

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

以智慧型手機內建感測器進行道路平坦度與舒適度評估

Assessing Road Smoothness and Riding Comfort using

Built-in Sensors in a Smartphone

賴彥彤

Yan-Tong Lai

指導教授：韓仁毓 博士

Advisor: Jen-Yu Han, Ph.D.

中華民國 108 年 1 月

Jan 2019

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

以智慧型手機內建感測器進行道路平坦度與舒適度評
估

Assessing Road Smoothness and Riding Comfort using
Built-in Sensors in a Smartphone

本論文係賴彥彤君 (R04521142) 在國立臺灣大學土木工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 108 年 01 月 24 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：

韓仁毓

韓仁毓

(指導教授)

蘇育民

蘇育民

林柏丞

林柏丞

蔡鎮宇

蔡鎮宇

系主任：

謝尚賢

謝尚賢

(簽名)

致謝



時光飛逝，猶記得當初持著期待又忐忑的心情跨越基隆路來到測量組，如今也要畢業了！首先要感謝組上三位老師對我這個測量門外漢悉心的指導，指導教授韓仁毓老師非常有耐心的指點我研究的方向，有時又能像朋友般談天說地；徐百輝老師、趙鍵哲老師的專業課程讓我對測量領域有更深入的了解，真的很謝謝老師們對我的照顧。感謝口試委員蘇育民老師、林柏丞老師、蔡鎮宇博士給予論文的建議使得本篇論文更臻完整。感謝儀衡工程技術顧問對本研究的幫助。

接著還要感謝 GSC 的好夥伴們，若堯、庭蓁一起當助教一起去大大小小的研討會一起撐過難捱的碩二時光；學長姐們的鼓勵及照顧；春嘉跟學弟妹們一起參與的數不清的外業人生，雖然辛苦，但跟大家一起就像出遊一樣非常開心！還有所有測量組的學長姊、同學、學弟妹，不論何時大家總是活力滿滿，讓我的研究所生活充滿朝氣，謝謝你們；謝謝我的閨蜜們，阿琳、阿慧跟阿培，我們總是互相扶持關心彼此，我愛你們；謝謝一直以來陪伴在我身旁的好友們：鎬璋、佩臻、科欣、佑毅、阿腸...在我身陷低潮時給我動力。

最後要感謝我的父母、家人、阿湯，謝謝你們總是在我背後當我的靠山讓我依賴給我溫暖、提供我良好的資源讓我在求學期間無後顧之憂、在我需要幫忙時義無反顧的伸出援手，我愛你們！！



摘要

路面的平坦度關係到用路人的安全與舒適度，而如何有效率的維護也是維持良好路面的重要因素之一。目前國際間最常使用的平坦度量測方法多著重於量測道路鋪面的幾何性，不僅無法直接反應用路人感受，且檢測方式耗時、成本高昂。本研究利用智慧型手機中的加速度規、陀螺儀與位置定位等感測器進行道路平坦度的量測，將車輛通過鋪面時所造成的加速度反應，經過三軸姿態改正、車速改正與濾波處理後，並使用標準差分類法、ISO2631-1 人體舒適度規範進行鋪面舒適度分類，分類成果再與國際糙度指標 IRI 進行對照。實測成果顯示，透過本研究提出的方法可以快速地收集路面平坦度資料，修正車速改正所造成之影響，進而建立基於用路人感受之服務力評估指標。此外評估成果可與位置資訊套疊展示，讓維護者能更準確、快速的找到需維護的路段，針對受損鋪面進行整修。

關鍵字：智慧型手機、道路平坦度、加速規、鋪面維護、國際糙度指標

ABSTRACT



The smoothness of road pavements is a key factor affecting the safety and comfort of general road users. As a consequence, an efficient monitoring and maintenance method ensuring the smoothness of road pavements become an important task. Meanwhile, the most commonly used smoothness measurement methods are primarily based on the geometric variations of road pavements. Such methods not only can't directly reflect the riding comfort of road users, but also are time-consuming and expensive. In this study, a method for collecting road pavement smoothness data using the built-in sensors in a smartphone, including accelerometer, gyroscopes and GNSS sensors, is proposed. After applying the proposed three-axis attitude correction, vehicle speed correction, and box filtering techniques, the road smoothness and riding comfort can thus be evaluated based the criteria described in ISO2631-1. Consequently, an efficient and economic method for evaluating the actual riding comfort of road users becomes available based the techniques developed in this study.

Keywords: smartphone, riding smoothness, accelerometer, ISO 2631-1, International Roughness Index

目錄



致謝	i
摘要	ii
ABSTRACT	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	ix
Chapter 1 前言	1
1.1 背景	1
1.2 研究動機與目的	4
1.3 論文架構	5
Chapter 2 文獻回顧	6
2.1 鋪面狀況指標	6
2.2 鋪面平坦度指標	7
2.2.1 國際糙度指標	8
2.2.2 單點高低差與平坦度標準差	10
2.3 平坦度量測儀器	11
2.3.1 剖面式平坦儀(Profilograph)	11
2.3.2 慣性式平坦儀(Inertia Profilometer)	12
2.3.3 其他發展中量測方法	12
2.4 舒適度評估指標	13
2.4.1 ISO 2631-1 人體全身振動量測方法	13
2.4.2 行駛指標(Ride Number, RN)	14
2.5 加速規型式與應用	15
2.6 小結	17

Chapter 3	研究方法.....	19
3.1	道路平坦度資料蒐集	19
3.2	道路平坦度資料處理	20
3.2.1	三軸加速度方位改正	21
3.2.2	不同車速之加速度改正	23
3.2.3	加速度資料濾波處理	25
3.3	行車舒適度評估	25
3.3.1	以由加速度計算之 IRI 值進行道路平坦度評估	26
3.3.2	以 ISO2631-1 進行道路舒適度評估	26
3.3.3	以標準差分類方式評估道路舒適度	27
3.4	小結	28
Chapter 4	實驗成果與分析	29
4.1	實驗設備配置	29
4.2	三軸加速度方位改正成果	30
4.3	量測車速改正成果	32
4.4	加速度資料濾波成果	37
4.5	舒適度分類成果與路段 IRI 值之比較	38
4.6	分類成果展示	43
Chapter 5	結論與建議	45
5.1	結論	45
5.2	未來工作建議	46
參考文獻		49



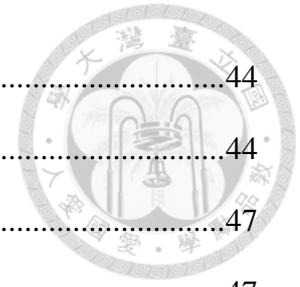
圖目錄



圖 1.1	道路破壞類型示意圖 (a)龜裂；(b)坑洞；(c)車轍.....	1
圖 1.2	民國 98 年至 106 年臺北市國賠案件申請原因統計圖	2
圖 2.1	鋪面龜裂嚴重程度示意(a)輕級(b)中級(c)重級 (內政部營建署，2002)...	6
圖 2.2	折減值對照表-以龜裂為例 (ASTM D6433-16, 2016).....	7
圖 2.3	四分車模型與其構造(修改自 Sayers and Karamihas, 1998)	8
圖 2.4	柔性鋪面之國際糙度指標分級圖(林宜蓉，2012).....	9
圖 2.5	以不同起始點進行單點高低差量測示意圖	10
圖 2.6	三米直規(a)示意圖；(b)實際照片(台灣儀器網，2019).....	11
圖 2.7	高低平坦儀(a)示意圖；(b)實際照片	12
圖 2.8	慣性式平坦儀示意圖(施雅蓉，2011).....	12
圖 2.9	振動量測方向座標位置圖－坐姿(修改自 International Organization for Standardization, 1997)	14
圖 2.10	壓阻式加速規示意圖	16
圖 2.11	壓電式加速規示意圖	16
圖 2.12	電容式加速規示意圖	17
圖 3.1	研究方法流程圖	19
圖 3.2	道路平坦度資料收集流程圖	20
圖 3.3	手機三軸方向示意	21
圖 3.4	量測車輛三軸方向示意圖	21
圖 3.5	三軸姿態角 α 、 β 、 γ 示意圖(a) α 角；(b) β 角；(c) γ 角	22
圖 3.6	α 角與車行方向關係示意圖.....	23
圖 3.7	速度 V 分解成垂直方向 Vv 與水平方向 Vh	24
圖 3.8	偶然誤差分佈曲線與發生機率圖	28
圖 4.1	(a)Toyota vios 車身 (TOYOTA,2018)；(b) HTC 10 外型(HTC,2018).....	29

圖 4.2	手機擺放位置	30
圖 4.3	道路平坦度資料收集畫面	30
圖 4.4	原始三軸加速度資料(上)與三軸旋轉角(下)之對照	31
圖 4.5	原始三軸加速度資料(上)與改正後三軸加速度(下)資料對照	31
圖 4.6	台中市水湳經貿園區重劃道路(a)位置示意圖；(b)現場照片	32
圖 4.7	以時速 40 公里通過水湳重劃道路之垂直方向加速度值與車速對應	33
圖 4.8	以不同車速通過水湳重劃道路之垂直加速度與車速之對照	34
圖 4.9	移除車速為 0 時的垂直加速度值	34
圖 4.10	車速改正前(上)後(下)之垂直加速度對照	35
圖 4.11	濾波前後比較圖。上為濾波前；下為濾波後。	38
圖 4.12	路段一第一次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法	39
圖 4.13	路段一第二次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法	39
圖 4.14	路段二第一次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法	40
圖 4.15	路段二第二次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法	40
圖 4.16	路段三第一次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法	41
圖 4.17	路段三第二次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法	41
圖 4.18	ISO2631-1 分類中非常不舒適與標準差分類中超過三倍標準差之資料數 百分比與實測 IRI 值比較圖	43
圖 4.19	將舒適度分類套疊至地圖上之成果(紅色為道路狀況最差之區域，綠色	

	則是最好的區域).....	44
圖 4.20	道路狀況不佳處實際照片	44
圖 5.1	高鐵的垂直加速度變化與車速對應	47
圖 5.2	高鐵之 ISO2631-1 與標準差分類成果	47
圖 5.3	高鐵分類成果展示	48



表目錄



表 1.1	我國現行一般新工道路平坦度檢驗規範	3
表 2.1	PCI 指標分級與建議維護工作 (Boyapati and Kumar, 2015).....	7
表 2.2	不同起點之單點高低差量測成果	11
表 2.3	RN 值對應的路面服務水準(陳怡先, 2004).....	15
表 3.1	ISO 2631-1 舒適度與加速度值之對應(International Organization for Standardization, 1997).....	27
表 4.1	改正前後三軸加速度平均值(m/s^2).....	32
表 4.2	車行方向 AB 之不同車速下加速度絕對值平均(m/s^2)、標準差	36
表 4.3	車行方向 BA 之不同車速下加速度絕對值平均(m/s^2)、標準差	36
表 4.4	車行方向 AB 之設計車速下的加速度絕對值平均(m/s^2)與標準差	37
表 4.5	車行方向 BA 之設計車速下的加速度絕對值平均(m/s^2)與標準差	37
表 4.6	ISO2631-1 分類中非常不舒適與標準差分類中超過三倍標準差之資料數百分比與實測 IRI 值比較表	42



Chapter 1 前言

1.1 背景

道路是每天都會接觸到的公共工程、也是國家的重要基礎建設，而國家整體發展與地區經濟的興衰與道路有著密不可分的關係。道路設置的主旨無非是要讓用路人能夠安全又舒適的通行，路面若維護不良，容易產生龜裂、車轍、坑洞等鋪面損壞(圖 1.1)。破損的路面是造成行駛感受不佳的最大原因，也是造成交通事故的原因之一，不容小覷。為了用路人的安全與行駛體驗，臺北市於民國 98 年起推動路平專案計畫(臺北市政府工務局新建工程處，2018)，每年更新的道路面積約 168 萬平方公尺，並根據路面毀損將維護工作分成一般維護型與路基改良型兩種進行作業。臺北市路平專案推動 6 年期間共花費約 130 億元，道路總長僅約 1700 公里尚且如此，更何況全台有超過 4 萬 3 千多公里的道路(交通部，2018)。若要進行全面整修實屬不易。

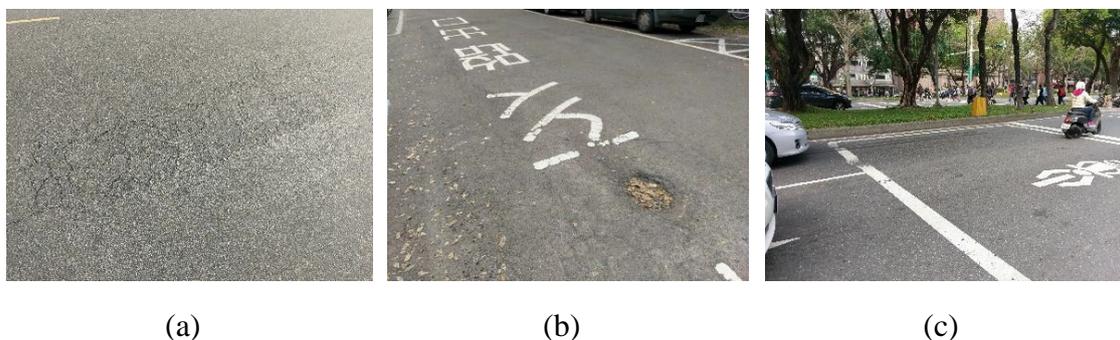


圖 1.1 道路破壞類型示意圖 (a)龜裂；(b)坑洞；(c)車轍

鋪面若已損壞，破壞程度輕會造成路面顛簸、用路人不適，重則可能導致機車騎士摔倒受傷。根據臺北市政府法務局受理國家賠償案件原因類型統計資料(圖 1.2)顯示，臺北市 106 年共接獲 234 筆國家賠償的申請，其中就有 83 筆申請原因與路面不平、破損、坑洞、孔蓋不良有關。自民國 98 年至民國 106 年期間與路面不平、破損、坑洞、孔蓋不良有關的申請案件甚至高達 646 件(臺北市政府法務局，



2018)，其中以道路坑洞為申請數量最高的原因，可見損壞的鋪面對用路人安全有直接的影響。由圖 1.2 中可看出自民國 98 年開始推動路平專案後申請案件數量呈現減少的趨勢，但民國 103 年後卻又開始提高，可見長期的道路維護與管理才能提供用路人穩定舒適的道路。

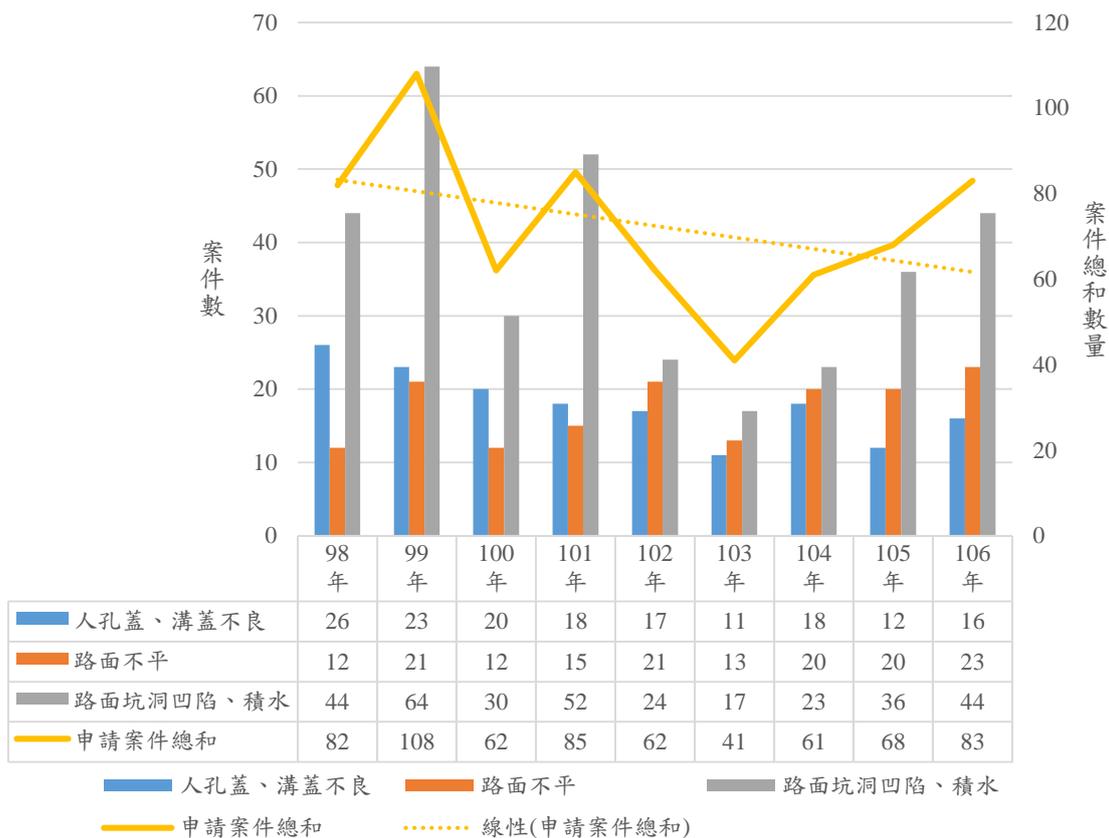


圖 1.2 民國 98 年至 106 年臺北市國賠案件申請原因統計圖

在道路維護的標準中，路面毀損至何種程度才需維護與驗收通過的門檻等因為各地區對道路平整度要求不同，故目前世界各國的道路驗收規定並無統一。以台灣為例：不同單位對新工道路之平坦度檢驗要求也有所出入，如表 1.1。除了各單位對新鋪道路有不同檢驗規範外，台北市與新北市對新工道路檢核也有自己的規範。光是臺灣就有至少五種不同的平坦度檢驗標準(公共工程委員會，2017；交通部高速公路局，2018；交通部，2014；交通部公路總局，2018；臺北市政府工務局，2010；新北市政府養護工程處，2018；內政部營建署，2014)，受限於量測人

員、設備與經費等因素，採用何種規範與量測方式最能有效率的體現出路面狀況並無絕對的答案，因此道路平整度的量測方式與門檻訂定仍有討論空間。

表 1.1 我國現行一般新工道路平坦度檢驗規範

規範頒定單位	計算參數	分批方式	門檻值	
公共工程委員會	一般道路	單點高低差	無	< 6 mm
		平坦度標準差	無	S < 2.6 mm
		國際糙度指標	無	IRI < 3.5 m/km
交通部	高速公路	單點高低差	無	< 3 mm
		平坦度標準差	無	S < 2.4 mm
		國際糙度指標	無	IRI < 1.75 m/km
交通部	一般道路	單點高低差	無	< 6 mm
		平坦度標準差	200 公尺	S < 2.8 mm
	高速公路	單點高低差	無	< 3 mm
營建署	高速公路	平坦度標準差	200 公尺	S < 2.4 mm
	一般道路	單點高低差	無	< 6 mm
		平坦度標準差	無	S < 2.6 mm
營建署	一般道路	國際糙度指標	無	IRI < 3.5 m/km
	高速公路	國際糙度指標	無	IRI < 1.75 m/km
	一般道路	平坦度標準差	200 公尺	接受區: S ≤ 2.8 mm 懲罰區: 2.8 < S ≤ 3.4 拒絕區: S > 3.4 mm
公路總局	快速道路	平坦度標準差	200 公尺	接受區: S ≤ 2.4 mm 懲罰區: 2.4 < S ≤ 2.8 拒絕區: S > 2.8 mm
高速公路局	一般道路	單點高低差	無	< 3 mm
台北市政府	一般道路	平坦度標準差	無	S < 2.6 mm
	快速道路	平坦度標準差	無	S < 2.4 mm
新北市政府	國際糙度指標	200 公尺	合格區: IRI < 3.5 m/km 改正區: 3.5 < IRI < 4.2 重做區: IRI > 4.2 m/km	



目前各國常使用的鋪面品質評估指標分別為鋪面狀況指標(Pavement Condition Index, PCI)、國際粗糙度指標(International Roughness Index, IRI)以及單點高低差與平坦度標準差指標，其中又以 IRI 使用最為廣泛(Aydın et al., 2017; Hu et al., 2017)。PCI 指標是以人工或機具輔助調查鋪面表面的受損情形，藉此獲得鋪面之平坦度與服務力。IRI 指標為根據剖面資料計算出的成果，為測試路段的縱向高程差與路段長度的比率。單點高低差與平坦度標準差指標則是直接量測鋪面真實縱剖面變化之情形。多用於檢視新鋪路面之施工一致性與施工水準，有量測方法簡易、設備便宜等優點。

平坦度量測設備依量測方式可分為兩種，分別為剖面式平坦儀(Profilograph)與慣性式平坦儀(Inertia Profilometer)。剖面式平坦儀是直接量測路面真實縱剖面變化，如三米直規。而慣性式平坦儀則為非接觸式的檢測儀器，藉由多種感測器量測車身之垂直位移改變量，與鋪面間的距離相減獲得鋪面縱向剖面之高程差值。

1.2 研究動機與目的

由上述背景可知當路面不平整時，用路人的行駛舒適度將會降低，造成交通意外的機率也跟著提高。為使人民能有更好的用路體驗，各縣市政府正積極進行道路整修計畫，由此可知道路維護的重要性。

此外，現行常用之平坦度指標與量測設備主要是為了獲得道路鋪面之糙度、紀錄路面之起伏，著重於求得道路鋪面真實的幾何變化，較無著墨於路面起伏對乘客造成的不適影響。目前最常用於檢視新工路面的施工一致性與施工水準的設備為三米直規(張孟孔等，2007)，因其具有設備便宜，操作容易的優點，但缺點為需以人工移動，效率不彰。IRI 量測速率雖然較高，但檢測儀器價格昂貴、需由經過訓練的專業人員進行操作並非各單位皆能負擔。因各單位選用不同設備進行檢測、對路面平坦度的需求不同等因素，檢驗門檻也無統一的規範。

另外依常理而言，以不同車速行駛過相同的路面凸起如人孔蓋，車速快者理



應感受到快速且較劇烈的振動；車速慢者雖同樣感受到明顯上下起伏，但人體感受之振動加速度相對較小，因此大大降低不適感。根據交通部公路總局之「施工說明書-技術規定」中瀝青混凝土鋪面篇內容提及，若設計行車速率小於40km/hr之路段，可免辦平整度檢驗(交通部公路總局，2012)。可見當車速緩慢時，用路人對平整度的感受相對較低。而國際糙度指標需保持在定速下進行測定，透露出行車速度對平整度量測有一定影響。

依據上述研究動機，本研究之主要目的可分為以下三大點：

- (一) 運用簡單設備進行平坦度量測，提高量測效率。
- (二) 將車速的影響排除，使未來在進行路面平整度量測時，可採任意車速進行量測，再推估至各車速所適合的標準。
- (三) 將人體對振動的感受列入平坦度良莠之考量，整合(一)、(二)兩點設計出一套可快速量測且能更真實表達出人體感受的方法進行道路平坦度與舒適度評估。

1.3 論文架構

本論文共分為五章，各章說明如下：於第一章前言中介紹鋪面維護的重要性與常見的量測設備，同時帶出目前在進行道路平坦度量測時的挑戰：包含檢驗門檻並統一規範、車速與人體感受對舒適度評估的影響等，由此衍生出本研究之主要目的。於第二章文獻回顧中對常用的平坦度量測方法與設備進行整理，對現有方式進行充分了解。第三章則是在了解道路檢測流程後根據本研究目的提出一套完整的資料收集、處理、分析方法，並在實際收集研究資料後依照此方法完成道路平坦度與舒適度評估撰寫於第四章。最後於第五章中對研究成果提出討論與未來建議。



Chapter 2 文獻回顧

為設計一套道路平坦度量測與舒適度評估之方法，本章首先將針對目前國內外常用的鋪面狀況指標、鋪面平坦度指標與量測設備進行介紹，接著回顧舒適度評估指標。由於路面不平整造成的振動感是影響用路人舒適度的最大因素，而振動大小一般又以加速度表示，因此最後一節將對加速規型式與相關應用進行回顧。

2.1 鋪面狀況指標

鋪面狀況指標(Pavement Condition Index, PCI)是判斷鋪面服務能力的重要指標。該指標是以人工或機具輔助調查鋪面表面的受損情形，藉此獲得鋪面之平坦度與服務力，並可以此作為鋪面維護的早期判斷依據(ASTM D6433-16, 2016)。判斷的流程首先為對鋪面進行現況調查，根據規範內容判斷鋪面破壞種類與嚴重程度(如圖 2.1)，以面積為單位，將其記錄至損壞調查表。再依破壞面積所佔道路面積的比例對應至折減值(如圖 2.2)。最後自滿分 100 將折減值一一扣除，將得到的分數對應至表 2.1 後即可知道該路段之鋪面狀況，並了解該段道路現階段的維護工作(Shan et al, 2013)。



圖 2.1 鋪面龜裂嚴重程度示意(a)輕級(b)中級(c)重級 (內政部營建署，2002)

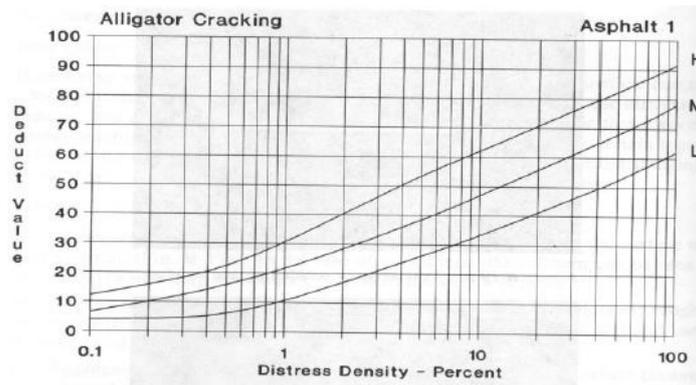


圖 2.2 折減值對照表-以龜裂為例 (ASTM D6433-16, 2016)

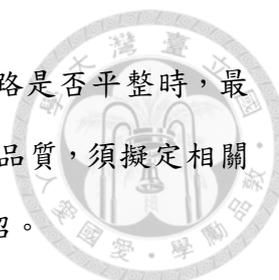
表 2.1 PCI 指標分級與建議維護工作 (Boyapati and Kumar, 2015)

PCI 值	等級	建議維護工作
100~85	極好 (excellent)	預防性養護
85~70	很好 (very good)	
70~55	好 (good)	例行性養護
55~40	尚可 (fair)	
40~25	差 (poor)	
25~10	很差 (very poor)	大型性整修
10~0	不及格 (failed)	

PCI 指標之優點為可以明確反應出路面的好壞，提供管理者決定維護工作的優先順序(Boyapati and Kumar, 2015)。但因檢測者對破壞嚴重程度的判定十分主觀，使用人工判視較容易疏忽細小的裂縫，但在重要地點如機場鋪面，一條細小的裂縫卻可能導致嚴重的後果(陳怡先，2004)。因此目前也有使用雷射道路裂縫量測系統(Laser Crack Measurement System, LCMS)進行客觀的裂縫偵測從而計算 PCI 的方式(Mulry, 2015)。

2.2 鋪面平坦度指標

鋪面平坦度(smoothness)又稱為糙度(roughness)，是路面頂層縱向與橫向的起



伏特徵，平坦度對用路人的舒適度有最直接的影響。在判斷道路是否平整時，最直觀的方法便是觀察路面是否有凹凸不平的情形。為維護道路品質，須擬定相關指標做為道路維護之規範，本節針對常使用的幾種指標進行介紹。

2.2.1 國際糙度指標

國際糙度指標(International Roughness Index, IRI)是目前國際間最常使用的路面平坦度指標(Aydın et al., 2017 ; Hu et al., 2017)，其發展歷史可由 1960 年代由 Spangler 與 Kelley 發展出的四分車模型說起。四分車模型是作為量測路面平坦度的標準車型，四分車是指在車體的其中一個輪胎中裝置包含懸吊彈簧與阻尼的機械式構造(如圖 2.3)，以模擬車上乘客在經過車體上下振動時的反應(Spangler and Kelly, 1964)。之後，越來越多學者以四分車模型對鋪面進行平坦度的量測，也發展出許多類似的平坦度指標。

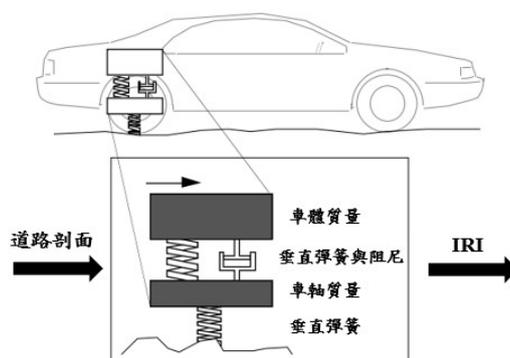


圖 2.3 四分車模型與其構造(修改自 Sayers and Karamihas, 1998)

直到 1982 年，世界銀行為了使平坦度指標標準化以利維護與管理，在巴西進行了國際糙度實驗(International Road Roughness Experiment, IRRE)，發現各研究中所使用的量測儀器與指標間存在可互相轉換的關係，於是建立了國際通用的粗糙度指標 IRI (Sayers, 1986)。研究顯示在模擬資料中，當模擬車速在 80 公里時所求得的 IRI 值與實際道路剖面最為符合(Sayers, 1995)，因此，美國材料試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)定義 IRI 為以四分車模型在時速 80 公里行駛下，測試路段的縱向高程差與路段長度的比率。因此 IRI 值越小，路



面越平整。其單位均採用國際標準制，以高程差除以路段長表示，常用單位如 m/km、cm/km，英制單位僅供參考使用(ASTM E1926-08, 2015)。

圖 2.4 為柔性鋪面之 IRI 分級表，路面 IRI 值一般落於 1~12m/km 之間，大致分為 5 個等級，圖中可見不同等級對應的駕駛感受與路面破壞類型。臺北市政府對新工路面檢驗標準為 IRI 值不得大於 3m/km，新北市政府則是規定小於 3.5m/km 為合格，大於 3.5m/km 需改正或是刨除重鋪(表 1.1)。

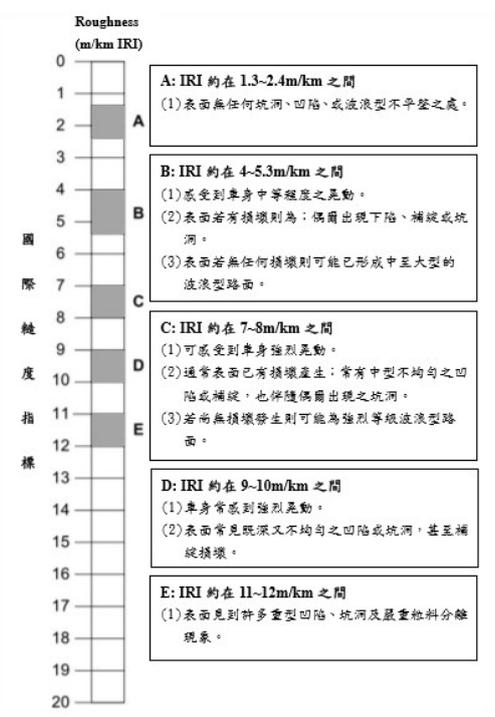


圖 2.4 柔性鋪面之國際糙度指標分級圖(林宜蓉，2012)

雖然 IRI 已經發展許久，但仍有不足之處。IRI 指標中僅考慮道路的高程差變化，卻沒將人體對於垂直震動時產生之加速度感受加入。Hu et al (2017)在研究中提到，當 IRI 值大於一臨界值後，行駛於上將對駕駛之舒適度與安全性影響有急升的趨勢。此外，由於 IRI 的計算方式是將高程差值除以路段長，如此將可能發生一路段之 IRI 檢測結果良好，但卻仍有坑洞在路上；或是兩路段之 IRI 值相同，但行駛在上時的感受卻截然不同的情形(Kropáč and Múčka, 2005)。



2.2.2 單點高低差與平坦度標準差

單點高低差是由剖面式平坦儀(見 2.2.1 節)量測而得，可用來檢視路面上是否有異常的凸起或凹陷；平坦度標準差則是計算檢測路段所有單點高低差的標準差，表示資料的一致性。由於剖面式平坦儀輸出成果是以離散取樣方式獲得，因此無法完整反應出道路剖面情形，自不同起始點量得的單點高低差也會不同(圖 2.5)，但其量測方法簡易、設備便宜，又因標準差可用來表示資料的一致程度，故單點高低差與平坦度標準差多用來評估施工品質的好壞。單點高低差計算式如式(2.1)，其中 d 為剖面式平坦儀中軸處的單點高低差； h 為高程值； i 為剖面式平坦儀中軸的位置； $i+1$ 是前輪位置，為中軸+1.5m 處； $i-1$ 是後輪位置，為中軸-1.5m 處。

$$d_i = h_i - \frac{1}{2}(h_{i-1} + h_{i+1}) \quad (2.1)$$

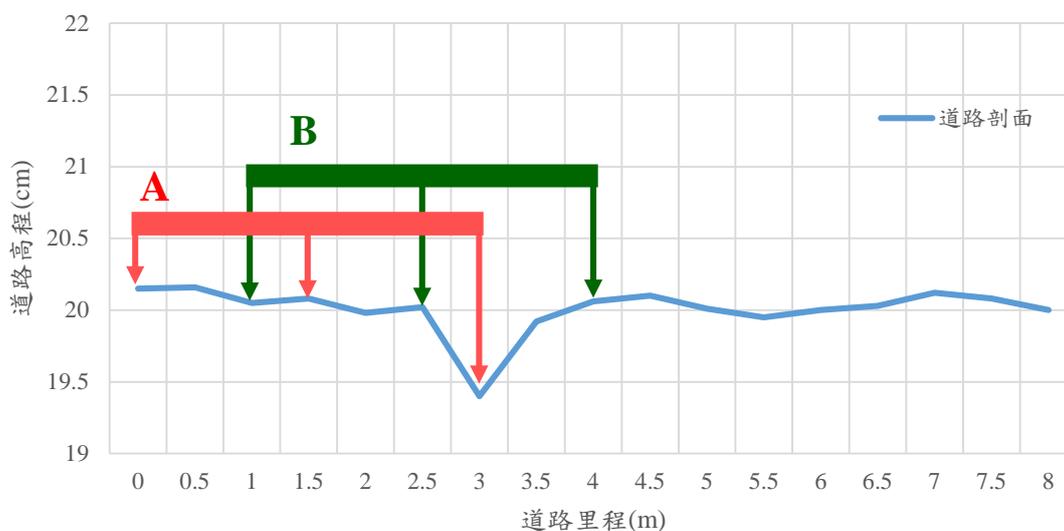
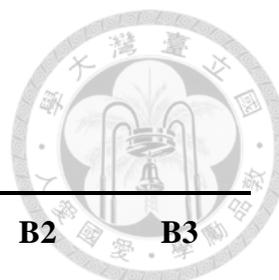


圖 2.5 以不同起始點進行單點高低差量測示意圖

表 2.2 為由不同起始處量測而得的單點高低差，A 組數據為由 0 公里處為起始點，量得之單點高低差由 A1、A2 等表示；B 組則由 1 公尺處為起始點，量得的單點高低差由 B1、B2 等表示。A1、A2、A3 因為有量測到凹陷處，所以單點高低差比另 4 點來得大；而 B 組數據因剛好掠過不平處，計算出來的單點高低差就



小很多，可見由不同起始點進行量測會導致成果的差異。

表 2.2 不同起點之單點高低差量測成果

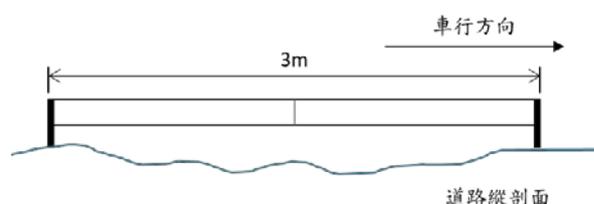
點號	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
(里程處)	(1.5m)	(3.0m)	(4.5m)	(6.0m)	(2.5m)	(4.0m)	(5.5m)
單點高低差	0.305	-0.69	0.4	-0.09	-0.035	0.075	-0.14

2.3 平坦度量測儀器

最常用來進行粗糙度調查的儀器依據其量測方式可區分為兩種，分別為剖面式平坦儀與慣性式平坦儀。本節將對此兩種平坦儀與其他發展中的量測方式進行回顧。

2.3.1 剖面式平坦儀(Profilograph)

剖面式平坦儀顧名思義是量測道路之剖面，利用記錄輪記錄路面起伏，直接量測鋪面真實縱剖面變化之情形，如三米直規(Straightedge)與高低平坦儀。



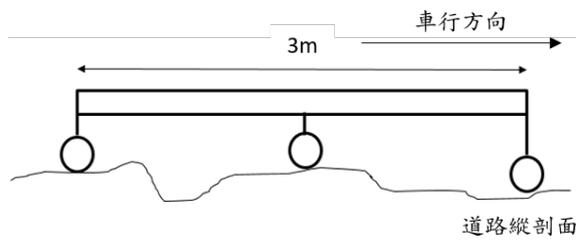
(a)



(b)

圖 2.6 三米直規(a)示意圖；(b)實際照片(台灣儀器網，2019)

三米直規是我國普遍使用於路面量測之儀器。其構造為 3 公尺之金屬橫條(如圖 2.6)，於前後端點各有一固定高度的凸角可立於路上，量測時由檢測人員放置於路面，利用三角量規量測三米直規中點與路面的縫隙，透過式(2.1)即可獲得單點高低差。但三米直規在進行量測時須以人工移位，過程緩慢、效率不彰，因此發展出



(a)

(b)

圖 2.7 高低平坦儀(a)示意圖；(b)實際照片

可連續記錄之高低平坦儀(如圖 2.7)，下方有 3 個記錄輪，分別在最兩端與正中間，記錄輪可上下伸縮，中央記錄輪具備標記與讀數設備，可讀取中點與另外兩記錄輪平均值之高程差值並自動將路面高程變化記錄於紙捲或電腦中(陳弘章，2006)。

2.3.2 慣性式平坦儀(Inertia Profilometer)

慣性式平坦儀為改良式的鋪面檢測儀器，它由加速規、位移感測器、距離感測器與電腦組成。其運作之基本原理為利用加速規量測數值，經兩次積分後得到車身之垂直位移改變量，再與位移感測器量得之車身與鋪面間的距離相減，即可得到鋪面縱向剖面之高程差值。其優點為設備輕巧可以裝設於任何車型。

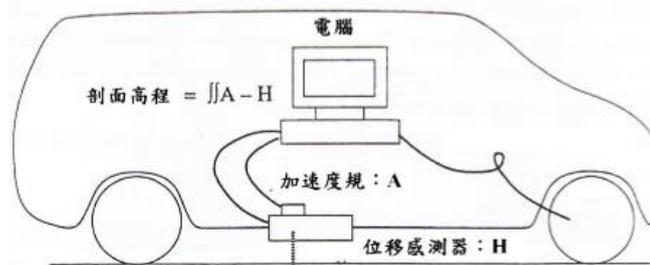


圖 2.8 慣性式平坦儀示意圖(施雅蓉，2011)

2.3.3 其他發展中量測方法

除了傳統剖面式平坦儀與慣性式平坦儀外，近年來也有學者發展其他鋪面檢

測方式，如 Han et al. (2016)利用光學影像輔助雷射測距儀進行道路剖面測量，於檢測車上安裝攝影機同時記錄鋪面表面影像，除了可蒐集路面縱向剖面資料，亦可搭配攝影機同時記錄鋪面表面影像，進行裂縫偵測、PCI 指標調查等應用。



2.4 舒適度評估指標

2.4.1 ISO 2631-1 人體全身振動量測方法

在進行機具操作或長時間駕車時，作業人員經常暴露在振動的環境中，振動感不只會使人體感到不適，據研究顯示，長時間下來更可能造成嚴重的身體傷害且可能降低工作表現與警覺度(Park et al., 2013)。為了作業人員健康與工作時間考量，國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)於 1974 年訂定了全身振動暴露評估指引，以傳播至人體全身且振動頻率為 1~80Hz 之振動，考量了人體健康因素與對振動之忍受力，提出 ISO 2631-1 規範。規範中又分為坐姿、臥姿與立姿三種情形，車輛駕駛以坐姿為主，故此處只討論坐姿的部分。

ISO 2631-1 規定，振動量測方向之座標設定為以人體中心原點，向人體正前方延伸為 X 軸，向左為 Y 軸，向上為 Z 軸。當人體位於移動物體上時，座標軸原點下移至臀部與移動物相交處(International Organization for standardization, 1997)，如圖 2.9。振動的大小則是量測 X、Y、Z 三方向的加速度值，Z 方向提供路面起伏時之垂直振動加速度，X、Y 方向之加速度則是與車輛行進間之加減速與轉彎有較大關聯。

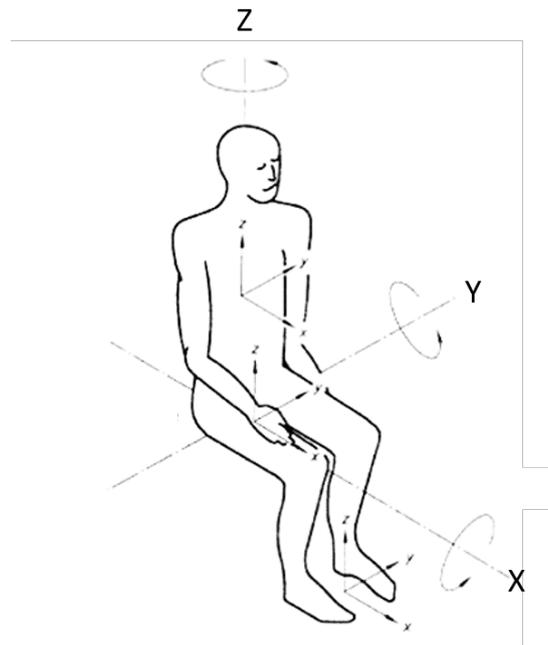


圖 2.9 振動量測方向座標位置圖—坐姿(修改自 International Organization for Standardization, 1997)

振動的大小會直接影響舒適度。當振動越大，產生之加速度也越大，因此規範以加速度大小作為評估標準，將舒適度的感受分為六個級別，分別是不會不舒適、有點不舒適、較為不舒適、不舒適、非常不舒適與極度不舒適，以此作為舒適度之參考。

2.4.2 行駛指標(Ride Number, RN)

由美國聯邦公路總署(Federal Highway Administration, FHWA)依據道路平坦度與用路人感受度之相關研究發展出的行駛指標，是使用慣性平坦儀量測剖面變化，並同時請一般用路人對道路平坦度以主觀的方式進行問卷評分。後根據兩個結果評估出該路段的行駛指標 RN 值(Holzschuher et al, 2011)。

$$RN = 5e^{-106PI} \quad (2.2)$$

其中 PI 如式(2.3)， PI_L 為檢測車輛左輪的剖面變化； PI_R 為右輪的剖面變化。



$$PI = \sqrt{\frac{(PI_L^2 + PI_R^2)}{2}} \quad (2.3)$$

RN 值由 5~0 對應路面服務水準，5 為最舒適，0 則是路面已到難以通行的程度，其餘分級詳見表 2.3。

表 2.3 RN 值對應的路面服務水準(陳怡先，2004)

RN 值	路面服務水準
5 ~ 4.5	Perfect
4.5 ~ 4	Very good
4 ~ 3	Good
3 ~ 2	Fair
2 ~ 1	Poor
1 ~ 0.5	Very poor
0.5 ~ 0	Failed

2.5 加速規型式與應用

加速規主要用於感測物體動態與靜態的加速度反應。動態加速度指物體在移動狀態下朝某特地方向產生之加速度變化量；靜態加速度則是物體本身受到重力的影響而產生的加速度，在地球上的物體受到地球重力的影響，均會產生垂直方向之重力加速度，其近似值約為 9.81m/s^2 ，但因地球質量分布不均，各地之重力加速度值會有微小差異，必須實地量測後才能得知。

依據不同的訊號傳遞方式，加速規可大致分為壓電式、電容式與壓阻式三種。

1. 壓阻式加速規

壓阻式加速規是最原始的加速規型式，其原理為利用感測器受到振動後之變形產生壓阻變化，透過輸出的壓阻係數轉換成電壓，進而感測其加速度大小(如圖 2.10)。雖能利用簡單的機械技術製造，但因量測時



消耗能量大、容易受溫度等外在環境影響，因此不適合在高精確度的場合中使用。

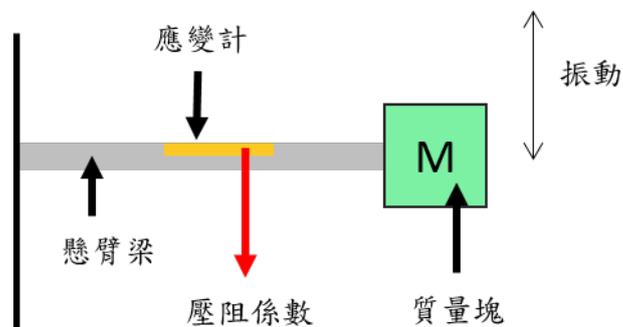


圖 2.10 壓阻式加速規示意圖

2. 壓電式加速規

壓電式加速規與壓阻式概念相同。差別在於壓電式加速規是利用壓電元件接收所受到來自振動的機械變化量，透過壓電效應轉將變化量換成電荷訊號輸出，藉由讀取電壓變化進而求得加速度值(如圖 2.11)。

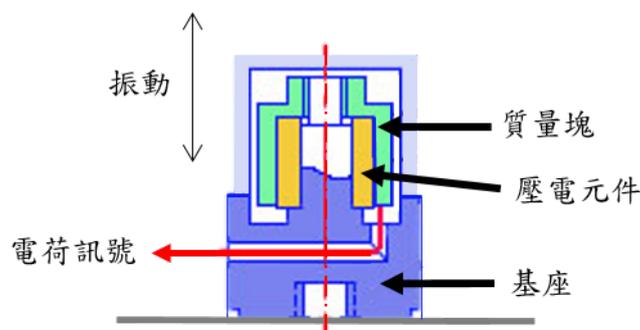


圖 2.11 壓電式加速規示意圖

3. 電容式加速規

電容式加速規是由帶有電極的平行電極板組成，藉由移動、震動時電極板之間距離改變產生的電容變化推得加速度(如圖 2.12)。電容式加速規體積小、穩定度高且相較另兩種型式，其加速度感應範圍與人體較為接近，已經廣泛應用在電子產品中。

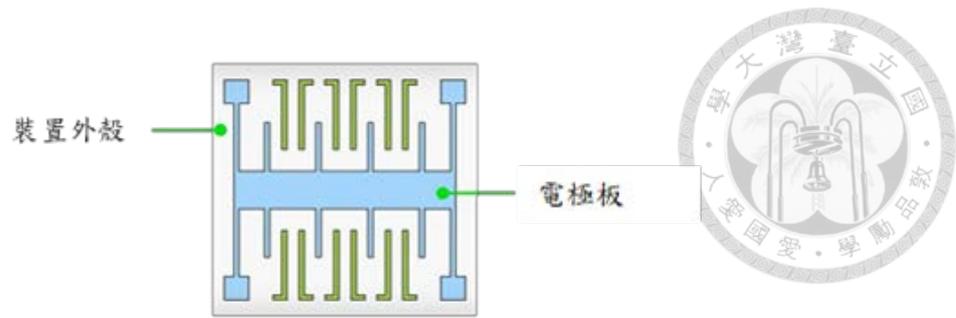


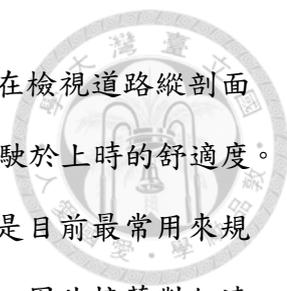
圖 2.12 電容式加速規示意圖

加速度量測方向又可分為單軸向與多軸向，普通加速規多為單軸向，當要量測多軸向加速度時，傳統作法為架設多個單軸向加速規，藉以量測不同軸向之訊號。但多個感測器組合起來不但體積偏大、製作成本較高更有增加系統誤差的風險(Beravs et al., 2012)，因此新式多軸向感測器則改為將數個微感測器設計於單一晶片上，利用微感測器的分布位置與晶片結構設計來量測不同軸向之電壓變化，經由類比數位轉換後得到各軸向之加速度變化。因晶片體積微小，可大量應用於手機、遙桿等小型設備中。除此之外，因晶片包覆於設備中，可減少感測器受塵埃干擾，而非接觸式感測器也可避免接觸性機械破壞，大幅提升感測器之使用年限。

由於機電技術日益成熟，加速規感測器體積越做越小之外，精確度與穩定度也比從前更加進步。在大量生產之下，價格也比以往便宜許多。如今，加速規被廣泛應用在日常生活用品中，無論是手機、相機或是汽車中都有加速規的蹤影，如手機、VR 實境中的動作感測，相機的防手震功能，汽車安全氣囊的撞擊感測等(Luczak et al., 2006)。在土木工程上主要應用在結構、隧道、邊坡等傾斜監測上(Pedley, 2013)，利用三軸加速規感測器蒐集三軸資訊後進而計算傾斜角，利用監控傾斜角達到監控、確保結構安全(彭信華，2009)。

2.6 小結

回顧目前常用的道路平坦度指標與其量測方法、設備，主要還是以量測道路鋪



面的幾何變化為主，包含單點高低差與平坦度標準差、IRI 都是在檢視道路縱剖面的起伏變化，並未連結人體感受，因此無法確切反映出用路人行駛於上時的舒適度。為了解人體感受評估方式，透過文獻回顧可知 ISO2631-1 指標是目前最常用來規範舒適程度的指標，其是以振動產生的加速度大小做為評估方式，因此接著對加速度規型式與目前應用進行了解，其中電容式加速規感應頻率範圍雖不如壓電式與壓阻式廣，但因其感應範圍與人體較為接近且價格便宜，因此以電容式的晶片微感測器最為廣泛使用。透過充分理解道路平坦度量測流程後，即可對研究方法提出規畫準備。



Chapter 3 研究方法

為了達到研究目的，本研究整合文獻回顧後將主要研究流程分為三大部分執行，分別是(1)建立一套以智慧型手機收集道路平坦度資料之方法(2)建立道路平坦度資料處理程序(3)建立行車舒適度評估方式，研究方法流程圖如圖 3.1 所示，詳細處理步驟於後續各小節依序說明。

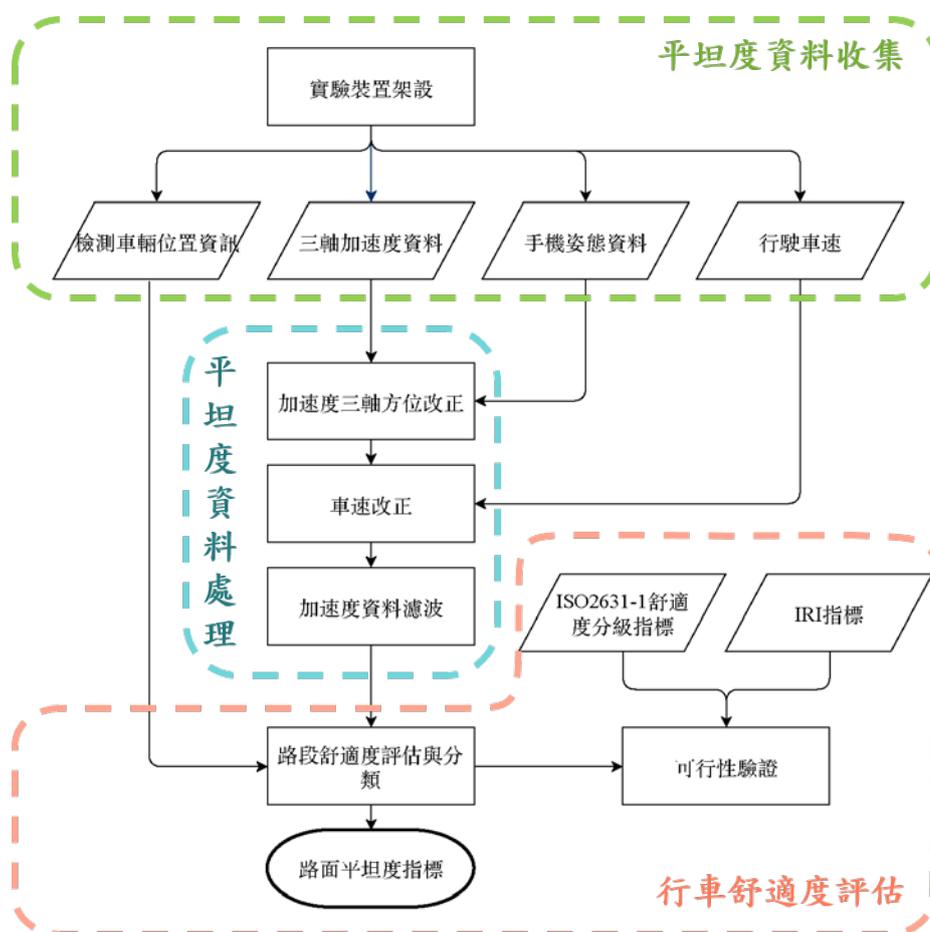


圖 3.1 研究方法流程圖

3.1 道路平坦度資料蒐集

以往在進行道路平坦度檢測時，都是將各種不同的感測器分別安裝在檢測車上，常會造成線材配置、電源供應、設備中心偏差等問題。近年來手機發展日益成

熟，不只內建多種感測器如 GNSS、三軸陀螺儀、加速規等，體積小、售價便宜等優點更讓手機普及化。多位學者也因此使用手機內建感測器進行各種研究，如人體活動、健康監控(He and Li, 2013; Sousa et al., 2017)；室內定位(余宗鴻，2017)；道路平坦度量測(Douangphachanh and Oneyama, 2014; Zang et al., 2018)等，研究成果皆顯示智慧型手機已經是發展成熟且穩定的量測設備。因此本研究使用手機作為鋪面平坦度的量測工具，藉由手機內建三軸加速度規收集車輛行駛時三軸向的加速度值，使用三軸陀螺儀收集手機三軸姿態角，得知手機擺放角度，內建之 GNSS 接收器則可獲得位置資訊與量測車速，將收集資料分別存成 JSON 資料格式，透過 Node.js 編程，將手機端 JSON 檔回傳至研究室伺服器以進行後續的資料處理(如圖 3.2)。

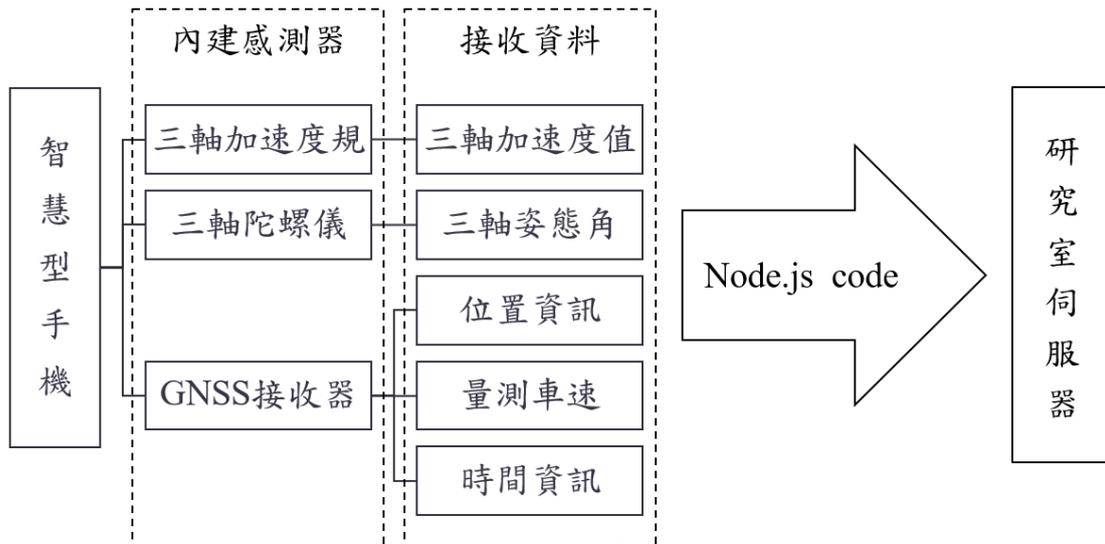


圖 3.2 道路平坦度資料收集流程圖

3.2 道路平坦度資料處理

本節之目的為利用智慧型手機中各感測器獲得的鋪面平坦度檢測資料在經過一系列處理後獲取與車輛垂直方向相同的垂直方向加速度值。為達此目的，本章可再細分為三步驟，分別如下，各步驟詳細方法將於接下各小節介紹。

- (1)使用三軸加速度與三軸姿態旋轉角資料，對加速度三軸方位進行改正，使



手機三軸方向確實對應至車輛三軸方向。改正完畢後獲得與量測車輛方位相同的加速度值。

(2)將不同車速下量得之加速度換算至設計車速時的加速度值。因車速會影響加速度值的量測，透過此步驟可消除車速對加速度值造成的影響。

(3)對經過三軸方位改正與車速改正後的加速度資料進行濾波處理，僅保留人體感受範圍內的加速度值，並以此進行後續舒適度評估與分類的作業。

3.2.1 三軸加速度方位改正

三軸加速規雖會提供三個方向之加速度數值，但因加速規在擺放時無法與量測車輛之三軸方向完全吻合，使得智慧型手機中加速規感測器之三軸方向與量測車輛之三軸方向有所偏差，如此獲得的其中一軸之加速度值將包含另外兩軸的資訊。智慧型手機與量測車輛之 x 、 y 、 z 三軸方向如圖 3.3、圖 3.4 所示。智慧型手機中 y 軸為手機頂端為正， z 軸則以手機面板方向為正， x 軸遵照右手定則以右方為正；量測車輛則是以車頭方向為 y 軸正方向， z 軸以車頂方向為正， x 軸據右手定則以駕駛之右手方向為正。

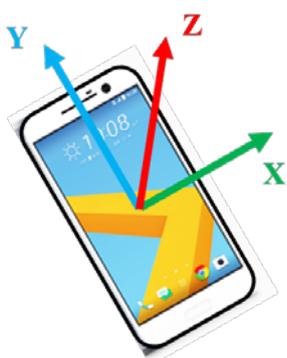


圖 3.3 手機三軸方向示意

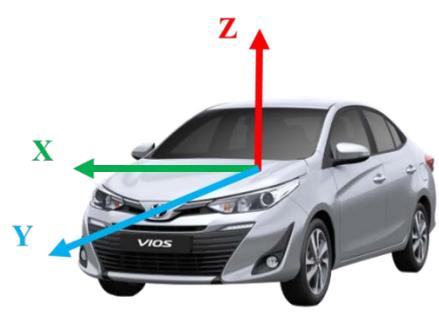


圖 3.4 量測車輛三軸方向示意圖

智慧型手機內的陀螺儀感測器可以感測手機的擺放角度 α 、 β 、 γ 角，其中：
 α 角為繞著 Z 軸旋轉的角度，數值由 0 度至 360 度，表示手機在水平面上的旋轉角度。不同廠牌的手機其 α 角 0 度時的定義不同，可分為兩種：(1)以北方為



α 角0度位置(2)以手機開始紀錄瞬間的 y 軸方向為初始值 0 度。如圖 3.5(a)。

β 角為繞著 X 軸旋轉的角度，數值由-180 度到 180 度，代表手機的俯仰角度。

β 角0度時代表手機為水平狀態，180度則是直立狀態，如圖 3.5(b)。

γ 角為繞著 Y 軸旋轉的角度，數值由-90 度到 90 度，表示手機側向傾斜的程度。

γ 角0度時手機為水平狀態，90度時則是側邊立起的狀態，如圖 3.5(c)。

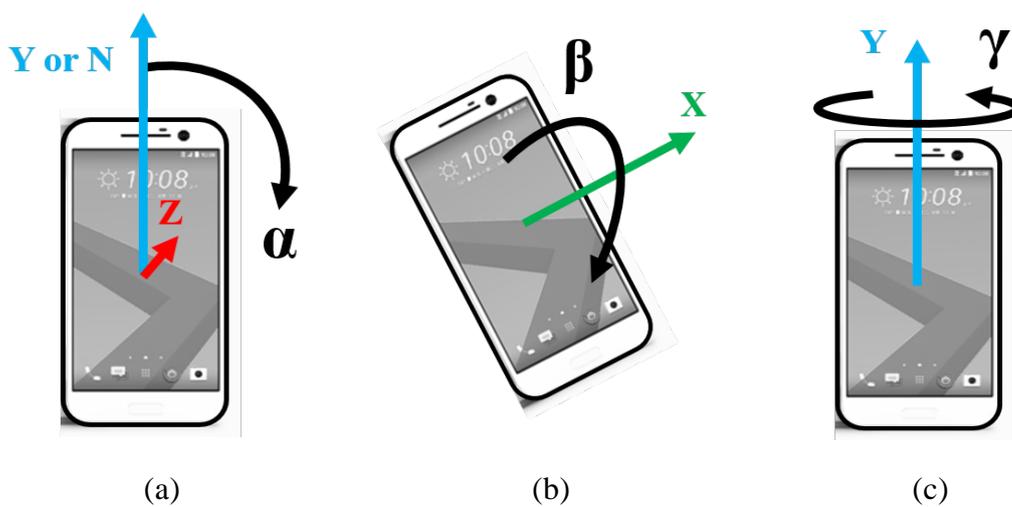


圖 3.5 三軸姿態角 α 、 β 、 γ 示意圖(a) α 角；(b) β 角；(c) γ 角

三軸加速度規於 x、y、z 軸收集到的智慧型手機三軸加速度值分別是 a_x 、 a_y 、 a_z ，將手機量得的三軸加速度值乘上由手機三軸姿態角所組成的旋轉矩陣 M_x 、 M_y 、 M_z 進行旋轉後，即可將 a_x 、 a_y 、 a_z 轉正至與量測車輛之 X、Y、Z 方向相同的加速度值 A_X 、 A_Y 、 A_Z 。但由於 α 角會隨車行方向改變(如圖 3.6)，若對 α 角進行旋轉改正，會導致改正後的 y 軸方向與實際車行方向不符，改正後的水平方向加速度 A_X 、 A_Y 將無法確實反映出車行方向與車體左右晃動的加速度行為，因此不須對 α 角進行旋轉。三軸方位改正數學式如式(3.1)所示：

$$\begin{bmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{bmatrix} = M_y M_x \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

其中 M_x 、 M_y 分別為對應手機三軸 x、y 方向的 3×3 旋轉矩陣，由手機姿態角 β 、 γ 所組成，如式(3.2)、式(3.3)所示：



$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

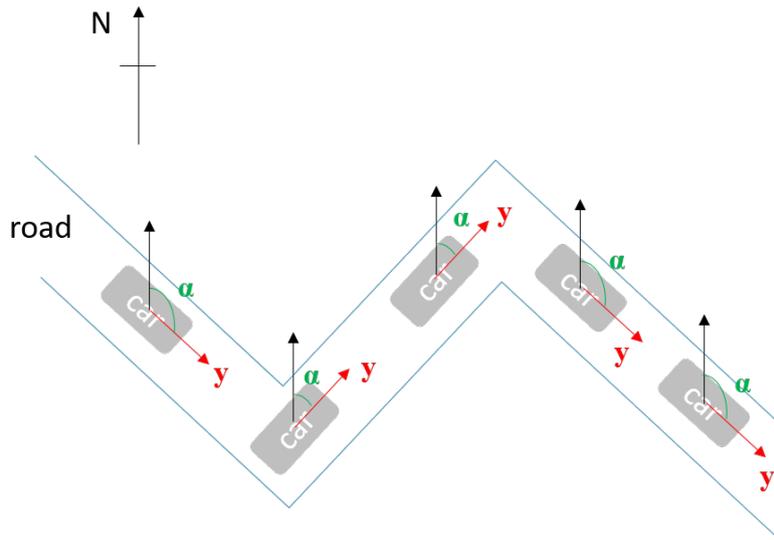


圖 3.6 α 角與車行方向關係示意圖

ISO 2631-1 規範中提到，振動的大小是由三軸方向的加速度值決定。垂直方向的加速度提供路面起伏時之垂直振動大小資訊，水平方向之加速度則與車輛行進間之加減速與轉彎有較大的關聯。因此在獲得改正後的三軸加速度值 A_x 、 A_y 、 A_z 後，只須採用與路面振動最有關係的垂直方向加速度 A_z 進行後續的資料處理與分析即可。

3.2.2 不同車速之加速度改正

目前在進行道路檢測時均使用固定車速量測方式，即保持定速行駛過待測路段。但因車輛起步、停等紅燈、前車阻擋等因素，實際上很難達到整個路段都使用定速量測的理想。本研究透過加速度與速度間之關係，將加速度值換算至設計車速的情形再進行後續處理。如此一來，即使量測過程中車速改變，也能利用此相關性進行修正，改變以往只能使用定速量測的方式。



若以車速 V 通過一與地面夾角 θ 的凸起(圖 3.7)，車速可以分解成垂直速度 V_v 與水平速度 V_h ，如式(3.4)、式(3.5)。當車速越快， V_v 與 V_h 也會越快。

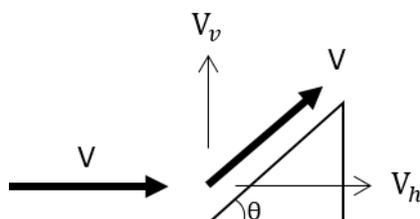


圖 3.7 速度 V 分解成垂直方向 V_v 與水平方向 V_h

$$V_v = V \times \sin \theta \quad (3.4)$$

$$V_h = V \times \cos \theta \quad (3.5)$$

由於加速度可表示成車速對時間的微分如式(3.6)：

$$a = \frac{dV}{dt} \quad (3.6)$$

而用路人的不適感來源主要為垂直方向的加速度，因此在單位時間 t 下的垂直方向的加速度 a_v 可以由式(3.6)與式(3.4)改寫為式(3.7)：

$$a_v = \frac{V_v}{t} = \frac{V \times \sin \theta}{t} \quad (3.7)$$

車速為設計車速 V_R 時的垂直向加速度 a_{vR} 與車速為實測車速 V_i 時的垂直加速度 a_{vi} 如式(3.8)與式(3.9)：

$$a_{vR} = \frac{V_R \times \sin \theta}{t} \quad (3.8)$$

$$a_{vi} = \frac{V_i \times \sin \theta}{t} \quad (3.9)$$

將式(3.8)與式(3.9)相除後即可得加速度與車速間轉換的關係如下：

$$a_{vR} = \frac{V_R}{V_i} \times a_{vi} \quad (3.10)$$

透過式(3.10)，只要獲得實際量測車速 V_i 與實際量測的垂直方向加速度 a_{vi} ，就可將實際量測垂直方向加速度 a_{vi} 轉換至設計車速 V_R 下的垂直方向加速度 a_{vR} ，讓加速度在相同車速的條件下進行舒適度評估與分類，也改變以往須採用定速檢測的方式。

3.2.3 加速度資料濾波處理

儘管已對三軸方位、檢測車輛車速因素進行改正，去除手機擺放角度、檢測車輛速度對垂直方向加速度收集的影響，但因車體本身引擎運轉、駕駛習慣等因素，難免還是會產生非道路崎嶇所造成的些微振動。ISO2631-1 規範中表示 1~80Hz 的振動對人體造成的影響最為顯著，且人體感受範圍普遍落於此頻域中，因此本研究選擇保留此頻率內的資訊，其餘皆濾除。

方法為首先利用傅立葉轉換將加速度資料 $a(t)$ 由空間域轉換至頻率域為 $g(x)$ ，乘上以 1Hz 與 80Hz 作為頻率區間之函數 $h(x)$ 獲得通帶濾波後的頻率域加速度值 $f(x)$ ，再使用傅立葉逆轉換將頻率域加速度值 $f(x)$ 轉換回時域中，即可消除 1~80Hz 頻率外的訊號。接著收集手機靜止時之頻率作為本身之雜訊參考，將其濾除後即完成濾波處理。

$$f(x) = g(x)h(x) \quad (3.11)$$

$$h(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x < 1 \cup x > 80 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.3 行車舒適度評估

本節將對實地收集鋪面資料並完成 3.2 節資料處理後的垂直加速度資訊，進行道路舒適度評估。透過文獻回顧，本研究選擇目前最常使用的鋪面平坦度評估指標 IRI 與人體舒適度評估指標 ISO2631-1 對經過資料處理後的垂直加速度進行道路舒適度分類，再加入標準差分類法進行評估。詳細方法介紹於各小節中。



3.3.1 以由加速度計算之 IRI 值進行道路平坦度評估

IRI 指標定義為由一路段之高程差值總和除以路段總長，如式(3.13)。其中 Δh 為高程差值， S 為路段總長。

$$IRI = \frac{\sum \Delta h}{S} \quad (3.13)$$

由於高程值是垂直加速度 a_v 的二次積分，而道路總長則是車速 V 的一次積分，透過上述兩關係，可藉由垂直加速度與車速推算出該路段之 IRI 值。高程差值總和與路段總長能改寫為式(3.14)與式(3.15)，其中 t 為量測時間。

$$\sum \Delta h = \iint_0^t a_v dt^2 \quad (3.14)$$

$$S = \int_0^t V dt \quad (3.15)$$

根據式(3.14)與(3.15)可以將式(3.13)改寫成式(3.16)求得路段之 IRI 值：

$$IRI = \frac{\iint_0^t a_v dt^2}{\int_0^t V dt} \quad (3.16)$$

將車速與加速度透過上式關係求得 IRI 值後即可對應至圖 2.4 柔性鋪面 IRI 指標分級表，對檢測路段進行平坦度分類。參考表 1.1 國內不同單位對新工道路平坦度的檢驗標準中，以 IRI 指標作為檢驗規範的單位有公共工程會與新北市政府，兩單位對一般道路檢驗門檻皆訂定 IRI 值小於 3.5m/km 方為合格，因此以 IRI 值 3.5m/km 做為鋪面維護門檻，超過此門檻的路段須優先排定維護工作。

3.3.2 以 ISO2631-1 進行道路舒適度評估

對完成資料處理流程後的垂直方向加速度資料根據 ISO2631-1 指標進行舒適度分類，ISO2631-1 舒適度指標中以垂直方向加速度大小為分類依據，將行駛於檢測道路上的舒適程度從舒適到極度不舒適分為 6 級(如表 3.1)，並針對不舒



適以上的路段進行維護。

由於行駛車速會對垂直加速度大小造成影響，因此可透過 3.3.2 節不同車速之加速度改正方法，將加速度換算至不同速限，評估以不同設計車速通過相同路段時 ISO2631-1 的舒適度變化情形。

表 3.1 ISO 2631-1 舒適度與加速度值之對應(International Organization for Standardization, 1997)

加速度值(m/s^2)	舒適度描述	
< 0.315	不會不舒適	(not uncomfortable)
0.315 ~ 0.63	有點不舒適	(a little uncomfortable)
0.5 ~ 1	較為不舒適	(fairly uncomfortable)
0.8 ~ 1.6	不舒適	(uncomfortable)
1.25 ~ 2.5	非常不舒適	(very uncomfortable)
> 2	極度不舒適	(extremely uncomfortable)

3.3.3 以標準差分類方式評估道路舒適度

假設在平坦道路上有一處突然的凸起，車輛自平坦處行駛過該凸起時會感受到明顯的振動感，相對於前段平坦道路，突如其來的振動感會帶給用路人更大的不適，但由於 IRI 指標是高程差值除以路段長，凸起處會被總長平均化，導致 IRI 指標無法確實反應此現象。而標準差在數學定義中則是可以用來衡量一組觀測量彼此之間的離散程度，也可表示該次量測成果的穩定性。因此可利用標準差的特性找出相對粗糙的路段或平坦道路上異常的凹凸處。

在隨機誤差理論中，偶然誤差的機率分佈圖(probability histogram)可以高斯函式(式(3.17))表示， σ 為觀測量標準差； l 為觀測量； u 為最或是值，圖形呈現高斯分佈曲線(Gaussian distribution)，且約有 68.3% 的資料數落於一倍標準差內；95.4% 資

料數落於兩倍標準差內；99.7%的資料數落於三倍標準差內，如圖 3.8。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}(l-u)^2/\sigma^2\right] \quad (3.17)$$

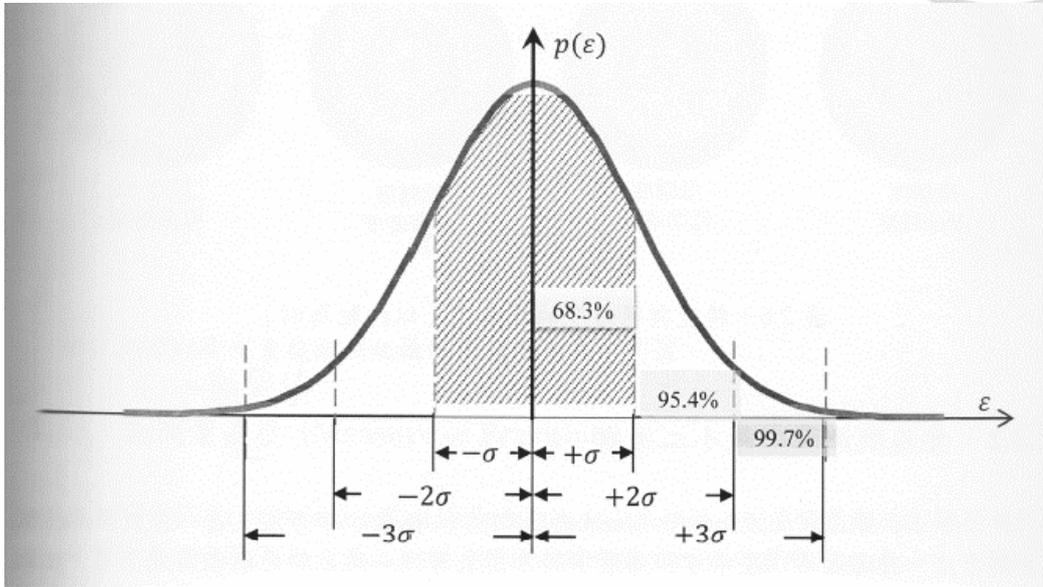


圖 3.8 偶然誤差分佈曲線與發生機率圖

一般以三倍標準差作為判斷觀測量是否為錯誤觀測量的依據，換句話說，超出三倍標準差的資料可視為不正常值。使用標準差特性作為路面平坦度的分類依據時，可將三倍標準差作為門檻值，在單次檢測資料中垂直加速度數值超過門檻值的路段標示成該次檢測資料中不合格的區域，需針對該路段進行維護，而門檻值的訂定日後可根據道路品質要求作調整。

3.4 小結

綜合 3.1~3.3 小節所說明的各項步驟，將研究流程整理如下：本研究建立一套道路資料收集方法，使用車輛搭載智慧型手機行駛於檢測道路，將手機內建感測器量測資料回傳至研究室伺服器，經過完整平坦度資料處理方法後輸出檢測道路的垂直方向加速度值，並將此加速度值以不同方法進行舒適度分類與評估，最後與該檢測路段之實測 IRI 指標進行比較。成果將於下章說明。



Chapter 4 實驗成果與分析

為驗證前述研究方法於實務應用之可行性，本研究將依照上一章節所討論各項處理程序進行實驗與分析，其內容主要包含：(1)實驗設備配置 (2)三軸加速度方位改正成果 (3)量測車速改正成果 (4)加速度資料濾波成果 (5)舒適度分類成果與路段實測 IRI 值之比較 (6)舒適度分類成果展示。

4.1 實驗設備配置

以大眾化之小型客車 Toyota vios 為量測車輛(圖 4.1(a))，其前懸吊系統為獨立麥花臣式懸吊附防傾平衡桿，後懸吊系統為扭力桿式拖曳臂懸吊附防傾平衡桿，車輪軸距為 2550mm。量測設備為 HTC 10 智慧型手機(圖 4.1(b))，內建加速度感測器、數位羅盤、陀螺儀、磁力感測器，可接收 GPS+GLONASS 衛星訊號(HTC，2016)。



(a)



(b)

圖 4.1 (a)Toyota vios 車身 (TOYOTA,2018)；(b) HTC 10 外型(HTC,2018)

Douangphachanh and Oneyama (2014)於研究中針對手機擺放位置進行討論，將手機分別擺放在儀表板、駕駛口袋與置物盒中，結果以置物盒中的資料呈現結果與真實路面狀況最為符合。儀表板與駕駛口袋中的資料受到額外振動干擾較大，參考該篇研究結果，本研究選擇將手機固定在前座座椅上(圖 4.2)，模擬乘客坐在座椅上感受到的加速度反應。



圖 4.2 手機擺放位置



圖 4.3 道路平坦度資料收集畫面

圖 4.3 為手機端資料展示畫面，orientation 為三軸姿態角度，表示智慧型手機的擺放角度；motion 為三個軸向的加速度值，記錄三個軸向的加速度大小；geolocation 則是記錄當下的位置資訊並顯示於底圖中；upload index 則表示檢測時車輛行駛狀態。

4.2 三軸加速度方位改正成果

根據 3.2.1 節研究方法，為得到與量測車輛之垂直方向相符的垂直加速度，須將三軸加速度資料乘上三軸旋轉矩陣進行旋轉改正。圖 4.4 為原始三軸資料(上)(藍線為 X 軸；紅線為 Y 軸；黃線為 Z 軸)與三軸旋轉角(下)(藍線為 α 角；紅線為 β 角；黃線為 γ 角)，將原始三軸加速度透過上式進行旋轉後獲得改正後的加速度如圖 4.5 所示。因手機一開始擺放的姿態與車行方向相似，故改正前後並無太大差異。

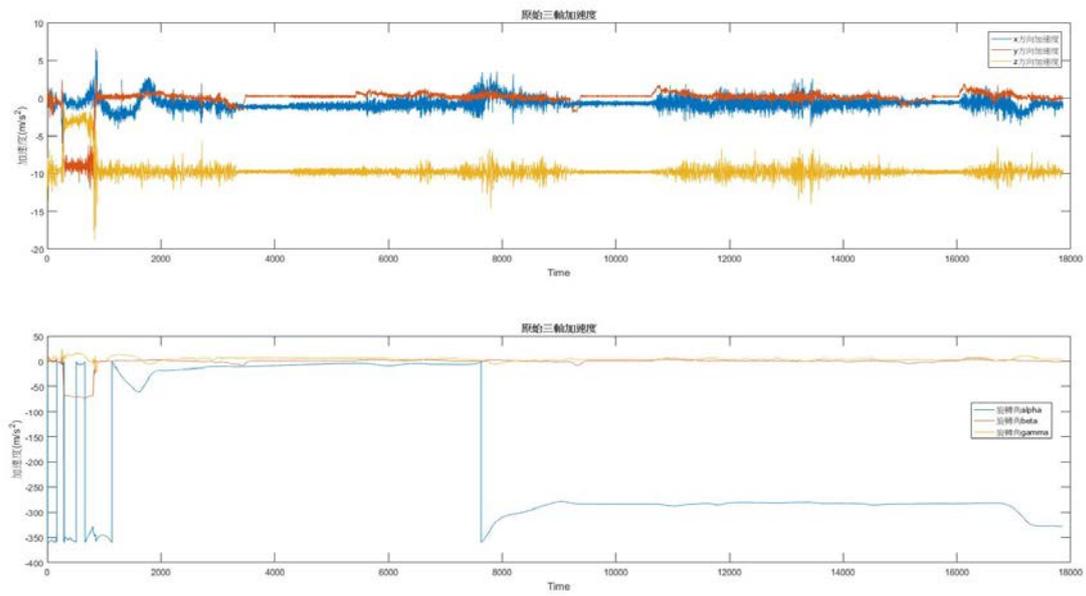


圖 4.4 原始三軸加速度資料(上)與三軸旋轉角(下)之對照

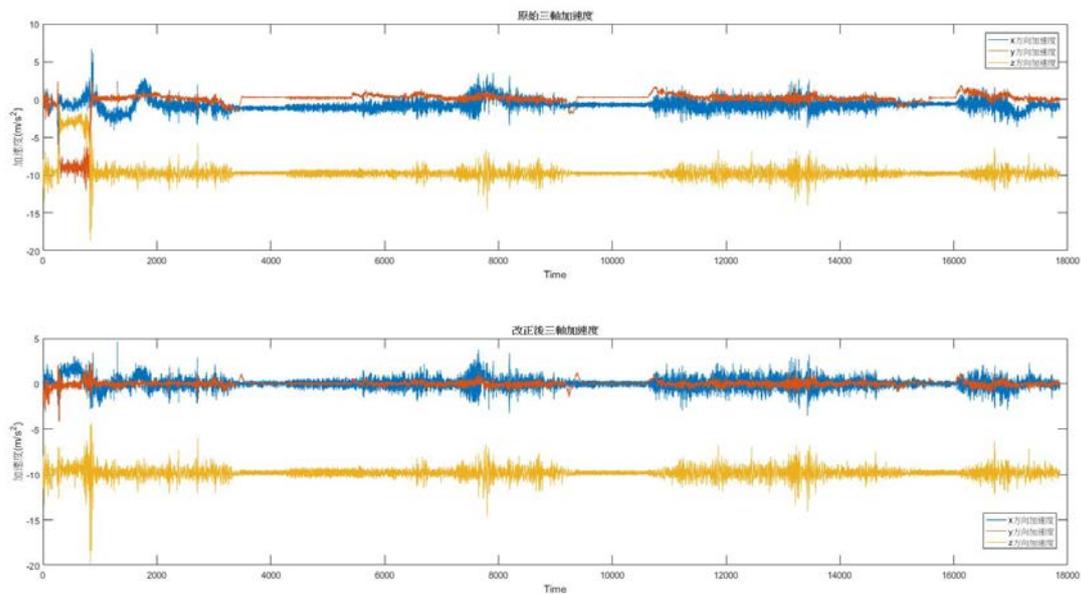


圖 4.5 原始三軸加速度資料(上)與改正後三軸加速度(下)資料對照

表 4.1 改正後之各軸向加速度平均值分別是：X 方向 0.0364；Y 方向 -0.0082；Z 方向 -9.8114。一般而言，X 軸為車體左右方向加速度，受轉彎影響大故不易檢核；Y 軸為車行方向，由車輛加減速行為展生加速度，若無急煞及急加速之行為理論上



應趨近於 0 m/s^2 ；Z 軸則是受重力影響，平均值應趨近於 9.81 m/s^2 。觀察改正後之加速度值確實與理論相同，故可確定達到三軸方向改正效果。

表 4.1 改正前後三軸加速度平均值(m/s^2)

	改正前	改正後
X 方向	-1.2894	0.0364
Y 方向	-0.7166	-0.0082
Z 方向	-8.0791	-9.8114

4.3 量測車速改正成果

本節以台中市水湳經貿園區重劃道路為實驗路段，路長約 420 公尺，由於該處道路筆直且平常較無車輛經過，適合進行多次量測實驗進行，路段位置圖與現場照片如圖 4.6。首先以固定車速(一般市區道路速限 40km/hr)於 AB 之間(AB 位置見圖 4.6)來回行駛三次，量測到的垂直方向加速度直與車速之對應如圖 4.7，可看到三次量測成果都有相同的趨勢。

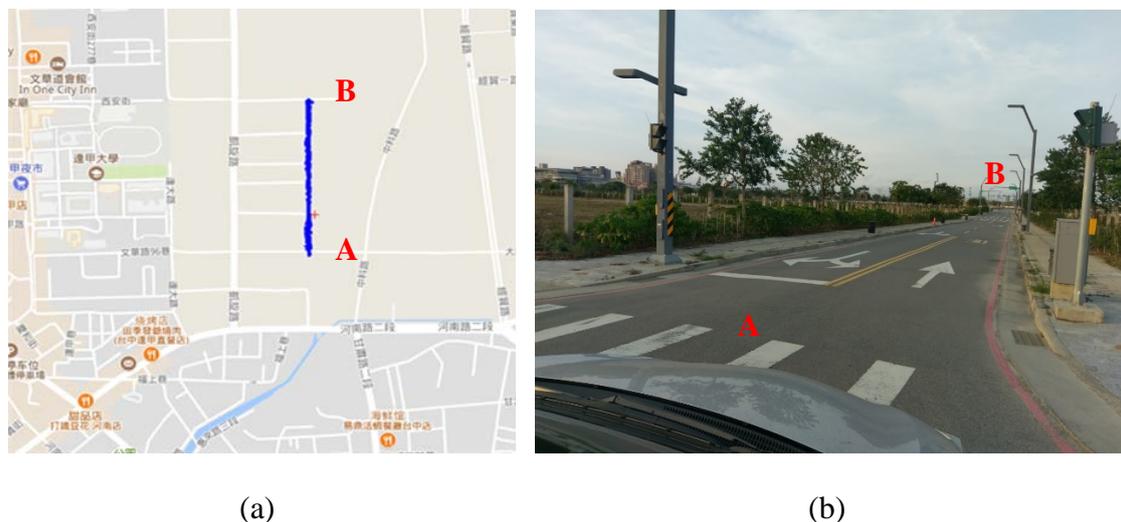


圖 4.6 台中市水湳經貿園區重劃道路(a)位置示意圖；(b)現場照片

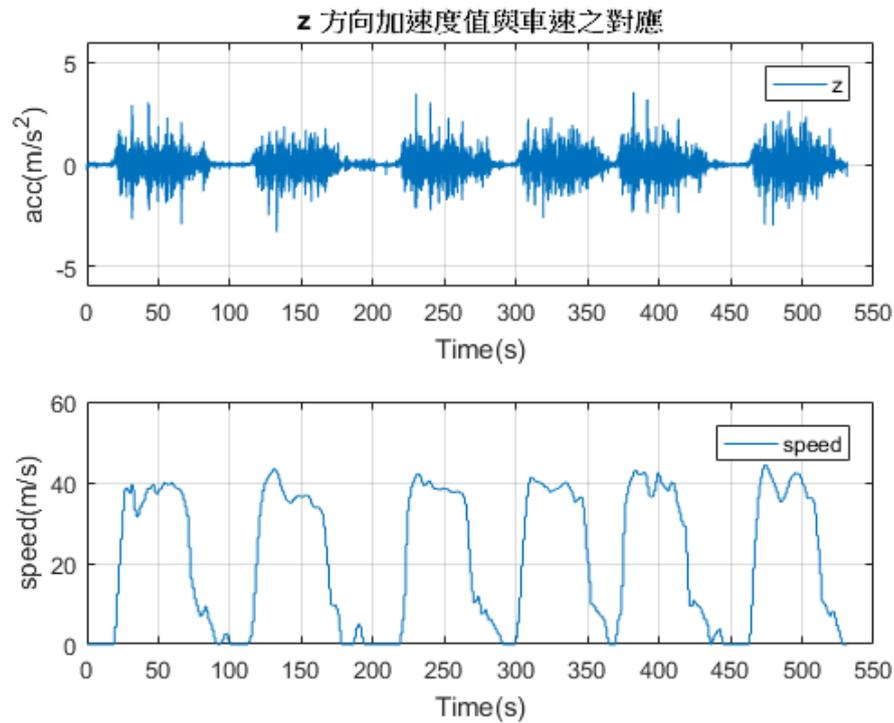
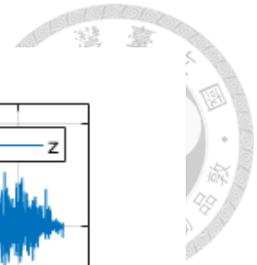


圖 4.7 以時速 40 公里通過水溝重劃道路之垂直方向加速度值與車速對應

接著以不同車速來回行駛該路段 6 次，平均車速分別是 25km/hr、19km/hr、28km/hr、37km/hr、47km/hr、40km/hr，並觀察垂直加速度變化之情形。圖 4.8 中為行駛 6 次之垂直加速度與車速對照圖，可以發現在車速越高時，產生的垂直加速度也越大。由於圖 4.8 中的資料包含停等時車速為 0 的垂直加速度資料，由於靜止狀態下收集到的加速度值並不是鋪面崎嶇造成的，因此需先將車速為 0 時的資料移除再進行後續改正，移除後的加速度資料如圖 4.9。

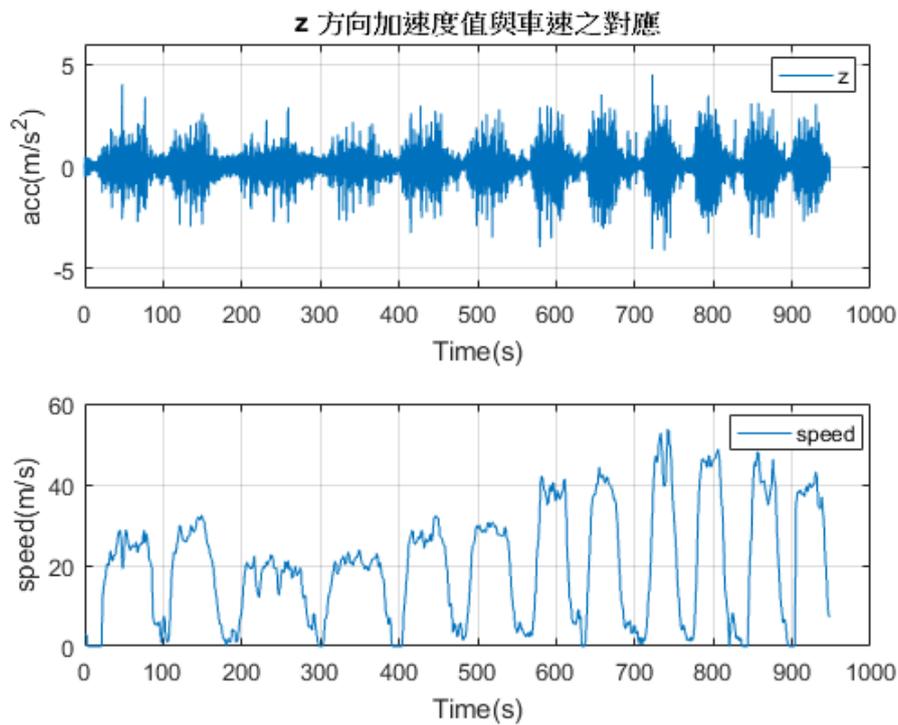
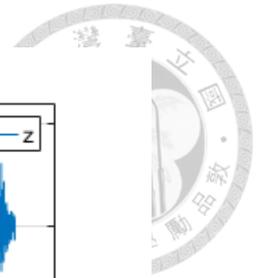


圖 4.8 以不同車速通過水湍重劃道路之垂直加速度與車速之對照

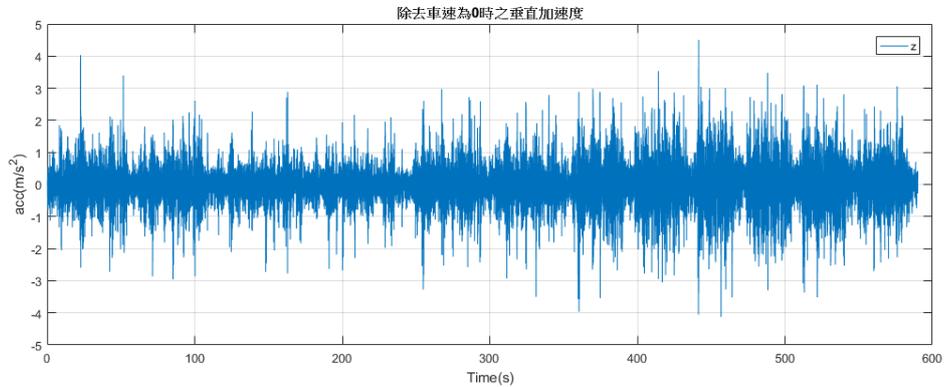


圖 4.9 移除車速為 0 時的垂直加速度值

圖 4.10 則是透過車速改正方法將垂直加速度轉換至設計車速(40km/hr)下的加速度對照圖，圖中上圖為改正前的垂直加速度(同圖 4.9)，下圖為改正至設計車速(40km/hr)的加速度值，可看出改正前因受車速影響，加速度大小有明顯差異，而改正後的加速度大小較為一致。

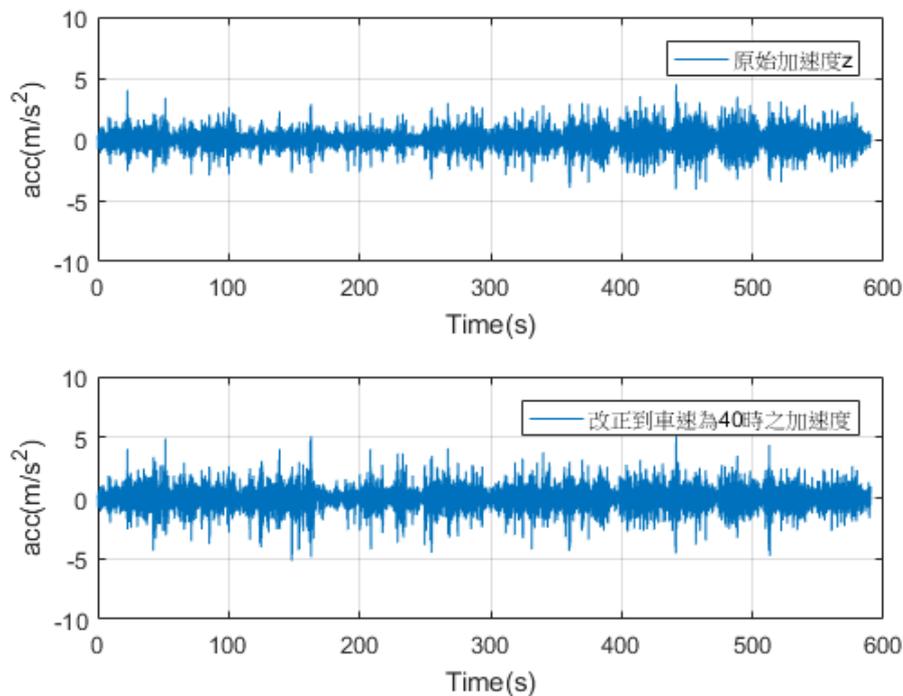
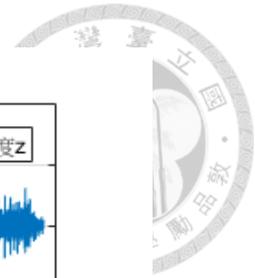


圖 4.10 車速改正前(上)後(下)之垂直加速度對照

接著將兩個車道的資料區分開來，並分別計算不同車速下的加速度絕對值平均與標準差。表 4.2 為車行方向 A 至 B 的加速度量測成果；表 4.3 則是車行方向為 B 至 A 的成果，透過兩表觀察不同車速改正前後加速度絕對值平均與標準差之關係。因為行駛於同一路段，理論上量測出來的加速度絕對值平均會相同，但在表 4.2 與表 4.3 中可看出改正前在車速越高時加速度平均值與標準差都越大。顯示出當使用不同車速行駛於同一路段時，車速較快者感受到的振動感、也就是垂直加速度也會越大，而經車速改正後的加速度絕對值平均的標準差明顯小於改正前，可見利用車速改正將不同車速下的加速度值轉換至設計車速時，確實能呈現出相似的情形。

表 4.2 車行方向 A→B 之不同車速下加速度絕對值平均(m/s²)、標準差

平均車速	車行方向	改正前		改正車速至 40km/hr 後	
		加速度絕對 值平均	標準差	加速度絕對 值平均	標準差
19	A→B	0.3412	0.3947	0.5830	0.8143
25	A→B	0.3969	0.4617	0.5071	0.6974
27	A→B	0.4428	0.5065	0.5444	0.7488
37	A→B	0.5516	0.6056	0.5792	0.7941
40	A→B	0.5505	0.6177	0.5499	0.7758
47	A→B	0.6397	0.6604	0.5863	0.8050
平均值		0.4871		0.5583	
標準差		±0.1121		±0.0307	

表 4.3 車行方向 B→A 之不同車速下加速度絕對值平均(m/s²)、標準差

平均車速	車行方向	改正前		改正車速至 40km/hr 後	
		加速度絕對 值平均	標準差	加速度絕對 值平均	標準差
19	B→A	0.3155	0.3947	0.4506	0.6437
25	B→A	0.4064	0.4617	0.5063	0.6926
27	B→A	0.4252	0.5065	0.5223	0.7083
37	B→A	0.4809	0.6177	0.4989	0.7637
40	B→A	0.5841	0.6056	0.5801	0.6603
47	B→A	0.6065	0.6604	0.5701	0.7481
平均值		0.4697		0.5213	
標準差		±0.1111		±0.0481	

為了檢核車速改正成果是否符合與實際以設計車速行駛時於檢測道路的情況一致，本研究利用以設計車速(40km/hr)行駛該路段 3 次之資料對改正後的成果進行比對。表 4.4 與表 4.5 中顯示以車速 40km/hr 行駛於測試路段的三次加速度值平均：車行方向 A 至 B 的加速度平均值為 0.5477；車行方向 B 至 A 的加速度平均值為 0.5269。與表 4.2、表 4.3 各車速改正至車速 40km/hr 時的加速度值平均：車



行方向 A 至 B 加速度平均值為 0.5583；車行方向 B 至 A 的加速度平均值為 0.5213 幾乎相同，顯示透過本研究提出的車速改正方法將不同車速改正至設計車速的方式確實可行。

表 4.4 車行方向 A→B 之設計車速下的加速度絕對值平均(m/s²)與標準差

平均車速	車行方向	加速度絕對值平均	標準差
39	A→B	0.5416	0.5984
39	A→B	0.5376	0.5856
40	A→B	0.5640	0.6365
	平均值	0.5477	
	標準差	±0.0142	

表 4.5 車行方向 B→A 之設計車速下的加速度絕對值平均(m/s²)與標準差

平均車速	車行方向	加速度絕對值平均	標準差
39	B→A	0.4955	0.5180
39	B→A	0.5105	0.5547
40	B→A	0.5747	0.6318
	平均值	0.5269	
	標準差	±0.0421	

4.4 加速度資料濾波成果

由於本研究著重於路面粗糙度對人體舒適度的影響，在通過車速改正將車速對加速度的影響移除後，本研究將人體感受範圍外的加速度值當成雜訊濾除。本實驗使用 4.3 節經過車速改正後的加速度成果作為原始資料，將 1~80Hz 以外的頻率濾除，並採用車速為 0 時的振動頻率視為車體本身造成的振動訊號，以此對整段資料進行濾波，將其濾除。濾波成果如圖 4.11。

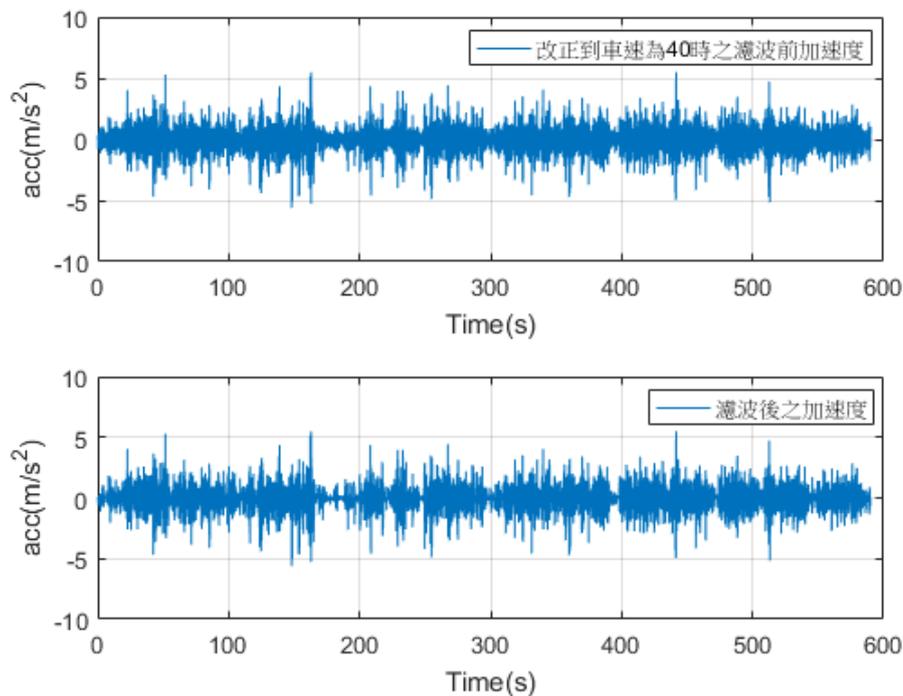
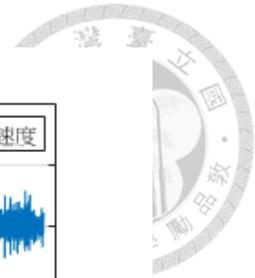


圖 4.11 濾波前後比較圖。上為濾波前；下為濾波後。

觀察濾波後之加速度資料，具特徵性的訊號並未受到濾波的影響而消失，仍舊可以透過觀察加速度大小找出顛簸處。

4.5 舒適度分類成果與路段 IRI 值之比較

本節於三條不同路段收集平坦度資料，每個路段皆行駛兩次，加速度資料經過方位、車速改正、與濾波處理後，即可進行後續分類。使用(1) ISO2631-1 指標與(2) 標準差分類法評估路段舒適度，並對兩種分類法與實測 IRI 資料進行比較。

圖 4.12 到圖 4.17 中，上圖採用 3.3.2 節 ISO2631-1 指標分類，其中綠色代表可接受的舒適度範圍，加速度值為 $<0.63 \text{ m/s}^2$ ；黃色部分代表感受到路面振動不太舒適，加速度值範圍在 0.63 m/s^2 到 1.6 m/s^2 之間；紅色部分則代表感受到明顯振動，屬於非常不舒適等級，加速度值為 1.6 m/s^2 以上。下圖則是採用 3.3.3 節標準差分類法的成果，紅色部分為超出三倍標準差的加速度資料位置。

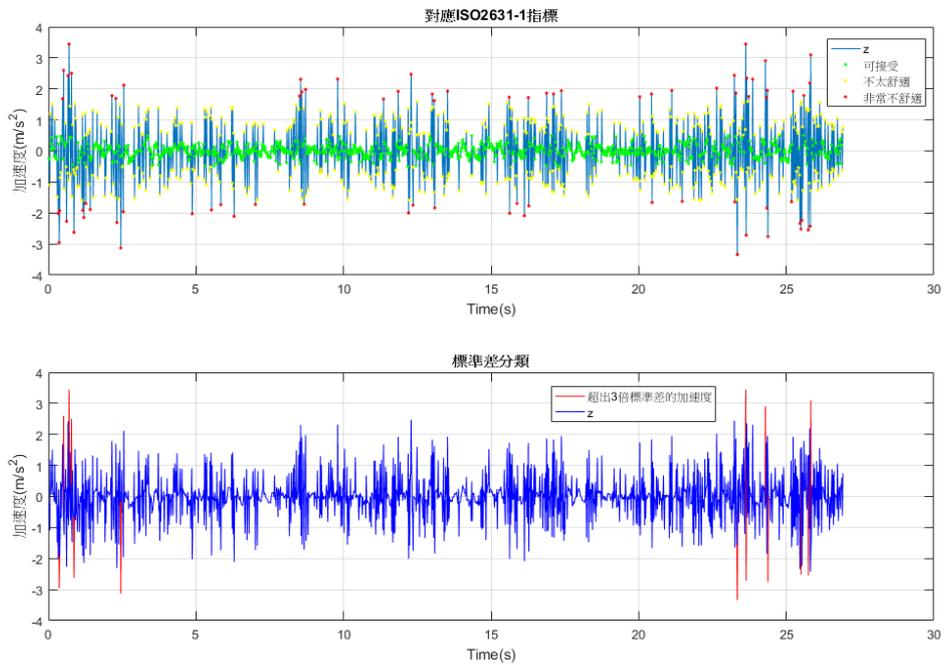
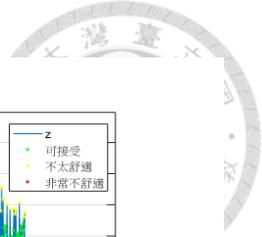


圖 4.12 路段一第一次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法

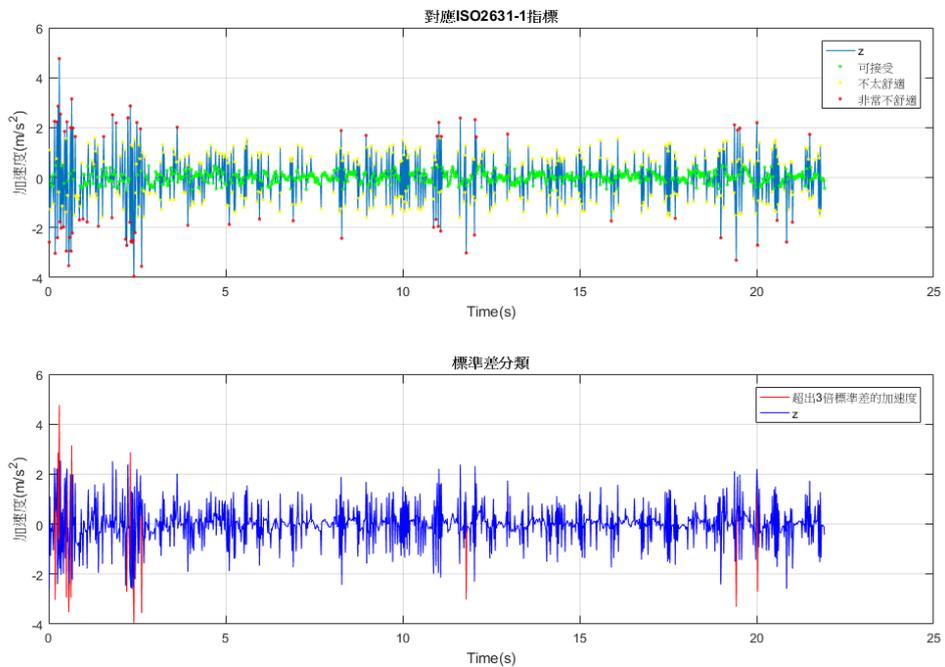


圖 4.13 路段一第二次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法

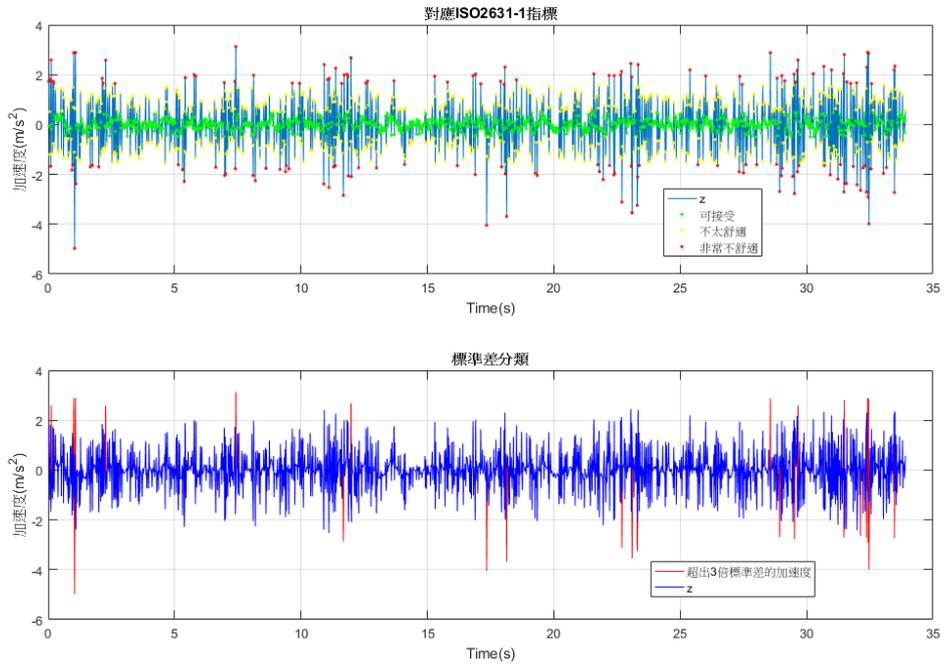
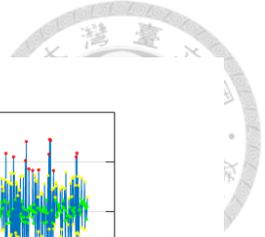


圖 4.14 路段二第一次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法

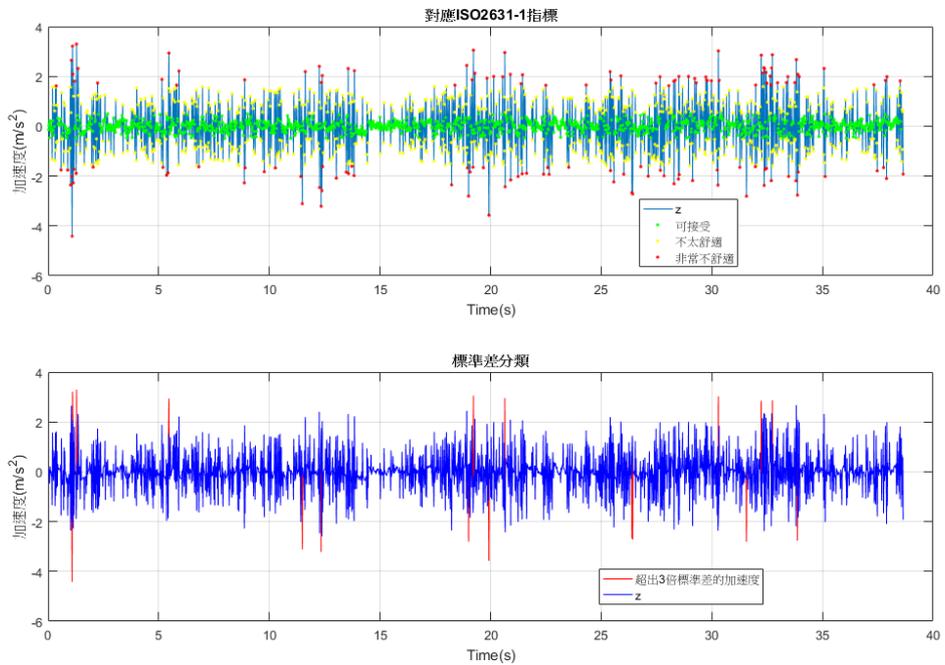


圖 4.15 路段二第二次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法

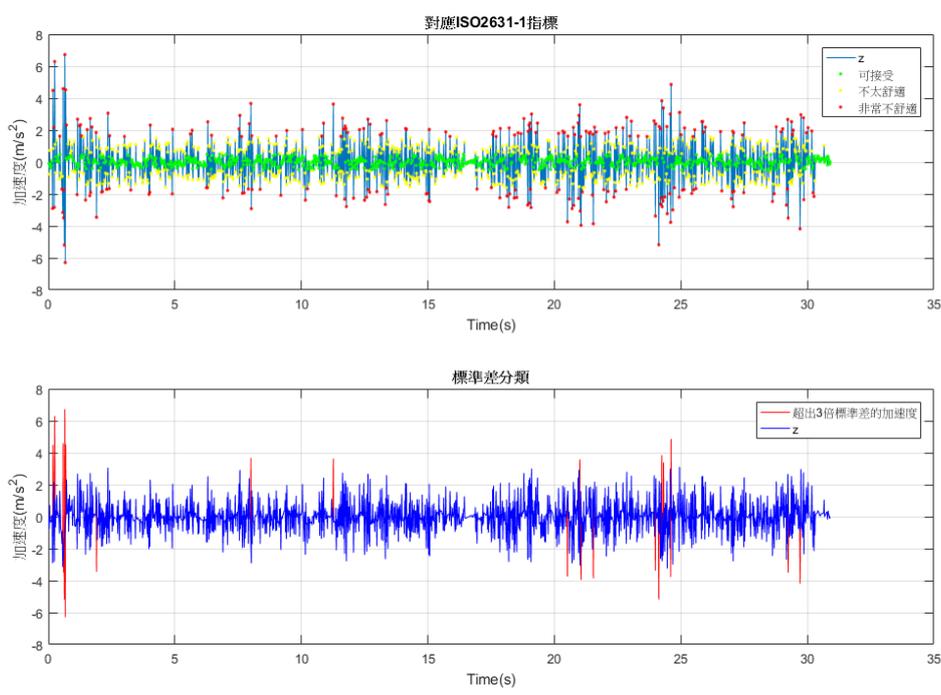
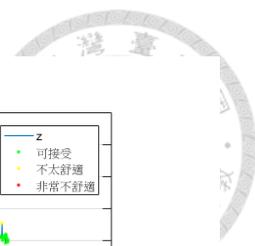


圖 4.16 路段三第一次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法

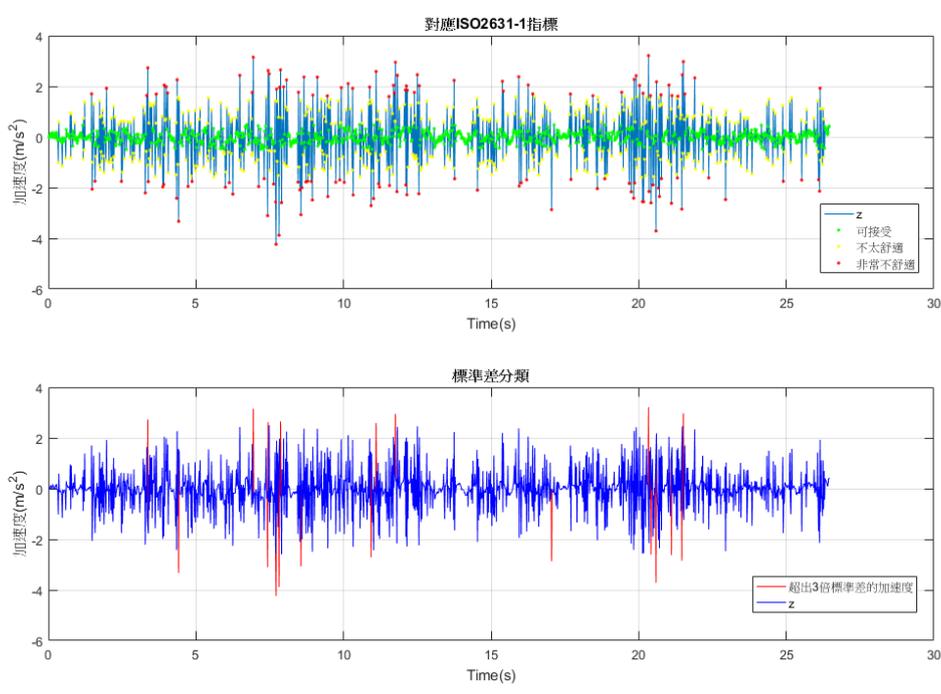


圖 4.17 路段三第二次量測成果，上為套用 ISO2631-1 規範；下為標準差分類法

將各路段中 ISO2631-1 分類中非常不舒適的資料數與超過三倍標準差的資料數統計後以所佔該路段資料總數百分比的方式呈現，並與實測 IRI 值進行比較(如表 4.6)。由統計圖(圖 4.18)可以發現以 ISO2631-1 指標評估行車舒適度的成果與 IRI 指標有相同的趨勢，在實測 IRI 值越大時，ISO2631-1 極度不舒服出現的比例也越高，透過極度不舒服占整段道路資料數的比例能直接反映出該路段的道路平坦度優劣。而使用標準差分類法的所占百分比成果則與實測 IRI 值無直接關聯，無論 IRI 大小，超過三倍標準差的資料數百分比皆約在 1.1%左右，因此標準差分類法的百分比成果無法直接呈現道路平坦度與行車舒適度。

表 4.6 ISO2631-1 分類中非常不舒適與標準差分類中超過三倍標準差之資料數百分比與實測 IRI 值比較表

	道路一 第一次	道路一 第二次	道路二 第一次	道路二 第二次	道路三 第一次	道路三 第二次
道路實測 IRI 值	2.20 (優良)	2.20 (優良)	2.67 (優良)	2.67 (優良)	4.05 (需改正)	4.05 (需改正)
ISO2631-1 極度不舒服 百分比	6.2%	7.5%	9.9%	8.4%	17.3%	11.8%
超過三倍標 準差百分比	0.9%	1.1%	1.3%	0.7%	1.2%	1.2%

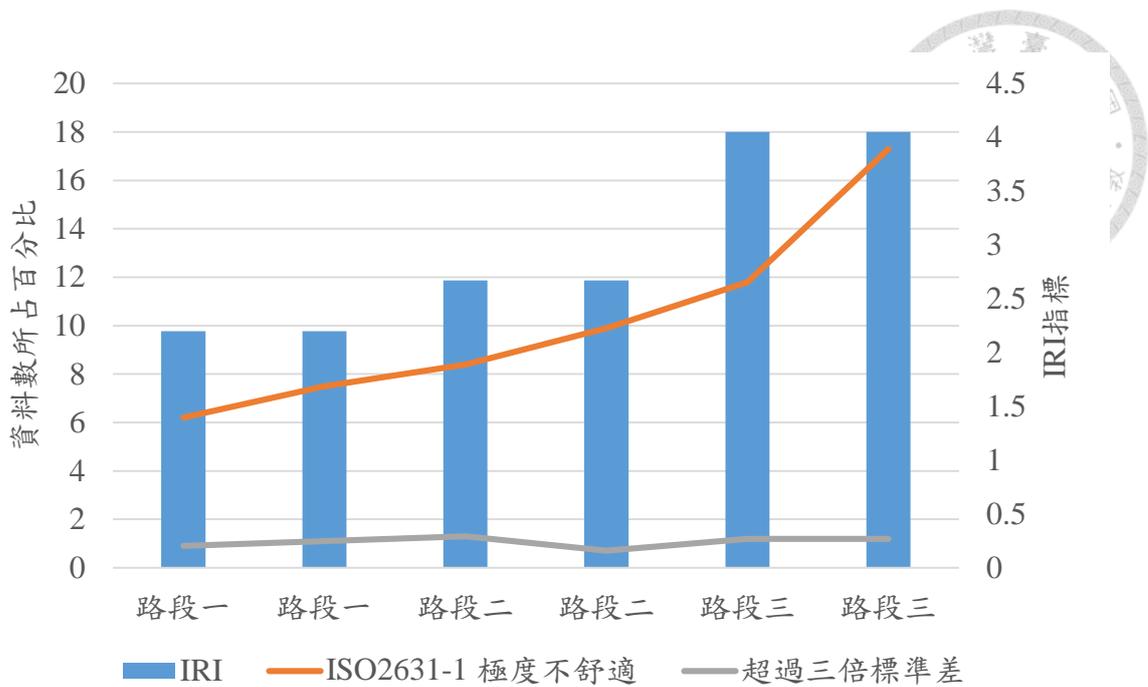


圖 4.18 ISO2631-1 分類中非常不舒適與標準差分類中超過三倍標準差之資料數百分比與實測 IRI 值比較圖

雖然無法透過超過三倍標準差的資料數百分比評估一路段整體的平坦度與行車舒適度，但透過標準差分類法卻可以更明確的找到特定的凹凸處，由圖 4.12 至圖 4.18 標準差分類法的成果中標示出超出三倍標準差的加速度值位置，配合智慧型手機中 GNSS 接收器紀錄的坐標位置並套疊至地圖上，可供使用者更清楚道路顛頗處，分類成果展示將於下節說明。

4.6 分類成果展示

本研究將超過三倍標準差的道路鋪面歸類為狀況不佳、須盡速改善的區域。並將標準差分類成果搭配位置資訊套疊在地圖上，使用 HSV 色彩模型來表示標準差大小，以不同顏色表示平坦度優劣：紅色為超過三倍標準差的位置，鋪面狀況最差；橘黃次之，為尚能接受的區域；綠色則是標準差最小的部分，鋪面狀況為最佳，箭頭代表車輛前進方向。

本節採用台北市民生東路至塔悠路之實際量測路段資料進行分類成果展示，



如圖 4.19。透過地圖套疊成果，維護者可以更準確、快速的找到需維護的路面，針對受損鋪面進行整修。實際至道路鋪面狀況不佳處查看，可發現多有補釘接縫、鋪面隆起的現象(如圖 4.20)，導致車輛通過時造成不良的行駛感受。

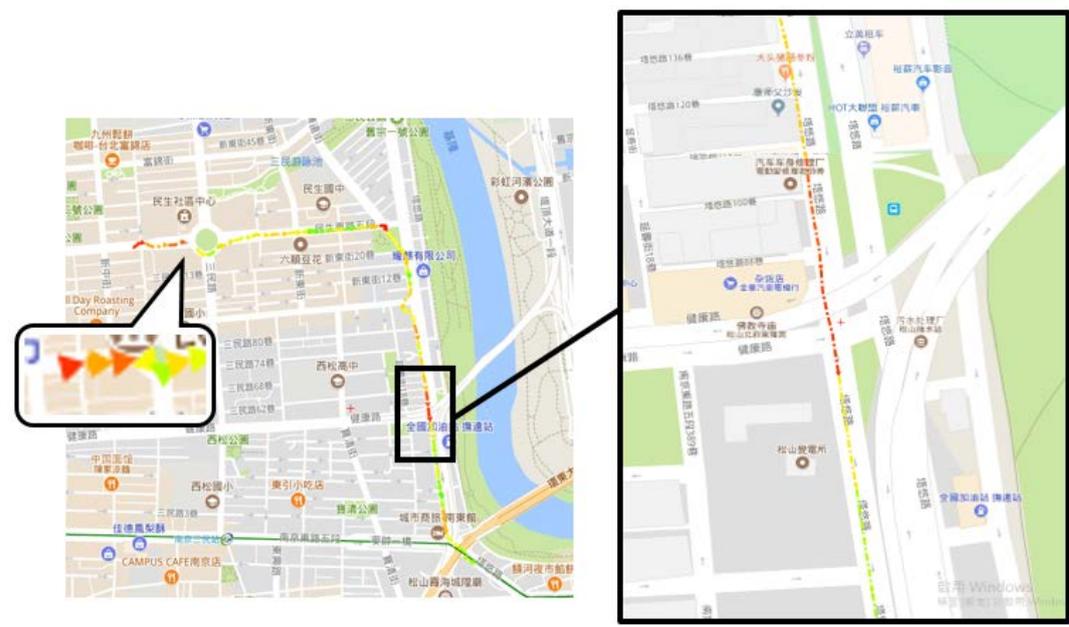


圖 4.19 將舒適度分類套疊至地圖上之成果(紅色為道路狀況最差之區域，綠色則是最好的區域)



(a)

(b)

圖 4.20 道路狀況不佳處實際照片



Chapter 5 結論與建議

5.1 結論

本研究利用車輛行駛於不平鋪面產生的加速度反應作為鋪面品質評估的指標，利用車輛收集道路資料後對加速度資料進行三軸方位改正，獲得與車行方向相同的三軸加速度資料，接著對車速進行改正。由於車速快慢會影響加速度的大小，行經相同凹凸處時車速快者將比車速慢者感受到更大的垂直加速度，因此以往在進行道路鋪面量測時皆須以定速進行量測，並未對車速進行修正。本研究採用行駛車速與垂直加速度間的關係將不同車速下量測的加速度值改正至特定的設計車速，研究成果顯示透過車速改正確實能將加速度值轉換至不同車速行駛時的情形。因此可藉由車速改正改變以往只能使用定速量測的方式。最後將加速度進行濾波處理則可以濾除人體感受範圍外的資訊，也可消除因地勢起伏造成的低頻訊號與車輛本身的引擎震動並完成資料處理流程。

道路平坦度資料經處理後即可進行分類比較，本研究使用 ISO2631-1 指標分類與標準差分類法並與道路實測 IRI 值進行對照，成果顯示 ISO2631-1 指標與實測 IRI 指標呈現相同趨勢，在越不平整處 ISO2631-1 極度不舒適的比例也越高，透過極度不舒適占整段道路資料數的比例能直接反映出該路段的道路平坦度優劣，相較之下，標準差分類法雖無法直接以不舒適占整段不舒適道路的比例做為平坦度評斷依據，但卻能更精確地掌握路段上特定的不平處，這是 IRI 與 ISO2631-1 指標無法辦到的。而相較於傳統鋪面品質指標如 IRI，標準差與 ISO2631-1 指標是以人體舒適度感受做為評估依據，因此更能表現出人體對道路不平的不適感。

將分類成果中不舒適位置與地圖資訊套疊後，維護者便可從展示平台得知鋪面服務狀況，方便進行維護管理。用路者也能透過手機程式，協助各地區的道路資料收集，經過後台資料處理後成果將即時更新到網站上，達成一套更快速方便的道路鋪面監測流程。



5.2 未來工作建議

本研究提出了以手持式加速規進行道路平坦度量測與舒適度分類之硬體建構以及完整分析方法，依據本研究所獲得之經驗以及研究成果，歸納出以下幾點建議，作為未來相關研究或實務應用之參考。

1. 研究流程探討

本研究著重於垂直方向的加速度討論，故資料處理流程為首先進行加速度方位改正後，接著只針對垂直方向加速度值進行車速改正與濾波處理。未來在進行三軸向分析時則可嘗試先對原始資料進行濾波處理後再對其進行後續處理與分析步驟。

2. 以不同車輛進行道路平坦度資料收集之影響

本研究之成果皆使用同一台汽車進行測試，若以不同車款行駛於同一道路上，因車輛避震與車型不同等因素，會導致成果略有差異。未來可針對不同車輛行駛行為作更深入的探討。

3. 延伸至不同交通工具的舒適度評估

本研究著重於鋪面平坦度與舒適度評估，但並沒有局限於道路平坦度的量測。圖 5.1 即是利用本研究提出的資料獲取方法獲得的高鐵資料。經過資料處理流程後，使用 ISO2631-1 與標準差分類法進行分類成果如圖 5.2，可以發現使用 ISO2631-1 指標的分類成果顯示整個路段皆為舒適等級，但因為高鐵行駛車速非常高，只要有微小振動就會造成嚴重不適感，由標準差分類法即可體現此現象，圖中紅色部份為不舒適的部份，並將分類成果套疊至地圖上如圖 5.3。由此可知標準差分類法的適用性較為廣泛，搭配本研究可應用於不同場合的舒適度評估，拓展本技術的應用範圍。

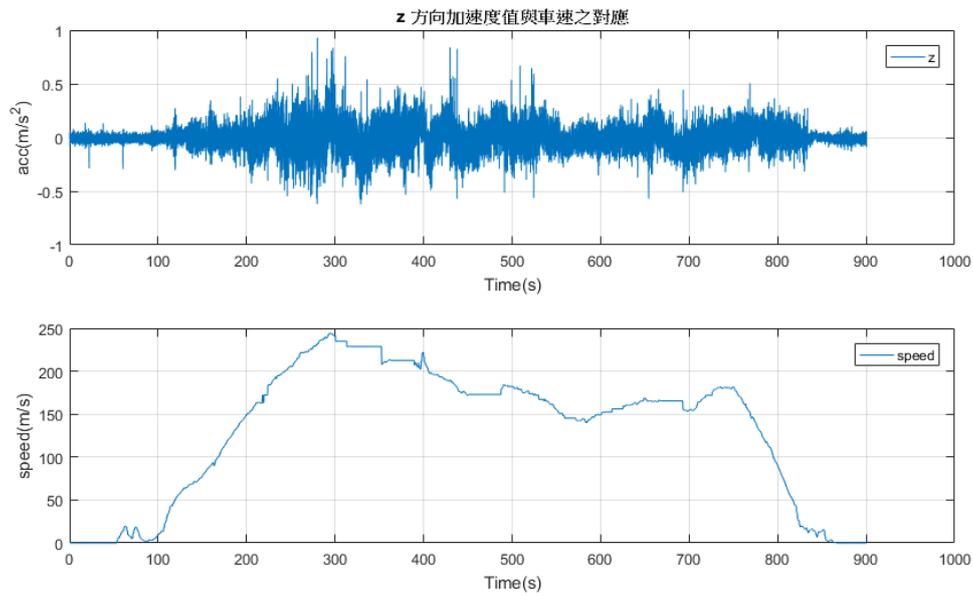
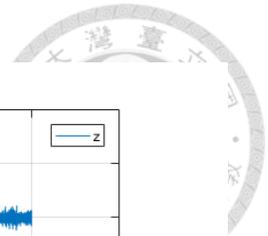


圖 5.1 高鐵的垂直加速度變化與車速對應

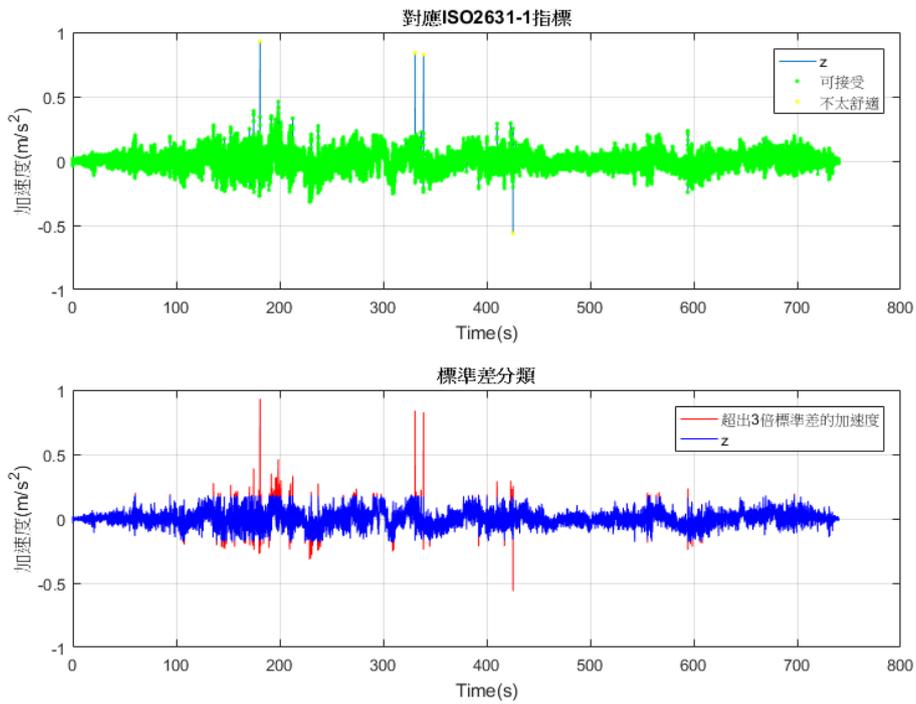


圖 5.2 高鐵之 ISO2631-1 與標準差分類成果

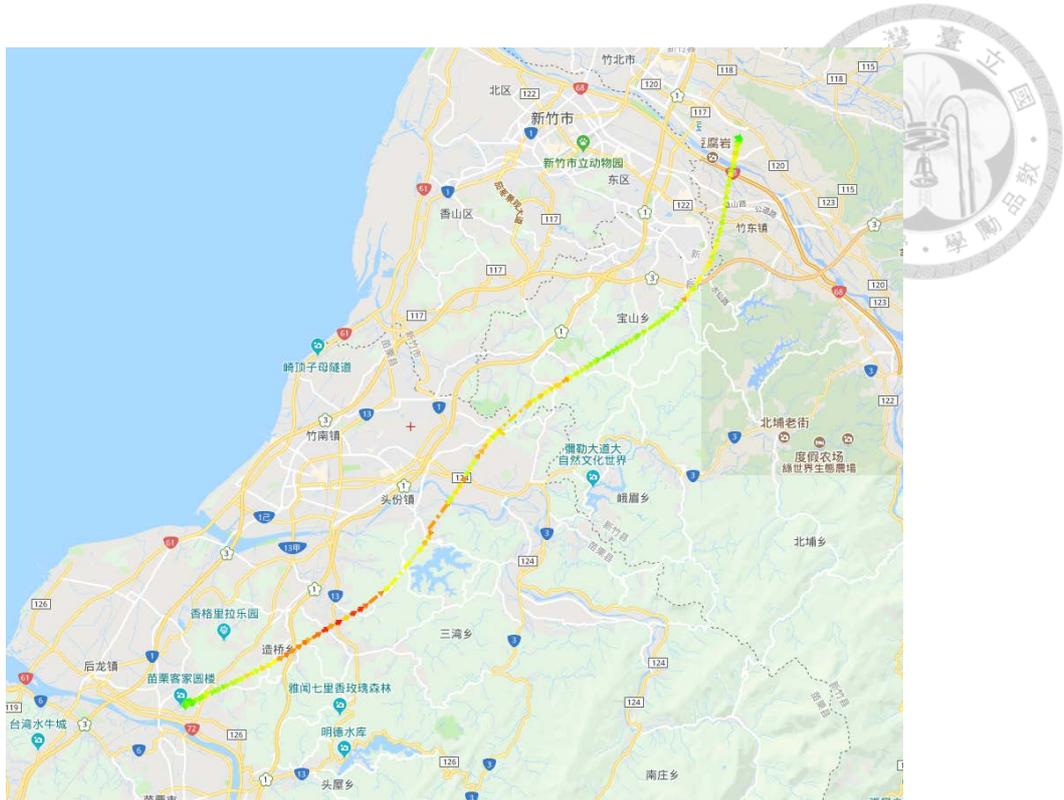
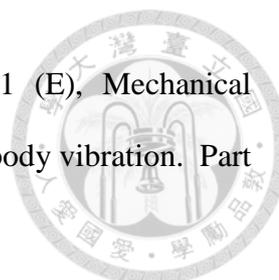


圖 5.3 高鐵分類成果展示

參考文獻



- ASTM E1926-08, 2015. Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6433-16, 2016. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aydın, M.M., M.S. Yıldırım, L. Forslöf, 2017. The Use of Smart Phones to Estimate Road Roughness: A Case Study in Turkey. In: International Conference on Advanced Engineering Technologies.
- Beravs, T., J. Podobnik, & M. Munih, 2012. Three-axial accelerometer calibration using Kalman filter covariance matrix for online estimation of optimal sensor orientation. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 61(9), 2501-2511.
- Boyapati, B., and R. P. Kumar, 2015. Prioritisation of pavement maintenance based on pavement condition index. Indian Journal of Science and Technology, 8(14).
- Cantisani, G., and G. Loprencipe, 2010. Road roughness and whole body vibration: Evaluation tools and comfort limits. Journal of Transportation Engineering, 136(9), 818-826.
- Douangphachanh, V., and H. Oneyama, 2014, Exploring the use of smartphone accelerometer and gyroscope to study on the estimation of road surface roughness condition. In Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2014 11th International Conference. IEEE. 783-787.
- HTC, 2018. HTC 10. URL: <https://www.htc.com/tw/smartphones/htc-10/> (Last date accessed: 27 Dec 2018).
- Hu, J., X. Gao, R. Wang, & S. Sun, 2017. Research on Comfort and Safety Threshold of the Pavement Roughness (No. 17-02974).



International Organization for Standardization, 1997, ISO 2631-1 (E), Mechanical vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements

Kropáč, O., and P. Múčka, 2005. Be careful when using the International Roughness Index as an indicator of road unevenness. *Journal of sound and vibration*, 287(4), 989-1003.

Luczak, S., W. Oleksiuk., & M. Bodnicki., 2006. Sensing tilt with MEMS accelerometers. *IEEE Sensors Journal*, 6(6), 1669-1675.

Mulry, B., M. Jordan, & D. O'Brien, 2015. Automated Pavement Condition Assessment Using Laser Crack Measurement System (LCMS) on Airfield Pavements in Ireland. In 9th International Conference on Managing Pavement Assets.

Múčka, P., 2016. Road Roughness Limit Values Based on Measured Vehicle Vibration. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(2), 04016029.

PARK. M. S., T. Fukuda., T. G. Kim, & S. Maeda, 2013. Health risk evaluation of whole-body vibration by ISO 2631-5 and ISO 2631-1 for operators of agricultural tractors and recreational vehicles. *Industrial health*, 51(3), 364-370.

Pedley, M. 2013. Tilt sensing using a three-axis accelerometer. Freescale iconductor application note, 1.

Sayers, M. W. 1986. The international road roughness experiment. World Bank Technical Paper No. 45. Washington, D.C.

Sayers, M. W. 1995. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record 1501*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1–12.

Sayers, M. W. and S. M. Karamihas, 1998. *The little book of profiling*, University of



Michigan.

Shah, Y. U., S. S. Jain, D. Tiwari, & M. K. Jain, 2013. Development of overall pavement condition index for urban road network. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 332-341.

Spangler, E. B., and W. J. Kelly, 1964. *GMR Road Profilometer: a Method for Measuring Road Profile*. Warren, Mich. : Research Laboratories, Research Publication no. GMR-452, General Motors Corp.

TOYOTA, 2018. TOYOTA vios. URL: <https://www.toyota.com.tw/showroom/VIOS>
(Last date accessed: 27 Dec 2018).

Yu, J., E. Chou, & J. T. Yau, 2006. Development of speed-related ride quality thresholds using international roughness index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 47-53.

Zang, K., J. Shen, H. Huang, M. Wan, & J. Shi, 2018. Assessing and mapping of road surface roughness based on GPS and accelerometer sensors on bicycle-mounted smartphones. *Sensors*, 18(3), 914.

臺北市政府法務局，2018。國家賠償事件原因統計表，臺北市政府法務局網頁，
URL: <https://www.legalaffairs.gov.taipei/cp.aspx?n=F58B43355A12A50A>, (Last date accessed: 20 Nov 2018).

臺北市政府工務局新建工程處，2018。路平專案計畫內容，臺北市政府工務局新建工程處網頁－工程集錦－路平專案，URL:
https://nco.gov.taipei/Content_List.aspx?n=6BE50925B57F152F, (Last date accessed: 20 Nov 2018).

臺北市政府工務局，2010。施工規範－瀝青混凝土鋪面，臺北：臺北市政府工務局。

林宜蓉，2012。市區自行車道鋪面騎乘舒適度評估指標研擬之研究，國立臺灣大



學土木工程學研究所學位論文，1-99。

台灣儀器網，2019。三米直規(路面平坦尺)，台灣儀器網網頁，URL:
http://www.tw17.com.tw/product_detail.asp?pro_ser=7270264 , (Last date accessed:
10 Feb 2019).

交通部，2014。公路工程施工規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面，臺北：交通部公路
工程部。

交通部，2018。106 年道路長度及橋樑座數概況，中華民國交通部網頁，URL:
<https://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=64&parentpath=0,6> , (Last date accessed:
10 Feb 2019).

交通部高速公路局，2018。施工技術規範 107 年 3 月版，臺北：交通部公路總局。

交通部公路總局，2012。瀝青混凝土鋪面，施工說明書－技術規定，臺北：
交通部公路總局。

交通部公路總局，2018。公路工程施工規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面，臺北：
交通部公路總局。

內政部營建署，2002。柔性鋪面損壞調查手冊，市區道路管理維護與技術規範手
冊研究，臺北：內政部營建署。

內政部營建署，2014。道路工程施工規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面，臺北：內
政部營建署。

公共工程委員會，2017。國內施工規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面，臺北：行政院
公共工程委員會。

新北市政府養護工程處，2018。路平推動指施概述，新北市政府養護工程處網頁，
URL:<https://www.maintenance.ntpc.gov.tw/home.jsp?id=703cd03eb5e556a0>, (Last
date accessed: 15 Oct 2018).

陳怡先，2004。機場鋪面平坦度評估指標研擬之研究，國立臺灣大學土木工程學研
究所博士論文，1-177。

陳弘章，2006。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，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，1-105。

施雅蓉，2011。慣性剖面儀載具與速度對檢測績效之影響，臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，1-95。

張孟孔、陳建旭、許阿明，2007。評估鋪面平坦度檢測指標之探討，臺灣公路工程，33(7)，2-14。

彭信華，2009。應用三軸加速規於建物傾斜量測之設計與驗證，國立臺灣科技大學營建工程系研究所碩士論文，1-137。

周家蓓，2005。路面品質績效量測設備開發先導計畫，交通部運輸研究所。