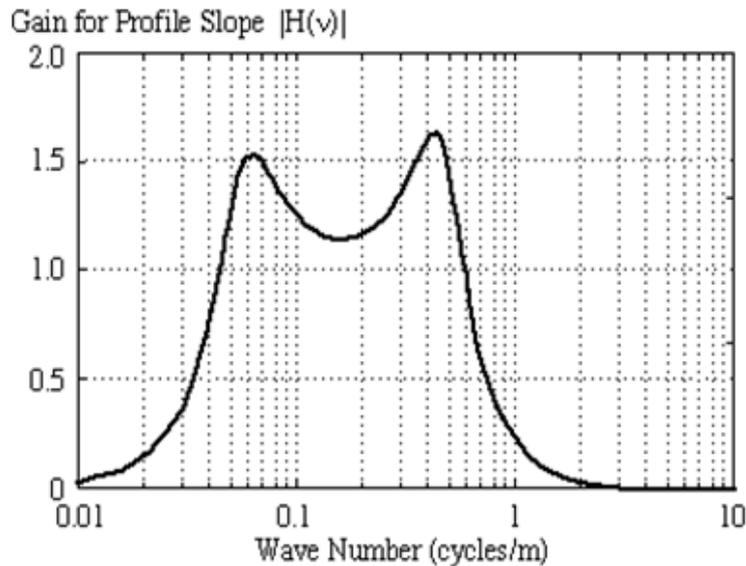


圖2.3 IRI四分車濾波器的波數反應圖[6]

5. 不受人為因素干擾

IRI 指標可運用數學資料客觀顯示鋪面特性，且可進行連續大量檢測，具檢測效率，更不會因體力、計算失誤等人為因素之干擾，導致對鋪面檢測實際狀況之影響。

6. 具有轉換性

IRI 是第一個廣泛使用於不同形式平坦儀的平坦度指標，各種形式之平坦度量測儀器均可以經由直接或間接計算方式，求得此指標之轉換值。

7. 可運用套裝程式軟體進行 IRI 值之計算

IRI 指標於國際間發展完善，世界銀行已公佈一套通用的 IRI 計算軟體，比其他傳統平坦度指標需以人工之方式評判，更符合經濟效益與代表性。

然而國際糙度指標仍有部分缺點，其缺點如下：

1. 因初始值之需求，量測區段必須大於 11 公尺

根據世界銀行公佈程式，必須以前 11 公尺的平均坡度為量測初始值，因此於 IRI 演算時，量測區段必須大於 11 公尺，所計算出之 IRI 值才具有代表意義。

2. 只針對單一的道路剖面

IRI 只針對單一的道路剖面進行計算，而非將同一路段上所有不同剖面加總平均。

3. 無法個別找出異常凹凸點

IRI 將道路剖面資料以平均值之方式計算而得，並無法找出單點高凸或凹陷區位。

2.2 鋪面平坦度檢測儀器

由於使用者對道路舒適度之感受無法具體由以口頭描述，或無法精確表達其鋪面平坦度之狀況，因此國內外各相關單位陸續開發新型式之平坦儀，以求能透過儀器正確量測鋪面情況，並由所量測到之資料進而求得平坦度指標，如此則可明確評定鋪面的優劣程度。本節依據平坦度檢測儀器不同之量測原理，說明其儀器分類，並彙整國內現行平坦度驗收規範中所規定之量測儀器設備；接著，進一步說明慣性式平坦儀及自動水準儀之量測原理及其特性。

2.2.1 儀器分類[7]

鋪面平坦度量測儀器依據不同之量測原理，主要可分為剖面式平坦儀（Profilograph）、反應式平坦儀（Response-Type Road Roughness Measuring Systems, RTRRMSs）、步進式平坦儀（Walking Profiler）、慣性式平坦儀（Inertia Profiler）及自動水準儀（Auto Rod and Level, AR&L）等。

剖面式平坦儀通常為直接量測鋪面的縱剖面變化情形，透過記錄輪或其他設備記錄路面高低起伏，而最具代表性之儀器則為三米直規（Straightedge）與高低平坦儀（High-low detector）。三米直規是以金屬或木材等材料所製成，為各工程單位普遍擁有之儀器，其兩端各有一凸腳以站立於檢測路面上，兩凸腳之間相距三公尺，如圖 2.4 所示。直規中央處設有標記與讀數之設備，可讀取中點路面

與兩接觸點連線間高度差；直規兩端設有把手以便於移動，檢測方式為平行於路線方向及垂直方向量測。由於依賴人工移動與判讀，使得檢測速度緩慢。

高低平坦儀的構造和指標計算與三米直規相似，不同處為將兩端凸腳改為滾輪，兩輪距仍為 3 公尺，中央設有一偵測輪，可隨路面高低而自由起降，經槓桿或齒輪原理將起降大小放大，以指針將所得之路面高低變化記錄於記錄器內，每隔 1.5 公尺讀取高低值一筆，高低平坦儀之構造如圖 2.5 所示。高低平坦儀之檢測速度仍然受到人力推動之影響，約等同於步行速度。

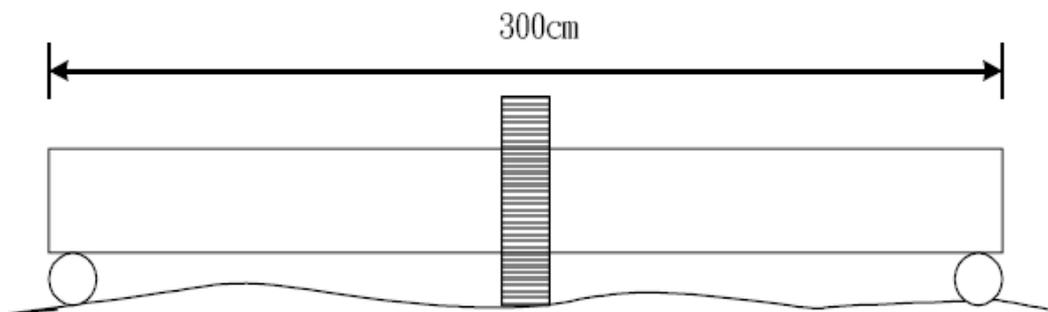


圖2.4 三米直規示意圖[7]

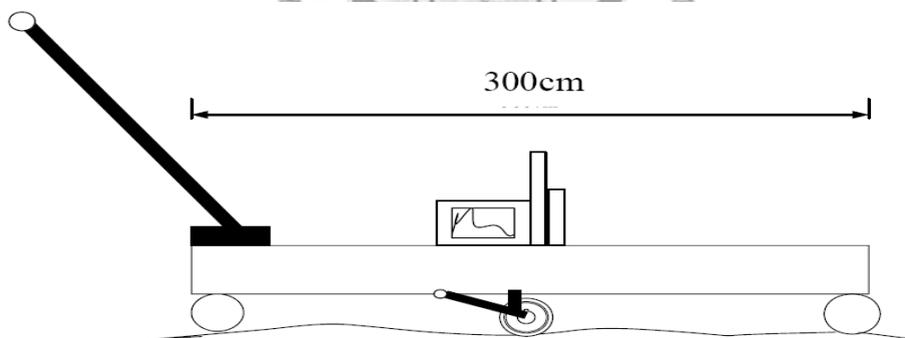


圖2.5 高低平坦儀示意圖[7]

由於剖面式平坦儀檢測速度較為緩慢，於是發展出可以較高速度量測的反應式平坦儀。反應式平坦儀大致可分為兩種，一種是在車身或車軸裝設加速度規，量測車輛隨路面起伏而產生的垂向加速度變化，稱為加速度規式；另一種是在車身與輪軸間裝設量測相對變位的儀器，稱為機械式。這兩種都是量測車輛對路面高程變化的反應，而不是直接對路面輪廓進行量測，因此稱為反應式平坦儀，最具代表性之儀器為梅式儀（Mays ride meter, MRM）。梅氏儀之檢測原理為在車輛行駛過程中，紀錄車輛本身避震系統移動之累積量，得到的數值為梅式指標，

以其數值高低評估調查路段平坦與否，梅氏儀之構造如圖 2.6 所示。



圖2.6 梅式儀[7]

為改進反應式平坦儀之缺點，開發能快速且準確蒐集大量平坦度資料之儀器，慣性式平坦儀成為近年來國內外之研發重點。慣性式平坦儀之基本原理為利用加速度規積分後之車身垂直位移改變量，與雷射、超音波或紅外線測距儀所得之車身與鋪面的距離相加減，即可得所檢測之鋪面縱剖面高程數據，以非以接觸之方式對路面輪廓進行直接量測，於 2.2.3 節中，也將以臺大慣性式平坦儀為例，進一步說明其零組件組成、量測原理及資料擷取與輸出等。

另一類型之鋪面平坦度檢測設備為步進式平坦儀（Walking Profiler, WP），步進式平坦儀以時速 0.8 公里~2.0 公里之步行速度沿行走之路面連續量測相對高程。圖 2.7 為澳洲道路研究委員會（Australia Road Research Board, ARRB）所生產之步進式平坦儀，該儀器利用量測臂沿著測線循環連續量測路面之高程，每 24.3 公分輸出一筆高程資料，並自動累加而產生路面縱剖面相對高程輸出值，步進式平坦儀輸出資料則包含 IRI 值與相對點位之真實高程剖面。利用步進式平坦儀量測時需以人力推動，其速度大約 0.8 km/hr，而高程量測誤差小於 0.01 公厘，每 50 公尺之剖面資料量測誤差則小於 1.0 公厘，具備高重現性，但量測速度緩慢，耗費時間，不適用於大規模之路網檢測，較常運用於校正其他反應式平坦儀或慣性式平坦儀之參考剖面量測儀器。



圖2.7 步進式平坦儀[7]

除步進式平坦儀外，自動水準儀（Auto Rod and Level, AR&L）也常作為參考剖面之量測儀器。AR&L 以人力推動一裝載數位量測桅杆之推車，而雷射端於量測範圍內 360 度發射雷射訊號至數位量測桅杆上的雷射接收器，數位量測桅杆接收至雷射訊號後，資料擷取系統將可記錄設定間距之鋪面高程讀值。自動水準儀可精確的量測鋪面之高程剖面變化，其量測準確度可達 1 公厘，並可經由 IRI 分析軟體計算 IRI 值。AR&L 為一具有極高重現性及準確性之參考剖面儀器，於 2.2.4 節中將針對該儀器進一步說明其設備組成、檢測原理及特性等。

2.2.2 國內現行平坦度驗收儀器

目前國內頒佈新工道路或養護檢測規範主要以交通部「公路工程施工規範」[8]、交通部台灣區國道新建工程局與國道高速公路局「施工技術規範」[9]，交通部公路總局「公路工程施工說明書」[10]，行政院公共工程委員會編訂之「公共工程施工綱要規範」[11]及內政部營建署所制定之「施工規範（道路工程及共同性工程）」[12]等五種規範為主。其中鋪面平坦度之驗收多數採用三米直規為檢測之儀器，且驗收之標準多以單點高低差或平坦度標準差作為驗收之標準，唯行政院公共工程委員會與內政部營建署於最新修訂之「公共工程施工綱要規範」與「市區道路平坦度驗收規範」已增修利用慣性式平坦儀及其所輸出之國際糙度指標（IRI）作為驗收標準，以下分別說明此五種規範之相關規定：

1. 交通部「公路工程施工規範」(97年)

交通部頒布之「公路工程施工規範」於第三章第六節「熱拌瀝青混凝土路面」中，提及道路平整度要求之具體規範，熱拌瀝青混凝土於完成後之路面應具平順、緊密及均勻之表面。以三公尺長之直規沿平行或垂直於路中心線之方向檢測時，其任何一點高低差，底層或結合層不得超過 ± 0.6 公分，一般公路之面層不得超過 ± 0.6 公分，高速公路之面層不得超過 ± 0.3 公分。所有高低差超過上述規定部分，應由承包商改善至合格為止。所有微小之高凸處、接縫及蜂巢表面，均應以熱燙板燙平。上述一切檢查及修正費用，均應由承包商全部負擔。

另外於第三章第七節「熱灌瀝青碎石面層」中，則提出熱灌瀝青碎石路面於壓實後之粗粒料頂面應具平整堅實之表面，其以三公尺長之直規沿平行或垂直於道路中心線之方向檢測時之任何一點高低差，均不得超過 ± 0.7 公分，如超過時，應將該處粒料翻鬆改正後重新滾壓之。在澆灌瀝青材料之前，如發現粒料附有泥土或不潔之物，應即移去，並換填潔淨新料後，重新滾壓至堅實平整時為止。粗粒料滾壓完竣後，如經工程司檢查結果認為厚度不足時，承包商應將其翻鬆另加新料拌勻後，重新滾壓之，俾達到所需厚度，承包商不得拒絕。

2. 交通部台灣區國道新建工程局「施工技術規範」(91年)

交通部台灣區國道新建工程局(以下簡稱國工局)所頒布之「施工技術規範」中，提出對瀝青混凝土密級配或開放級配之路面經最後滾壓後，需用三公尺長之直規，平行放於與路面中心線以及與中心線成直角之方向檢驗之。在三公尺長直規之下路面之凹凸超過0.3公分者，應立即予以整修，且於必要時，其整個周圍路面應重加滾壓，其整修不可以加熱刮除方式處理，處理方式需經工程司認可後為之。經壓實後之路面應平整，且路拱及坡度正確。多孔隙或蜂巢樣地點應予整修。在最後滾壓完成後所遺留下之凹陷及其他有缺點地區應依工程司指示予以修整，或拆除並重新料滾壓，費用由承包商負擔。國工局之「施工技術規範」中，對於基層與底層的相關平坦度規定，同樣以三公尺長之直規做為檢測儀器，其不同材料之基層與底層有明確規定可容許之最大高低差，如表 2.1 所示。

表2.1 國工局施工技術規範之基層與底層平坦度規定

材料種類	可容許之最大高低差 (公分)
級配粒料基層	2.5
級配粒料底層	1.5
廠拌地瀝青處理底層	0.6
低強度混凝土底層	1.5

3. 交通部公路總局「公路工程施工說明書」(97年)

公路總局在民國 94 年針對舊版「公路工程施工說明書」進行全盤修定，且在民國 97 年針對第 02742 章「瀝青混凝土鋪面」中增修部分規定。其說明書中提及，瀝青混凝土路面分兩層以上鋪築、設計有平整度調整層之加封鋪築或採取刨除重鋪，及橋面上鋪築瀝青混凝土路面時，於最後一層鋪築完成後須做平整度檢驗。利用三米直規或高低平坦儀之檢測儀器，按本局公路工程材料手冊規定方法，就平行於路線方向檢驗其平整度。

對於平坦度之驗收標準，則提出一般公路平整度標準差合格上限為 0.28 公分，快速公路平整度標準差合格上限為 0.24 公分。若有下列(1)至(3)任一情況之路段，得免辦平整度檢驗；若有下列(4)情況處之檢驗結果，不列入計算平整度標準差。其檢驗之頻率每 200 公尺為一檢驗單位（餘數未達 100 公尺時併入前一檢驗單位辦理，餘數超過 100 公尺以上時單獨作為一檢驗單位）。

- (1) 無瀝青混凝土底層或原有路面未整理之路面加封路段（橋面混凝土除外）。
- (2) 設計行車速率小於 40 km/hr 之路段。
- (3) 其他經工程司核可為不適合作平整度檢驗之路段。
- (4) 路面人孔蓋、橋面伸縮縫及新舊路面接縫。

4. 公共工程委員會「公共工程施工綱要規範」(98年)

公共工程委員會在民國 98 年 1 月 7 日召會審查通過「公共工程施工綱要規範」之最新修改版本 V.7.0，並於 98 年 3 月 26 日公告期滿後公佈。「公共工程施

工綱要規範」之第 02742 章「瀝青混凝土鋪面」對瀝青混凝土鋪面施工平整度之要求如下：

- (1) 新鋪設路面、全部厚度或部分厚度之銑刨加鋪路面及管線挖掘回填路面，完成後之路面應具平順、緊密及均勻之表面。路面之平整度得以三公尺長之直規、高低平坦儀或慣性剖面儀擇一執行。
- (2) 以三公尺長之直規或高低平坦儀量測道路平整度時，應沿平行或垂直於路中心線之方向檢測，其任何一點高低差，底層或結合層不得超過 ± 0.6 公分，平整度標準差 (S) 不得大於 0.26 公分；一般公路之面層不得超過 ± 0.6 公分，平整度標準差 (S) 不得大於 0.26 公分；高速公路之面層不得超過 ± 0.3 公分，平整度標準差 (S) 不得大於 0.24 公分。
- (3) 以慣性剖面儀量測道路平整度時，一般公路面層之國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI) 應小於 3.5 m/km；高速公路面層之 IRI 值應小於 1.75 m/km。
- (4) 所有高低差超過上述規定部分，應由承包商改善至合格為止。
- (5) 所有微小之高凸處、接縫及蜂巢表面，均應以熱燙板燙平。

5. 營建署「市區道路平坦度驗收規範」(97年)

內政部營建署於民國 91 年至 95 年針對平坦度驗收制度持續研究，隨後擬定「市區道路鋪面養護與管理規範」草案，新建道路檢驗標準如表 2.2 所示，而刨除回鋪工程之檢驗標準，則視鋪面施工前所測得之原始平坦度 IRI 值而有所差異，如表 2.3、表 2.4 及表 2.5 進行評估並辦理檢驗。

檢測時儀器及其資料處理軟體應具有輸出以國際糙度指標表示之檢驗結果、檢驗速度、施測參數及原始平坦度資料等內容之功能；檢驗位置為車道右車輪軌跡處，並配合街廓採 100 公尺為一檢驗區段，不足餘數區間小於 50 公尺，併入前一檢測區段計算，若不足餘數區間超過 50 公尺，則單獨計算其平坦度值。特殊檢驗要求區段與工程司要求增加局部檢驗區段，應採用三公尺長之直規進行平坦度檢驗，檢驗標準訂為 ± 0.6 公分。下列區段無須以本規範檢驗程序量測路段整體平坦度：

- (1) 橋面鋪面。
- (2) 交叉路口 (含圓環)。
- (3) 與不同性質鋪面 (含橋面、剛柔性鋪面交接、或未在此工程範圍內之舊有鋪面) 路段交接處相距 5 公尺範圍內。
- (4) 車道縮減致路寬不及 2.5 公尺處。
- (5) 巷道長度未達 200 公尺及寬度 15 公尺 (含) 以下之路段。
- (6) 其他因道路形式或佈設方式難以進行量測路段, 工程主管機關得於工程招標公告內註明為排除區段。

表2.2 新建道路檢驗標準 單位：m/km

道路等級	評估結果		
	合格區	改正區	重做區
快速道路	$IRI \leq 3.2$	$3.2 < IRI \leq 3.5$	$IRI > 3.5$
主、次要道路	$IRI \leq 3.5$	$3.5 < IRI \leq 3.8$	$IRI > 3.8$
寬度 8 公尺以上巷道	$IRI \leq 4.0$	$4.0 < IRI \leq 4.3$	$IRI > 4.3$

表2.3 重鋪道路檢驗標準(原始IRI小於4.0 m/km) 單位：m/km

道路等級	評估結果		
	合格區	改正區	重做區
快速道路	$IRI \leq 3.2$	$3.2 < IRI \leq 3.5$	$IRI > 3.5$
主、次要道路	$IRI \leq 3.5$	$3.5 < IRI \leq 3.8$	$IRI > 3.8$
寬度 8 公尺以上巷道	$IRI \leq 4.0$	$4.0 < IRI \leq 4.3$	$IRI > 4.3$

表2.4 重鋪道路檢驗標準(原始IRI介於4.0~6.5 m/km) 單位：m/km

道路等級	評估結果		
	合格區	改正區	重做區
快速道路	$IRI \leq 3.2$	$3.2 < IRI \leq 3.5$	$IRI > 3.5$
主、次要道路	$IRI \leq 4.2$	$4.2 < IRI \leq 4.5$	$IRI > 4.5$
寬度 8 公尺以上巷道	$IRI \leq 4.7$	$4.7 < IRI \leq 5.0$	$IRI > 5.0$

表2.5 重鋪道路檢驗標準(原始IRI大於6.5 m/km) 單位：m/km

道路等級 \ 評估結果	合格區	改正區	重做區
快速道路	$IRI \leq 3.2$	$3.2 < IRI \leq 3.5$	$IRI > 3.5$
主、次要道路	$IRI \leq 5.0$	$5.0 < IRI \leq 5.3$	$IRI > 5.3$
寬度 8 公尺以上巷道	$IRI \leq 5.5$	$5.5 < IRI \leq 5.8$	$IRI > 5.8$

綜合以上五個相關單位所訂定之平坦度驗收規範，主要仍以三米直規為新工或養護道路之平坦度驗收儀器，量測單點高低差或計算平坦度標準差，彙整如表 2.6 所示。但道路竣工長度動輒數十公里，如此龐大面積若採用檢測速度慢的三米直規進行檢測工作或驗收，耗費龐大時間與人力，多採抽樣檢測，以少數單點資料表達整體區段平坦度，但對於長距離之檢測，卻無法真實反映道路剖面。故近幾年來國內學術單位及政府單位引進不少慣性式平坦儀檢測儀器，可快速且準確進行大規模路網檢測，且輸出之國際糙度指標也符合國際之趨勢。

然而，國內尚缺乏一套完整之檢測流程及規範可供相關單位遵循，未來若要進一步推廣使用慣性式平坦儀作為驗收之儀器，則需透過政府各相關單位進行規範增修，並規定明確之驗收門檻值作為驗收通過與否之依據。除此之外，國內目前尚未對慣性式平坦儀之精準度有具體認證程序與認證中心，無法評估各廠商或各單位之慣性式平坦儀是否能準確量測各等級道路鋪面之平坦度，故本研究透過研擬慣性式平坦儀儀器與人員認證之程序，並利用臺大自行研發之慣性式平坦儀於合適之場地進行示範試驗，以作為未來慣性式平坦儀認證中心之參考。

表2.6 國內平坦度驗收規範之檢測儀器、參考指標與檢驗標準彙整

單位	檢測儀器	參考指標或計算參數		檢驗標準
交通部	三米直規	高速公路	單點高低差	< 0.6 cm
		一般公路		< 0.3 cm
國工局	三米直規	單點高低差		< 0.3 cm
公路總局	三米直規 高低平坦儀	高速公路	平坦度標準差	< 0.28 cm
		一般公路		< 0.24 cm
公共工程 委員會	三米直規 高低平坦儀 慣性式平坦儀	高速公路	單點高低差	< 0.6 cm
			平坦度標準差	< 0.26 cm
			國際糙度指標	< 3.5 m/km
		一般公路	單點高低差	< 0.3 cm
			平坦度標準差	< 0.24 cm
			國際糙度指標	< 1.75 m/km
營建署	三米直規 慣性式平坦儀	單點高低差		< 0.6 cm
		國際糙度指標		表 2.2~表 2.5

2.2.3 慣性式平坦儀

慣性式平坦儀之基本原理為利用加速度規積分後之車身垂直位移改變量，與雷射、超音波或紅外線測距儀所得之車身與鋪面的距離相加減，即可得所檢測之鋪面縱剖面斷面高程真值，以非以接觸之方式對路面輪廓進行直接量測。以下針對國際較為知名之慣性式平坦儀與臺大自行研發之慣性式平坦儀詳細介紹其設備裝置與軟體等功能。

1. ARAN 道路檢測車[7]

ARAN 為加拿大 Roadware 公司所出產之全功能道路檢測車，如圖 2.8 所示。其設計為大型箱型車，車輛保險桿前方左右各裝設一組雷射感測器，用於檢測道面縱向剖面之起伏狀況。橫向車轍之檢測則由保險桿前方所裝設的 13 個超音波同時量測獲得。該車輛於車內設有攝影機及相關後端分析電腦儀器，可供攝影路權之用。亦可在車體後另裝設垂直向下之攝影機，以擷取鋪面表面之損壞影像，再以影像處理軟體或人工方式進行判讀。



圖2.8 ARAN道路檢測車[7]

2. 南達科達州縱剖面量測系統（South Dakota profiling system）[7]

南達科達州縱剖面量測系統是由車前保險桿兩輪軌跡處之加速規以及超音波距離量測器所組成，另裝設有三具超音波距離量測器用以量測車轍深度。南達科達縱剖面量測系統與其他慣性式平坦度儀最大差異處，在採用等時間差之方式擷取加速規數值，而非一般所採用之等距離方式擷取數值，將蒐集所得之數值對時間進行兩次積分，計算後得到各時間段之檢測車絕對高程資料，設備如圖 2.9 所示。南達科達州縱剖面量測系統採超音波距離量測器進行距離量測，其成本雖較低廉，但有下列缺點：

1. 超音波距離量測器於潮濕路面表面上可能產生訊號誤判。
2. 量測資料擷取間距大於雷射系統，資料重現性之表現不如雷射系統。
3. 超音波系統之訊號較易受外界溫度影響，若於溫度變化大之路段量測，對量測結果可能造成較大影響。
4. 超音波系統之量測精確度易受瀝青路面之粗質紋理特性影響。



圖2.9 南達科達州縱剖面量測系統[7]

3. ARRB 雷射平坦儀[7]

ARRB 採用多重雷射平坦儀 (multi-laser profiler) 為量測儀器，可裝設於車輛前面或後面之保險桿上，如圖 2.10 及 2.11 所示。若裝設三套或以上之雷射設備便可計算路面橫斷面之車轍值，而裝置更多之雷射設備則可更精確量測路面橫斷面之車轍，儀器檢測速度最高 110 km/hr，可供路網層級之路面檢測使用。



圖2.10 ARRB雷射平坦儀(後保險桿)[7]



圖2.11 ARRB雷射平坦儀(前保險桿)[7]

4. 臺灣大學研發之雷射慣性式平坦儀[7]

此雷射慣性式平坦儀為可拆卸式慣性式平坦儀，主要由加速度規與位移感測器所組成：加速度規用以量測車身垂直加速度，經過兩次積分後即可得車身垂直位移改變量，再與位移感測器所得之車身與鋪面間距離相加減，便能得到鋪面縱

剖面高程數據；利用裝置於右前輪上的距離感測器，求得檢測距離與檢測行進速度，後將所有資料轉換為分析平坦度指標所需之資料格式，加以存檔管理。該平坦儀之系統架構與感測箱內部構造、儀器外部架構如圖 2.12、圖 2.13 及圖 2.14 所示。

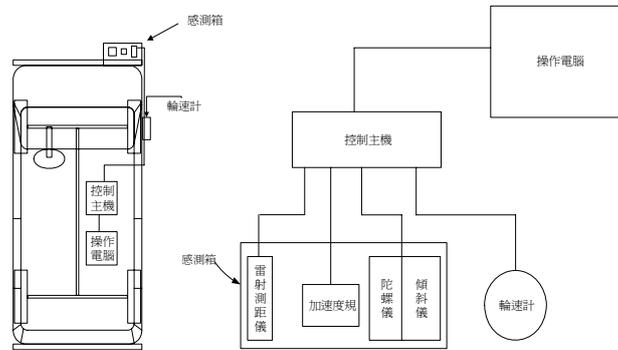


圖2.12 系統架構[7]

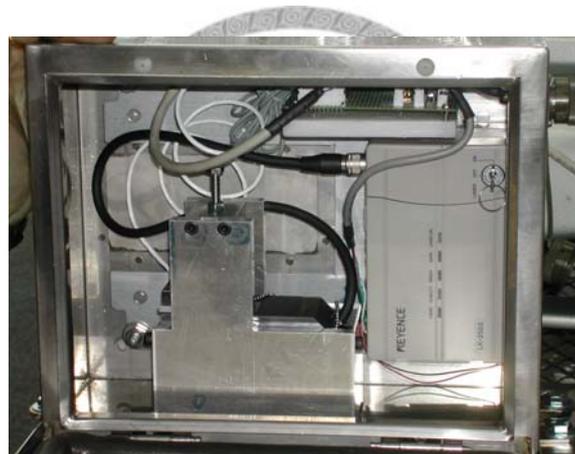


圖2.13 感測箱內部構造[7]



圖2.14 儀器外部架構[7]

5. 輕量型平坦儀 (lightweight profiler) [7]

輕量型平坦儀與一般慣性式平坦儀最大不同處在於以較輕型車輛為載具代替一般檢測車輛，大多採用雷射感測器量測垂直位移。輕量型平坦儀之檢測速度與使用之輕量車輛有關，大約介於6 km/hr~10 km/hr之間。臺灣大學於民國94年已研發以代步車作為載具之輕量型平坦儀，如圖2.15所示。該檢測設備已於一般道路及機場跑道等鋪面進行平坦度資料蒐集，且能正確量測鋪面剖面資料。輕量型平坦儀具有重量輕、攜帶方便、成本低之特色，可進行中、低速鋪面平坦度之檢測工作。



圖2.15 代步車式輕量型平坦儀[7]

2.2.4 自動水準儀 (Auto Rod and Level, AR&L)

自動水準儀 (Auto Rod and Level, AR&L) 為 APR Consultants, Inc.獨家設計、製造並銷售。自動水準儀自 1990 年代早期即開始發展，可以改善傳統水準儀 (Rod and Level, R&L) 量測速度較低的缺點，且該儀器之精準度可到 1 mm；再者，AR&L 為符合 ASTM E1364-95[13]與 AASHTO R40[14]規範中等級一之儀器規格。該儀器協助 APR 公司開發之航機模擬軟體蒐集所需之鋪面剖面資料，由發展至今，APR 公司已利用自動水準儀檢測過許多機場之跑、滑道以及道路之鋪面剖面。其組成包含：

1. 兩組 360 度旋轉之紅外線雷射發射器以及三角架，如圖 2.16 所示。此一雷射發射器將雷射光束發射在會旋轉的鏡子上，因此，當鏡子旋轉時，可產生雷射光面。

2. 數位量測桅杆，用來偵測及追蹤雷射光線，並記錄相對於雷射發射器之高程變化。
3. 筆記型電腦，灌有 ToPoGraph 軟體用以紀錄及儲存高程資料點，並為操作者與儀器溝通之介面。
4. 資料擷取系統，將數位量測桅杆所得資料傳送至手提電腦中。
5. 測距輪，此為啟動資料擷取之裝置，沿著輪子的圓周裝有固定間距之釘子，這些釘子可傳送訊號至資料擷取系統，使資料擷取系統讀取該時間點所量得之高程資料，並加到 ToPoGraph 軟體之高程資料表上。
6. AR&L 推車，裝有數位量測桅杆、手提電腦、資料擷取系統、測距輪、以及供電系統。如圖 2.17 所示。



圖2.16 雷射發射器及三角架



圖2.17 AR&L推車

AR&L 之輸出資料為固定間距之高程點，可儲存於電腦中供相關軟體使用。

圖 2.18 為操作示意圖，而圖 2.19 為現場操作圖，儀器操作步驟如下：

1. 將雷射發射器放置在欲量測鋪面之任一端，並距離開始點 90 公尺至 120 公尺處。因此，當每一次雷射發射器放置妥當後，AR&L 推車可行走並量測 180 公尺至 240 公尺之高程剖面資料。
2. 當數位量測桅杆上的雷射接收器鎖定之後，儀器操作者即可推動 AR&L 推車，資料擷取系統將於每一設定間距擷取高程之讀值。操作者以一般行走速度推動 AR&L 推車，並須注意是否行走在同一路徑上，另外，可由其他操作者隨時注意電腦畫面，確保資料擷取正常運作。當 AR&L 推車通過雷射發射器後，操作者需注意勿將自己置於推車及雷射發射器間，以免阻礙雷射訊號之接收，而導致部分錯誤資料產生。
3. 當 AR&L 推車通過雷射發射器約 90 公尺至 120 公尺時，即代表此一階段之剖面量測完成，需要重新進行雷射發射器之設定。此時將雷射發射器移動 180 公尺至 240 公尺至下一個放置地點，以進行下個高程剖面量測動作。

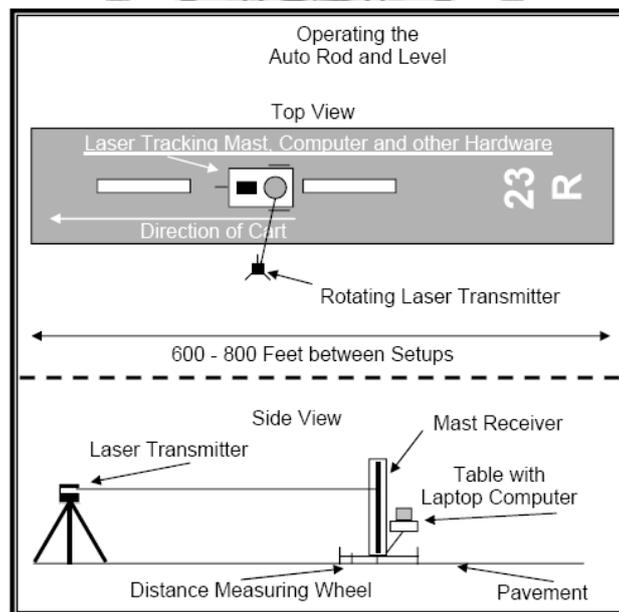


圖2.18 儀器組成及基本操作



圖2.19 現場操作AR&L

2.3 國內外認證規範探討與比較

2.3.1 中華民國國家標準 CNS 15046 規範

民國 95 年 12 月經濟部標準檢驗局正式公布中華民國國家標準 CNS 15046 「慣性剖面儀量測鋪面縱向剖面試驗法」之規範 [15]，其內容依據美國材料試驗協會（America Society for Testing and Materials, ASTM）訂定之 ASTM E950[1] 認證規範，規定慣性式平坦儀之儀器組成、功能、操作方法及等級要求，用以提供儀器製造以及現地量測遵循之標準。

本標準適用於以加速度規建立慣性參考剖面之慣性剖面儀進行車行表面之剖面量測及記錄，該設備之感測器組成包含加速度規、位移感測器與距離感測器，且需配有計算與記錄剖面之設備，其他輔助設備則得包含顯示車速之設備，即可顯示剖面或數據之圖示設備。

位移感測器主要量測加速度規與車行表面之加速度規與車行表面之垂直距離，其量測方向須與車行表面垂直，且與加速度規之量測方向一致。位移感測器應能連續或間歇量測，採間歇方式量測時，其量測間距不得大於表 2.7 中之規定。位移感測器之垂直量測之解析度須符合表 2.8 同一等級之規定。距離感測器之量測間隔亦需滿足表 2.7 之等級需求。

表2.7 縱向量測間距 單位：mm

等級一	不大於 25
等級二	介於 25 至 150
等級三	介於 150 至 300
等級四	大於 300

表 2.8 垂直量測之解析度 單位：mm

等級一	不大於 0.1
等級二	介於 0.1 至 0.2
等級三	介於 0.2 至 0.5
等級四	大於 0.5

於儀器零組件校正程序之規定部分，為使儀器可以符合各等級之績效需求，量測系統及組成設備應進行定期校正。其中加速度規應於經認可之實驗室中進行校正或送回原廠進行相關校正。位移感測器則應以靜態塊規作為基準進行校正，其校正間距至少為 25 mm，校正結果應符合該等級之精密度要求。距離感測器應在一已知距離直線段進行，此已知距離應大於 160 m，並採用實際量測時之車輛行駛速度進行量測，當誤差大於已知距離之 0.1% 時，則不被接受。

至於試驗區段則要求至少須有 100 m 之加速區，資料擷取區段應為 160 m，操作者應熟悉該區段之起點、終點及任何須識別之特殊路段。慣性式剖面儀須於同一路徑執行十次重複性之量測，並以 0.25 m 之間距進行計算，儀器之精密度與偏差依儀器等級而異，精密度計算方式採用沿著量測車行表面同一點位十次重現性標準差之平均，而偏差計算方式則為十次重複量測之平均值與參考值間之絕對差值的平均，而各等級之精密度與偏差應不大於表 2.9 與表 2.10 所列。

表 2.9 各等級儀器精密度要求標準 單位：mm

儀器等級種類	精密度要求(1 個標準差)
等級一	0.38
等級二	0.76
等級三	2.50

表 2.10 各等級儀器偏差要求 單位：mm

儀器等級種類	偏差
等級一	1.25
等級二	2.50
等級三	6.25

2.3.2 美國 AASHTO PP49 規範

美國州公路暨運輸官員協會 (America Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 於2007年針對AASHTO PP49[2]慣性式平坦儀認證程序與實際作法提出增修並正式納入最新版本之規範中，並於AASHTO PP50[16]中詳述各零組件校正流程。AASHTO PP49規範中除提供各零件組成與校正、場地需求、儀器認證流程外，也定訂比對慣性式平坦儀重現性與準確性之標準，以及操作人員認證大綱以供認證單位與廠商作為參考。以下就AASHTO PP49規範之內容統整之。

首先，規範中規定慣性式平坦儀檢測設備須先完成各零件組成之校正，包括加速度規、位移感測器及距離感測器之校正。於加速度規校正方面，並沒有明確之校正流程以供參考，但有針對位移感測器與距離感測器提出明確之校正流程。

位移感測器校正方式則採用靜態精密塊規進行之。實際作法為將慣性式平坦儀固定於檢測車輛(保持車輛靜止及水平)並確保位移感測器之量測方向與地面垂直，檢測前先於位移感測器下置放一平板(確保其水平)以為參考值，首先於位移感測器下方置放一平板，量測十次並計算平板平均值；接著分別置放標稱厚度為6 mm、12 mm、25 mm及50 mm之塊規，並各自量測十次，計算各塊規每一次量測值與平板平均值之差值，此差值即為塊規量測厚度；最後計算各塊規每一次量測厚度與標稱厚度之絕對差值，各塊規絕對差值之平均皆不可大於0.25 mm。至少須各自量測25 mm及50 mm之塊規十次，當兩塊規之平均絕對差值超過0.25 mm，則須量測上述四種規格之塊規；而當任一規格塊規於量測後未達規範值，則位移感測器之校正結果不被接受，無法進行後續儀器認證流程。

距離感測器應於已知距離之直線段進行校正，此已知距離應大於 160 m，重複量測此已知距離三次，量測距離與已知距離之誤差平均須在 0.15%以內，即完成距離感測器之校正流程。

接著，於慣性式平坦儀認證試驗場地要求部份，須包含平坦及中度平坦兩段筆直之認證道路，各段長度為 160 m，其中平坦認證道路之平坦度 IRI 值須介於 0.5~1.2 m/km 之間；而中度平坦認證道路之平坦度 IRI 值則介於 1.5~2.1 m/km 之間。試驗道路需有適當之加減速區，且縱向及橫向剖面應避免明顯坡度變化。

至於濾波要求方面，AASHTO PP49 規定慣性式平坦儀量測之訊號經高通濾

波後，需百分之百通過波長範圍小於 45 m 之訊號；而波長範圍大於 90 m 之訊號需濾除 30% 以上；至於波長範圍大於 135 m 之訊號需濾除 90% 以上。濾波軟體必須能正確計算並輸出 IRI 值，並且須有自動觸發系統擷取起點之第一筆高程資料。

AASHTO PP49 規定參考剖面之建立可用 Dipstick 或 Walking Profiler 來建立，而這些儀器都須事先經過 rod and level 之校正，建立參考剖面之儀器於同一路徑重複三次試驗；至於慣性式平坦儀一樣也於同一路徑上進行十次重複性試驗。

AASHTO PP49 之規範於數據比對方面，提出三種數據比對方式，作為慣性式平坦儀儀器、軟體及人員重現性與準確性之評估標準。此三種方式分別為高程剖面交叉相關性比對、逐點高程比對及平坦度指標 IRI 值比對，以下則分別詳細敘述各種數據比對方式。

(1) 高程剖面交叉相關性比對 (Cross Correlation) [17][18]

交叉相關性 (Cross Correlation) 適用於比對兩個剖面之間的相關程度，其交叉相關係數之計算以式 1 表示：

$$R_{pq}(\delta) = \lim_{L \rightarrow \infty} \int_0^L P(x)Q(x+\delta)dx \quad \text{式 1}$$

其中：

$R_{pq}(\delta)$ = 剖面 P 訊號與剖面 Q 訊號之相關係數

δ = 前後位移長度

將上式 1 透過正規化處理後，其相關係數之值將介於 -1 至 1 間，以下列式 2 表示：

$$R_{pq}(\delta) = \frac{1}{\sigma_p \sigma_q} \sum_{i=1}^N P_i Q_{i+\frac{\delta}{\Delta}} \quad \text{式 2}$$

其中：

$R_{pq}(\delta)$ = 剖面 P 訊號與剖面 Q 訊號之相關係數

δ = 前後位移長度

σ_p = 剖面 P 訊號之標準差

σ_q = 剖面 Q 訊號之標準差

i = 第 i 個取樣間距

Δ = 取樣間距

由於各剖面間存在有些微之前後位移，AASHTO PP49 規範中也明確訂定進行交叉相關性比對時，可將剖面進行前後位移，找出兩剖面之最大交叉相關係數，但前後位移不可超過 0.9 m。其重現性與準確性計算為之門檻值說明如下：

- A. 重現性：透過 ProVAL 或其他分析軟體將檢測剖面進行 IRI 濾波後，比對十次檢測剖面曲線之相關性。各檢測剖面將與其他九次檢測剖面進行交叉相關分析，可得四十五交叉相關係數，其平均值不得小於 0.92。
- B. 準確性：十次檢測剖面與參考剖面進行交叉相關分析，可得十個交叉相關係數，其平均值不得小於 0.9。

(2) 逐點高程比對

- A. 重現性：待測平坦儀於同一路徑重覆檢測十次後，計算同一點位十次檢測高程之標準差，再取各點位檢測高程標準差之平均值，此平均值不可大於 0.9 mm。
- B. 準確性：取十次檢測高程剖面數據之平均值作為檢測剖面，並轉換檢測剖面之資料間距使其與參考剖面資料間距相同後進行比對，計算檢測剖面與參考剖面於同一點位之高程差，各點位高程差值之平均需介於 -0.5 mm ~ 0.5 mm 之間，且各點位高程差之絕對值平均不可大於 1.5 mm。

(3) 平坦度指標 IRI 值比對

- A. 重現性：利用檢測設備之分析軟體，將每一次檢測剖面換算成 IRI 值，並計算十次檢測 IRI 值之變異係數，其值不可大於 3%。
- B. 準確性：利用檢測設備之分析軟體，將每一次檢測剖面換算成 IRI 值，而參考剖面則透過 ProVAL 或其他分析軟體換算成參考 IRI 值。計算十次檢測 IRI 值與參考 IRI 值絕對差異之平均，再除以參考 IRI

值後，其值不可大於 5%。

完成認證程序後，認證中心需提供認證結果之文件，其內容包含平坦儀驗明書(製造商、型號、分析軟體版本、擁有者等)、認證日期、平坦儀操作者、認證中心測試人員姓名、試驗日期、總共試驗次數、濾波種類、各零件組成校正結果、重現性、準確性、整體檢測結果(通過或未通過)等。

2.3.3 美國各州認證規範

本研究初期首先蒐集美國各州慣性式平坦儀認證規範，依其內容觀之，大部份州別依據 ASTM E950 或 AASHTO PP49 之制定其認證制度與規範，但對於零組件校正程序、作法，甚至試驗場地、濾波要求或重現性與準確性門檻值則各有所差異。故本節彙整美國十二州之認證規範，包括紐約州[19]、德州[20]、賓州[21]、佛羅里達[22]、麻州[23]、維吉尼亞[24]、科羅拉多州[25]、馬里蘭州[26]、密西根州[27]、喬治亞州[28]、明尼蘇達州[29]與紐澤西州[30]等，針對單一零組件、試驗路段要求、速度限制、參考剖面建立、濾波要求及數據比對方式統整說明之。



1. 單一零組件

(1) 位移感測器

位移感測器校正部份各州多以標準厚度之塊規進行校正，塊規厚度規格與誤差要求如表 2.11 所示。至於檢測次數，各州均有不同之規定，但大多數州別以 AASHTO PP49 之規範為依據，進行十次檢測為校正原則，誤差不可超過 0.25 公厘。由於位移感測器之校正原理係透過量測電壓值進行距離或厚度之轉換，但容易受雜訊影響而無法使電壓保持定值，導致每次量測值呈現微幅跳動之現象，為降低此一現象對量測數值之影響，喬治亞州規定校正時每次量測需取 2000 筆數據之平均值作為量測值，再與標準厚度之塊規進行比對，其誤差不可超過 0.25 公厘。

表 2.11 美國各州位移感測器校正要求

州別	賓州 麻州	紐約州 科羅拉多州 喬治亞州	德州	密西根州	馬里蘭州	佛羅里達州 維吉尼亞州 明尼蘇達州 紐澤西州
塊規規格 (mm)	6.35 12.7 25.4 50.8	6.35 12.7 25.4	25.4	1mm~25 mm 三種 不同規格	50.8 101.6	N/A
誤差要求 (mm)	誤差≤0.25				N/A	

(2) 距離感測器

距離感測器校正部分，各州大多透過 160 公尺以上特定之筆直道路重複進行距離量測，並輔以距離參數校正方式直到量測值與實際距離之誤差符合規定為止。各州對於距離校正之誤差要求有所差異，大多介於 0.1%~0.38%，而維吉尼亞州於規範中則是沒有提及距離感測器校正之作法及相關要求，如表 2.12 所示。

表 2.12 美國各州距離感測器校正要求

州別	麻州 佛羅里達州 密西根州 紐澤西州	德州	紐約州	科羅拉多州 明尼蘇達州	賓州 馬里蘭州	喬治亞州	維吉尼亞州
校正距離 (m)	160	160	200	305	322	305	N/A
誤差要求 (%)	0.1	0.38	0.15	0.1	0.1	0.38	

(3) 加速度規

至於加速度規校正部份，各州大多建議採用委外校正或依據儀器廠商之指示進行校正，因此，針對加速度規校正內容並無詳細說明或規定。

各州對於單一零組件校正頻率有些許差異，以每天、每週或每月為單位，有些則是依據儀器製造商建議進行校正。另外，每次進行檢測前、零組件置換後、出現不合理的訊號或檢測結果發生異常時，皆須進行單一零組件之校正。

2. 試驗路段要求及速度限制

各州試驗路段要求及速度限制之規定彙整如表 2.13。首先針對試驗路段長度

方面說明，喬治亞州為 1600 公尺，賓州為 176 公尺，科羅拉多州、明尼蘇達州與馬里蘭州為 300 公尺，而維吉尼亞州則為 150 公尺，其餘各州則皆為 160 公尺，此試驗長度要求為資料擷取長度；除了資料擷取長度外，各州對於加、減速區則均有 50 公尺~150 公尺之要求（密西根州與紐澤西州除外）。接著試驗路段平坦度方面，紐約州規定 IRI 值須介於 0.55 m/km~1.1 m/km 間，麻州則是要求兩段平坦度相異之試驗路段，其中平坦路段之 IRI 值介於 0.47 m/km~1.18 m/km 間，而中度平坦路段之 IRI 值則是介於 1.50 m/km~2.13 m/km 間。至於速度限制方面，德州規定行車速度須大於 19.2 km/hr，喬治亞州與佛羅里達州則是規定行車速度須介於 25 km/hr~95 km/hr 間，而考量駕駛員之行車穩定性方面，佛羅里達州更是要求資料擷取過程時，行車速度最大值與最小值之變化量不得超過 3.2 km/hr，以確保量測數據之可靠度。

除上述規定外，各州規範均有規定試驗路段須為一筆直道路，應避免道路縱向與橫向剖面起伏過大，且不可於潮濕表面進行慣性式平坦儀之量測。紐約州、喬治亞州、科羅拉多州及維吉尼亞州則在規範中要求起訖點及輪軌跡處須畫上參考線或以反光貼紙標記，以提升行駛車輛之穩定度。

表 2.13 美國各州試驗道路要求及速度限制

州別	紐約州	麻州	德州	佛羅里達州	喬治亞州	密西根州 紐澤西州	賓州	維吉尼亞州	科羅拉多州 明尼蘇達州 馬里蘭州
長度(m)	160	160	160	160	1600	160	176	150	300
加速區(m)	50	適當加速區	N/A	160	122~152	N/A	50	300	適當加速區
平坦度(m/km)	0.55~1.1	平坦 0.47~1.18 中度平坦 1.50~2.13	N/A			N/A			
速限(km/hr)	N/A	N/A	>19.2	25~95	25~95				

3. 參考剖面建立

表2.14 為各州參考剖面建立方式及試驗次數之比較，由表中可清楚得知，各州參考剖面多以水準儀 (Rod and Level, R&L)、步進式平坦儀 (WP)、Dipstick 等高精度靜態高程剖面量測設備建立之，而AASHTO PP 49規範中也明確規定這

些儀器可做為建立參考剖面之儀器。

建立參考剖面之儀器於試驗路段依同一路徑與方向進行重複試驗，各州大多以重複3次試驗為原則，科羅拉多州則是重複10次試驗，而其他州之規範中並沒有特別說明重複試驗之次數。至於慣性式平坦儀之重複試驗次數方面，除賓州、明尼蘇達州與喬治亞州為5次，而維吉尼亞州為5~7次外，其餘5州進行10次慣性式平坦儀重複試驗，而其中麻州則是進行12次試驗後扣除2次偏離最大之資料，取其10次穩定之剖面資料。

表 2.14 美國各州參考剖面建立與試驗次數

州別	紐約州	德州	麻州	科羅拉多州	賓州 明尼蘇達州	密西根州	佛羅里達州	維吉尼亞州	喬治亞州	馬里蘭州 紐澤西州
參考剖面之儀器	R&L	WP Dipstick	WP	WP	WP	R&L	等級一之儀器	Dipstick	N/A	N/A
參考剖面試驗次數	3	3	3	10	N/A					N/A
慣性式平坦儀試驗次數	10	10	12	10	5	10	10	5~7	5	

4. 濾波要求

為確保能順利進行高程數據之比對及後續平坦度指標之計算，則須將原始高程剖面透過高、低通之濾波將不必要頻率之訊號濾除。其中高通濾波將排除低頻部份，去除長波長之影響，紐約州、佛羅里達州、科羅拉多州、馬里蘭州與紐澤西州設定波長90公尺為其門檻值，亦即去除90公尺以上波長之影響；而德州設定為60公尺，賓州與維吉尼亞州則是30公尺。另外，低通濾波為排除高頻部份之訊號，去除短波長之影響，除紐約州於規範中有設定波長0.15公尺為其門檻值外，其餘州別則無特別說明之。透過高、低通濾波處理後，可去除原始高程剖面之坡度變化影響（高通濾波）及系統電子雜訊與鋪面表面紋理之影響（低通濾波），以便進行不同儀器之量測數據比對與平坦度指標之計算。

5. 數據比對方式

至於數據比對方式，各州所採用之方式不一，多以AASHTO PP49與ASTM E950所規定之比對方式為基準，然而，由於各州政府所考慮之層面不同，而有相異之限定門檻值，各州所採用之數據比對方式彙整如表2.15。

由表2.15中顯示，除佛羅里達州與明尼蘇達州外，各州均採用IRI值之比對，由於IRI值為一整段試驗區域平坦度之輸出值，以一輸出值代替一段高程剖面數據並執行其比對，較易執行。而於AASHTO PP49所提出之交叉相關比對方式，則有賓州與麻州採用。至於逐點高程比對方面，紐約州與德州則採用AASHTO PP49所規定之比對方式，佛羅里達州採用ASTM E950之方式，雖然此三州採用逐點高程比對，但於本研究期間內大量回顧國內外文獻，卻無任何相關研究或實驗報告說明以室外試驗進行慣性式平坦儀逐點高程重現性與準確性之評估，而透過本研究進行多次之重複性試驗，卻無法順利通過任何規範對於逐點高程之要求，試驗說明及結果分析將會於第四章與第五章深入說明之。



表 2.15 美國各州數據比對方式與門檻值要求

州別	紐約州	德州	賓州	麻州	佛羅里達州	科羅拉多州
慣性式平坦儀重現性與準確性比對	<p>逐點高程 重現性： 標準差 ≤ 1 mm 準確性： 平均差值 ≤ 0.5 mm，單點絕對差值 ≤ 1.5 mm</p> <p>IRI 值 重現性： 標準差 ≤ 0.05 m/km 準確性： 試驗平均 IRI 值與參考 IRI 值之差值 ≤ 0.1 m/km</p>	<p>逐點高程 重現性： 標準差 ≤ 0.89 mm 準確性： 平均差值 ≤ 0.5 mm，單點絕對差值 ≤ 1.5 mm</p> <p>IRI 值 重現性： 標準差 ≤ 0.047 m/km 準確性： 試驗平均 IRI 值與參考 IRI 值之差值 ≤ 0.19 m/km</p>	<p>交叉相關 重現性： 平均值 ≤ 92 準確性： 平均值 ≤ 90</p> <p>IRI 值 重現性： 標準差 \leq 平均值的 3 % 準確性： 試驗平均 IRI 值與參考 IRI 值之差值 \leq 參考 IRI 值的 3 %</p>	<p>交叉相關 重現性： 平均值 ≤ 90 準確性： 平均值 ≤ 80</p> <p>IRI 值 重現性： 變異係數 $\leq 3\%$ 準確性： 取各次試驗 IRI 值與參考 IRI 值絕對差值之平均，再除以參考 IRI 值，其值 $\leq 5\%$</p>	<p>逐點高程 重現性： ≤ 0.38 mm (等級一) 0.38 mm ~ 0.76 mm (等級二) 0.76 mm ~ 2.50 mm (等級三) 準確性： ≤ 1.25 mm (等級一) 1.25 mm ~ 2.50 mm (等級二) 2.50 mm ~ 6.25 mm (等級三)</p>	<p>IRI 值 重現性： 標準差 $\leq .05$ m/km 準確性： 試驗平均 IRI 值與參考 IRI 值之差值 ≤ 0.1 m/km</p>
	維吉尼亞州	喬治亞州	馬里蘭州	密西根州	明尼蘇達州	紐澤西州
	<p>IRI 值 重現性： 75 % 的試驗 IRI 值落入平均值的 2 % 內可作為施工驗收之用；95 % 的試驗 IRI 值落入平均值的 5 % 內可作為路網層級評估之用 準確性： 50 % 的試驗 IRI 值落入參考 IRI 值的 5 % 內</p>	<p>IRI 值 重現性： 各次試驗 IRI 值落入平均值的 5 % 內 準確性： 各次試驗 IRI 值落入參考 IRI 值的 5 % 內</p>	<p>IRI 值 重現性： 變異係數 $\leq 3\%$ 準確性： 無說明準確性之計算方式</p>	<p>逐點高程 重現性： 擇 15 個超過 5 mm 隆起或低陷處之標準差，標準差之平均 ≤ 2.5 mm 準確性： 擇 15 個超過 5 mm 隆起或低陷處之單點絕對差值的平均 ≤ 2.5 mm</p> <p>IRI 值 重現性： 標準差 ≤ 0.05 m/km 準確性： 試驗平均 IRI 值與參考 IRI 值之差值 ≤ 0.2 m/km</p>	<p>PI 值 重現性： 標準差 ≤ 0.02 m/km 準確性： 試驗 PI 值之平均 \leq 參考 PI 值的 15 %</p>	<p>IRI 值 重現性： 變異係數 $\leq 3\%$ 準確性： 取各次試驗 IRI 值與參考 IRI 值絕對差值之平均，再除以參考 IRI 值，其值 $\leq 5\%$</p>

2.3.4 綜合比較

研究期間進行國內、外相關認證規範彙整之過程中，深入探討 ASTM E950 與 AASHTO PP49 之規範後得知，ASTM E950 由於是由美國材料試驗協會所訂定，其規範雖適用於以加速度規建立慣性參考剖面之慣性剖面儀進行車行表面之剖面量測及記錄，然而內容多在陳述設備組成、操作步驟、檢測報告應包含之項目及慣性剖面儀之精密度與偏差規定，並針對各感測器量測間距與解析度及慣性剖面儀檢測剖面高程精密度與偏差給予等級劃分，並無具體詳述各感測器之校正方法與標準，亦無平坦儀輸出數據重現性與準確性評估方式之具體作法及相關內容。而 AASHTO PP49 是由美國州公路暨運輸官員協會所訂定，參予美國各州相關單位之眾多鋪面工程實務，所訂定之規範較能應用於實務面。該規範針對慣性式平坦儀認證程序中各零組件之校正方法與標準提出詳細流程、作法及要求標準，規範也針對參考剖面確立方式詳加說明之，另外，於數據重現性與準確性評估方式，也提出三種數據比對方式，且做法較能符合實務面之要求；再者，AASHTO PP49 亦針對人員認證部份規定須先受專業訓練課程，而後透過筆式認證與操作認證評估操作人員之能力。

另外，深入探討美國各州認證規範之比對方式與門檻值要求後(如表 2.15)，也發現其中七州政府採用 AASHTO PP49 之規範進行數據之比對，但其門檻值之要求略有差異，採用 ASTM E950 規範中以精密度及偏差劃分儀器等級卻只有佛羅里達州。維吉尼亞州、密西根州、喬治亞州及明尼蘇達州等則是自訂數據比對之方式，各州數據比對所採用之方式整理如表 2.16。

有鑑於此，本研究以 AASHTO PP49 為參考依據，配合其他相關規範如 ASTM E950 及 ASHTO PP50 等，針對 CNS 15046 規範中不足之處，提出增修項目，重新研擬並提出「慣性式剖面儀精準度認證試驗法」(附件一)之標準，適用於以加速度規建立慣性參考剖面之慣性式剖面儀進行認證試驗及數據比對，其主要項目包含儀器設備、各零組件校正程序、濾波方式、數據比對方式與要求、人員認證與認證報告項目。透過本研究後續相關實驗及分析，確立該規範之適宜性，將提送至經濟部標準檢驗局進行審查，以作為認證單位、各儀器廠商及操作人員之依循標準，且更能推廣應用慣性式平坦儀於道路鋪面平坦度檢測或驗收作業；透過「慣性式剖面儀精準度認證試驗法」之制定，促使慣性式平坦儀認證制度更臻

完善。

表 2.16 美國各州數據比對方式

比對方式 州別	ASTM E950	AASHTO PP49			各州政 府自定
	逐點高程 (等級劃分)	逐點高程	交叉相 關性	IRI 值	
紐約州		○		○	
德州		○		○	
賓州			○	○	
佛羅里達州	○				
麻州			○	○	
維吉尼亞州					○
科羅拉多州				○	
馬里蘭州				○	
密西根州					○
喬治亞州					○
明尼蘇達州					○
紐澤西州				○	

第三章 慣性式平坦儀認證程序與人員教育訓練制度

本研究在第二章文獻回顧中，詳述民國 95 年依據 ASTM E950 之慣性式平坦儀認證規範所完成的中華民國國家標準 CNS 15046 之具體內容，然而，再針對美國各州認證規範進行完整蒐集並彙整。於本研究多次試驗過程中發現中華民國國家標準 CNS 15046 並不適用於慣性式平坦儀認證程序，故重新研擬「慣性式剖面儀精準度認證試驗法」（附件一）以供後續相關單位參考。以下主要依據 AASHTO PP49 規範所訂定之慣性式平坦儀認證具體作法與要求，配合部分 CNS 15046 之標準，詳述慣性式平坦儀認證程序，並參酌美國國家公路協會（National Highway Institute, NHI）教育訓練制度與課程，研擬人員認證制度並規劃教育訓練教材之具體內容。

3.1 認證程序之研擬

本研究於彙整美國各州規範過程中發現，大部分州政府係依循 AASHTO PP49 之規定進行平坦儀認證作業，僅極少數州採用 ASTM E950 之規範。整體而言，各認證之具體內容雖不一致，但認證項目則大致相同。至於在平坦儀數據輸出之重現性與準確性方面，大多透過 IRI 值進行比對，只有佛羅里達州、紐約州、德州採用高程比對之方式，總而言之，各州規範自主性相當高。

本研究主要依據 AASHTO PP49 所訂之內容與作法，配合部分 CNS 15046 之規範，研擬國內慣性式平坦儀認證程序。認證程序包含室內實驗室校正與室外實驗道路認證兩部分；室內實驗室主要提供平坦儀組成原件進行個別的校正試驗，包含加速度規及垂直位移感測器(雷射、超音波)，室外實驗道路則作為距離感測器校正之用，並可同時評估設備操作人員之操作程序是否正確，且瞭解試驗進行之穩定性及數據輸出之重現性與準確性。

圖 3.1 為本研究所研擬之慣性式平坦儀認證流程圖，於相關單位提出申請後，將先撰寫基本資料，包含使用單位名稱、操作人員資料、儀器製造日期、校正記錄、車輛登記記錄及設備規格記錄等，接著針對操作人員進行資格確認，瞭解操作人員對檢測執行、設備安裝、檢查之步驟是否熟悉，並同時檢查檢測車輛車況，如胎壓、檢測儀器電路安排、設備置具安裝方式等。確認人員及車況基本

資料後，隨即針對其分析軟體之輸出格式及計算邏輯進行瞭解，並須確認原始資料之濾波方式及門檻，以利後續進行資料比對及評估。

確認操作人員與檢測車輛之設備後，由操作人員將檢測設備帶入認證中心，進行室內實驗室單一設備校正；完成室內實驗室校正流程後，接著進行距離感測器校正及慣性式平坦儀輸出數據重現性與準確性評估；待完成數據比對及評估，確認設備與人員皆符合標準後，由認證中心核發認證證明文件，若有評估項目未達標準，則認證中心提出建議執行評估改善策略，作為設備修繕、升級或人員技術加強之參考。

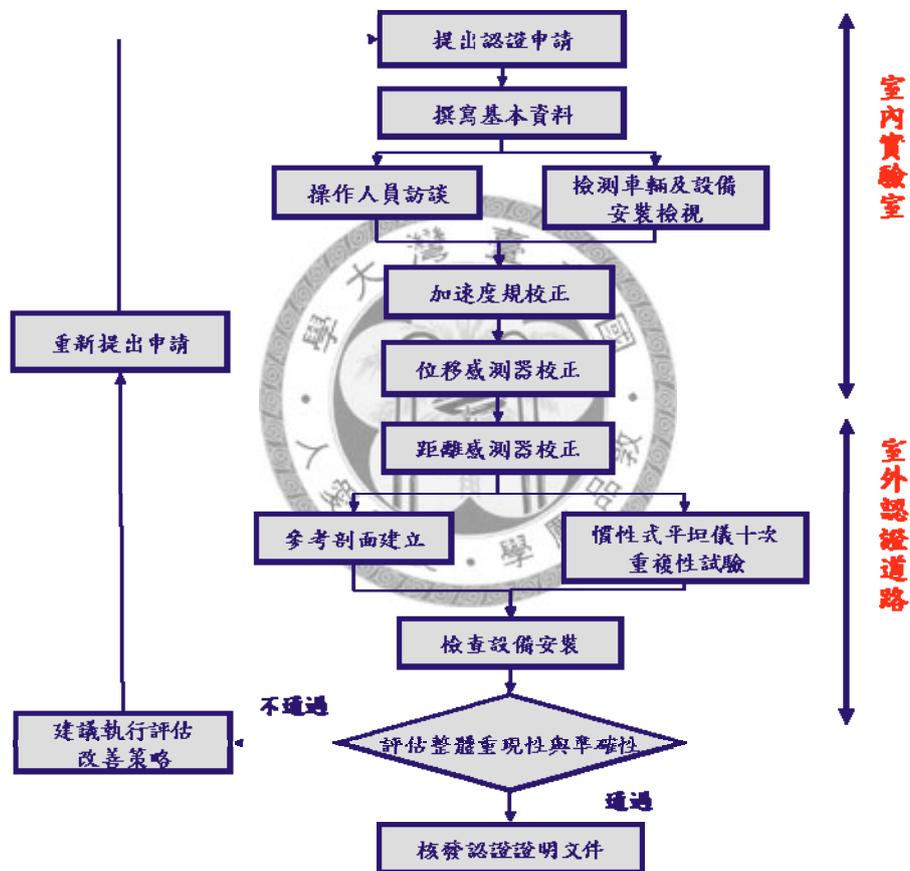


圖3.1 慣性式平坦儀認證流程圖

3.1.1 室內試驗

室內實驗室單一設備之校正作業，包含加速度規與位移感測器，其做法如下：

(一) 加速度規

加速度規之校正需透過加速規校正系統進行，其原理為將欲校正之加速度規

固定於校正系統之振動平台，如圖 3.2 所示，並輸入特定頻率進行量測，量測結果將與校正系統之參考加速度規進行比對，計算求得待測加速度規之電壓靈敏度，用以評估加速度規量測值是否異常。

完整加速度規校正系統設備費用及定期維護之成本較高，且目前國內已有若干實驗室，經由國家實驗室體系認可執行加速度規之校正；因此，於本認證流程中之加速度規校正方式，將採委外執行之程序進行，送往經認可之加速度規校正實驗室進行校正。



圖3.2 加速度規校正振動平台

(二) 位移感測器

位移感測器主要用來量測道路剖面高程變化情形，其校正方式係於室內實驗室採用靜態精密塊規進行，其實際作法依照AASHTO PP49規範所訂定之流程，參考本研究第二章文獻回顧之2.3.2節。

3.1.2 室外試驗

校正程序之第二部分將於室外試驗道路進行，由操作人員將設備安裝於檢測車輛後，進行距離感測器校正及慣性式平坦儀輸出數據重現性與準確性評估，其作法如下：

(一) 距離感測器校正

待加速度規與位移感測器校正作業執行完畢後，便由操作人員將設備安裝於檢測車輛之固定置具上，於實驗道路上進行重複之平坦度檢測。在進行平坦度檢

測之前，必須確保檢測車輛為標準胎壓，並透過已知長度之特定區段確認距離感測器之量測值是否準確。距離感測器校正之特定區段長度應至少為 160 m，且須重複量測該段距離，直至連續 3 次之量測距離與已知距離之誤差平均值不超過 0.1 %。若差距仍大於此一門檻值，則可藉由參數調整修正之。校正過程中應以車輛實際行駛速度應介於 30 km/hr 至 40 km/hr，並且盡量避免突然之速度變化，以減少非預期之加速度規量測值。

(二) 數據重現性與準確性評估

完成距離感測器校正並確認無誤後，接著由操作人員於試驗道路上重複進行十次試驗，並以 25 cm 為其高程資料輸出之水平間距。試驗道路之規劃為一約 300 m 之直線區段，前 100 m 為加速區段，中間 160 m 為檢測區段，並保留最後約 40 m 範圍作為減速區段。各區段之起迄點及檢測路徑應予以適當標記以確保正確之量測位置，進行試驗前也應確實清掃該試驗路段以確保路徑上無異物殘留。另一方面，為確保重複試驗皆在同一路徑上執行，須嚴格控制車行表面縱剖面量測時之縱向位置，並可藉由自動位置標記方式提高路徑一致性。

完成慣性式平坦儀十次重複性試驗後，為使慣性式平坦儀輸出數據能有比對之依據，必須利用自動水準儀 (AR&L) 或步進式平坦儀 (WP) 於檢測區段上以同一路徑與方向重複進行三次高程剖面之量測，且以高程剖面交叉相關性比對其重現性，三次高程剖面之交叉重現性不可小於 0.92；並取三次高程剖面各相同高程點位之平均值作為參考剖面，透過公認軟體 (例如：ProVAL) 計算參考剖面之 IRI 值，此值即為軟體認證之參考值。

為檢視各次試驗數據之重現性與準確性，可藉由逐點高程資料比對或高程剖面交互相關性比對等方式進行之；另一方面為驗證 IRI 計算軟體指標輸出之重現性與準確性，則需透過公認軟體 (如 ProVAL) 計算參考剖面之 IRI 值，並以其為比對基準。本研究利用 ProVAL 分析軟體進行高、低通濾波及 IRI 濾波，並以濾波後之高程剖面，透過 ProVAL 分析軟體計算其 IRI 值並進行不同方式之數據比對。ProVAL 分析軟體由美國 The Transtec Group 在美國聯邦公路總署 (Federal Highway Administration, FHWA) 的長期鋪面成效計畫 (Long Term Pavement Performance, LTPP) 共同支持下所發展之工程實務軟體，該軟體可大量分析鋪面

剖面資料，操作介面清楚簡易且具有強力分析能力，常應用於鋪面工程之分析。目前 ProVAL 最新版本為 2.31 版，而該軟體可以分析之項目包含：

- (1) 標準乘駕素質統計指數：IRI、RN、HRI、MRI，可輸出整段或分段之平坦度資料
- (2) 功率頻譜密度 (Power Spectrum Density, PSD)
- (3) 剖面式平坦儀 (profilograph) 模擬程式
- (4) 三米直規模擬程式
- (5) 區域性平坦度檢測
- (6) 交互相關性，用以計算兩剖面間之相關係數

進行資料分析前，須注意平坦儀所蒐集之剖面資料格式，ProVAL 可接受之標準文件格式是一個基於二進位的文件格式 PPF 檔或 ERD 檔，若原始資料格式為 TXT 檔或其他格式之檔案，則要透過轉檔程序，轉換成 PPF 檔或 ERD 檔後方可進行資料分析。

本研究以 AASHTO PP49 規範中所提及之三種比對方式進行相關試驗及其比對，比對方式及門檻值已於 2.3.2 節中詳細說明之。

另外，執行數據評估作業前，應先完成設備安裝之檢視，確認各項儀器元件並無因車體振動而鬆落或以確保檢測結果之正確性。另一方面，也應透過特定方式確認操作人員是否具備相關專業知識以及穩定之操作能力，此部分將於 3.2 節中詳細說明之。待各數據比對皆完成，確認設備與人員評估皆符合其標準後，由認證中心核發認證證明文件；若認證過程中，零組件校正不合標準，數據比對無法通過，亦或人員評估未達標準，則認證中心提出建議執行評估改善策略，以供提出認證申請之單位作為設備修繕、升級或人員技術加強之參考。

3.2 人員教育訓練制度之研擬

有鑑於國內目前使用慣性式平坦儀進行例行性檢測時，可能因操作人員對於設備原理、平坦度指標及影響量測結果之因素認知不足，無法確實排除或避免誤差之產生，導致輸出數據與實際情況不相符；為能準確量測實際道路剖面並計算該道路之平坦度，本研究以平坦度檢測與認證相關規範為基礎，研擬人員教育訓

練制度，規劃慣性式平坦儀人員教育訓練課程，提供政府、學術單位以及民營業者適宜之管道，以強化正確認知與相關基礎知識，進而全面提升慣性式平坦儀操作人員之素質。

3.2.1 國外人員教育訓練課程

美國國家公路機構（National Highway Institute, NHI）每年定期開授運輸工程、土木工程相關之教育訓練課程，提供美國各州相關單位之工程人員及主管培訓專業知識與實務經驗，並且透過教育訓練取得認證資格。NHI 開授之教育訓練課程範圍相當廣泛，包含下列十四大項：

1. 結構工程
2. 鋪面暨材料工程
3. 大地工程
4. 道路設計暨容量管理
5. 工程品質暨維修管理
6. 水利工程
7. 智慧型運輸系統
8. 物流管理
9. 不動產管理
10. 環境工程
11. 運輸規劃
12. 公共行政
13. 道路安全
14. 通訊工程



其中鋪面暨材料工程之課程包含道路鋪面試驗、認證與養護維修，大約有 28 門不同專業領域之教育訓練課程。依據各課程內容及其特性，授課天數也不盡相同，分別從 1 天至 30 天不等。慣性式平坦儀人員認證為鋪面暨材料工程下之一門教育訓練課程，以下為該課程之概述：

1. 訓練課程編號：NHI-131100

2. 訓練課程名稱：Pavement Smoothness: Use of Inertial Profiler Measurements for Construction Quality Control.
3. 費用：每位 \$235 美元
4. 訓練課程期間：1.5 天
5. 班級人數：20~30 人

此教育訓練課程主要目的在於使受訓人員對於鋪面平坦度量測與資料分析有正確認知，包括檢測儀器原理與平坦度指標等。由專業人員教授如何擷取慣性式平坦儀之數據以及如何正確計算數據，並講授各種影響慣性式平坦儀量測之誤差。課程內容劃分為若干單元，分別涵蓋上述之內容。完成教育訓練課程之受訓人員，將具備下列敘述之各項能力：

1. 了解慣性式平坦儀內部各零件組成及其操作原理
2. 正確操作慣性式平坦儀，且排除不必要之量測誤差
3. 解釋高程剖面與IRI值之結果
4. 熟悉濾波過程及取樣間距之調整
5. 將原始資料轉換成平坦度評估指標，如：IRI或RN
6. 了解不同計算方式對偏差結果之影響

3.2.2 人員教育訓練課程與教材

國內目前部分工程實務單位已擁有速度快、準確性高之慣性式平坦儀，並且利用慣性式平坦儀進行例行性道路鋪面檢測，相關單位包含桃園縣交通局道路平坦度檢測儀、公路總局鋪面檢測系統、國道高速公路局由國內研製之慣性式平坦儀、桃園國際航空站鋪面紋理暨平坦度檢測儀、台北市新工處鋪面檢測儀及臺灣大學自行研發之慣性式雷射平坦儀等。雖然有越來越多工程單位利用慣性式平坦儀取代三米直規或其他量測平坦度之儀器，但操作人員對於慣性式平坦儀之設備原理、平坦度指標及量測誤差因素卻沒有正確的認知。當進行道路平坦度檢測時，由於外在環境改變及設備發生異常現象，造成檢測過程中，儀器未能正確量測道路真實高程剖面；亦或由於人為不當操作因素，導致儀器量測之高程剖面與道路真實高程剖面產生誤差。由於量測誤差會導致輸出數據與實際情況不相符之現象，影響檢測路段之平坦度指標計算，降低平坦度檢測結果之準確性及可靠性。

本研究參酌美國國家公路協會開授之教育訓練課程內容[31]，規劃國內慣性式平坦儀人員認證教育訓練課程與相關教材。本課程以研擬之訓練教材為主要授課內容，將由專業人員授課並示範儀器之操作。課程內容包含平坦度指標、剖面量測儀器介紹、認證程序、影響慣性式平坦儀量測之各項因素、訊號處理及國內平坦度檢測相關規範等。參與認證之人員於課程結束後，須參加筆試測驗，通過筆試測驗者方能取得慣性式平坦儀人員操作認證的資格。

至於教育訓練之課程教材範圍則涵蓋平坦度指標、各種剖面量測儀器、認證程序、影響慣性式平坦儀量測之環境、設備及人為操作誤差與訊號處理等。第一章簡介人員教育訓練之目標及內容範圍，第二章概述鋪面平坦度及剖面量測，並且說明縱剖面指標、國際糙度指標及行駛指數之原理與其特色。第三章介紹國際常用之平坦度量測儀器，包括剖面式平坦儀、反應式平坦儀、步進式平坦儀、慣性式平坦儀及自動水準儀。第四章說明慣性式平坦儀認證程序，包含室內單一零組件校正流程、室外零組件校正流程、室外試驗及評估項目。第五章探討影響慣性式平坦儀量測之鋪面及環境因素，分別說明誤差產生之原因及對於量測結果之影響。第六章探討影響慣性式平坦儀量測之設備因素，分別針對不同類型之感測器及不同環境下探討誤差產生之原因及對於量測結果之影響。第七章探討影響慣性式平坦儀量測之人為操作因素，說明操作人員於事前確認、檢測速度、速度變化控制、加速區、資料擷取起始位置、橫向位移及檢測過程確認各項中，可能產生誤差之原因及其影響。除設備操作與基礎概念外，在進行量測結果之判讀與路況評估時，量測資料需透過平坦度指標之轉換，以方便進行路段之平坦度評估，因此，操作人員對於資料處理需具備相關之知識，本教材第八章則概述量測訊號處理之過程，包括訊號基本概念、濾波方式簡介及訊號處理流程，協助資料分析人員正確的判讀量測結果。人員教育訓練教材之具體內容，則將詳述於附件二中。

3.2.3 人員認證制度

為檢視慣性式平坦儀操作人員是否具備相關專業知識以及穩定之操作儀器能力，本研究以 AASHTO PP 49 為基礎，研擬操作人員認證流程如圖 3.3 所示。

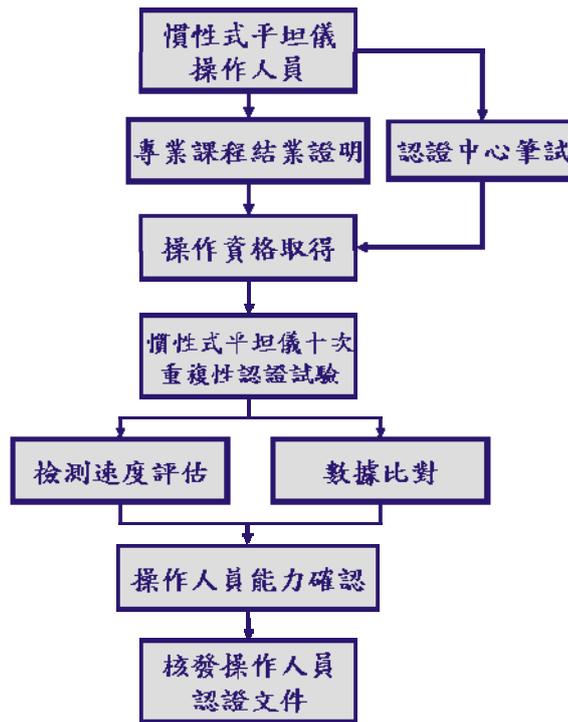


圖3.3 慣性式平坦儀操作人員認證流程圖

平坦儀認證作業正式執行之前，操作人員首先應完成教育訓練課程或是通過認證中心筆試測驗，以取得平坦儀操作資格。筆試測驗部分則根據課程及教材內容進行研擬，以檢視操作人員是否具備平坦度相關專業知識。操作人員取得平坦儀操作認證資格後，必須展示其設備啟動能力並能正確判別儀器狀態，以確保實際檢測數據之正確性。接著則於室外實驗室部份進行平坦儀十次重複性檢測，檢測過程中將由認證中心人員協助紀錄檢測歷時，計算各次檢測平均速度之變化量或是藉由各次檢測過程中所紀錄之速度變化，檢視操作人員之穩定性；另一方面，透過剖面高程數據比對之結果，了解操作人員駕駛待測平坦儀進行檢測時之數據重現性與準確性，藉以確認其實地檢測能力。完成上述流程並通過評估後，便可針對該操作人員核發該部平坦儀之操作人員認證文件。

上述項目主要是針對操作人員專業知識、設備啟動與狀態確認能力以及實地檢測能力進行確認。其中第一項的測試對象僅針對人員的部份，而後兩項則是針對人員與儀器，即考量平坦儀整體執行績效。有鑑於此，認證作業係針對特定操作人員及特定平坦儀進行檢視，因此認證證明文件僅屬實際參與認證之操作人員及其所操作之平坦儀所有。實際檢測過程中若任何一部分有所變更時，則其所蒐

集之數據將不具代表性與可靠度。

另一方面，為充實平坦儀操作人員專業領域之新知並確認其平坦儀操作資格，應針對操作人員研擬相關回訓機制。依據國內「公共工程施工品質作業要點」第五點：『品管人員，應接受工程會或其委託訓練機構辦理之公共工程品質管理訓練課程，並取得結業證書。取得前開結業證書逾四年者，應再取得最近四年內之回訓證明，始得擔任品管人員』及「營造業工地主任評定回訓及管理辦法」第七條：『取得工地主任執業證者，每逾四年，應再取得最近四年內回訓證明，並檢具申請書及原執業證，向中央主管機關申請換領執業證，始得擔任營造業工地主任』之規定，各相關品管人員於取得證書後，應於四年內取得回訓證明。有鑑於平坦儀操作人員之特性亦屬品管人員之範疇，因此建議取得專業課程結業證明或通過認證中心筆試逾四年者，應再取得最近四年之回訓證明，使得具備平坦儀操作資格。[32][33]

至於認證頻率方面，儀器與人員需每年定期進行操作認證作業以確保其數據正確性與可靠度，期間若有設備變更之情況發生，也應針對該項設備及其對整體系統之影響進行評估，此時建議亦應重新進行認證以確保該慣性式平坦儀檢測數據之精準度。



第四章 臺大慣性式平坦儀認證結果分析

依據第三章所研擬之慣性式平坦儀認證程序，本研究利用臺灣大學土木系自有之慣性式平坦儀順利完成室內實驗室校正，包括將加速度規與位移感測器。經確認室內試驗流程之可行性與正確性後，本研究尋找合適場地進行室外試驗，透過距離感測器校正、慣性式平坦儀之重複試驗及參考剖面之建立評估認證流程之正確性與可行性。

4.1 試驗場地

為了進一步確認慣性式平坦儀認證程序中室外試驗之可行性，臺大慣性式平坦儀研究人員除積極進行臺灣大學竹北校區之認證中心規劃與設計外，並先暫於臺北縣、市新工道路與河濱道路，尋找適宜之道路進行室外試驗。本研究以台北縣淡海新市鎮新市三路二段作為試驗道路，該路段為新工不久之雙向四車道，如圖 4.1 所示。該試驗道路之交通量極少，可降低其他車輛之影響，使試驗過程更為流暢、順利。該試驗道路之鋪面經量測後得知平坦度 IRI 值介於 2.5 m/km~4.5 m/km，路段長度約為 280 m，前 80 m 為加速區段，中間 160 m 為檢測區段，並保留最後約 40 m 作為減速區段。



圖 4.1 淡海新市鎮試驗替代路段實景

4.2 參考剖面建立與慣性式平坦儀重複性試驗

本研究利用於民國 96 年採購之自動水準儀 (AR&L) 進行參考剖面之建立。AR&L 除可精準量測鋪面剖面外，並可達到比一般的水準儀或步進式平坦儀更

高的量測速度，同時兼具準確以及快速之優點；除此之外，AR&L 已被美國聯邦公路總署選為參考剖面量測儀之候選儀器，且被美國各州運輸部廣泛使用於認證程序中。該設備之組成與功能已詳述於 2.2.4 節中。

實際於淡海新市鎮進行認證作業之前，為使慣性式平坦儀輸出數據能有比對之依據，必須利用前述之 AR&L 於檢測區內建立參考剖面。有鑒於此，在確定慣性式平坦儀重複性試驗輪軌跡所在位置(車道線右側 107 cm)後，遂於檢測區內劃設 AR&L 檢測線，如圖 4.2 所示。

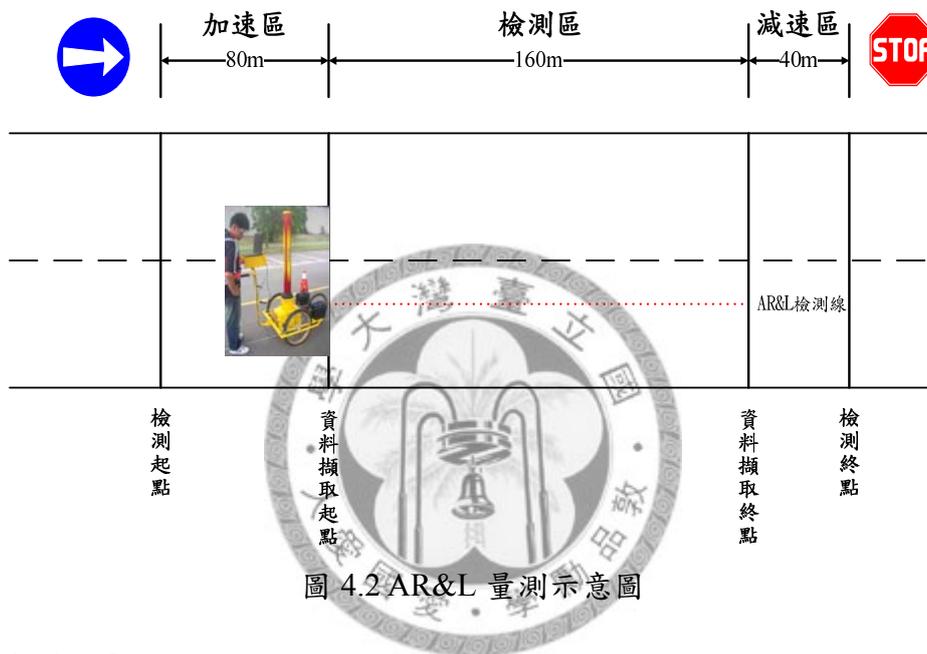


圖 4.2 AR&L 量測示意圖

其檢測步驟如下：

1. 胎壓確認(10 psi)
2. 距離校正(校正長度至少為 30 m)
3. 確認資料擷取間距
4. 雷射架設與設定
5. 同路徑檢測三次

操作者以步行速度於 AR&L 檢測線上，保持同一路徑各重複量測三次，原始資料經繪圖後可見 AR&L 三次量測之高程數據幾乎重疊(如圖 4.3)，顯示三次檢測均沿同一路徑進行。但因道路原有坡度之影響，須先利用 ProVAL 軟體以高通濾波處理方式以除去坡度對於剖面之影響，才能與慣性式平坦儀進行後續比對。圖 4.4 為 AR&L 三次量測之高程數據經高通濾波處理後之高程剖面，由圖顯

示經高通濾波後之高程剖面一致性甚高。本研究進一步透過 ProVAL 軟體以交叉相關性評估，三次高程剖面經 IRI 濾波後(如圖 4.5)之重現性如表 4.1 所示，其平均值大於 92，顯示兩兩剖面間之數據可靠度與重現性甚高。接著將三次 AR&L 量測高程數據平均即可得參考剖面，同樣透過 ProVAL 軟體計算參考剖面之 IRI 值，以作為參考 IRI 值進行比對，其單位為 m/km。

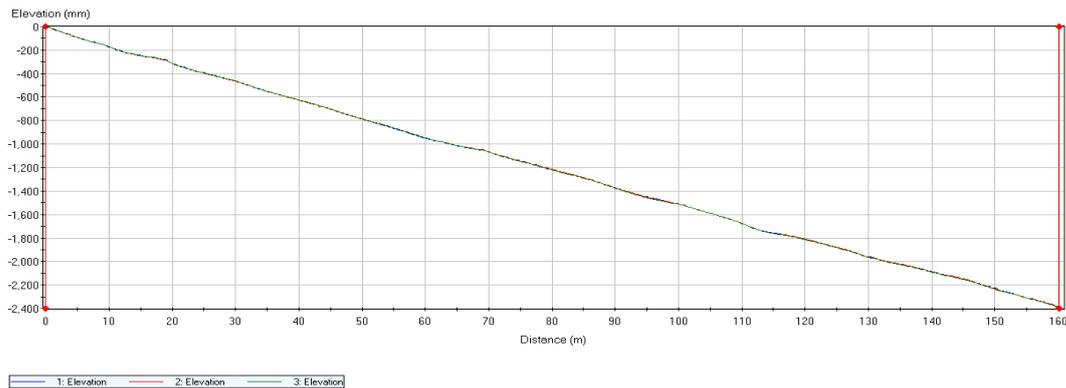


圖 4.3 AR&L 三次量測高程數據

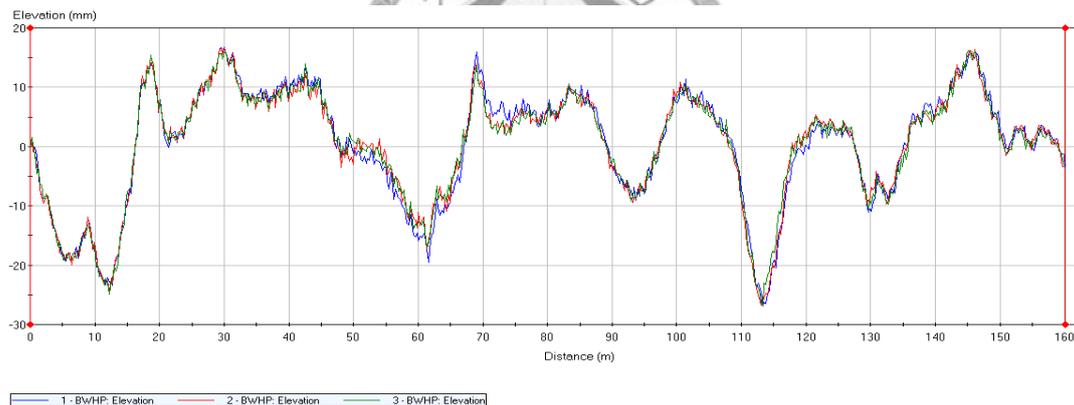


圖 4.4 AR&L 三次量測高程數據經高通濾波處理圖

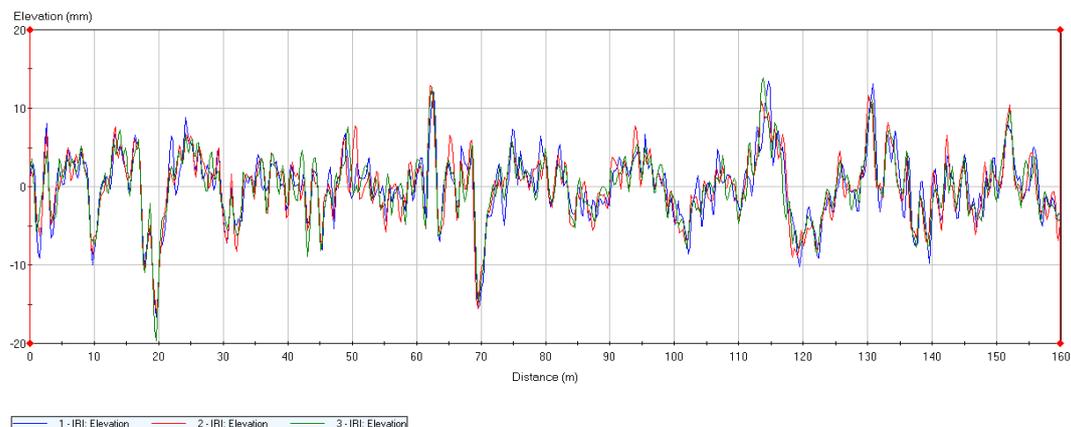


圖 4.5 AR&L 三次量測高程數據經 IRI 濾波處理圖

表 4.1 AR&L 交叉相關重現性

編號	2	3
1	96	93
2		94

完成參考剖面之建立後，接著進入臺大慣性式平坦儀距離感測器校正，圖 4.6 為距離感測器校正示意圖，其實際檢測步驟如下：

1. 慣性式平坦儀車輛胎壓確認 (40 psi)
2. 起訖點標記 (駕駛對準車道線)
3. 操作人員將車輛停妥於起點，並由一位工作人員從旁進行起始點定位輔助
4. 穩定加速至試驗速度後維持定速，接近終點時穩定減速並停止
5. 終點處另有工作人員進行實際距離量測
6. 計算誤差百分比
7. 原始參數 × 量測距離 = 修正後參數 × 實際距離
8. 以修正後參數重複上述步驟 3~7，直到誤差百分比通過 CNS 15046 之規定

依據 CNS 15046 之規定，此誤差百分比需小於 0.1%，若大於此一門檻值可藉由上述步驟 7 進行參數調整修正，其數據及校正結果如表 4.2 所示。由表九中之結果顯示，距離感測器經第三次校正後，其誤差百分比為 0.06%，已符合規範所要求之門檻值。

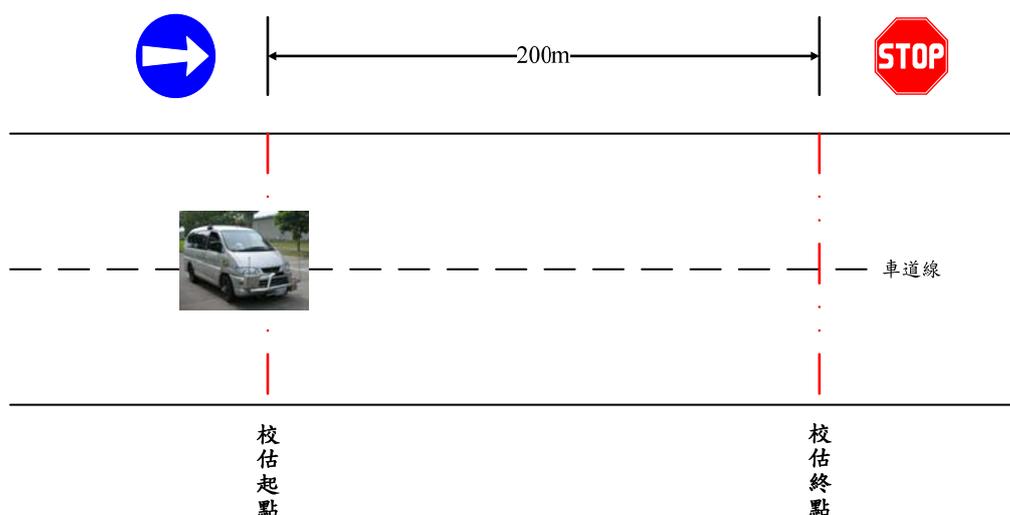


圖 4.6 距離感測器校正方式示意圖

表 4.2 距離感測器校正結果

次數	行走距離參數設定	量測距離 (m)	實際距離(m)	誤差百分比(%)
1	48.78	205.32	200.45	2.43
2	49.965	199.74	200.16	0.21
3	49.86	198.98	199.10	0.06

確認距離感測器校正之誤差百分比符合門檻值後，接著進行慣性式平坦儀十次重複性試驗。首先，在試驗道路上劃設檢測起訖點與資料擷取起訖點，該路段劃分為加速區 80 m，檢測區 160 m 以及減速區 40 m，如圖 4.7 所示。為檢視試驗過程中行經檢測區時是否定速以及右輪軌跡線是否固定，其試驗步驟如下：

1. 駕駛員將車輛停妥於檢測起點，並由一位工作人員從旁進行起始點及右輪軌跡定位輔助，如圖 4.8 所示。
2. 駕駛員對準車道線，穩定加速並應於資料擷取起點前達檢測速度，隨即保持定速至通過資料擷取終點後穩定減速並停止。
3. 電腦操作人員則應於開始前啟動平坦度檢測程式，並於車輛通過資料擷取終點後方可停止資料擷取。
4. 重複上述 2、3 之步驟檢測十次。

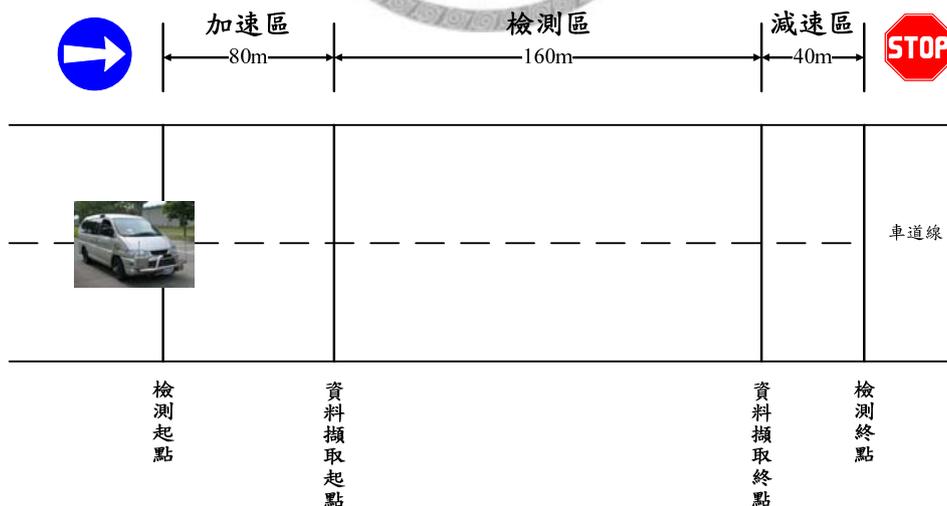


圖 4.7 慣性式平坦儀十次檢測示意圖



圖 4.8 慣性式平坦儀起始點定位

4.3 重現性與準確性分析

1. 軟體認證

為了獲得慣性式平坦儀十次重複性試驗之平坦度，本研究利用慣性式平坦儀檢測設備之分析軟體擷取並計算 160 m 檢測區之平坦度 IRI 值，如表 4.3 所示。另外，參考剖面之平坦度則透過 ProVAL 分析軟體換算成參考 IRI 值，其值為 3.07 m/km。

表 4.3 臺大慣性式平坦儀 IRI 值 單位：m/km

試驗編號	IRI 值
1	3.05
2	2.98
3	3.04
4	3.02
5	3.05
6	3.00
7	3.04
8	3.05
9	3.05
10	3.09
平均值	3.04
AR&L	3.07
變異係數 (%)	1.00

由表 4.3 之數據經計算後，慣性式平坦儀十次試驗 IRI 值之變異係數為 1.00%，符合 AASHTO PP 49 規範之要求門檻值 3%。至於 IRI 值準確性部分，經計算後為 1.21%，亦小於 AASHTO PP49 規範之要求門檻值 5%。由上述結果顯示，慣性式平坦儀檢測設備之分析軟體不論重現性或準確性，皆可通過

AASHTO PP49 規範之要求。透過比對平坦度指標數值，可確認該軟體指標計算邏輯之正確性與可靠度，為進一步確認原始高程數據之重現性與準確性，則透過以下高程剖面交叉相關性比對或逐點高程資料比對之方式進行之。

2. 高程剖面交叉相關性比對

圖 4.9 為慣性式平坦儀重複十次試驗之原始高程數據繪製圖。為消除試驗道路坡度之影響，透過高通濾波處理後，將十次高程數據重新繪製，如圖 4.10 所示，由圖中可清楚發現十次試驗之高程數據幾乎重疊，顯示十次試驗之路徑一致性甚高。再將十次試驗之高程數據透過 ProVAL 分析軟體之 IRI 濾波後，如圖 4.11 所示，將各次高程數據與其他九次進行交叉相關重現性分析，結果如表 4.4 所示，重現性之平均值為 0.96，符合 AASHTO PP49 規範之要求門檻值 0.92。

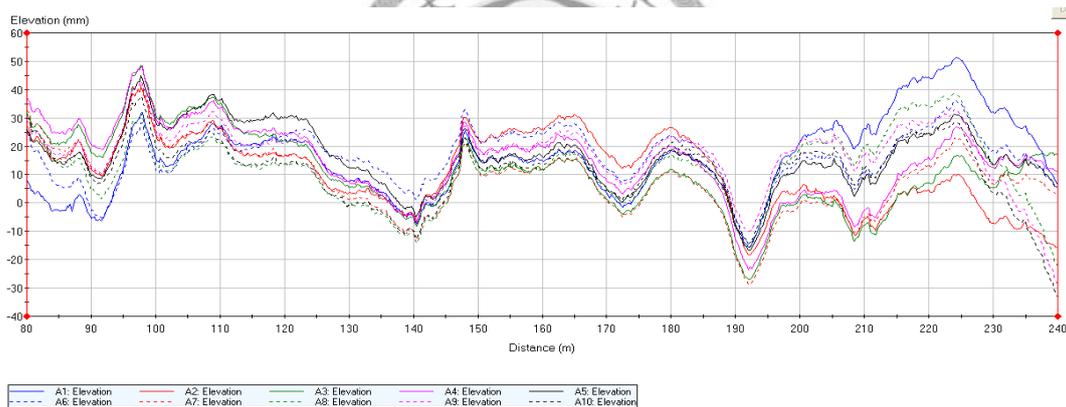


圖 4.9 慣性式平坦儀十次試驗原始高程數據

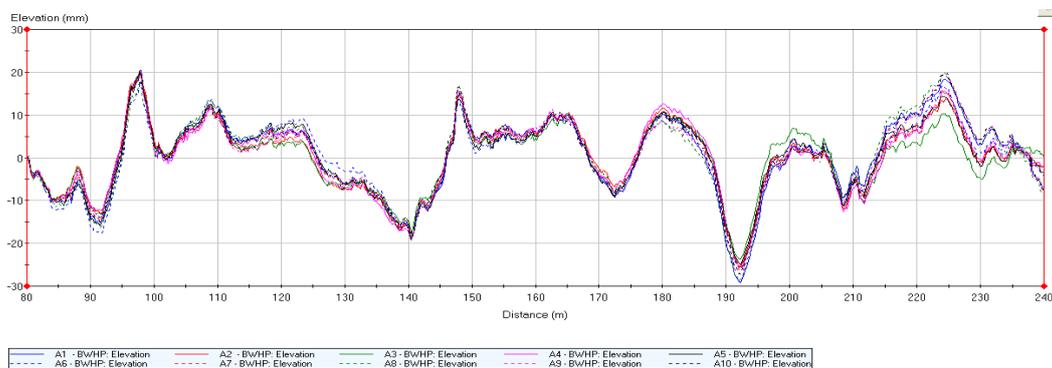


圖 4.10 慣性式平坦儀十次試驗高程數據經高通濾波處理圖

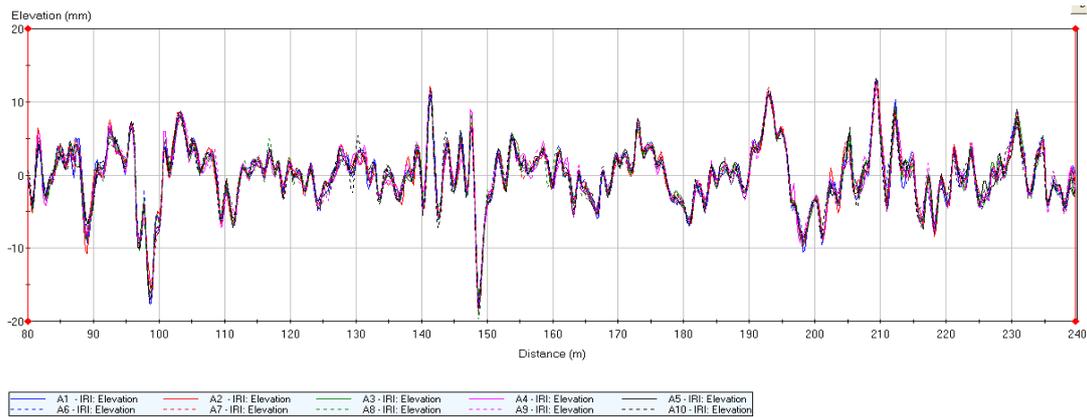


圖 4.11 慣性式平坦儀十次試驗高程數據經 IRI 濾波處理圖

表 4.4 交叉相關重現性 單位：%

編號	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	95	95	95	95	94	97	97	95	96
2		98	96	96	96	96	96	96	94
3			96	97	97	96	96	96	95
4				97	96	97	96	96	95
5					96	97	97	97	96
6						95	96	96	95
7							98	96	96
8								97	97
9									96

至於準確性部分，將慣性式平坦儀十次檢測高程數據與 AR&L 參考剖面數據透過 ProVAL 分析軟體之 IRI 濾波處理後，接著進行交叉相關準確性之比對，其結果如表 4.5 所示，準確性之平均值為 0.92，亦符合 AASHTO PP49 規範之要求門檻值 0.9。

表 4.5 交叉相關準確性 單位：%

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
準確性	91	93	92	94	92	91	93	92	91	91

3. 逐點高程資料比對

根據 AASHTO PP49 規範與本研究 2.3.4 節中彙整之各州認證規範所顯示，逐點高程比對並非絕對需要；不僅比對過程繁複且執行困難度高，其比對結果亦甚難達到合格的一致性。本研究乃基於求真與求知的原則，進行此項目之比對。

逐點高程比對為針對各剖面每一相對應點位(間距0.25 m)所輸出之高程數據進行點對點的比對。然而，十次重複性試驗過程中，操作人員駕駛車輛無法避免些微橫向偏移，導致各次試驗之路徑與參考剖面無法完全一致，為了順利進行逐點高程比對，必須先將已經過高通濾波之高程數據進行前後平移，直到參考剖面與慣性式平坦儀之高程剖面於縱向測線之方向幾乎重合，如圖 4.12 所示，由圖中可發現慣性式平坦儀（九次）與 AR&L（紅色曲線）之逐點高程已幾乎重合，可進行逐點高程比對。

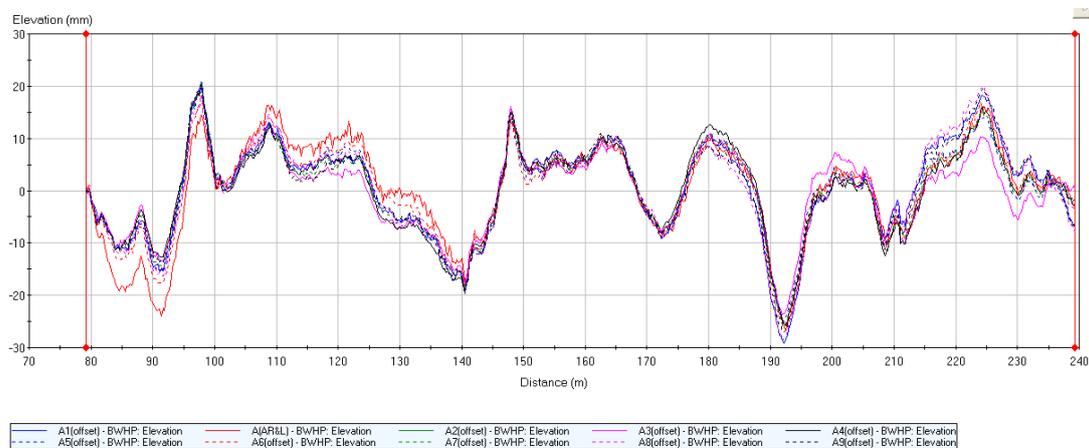


圖 4.12 慣性式平坦儀與 AR&L 逐點高程比對

表 4.6 為右輪軌跡測線之逐點高程重現性及準確性比對結果。首先在重現性部分，各點位檢測高程標準差之平均值為 1.31 mm，無法通過 AASHTO PP49 所設定之門檻值 0.9 mm。至於準確性部分，各點位高程差值之平均為 0.02 mm，各點位高程差之絕對值平均則為 2.43 mm，亦無法通過 AASHTO PP49 規範中絕對值平均之門檻值 1.5 mm。

表 4.6 逐點高程重現性及準確性比對結果

逐點高程	重現性 (mm)	準確性(mm)	
		差值平均	絕對差值平均
比對結果	1.31	0.02	2.43
AASHTO PP49	0.9	± 0.5	1.5
通過與否	X	○	X

此部份之比對分析結果並不令人意外，實乃因為在車速高達 40 km/hr 之情況下，駕駛車輛之操作人員很難精準無誤進行十次重複性試驗而不產生任何橫向偏移；故若以每 25 cm 輸出一高程資料與參考剖面之高程資料比對，且通過高要求之門檻值，其可能性並不高。

綜合以上之比對結果，顯示由本研究操作人員搭配臺大慣性式平坦儀所檢測之數據於軟體認證及高程交叉相關性比對項目中呈現高度重現性與準確性；但在逐點高程資料比對方面，由於操作人員駕駛路徑之些許偏差，產生逐點高程無法準確對應之現象，導致比對結果無法通過重現性及準確性，由此可知，操作人員駕駛車輛之穩定性對於數據比對有極重要之影響，故人員教育訓練制度之研擬也就顯得格外重要；除此之外，另尋他法確認操作人員及儀器各自之穩定性、重現性及準確性亦是慣性式平坦儀認證作業待突破之重要項目之一。

本研究經過多次試驗後也發現，在室外道路進行慣性式平坦儀十次重複性試驗，並利用該數據進行逐點高程比對有相當大之困難度；不論是外在環境因素或人員操作時難以避免之橫向偏移誤差，都會導致分析數據時難以通過規範的門檻值要求。由第二章相關國內外文獻回顧顯示，雖然美國佛羅里達州、德州及紐約州政府依循 ASTM E950 或 AASHTO PP49 規範之逐點高程比對進行評估，但仍沒有以室外認證並採逐點高程比對之相關評估數據。因此，本研究也建議若於室外道路進行認證，可採用大多數州政府所依循採用之交叉相關比對評估儀器配合操作人員之重現性與準確性，亦或透過室內認證進行重複性試驗取代室外認證之程序。

第五章 人為誤差影響分析

本章將針對各種影響慣性式平坦儀量測之因素，包括鋪面因素、環境因素、設備因素及人為操作等因素，探討室外認證過程中最常遭遇且最難避免之人為操作因素。故本章利用臺大自行研發之慣性式平坦儀，進行不同車速下加速度變化、速度控制與橫向偏移量之試驗，並且搭配自動化檢測設備之數位相機實地進行試驗，最後分析試驗數據並加以說明。

慣性式平坦儀係利用加速度規與位移感測器量測鋪面縱剖面斷面相對高程，以非以接觸之方式對路面進行直接量測。然而在進行量測過程中，卻有許多因素可能導致量測之高程剖面產與真實剖面產生偏誤之現象，導致後續以高程資料進行繁複計算時，影響平坦度指標 IRI 值。影響慣性式平坦儀量測之因素可分為四大類型，分別為鋪面因素、環境因素、設備因素及人為操作因素。

影響慣性式平坦儀量測之鋪面因素包括坡度與曲線路段；環境因素包括空氣濕度、鋪面積水及鋪面異物；而設備因素則隨著不同類型或規格之感測器於不同環境下，皆有可能產生誤差，附件二「慣性式平坦儀人員認證教育訓練教材」中詳細說明誤差產生之原因及對於量測結果之影響。

5.1 影響慣性式平坦儀量測之人為操作因素[29]

於本研究期間，經過多次重複性試驗發現影響慣性式平坦儀量測之誤差以人為操作因素最常發生，且試驗過程中難以透過其他手段避免誤差產生。人為操作因素包括事前確認、檢測速度、速度變化控制、加速度變化、資料擷取起始位置、橫向偏移及檢測過程確認等，其中以速度變化控制、加速度變化及橫向偏移為最難避免之人為操作因素。以下分別說明各種人為操作因素對於慣性平坦儀量測之影響。

1. 事前確認

慣性式平坦儀進行試驗前，操作人員必須先行確認各設備是否處於穩定狀態，可供正常運作。為確保檢測過程中感測器量測、資料儲存與擷取正確無誤，事前必須針對車輛胎壓、設備暖機及接線等逐一確認。

2. 資料擷取起始位置

慣性式平坦儀檢測之過程中，可利用自動觸發設置，透過自動方式擷取量測資料，亦可透過手動按鍵或後續處理等方式擷取量測資料。採用自動觸發方式能精確擷取分析區段之資料，相對於手動按鍵或後續處理等方式，誤差甚小。當資料擷取起點位置不正確時，會導致慣性式平坦儀量測之高程剖面產生前後位移，如圖 5.1 所示。一般道路並不會設有自動觸發裝置，操作人員可由檢測路段上之明顯標的物位置，如路口、建築物，以手動方式標記資料擷取範圍。

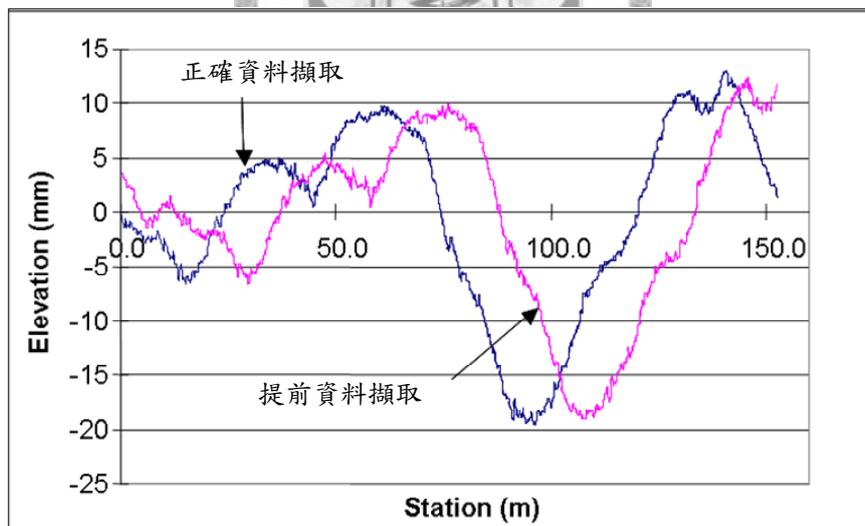


圖 5.1 起始位置偏移[29]

3. 速度控制變化

當車輛具有加速度時，即產生速度之變化。在檢測過程中，任何加速或減速皆會對剖面量測造成影響；由於車速改變（加速或減速），使位移感測器與加速

度規傾斜，而傾斜的角度造成量測值產生誤差，而導致量測剖面與實際剖面不同。為了確保剖面量測資料之正確性，車輛於資料擷取起點前，必須達固定之檢測速度，且操作人員於檢測過程中，應盡量維持等速行駛；若於一般道路進行檢測，則建議量測初始速度變化較大且未達穩定值前之數據，應不納入評估資料中。

由 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 研究計畫 10-47[34]資料顯示，雖然車速改變並不會使 IRI 值有明顯差異，但確實對高程剖面量測造成影響，如圖 5.2 及圖 5.3 所示。圖 5.2 說明減速對於高程剖面量測之影響，以同一高速慣性式平坦儀針對相同測線進行六次剖面量測，其中五次維持 80 km/hr 等速行駛，而另一次檢測速度由 80 km/hr 減速至 48 km/hr，由於加、減速皆使位移感測器與加速度規產生傾斜，而傾斜的角度造成量測值產生誤差，導致減速之高程剖面與原先維持等速之高程剖面有明顯差異。圖 5.3 說明加速對於高程剖面量測之影響，其中五次維持 80 km/hr 等速行駛，而另一次檢測速度由 48 km/hr 加速至 80 km/hr，由圖 5.3 亦顯示檢測過程中加速會使高程剖面產生變化。

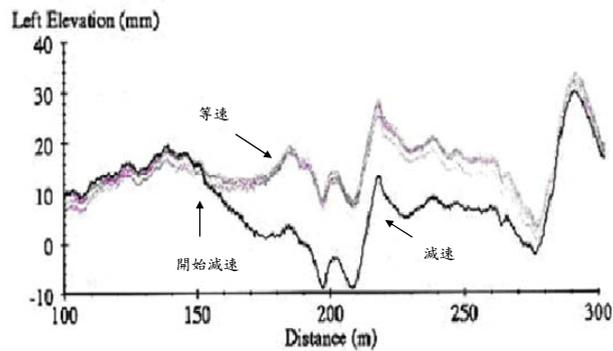


圖 5.2 減速對剖面量測之影響[34]

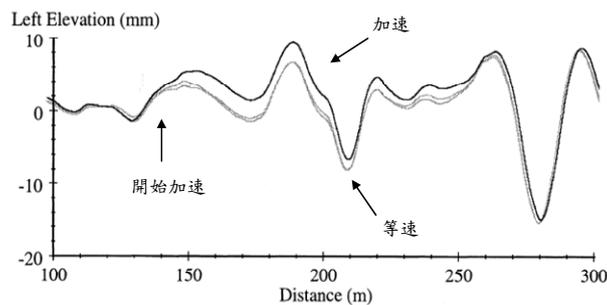


圖 5.3 加速對剖面量測之影響[34]

在進行慣性式平坦儀認證之室外重複性試驗時，並不允許車輛突然加速、減速或煞車之情況，因此上述所說明之高程剖面偏離之現象，通常發生於一般道路平坦度檢測或大規模路網檢測之情況。然而，即使操作人員於認證時盡量保持定速進行試驗，仍無法避免車輛產生些微加、減速之情形發生，而造成位移感測器及加速度規量測之誤差，故於本章 5.2 節中將會針對不同車速下加速度之變化與操作人員速度控制之穩定程度，透過重複性試驗深入探討並加以分析說明。

4. 橫向偏移

慣性式平坦儀重複性試驗過程中，任何橫向偏移皆會造成高程剖面量測之誤差，因此操作人員應具備高度穩定性，盡量避免車輛產生橫向偏移，確保慣性式平坦儀於同一路徑上進行量測，以利後續資料分析，且提高認證評估之公正性與準確性。操作人員駕駛車輛時，可透過道路之標線或車內特殊標記等方式定位，減少量測之橫向偏移，確保慣性式平坦儀每次所量測之高程剖面皆位於同一路徑。

本研究於淡海新市鎮進行慣性式平坦儀認證試驗時，在不同鋪面平坦度之情況下，儘管操作人員相當熟練駕駛該車輛，且具備有穩定控制之能力，在 160 公尺長之試驗區段仍無法避免產生些微幅度的橫向偏移。故本章 5.3 節中也將針對車輛之橫向偏移量深入探討，該試驗搭配自動化檢測設備之攝影機，並利用影像辨識技術，分析車輛橫向偏移量之變化。

5. 檢測過程確認

操作人員於試驗中須注意各感測器之輸出值或圖形變化是否合理，避免由於外在環境、人為因素或系統不穩定而造成不合理的輸出值或圖形。部份慣性式平坦儀軟體可發出即時警示訊號或聲響，提醒操作人員注意駕駛速度、資料擷取異常或感測器不正常量測等現象，以避免剖面量測之誤差。而當結束每一次試驗

時，操作人員也必須確認該次試驗之輸出值是否合乎常理，避免由於錯誤資料導致後續評估之偏誤。

5.2 不同速度下加速度變化與速度控制分析

慣性式平坦儀重複性試驗過程中，並無車輛突然加速、減速或煞車之情況，但車輛於行進中產生之任何加速或減速，皆會使加速度規傾斜，造成加速度量測值產生偏誤，導致剖面量測之誤差。故本研究於相同試驗區段，由熟悉車輛駕駛之操作人員進行不同速度十次重複性試驗，試驗目標速度分別為 25 km/hr、45 km/hr 及 65 km/hr。該試驗區段同樣保留前 80 公尺之加速區，確保資料擷取起點前已達穩定之試驗速度，且過程中操作人員盡量維持穩定駕駛直至資料擷取終點後開始減速並停止。

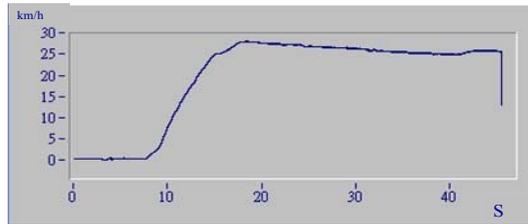
表 5.1 為目標速度 25 km/h、45 km/h 及 65 km/h 下，十次試驗之重現性及準確性（與 AR&L 參考剖面比對）結果。由表 5.1 可發現在速度 25 km/h 及 45 km/h 時，重現性與準確性皆通過門檻值；但提高速度至 65 km/h 後，重現性與準確性都降低，無法通過 AASHTO PP49 規範之要求。故本研究進一步分析車輛行駛過程中速度及加速度之改變情況與程度。

表 5.1 不同速度下交叉相關重現性與準確性

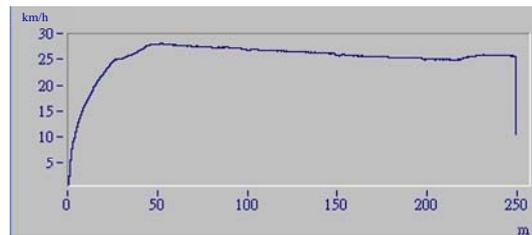
速度(km/hr)	重現性	準確性
25	0.96	0.92
45	0.96	0.92
65	0.90	0.88
AASHTO 門檻值	0.92	0.90

為深入探討不同目標速度下，速度控制與加速度變化之情況，首先利用慣性式平坦儀檢測設備之距離感測器紀錄行車過程之速度變化情形，將時間域的速度資料（時間-速度）轉換為距離域（距離-速度）的速度資料，如圖 5.4 所示，再擷取 80 公尺至 240 公尺的速度變化資料，計算其平均速度、標準差與變異係數

並分析之。



(a) 時間域之速度資料



(b) 距離域之速度資料

圖 5.4 時間域轉距離域

圖 5.5 為目標速度分別為 25 km/h、45 km/h 及 65 km/h 下，十次試驗於之速度變化圖。由圖 5.5 可知車輛的速度變化幅度隨著目標速度增加而增大，速度 65 km/h 情況下，人員穩定控制速度之能力已大幅下降。

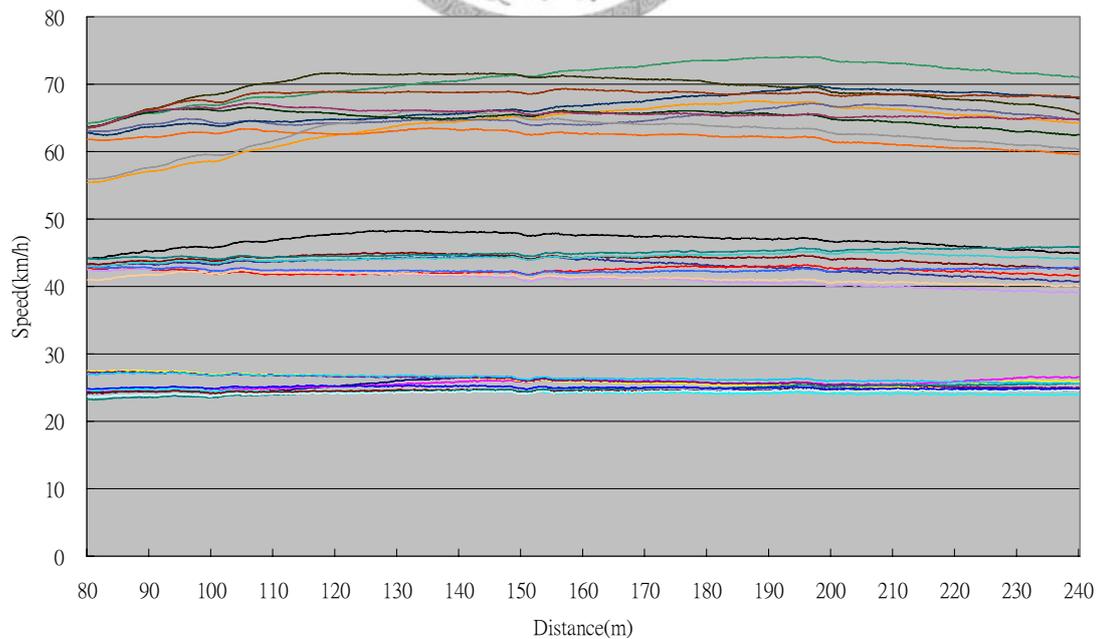


圖 5.5 速度變化圖

表 5.2 說明各目標速度下各次試驗之速度、標準差、變異係數及全距(最大速度與最小速度之差值)，速度 25 km/h 與 45 km/h 情況下各次試驗速度標準差幾乎都控制在 1 km/h 以內，其標準差之平均分別為 0.5 km/h 與 0.7km/h，而變異係數大多控制在 2.5%以內；然而目標速度 65 km/h 下各次試驗之標準差與變異係數則都大幅提高。除此之外，若根據佛羅里達州認證規範[22]對於行車速度之要求，最大速度與最小速度之差值不得超過 3.2 km/h，由表 5.2 之全距資料顯示，當目標速度為 25 km/h 時，全部試驗之全距值可通過該規範，而目標速度 45 km/h 時，有三次試驗之全距值超過 3.2 km/h，但仍能控制在 4.1 km/h 內，然而目標速度提升至 65 km/h 時，各次試驗皆超過 3.2 km/h，最高則達 12 km/h。當操作人員一邊控制駕駛穩定性，一邊注意是否對齊前方鋪面標線時，目標速度 65 km/hr 之情況下，車輛的速度變化幅度明顯較目標速度 25 km/hr 與 45 km/hr 之情況還大。由此趨勢亦顯示，較高的速度將會使操作人員較難穩定控制速度，進而導致量測過程中產生較大之誤差。

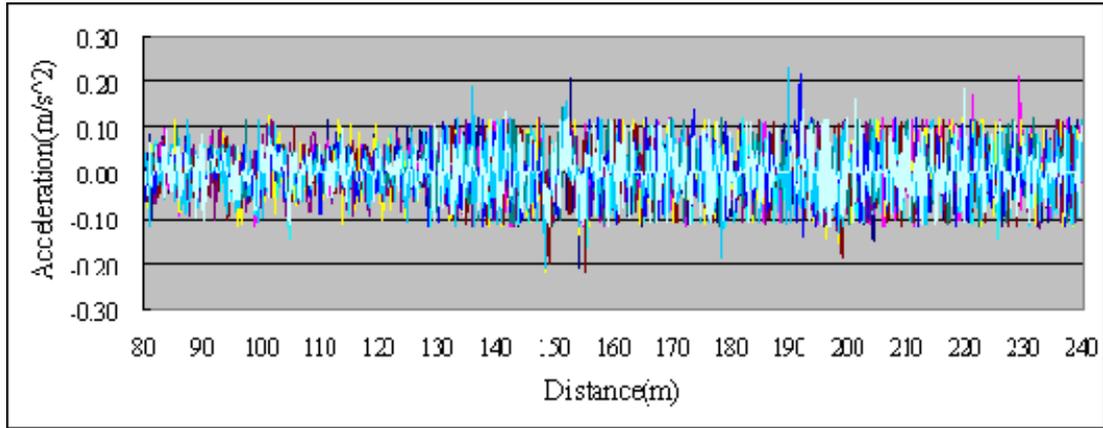
表 5.2 速度變化標準差、變異係數及全距

目標速度	25 km/h									
試驗	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
速度 (km/h)	25.4	25.6	26.1	24.3	26.1	24.5	24.7	25.0	26.4	24.3
標準差 (km/h)	0.7	0.6	0.7	0.2	0.7	0.1	0.6	0.2	0.4	0.3
變異係數 (%)	2.8	2.3	2.7	0.8	2.7	0.4	2.4	0.8	1.5	1.2
全距 (km/h)	2.5	2.3	2.6	1.0	2.4	0.7	2.4	0.7	1.7	1.1
目標速度	45 km/h									
試驗	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
速度 (km/h)	45.3	43.1	42.5	42.1	41.1	42.5	42.4	44.3	46.8	45.0
標準差 (km/h)	0.4	1.0	0.6	0.6	1.0	0.6	0.2	0.5	1.0	0.5
變異係數 (%)	0.9	2.3	1.4	1.4	2.4	1.4	0.5	1.1	2.1	1.1
全距 (km/h)	1.6	3.9	2.9	2.5	3.9	2.5	1.2	2.3	4.1	1.9
目標速度	65 km/h									
試驗	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
速度 (km/h)	63.9	62.1	65.0	62.6	66.7	70.8	65.1	69.4	68.3	65.7
標準差 (km/h)	3.3	1.0	1.1	2.5	2.1	2.6	1.0	2.0	1.1	0.6
變異係數 (%)	5.2	1.6	1.7	4.0	3.1	3.7	1.5	2.9	1.6	0.9
全距 (km/h)	12.0	3.9	4.1	10.2	7.3	9.8	4.1	8.1	5.8	3.7

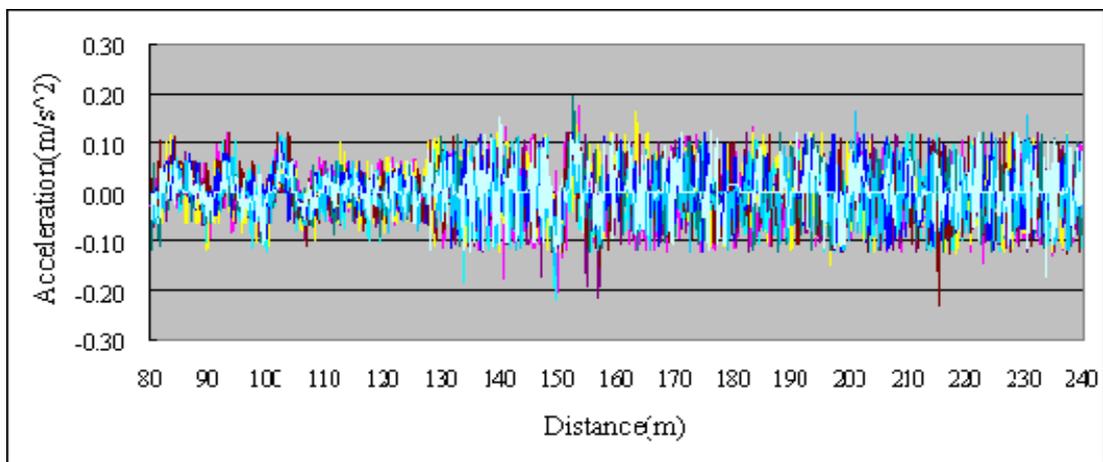
除速度控制外，由各次速度資料進行一次微分後得到之瞬時加速度也可表示操作人員穩定駕駛之能力。首先，各試驗的加速度資料係利用各試驗的速度資料進行一次微分後，得到每個時間點之瞬時加速度，再將時間域的加速度資料轉換為距離域的加速度資料，並且擷取 80 公尺至 240 公尺的資料，不同速度下各次試驗的瞬時加速度變化圖分別如圖 5.6 所示。

另外，速度 25 km/h、45 km/h 及 65 km/h 下十次試驗之加速度標準差皆為 0.05m/s^2 ，由表 5.3 可知，在速度 25 km/h 與 45 km/h 之情況下，各次試驗之加速度有超過 80% 落在一個標準差之內，而速度 65 km/h 之情況下，加速度落在一個標準差之內之比例明顯下降，最低只有 71% 落入一個標準差之內。

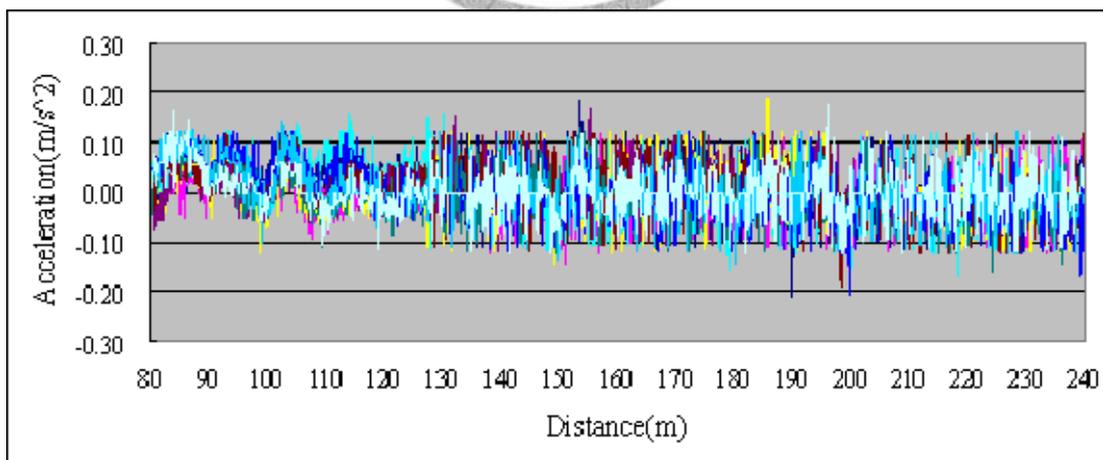
綜合以上分析結果，速度 65 km/h 下試驗數據之交叉相關重現性與準確性比對結果均不如其他兩組較低速度之試驗；其原因在於高速度時操作人員穩定控制車輛的能力降低，不論是速度變動範圍或加速度變化都較大，造成位移感測器與加速度規傾斜，導致剖面量測資料產生誤差。由速度與加速度之變化結果也可進一步說明目標速度為 65 km/h 時，慣性式平坦儀之交叉相關重現性與準確性均降低，且未能達到 AASHTO PP49 之標準。未來慣性式平坦儀進行室外認證時，檢測速度不宜過高，速度範圍建議介於 25 km/h 至 45 km/h 之間，可提升量測數據之正確性。



(a) 目標速度 25 km/h



(b) 目標速度 45 km/h



(c) 目標速度 65 km/h

圖 5.6 瞬時加速度變化圖

表 5.3 加速度值落入一個標準差之比例 單位：%

試驗編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25 km/h	83	80	83	85	83	83	85	84	83	82
45 km/h	84	83	84	87	85	82	85	83	89	83
65 km/h	72	85	81	71	79	74	82	76	79	80

5.3 橫向偏移分析

在經多次重複認證試驗後，儘管操作人員相當熟練駕駛該車輛，且具備有穩定駕駛之能力，還是會產生些微幅度的橫向偏移。因此，本研究於大佳河濱公園內一段長約 160 公尺，且有明顯縱向白色標線之直線路段，針對速度 25 km/h、35 km/h 及 45 km/h 三組低速度範圍，並搭配自動化檢測設備之數位相機進行重複性試驗。

圖 5.7 中白色圈內為自動化檢測設備之數位相機架設於車架桿上的實際情形，車架由一伸縮方管作為主桿向車尾後方延伸，與水平面夾角約 20 度，並設計兩組支撐架避免車輛於行駛過程中造成各方向晃動。數位相機與道路路面之距離約為 2.8 公尺，所拍攝之影像大小為 4.3×3.1(公尺)。數位相機採用 AVT Marlin F-145B2 黑白相機(如圖 5.8)，最大解析度為 1392×1040 像素，於最大畫素下最多每秒可連續擷取 10 張影像。



圖 5.7 數位相機架設圖



圖 5.8 AVT Marlin 黑白數位相機

由重複性試驗中所獲得之鋪面影像透過影像辨識之邏輯判斷，進一步分析影像中的標線中心線之位置，再透過標線實際長度與影像所選蓋之實際範圍大小，經由換算後得車輛實際偏移量。

本研究利用 C++ Builder 6 套裝軟體進程式撰寫，分析影像縱向標線之中心線位置（參考圖 5.9），其邏輯判斷為：

1. 讀取每張影像每一像素 (Pixel) 之 RGB 值，以區別白色標線區塊與灰色鋪面區塊，保留 (245,245,245) 之上的色值，並使 (245,245,245) 之下的變為全黑色塊。
2. 由於縱向白色標線之寬度大約佔 25 個像素，故從影像最右上方由右至左判斷超過 25 個連續像素 RGB 值在 (245,245,245) 之上，並讀取第 12 個像素之 X 與 Y 座標，意即縱向標線中心線之位置。
3. 由於影像產生些微扭曲之情形，設定影像截斷上下各 120 像素，共 240 像素（實際長度為 0.72 公尺）。
4. 於長約 800 像素之分析範圍內，每張影像分別輸出 10 個位置點的 X 與 Y 座標，如圖 5.14 所示，輸出間距為 89 像素（實際長度約為 0.26 公尺）。

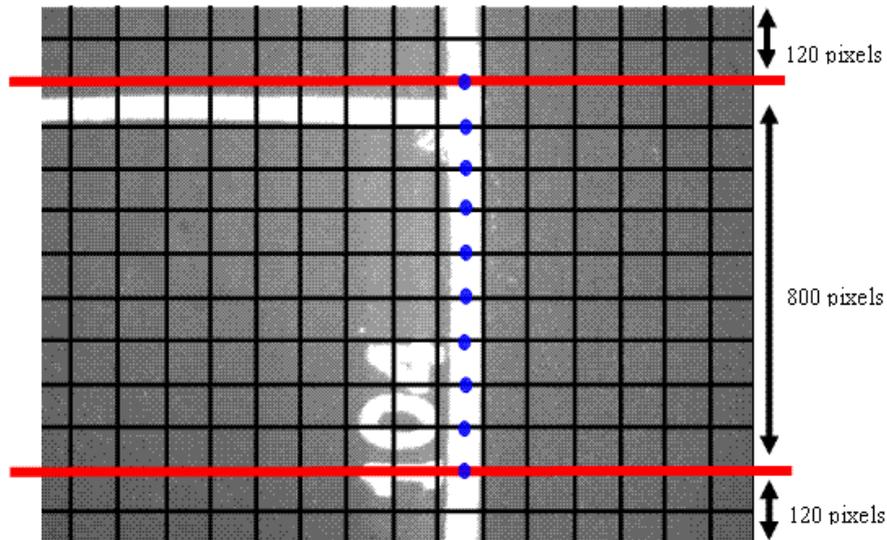
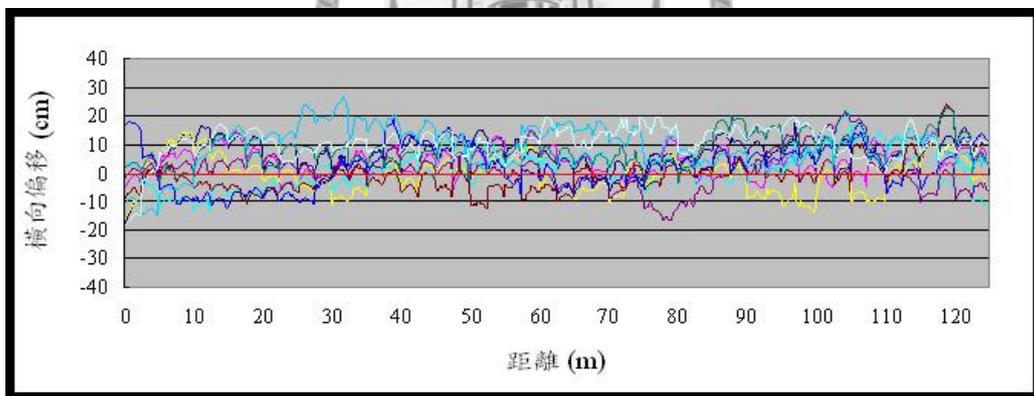
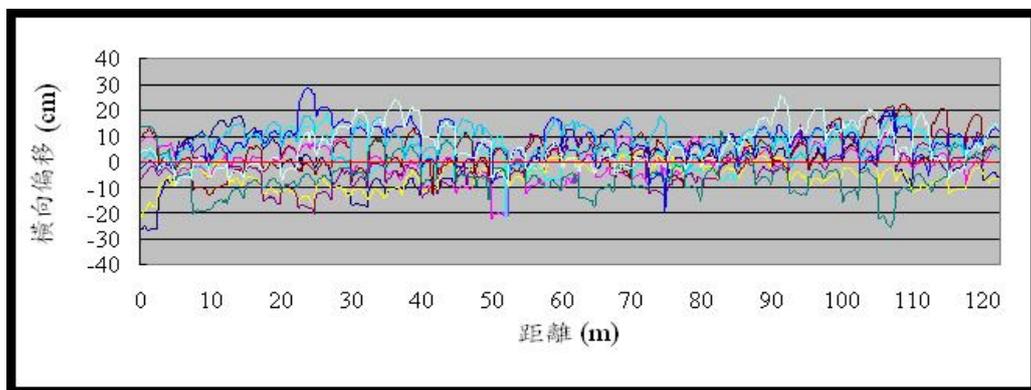


圖 5.9 判斷標線中心線之位置

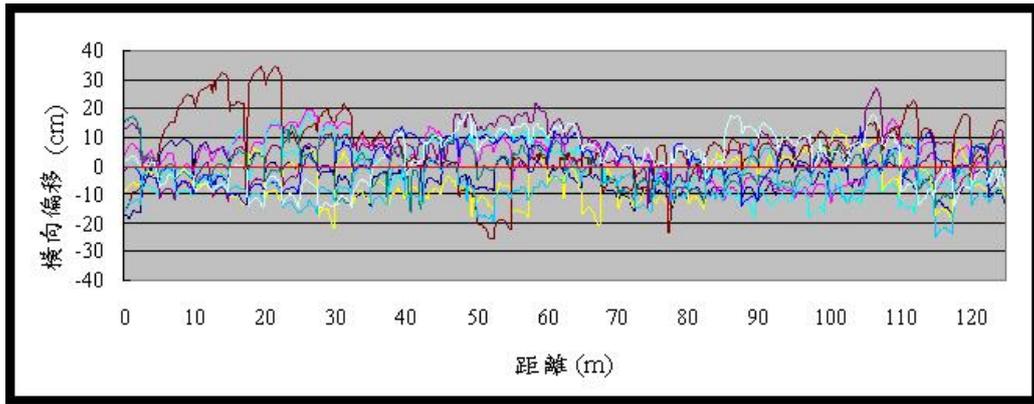
得到所有連續影像之標線中心線之 X 與 Y 座標後，配合實際標線寬度（約 13 公分）將座標點轉換為實際長度。圖 5.10 為速度 25 km/h、35 km/h 及 45 km/h 下之橫向偏移軌跡圖，圖中正值代表車輛向右偏移，而負值代表車輛向左偏移。



(a) 目標速度 25 km/h



(b) 目標速度 35 km/h



(c) 目標速度 45 km/h

圖 5.10 偏移軌跡圖

由於此三組試驗皆在低速下進行，操作人員駕駛之穩定性皆相當高，由圖可看出重複十次試驗之橫向偏移情況相差不大。接著擷取各組速度十次試驗中 26 公尺至 100 公尺穩定駕駛之數據，並以十次試驗的第 26 公尺橫向位置平均值作為基準點，將其他點位之橫向位置扣除基準點，隨後計算速度 25 km/h、35 km/h 及 45 km/h 下之絕對橫向偏移平均值及絕對橫向偏移標準差，如表 5.4 所示。由表 5.4 顯示，速度在 25 km/h~45 km/h 間，絕對橫向偏移平均值大約介於 6.5 cm~6.9 cm 間，不超過一正常標線之寬度（12 公分）；而絕對橫向偏移標準差在三組速度下分別為 5.02 cm、4.72 cm 及 4.71 cm，各組差異甚小，亦顯示在此三組速度下操作人員控制車輛橫向偏移具有相當高之穩定性。

表 5.4 平均橫向偏移及絕對橫向偏移標準差

速度	25 km/h	35 km/h	45 km/h
絕對橫向偏移平均值 (cm)	6.52	6.32	6.85
絕對橫向偏移標準差(cm)	5.02	4.72	4.71

由橫向偏移試驗與分析可發現操作人員在穩定駕駛過程中難免會產生些微偏移之情況。本試驗藉由自動化檢測設備之數位相機連續擷取鋪面影像，並撰寫程式判讀各影像中縱向標線中心線位置，可計算出車輛實際偏移量；但由於影像

仍存有扭曲的現象，本研究截去扭曲範圍之影像，而未考慮該範圍之偏移情況，故分析結果仍存在些許誤差，未來若要分析更精確之偏移量，建議可進一步透過影像處理技術或其他更新之監測技術改善分析結果。



第六章 結論與建議

美國在慣性式平坦儀認證制度方面，數州政府皆有訂定詳細的規範可供相關機構作為執行認證之參考依據；然而，國內儘管已開始利用慣性式平坦儀蒐集平坦度資料，也有少數道路主管機關（行政院公共工程委員會與內政部營建署）修訂道路平坦度驗收規範，將慣性式平坦儀納入驗收標準儀器，但在設備與人員資格之認證方面，目前卻尚未有可遵循之評估流程。本研究參酌國外相關規範，提出「慣性式剖面儀精準度認證試驗法」，並且以室內實驗室與室外認證試驗證明本研究所研擬之認證程序具有可執行性與正確性。除了建置認證程序外，亦研擬操作人員認證制度與課程教材，期待藉此做為未來認證機構或道路主管機關之參考依據，有助於提升操作人員之素質。

6.1 結論

本節將總結前述各章節之研究結果，內容則分述如下：

1. 目前國內道路主管機關頒佈之新工道路或養護檢測規範主要仍以三米直規作為驗收儀器，唯行政院公共工程委員會與內政部營建署已增修其驗收規範，將慣性式平坦儀及其所輸出之國際糙度指標（IRI）納入平坦度驗收之標準。
2. 本研究蒐集美國 ASTM E950、AASHTO PP49 與共計 12 州之慣性式平坦儀認證相關規範，經深入探討與比較後，以 AASHTO PP49 為參考依據，研擬慣性式平坦儀認證程序，並提出較適用於我國之「慣性式剖面儀精準度認證試驗法」(附件一)，將提送至經濟部標準檢驗局進行審查，以作為認證單位、各儀器廠商及操作人員之依循準則，擴大慣性式平坦儀應用於各等級道路鋪面平坦度檢測與驗收作業。

3. 本研究為國內首次針對慣性式平坦儀進行整體性之認證，利用臺大慣性式平坦儀順利完成室內實驗室校正，並於台北縣淡海新市鎮內一特定道路進行室外認證程序。操作人員搭配臺大慣性式平坦儀進行重複性試驗，透過交叉相關比對及平坦度 IRI 值比對均呈現高度重現性與準確性，顯示其設備、軟體及人員之穩定性與正確性極高。
4. 本研究以逐點高程比對方式評估慣性式平坦儀時，由於外在因素影響及操作人員無法避免些許橫向偏移，導致分析結果無法通過 AASHTO PP49 規範中重現性與準確性之標準。
5. 不同試驗速度下（25 km/h、45 km/hr、65 km/h），速度 65 km/h 之交叉相關重現性與準確性比對結果均不如其他兩組較低速度之試驗。
6. 人為操作影響為慣性式平坦儀試驗過程中最常遭遇且最難避免之因素。研究結果顯示，試驗速度為 65 km/h 下，速度控制與加速度變化較不理想，未來慣性式平坦儀進行認證時，檢測速度不宜過高，速度以 25 km/h 至 45 km/h 之間為佳。
7. 藉由影像辨識之邏輯可判斷鋪面影像標線中心線之位置，並可計算出車輛實際橫向偏移量。由絕對橫向偏移平均值與絕對橫向偏移標準差之計算顯示，當速度為 25 km/h、35 km/h 及 45 km/h，操作人員控制車輛橫向偏移具有相當高之穩定性。

6.2 建議

本節由前述各章節之研究結果，提出建議方向，內容分述如下：

1. 本研究期間經過多次重複性試驗後發現，不論是外在環境因素影響，亦或人員操作時難以避免之車輛產生橫向偏移，都將導致逐點高程無法準確對應之現象，若要求利用室外試驗之數據進行逐點高程比對實際上具有相當高的難度。建議未來若於室外道路進行認證，可利用交叉相關比對與平坦度 IRI 值

比對評估儀器之重現性與準確性，而逐點高程比對則建議透過室內認證或其他更新式之橫向偏移監測設備進行重複性試驗。

2. 透過影像辨識之邏輯判斷可間接得知車輛橫向偏移情況，但多數影像仍存有扭曲的現象，建議未來可透過影像處理技術改善此問題，亦或利用其他定位方式來量化車輛偏移之程度。
3. 本研究受限於研究時程與試驗場地長度，於橫向偏移試驗部分僅針對低速度範圍進行試驗與分析，未來若有符合規定之認證道路，則可進行更多組不同速度，甚至不同操作人員的重複性試驗；並能同步蒐集平坦度資料，分析各種不同狀況下，操作人員搭配儀器之重現性與準確性。
4. 國內之鋪面平坦度發展與人員素質稍顯落後於道路工程先進之國家，建議上級道路主管機關應推廣慣性式平坦儀之使用，增修各道路等級之平坦度驗收規範，並積極訓練操作人員，提升國內平坦度檢測與驗收之品質。



參考文獻

- [1] “Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference,” ASTM E950, 2004
- [2] “Certification of Inertial Profiling Systems,” AASHTO PP49, 2007
- [3] Sayers, M. W., Gillespie, T. D., Queiroz, C. A. V., “The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurement,” Transportation Research Record 1084, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1986
- [4] Sayers, M. W., “On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile,” Transportation Research Record 1501, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1995
- [5] “Standard Practice for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of a Vehicular Traveled Surface,” ASTM E1170-92, 1992
- [6] 周家蓓，「高速公路鋪面平坦度檢測分析與平坦儀評估」，交通部台灣區國道高速公路局，民國93年
- [7] 陳弘章，「應用慣性式平坦儀量測數據於道路整建平坦度驗收之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國95年10月
- [8] 交通部，「公路工程施工規範」，民國97年
- [9] 交通部台灣區國道新建工程局，「施工技術規範」，民國91年
- [10] 交通部公路總局，「公路工程施工說明書」，民國97年
- [11] 行政院公共工程委員會，「公共工程施工綱要規範」，民國98年
- [12] 內政部營建署，「市區道路平坦度驗收規範」，民國93年

- [13] “Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method,” ASTM E1364-95, 2005
- [14] “Measuring Pavement Profile Using a Rod and Level,” AASHTO R40-05, 2007
- [15] CNS 15046, 「慣性剖面儀量測鋪面縱向剖面試驗法」, 中華民國國家標準, 民國95年12月
- [16] “Operating Inertial Profilometers and Evaluating Pavement Profiles,” AASHTO PP50, 2007
- [17] Steven M. Karamihas, “Development of Cross Correlation for Objective Comparison of Profiles,” July 2002
- [18] 林茂文「時間數列分析與預測」, 華泰書局, 民國81年
- [19] “New York State Department of Transportation, Material’s Method : Inertial Profiler Calibration and Verification,” April 2003
- [20] Tex-1001-S, “Operating Inertial Profilometers and Evaluating Pavement Profiles,” Aug 2002
- [21] “Light weight profiling system-calibration verification & operator certification program manual,” Pennsylvania State Department of Transportation, 2008
- [22] “Florida Method of Test for Measuring Pavement Longitudinal Profiles Using a Laser Profiler,” Designation FM5-549, April 2001
- [23] Alexander J. Austerman, Walaa S. Mogawer, Matthew Turo, “Massachusetts Inertial Profiler Certification Utilizing AASHTO Specifications and Cross Correlation,” Transportation Research Board, 2007
- [24] “Quality Assurance of Road Roughness Measurement,” Virginia Transportation Research Council, VTRC 00-R20, May 2000.

- [25] “High Speed Profiler Quality Assurance Plan,” CDOT, Sep 2003
- [26] “Operation of the Inertial Profiler,” Maryland Department of Transportation, MSMT 563, 2005
- [27] “Michigan Test Method for Certification of Profilometers,” Michigan Department of Transportation, 2005
- [28] “Test Method for Determining the Ride Quality and Smoothness of a Pavement Surface Using a Road Profiler,” Georgia Department of Transportation, GDT 126, April 2005
- [29] “Pavement Smoothness Measuring Device Certification Program,” Minnesota Department of Transportation, 2002
- [30] “Operating Inertial Profiler System for Evaluating Pavement Profiles,” New Jersey Department of Transportation, NJDOT R-1, 2007
- [31] Federal Highway Administration, “Pavement Smoothness: Factors Affecting Inertial Profiler Measurements Used for Construction Quality Control,” FHWA NHI-02-050, 2001
- [32] 行政院公共工程委員會，「公共工程施工品質管理作業要點」，民國93年7月30日
- [33] 內政部，「營造業工地主任評定回訓及管理辦法」，民國93年4月6日
- [34] Steven M. Karamihas, Thomas D. Gillespie, Starr D. Kohn, Rohan W. Perera, “Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement,” NCHRP Project 10-47, 1999

附件一

慣性式剖面儀精準度認證試驗法 (草案)

慣性式剖面儀精準度認證試驗法

1. 適用範圍：本標準適用於以加速度規建立慣性參考剖面之慣性式剖面儀進行認證試驗及數據比對，其項目包含儀器、軟體及人員認證。

2. 要義與應用

2.1. 本試驗法規範慣性式剖面儀設備之組成及規格，並針對各感測器提出其校正程序。

2.2. 本試驗法針對裝載慣性式剖面儀設備之車輛，提出縱向剖面檢測認證程序；並針對慣性式剖面儀設備之分析軟體，提出軟體認證程序。

2.3. 本試驗法亦提出人員筆試及操作認證之評估項目。

3. 名詞釋義

3.1. 慣性式剖面儀 (inertial profiler)：係指採用加速度規所建立之慣性參考剖面，配合位移感測器等設備，用於量測鋪面縱向剖面之試驗儀器。

3.2. 縱向剖面 (longitudinal profile)：與量測方向同向之鋪面連續變化線，旨在表示道路表面縱向之起伏狀態。

3.3. 高通濾波 (high pass filter)：濾除低於截斷頻率的訊號，使頻率範圍高於某一特定值的訊號得以完全保留；即濾除高於截斷波長的訊號，降低長波長影響之濾波方式。

3.4. 低通濾波 (low pass filter)：濾除高於截斷頻率的訊號，使頻率範圍低於某一特定值的訊號得以完全保留；即濾除低於截斷波長的訊號，降低短波長影響之濾波方式。

3.5. 國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI)：為量測路段縱向剖面單一輪跡之累積高程差與量測路段長度之比值，其單位為公尺/公里 (m/km) 或公分/公里 (cm/km)。

- 3.6. 水準儀 (rod and level)：測量上用於測定遠距離點與水準線高度的儀器。
- 3.7. 步進式平坦儀 (walking profiler)：係指透過人力步行方式推進，並利用量測臂以固定間距連續量測鋪面縱向剖面。
- 3.8. 交叉相關 (cross correlation)：旨在了解兩組連續訊號之間的相關程度，透過交叉相關分析後所得之值為交叉相關係數。
- 3.9. 資料間距 (report interval)：量測路段內，慣性式剖面儀或參考剖面儀器每輸出一筆高程資料之距離間隔。
- 3.10. IRI濾波 (IRI filter)：為計算IRI值之濾波方式，包含25公分移動平均及各波段權重分配之濾波，利用高程之斜率取代高程值。

4. 儀器設備

- 4.1. 慣性式剖面儀檢測設備包括：加速度規、位移感測器、距離感測器、車輛、儲存設備及電腦分析軟體。
- 4.2. 慣性式剖面儀各項檢測設備（電腦分析軟體除外）之功能及要求標準，遵照「CNS 15046 慣性剖面儀量測鋪面縱向剖面試驗法」中具體規範之規格及功能。
- 4.3. 電腦分析軟體需求：用以分析量測高程剖面資料之軟體，須能讀取儲存於電腦之感測器量測數據，並透過正確之計算邏輯（包括濾波及IRI值計算公式），將感測器量測之數據轉換為高程剖面資料，最後輸出各次量測高程資料及IRI值。

5. 校正程序

- 5.1. 慣性式剖面儀檢測設備進行認證程序前，須先完成感測器之個別校正，包括：加速度規、位移感測器及距離感測器之校正。
- 5.2. 加速度規校正：加速度規須送回原廠進行校正，或由經過認證之相關校正實驗室進行加速度規校正。無論採用何種方式，當誤差大於允許

的程度時應不被接受。

5.3. 位移感測器校正：位移感測器校正須利用精密塊規進行測試，此校正程序必須於一平坦之鋪面上進行，且測試過程中，應盡量避免慣性式剖面儀因環境或人為因素而產生晃動。

5.3.1. 先於感測器下方置放一平板，量測10次並計算平板平均值；接著分別置放標稱厚度為6 mm、12.5 mm、25 mm及50 mm之塊規，並各自量測10次，計算各塊規每一次量測值與平板平均值之差值，此差值即為塊規量測厚度；最後計算各塊規每一次量測厚度與標稱厚度之絕對差值，各塊規絕對差值之平均值皆不可大於0.25 mm。

5.3.2. 至少須各自量測25 mm及50 mm之塊規10次，當兩塊規絕對差值之平均值大於0.25 mm，則須量測上述四種規格之塊規；而當任一規格塊規於量測後未達規範值，則位移感測器之校正結果不被接受，無法進行儀器或軟體認證。

5.4. 距離感測器校正：距離感測器應於已知距離之直線段進行校正，此已知距離應大於160 m，須重複量測該距離，直至連續3次之量測距離與已知距離之誤差平均值不超過0.1%，方可接受。上述校正程序應採用車輛行駛速度30 km/hr至40 km/hr進行量測。

5.5. 校正報告書：各感測器進行校正後，須附上各感測器之校正結果報告書等證明文件。

5.6. 感測器記錄本：慣性式剖面儀檢測設備於每次儀器設備維修、零件置換或軟體版本升級等後，皆須紀錄其項目、日期及變更內容，並於提出認證時檢附。

6. 訊號處理

6.1. 將加速度規與位移感測器量測之數據計算為高程剖面資料，並以距離

感測器之數值將高程剖面資料處理為行駛距離之函數，濾波器之高通濾波門檻為60 m，低通濾波門檻為0.5 m，以完整保留該波長範圍之訊號組成，方可進行後續指標計算與應用。

6.2. 進行濾波後之訊號，經由軟體計算其高程及IRI值，方可進行儀器或軟體之認證比對。

7. 試驗區段

7.1. 試驗區段之距離大於 160 m，須為一筆直路段且有適當之加、減速區域，並應避免明顯的縱向及橫向坡度變化。

7.2. 為達到認證執行之穩定性，試驗區段 IRI 值應不可大於 2.5 m/km。

7.3. 當準備進行試驗區段之量測時，操作員應熟悉該區段之起點、終點、及任何須識別之特殊路況。如果系統可自動辨識路況，操作員應在特殊路況地點放置適當標記以供辨識，且輪跡線(或其他欲進行量測之測線)及區段起、終點應有適當標記，以確保正確之量測位置。

7.4. 量測前應確實清掃試驗區段，以確保試驗區段量測輪跡線上無異物殘留。

8. 認證

8.1. 認證內容包括儀器認證、軟體認證及人員認證。

8.2. 參考剖面可用水準儀或步進式平坦儀建立之。

8.2.1. 以水準儀建立參考剖面須依據 AASHTO R40 之規範建立之，若儀器最大水平量測間距與資料輸出間距小於 7 cm，且最小垂直量測解析度小於 0.25 mm，則可不受此限。

8.2.2. 以步進式平坦儀建立參考剖面，則須事先以水準儀進行校正，水準儀之間距為步進式平坦儀間距之倍數；並須移動步進式平坦儀之起點重複進行數次量測，以獲取較小之間距。

8.2.3. 儀器於試驗區段上以同一路徑與方向重複進行 3 次高程剖面之量測，且須以 8.6.1 高程剖面交叉相關性比對其重現性，此 3 次高程剖面可得 3 個交叉相關係數，其平均值不可小於

0.92；取 3 次高程剖面各相同高程點位之平均值作為參考剖面，透過公認軟體（例如：ProVAL）計算參考剖面之 IRI 值，此值即為軟體認證之參考值。

8.3. 為進行比對，慣性式剖面儀每一個量測車行表面之長度、量測之指定位置點數、及每一個測點之量測次數均應保持固定。

- (1) 進行試驗之剖面長度應為 160 m，並以 25 cm 資料間距為一點位進行計算。
- (2) 須重複執行 12 次試驗，其車速應介於 30 km/hr 至 40 km/hr 之間。
- (3) 轉換參考剖面資料間距，使其與量測剖面資料間距相同。
- (4) 進行重現性或準確性等評估時，任何會影響量測過程之獨立變數皆應嚴格控制。
- (5) 選擇橫向剖面變化較小之處進行量測，以降低縱向剖面量測之變異。
- (6) 為確保重複試驗皆在同一路徑上執行，須嚴格控制車行表面縱剖面量測時之縱向位置，並可藉由自動位置標記方式提高量測路徑一致性。

8.4. 儀器認證：可由高程剖面交叉相關性比對進行，其評估結果以重現性及準確性來表示。

8.4.1. 高程剖面交叉相關性分析步驟如下：

- (1) 針對 12 次量測剖面及參考剖面，利用 ProVAL 或其他分析軟體進行 IRI 濾波及後續交叉相關性分析。
- (2) 轉換後之量測剖面得進行水平位移，使其與參考剖面重合，但前後最大水平位移量不可大於 0.9 m。

8.4.2. 重現性：12 次量測剖面經過 IRI 濾波後，將各量測剖面與其他 11 次量測剖面進行交叉相關分析，並得各量測剖面與其他 11 次量測剖面之交互相關係數平均值，去除平均值最小之 2 次量測剖面；針對 10 次量測剖面共可得 45 個交叉相關係數，其平均值不得小於 0.92。

8.4.3. 準確性：將 8.4.1.2. 中 10 次量測剖面與參考剖面進行交叉相關分析，共可得 10 個交叉相關係數，其平均值不得小於 0.90。

8.5. 軟體認證：為驗證軟體計算 IRI 值之能力，其評估結果以重現性及準確性來表示。

8.5.1. 重現性：利用檢測設備之分析軟體，計算 10 次量測剖面之 IRI 值，並計算 10 次 IRI 值之變異係數，其值不可大於 3%。

8.5.2. 準確性：利用檢測設備之分析軟體，計算 10 次量測剖面之 IRI 值，並與參考值進行比對。計算 10 次量測剖面之 IRI 值與參考值之絕對差值，取 10 次絕對差值之平均值再除以參考值，其值不可大於 5%。

8.6. 人員認證：使用慣性式剖面儀來執行鋪面平坦度評估之人員，必須獲得儀器操作及平坦度相關知識，並通過人員認證程序。

8.6.1. 於進行人員認證程序前，操作人員須具備之相關知識包括：

- (1) 平坦度之定義及其計算方式。
- (2) 慣性式剖面儀之原理及操作方式。
- (3) 高程剖面資料儲存及擷取。
- (4) 利用分析軟體計算 IRI 值。
- (5) 影響量測之各項誤差來源。

8.6.2. 人員認證程序：人員認證程序包括筆試認證與操作認證。申請者須先通過筆試認證，方可進行操作認證，筆試內容包含 8.6.1 之項目。申請者進行操作認證時，須自備慣性式剖面儀，操作認證過程之評估項目包括：

- (1) 完成檢測設備之架設並進行事前確認。
- (2) 駕駛車輛之穩定性。
- (3) 操作軟體之正確性及資料判讀能力。
- (4) 計算量測剖面之 IRI 值。

8.6.3. 申請者完成筆試認證及操作認證，且儀器與軟體認證皆通過後，方可通過人員認證程序。

8.6.4. 筆試認證之有效期限為四年，操作認證之有效期限為一年。

8.6.5. 成功通過人員認證程序之申請者，認證機構將核發人員證明書乙份，其上須標示通過某特定廠牌或型號之慣性式剖面儀認證，其有效期限為一年。

9. 認證報告

- 9.1. 日期與時間。
- 9.2. 試驗編號。
- 9.3. 操作人員資料及車輛證明文件。
- 9.4. 天候狀況。
- 9.5. 試驗區段位置及路面描述。
- 9.6. 量測速度與方向。
- 9.7. 各感測器校正結果，包括：加速度規、位移感測器、距離感測器。
- 9.8. 儀器認證結果，包括交叉相關性分析之重現性、準確性及通過與否。
- 9.9. 軟體認證結果，包括檢測設備分析軟體之重現性、準確性及通過與否。
- 9.10. 整體儀器認證通過與否及建議改善項目。

10. 引用標準

- 10.1. “Standard Practice for Certification of Inertial Profiling Systems,” AASHTO PP 49-07, 2007
- 10.2. “Standard Practice for Operating Inertial Profilers and Evaluating Pavement Profiles,” AASHTO PP 50-07, 2007
- 10.3. “Standard Practice for Measuring Pavement Profile Using a Rod and Level,” AASHTO R40-05, 2007
- 10.4. “Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference,” ASTM E950, 2004
- 10.5. Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas, “The Little Book of Profiling”, 1998
- 10.6. Alexander J. Austerman, Walaa S. Mogawer, Matthew Turo, “Massachusetts Inertial Profiler Certification Utilizing AASHTO Specifications and Cross Correlation,” Transportation Research Board, 2007
- 10.7. 經濟部標準檢驗局，「CNS 15046 慣性剖面儀量測鋪面縱向剖面試驗法」，中華民國國家標準，民國 95 年 12 月

附件二

慣性式平坦儀人員教育訓練教材

章節目錄

第一章 人員教育訓練教材簡介	1
1.1 人員教育訓練目標	1
1.2 教材內容範圍	1
第二章 鋪面平坦度及剖面量測	3
2.1 鋪面平坦度簡介	3
2.2 剖面量測	3
2.3 平坦度指標原理及特色	4
2.3.1 縱剖面指標 (Profile Index, PI)	4
2.3.2 國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI)	6
2.3.3 行駛指數(Ride Number, RN)	10
第三章 鋪面量測儀器介紹	12
3.1 簡介	12
3.2 剖面式平坦儀 (Profilograph)	12
3.3 反應式平坦儀 (Response-Type Road Roughness Measuring Systems)	15
3.4 步進式平坦儀 (Walking Profiler)	16
3.5 慣性式平坦儀 (Inertial profiler)	17
3.6 自動水準儀 (Auto Rod and Level, AR&L)	22
3.7 國內使用平坦度檢測儀器之現況	24
第四章 慣性式平坦儀認證程序	26
4.1 認證程序概述	26
4.2 室內單一設備校正	27
4.3 室外校正及試驗流程	28
4.4 設備與人員認證評估	29
第五章 影響慣性式平坦儀量測之鋪面及環境因素	31
5.1 簡介	31
5.2 鋪面因素	31
5.3 環境因素	32
第六章 影響慣性式平坦儀剖面量測之設備因素	35
6.1 簡介	35
6.2 位移感測器	35
6.3 加速度規	38
6.4 距離感測器	38
第七章 影響慣性式平坦儀剖面量測之人為因素	40
7.1 簡介	40
7.2 事前確認	40

7.3 檢測速度.....	41
7.4 速度變化.....	41
7.5 加速區.....	42
7.6 資料擷取起始位置.....	43
7.7 橫向位移.....	44
7.8 檢測過程確認.....	44
第八章 訊號處理過程	45
8.1 基本訊號定義.....	45
8.2 濾波.....	46
8.3 訊號處理流程.....	47
參考文獻.....	48



表目錄

表 2.3.1	行駛指數與路面行車品質[3]	11
表 3.7.1	我國現行完工道路鋪面平坦度檢測儀器及規範彙整	25
表 6.2.1	位移感測器垂直測距之解析度[14]	36



圖目錄

圖 2.2.1	剖面示意圖[2].....	3
圖 2.3.1	四分車模型[3].....	7
圖 2.3.2	國際糙度指標於柔性鋪面之評估[3].....	7
圖 2.3.3	IRI 四分車濾波器的波數反應圖[3].....	9
圖 3.2.1	三米直規構造圖[9].....	13
圖 3.2.2	高低平坦儀[9]	13
圖 3.2.3	加州平坦儀示意圖[9]	14
圖 3.2.4	Rainhart 平坦儀示意圖[9]	14
圖 3.3.1	梅氏儀外觀[9]	15
圖 3.3.2	BPR 平坦儀示意圖[9]	16
圖 3.4.1	步進式平坦儀[9]	17
圖 3.5.1	ARAN 道路檢測車[9].....	18
圖 3.5.2	南達科達州縱剖面量測系統[9]	18
圖 3.5.3	ARRB 雷射平坦儀(後保險桿) [9]	19
圖 3.5.4	ARRB 雷射平坦儀(前保險桿) [9]	19
圖 3.5.5	系統架構[9]	20
圖 3.5.6	感測箱內部構造[9]	20
圖 3.5.7	儀器外部架構[9]	20
圖 3.5.8	Dynatest/KJL T6400 輕量型平坦儀[9].....	21
圖 3.5.9	輕量型平坦儀[9]	21
圖 3.5.10	代步車式輕型平坦儀[9]	22
圖 3.6.1	雷射發射器及三角架.....	23
圖 3.6.2	AR&L 推車.....	23
圖 3.6.3	儀器組成及基本操作.....	24
圖 4.1.1	慣性式平坦儀認證程序圖.....	26
圖 5.2.1	橫向加速度[13].....	32
圖 5.3.1	鋪面積水對於剖面量測之影響[12].....	33
圖 5.3.2	鋪面異物之影響[12].....	34
圖 6.2.1	雷射位移感測器原理[12].....	36
圖 6.2.2	失真現象[12].....	37
圖 6.4.1	距離感測器誤差[12].....	39
圖 7.4.1	減速對剖面量測之影響[13].....	42
圖 7.4.2	加速對剖面量測之影響[13].....	42
圖 7.5.1	加速區對剖面量測之影響[13].....	43
圖 7.6.1	起始位置偏移[13].....	44
圖 8.1.1	波示意圖.....	46

第一章 人員教育訓練教材簡介

1.1 人員教育訓練目標

人員教育訓練目標在於培養政府與民間檢測單位之主管與操作者對慣性式平坦儀具有正確認知，並能正確使用儀器進行施工驗收及例行性檢測。藉由完整且詳盡之室內課程安排，可使參與課程之操作人員能對慣性式平坦儀檢測原理、平坦度指標、認證程序及各種影響認證之誤差因素等，能有全盤且深入之了解。再者，透過室外實驗道路之訓練，協助設備操作人員模擬認證程序，並配合專業人員從旁講授，藉此提昇操作人員之穩定性，培養實際檢測之正確進行流程及相關注意事項。本課程旨在強化慣性式平坦儀操作人員之正確認知及理論基礎，在場地及設備允許下，如能配合操作人員實務訓練，對於提升國內公共工程之驗收水準將有莫大助益。



1.2 教材內容範圍

本教材內容範圍涵蓋平坦度指標、各種剖面量測儀器、認證程序、影響慣性式平坦儀量測之環境、設備及人為誤差因素與訊號處理。

本教材第二章概述鋪面平坦度及剖面量測，並且說明縱剖面指標、國際糙度指標及行駛指數之原理與其特色。第三章介紹國際常用之平坦度量測儀器，包括剖面式平坦儀、反應式平坦儀、步進式平坦儀、慣性式平坦儀及自動水準儀，並說明目前國內各工程單位使用平坦度檢測儀器之現況。第四章說明慣性式平坦儀認證程序，包含室內單一零組件校正流程、室外零組件校正流程、室外試驗及評估項目。第五章則探討影響慣性式平坦儀量測之鋪面及環境因素，分別說明誤差產生之原因及對於量測結果之影響。第六章探討影響慣性式平坦儀量測之設備因素，分別針對不同類型之感測器、環境改變及使用時機探討誤差產生之原因及對於量測結果之影響。第七章探討影響慣性式平坦儀量測之人為操作因素，說明操作人員於事前確認、檢測速度、速度變化控制、加速區、資料擷取起始位置、橫向位

移及檢測過程確認各項中，可能產生誤差之原因及其影響，以期增加量測之穩定性，並降低人為誤差之影響。除設備操作與基礎概念外，在進行量測結果之判讀與路況評估時，量測資料需透過平坦度指標之轉換，以方便進行路段之平坦度評估，因此，操作人員對於資料處理需具備相關之知識，於本教材第八章概述量測訊號處理之過程，包括訊號基本概念及濾波方式簡介，協助資料分析人員正確的判讀量測結果。



第二章 鋪面平坦度及剖面量測

2.1 鋪面平坦度簡介

鋪面平坦度主要受鋪面材料、施工品質、交通量及外在環境等影響，而當鋪面平坦度不佳時，駕駛者與乘客將會產生不適之感受。依據 ASTM E867 “Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems” 規範[1]，將鋪面平坦度定義為「道路表面脫離純粹平面之偏差量，具有影響車輛動態狀況、行駛品質、動態鋪面荷重及鋪面排水之特徵尺度」。現今加拿大、美國及歐洲國家最常引用作為平坦度評估驗收標準的指標，以縱剖面指標(Profile Index, PI)、國際糙度指標(International Roughness Index, IRI)及行駛指數(Ride Number, RN)為主，其中又以國際糙度指標(IRI)較為廣泛使用。以下 2.2 節將說明剖面量測之基本概念，而於 2.3 小節將說明縱剖面指標、國際平坦度指標與行駛指數在使用上之優缺點。

2.2 剖面量測[2]

道路剖面用以表示道路表面連續起伏之狀態，於不同路徑所量測到之道路剖面也都不相同，如圖 2.2.1 所示。平行於道路方向的道路剖面稱為縱剖面(Longitudinal Profile)，而垂直於道路方向的道路剖面則稱為橫剖面(Lateral profile)。剖面並非必為直線，道路如果為一彎曲路段，則所量測之剖面則為曲線剖面。

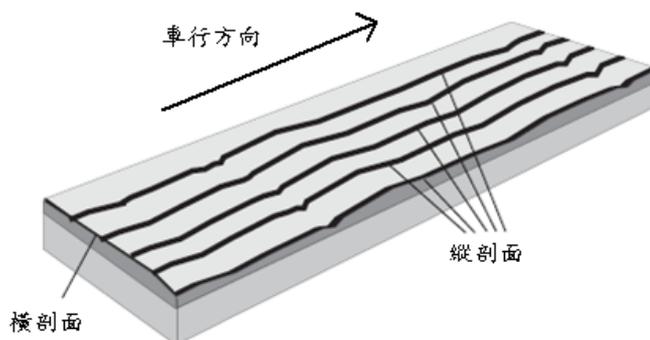


圖 2.2.1 剖面示意圖[2]

一般而言，道路量測以縱剖面為主，由縱剖面資料可得知道路的坡度、平坦度及紋理等特性，也可經由運算得出鋪面平坦度相關指標。一般進行道路縱剖面量測時，測線多以輪軌跡處為主，可採單輪或雙輪軌跡進行，若是進一步評估道路車轍之情況，則需要於同一路段量測多條各自平行的縱剖面，才可以評估道路橫剖面凹陷起伏之情況。

量測縱剖面之主要功能為：

1. 於鋪面管理系統中扮演監督道路使用狀況的角色。
2. 評估新建道路及修復後之道路品質。
3. 診斷特定路段之鋪面狀況及選定適合之修復工程。
4. 深入了解特定路段之鋪面狀況，以供學術研究使用。

2.3 平坦度指標原理及特色

2.3.1 縱剖面指標 (Profile Index, PI) [3]

縱剖面指標(Profile Index, PI)於國外較常用於新工道路之平坦度驗證，此一指標乃利用剖面式平坦儀為量測儀器，在道路鋪面平均雙輪軌跡上，於檢測範圍內量測並計算中央覆蓋帶上下起伏特殊高凸或下凹區域所累積之總扇形離差數，於 ASTM E1274[] 中訂有完整檢測之方法。

縱剖面指標之使用以美國及加拿大最為廣泛且較具成效，但多利用於新工道路鋪面以評估其平坦度之水準，如美國的加州、密西根州、北卡羅來納州、印第安納州、俄亥俄州、伊利諾州、北達克塔州、明尼蘇打州及奧勒岡州等；而加拿大部分，則於英屬哥倫比亞、亞柏達、薩克斯其萬省等地區皆有使用縱剖面指標。然而這些地區量測鋪面之縱剖面指標時，所使用之量測儀器並不完全相同，而以美國加州平坦儀所量測之方法及計算過程最具代表性，並將在 3.2 節中進一步介紹其量測方法。

縱剖面指標具有下列優點：

1. 適於新工、使用中或加鋪完成後路段檢測之用

本指標之量測儀器以往需以較慢之人類步行速度，才能進行檢測工作，但因近年來演變，已研發出可裝設於車上之新型儀器，故適用於新工、使用中或加鋪完成後之路段檢測。目前美、加兩國廣泛採用 PI 指標為新工完成道路之檢測標準。

2. 與用路人感受具有相關性

因剖面式平坦儀並非真正均保持在水平位置，若路面的高低起伏之波長恰等於縱剖面式儀器框架長度之整倍數正弦波，則描繪剖面圖上將不會感受到這種路面的起伏情況。但因用路人對於此波動反應較不敏感，故剖面式平坦儀求得的之 PI 值與一般用路人的感受亦有良好之相關性。

3. 可判斷異常凹凸點

由於 PI 值係以鋪面實際起伏計算而得，故可用於異常單點之判斷與位置之確認，反應真實路面，且於新工道路驗收時，可由檢測結果之高程異常點位置，進行局部的修補與刨平，以提升道路之平坦度狀況。

4. 不受初始距離影響

PI 值之計算不須建立初始值，路段中任一點量測結果皆納入評估，因此不受檢測路段長度限制，可應用於小規模鋪面工程之平坦度評估。於國外新工道路驗收時，通常於每日鋪設完工後立即進行檢測，所以一個工作天的檢驗路段並不會太長，且若有局部小範圍的鋪設，以 PI 指標進行量測更具經濟效益。

除前述優點外，縱剖面指標有以下缺點：

1. 對於不同使用者而言可能存在明顯差異

PI 值之計算受到所採用的比例尺大小、計算用的中央覆蓋帶寬度、計算單位區段長度等因素影響，而使計算值呈現不同結果。因此使用時必須將以上變動因素採統一標準，例如指定平坦儀器型態、固定比例尺、固定的中央覆蓋帶寬度

等，PI 值於計算時才具備穩定性。

2. 無適當之標準值以為評斷依據

目前並無適當之 PI 標準值，以為評斷道路平坦度等級之依據。

2.3.2 國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI)

由於透過道路平坦度之檢測結果，可探究其鋪面之特性、反應使用者舒適程度、鋪面養護成本及鋪面壽齡等，故平坦度檢測需求與日俱增。隨著科技進步，世界各國已從原始人工尺規抽樣檢測到利用電腦化之儀器規模連續檢測，於期間陸續發展出各式各樣的平坦度量測儀器，而不同儀器所輸出之指標也因計算原理之差異而有所不同，有些指標無法與其他指標進行轉換，或無法隨時間增加而有相同的檢測穩定性，將導致鋪面養護管理缺乏公平、統一之標準。因此於 1982 年，世界銀行首先於巴西嘗試建立國際性通用之平坦度指標，著手進行國際糙度試驗 (International Road Roughness Experiment, IREE) [5] 之研究，而所發展出之指標即為國際糙度指標 (IRI)。

國際糙度試驗 (International Road Roughness Experiment, IREE) 參與之研究機構包括巴西運輸規劃局、巴西公路研究所、英國運輸與道路研究實驗室、美國密西根大學運輸研究所及比利時道路研究中心等。試驗區段總計有 49 處，其中包含瀝青混凝土、表面處理、礫石及泥土四種鋪面，分別使用不同形式之平坦度量測儀器，包括人工操作之平坦儀、反應式平坦儀、慣性式平坦儀及主觀評分進行平坦度之量測，在擷取所有量測資料後，進一步分析其結果，最後推導出符合時間軸上具穩定性 (time-stable)、不同指標之間可移轉性 (transportable)、顯著且具代表性 (relevant) 及具效力性 (valid) 四項準則之國際糙度指標[6]。

國際糙度指標之原理詳述於 ASTM E1170-92[7]，運用電腦模擬四分車於 80 km/hr 下之車體運動量及加速度之反應方程式。四分車顧名思義意指一車輛四個輪子中單一車輪之機械系統裝置，用以模擬乘車時之反應，該裝置包含垂直彈簧

(用以表示輪胎)、以輪胎支撐車軸質量、懸吊彈簧與阻尼，以及輪胎懸吊系統支撐車體質量，如圖 2.3.1 所示。第一階段量測行駛中車輛之非彈性車體與彈性車體互相之累積運動量距離與該檢測之距離比值，其紀錄單位為公尺/公里 (m/km)；第二階段則量測車體之加速度，用於評估行車過程中之品質。一般而言，鋪面平坦度 IRI 值範圍可由最平坦 0 m/km 到最粗糙 20 m/km，圖 2.3.2 顯示國際糙度指標在不同範圍內其柔性鋪面之可能狀況[3]。

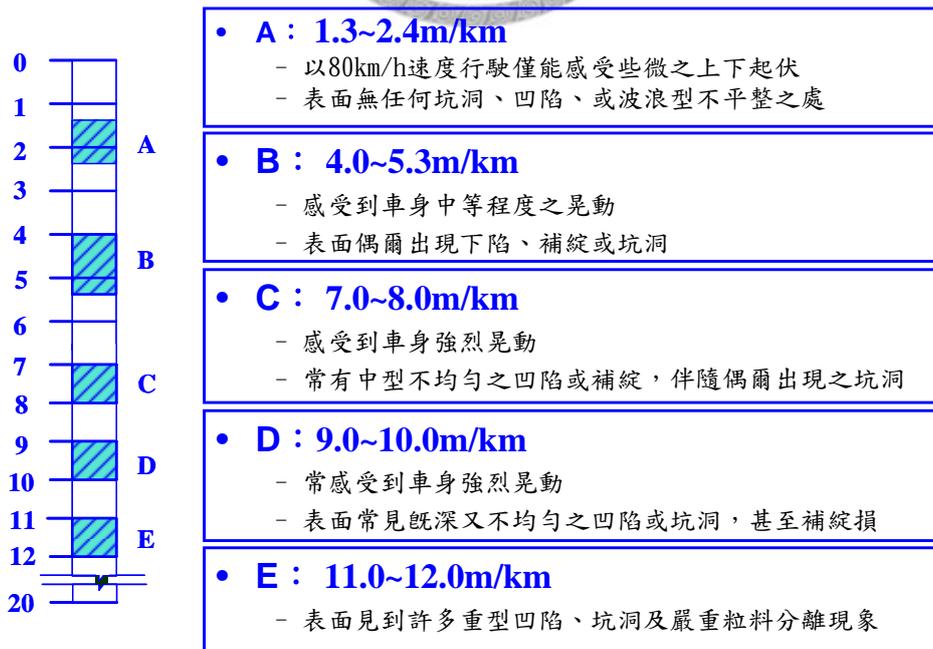
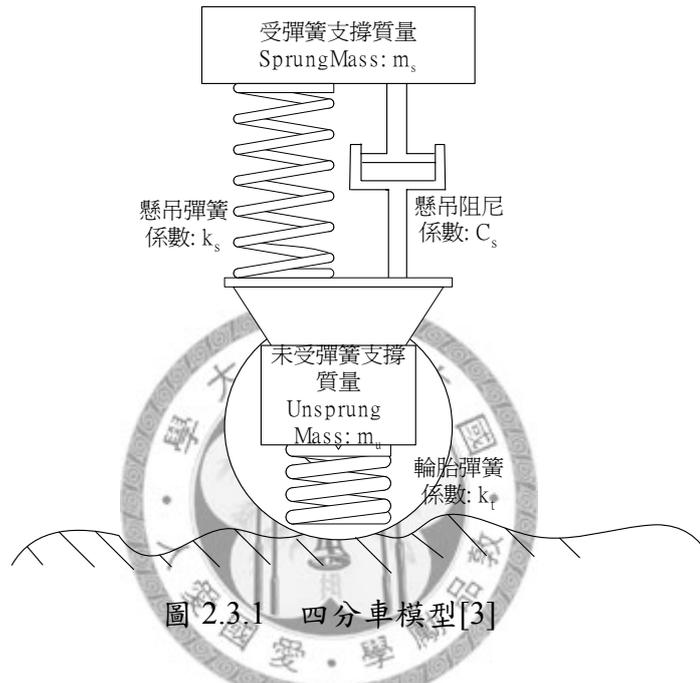


圖 2.3.2 國際糙度指標於柔性鋪面之評估圖[3]

國際糙度指標為目前廣泛運用於各種儀器之平坦度指標，且該指標也被美國材料試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)與美國州公路暨運輸官員協會(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)納入其規範之中，且國際糙度指標也被世界許多國家之道路主管機構廣為採用。其指標具有以下優點：[3]

1. 與大部分車型受震動時之反應變數具有相關性

IRI 值是以四分車模擬，利用車輛行駛時之振動情形表示路面之變化，計算而得平坦度結果；其資料呈現結果非常相似於一般車輛行駛於公路時的真實情況。因 IRI 對於大部分車型受震動時之反應變數有很大的相關性，尤其是其與路錶反應(具歷史資料連貫性)、乘客的垂直加速度感受(行駛品質)以及輪荷重(車輛的可控制性與安全性)具有高度相關性，遂使之成為一般公眾所認定的平坦度指標。

2. 對於平坦度的量測呈線性比例

亦即當平坦儀所測得的高程差，是以某固定百分比持續增加，則 IRI 也會依此相同比例持續增加；換言之，若高程差增加兩倍，IRI 也會增加兩倍。

3. 採用不同平坦度量測儀器亦有近乎相等之 IRI 值

IRI 值並非第一個平坦度指標，在它被提出之前已有許多不同的量測儀器與方法，且各國於量測平坦度時有其獨特的量測區間；綜合以上兩點因素，容易造成計算結果產生誤差。根據世界銀行所公佈的計算程式測試發現，若以 IRI 為平坦度指標，於計算平坦度量測結果時，有近乎相等之 IRI 值，因此其為第一個在空間軸上具移轉性、時間軸上具穩定性的平坦度指標。

4. 可考量波長為 3m 以上之各種波長對路面平坦度之影響

圖 2.3.3 為 IRI 四分車濾波器的波數反應圖，輸出正弦波的振幅等於輸入的

振幅再乘以圖 2.3.2 之得點數(無因次單位)。由圖 2.3.2 中可顯示波數接近 0.065 cycles/m(波長長度約 15.4 m)與 0.42 cycles/m(波長長度約 2.4 m)時,有最大的敏感度,人體會有最敏感的不舒適性產生。但因不舒適度介於 2.4 m 及 15.4 m 之間亦相當高,因此當使用三米直規或高低平坦儀作為量測平坦度驗收規範之工具,其僅只可量測到 3 m 內之道路平坦度變化,而忽略波長為 3m 以上之各種波長時用路者之感受,故採用 IRI 為平坦度評估指標,較可直接連續量測真實剖面之剖面行為。

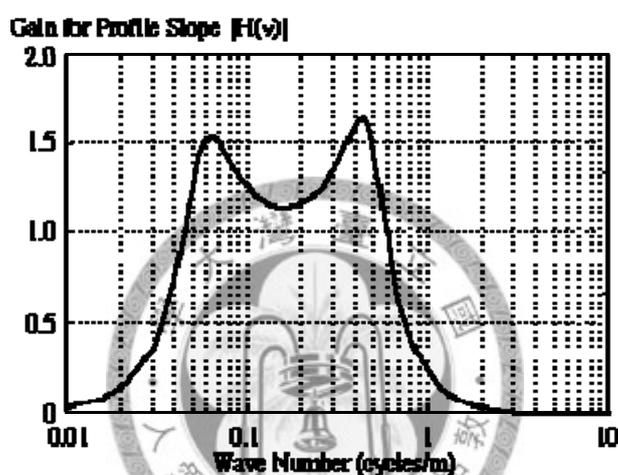


圖 2.3.3 IRI 四分車濾波器的波數反應圖[3]

5. 不受人為因素干擾

IRI 指標可運用數學資料客觀顯示鋪面特性,且可進行連續大量檢測,具檢測效率,更不會因體力、計算失誤等人為因素之干擾,導致對鋪面檢測實際狀況之影響。

6. 具有轉換性

IRI 是第一個廣泛使用於不同形式平坦儀的平坦度指標,各種形式之平坦度量測儀器均可以經由直接或間接計算方式,求得此指標之轉換值。

7. 可運用套裝程式軟體進行 IRI 值之計算

IRI 指標於國際間發展完善，世界銀行已公佈一套通用的 IRI 計算軟體，比其他傳統平坦度指標需以人工之方式評判，更符合經濟效益與代表性。

然而國際糙度指標仍有部分缺點，其缺點如下：[3]

1. 因初始值之需求，量測區段必須大於 11 m

根據世界銀行公佈程式，必須以前 11 m 的平均坡度為量測初始值，而此初始值對檢測前 11 m 的平均 IRI 值具有很大的影響。因此於 IRI 演算時，量測區段必須大於 11 m，所計算出之 IRI 值才具有代表意義。

2. 只針對單一的道路剖面

IRI 只針對單一的道路剖面進行計算，而非將同一路段上所有不同剖面加總平均。

3. 無法個別找出異常凹凸點

IRI 將道路剖面資料以平均值之方式計算而得，並無法找出單點高凸或凹陷區位。若要找出異常凹凸點，須個別算出路段上每一點之個別 IRI 值，並針對超過所訂門檻值之單點進行檢討，方可改善。



2.3.3 行駛指數(Ride Number, RN) [3]

行駛指數是一種與現今服務力指標(Present Serviceability Index, PSI)類似的指標，數字 0 到 5 之間是代表路面行駛品質，如果 RN=5，則表示此路段平坦度接近完美境界，反之若 RN=0，則表示此路面太過粗糙已到無法通行的地步，表 2.3.1 為 ASTM E1489-96[8]規範中行駛指數(RN)與路面行車品質。

行駛指數與 1960 年代的 AASHO 道路試驗發展的現今服務力指標(PSI)雷同，乃是請一群代表一般用路人的評分小組，以個人主觀的看法，對鋪面的服務力品質進行評分，評分後再將小組全體分數作平均(Mean Panel Ratings, MPR)，此平均分數即代表此路面的服務力。這種主觀的評分方式需耗費大量的人力與時

間，而且一般社會大眾容易受外在因素的影響而對於路面服務水準有所變動，因此只能在特殊情況下謹慎量測，不能當作經常性的例行檢測。代表用路人感覺的行駛指數 (RN) 即延續此觀念，於進行平坦度小組評分之同時，亦以慣性剖面式平坦儀量測檢測路段的高低起伏，再以數學模式將慣性式平坦儀測得的數據轉換成行駛指數 RN 值。

大部份路段之鋪面 RN 值介於 1.0 至 4.5 之間，但因 RN 值並非一個現性尺度，在互相比較時無法像 IRI 值可任意取其路段之平均值，意即若兩相連各一公里之路段，前一段之 RN 值為 3.0，而後一段之 RN 值為 4.0，若要以一個綜合的 RN 值代表此兩公里路段，其值並非 3.0 與 4.0 之平均值，尚需經過繁雜計算過程。

表 2.3.1 行駛指數與路面行車品質[3]

路面服務力水準	RN值
完美 (perfect)	4.5~5.0
非常好 (very good)	4.0~4.5
很好 (good)	3.0~4.0
普通 (fair)	2.0~3.0
不良 (poor)	1.0~2.0
很差 (very poor)	0.5~1.0
無法通行	0~0.5

第三章 鋪面量測儀器介紹

3.1 簡介

由於使用者對道路舒適度之感受無法具體由以口頭描述，或無法精確表達其鋪面平坦度之狀況，因此國內外各相關單位陸續開發新型式之平坦儀，以求能透過儀器正確量測鋪面情況，並由所量測到之資料進而求得平坦度指標，如此則可明確評定鋪面的優劣程度。本章介紹國際常用之平坦度量測儀器及國內使用狀況，其中平坦度量測儀器依據不同之量測原理，主要可分為剖面式平坦儀

(Profilograph)、反應式平坦儀 (Response-Type Road Roughness Measuring Systems, RTRRMSs)、步進式平坦儀 (walking profiler)、慣性式平坦儀 (Inertia Profiler) 及自動水準儀 (Auto Rod and Level, AR&L) 等，以下各小節將針對各類型平坦儀詳細介紹，且於章節最後統整國內目前相關工程單位所使用之設備。

3.2 剖面式平坦儀 (Profilograph) [9]

剖面式平坦儀之檢測原理，通常為直接量測鋪面的縱剖面變化情形，透過記錄輪或其他設備記錄路面高低起伏。以下對較具代表性之儀器，包括三米直規 (Straightedge)、高低平坦儀 (High-low detector)、加州平坦儀 (California Profilograph) 及 Rainhart 平坦儀 (Rainhart Profilograph)，進一步說明其使用方法及原理。

1. 三米直規 (Straightedge)

三米直規是以鋁合金或木材等材料製作而成，其兩端之同一面各附有一凸起的腳以站立於檢測路面上，兩凸腳之間相距 300 cm，直規中央處附有可用來標記與讀數之設備。此設備即是讀取中點路面與兩接觸點連線間高度差，凸腳應以耐磨損之金屬製造，其高度應可足以量測各種可能發生之最大高度差，直規兩端設有把手以供提送，其構造參考圖 3.2.1。

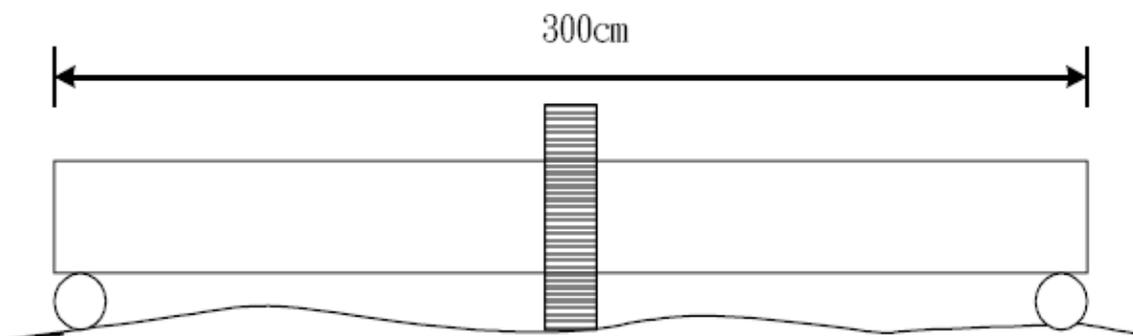


圖 3.2.1 三米直規構造圖[9]

2. 高低平坦儀 (High-low detector)

高低平坦儀因構造簡單與操作容易，仍廣泛使用於世界各地。其構造和指標計算與三米直規相似，不同處為將兩端凸腳改為滾輪，兩輪距仍為 3 m，中央設有一偵測輪，可隨路面高低而自由起降，經槓桿或齒輪原理將起降大小放大，以指針將所得之路面高低變化記錄於記錄器內，每隔 1.5 m 讀取高低值一筆，記錄最小單位可達 1 mm。回到試驗室後，由紙帶所記錄之三米高低平坦儀檢測軌跡圖上量取每隔 1.5 m 之高低差，求出高低值的標準差。檢測速度仍受到人力推動之影響，約等於步行速度，檢測儀器如圖 3.2.2 所示。

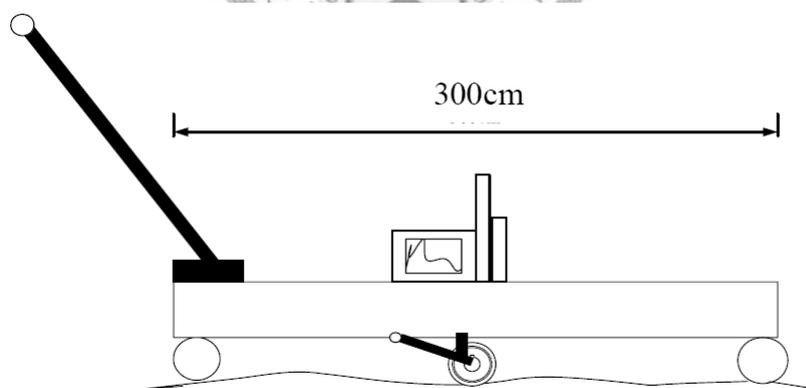


圖 3.2.2 高低平坦儀[9]

3. 加州平坦儀 (California Profilograph)

由於高低平坦儀與地面有三個接觸點，儀器放大特定波長之突起且忽略其他不平坦處，故需對儀器進行改良，即產生了加州平坦儀。加州平坦儀之構造原理與高低平坦儀相似，將高低平坦儀前後輪各以一組鉸式 (hinged) 連接輪代替，

如此可使外端多輪系統之銜接連線與鋪面頂基線保持平行，中央自動記錄輪即可真實記錄鋪面之縱向高低變化，用以計算縱剖面指標 PI，儀器構造如圖 3.2.3 所示。

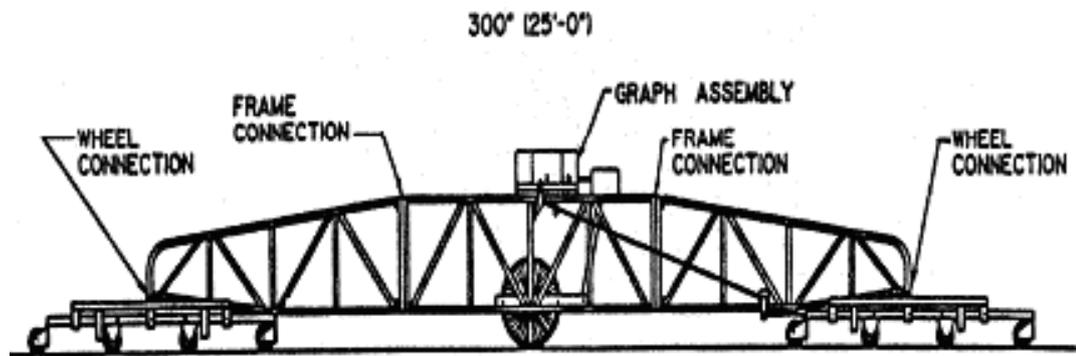


圖 3.2.3 加州平坦儀示意圖[9]

4. Rainhart 平坦儀 (Rainhart Profilograph)

Rainhart 平坦儀之操作方式與加州平坦儀相同，不同處為 Rainhart 平坦儀將 12 個支撐輪分於四處，每處 3 個支撐輪，如此可以保證每一輪前進時於分離的軌跡，儀器構造如圖 3.2.4 所示。

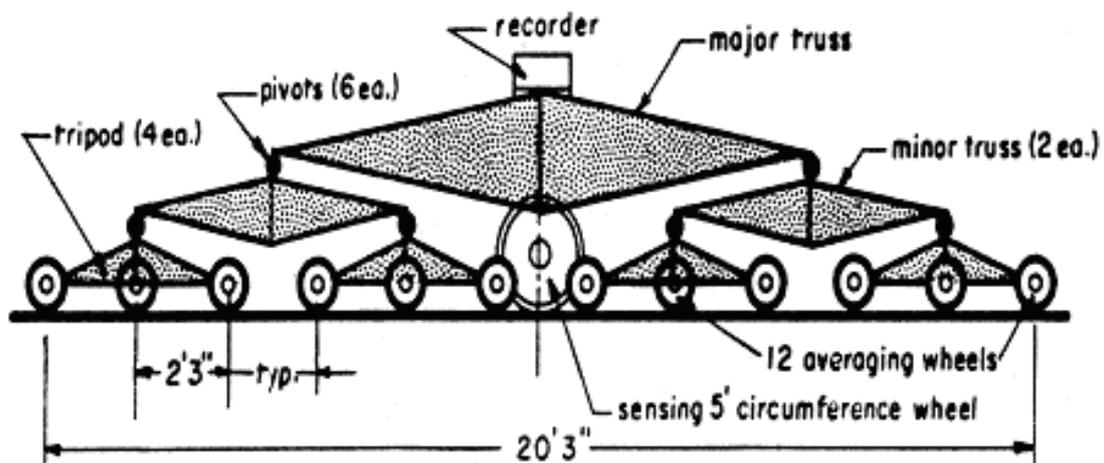


圖 3.2.4 Rainhart 平坦儀示意圖[9]

3.3 反應式平坦儀 (Response-Type Road Roughness

Measuring Systems) [9]

由於剖面式平坦儀檢測速度較為緩慢，於是發展出可以較高速度量測之反應式平坦儀。反應式平坦儀大致可分為兩種，一種是在車身或車軸裝設加速度規 (Accelerometer)，量測隨路面起伏而產生的垂向加速度變化，稱為加速度規式；另一種是在車身與輪軸間裝設量測相對變位的儀器，稱為機械式。這兩種都是量測車輛對路面輪廓變化的反應，而不是直接對路面輪廓進行量測，因此稱為反應式平坦儀。以下對較具代表性之儀器與其使用方法進行說明。

1. 梅氏儀 (Mays ride meter, MRM)

梅氏糙度儀為反應式平坦儀中最廣為使用的，其檢測原理為在車輛行駛過程中，紀錄車軸與車輛本身避震系統移動之累積量，得到的數值為梅式指標，以其數值高低評估調查路段平坦與否。儀器構造如圖 3.3.1 所示。



圖 3.3.1 梅氏儀外觀[8]

2. BPR 平坦儀 (Bureau of Public Roads roughometer)

此儀器是美國公路局所發展之標準單輪平坦儀，主要由一輛單輪拖車組成，通過機械式積分器記錄帶片彈簧車輪的總垂直位移量。其檢測速度通常為 32 km/hr。儀器構造如圖 3.3.2 所示。

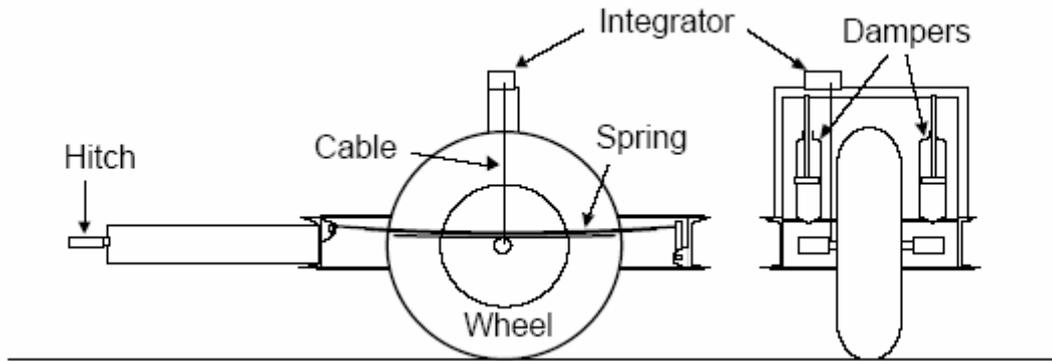


圖 3.3.2 BPR 平坦儀示意圖[9]

反應式平坦儀之優點為初置價格低廉、操作簡便，並可於正常車流速度下大範圍量測平坦度。但反應式平坦儀仍有部分限制與缺點：

1. 反應式平坦儀雖可明顯分辨道路好壞，但數值精確度不足以為工程師所接受。
2. 懸吊系統特性與車上載重、油料多寡、乘客人數、胎壓及量測時行車速度等皆會影響所測得平坦度數值。
3. 量測車輛動態反應，並非路面真實剖面資料，重現性較差。
4. 儀器必須時常進行校正工作，以確保資料具良好準確度。

3.4 步進式平坦儀 (Walking Profiler) [9]

步進式平坦儀為澳洲道路研究委員會 (Australia Road Research Board, ARRB) 所生產，如圖 3.4.1 所示。該儀器之量測原理與其他各類平坦儀不盡相同，檢測時需以人力推動，每小時前進速度大約可達 0.8 km/hr，量測方式為利用量測臂沿行走之路面循環連續量測路面高程，每 24.4 cm 記錄一筆路面高程資料，並自動累加產生路面縱剖面相對高程輸出值，系統輸出資料則包含 IRI 值與相對點位之真實高程剖面。其系統之高程量測誤差小於 0.01 mm，每 50 m 之剖面資料量測誤差則小於 1.0 mm；由於具備高重現性，誤差較小，經常應用於與新開發或其他類型平坦儀之剖面比對，以驗證其準確性。但步進式平坦儀的最大缺點為檢測速度緩慢，耗費時間，不適用於大規模的路段量測。



圖 3.4.1 步進式平坦儀[9]

3.5 慣性式平坦儀 (Inertial profiler) [9]

為改進反應式平坦儀之缺點，開發能快速且準確蒐集大量平坦度資料之儀器，慣性式平坦儀成為近年來之研發重點。此類儀器基本原理為利用加速度規積分後之車身垂直位移改變量，與雷射、超音波或紅外線測距儀所得之車身與鋪面的距離相加減，即可得所檢測之鋪面縱剖面斷面高程真值，以非以接觸之方式對路面輪廓進行直接量測。

1. ARAN 道路檢測車

ARAN 為加拿大 Roadware 公司所出產之全功能道路檢測車，如圖 3.5.1 所示。其設計為大型箱型車，車輛保險桿前方左右各裝設一組雷射感測器，用於檢測道面縱向剖面之起伏狀況。橫向車轍之檢測則由保險桿前方所裝設的 13 個超音波同時量測獲得。該車輛於車內設有攝影機及相關後端分析電腦儀器，可供攝影路權之用。亦可在車體後另裝設垂直向下之攝影機，以擷取鋪面表面之損壞影像，再以影像處理軟體或人工方式進行判讀。



圖 3.5.1 ARAN 道路檢測車[9]

2. 南達科達州縱剖面量測系統 (South Dakota profiling system)

南達科達州縱剖面量測系統是由車前保險桿兩輪軌跡處之加速規以及超音波距離量測器所組成，另裝設有三具超音波距離量測器用以量測車轍深度。南達科達縱剖面量測系統與其他慣性式平坦度儀最大差異處，在採用等時間差之方式擷取加速規數值，而非一般所採用之等距離方式擷取數值，將蒐集所得之數值對時間進行兩次積分，計算後得到各時間段之檢測車絕對高程資料，設備如圖 3.5.2 所示。南達科達州縱剖面量測系統採超音波距離量測器進行距離量測，其成本雖較低廉，但有下列缺點：

1. 超音波距離量測器於潮濕路面表面上可能產生訊號誤判。
2. 量測資料擷取間距大於雷射系統，資料重現性之表現不如雷射系統。
3. 超音波系統之訊號較易受外界溫度影響，若於溫度變化大之路段量測，對量測結果可能造成較大影響。
4. 超音波系統之量測精確度易受瀝青路面之粗質紋理特性影響。



圖 3.5.2 南達科達州縱剖面量測系統[9]

3. ARRB 雷射平坦儀

ARRB 採用多重雷射平坦儀 (multi-laser profiler) 為量測儀器，可裝設於車輛前面或後面之保險桿上，如圖 3.5.3 及 3.5.4 所示。若裝設三套或以上之雷射設備便可計算路面橫斷面之車轍值，而裝置更多之雷射設備則可更精確量測路面橫斷面之車轍，儀器檢測速度最高 110 km/hr，可供路網層級之路面檢測使用。



圖 3.5.3 ARRB 雷射平坦儀(後保險桿)[9]



圖 3.5.4 ARRB 雷射平坦儀(前保險桿)[9]

4. 台灣大學研發之雷射慣性式平坦儀

此雷射慣性式平坦儀為可拆卸式慣性式平坦儀，主要由加速度規與位移感測器所組成：加速度規用以量測車身垂直加速度，經過兩次積分後即可得車身垂直位移改變量，再與位移感測器所得之車身與鋪面間距離相加減，便能得到鋪面縱剖面高程數據；利用裝置於右前輪上的距離感測器，求得檢測距離與檢測行進速度，後將所有資料轉換為分析平坦度指標所需之資料格式，加以存檔管理。該平

坦儀之系統架構與感測箱內部構造、儀器外部架構如圖 3.5.5、圖 3.5.6 及圖 3.5.7 所示。

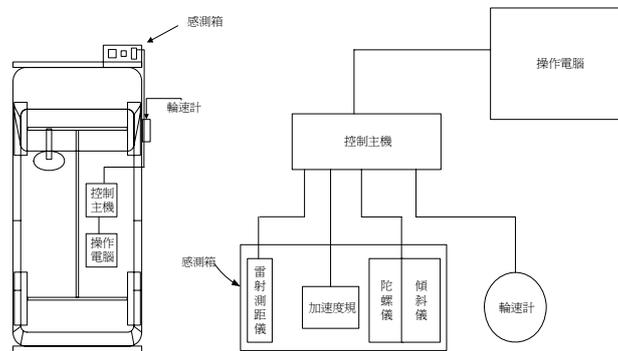


圖 3.5.5 系統架構[9]

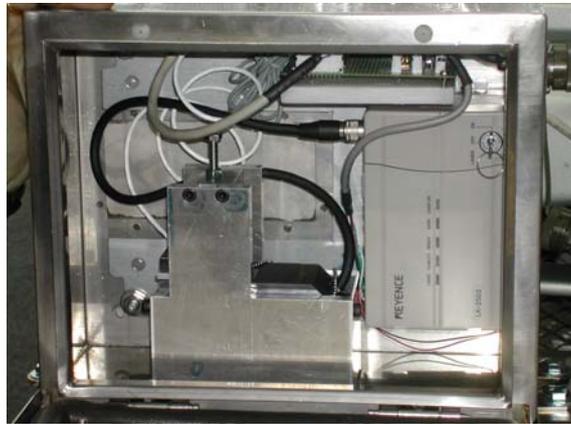


圖 3.5.6 感測箱內部構造[9]



圖 3.5.7 儀器外部架構[9]

5. 輕量型平坦儀 (lightweight profiler)

輕量型平坦儀其特點為以類似高爾夫球車之輕型車輛為載具，垂直位移檢測工具大多採用雷射感測器。此儀器檢測速度與使用之輕量車輛有關，大約為 6

km/hr~10km/hr 之間，目前以 Dynatest/KJL T6400 輕量型平坦儀與 SSI 輕量型平坦儀較為人熟之，如圖 3.5.8 及圖 3.5.9 所示。

另外，臺灣大學於民國94 年已完成研發一輕量型雷射慣性式平坦儀，如圖 3.5.10所示。此輕量型雷射慣性式平坦儀使用代步車作為檢測之車輛，加裝檢測設備後進行低速平坦度之檢測工作。此儀器之組成包含加速規與雷射距離量測器等，量測速度介於5km/hr~10km/hr之間，具有重量輕、攜帶方便、成本低之特色，且可準確量測鋪面剖面資料。



圖 3.5.8 Dynatest/KJL T6400 輕量型平坦儀[9]



圖 3.5.9 輕量型平坦儀[9]



圖 3.5.10 代步車式輕型平坦儀[9]

3.6 自動水準儀 (Auto Rod and Level, AR&L)

自動水準儀 (Auto Rod and Level, AR&L) 為 APR Consultants, Inc. 獨家設計、製造並銷售，從 1990 年代早期即開始發展，可以改善傳統水準儀 (Rod and Level, R&L) 量測速度較低的缺點，且數據擷取之精準度也提高，最精準可量測到 1 公厘之刻度。AR&L 為符合 ASTM E1364-95[10] 與 AASHTO R40[11] 規範中等級一之儀器規格。除此之外，AR&L 已被美國聯邦公路總署選為參考剖面量測儀之候選儀器，將被美國各州運輸部廣泛使用於認證程序中。該儀器協助 APR 公司開發之航機模擬軟體蒐集所需之鋪面剖面資料，由發展至今，APR 公司已利用 AR&L 檢測過許多機場之跑、滑道以及道路之鋪面剖面。其組成包含：

1. 兩組 360 度旋轉之紅外線雷射發射器以及三角架，如圖 3.6.1 所示。此一雷射發射器將雷射光束發射在會旋轉的鏡子上，因此，當鏡子旋轉時，可產生紅外線雷射光面。
2. 數位量測桅杆，用來偵測及追蹤紅外線雷射光線，並記錄相對於雷射發射器之高程變化。
3. 手提電腦，灌有 ToPoGraph 軟體用以紀錄及儲存高程資料點，並為操作者與

儀器溝通之介面。

4. 資料擷取系統，將數位量測桅杆所得資料傳送至手提電腦中。
5. 測距輪，此為啟動資料擷取之裝置，沿著輪子的圓周裝有固定間距之釘子，這些釘子可傳送訊號至資料擷取系統，使資料擷取系統讀取該時間點所量得之高程資料，並加到 ToPoGraph 軟體之高程資料表上。
6. AR&L 推車，裝有數位量測桅杆、手提電腦、資料擷取系統、測距輪、以及供電系統。如圖 3.6.2 所示。



圖 3.6.1 雷射發射器及三角架



圖 3.6.2 AR&L 推車

AR&L 之輸出資料為固定間距之高程點，可儲存於電腦中供相關軟體使用。儀器操作步驟如下，並如圖 3.6.3 所示：

1. 將雷射發射器放置在欲量測鋪面之任一端，並距離開始點 90 公尺至 120 公尺處。因此，當每一次雷射發射器放置妥當後，AR&L 推車可行走並量測 180 公

尺至 240 公尺之高程剖面資料。

- 當數位量測桅杆上的雷射接收器鎖定之後，儀器操作者即可推動 AR&L 推車，資料擷取系統將在測距儀每一個刻度計數處收集高程之讀值。操作者以一般行走速度推動 AR&L 推車，並注意需行走在直線上。當 AR&L 推車通過雷射發射器後，操作者需注意勿將自己置於推車及雷射發射器間，以免阻礙訊號接收。
- 當 AR&L 推車通過雷射發射器約即 90 公尺至 120 公尺時，即代表此一階段之剖面量測完成，需要重新進行雷射發射器之設定。此時將雷射發射器移動 180 公尺至 240 公尺至下一個放置地點，以進行下個高程剖面量測動作。

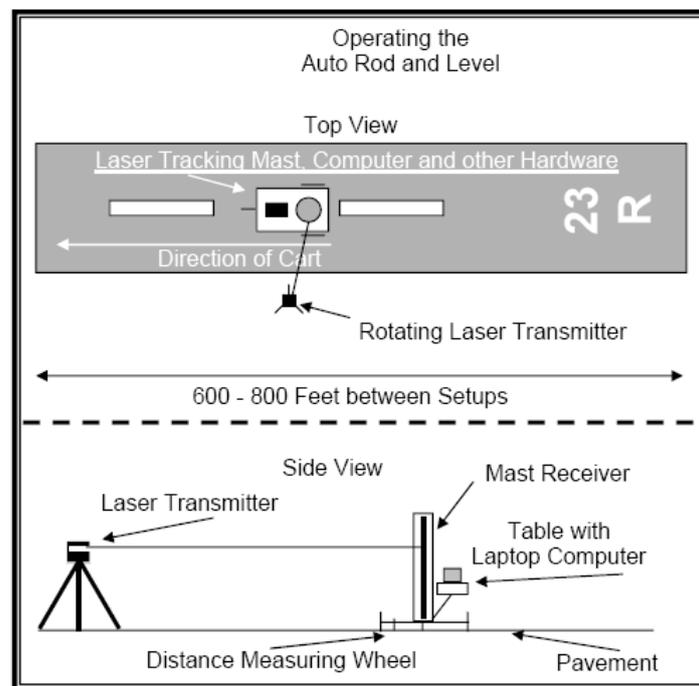


圖 3.6.3 儀器組成及基本操作

3.7 國內使用平坦度檢測儀器之現況

目前國內工程單位進行平坦度驗收時，大部分仍使用三米直規作為檢測儀器，量測單點高低差或計算平坦度標準差，由於耗費大量人力與時間進行檢測，多採抽樣檢測，以少數單點資料表達整體區段平坦度，但對於長距離之檢測，卻無法真實反映道路剖面。表 3.7.1 為國內現行完工道路鋪面平坦度檢測儀器及規範彙整表，近年來營建署、台北市新工處、台北市養工處已開始利用慣性平坦儀

進行新建或重鋪工程之平坦度檢測，並以國際糙度指標作為其評估規範。

表3.7.1 我國現行完工道路鋪面平坦度檢測儀器及規範彙整

單位	檢測儀器	參考指標或計算參數		適用工程
交通部	三米直規	高速公路	單點高低差	新建與重鋪
		一般公路		
國工局	三米直規	單點高低差		新建與重鋪
公路總局	三米直規	高速公路	平坦度標準差	新建與重鋪
	高低平坦儀	一般公路		
公共工程會	三米直規 慣性式平坦儀	高速公路	單點高低差、平坦度標準 差、國際糙度指標	新建與重鋪
		一般公路		
營建署	三米直規 慣性式平坦儀	單點高低差、國際糙度指標		新建與重鋪

第四章 慣性式平坦儀認證程序

4.1 認證程序概述

慣性式平坦儀設備及人員認證進行之程序如圖 4.1.1 所示，於相關單位提出申請後，先撰寫基本資料，包含使用單位名稱、操作人員資料、儀器製造日期、校估記錄、車輛登記記錄及設備規格記錄等，接著針對操作人員進行初步訪談，瞭解操作人員對檢測執行、設備安裝、檢查之步驟是否熟悉，並同時檢查檢測車輛車況，如胎壓、檢測儀器電路安排、設備置具安裝等。

確認操作人員與檢測車輛之設備後，由操作人員將檢測設備帶入認證中心，進行室內實驗室單一設備校正；完成室內實驗室校正流程後，接著進行距離感測器校正及慣性式平坦儀輸出數據重現性與準確性評估；待完成數據比對及評估，確認設備與人員皆符合標準後，由認證中心核發認證證明文件，若有評估項目未達標準，則認證中心提出建議執行評估改善策略，作為設備修繕、升級或人員技術加強之參考。

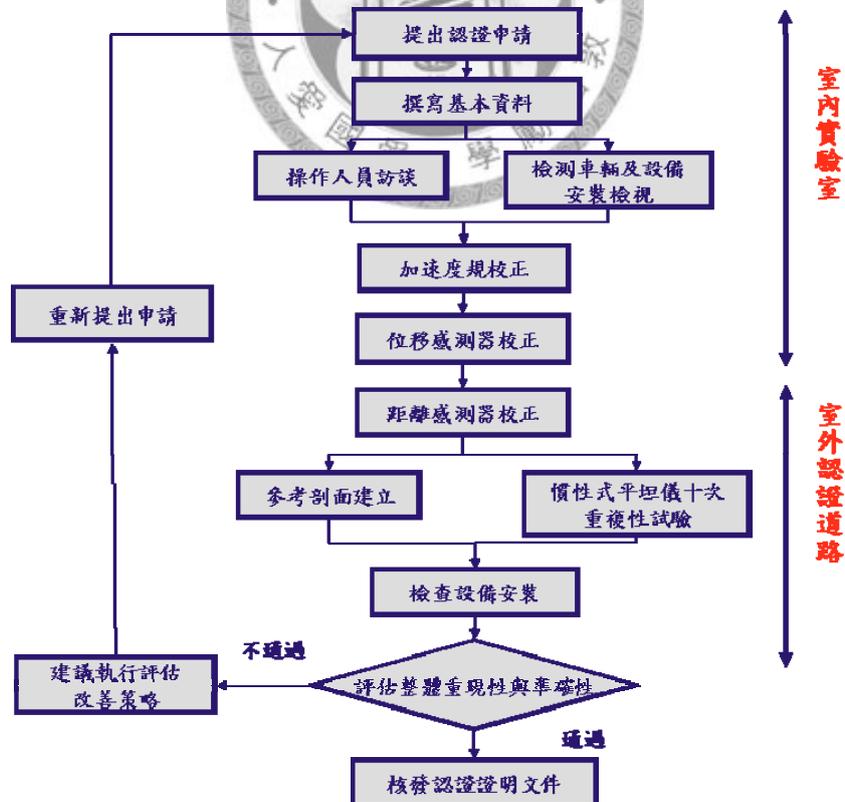


圖4.1.1 慣性式平坦儀認證程序圖

4.2 室內單一設備校正

室內實驗室單一設備之校正項目包含加速度規與位移感測器，其校正程序如下：

1. 加速度規

加速度規之校正需透過加速規校正系統進行，其原理為將欲校正之加速度規固定於校正系統之振動平台，並輸入特定頻率及振幅進行量測，量測結果將與校正系統之參考加速度規進行比對，計算求得待測加速度規之靈敏度，用以評估加速度規量測值是否異常。

完整加速度規校正系統設備費用及定期維護之成本較高，且目前國內已有若干實驗室，經由國家實驗室體系認可執加速度規之校正；因此，加速度規校正方式建議採委外執行之程序進行，送往經認可之加速度規校正實驗室進行校正。

2. 位移感測器

位移感測器主要用來量測道路剖面高程變化情形，其校正方式係於室內實驗室採用靜態精密塊規進行。位移感測器校正程序須於一平坦之表面上進行，且校正過程中，應避免慣性式平坦儀因環境或人為因素而產生晃動之現象。

實際作法為將慣性式平坦儀固定於檢測車輛(保持車輛靜止及水平)並確保位移感測器之量測方向與地面垂直，檢測前先於位移感測器下置放一平板(確保其水平)以為參考值，首先於位移感測器下方置放一平板，量測十次並計算平板平均值；接著分別置放標稱厚度為 6 mm、12 mm、25 mm 及 50 mm 之塊規，並各自量測十次，計算各塊規每一次量測值與平板平均值之差值，此差值即為塊規量測厚度；最後計算各塊規每一次量測厚度與標稱厚度之絕對差值，各塊規絕對差值之平均皆不可大於 0.25 mm。至少須各自量測 25 mm 及 50 mm 之塊規十次，當兩塊規之平均絕對差值超過 0.25 mm，則須量測上述四種規格之塊規；而當任一規格塊規於量測後未達規範值，則位移感測器之校正結果不被接受，無法進行後續儀器認證流程。

4.3 室外校正及試驗流程

待加速度規與位移感測器校正作業執行完畢後，進行室外實驗道路之校正及檢測流程，其項目包括距離感測器校正、慣性式平坦儀輸出數據重現性與準確性評估。

1. 實驗道路標準

實驗道路規劃為直線區段約 300 m，前 100 m 為加速區段，中間試驗區段為 160 m，並保留最後約 40 m 之範圍作為減速區段。為達認證室外認證流程之可靠度及準確度，實驗道路無明顯之縱向及橫向坡度變化。實驗道路檢測區起點與終點皆有特殊明顯標記供操作人員辨識，以確保正確之量測位置。進行室外實驗道路認證流程前，認證中心人員應確實清掃各區段，確定輪跡線上無任何異物殘留後，方可進行認證流程。

2. 距離感測器校正

待加速度規與位移感測器校正作業執行完畢後，便由操作人員將設備安裝於檢測車輛之固定置具上，於實驗道路上進行重複之平坦度檢測。在進行平坦度檢測之前，必須確保檢測車輛為標準胎壓，並透過已知長度之特定區段確認距離感測器之量測值是否準確。距離感測器校正之特定區段長度應至少為 160 m，且須重複量測該段距離，直至連續 3 次之量測距離與已知距離之誤差平均值不超過 0.1 %。若差距仍大於此一門檻值，則可藉由參數調整修正之。校正過程中應以車輛實際行駛速度應介於 30 km/hr 至 40 km/hr，並且盡量避免突然之速度變化，以減少非預期之加速度規量測值。

3. 建立參考剖面

為使慣性式平坦儀輸出數據能有比對之依據，必須利用自動水準儀 (Auto Rod & Level, AR&L) 或步進式平坦儀 (Walking Profiler, WP) 於檢測區段上以同一路徑與方向重複進行三次高程剖面之量測，並取其平均作為參考剖面，而三次

量測之 IRI 平均值即為參考 IRI 值。

4. 慣性式平坦儀試驗

慣性式平坦儀於開始檢測前亦應檢查胎壓狀況並確保其為標準胎壓，接著在檢測路段上劃設檢測起訖點與資料擷取起訖點，該路段劃分為加速區 80 m，檢測區 160 m 以及減速區 40 m。為檢視檢測過程中行經檢測區時是否定速以及右輪軌跡線是否固定，其檢測步驟如下：

1. 駕駛員將車輛停妥於檢測起點，並由一位工作人員從旁進行起始點及右輪軌跡定位輔助
2. 駕駛員對準車道線，穩定加速並應於資料擷取起點前達檢測速度，隨即保持定速至通過資料擷取終點後穩定減速並停止
3. 電腦操作人員則應於開始前啟動平坦度檢測程式，並於車輛通過資料擷取終點後方可停止資料擷取
4. 重複上述 2、3 之步驟進行十次量測

4.4 設備與人員認證評估

針對設備重現性方面，慣性式平坦儀應在固定檢測路徑下進行十次重複性量測，駕駛人員應維持車輛行駛速度於 30 km/hr 至 40 km/hr 之間，且避免過大範圍之加、減速度，藉以評估十次高程剖面及 IRI 值之重現性，以及操作人員之穩定性。至於在準確性方面，則透過自動水準儀 (AR&L) 或步進式平坦儀 (WP) 建立之參考剖面與參考值，與慣性式平坦儀之十次高程數據及 IRI 值進行比對，以確認該設備之準確性。

平坦儀認證作業正式執行之前，操作人員首先應完成教育訓練課程或是通過認證中心筆試測驗，以取得平坦儀操作資格。筆試測驗部分則根據課程及教材內容進行研擬，以檢視操作人員是否具備平坦度相關專業知識。操作人員取得平坦儀認證資格後，必須具有正確啟動設備並能正確判別儀器之狀態，以確保實際量測數據之正確性。接著則於室外實驗室部份進行平坦儀十次重複性量測，於過程中將由認證中心人員協助檢視操作人員之穩定性，包括速度控制穩定性及橫向偏移控制能力；另一方面，透過剖面高程數據比對之結果，進一步了解操作人員駕

駛待測平坦儀進行量測時之數據重現性與準確性，藉以確認其實地檢測能力。完成上述流程並通過評估後，便可針對該操作人員核發該部平坦儀之操作人員認證文件。若認證過程中，零組件校正不合標準，數據比對無法通過，亦或人員評估未達標準，則認證中心提出建議執行評估改善策略，以供提出認證申請之單位作為設備修繕、升級或人員技術加強之參考。



第五章 影響慣性式平坦儀量測之鋪面及環境因素

5.1 簡介

目前國外多以慣性式平坦儀為主要平坦度檢測儀器，除了具有速度快、準確度高之特性，並可蒐集大規模路網之檢測資料，用以評估道面之使用狀況，並納入鋪面管理系統之中，透過養護維修之概念，降低工程之生命週期成本，以提供用路人良好之行駛環境。部份國內學術單位、顧問工程公司及公部門單位，如營建署、公路總局、台北市新工處等，已自行開發或購買慣性式平坦儀，進行道路檢測。本章將以進一步探討影響慣性式平坦儀剖面量測之鋪面及環境因素，作為未來進行該儀器量測時之參考。

5.2 鋪面因素[13]

鋪面之特性影響慣性式平坦儀量測之準確度，當檢測路段內之鋪面坡度、曲線過大或不穩定時，會造成感測器量測值產生偏誤，進而影響高程剖面及平坦度指標計算。以下將探討坡度及曲線路段對於感測器量測結果之影響。

1. 坡度 (Hills and grades)

道路坡度會改變慣性式平坦儀中加速規檢測之方向，進而影響加速度規之讀值。一般而言，當加速度規與檢測鋪面呈現絕對垂直之角度，且車輛並無垂直位移，此時加速度規所量測到之加速度為 $1g$ (約 9.81 m/s^2)，利用後端資料處理後，可將 $1g$ 之偏移量去除，即得到為零之加速度值，真實反應車輛相對於檢測鋪面之加速度值。而若道路呈一穩定坡度，檢測過程中加速度規保持固定傾斜角 θ 。其加速度之誤差則以下列公式表示[13]：

$$Error = (1 - \cos \theta) \times 1g \quad \text{公式(5.2.1)}$$

若檢測道路坡度前後維持穩定不變，則加速度規與檢測鋪面將也將保持一定傾斜角度，透過後端資料處理及誤差公式，仍可將加速度規訊號之偏移量去除，舉例而言，當道路坡度達 12% 時，以公式(5.2.1)計算結果可知，道路坡度將使加

速度規產生 0.007 g 的誤差。

在一坡度為零之標準鋪面上檢測時，由於加速度規可始終與道路鋪面保持垂直，而在一平穩的斜度上檢測時，通常可透過後端處理去除加速度之偏移量；但若檢測道段坡度變化大且呈不規則性，檢測過程中加速度規受到坡度干擾，隨坡度變化而改變其傾角，無法依據加速度之誤差公式計算偏移量，進而導致檢測過程中剖面量測之誤差。

2. 曲線路段 (Curves)

當檢測路段並非一筆直道路而是曲線道路時，由於曲線道路之超高設計，將使加速度規於檢測時產生橫向加速度，造成檢測結果之誤差，加速度規量測之分析情況如圖 5.2.1 所示。由於加速度值受曲線道路之超高設計影響，檢測道路是否筆直就成了影響慣性式平坦儀剖面量測之因素。

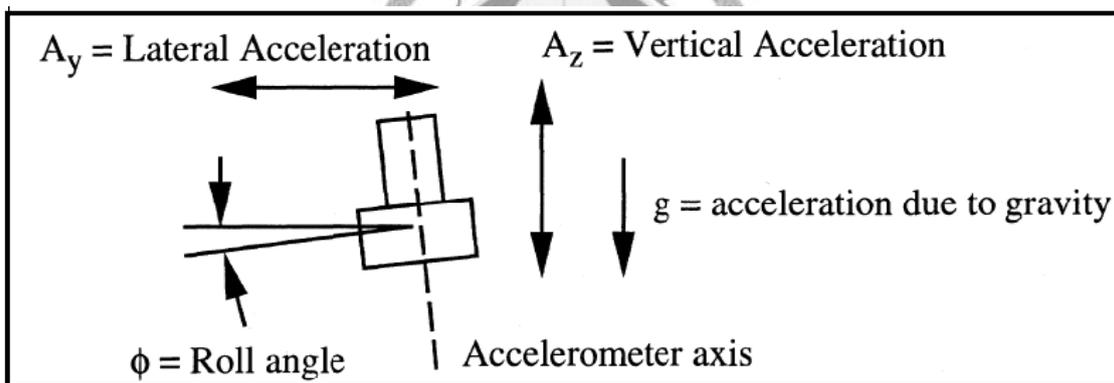


圖 5.2.1 橫向加速度[13]

5.3 環境因素[12]

進行慣性式平坦儀剖面量測時，任何外在環境因素皆會影響感測器的量測，使之產生誤差，亦有可能導致高程剖面中極為離譜的離群值，進而影響高程剖面及平坦度指標計算。本節將探討空氣濕度、鋪面積水及鋪面異物對於感測器量測之影響。

1. 空氣溼度

空氣濕度於合理範圍內對於雷射、紅外線或光學感應器之性能影響並不大，其感測器產品規格中通常會標示操作之環境因素，例如 Selcom 位移感測器之產品規格書中標明，空氣溼度 90% 以下即可正常運作。因此，操作者或儀器保管者於平日進行儀器保養時，應需徹底檢查儀器發射器、鏡頭、鏡面等是否產生水氣，且於檢測前確實清除儀器表面附著的水氣，即可降低空氣濕度對於剖面量測之影響。

2. 鋪面積水

於潮溼或積水的鋪面上進行檢測時，容易導致位移感測器出現嚴重誤差。由實地檢測經驗得知，當鋪面產生積水時，由位移感測器發出之訊號會產生散射現象，其量測值會有相當大的偏誤，造成計算剖面高程及 IRI 之誤差。因此，當鋪面積水產生時，應立即停止作業，待水分排除時，方可繼續進行檢測。由國外研究文獻歸納顯示，鋪面積水時確實會造成檢測路段之 IRI 產生相當大之誤差，圖 5.3.1 為不同積水程度對於剖面量測之影響可見在積水的鋪面檢測時，誤差可能高達兩倍以上。

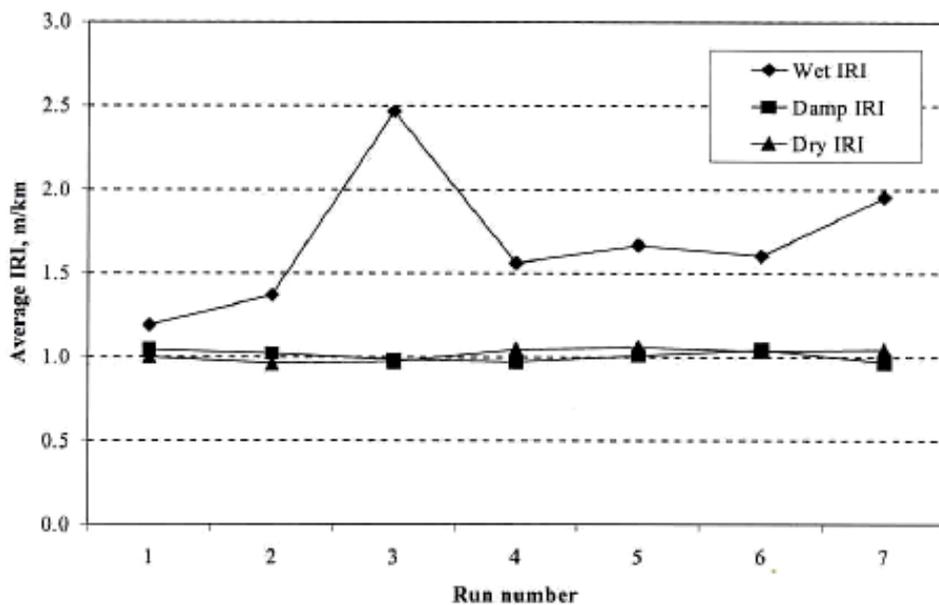


圖 5.3.1 鋪面積水對於剖面量測之影響[12]

3. 鋪面異物

當鋪面上存在異物，諸如碎屑、泥砂等，則會造成位移感測器量測到不必要

的突起物，而導致高程剖面資料出現離群值，如圖 5.3.2 所示。因此，進行慣性式平坦儀剖面量測之前，需利用掃帚確實清掃該檢測道路之鋪面表面，除去鋪面上之異物，才能使慣性式平坦儀準確量測真實剖面，並降低剖面量測之誤差。

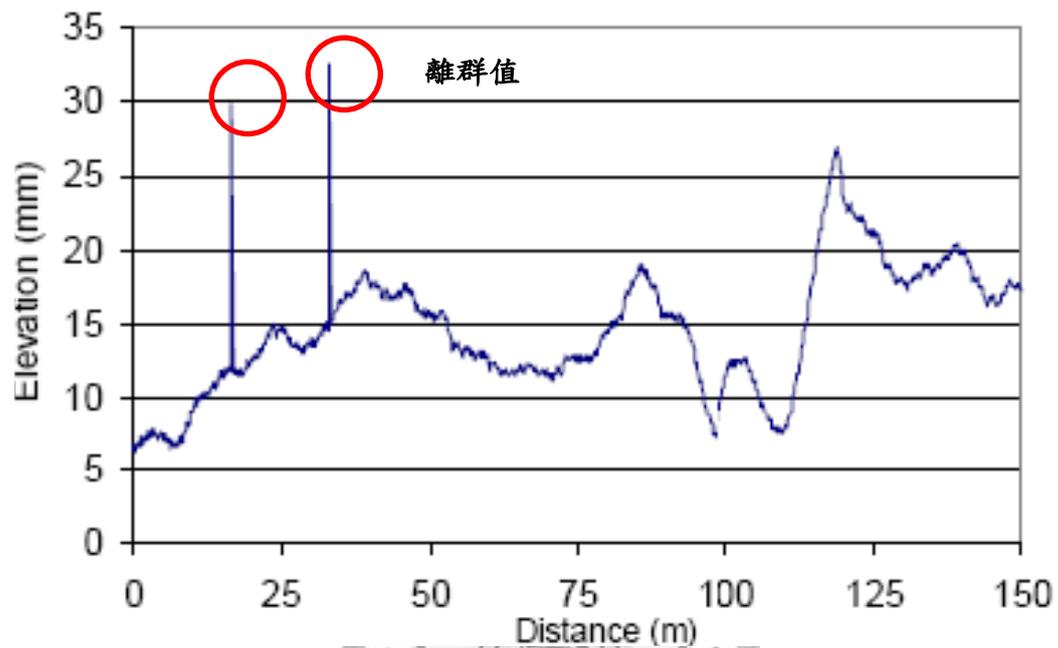


圖5.3.2 鋪面具物之影響[12]



第六章 影響慣性式平坦儀剖面量測之設備因素

6.1 簡介

慣性式平坦儀檢測設備包括：位移感測器、加速度規、距離感測器、車輛、儲存設備及電腦分析軟體，其中位移感測器量測車輛至鋪面之垂直距離，透過加速度規量測車身垂直加速度，經由二次積分後得垂直位移變化量，用以補償位移感測器量測之垂直距離，以得鋪面真實剖面高程變化，配合距離感測器所紀錄之檢測距離，並經過訊號處理及指標計算公式後，可得到該檢測路段之高程剖面及 IRI 值。不同類型之感測器，對於剖面量測所產生之誤差也不盡相同，隨著外在環境改變時，感測器也會出現個別誤差，本章將進一步探討各感測器對於剖面量測之影響因素，以降低剖面量測之誤差。

6.2 位移感測器[12]

位移感測器量測之距離為發射訊號點至鋪面之垂直距離，該垂直距離透過加速度規值補償，即得鋪面高程資料。由於位移感測器類型、解析度、足點大小、量測範圍不同，進行剖面量測時，也會有各有差異，分別進行下列說明。

1. 位移感測器類型

位移感測器依訊號類型不同，可分為雷射、紅外線、光學式及超音波位移感測器，至今大多數慣性式平坦儀使用雷射或紅外線位移感測器，超音波位移感測器由於解析度、足點、取樣頻率等無法達到量測之準確性，現今已鮮少使用。以下針對雷射及紅外線位移感測器分別說明其量測原理。

- 雷射位移感測器：當雷射光束照射在連續起伏之鋪面上，由於鋪面為一粗糙表面，使雷射光束產生散射式反射，經過透鏡的聚焦後投影於光檢測器上，利用雷射三角法原理(Triangulation)求得垂直位移，其原理如圖 6.2.1 所示。

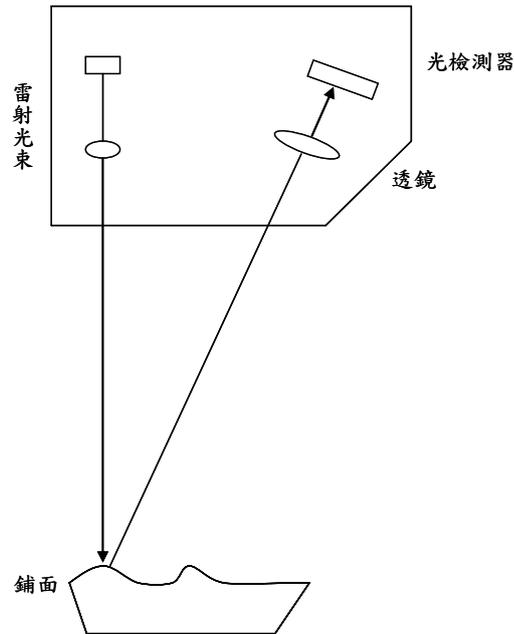


圖6.2.1 雷射位移感測器原理[12]

- 紅外線位移感測器：紅外線位移感測器之量測原理與雷射位移感測器大致相同，不同之處為發射光束為紅外線而非雷射光束。
- 超音波位移感測器：利用超音波發射器，發射至連續起伏之鋪面上再反射至接收器，由音波經歷的來回時間計算發射器至鋪面之距離。

2. 解析度

解析度為位移感測器可精確量測距離之最小單位。由國外研究整理，解析度至少須達 0.5mm 方足以精確擷取高程剖面進而計算 IRI 值或 RN 值。中華民國國家標準 CNS 15046[14]中訂定位移感測器垂直測距解析度之標準，如表 6.2.1 所示。對於等級一之慣性式平坦儀，位移感測器垂直測距之解析度須不大於 0.1mm；而等級四於解析度之標準則大於 0.5mm。

表 6.2.1 位移感測器垂直測距之解析度[14] 單位：mm

等級一	不大於 0.1
等級二	大於 0.1 至 0.2
等級三	大於 0.2 至 0.5
等級四	大於 0.5

3. 足點

足點為光束打在鋪面上之面積，其尺寸大小對量測鋪面紋理、裂縫及接縫具有重大之影響。一般而言，雷射位移感測器之足點直徑介於 1 mm~5 mm 之間，故可測得鋪面表面較細微之紋理特性及裂縫。

4. 取樣頻率

取樣頻率為位移感測器於單位時間內之取樣個數。對於慣性式平坦儀，配合車行速度之換算，可由頻率求得取樣間距，而取樣間距代表兩個最近取樣點之車行方向距離。若位移感測器之取樣頻率過低（取樣間距過大），則容易發生失真（aliasing）現象，如圖 6.2.2 所示。

計算 IRI 值所關切之最小鋪面剖面波長約為 0.3 m，為確保可準確量測此波長範圍之剖面，最小取樣間距必須為最小鋪面剖面波長之一半，即為 0.15 m。假設車行速度為 100 km/hr，則所需取樣頻率須至少為 184 Hz，而一般雷射位移感測器之取樣頻率多在 1200 Hz 以上，故可滿足檢測之取樣頻率要求。超音波位移感測器由車輛發射聲波至地面再回傳雖然只需 0.002 秒的時間，但由於聲波多重反射會持續維持 0.01 秒，換算所得之取樣頻率較低，因此，超音波位移感測器於高速下進行量測時，容易發生失真現象。

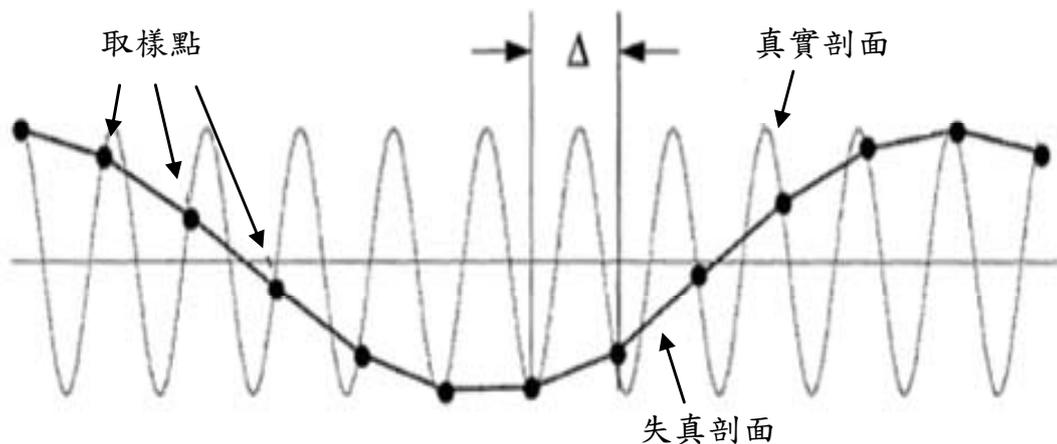


圖6.2.2 失真現象[12]

6.3 加速度規[12]

慣性式平坦儀利用加速度規量測車輛相對於鋪面之垂直加速度，經過兩次積分後則為垂直位移距離，作為補償車輛上下振動之垂直加速度，透過加速度規之補償，位移感測器方可正確量測各點高程。

車輛穩定前進時仍具有縱向或橫向之加、減速度，造成車輛前後左右傾斜，導致加速度規量測產生極小誤差，但只要縱向或橫向之加、減速度小於 0.1 g，則誤差可忽略不計。因此，使用慣性式平坦儀進行檢測時，應盡量避免過度加、減速或任何會造成車輛傾斜之因素。

相關研究報告中建議，針對道路路網層級之平坦度驗收，加速度規之垂直向加速度量測範圍應為 ± 5 g 以上；而針對新工道路之平坦度驗收，其量測範圍則可縮小。不論道路路網層級或新工道路之平坦度驗收，加速度規之反應頻率應至少為 150 Hz，以量測波長 0.3 m 之剖面，滿足計算 IRI 值所考慮之最小波長範圍。

6.4 距離感測器

量測實際車行距離之精準度，對於鋪面平坦度檢測具有重大的影響，當距離感測器所紀錄之距離與實際車行距離不相同時，則會使各點高程與實際情況不符，導致高程剖面與真實剖面產生誤差現象，如圖 6.4.1 所示。

影響距離感測器之量測主要來自於胎壓變化，故於進行鋪面檢測前，車輛胎壓須保持在固定建議值，一般而言，胎壓約為 35 psi~40 psi 之間。為確保慣性式平坦儀紀錄的檢測距離與實際車行距離相同，在進行鋪面檢測前，也應針對距離感測器重複進行固定距離之校估，直到慣性式平坦儀所紀錄的檢測距離與實際車行距離之誤差小於 0.1% 後，方可開始進行數據之量測。一般而言，校正距離至少為 160 m，需注意校估路段是否筆直，並避免過大或不規則坡度變化的路段。

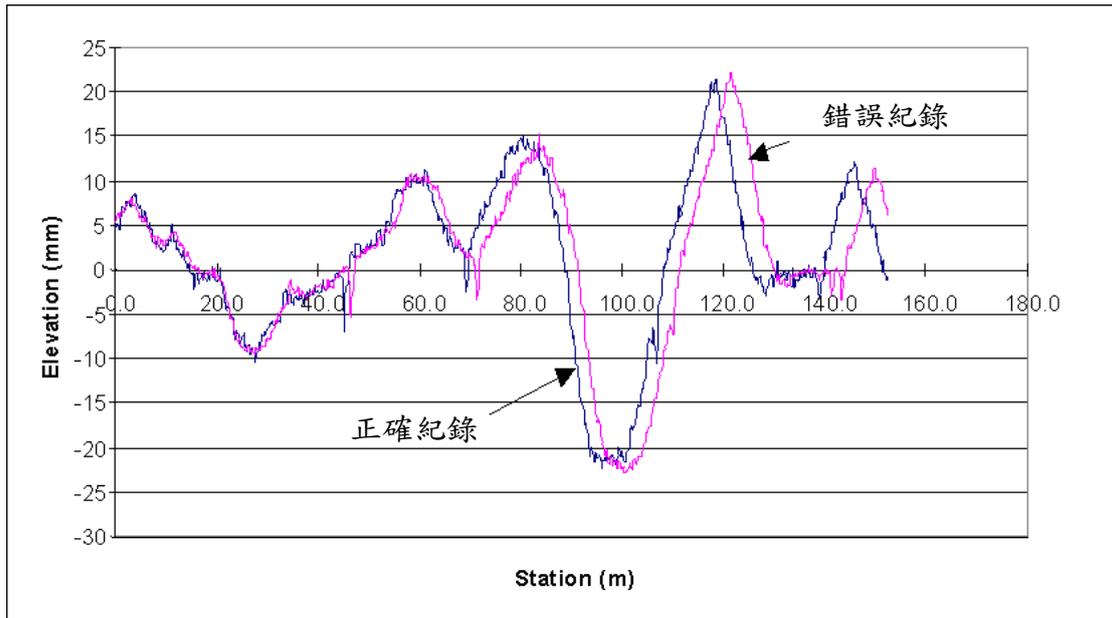


圖 6.4.1 距離感測器誤差[12]



第七章 影響慣性式平坦儀剖面量測之人為因素

7.1 簡介

利用慣性式平坦儀進行量測時，操作人員對於剖面量測之正確性與否，具有多方面之操作誤差。舉例而言，橫向位移控制、速度變化控制等，皆會對剖面量測產生影響，導致分析高程或平坦度資料於實際路況不符。因此，操作人員需了解任何會影響慣性式平坦儀剖面量測之操作因素，以降低操作過程中對於剖面量測之誤差。為提升駕駛穩定性與數據接受之正確性，建議使用慣性式平坦儀進行剖面量測，由兩位操作人員共同進行檢測，一位負責駕駛，另一位則負責電腦操作與資料接收。

本章節探討影響慣性式平坦儀剖面量測之人為操作因素，其項目分別為：事前確認、檢測速度、速度變化、加速區、資料擷取起始位置、橫向位移、檢測過程確認，將於以下各小節分別敘述之。



7.2 事前確認

慣性式平坦儀進行檢測前，操作人員必須先行確認各設備、接線是否處於穩定狀態，可供正常運作。為確保檢測過程中感測器量測、資料儲存與擷取正確無誤，事前必須針對下列各項目仔細確認：

1. 確認胎壓

由於車輛胎壓會改變輪胎之半徑，進而影響車行距離之量測，操作人員必須確認胎壓是否符合各車輛製造商之規定，並於每次檢測前，確認胎壓在一固定值，可降低距離感測器之不穩定性。

2. 設備暖機

各項設備於啟動後，皆需要一段時間適應其外在環境，以確保各設備之穩定性及正確性。各項設備之暖機時間，參考各製造商之規定。

3. 確認感測器及線路

進行檢測前，必須先確認感測器裝設是否穩固，鏡頭是否有汙損；另外，尚須檢查各設備之線路及接頭是否鬆脫。

7.3 檢測速度

各慣性式平坦儀，具有不同的檢測速度範圍，其速度受限於感測器之規格及車輛本身。製造商於慣性式平坦儀規格書上，應提供該儀器設備適當之檢測速度，而操作人員於進行檢測時，則須遵照規格書中之最高及最低速度限制，以確保所蒐集之資料正確無誤。

最高檢測速度取決於位移感測器之取樣頻率，當檢測速度越快時，設備所需的取樣頻率需相對提高。近年來，慣性式平坦儀不斷開發，大部分位移感測器之取樣間距可達 25 mm，最高檢測速度可達 100 km/hr。進行量測時，操作人員必須駕駛於檢測速度範圍內，如果速度超出其範圍，則造成部分剖面資料錯誤，導致後續分析資料之誤差。

7.4 速度變化

當車輛具有加速度時，即產生速度之變化。在檢測過程中，任何加速或減速皆會對剖面量測造成影響；由於車速改變（加速或減速），使加速度規傾斜，造成加速度量測值產生偏移量，而導致剖面量測之誤差。為了確保剖面量測資料之正確性，車輛於資料擷取起點前，必須達固定之檢測速度，且操作人員於檢測過程中，應盡量維持等速行駛；若於一般道路進行檢測，則建議量測初始速度變化較大且未達穩定值前之數據，應不納入後續該路段平坦度評估資料中。

由 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 研究計畫 10-47[13]資料顯示，雖然車速改變並不會使 IRI 值有明顯差異，但確實對高程剖面量測造成影響，如圖 7.4.1 及圖 7.4.2 所示。

圖 7.4.1 說明減速對於高程剖面量測之影響，同一高速慣性式平坦儀針對相同測線進行六次剖面量測，其中五次維持 80 km/h 等速行駛，而另一次檢測速度



由 80 km/h 減速至 48 km/h，檢測過程中減速導致高程剖面與原先維持等速之高程剖面有明顯差異。圖 7.4.2 說明加速對於高程剖面量測之影響，其中五次維持 80 km/h 等速行駛，而另一次檢測速度由 48 km/h 加速至 80 km/h，檢測過程中加速同樣使高程剖面產生變化。

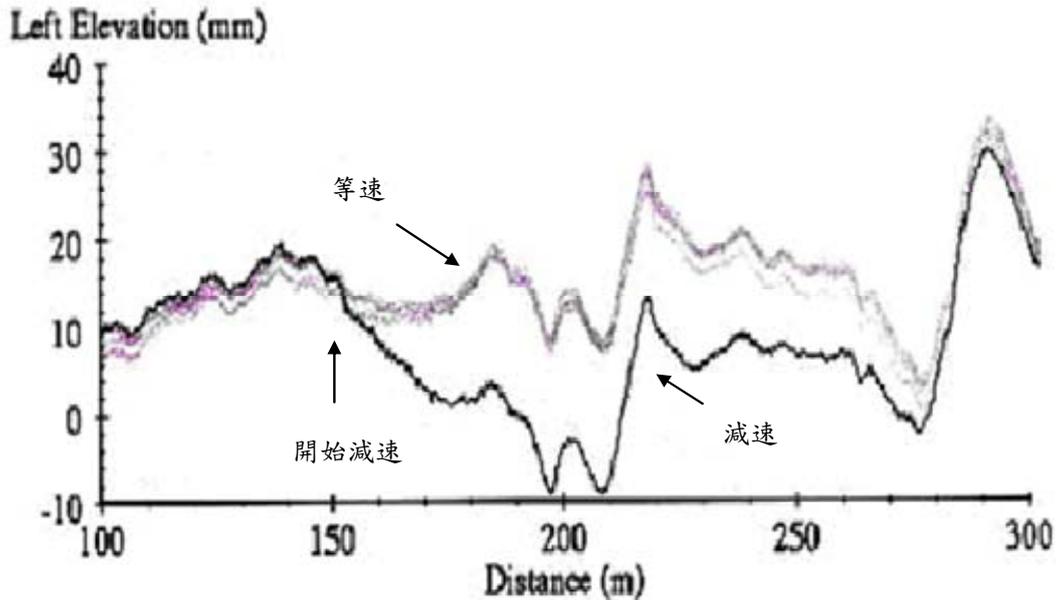


圖 7.4.1 減速對剖面量測之影響[13]

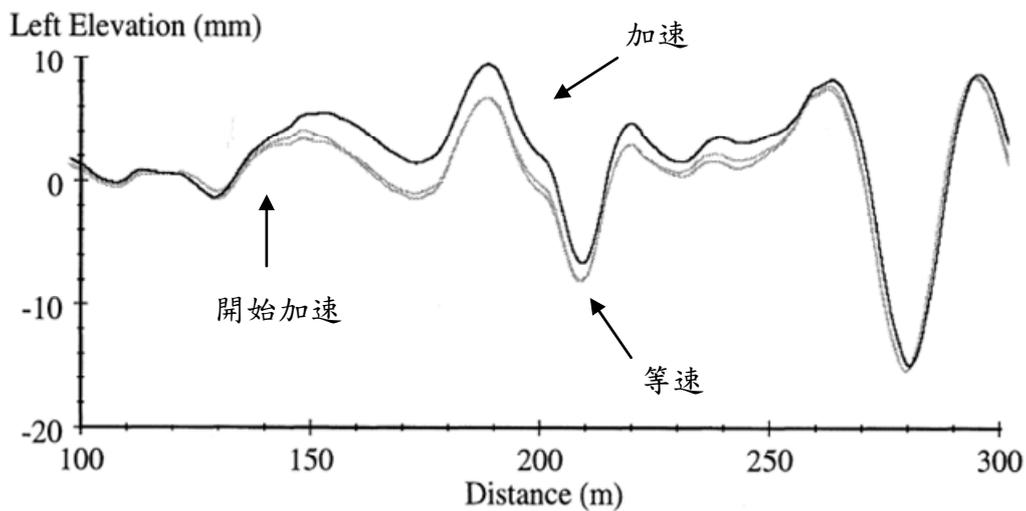


圖 7.4.2 加速對剖面量測之影響[13]

7.5 加速區

利用慣性式平坦儀進行剖面量測時，須有適當距離之加速區，以利車輛於資

料擷取起點前加速至檢測速度；倘若車輛於資料擷取起點處才開始加速，則於檢測過程中，使加速度規傾斜，造成加速度值產生偏移量，導致剖面量測誤差。NCHRP 研究計畫 10-47 中，針對有無加速區進行試驗探討，利用高速慣性式平坦儀於同一測線進行六次剖面量測，其中五次車輛由加速區起點開始加速，而另一次則由資料擷取起點開始加速，由圖 7.5.1 所示，於檢測區前 50 m 處，無加速區之高程剖面起伏較大，與有加速區之高程剖面相差甚大。於實際道路檢測中，若於適當加速區可供使用，則於數據分析時，應將資料擷取開始點之 20 m ~30 m 之數據予以去除，不納入指標計算分析中。

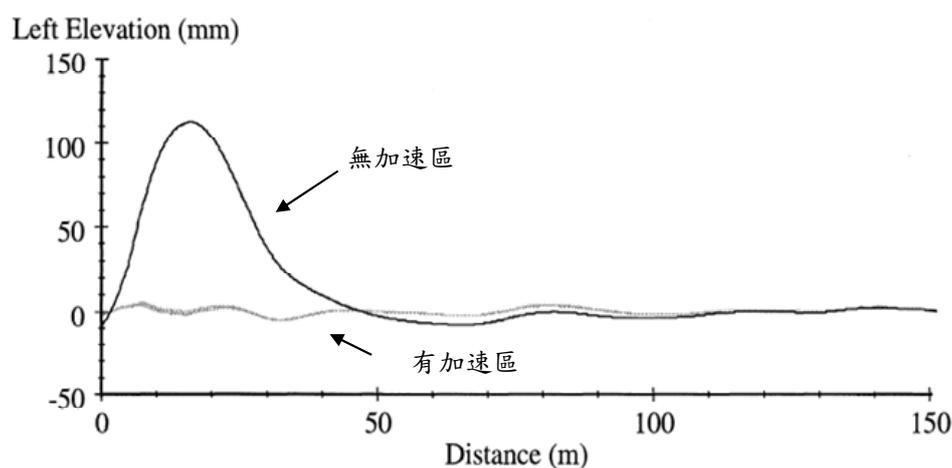


圖 7.5.1 加速區對剖面量測之影響[13]

7.6 資料擷取起始位置

慣性式平坦儀檢測之過程中，可利用自動觸發設置，透過自動方式擷取量測資料，亦可透過手動按鍵或後續處理等方式擷取量測資料。採用自動觸發方式能精確擷取分析區段之資料，相對於手動按鍵或後續處理等方式，誤差甚小。當資料擷取起點位置不正確時，會導致慣性式平坦儀量測之高程剖面產生前後位移，如圖 7.6.1 所示。一般道路並不會設有自動觸發裝置，操作人員可由檢測路段上之明顯標的物位置，如路口、建築物，以手動方式標記資料擷取範圍。

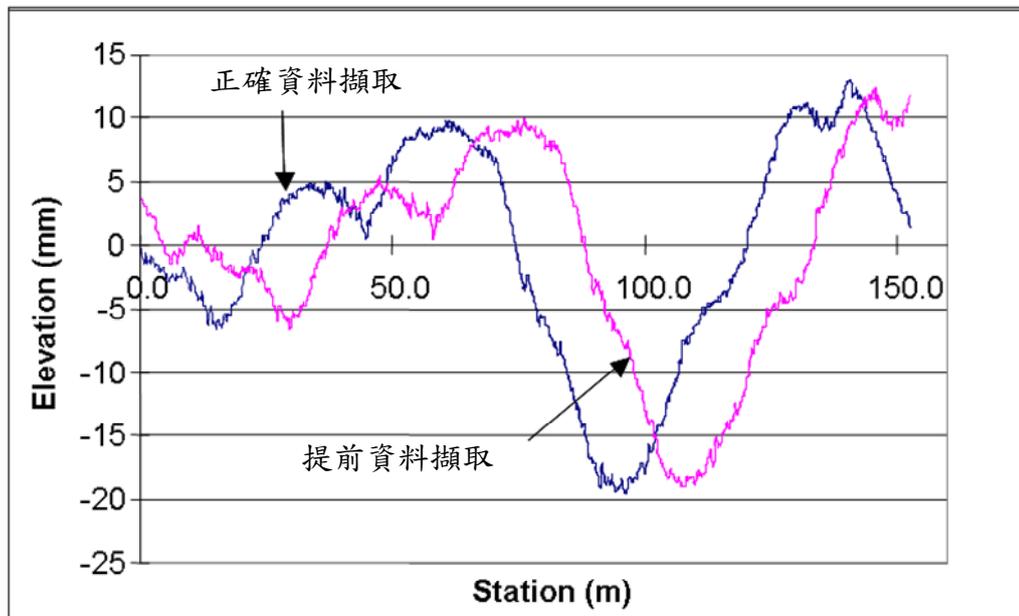


圖 7.6.1 起始位置偏移[13]

7.7 橫向位移

任何橫向位移皆會造成高程剖面量測之誤差，操作人員於檢測過程中，須盡量避免車輛產生橫向位移，確保慣性式平坦儀於同一測線上進行檢測，以利後續資料分析。操作人員駕駛時，可透過道路之標線或車內特殊標記等方式定位，以利駕駛人保持穩定直線之行駛，減少量測之橫向偏移，以確實掌握輪軌跡之平坦度狀況。

7.8 檢測過程確認

慣性式平坦儀檢測過程中，操作人員須注意各感測器之輸出值或圖形變化是否合理，避免由於外在環境、人為因素或系統不穩定而造成不合理的輸出值或圖形。部份慣性式平坦儀軟體可發出即時警示訊號或聲響，提醒操作人員注意駕駛速度、資料擷取異常或感測器不正常量測等現象，以避免剖面量測之誤差。當結束每一次檢測時，操作人員也必須確認該次檢測之輸出值是否合乎常理，避免由於錯誤資料導致後續之分析錯誤。

第八章 訊號處理過程

8.1 基本訊號定義[15]

訊號為一連貫隨時間改變之物理量，為一時間函數，X 軸代表時間，而 Y 軸代表隨時間改變之速度、位移、電壓值等物理量。一般而言，訊號可分為兩大類，一為類比訊號 (analog signal)，另一為數位訊號 (digital signal)。類比訊號所代表的訊息為一連續性狀態變化的波形，如聲音訊號。數位訊號所代表的訊息為一離散性狀態變化的波形，如摩斯電碼、電腦 0 及 1 之資料等。慣性式平坦儀之量測結果為一連續之類比訊號，透過邏輯演算而轉換成高程剖面及平坦度指標值，以下分別介紹類比訊號波長、頻率與週期之定義及單位。

波長為在某一固定的時間中，沿著波傳播的方向，距離平衡位置之位移相同的兩個質點間的最短距離。簡而言之，波長為相鄰兩個波峰或波谷之間的距離，亦或相鄰兩個密部或疏部之間的距離。國際通用之波長代號為 λ ，而單位通常以 m 表示。

頻率為衡量聲音、電磁波或其他種類訊號波，每秒重複訊號波形的數量，亦即每一秒鐘訊號出現之次數。國際通用之頻率代號為 f ，而單位以赫茲 (Hz) 表示之。頻率與波長具有反比例關係，頻率 f 等於波的速度 v 除以波長 λ 。

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad \text{公式(8.1.1)}$$

週期為波行經介質時，完成一次振動所需的時間，通常以 T 表示週期，其單位為時間，其值為頻率之倒數。而振幅是在波動或振動中，距離平衡位置或靜止位置的最大位移，振幅恆為正值，通常以 A 表示振幅，其單位為公分、公尺等長度單位，下圖 8.1.1 為波示意圖。

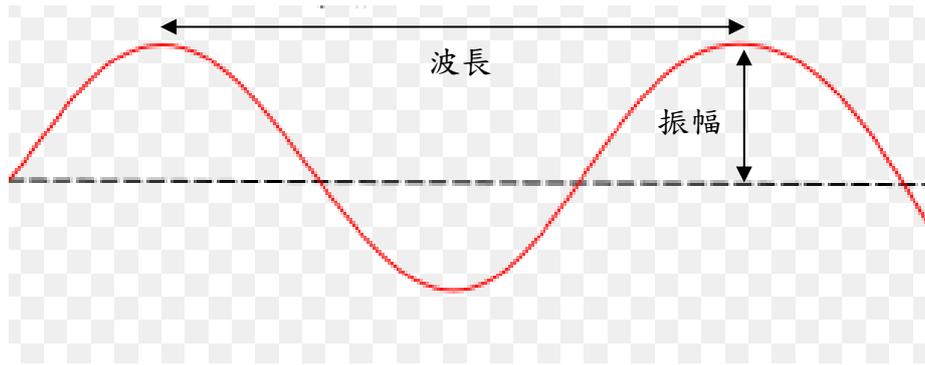


圖 8.1.1 波示意圖

8.2 濾波

於訊號量測時，由於外在環境因素產生的雜訊容易導致訊號失真，在訊號擷取後可透過濾波將不必要的雜訊消除，使不同頻率範圍內產生不同之增益，特定頻率之訊號被突顯出來，而其他頻率之訊號則衰減或濾除，以達消除雜訊之目的。

一般而言，慣性式平坦儀之軟體本身，已對原始訊號進行濾波處理，但由於高程剖面資料之用途不同，有時操作人員需再進行額外的濾波處理，以濾除不必要的訊號範圍。濾波進行方式依照其範圍及用途，可分為高通濾波、低通濾波及帶通濾波，以下分別介紹三種濾波及其特性，使用者可依分析路況特性等，進行不同之訊號處理方式。

1. 高通濾波

濾除低於截止頻率的訊號，使頻率範圍高於某一特定值的訊號得以完全保留，降低長波長對於訊號之影響。將剖面資料透過高通濾波後，可消除該檢測路段之坡度影響，降低其對資料判讀之影響。

2. 低通濾波

濾除高於截止頻率的訊號，使頻率範圍低於某一特定值的訊號得以完全保留，降低短波長對於訊號之影響。將剖面資料透過低通濾波後，可降低由裂縫或

接縫對剖面造成之影響，使剖面較為平順。

3. 帶通濾波

保留截止頻率兩側某一頻率範圍內的訊號，使特定頻率範圍之訊號得以完全保留，消除頻率範圍外之訊號對於資料分析之影響。

8.3 訊號處理流程

慣性式平坦儀之雷射式位移感測器量測車身與鋪面之距離，雷射光束照射在連續起伏之鋪面上並反射至透鏡上，再經過透鏡的聚焦後投影於光檢測器上，利用雷射三角法原理（Triangulation）求得垂直位移。當進行車輛行駛產生上下振動時，慣性式平坦儀之加速度規可量測不同之電壓值，利用線性轉換成車輛加速度值，再透過兩次積分將加速度值轉成距離值，補償車輛上下振動對位移感測器之影響。距離感測器則藉由車輛輪胎轉動圈數轉換成電壓訊號，再由電壓訊號轉換為行駛距離。利用訊號擷取卡，將位移感測器、加速度規及距離感測器之訊號擷取至主機。

成功擷取各感測器量測之訊號後，經由計算軟體演算，輸出逐點高程資料及各區段之 IRI 值。世界銀行已公佈一套通用的 IRI 值計算軟體，而其邏輯計算程式中初始距離 11 m 對 IRI 值之演算有很大的影響，故量測區段必須大於 11 m 所計算出的 IRI 值才有意義。一般而言，進行道路平坦度檢測時，多以 100 m 為一區段輸出 IRI 值，而為了確保擷取穩定之訊號，於檢測前 20 m~30 m 區間的資料，由於受到車輛加速之影響，不予考慮；且檢測過程中應於街廓處、橋面等特殊路段，利用手動標示之方法將擷取訊號區隔，以利分析各區段之平坦度。

參考文獻

- [1] “Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems,” ASTM E867, 2006
- [2] Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas , “The Little Book of Profiling,” 1998
- [3] 周家蓓，「高速公路鋪面平坦度檢測分析與平坦儀評估」，交通部台灣區國道高速公路局，民國93年
- [4] “Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph,” ASTM E1274, 1993
- [5] Sayers, M. W., Gillespie, T. D., Queiroz, C. A. V., “The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale For Road Roughness Measurement,” Transportation Research Record 1084, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1986
- [6] Sayers, M. W., “On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile,” Transportation Research Record 1501, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1995
- [7] “Standard Practice for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of a Vehicular Traveled Surface,” ASTM E1170-92, 1992
- [8] “Standard Practice for Computing Ride Number of Roads from Longitudinal Profile Measurements Made by an Inertial Profile Measuring Device,” ASTM E1489-96, 1996
- [9] 陳弘章，「應用慣性式平坦儀量測數據於道路整建平坦度驗收之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國95年10月

- [10] “Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method,” ASTM E1364-95, 2005
- [11] “Measuring Pavement Profile Using a Rod and Level,” AASHTO R40-05, 2007
- [12] Federal Highway Administration, “Pavement Smoothness: Factors Affecting Inertial Profiler Measurements Used for Construction Quality Control,” FHWA NHI-02-050, 2001
- [13] Steven M. Karamihas, Thomas D. Gillespie, Starr D. Kohn, Rohan W. Perera, “Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement,” NCHRP Project 10-47, 1999
- [14] CNS 15046, 「慣性剖面儀量測鋪面縱向剖面試驗法」, 中華民國國家標準, 民國 95 年 12 月
- [15] 藍國桐, 「通訊原理與應用」, 民國 88 年 8 月

