

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

市區自行車道鋪面騎乘舒適度評估指標研擬之研究

A Study of Index of Urban Bike Lane Ridability



指導教授：周家蓓 教授

Major Professor: Chou, Chia-Pei

中華民國 101 年 7 月

July 2012



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

市區自行車道鋪面騎乘舒適度評估指標研擬之研究
A Study of Index of Urban Bike Lane Ridability

本論文係林宜蓉君（學號 R99521516）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 101 年 6 月 26 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
(指導教授)

周家蓓

王仲宇 教授

王仲宇

郭振銘 副教授

郭振銘

系主任

呂 良 正

呂良正

(簽名)



誌謝

兩年前，得知錄取交通組的心情真是又開心又猶豫，對於是否要北上念書讓
我考慮再三而拿不定主意，感謝當時家人的支持、郭振銘老師與陳建旭老師的鼓
勵推進、國中好友怡帆的鼓勵與打氣，讓我鼓起勇氣踏入這校園的椰林大道並開
始熟悉陌生的城市-台北。研究所兩年生涯當中，研究室裡共同的生活點滴，一起
修課趕作業、撰寫論文的革命情感，這一路走來，要感謝的人真的很多。

首先要感謝指導教授周家禧教授對於我悉心的教導，雖在碩二時老師多不在
國內，仍透過視訊通話來指點我研究上正確的方向使我獲益匪淺，從老師身上也
學習到老師對於研究上嚴謹的態度更是我學習的典範；感謝家人的支持與鼓勵，
讓我能夠專心於課業與論文的撰寫上；感謝口試委員王仲宇教授與郭振銘教授對
於論文的建議使得本論文能夠更完整與嚴謹；感謝王仁佐學長與柔依學姐在自行
車模型的建構與推導上給予指教；感謝國家地震中心的林柏暘先生在自行車相關
實驗上的協助與建議；感謝小周家的學長姐、同學、學弟妹們。艾勳學姐與李寧
學姐教導許多關於論文寫作的小撇步；鎮宇學長、君凱學長、雅蓉學姐有了你們
研究室更為熱鬧；99 級的四位同學，好相處的林琳是研究室裡聊天的好同學、加
上大學時期共同班六年的艾蓉總是幫助我許多以及生活上的叮嚀、小周家唯一的
男性同學李柏提供研究與生活上的協助、炒熱氣氛的偲瑞總是讓研究室充滿笑聲；
學弟妹鴻軒、承晏、琦芮對於實驗上的協助；感謝自從成大土木大學部時期就彼
此關心的同學們婉婷、皓芸、六一、韓妤、股王、友梅，希望未來彼此能夠繼續
保持聯絡以及大學的直屬學姐丁文婕從大一就對我非常關照，至今成好朋友能夠
互相打氣。

最後，謹以此論文給我的父母親以及同學們。

宜蓉 謹誌於土木系館 314 室與國際青年宿舍

民國一百零一年七月十九日



摘要

本研究針對自行車道研擬專用之舒適度評估方法及最佳評估設備做為研究目標。由於近年來全世界愈來愈重視節能減碳以及綠色交通的觀念，於私人運具方面，自行車的盛行取代部分汽機車的情形亦是種趨勢，同時，國內亦有許多縣市投入愈來愈多自行車道規劃與興建。然而，目前無論是三米直規或慣性式平坦儀的量測標準及驗證方式，皆是針對小客車而設計，並不符合自行車輛的行駛特性。因此，本研究主要探討通勤者騎乘於自行車道之騎乘舒適度指標研擬，自行車款式選用主要依一般市售之通勤車款類型為主，又由於各類型自行車避震器配置和避震效果皆有不同，為求得較具代表性之結果，故僅考慮一般市售自行車皆有之座墊避震器，忽略設計等級較高之前、後避震器之影響。其方法分別為利用自行車實際騎乘量測與撰寫 Matlab 程式以運用本研究推導之自行車運動方程式求解。於自行車實測部分，主要收集台北市區自行車道鋪面剖面資料，並於自行車座墊下裝置加速度規進行實際騎乘量測；程式模擬部分，則藉由其自行車簡化模型的運算，求取座墊之垂直加速度。將實測與模擬之結果進行比較修正後，實際收取自行車道路段總長度約 21 公里以探討代表值之大小並參考 ISO 2631-1 之規範中加速度值門檻值之訂定，以加速度值累積百分比達 70% 作為該路段加速度代表值來衡量自行車道舒適度，其涵蓋範圍較廣，為一般不舒適至極度不舒適，且提出適當自行車道騎乘舒適度指標之建議門檻值。配合自行車之車輛結構特性，開發合適之檢測設備及標準量測方法，以便於評估自行車道舒適度時能有量化之依據可循。

關鍵字：自行車、自行車道騎乘舒適度、慣性式平坦儀、ISO2631-1、Matlab



Abstract

The purpose of this research is focusing on setting the assessment method and the best assessment measurement of the bike lane ridability. The research motivations are as follows: first, in recent years, the concepts of energy saving, carbon reduction and green transportation are already paid a great attention to the public. Second, for private transit, it is trend that bicycle instead of part of cars already. Third, the existing measurement standard and certification for 3-meter straightedge or Inertial profilers are designed to the structure and riding characteristic of car instead of bicycle. Therefore, the research is mainly focused on the ridability index assessment for commuters of bike lane. For the normal commuters, adopt the common bicycle only with the saddle damper and without others dampers such as front and rear shock absorber. The research method mainly can divide into two parts: the related measurement on the bike lane, solve the bicycle motion equation with Matlab programming. For the related measurement, collect the data of the profilers of bike lane in Taipei city and ride the bicycle on the bike lane to collect the data of accelerometer equipped at the bottom of seat. For Matlab programming, calculate the simulation acceleration at the position of seat by solving the bike motion equation. Compare and correct results between measurement and simulation, and then reference the specification of ISO2631-1 to set the threshold of acceleration for bike lane ridabiltiy by means of collecting the bike



lane twenty-one kilometers for setting the bike lane ridability. In addition, set the value of acceleration to fit the accumulated percentage of 70% in order to judge the bike lane ridability due to the range with highly width from fairly uncomfortable to extremely uncomfortable. Finally, with the characteristic of bike structure, develop appropriate measurement equipments and standard so that the bike lane ridability can have an quantification as reference.

Keyword: bicycle, bike lane ridability, Inertial profiler, ISO2631-1, Matlab





目錄

口試委員會審定書	III
誌謝	V
摘要	VII
ABSTRACT	IX
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 公路與市區道路鋪面慣用平坦度與舒適度指標	5
2.1.1 國際糙度指標(IRI)	5
2.1.2 行駛指標(RN) [3]	7
2.1.3 行駛品質指數(RQI) [3]	7
2.1.4 ISO2631-1 人體全身振動量測方法[5][6]	8
2.1.5 鋪面行駛品質指標(PRQI) [6]	9
2.2 平坦度檢測儀器	10
2.2.1 剖面式平坦儀	10

2.2.2 反應式平坦儀[7]	12
2.2.3 步進式平坦儀.....	13
2.2.4 慣性式平坦儀.....	14
2.3 自行車與自行車道簡介與特性	19
2.3.1 自行車發展簡介與基本架構.....	19
2.3.2 自行車道基本特性.....	21
第三章 自行車道騎乘舒適度相關檢測設備與實驗	27
3.1 自行車道騎乘舒適度檢測設備架構與量測方法	27
3.2 自行車道剖面檢測設備介紹與方法	32
3.3 自行車座墊之彈簧係數與阻尼係數相關試驗	36
3.4 自行車道騎乘舒適度實測結果分析與評估指標構想	45
第四章 自行車模擬模型建置與驗證方法	51
4.1 自行車模擬模型建置與方法	51
4.1.1 自行車模擬模型參數訂定	57
4.1.2 中央差分法(CENTRAL DIFFERENCE METHOD, CDM)	60
4.2 自行車模擬模型驗證方法	62
4.2.1 單自由度不含阻尼之自由振動模型解析解介紹.....	62
4.2.2 單自由度含阻尼之自由振動模型解析解介紹.....	63
4.2.3 雙自由度不含阻尼之自由振動模型解析解介紹.....	63

第五章	自行車道舒適度指標代表值驗證比對與訂定	67
5.1	自行車模擬模型驗證比對結果	67
5.1.1	單自由度不含阻尼之自由振動模型解析解與數值解比對結果	67
5.1.2	單自由度含阻尼之自由振動模型解析解與數值解比對結果	69
5.1.3	雙自由度不含阻尼之自由振動模型解析解與數值解比對結果	70
5.2	自行車實測作業與模擬程式結果探討	74
5.2.1	自行車實測作業與模擬程式於瀝青鋪面比對結果	75
5.2.2	自行車實測作業與模擬程式於彩色鋪面比對結果	77
5.2.3	自行車實測作業與模擬程式於磚面人行共用道比對結果	79
5.2.4	自行車實測作業與模擬程式比對結果	81
5.3	自行車道騎乘舒適度指標代表值訂定	85
5.3.1	自行車道加速度直方圖累積百分比達 50%	87
5.3.2	自行車道加速度直方圖累積百分比達 60%	87
5.3.3	自行車道加速度直方圖累積百分比達 70%	88
5.3.4	自行車道加速度直方圖累積百分比達 80%	89
5.3.5	自行車道加速度直方圖累積百分比達 90%	89
5.3.6	小結	90
第六章	結論與建議	93
6.1	結論	93

6.2 建議	94
參考文獻	95
簡歷	99



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	4
圖 2.1 四分車模型[3]	5
圖 2.2 柔性鋪面國際糙度指標評估圖[4]	6
圖 2.3 坐式之振動量測座標圖[5]	8
圖 2.4 三米直規示意圖[7][8].....	11
圖 2.5 高低平坦儀示意圖[7][8]	12
圖 2.6 梅氏儀[7]	12
圖 2.7 BPR 平坦儀示意圖[7].....	13
圖 2.8 步進式平坦儀及其實際檢測情況	14
圖 2.9 慣性式平坦儀組成及架設示意圖[9]	15
圖 2.10 車轍高度量測示意圖[9]	15
圖 2.11 自行車專用道路示意圖[15].....	22
圖 2.12 自行車與行人共用道路示意圖[15]	22
圖 2.13 自行車專用車道示意圖[15]	23
圖 2.14 自行車共用車道示意圖[15]	23
圖 3.1 自行車道騎乘舒適度檢測設備實體車照片	27
圖 3.2 自行車道騎乘舒適度檢測設備系統架構	29
圖 3.3 自行車檢測軟體開啟畫面	30
圖 3.4 自行車檢測軟體啟動後畫面	30
圖 3.5 檢測過程小鍵盤使用方式	31
圖 3.6 摩托車加裝輔助輪之側照及後照圖[9]	33
圖 3.7 輕量型慣性式平坦儀儀器裝設圖	33
圖 3.8 輕量型慣性式平坦儀儀器各部件	34
圖 3.9 輕量型慣性式平坦儀檢測軟體開啟畫面	35

圖 3.10 輕量型慣性式平坦儀檢測軟體啟動畫面	35
圖 3.11 拉線式位移計	37
圖 3.12 量測自行車座墊彈簧係數整體架構	38
圖 3.13 載重與位移關係圖(A).....	38
圖 3.14 載重與位移關係圖(B).....	39
圖 3.15 載重與位移關係圖(C).....	39
圖 3.16 彈簧係數比例轉換示意圖	39
圖 3.17 加載鐵塊於自行車座墊上	40
圖 3.18 加速度歷時圖(一)	40
圖 3.19 加速度歷時圖(二)	41
圖 3.20 加速度歷時圖(三)	41
圖 3.21 頻率響應曲線[19]	42
圖 3.22 自行車座墊阻尼頻率響應曲線(一)	43
圖 3.23 自行車座墊阻尼頻率響應曲線(二)	43
圖 3.24 自行車座墊阻尼頻率響應曲線(三)	43
圖 3.25 自行車實測加速度值資料處理流程	45
圖 3.26 自行車實測加速度值原始歷時資料	46
圖 3.27 自行車靜止狀況下之功率頻譜圖	47
圖 3.28 自行車靜止時騎乘者加載狀況之功率頻譜圖	47
圖 3.29 自行車實測加速度值濾波後歷時資料	48
圖 3.30 各檢測人員自行車實測加速度值比較	49
圖 4.1 自行車實車構圖	52
圖 4.2 自行車之簡化模型	52
圖 4.3 釋放 u_1 之自由度	53

圖 4.4 釋放 u_2 之自由度	54
圖 4.5 釋放 u_3 之自由度	54
圖 4.6 釋放 w_2 之自由度	55
圖 4.7 釋放 w_3 之自由度	55
圖 4.8 自行車簡化模型各部分自由體圖	56
圖 4.9 自行車車架圖	58
圖 4.10 圓形柱示意圖[23]	59
圖 4.11 車架管徑截面圖	59
圖 4.12 平行軸定理示意圖[23]	60
圖 4.13 中央差分法示意圖[21]	60
圖 4.14 單自由度不含阻尼模型結構示意圖	62
圖 4.15 單自由度含阻尼模型結構示意圖	63
圖 4.16 雙自由度基本模型示意圖	64
圖 5.1 單自由度模型結構示意圖	68
圖 5.2 單自由度模型無阻尼數值解	68
圖 5.3 質量 m_1 位移量之解析解與數值解比較圖	69
圖 5.4 雙自由度模型結構(法一)	71
圖 5.5 雙自由度模型結構(法二)	71
圖 5.6 質量 m_1 位移量之解析解與數值解比較圖	72
圖 5.7 質量 m_2 位移量之解析解與數值解比較圖	72
圖 5.8 質量 m_1 位移量之解析解與數值解比較圖	73
圖 5.9 質量 m_2 位移量之解析解與數值解比較圖	73

圖 5.10	自行車實測數據與模擬程式比對流程圖	74
圖 5.11	瀝青鋪面自行車道實際照片	75
圖 5.12	自行車道瀝青鋪面剖面歷程圖	76
圖 5.13	自行車於瀝青鋪面實際量測加速度歷程圖	76
圖 5.14	瀝青鋪面自行車道模擬加速度歷程圖	76
圖 5.15	彩色鋪面自行車道實際照片	77
圖 5.16	自行車道彩色鋪面剖面歷程圖	78
圖 5.17	自行車於彩色鋪面實際量測加速度歷程圖	78
圖 5.18	彩色鋪面自行車道模擬加速度歷程圖	78
圖 5.19	磚面人行共用之自行車道實際照片	79
圖 5.20	磚面人行共用之自行車道剖面歷程圖	80
圖 5.21	自行車於磚面人行共用之自行車道實際量測加速度歷程圖	80
圖 5.22	磚面人行共用之自行車道模擬加速度歷程圖	80
圖 5.23	瀝青鋪面各量測人員實測與模擬加速度代表值比較	82
圖 5.24	彩色鋪面各量測人員實測與模擬加速度代表值比較	82
圖 5.25	磚面人行道各量測人員實測與模擬加速度代表值比較	83
圖 5.26	各量測人員實測與模擬加速度代表值誤差百分比	84
圖 5.27	自行車道舒適度指標代表值運算流程	86
圖 5.28	各路段累積百分比達 50% 之比較圖	87
圖 5.29	各路段累積百分比達 60% 之比較圖	88
圖 5.30	各路段累積百分比達 70% 之比較圖	88
圖 5.31	各路段累積百分比達 80% 之比較圖	89
圖 5.32	各路段累積百分比達 90% 之比較圖	90
圖 5.33	自行車道舒適度各材質之加速度平均代表值	91

表 目 錄

表 2.1 行駛指數(RN)所表示之路面服務力水準	7
表 2.2 ISO 2631 附錄 C 舒適度評估標準[5]	9
表 2.3 鋪面行駛品質指標(PRQI)建議範圍表[6].....	10
表 2.4 各式高速慣性平坦儀比較表[9]	16
表 2.5 各式輕量型慣性式平坦儀比較表[9]	17
表 2.6 自行車發展史[11].....	20
表 2.7 各類型腳踏自行車道淨寬度一覽表[15].....	24
表 3.1 自行車避震系統參數設定[16][17].....	36
表 3.2 自行車座墊彈簧載重與位移關係之數據	37
表 3.3 自行車座墊阻尼比	44
表 3.4 各檢測人員自行車實測加速度值	49
表 4.1 自行車各部件重量	57
表 4.2 自行車避震系統參數設定	57
表 5.1 漆青鋪面實測與模擬之加速度代表值比較	77
表 5.2 彩色鋪面實測與模擬之加速度代表值比較	79
表 5.3 磚面人行共用之自行車道實測與模擬之加速度代表值比較	81
表 5.4 各量測人員實測與模擬加速度代表值	81
表 5.5 各量測人員實測與模擬加速度代表值誤差百分比	83
表 5.6 自行車避震系統之參數設定[16][17].....	85
表 5.7 ISO2631-1 附錄 C 舒適度評估標準	90
表 5.8 自行車道剖面實測路段輸出模擬加速度代表值比較表	91
表 5.9 自行車道舒適度建議門檻值訂定	91



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

因應國際減碳共識下，行政院環境保護署已將 2010 年訂為臺灣的「節能減碳年」以因應氣候變遷相關策略，啟動適合我國需求之溫室氣體國家適當減緩行動。除了以愛護地球以及環保概念為前提之下，加上近年國際原油價格的調漲，全球各地之油價相對於過去一二十年已大幅提高，為了愛護我們所居住的地球，節能減碳與綠色交通的觀念亦逐漸受到重視。在私人運具選擇方面，近年來民眾考量於油價之需求已有更多通勤族改用自行車做為通勤之運具以取代部分汽機車的使用，以減少生活的開銷並達到節流的效果。

國內各縣市政府為提倡綠色交通之觀念的同時，且因應以自行車做為通勤之運具的民眾逐漸增加，紛紛投入自行車道的規畫與興建，在市區街道上多可見與行人共用之自行車道，更甚者劃設自行車專用車道，以加鋪不同顏色或路檔與一般機動車輛作為區隔，在交通狀況許可下，通勤族亦會以騎乘於專用自行車道上作為通勤路線。對通勤者來說，自行車道設計準則訂定一般行車速度通常保持於每小時 15~18 公里，對行人安全亦較無威脅性，相對於其他機動車輛之行駛速度較為緩慢而延長騎乘者整體之騎乘時間，因此，自行車道騎乘舒適度之良窳對用路人而言亦有一定之重要性。

於交通部運輸研究所於 1999 年公布之「自行車設計準則」著重於車道寬度、車道配置等基本要項，在自行車道舒適度方面尚無一統一標準門檻，且目前國內用於量測道路平坦度之三米直規或慣性式平坦儀的量測標準以及驗證方式皆針對小客車而設計，並不符合自行車車輛之結構以及行駛特性，因此，有必要制定一符合自行車結構等特性之自行車道專用指標。

1.2 研究目的

隨著各縣市自行車道路網的規畫與興建逐年增加，民眾所騎乘之自行車車款種類亦相當多，若逐一針對各車款自行車對自行車道之舒適性良窳，此舉於實際施作上有所困難且費時，因此本研究以一般通勤者的觀點，將結構單純之自行車作為研究目標，訂定出一較為保守之自行車道騎乘舒適度指標之代表值。本研究目的如下：

1. 推導與建立一符合自行車結構之車架模型運動方程式，並撰寫程式模擬車體模型受路面高程影響後自行車座墊處之加速度值反應，以取代實際騎乘自行車觀察各車款車型之舒適度，可提高分析效率。
2. 開發一自行車檢測儀器，透過實際騎乘於路面上收取自行車座墊處之加速度值反應，作為與本研究所建立之自行車模擬程式之結果比對，確認其模擬程式之可用性。
3. 應用輕量型慣性剖面儀於自行車道收取剖面資料，擴展其應用層面，可快速收集大量自行車路網之剖面資料，提升整體檢測效率。
4. 避免實際騎乘自行車時受各種主觀因素之影響，以路段剖面輸入模擬程式即可判斷自行車道之良窳。並且依照現有市區通勤型自行車道，訂定一騎乘舒適度評估指標與其代表值。

1.3 研究內容與方法

根據本研究前述之三項研究目的，其研究內容與方法如下：

1. 文獻回顧

首先回顧公路常用之平坦度與舒適度相關指標，做為本研究自行車道騎乘舒適度指標研擬之方向，以開發一自行車檢測儀器相關設備。配合現有自行車道設計準則之標準選用適當檢測儀器，以應用於自行車道剖面收集之儀器。再者，了解自行車之力學相關結構特性，以推導符合其特性之運動方程式並撰寫matlab 程式以提升分析效率。

2. 自行車檢測儀器建置與實測

參考 ISO2631-1 規範中之舒適度訂定，以騎乘者座墊處所反應出之加速度值大小作為本研究訂定自行車道騎乘舒適度之代表值，開發一套主要由加速度規、距離感測器以及資料擷取系統所組成之自行車檢測儀器，實際騎乘於路面上並擷取自行車座墊處之加速度值反應。

3. 推導自行車運動方程式與撰寫模擬程式

本研究以通勤者的角色為出發點，參考一般市售之通勤自行車車款之車體構造，且考量於自行車各車款類型避震器配置與避震效果皆有不同，為求得較較具代表性之結果，本研究所使用車款僅考慮一般市售自行車皆有之座墊避震器，忽略設計等級較高之前、後避震器之影響。依照其特性推導運動方程式並撰寫 matlab 程式模擬車體模型受路面高程影響後之自行車座墊處之加速度值反應。

5. 自行車實測結果與模擬程式比對及指標訂定

先透過自行車實測數據結果經過後續處理訂定一自行車道騎乘舒適度指標之代表值，於比對方面，將同一路段之剖面資料讀入模擬程式即可透過比較座墊處之加速度值以驗證其準確性後，最後其騎乘舒適度指標之門檻值藉由相同之指標代表值計算處理即可輸出各路段自行車道騎乘舒適度指標代表值。

1.4 研究流程

確立研究目的、內容及方法後，本研究之研究流程如圖 1. 1。首先進行相關文獻回顧之工作，包括道路平坦度與舒適度、自行車結構特性、自行車道設計準則、建構自行車之力學相關文獻回顧為主；接著進行推導自行車運動方程式與撰寫 matlab 程式之工作，以求取自行車座墊處之反應結果。為比對模擬與實驗結果，實地檢測以市區通勤型自行車道為對象，分別進行自行車騎乘實測與自行車道剖面收集工作做為後續分析，最終建立自行車道騎乘舒適度指標代表值。

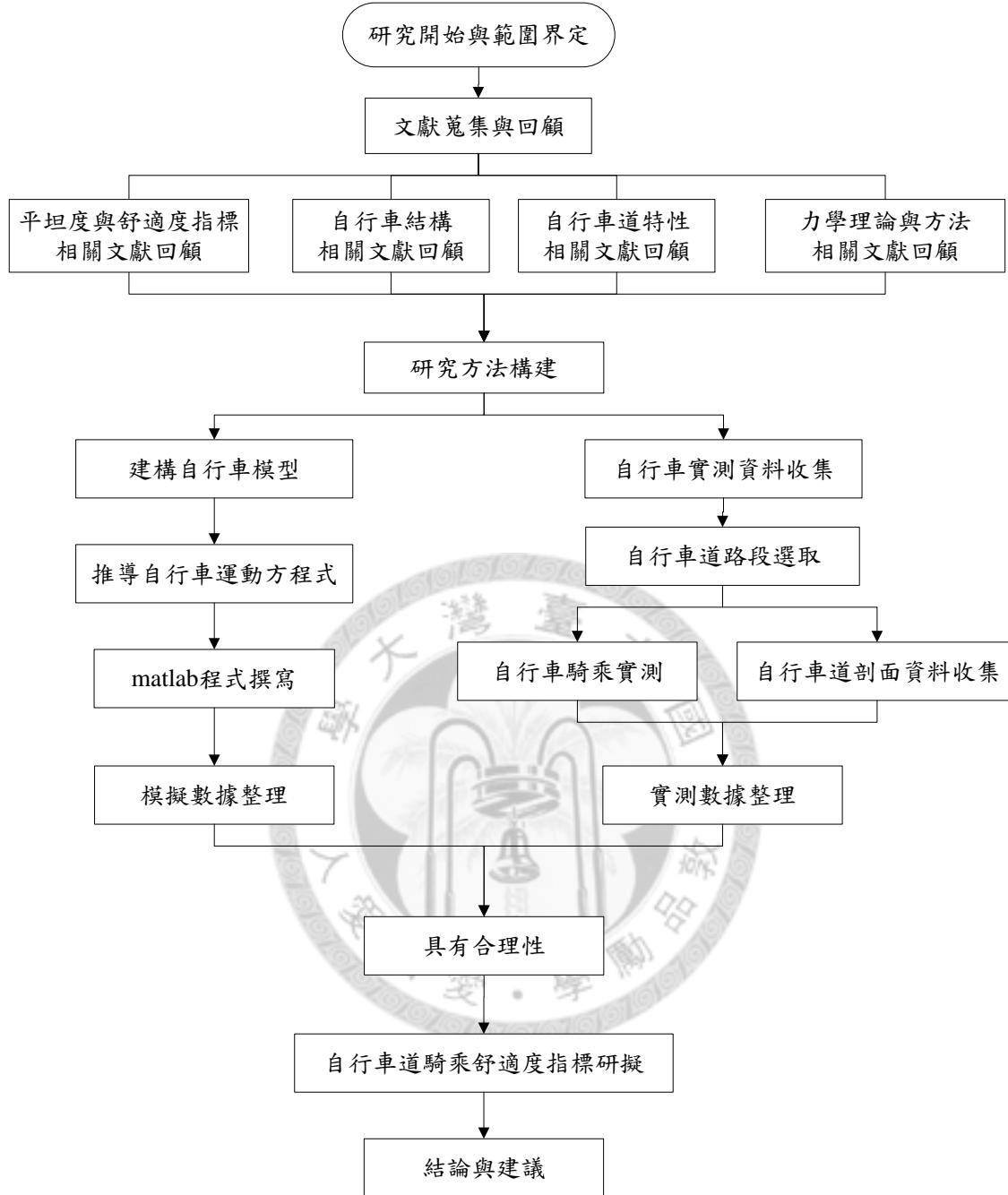


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章首先介紹公路與市區道路常用之鋪面平坦度與舒適度指標，並回顧國內外常見且具代表性之平坦度檢測儀器，接著介紹自行車之發展史並了解其結構組成作為建置自行車模擬程式之基礎，最後針對現有自行車道設計準則進行回顧。

2.1 公路與市區道路鋪面慣用平坦度與舒適度指標

本節介紹國際常用之平坦度指標以及考量於與用路人舒適度有較大關連性之平坦度指標進行回顧。

2.1.1 國際糙度指標(IRI)

國際糙度指標(International Roughness Index, IRI)係世界銀行於 1982 年於巴西等地進行國際糙度試驗(Internaional Road Roughness Experiment, IRRE)所發展而得[1]，建立國際性共通之平坦度指標，並經美國材料試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)[2]定義為模擬時速 80 公里之四分車模型(Quarter Car)如圖 2.1，行駛過試驗路段縱剖面後，單一輪軌跡之累積高程差與試驗路段長度比率，其常用單位為公尺/公里(m/km)、公分/公里(cm/km)。IRI 指標具有下列四項特性：時間軸上具穩定性、在空間中具移轉性、顯著及具代表性與有效性，為目前廣泛運用於各種儀器之平坦度指標。圖 2.2 可看出柔性鋪面國際糙度指標在不同範圍內對乘車者之舒適性與破壞種類的可能性。此指標較適用於反應一般中小型轎車、休旅車乘客之舒適度指標。

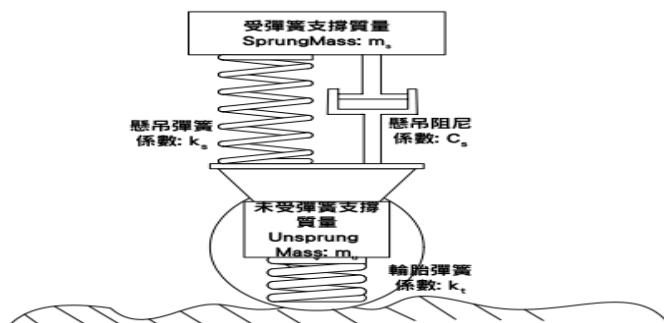


圖 2.1 四分車模型[3]

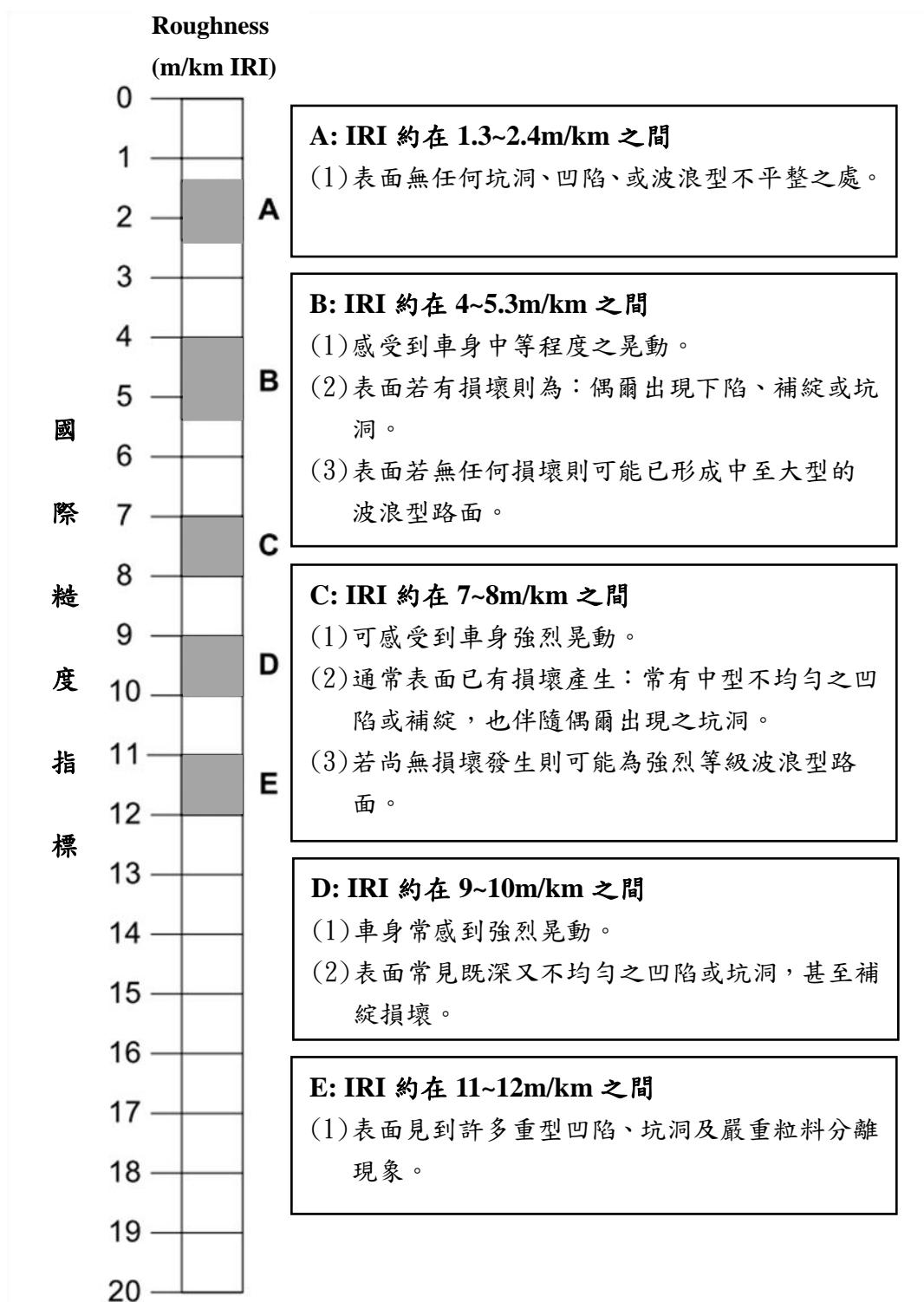


圖 2.2 柔性鋪面國際糙度指標評估圖[4]

2.1.2 行駛指標(RN) [3]

1980 年代美國聯邦公路總署(Federal Highway Administration, FHWA)所進行之道路平坦度與用路者感受者舒適度之相關研究所發展得行駛指標(Ride Number, RN)。此研究成果經 FHWA 於 1990 年代持續發展，最終成為現今採用之行駛指數。RN 之發展目標主要希望與用路人感受之舒適度有較好的關連性。

代表用路人感覺的行駛指數(RN)與 1960 年代 AASHO 道路試驗發展的現今服務力指標(Pavement Serviceability Index, PSI)相似，同樣是請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，且同時亦以慣性剖面式平坦儀量測檢測路段的剖面變化，再以數學模式將慣性式平坦儀測得之數據轉換成行駛指數 RN 值。將數字 0 到 5 之間是代表路面行駛品質，若 RN=5，則代表此路段平坦度相當平坦，反之若 RN=0，則代表此路段平坦度過於粗糙已到無法通行的地步，如表 2. 1。此指標如同 IRI，亦為中小型之五至八人座車系統對路面舒適度評估之用。

表 2.1 行駛指數(RN)所表示之路面服務力水準

路面服務水準	RN	路面服務水準	RN
完美(perfect)	4.5~5.0	不良(poor)	1.0~2.0
非常好(very good)	4.0~4.5	很差(very poor)	0.5~1.0
很好(good)	3.0~4.0	無法通行	0.0~0.5
普通(fair)	2.0~3.0		

2.1.3 行駛品質指數(RQI) [3]

自 1970 年代早期，密西根州運輸部(Michigan Department of Transportation, MDOT)多有對於道路鋪面平坦度與用路者感受舒適度之相關研究。MDOT 於經過長久研究發現，功率頻譜密度(Power Spectral Density, PSD)分析法可與用路者感受之舒適度有 90% 以上之關聯性，透過此種訊號分析方法，鋪面剖面可被區分為 0.61~1.52 公尺、1.52~7.62 公尺，以及 7.62~15.24 公尺三種波段。鋪面中波長小

於 0.61 公尺之變化只會造成車輛輪胎之噪音，大於 15.24 公尺之變化則並不會對車輛之懸吊系統產生影響。基於此研究發現，MDOT 發展一以訊號分析為計算基礎之行駛品質指標(Ride Quality Index, RQI)，然而 RQI 指標之使用仍未見廣泛。

2.1.4 ISO2631-1 人體全身振動量測方法[5][6]

鋪面平坦度直接影響者即為車輛內乘客所感受之舒適度，舒適度愈佳即代表振動程度愈小，舒適度不良即代表振動程度愈大。國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)之 2631-1 規範中訂定評估人體全身振動量之方法，可用來評估人體的舒適度，亦可反應為路面之品質，量測的重點為下列三項：人體健康舒適度、振動感覺的機率、暈車的發生機率。而人體健康舒適度與振動感覺的評估所考慮的頻率範圍為 0.5Hz~80Hz。

在振動量測座標方面，根據 ISO 2631-1 規定，全身振動方向直角座標的原點位於人體的心臟，向人體正前方延伸為 X 軸，左側為 Y 軸，頭頂正上方為 Z 軸，而當受測者坐在移動的物體上時，座標原點往下移至臀部，如圖 2.3。

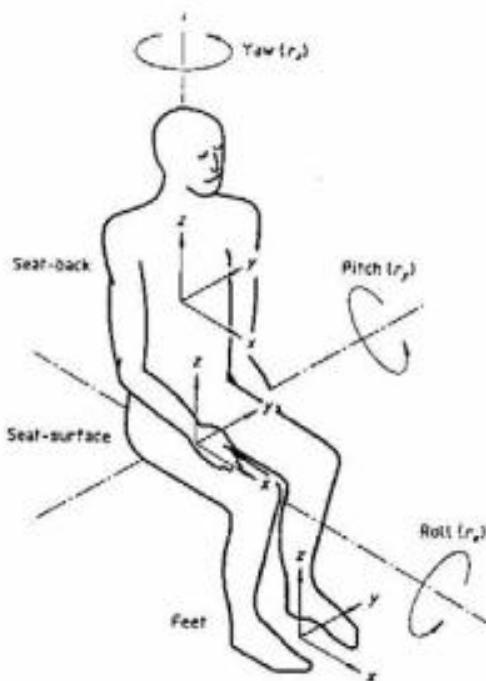


圖 2.3 坐式之振動量測座標圖[5]

振動強度之大小主要量測 X, Y, Z 三個方向的加速度(a , 以 m/s^2 為單位)來評估及表示。振動頻譜取樣可以位移、速度或加速度為取樣單位，一般最常使用加速度作為取樣之參考，但無論採何種取樣單位，均可分析求得相同的結果。其中三方向對路面品質造成影響者，主要為垂直 Z 方向之振動量，水平 X, Y 方向之振動量則多受車輛行進、移動以及轉彎行為所造成，故路面品質之舒適度可用垂直 Z 方向之加速度值作為衡量依據。

ISO 2631-1 標準於其附錄 C 中針對各種總振動值 a_v ，訂定一評估標準，如表 2.2。由表中可知，當 a_v 大於 $0.315 m/s^2$ 後，人體即會感受到不適。然而此規範附錄 C 是現今關於振動強度與人體舒適度的意見整合，並提供一個統一且方便的方法來說明振動的主觀嚴重程度，以衡量人體全身振動之舒適度，並非用來定義加權加速度之極限值。

表 2.2 ISO 2631 附錄 C 舒適度評估標準[5]

範圍(m/s^2)	舒適度
小於 0.315	不會不舒適(not uncomfortable)
0.315 到 0.63	略為不舒適(a little uncomfortable)
0.5 到 1	一般不舒適(fairly uncomfortable)
0.8 到 1.6	不舒適(uncomfortable)
1.25 到 2.5	非常不舒適(very uncomfortable)
大於 2	極度不舒適(extremely uncomfortable)

2.1.5 鋪面行駛品質指標(PRQI) [6]

鋪面行駛品質指標(Pavement Riding Quality Index, PRQI)為一個參考 ISO2631-1 與 IRI 進行整合之應用指標，此研究由交通部運輸研究所經由周家蓓教授研究團隊所開發之簡易型可攜式儀器，實地量測值比對台大之慣性式雷射平坦儀之量測結果，以慣性式平坦儀採用之 IRI 值修正 ISO2631-1 之舒適度評估表

而草擬之 PRQI，使得門檻值區隔點由 IRI 測試校估而得。如此不但可方便操作者明確判斷路面之舒適度及平坦度，亦可以提升未來路面品質績效量測設備之普及性。表 2.3 為參考 ISO 2631-1 附錄 C，且整合市區道路與省道檢測值相關性圖及營建署市區道路平坦度驗收規範、台北市道路平坦度檢測規範工作與市區道路平坦度評估準則之探討所建議之平坦度養護維修及新工 IRI 值門檻，提出對國內之鋪面行駛品質指標(PRQI)建議範圍表。

表 2.3 鋪面行駛品質指標(PRQI)建議範圍表[6]

垂直加速度 a_z 範圍(m/s^2)	舒適度描述	相對應之 IRI 範圍(m/km)	等級
小於 0.2	相當舒適	小於 1.5	A
0.2~0.6	舒適	1.5~3.5	B
0.6~1	有些不舒適	3.5~6.5	C
1~1.6	相當不舒適	6.5~10	D
大於 1.6	極為不舒適	10	E

2.2 平坦度檢測儀器

雖本研究著重於自行車舒適度之檢測，但其原理必於國際上常見之道路平坦度檢測儀器相關，故先行做些簡易介紹，依其量測原理依序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)以及慣性式平坦儀(Inertia Profilometer)等。

2.2.1 剖面式平坦儀

剖面式平坦儀之檢測原理為透過記錄輪或其他設備記錄路面高低起伏，通常為直接量測鋪面的縱剖面變化情形，主要較具代表性之兩種儀器分別為：三米直規與高低平坦儀，以下就其使用方法進行介紹。

1. 三米直規(Straightedge) [7][8]

三米直規是以耐磨損金屬或木材等材料所製成，為我國各工程單位普遍擁有之儀器，該儀器兩端各有一凸腳相距 3 公尺以站立於檢測路面上，其高度需可量測不同鋪面可能之最大高程差，如圖 2.4。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；量測方式為平行於測線方向及垂直方向。雖直規兩端設有把手以便於移動，但仍需依賴人工移動與判讀，整體檢測速度較為緩慢。

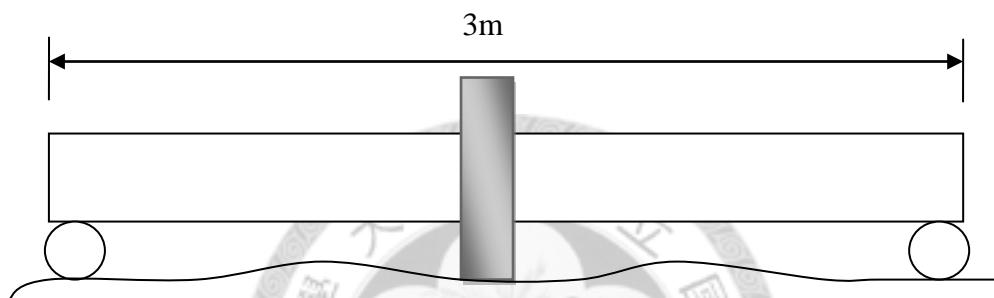


圖 2.4 三米直規示意圖[7][8]

2. 高低平坦儀[7][8]

高低平坦儀的構造與指標計算方式與三米直規相似，即為傳統三米直規之改良且可分為機械式或電子式，亦為我國各工程單位常用之平坦度驗收儀器。其主體長度仍為 3 公尺，不同處為將兩端凸腳更改為剛體膠輪，中央設有一檢測輪可隨路面高低而自由起降，透過槓桿或齒輪原理將路面高程變化記錄於紙捲上或電腦內，檢測時所量得之讀值即為單點高低差，構造如圖 2.5。但高低平坦儀仍需人力推動，因此檢測速度仍較為緩慢，約為步行速度。

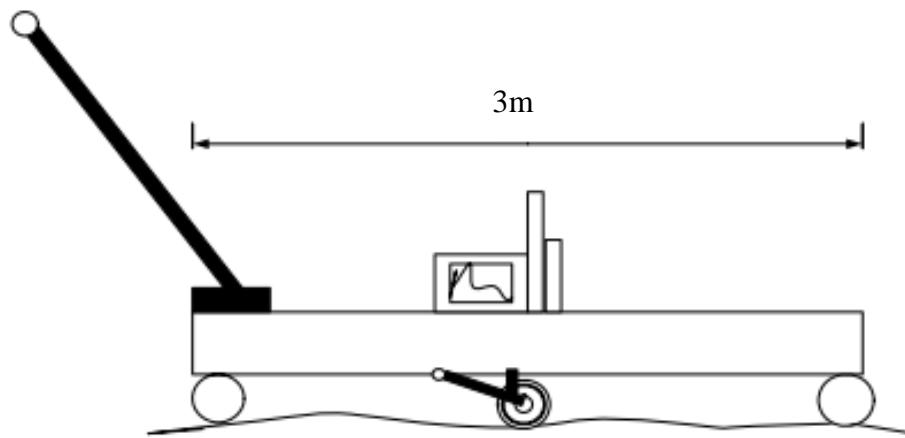


圖 2.5 高低平坦儀示意圖[7][8]

2.2.2 反應式平坦儀[7]

因剖面式平坦儀檢測速度較為緩慢，於是發展出反應式平坦儀以提高檢測速度。反應式平坦儀大致分為兩種，其一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。這兩種皆為量測車輛對路面輪廓變化之反應，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)

梅氏儀之檢測原理為在車輛行駛過程中，記錄車軸與車輛本身避震系統移動之累積量，得到之數值即為梅氏指標，以其數值大小評估檢測路段平坦與否，梅氏儀之構造如圖 2.6。



圖 2.6 梅氏儀[7]

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

BPR 平坦儀為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。其檢測速度通常為每小時 32 公里，儀器構造如圖 2.7。

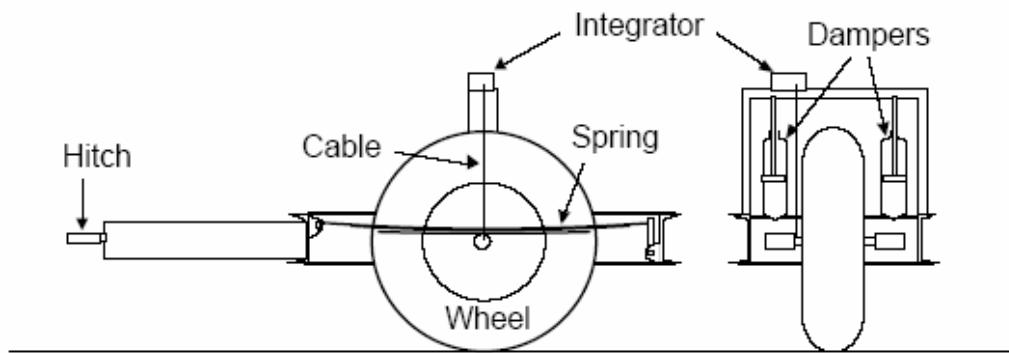


圖 2.7 BPR 平坦儀示意圖[7]

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被工程師接受。
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。

2.2.3 步進式平坦儀

本節介紹之步進式平坦儀為澳洲道路研究委員會(Australia Road Research Board, ARR)所生產之具有代表性之鋪面平坦度檢測儀器，如圖 2.8。該儀器之量測原理與其他各類型平坦儀不同，量測時需以人力推動，行進速度約為每小時 800 公尺，該儀器量測原理為利用其量測臂沿一測線連續量測路面高程，取樣間距為每 24.13 公分記錄一筆剖面高程資料並自動累加距離輸出路面縱剖面相對高程值。該儀器量測誤差小於 0.01 公釐，每 50 公尺之剖面資料量測誤差則小於 1.0 公釐，具有高精確度之量測儀器且於剖面量測時可達高度重現性，因此，常用來

建立參考剖面並與新開發儀器之高程剖面資料比對之用，以驗證其正確性[7][9]。



圖 2.8 步進式平坦儀及其實際檢測情況

2.2.4 慣性式平坦儀

慣性式平坦儀為一種可記錄道路真實剖面高低並輸出平坦度值之儀器，主要組成包括加速度規(Accelerometer)、位移感測器、距離感測器(Distance Measurement Instrument, DMI)、電腦(包括軟體及硬體)，如圖 2.9，其中位移感測器針對其量測設備又分為雷射、超音波及紅外線測距。慣性式平坦儀基本原理為利用加速度規兩次積分後所得之車身垂直位移改變量，以及位移感測器所得之車身與鋪面之距離相加減，即可得所檢測之鋪面縱向剖面之高程真值，乃以非接觸式對路面輪廓進行連續高程量測，其各感測器設備可裝置於任何車種上，依照裝置車種類型可分為兩種，分別為高速慣性式平坦儀(High-Speed Profiler)及輕量型慣性式平坦儀(Lightweight Profiler)，以下分別介紹常見之車款類型[7][9]。

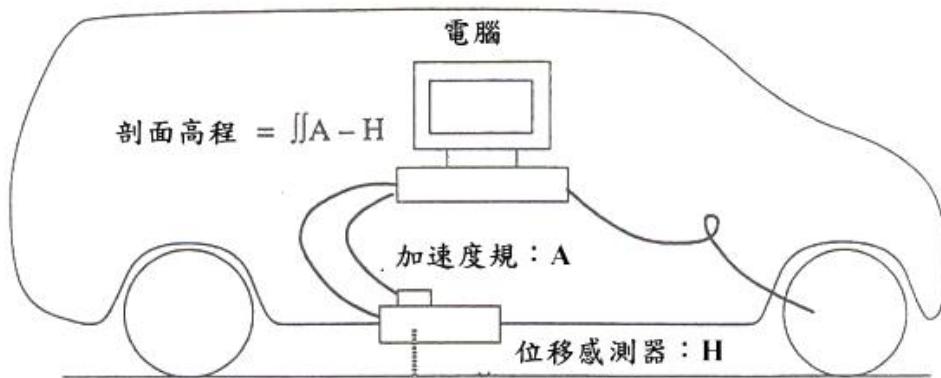
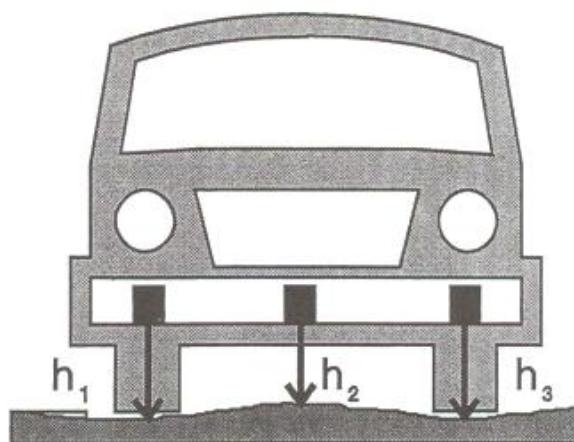


圖 2.9 慣性式平坦儀組成及架設示意圖[9]

1. 高速慣性式平坦儀[9]

高速慣性式平坦儀除了可收取道路縱向剖面高程數據，作為平坦度分析之用，亦可藉由架設五具位移感測器(前後輪及中央處)以計算路面橫斷面之車轍值，如圖 2.10；架設攝影系統以記錄該道路之實際狀況，譬如一般道路、路肩、道路標誌及其它路面特徵，較常見之四種高速慣性平坦儀比較表如表 2.4。



$$\text{車轍深度} = (h_1 - 2h_2 + h_3)/2$$

圖 2.10 車轍高度量測示意圖[9]

表 2.4 各式高速慣性平坦儀比較表[9]

儀器名稱	車款圖片	位移 感測器	車轍 量測	攝影 系統
ARAN 道路檢測車		雷射	有	有
南達科達州 縱剖面量測系統		超音波	有	無
ARRB 雷射平坦儀		雷射	有	無
台大高速 慣性式平坦儀		雷射	無	有

2. 輕量型慣性式平坦儀[9]

輕量型慣性式平坦儀之感測器一般裝置於較輕型之多用途車上，國外常見之輕量型慣性式平坦儀載具多為高爾夫球車(Golf Cart)或越野車(All-Terrain Vehicle)等，而我國於民國 95 年由臺灣大學研發之輕量型慣性式平坦儀是以電動代步車做為載具；於民國 100 年改用輔輪式摩托車做為載具以提高檢測速度及重現性與準確性之驗證，而輕量型載具之特色為車體重量較輕，可減少其對於新工鋪面正向壓力，用在甫完工之道路上進行施工品管，最為恰當。

表 2.5 就國內外六種輕量型平坦儀進行比較，分別為 Ames Lightweight Profiler 所製造之 LISA、International Cybernetics Corporation 所製造之 Mobile Data Recording System(行動數據記錄系統)、K J Law Engineering 所製造之 T6400 輕量型慣性式平坦儀、Surface Systems and Instruments 所製造之輕量型慣性式平坦儀 Pathway Services Incorporated 所製造之 PathRunner LITE、臺灣大學於民國 100 年改良之輕量型慣性式平坦儀。各家儀器之輕量型平坦儀裝設之車種不同，檢測速度範圍也不一，但其感測器等級皆符合 ASTM E950[10] 儀器精密度等級一要求。

本研究所採用之臺灣大學輕量型慣性式平坦儀之檢測方法與設備更新將於 3.2 節進行更詳細之介紹與說明。

表 2.5 各式輕量型慣性式平坦儀比較表[9]

儀器名稱	車款圖片	車種	檢測速度
LISA		越野車	13~20kph

T6400		越野車	16~40kph
ICC		越野車	64kph 以上
SSI		越野車	5~32kph
PathRunner LITE		高爾夫球車	8~32kph

台大輕量型 慣性式平坦儀		輔輪式摩托車	30kph 以上
-----------------	-----------------------------------------------------------------------------------	--------	----------

2.3 自行車與自行車道簡介與特性

簡述了上述以檢測車行道路為主之各項檢測儀器後，本節先對自行車發展演進進行回顧，為了解自行車車款之特性，回顧常見之自行車基本架構以作為自行車力學模型建置之基礎以及了解現有的自行車設計準則所訂定之自行車道相關基本特性。

2.3.1 自行車發展簡介與基本架構

自行車之發展史如表 2. 6。最早只單用以木製為主之兩車輪構造所組成，其驅動方式仍需人力接觸地面以推進，漸漸演變至今主要以鏈條系統且後輪驅動之兩輪自行車為主，其驅動方式即為現今施力於腳踏板透過鏈條系統帶動後輪以前進之結構。有了自行車整體架構公認性之原型後，英國機械工程師約翰·斯塔利，從機械學、運動學的角度首度設計出以橡膠車輪提升舒適性且車型與現今自行車車款相近。而愛爾蘭的獸醫約翰·鄧洛普發明了充氣輪胎，從根本上改變了自行車之騎乘性能，在不同路面上提供良好的貼地性且可減少車輪轉動時的阻力，可謂為自行車「避震」的先驅。其中自行車避震的目的在於消滅行駛時所造成之振動以減少騎乘者之不適感[11][12]。

表 2.6 自行車發展史[11]

	時間	對自行車之貢獻	自行車圖片
美索不達米亞	西元前 3500 年	用兩輪的車輛以搬運物品及乘載人員	
達文西	西元 1493 年	是第一位設計二輪車的人，設計稿已有鏈條設計，但尚無製造完成	
克姆提・西夫拉克	西元 1791 年	木頭製造，以動物造型的橫樑為主體，沒有轉向系統	
德萊西恩	西元 1817 年	第一輛有轉向系統之木製二輪車，於 1818 年在法國巴黎公開展示	
柯催克・麥里恩	西元 1839 年	第一輛由後輪驅動之自行車，此時的自行車才真正雙腳離地	
皮耶・米蕭父子	西元 1860 年	第一輛由前輪驅動之自行車，於前輪裝置能轉動之腳蹬板，鞍座架於前輪上	
詹姆士・史塔克 詹姆士・塞特	西元 1885 年	第一輛前後輪大小相同且有鏈條系統之自行車，公認為是現代自行車之原型	

自行車基本架構所包含之各部組件相當多，依其各零部件之功能加以分類，自行車各個子系統可分為以下六點[11]：

1. 傳動系統：具備「傳遞動力」的功能，可將騎乘者的踩踏力傳遞至車輪系統。包含曲柄組、鏈條、大尺盤與飛輪。
2. 變速系統：藉由改變鏈條所在的齒片位置，將有限的人力進行最大的運用，透過前後齒片的搭配，產生類似槓桿效果以達到更大之輸出動力，以符合不同的騎乘條件。其包含拉桿、前變速器與後變速器。
3. 紗車系統：具備「制動」的功能，提供制動力使自行車減速或停止。主要是由煞車把手、夾器、煞車皮、煞車內線以及導管所組成。
4. 轉向系統：具備「轉向」的功能，負責轉向與車身的平衡。包含車把、車把立管、前頭腕組與前叉。
5. 車架系統：整體車身的支撐結構，並具有支撐與避震之功能。包含頭管、上管、下管、座管、座支柱與鍊支柱。
6. 輪組：單車運轉的核心，是影響騎乘性能之關鍵之處亦可間接吸收行進間所造成的振動。包含花鼓、鋼絲、輪框與內外胎。

2.3.2 自行車道基本特性

本研究主要探討自行車道種類為「市區通勤自行車道系統」，通勤型路網規劃與建置，配合自行車短程運輸之特性，提供各項功能特性為安全性、舒適性、直通性、吸引性、配套措施等[13]。由小範圍的「端點路網」作為發端，擇定重要旅次產生吸引點作為端點，包括：住宅區、重要公共場所等，以端點周圍3~5公里範圍規劃自行車道路網，在各端點路網間再以自行車道連結，逐步構成完整的自行車道路網[13]。

國內現行自行車道的建置受到國內道路擁有數量龐大的機車，其行駛空間與自行車部分重疊，故將自行車道劃設於與機動車輛實體間隔方式，包括車道上設實體分隔或劃設於人行道上。但若強制縮減機動車輛空間，易遭致機動車輛使用者反彈，使得部分自行車道劃設於人行道與行人共用人行道方式為優先。當自行

車使用率提升後，且自行車流與行人產生一定程度衝突時，可拓寬人行道或設置自行車專用道[14]。綜合以上因素，自行車道主要可分為四種類型[15]：

1. 自行車專用道路：特別設計僅提供自行車使用之道路，其車道不與其他車道相關如圖 2. 11。
2. 自行車與行人共用道路：於自行車路網範圍內劃設特定空間，僅提供自行車與行人共用，其他車種不得佔用行駛，常利用標線或鋪面顏色作為分隔方式且自行車與行人活動空間採混合使用方式，如圖 2. 12。
3. 自行車專用車道：在道路上之一般車道旁增設之車道僅供自行車使用，路權屬於自行車，如圖 2. 13。
4. 自行車共用車道：道路上一混合車流使用之車道，亦提供給自行車使用，如圖 2. 14(a)；道路上一混合車流使用之車道，將自行車道劃設於人行道，提供自行車與行人混合使用，與自行車與行人共用道路相較之下，其車道寬度較為狹窄，如圖 2. 14(b)。



圖 2. 11 自行車專用道路示意圖[15]

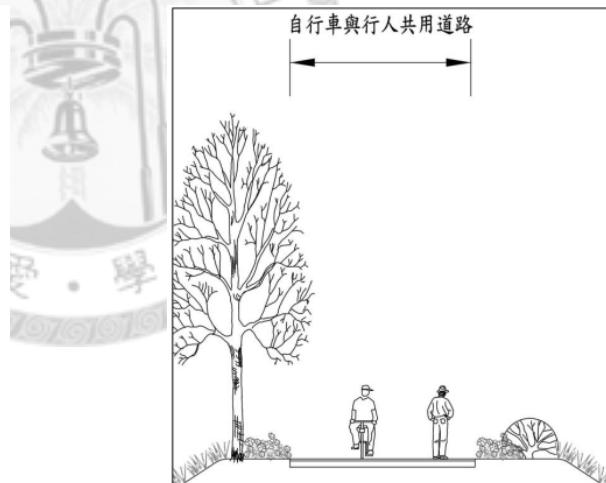


圖 2. 12 自行車與行人共用道路示意圖[15]

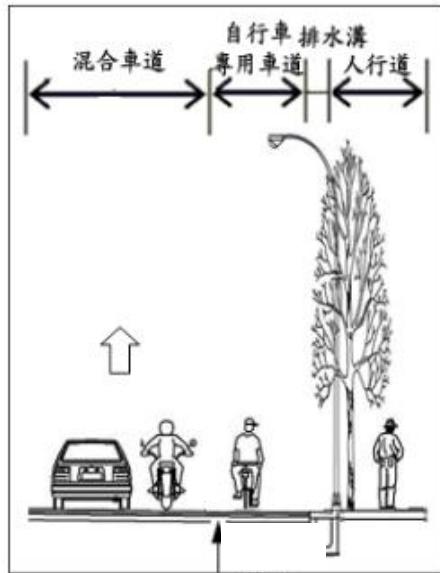
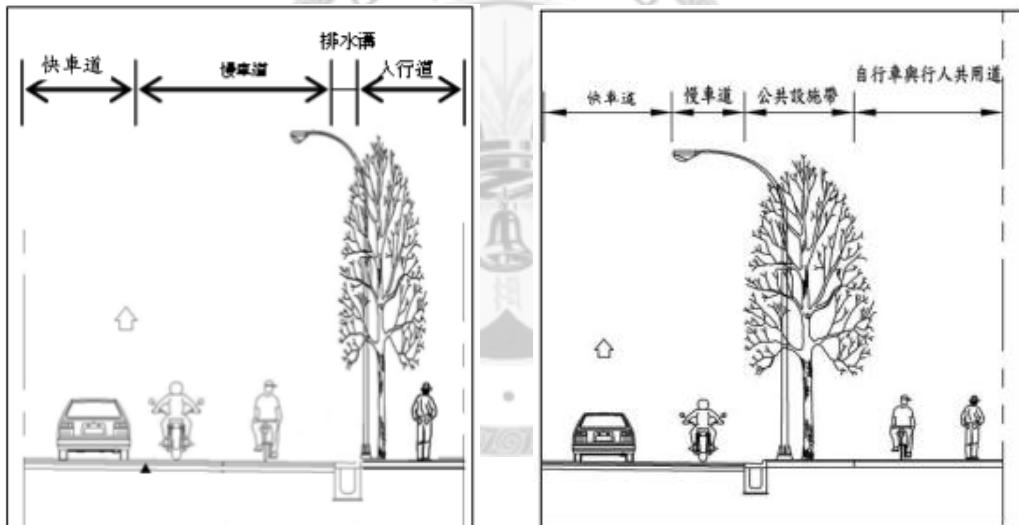


圖 2.13 自行車專用車道示意圖[15]



(a) 自行車與機動車輛共用車道

(b) 自行車與行人共用人行道

圖 2.14 自行車共用車道示意圖[15]

上述四大類型之自行車道種類淨寬度如表 2.7，總觀其淨寬度多為 2.0 公尺以上。對於本研究所需相關檢測設備(自行車檢測設備與輕量型慣性式平坦儀)而言，皆有足夠的寬度予以行駛。

表 2.7 各類型腳踏自行車道淨寬度一覽表[15]

自行車道 類型	分隔/位置	方向	淨寬度(m)	備註
自行車 專用道路		單向	2.0m 以上為宜, 最小 1.2m	單車單向
		併行	3.0m 以上為宜, 最小 2.0m	雙車單向
		雙向	3.0m 以上為宜, 最小 2.5m	雙車雙向
自行車與 行人共用 道路	混用		4.0m 以上為宜, 最小 3.0m	
	分隔	單向	3.2m~3.5m	(人行道：2.0m 以上為宜， 自行車：1.2~1.5m 以上)
		併行	4.0m~4.5m	(人行道：2.0m 以上為宜， 自行車：2.0~2.5m 以上)
		雙向	4.5m 以上	(人行道：2.0m 以上為宜， 自行車：2.5m 以上)
自行車 專用車道	人行道	單向	1.5m 以上為宜, 最小 1.2m	單車單向
		併行	2.5m 以上為宜, 最小 2.0m	雙車單向
		雙向	2.5m 以上為宜	雙車雙向
	車道上	單向	1.5m 以上為宜, 最小 1.2m	單車單向
		併行	2.5m 以上為宜, 最小 2.0m	雙車單向
		雙向	2.5m 以上為宜	雙車雙向
自行車 共用車道	機車混合	標線	2.0m 以上	單向
		實體	2.5m 以上	單向
	汽車混合		3.5m 以上, 不宜大於 4.5m	單向
	與人行混合		2.5m 以上為宜, 最小 2.0m	不分單向與雙向

註：在自行車專用車道或專用道路寬度小於 2.0 公尺時應禁止三輪腳踏車進入

由於上述四種類型之自行車道各不相同，其設置位置必將影響其施工技術。

圖 2. 13、圖 2. 14(a)之自行車道均與機車甚至混合車流車道鄰臨，其施作方式與一般車道無異，鋪面材質亦近似，但僅在標線劃設上分隔出自行車專用車道。而圖 2. 11 為專為自行車行走而鋪設之車道，其施工技術(包括施工儀器與鋪面材質)可能均不同於一般車道，為近年來所新發展之鋪面工程。至於圖 2. 12、圖 2. 14(b)之自行車與人行共用之車道，可能施工技術偏重於人行道之既有特色及工法。但不論為何種自行車道，其既設為通勤用車道，即因共同具有一定騎乘舒適度或平坦度以符合騎乘車之要求。





第三章 自行車道騎乘舒適度相關檢測設備與實驗

本章介紹本研究所開發之自行車道騎乘舒適度檢測設備架構，主要由距離感測器與加速度規所組成，作為評估自行車道騎乘舒適度績效之指標；接著介紹自行車道剖面收集相關檢測儀器與使用方式，並透過實驗求得自行車座墊處之彈簧係數與阻尼係數以輸入後續模擬程式，最後依照自行車騎乘舒適度檢測設備之實測結果訂定自行車道騎乘舒適度指標代表值之構想，作為後續實測結果與模擬程式之比對。

3.1 自行車道騎乘舒適度檢測設備架構與量測方法

本研究之目的為探討市區通勤者騎乘自行車道之騎乘舒適度指標研擬，故研究採用自行車作為實地檢測騎乘舒適度之運具。自行車選用架構參考一般市售通勤車款，其結構避震系統僅有座墊避震器，並無設計等級較高之前、後避震器之配備，故本研究使用架構單純之自行車進行後續模擬與檢測工作，選用車款照片如圖 3.1。



圖 3.1 自行車道騎乘舒適度檢測設備實體車照片

其設備系統架構包括四部分如圖 3. 2，分別為加速度規、資料擷取系統、距離感測器、碼表以及小鍵盤，其中加速度規裝置於座墊下方，並確保其加速度規保持水平，以量取人體騎乘時之垂直加速度值，作為舒適度之衡量標準；資料擷取系統則可將加速度規量測所得資料透過擷取卡顯示於電腦上；距離感測器裝置於自行車龍頭上乃因自行車車輪輪軸較為特殊，不便直接裝設距離感測器，故於車軸處加裝一轉接器，但使得原距離感測器之規格為 1000 pulse/圈，因加裝轉接器而改變其車輪每圈之 pulse 數，故應不同騎乘者進行距離校估；碼表則用來固定騎乘速度，參考自行車設計準則建議以每小時 15~18 公里為最佳行駛速率，對行人安全亦較無威脅性[15]，故本研究訂定一般市區通勤者騎乘速度約 15 公里/小時；小鍵盤則利用其輕便特性來設定快捷鍵，用來取代直接透過電腦啟動、標記與停止自行車檢測軟體，標記功能主要用以找出自行車定速之距離處。





(a)加速度規

(b)資料擷取系統



(c)距離感測器與其轉接器



(d)碼表

(e)小鍵盤

圖 3.2 自行車道騎乘舒適度檢測設備系統架構

開啟檢測軟體畫面如圖 3.3，自行車平坦度檢測設備系統資料擷取軟體設定加速度值取樣頻率為 2000Hz，其代表每秒兩千筆之數據；距離感測器則為每秒紀錄一次行進累積 pulse 數。加速度值(圖 3.4 中” ACC” 欄位)所量測得之單位為電壓(伏特, volt)，除上其轉換參數(scale factor)：804.6mv/g，即可得其加速度 g 值；行走距離(圖 3.4 中” Distance” 欄位)所量測得之單位為 pulse 數。本研究所開發之自行車騎乘舒適度檢測儀器並無雷射配備，故” Laser” 欄位無數據顯示，為空白欄位。

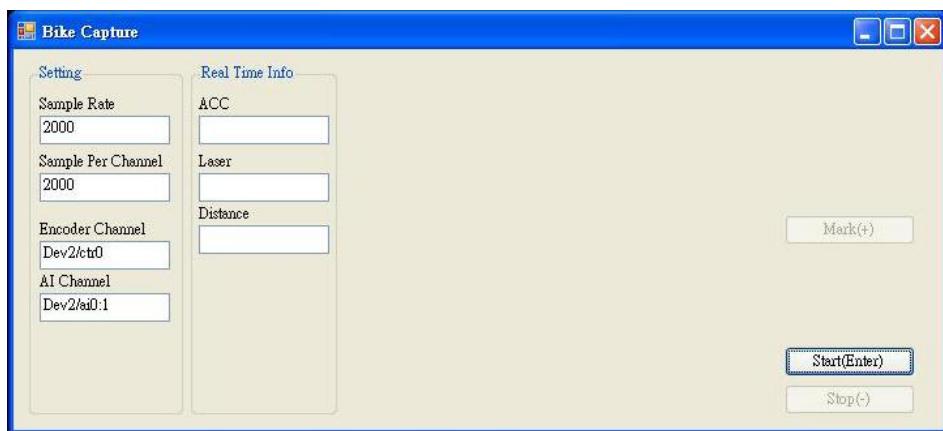


圖 3.3 自行車檢測軟體開啟畫面

自行車檢測軟體啟動後畫面如圖 3.4，加速度值欄位約為 0.81 左右；Distance 欄位從 0 開始隨行進距離增加而增加。自行車實際騎乘檢測過程當中，因電腦放置於自行車前籃中，因此透過裝置於手把旁之小鍵盤如圖 3.5，利用快捷鍵「Enter」啟動檢測軟體、「+」標記達定速之檢測距離處、「-」停止檢測軟體。



圖 3.4 自行車檢測軟體啟動後畫面



圖 3.5 檢測過程小鍵盤使用方式

利用上述之自行車騎乘舒適度檢測設備進行實際騎乘量測。於實際量測前應先收集市區通勤型自行車道路網調查與踏勘，路段鋪面種類常見的可分為傳統瀝青鋪面、彩色鋪面、磚面；路權方面可分為自行車專用道路、自行車專用車道、人行共用道、人車共用道。而準備工作可分別以下 3 點：

1. 確認胎壓，依車輪上標記為準，各廠牌應有不同，本研究所使用之車輪之胎壓為 65psi。
2. 安全上考量，應穿著反光背心。
3. 因上述介紹之檢測設備已固定於自行車本身，確認線路訊號是否連線至電腦，即可進行量測工作。

備妥準備工作事項，即可於量測路段，透過實際騎乘自行車收取裝設於自行車座墊下方之加速度規的垂直加速度值。

3.2 自行車道剖面檢測設備介紹與方法

由 3.1 節所介紹之自行車騎乘舒適度檢測設備，主要為量測用路人騎乘於自行車道所感受之垂直加速度值來衡量其舒適度以及評估自行車道之平坦度良窳。而受到自行車載具車速上限限制、騎乘者之體重影響以及其騎乘時之穩定度，此方法將不適合大範圍使用或列為標準檢測方法，因此自行車路段剖面仍需額外收集。本研究利用國立臺灣大學於民國 100 年所研發之輕量 II 型慣性式平坦儀做為主要檢測設備，以進行後續自行車模擬程式中之剖面輸入作業，若遇自行車路段較為狹窄或加速區距離不足以符合輕量 II 型慣性式平坦儀之檢測速度，亦可使用步進式平坦儀進行小範圍自行車路段剖面收集。

本研究所採用之輕量型慣性式平坦儀其相關設備，因一般摩托車車型為兩輪式之載具，考量自摩托車駕駛人之騎乘特性，故在後輪之兩側加裝同尺寸之輔助輪，增加其穩定度如圖 3. 6[9]。此慣性式平坦儀除載具本身外，主要設備可分為四部分：位移感測器、加速度規、距離感測器以及資料擷取系統，如圖 3. 7。文獻中[9]針對檢測速度大小進行探討並依循 CNS15371 驗證規範於臺灣大學竹北校區之實驗道路分別以每小時 10~40 公里之檢測速度各進行 12 次輕量型慣性式平坦儀重複性驗證發現當檢測速度超過每小時 30 公里時，其量測數據最為穩定且正確，其交叉相關性可通過規範重複性 92% 及準確性 90% 之門檻值，並且所量得之路段剖面亦能貼近真實剖面之結果。



圖 3.6 摩托車加裝輔助輪之側照及後照圖[9]



圖 3.7 輕量型慣性式平坦儀儀器裝設圖

為使輕量型慣性式平坦儀應用於自行車道，車載設備除了上述四種檢測設備外，本研究期間更新兩組設備包含標記按鍵以及小鍵盤，其中標記按鍵用來記錄當檢測速度達每小時 30 公里之所在位置點可任意裝置於操作者方便之處；小鍵盤則可取代開啟檢測電腦，透過小鍵盤之快捷鍵設定，即可達到啟動與停止輕量型慣性式平坦儀檢測程式。

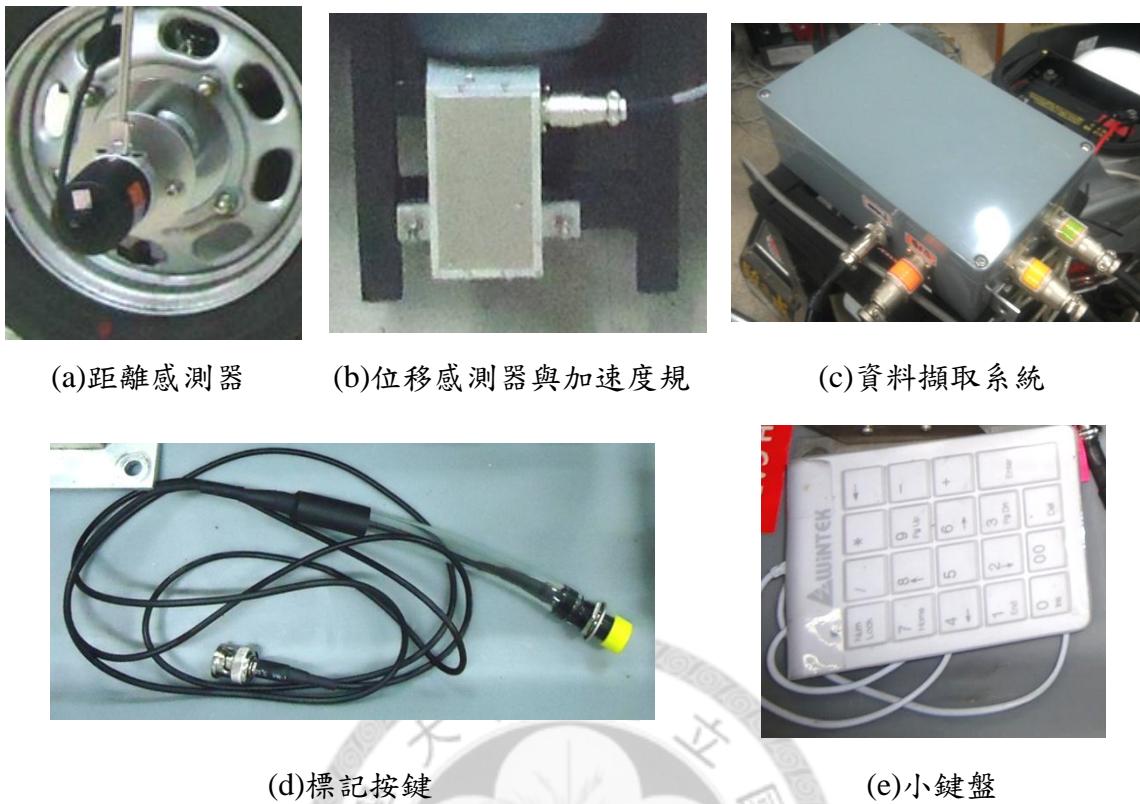


圖 3.8 輕量型慣性式平坦儀儀器各部件

輕量型慣性式平坦儀檢測方法，分別為以下三點：

1. 確認胎壓，輕量型慣性式平坦儀四輪胎壓皆為 30psi。
2. 架設距離感測器、位移感測器、加速度規、資料擷取系統、標記按鈕以及電腦於輕量型慣性式平坦儀上。距離感測器之解析度為一圈 1000 個 pulse，亦即架設在車輪輪軸上，每轉一圈可測得 1000 個 pulse，此單位可透過距離校估的方式，轉換為常見的公制單位；位移感測器架設高度為 15 公分，雷射之取樣頻率為 800Hz；加速度規與位移感測器一併設計於同一鐵盒裡，可隨車身因路面高低起伏而量測得車體垂直位移量；資料擷取系統固定於車身之架子上；標記按鈕裝置於把手處以便操作者記錄；電腦則由另一人員於後座手持電腦並操作小鍵盤以開啟或停止檢測程式，共需兩位檢測人員。

3. 開啟電腦之輕量型慣性式平坦儀檢測軟體如圖 3.9，取樣頻率(Sample Rate)皆為 800Hz, ACC 欄位為加速度值之電壓值；Laser 欄位為雷射之電壓值；Distance 欄位為距離之 pulse 數；Mark 欄位為一數位訊號之電壓值。檢測軟體可藉由 Start 鍵(Enter)開啟如圖 3.10，ACC 欄位約為 0.7~0.8；Laser 欄位約為 3.2；Distance 欄位因車體尚未前進，故應為 0；Mark 欄位則採用類比訊號作為其訊號種類，尚未按下標記按鈕時為 0~2 之間之電壓變動值，當按下標記按鈕其電壓值即會攀升至 5，因此判斷邏輯即為電壓值達 2.5 時即表示檢測人員已按下其標記按鈕，作為一距離標記處。

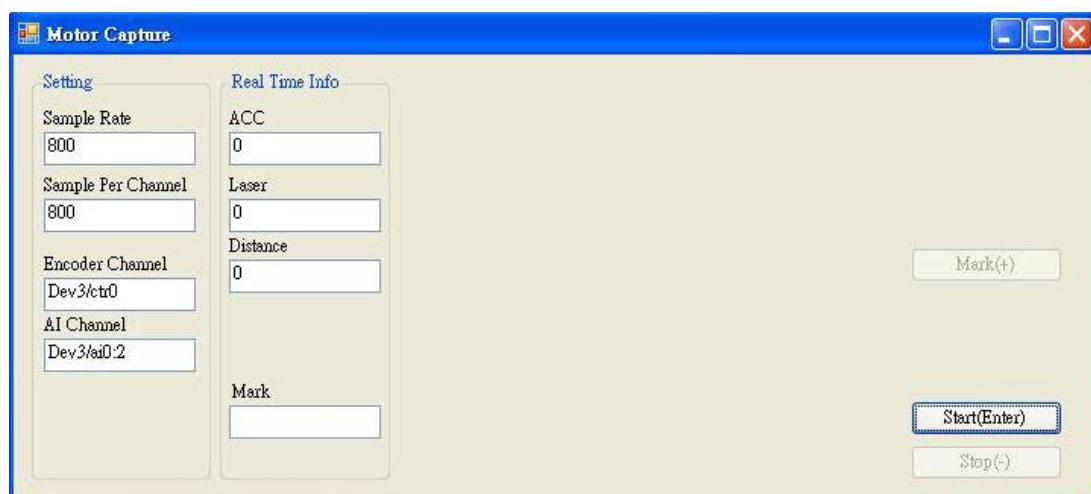


圖 3.9 輕量型慣性式平坦儀檢測軟體開啟畫面



圖 3.10 輕量型慣性式平坦儀檢測軟體啟動畫面

3.3 自行車座墊之彈簧係數與阻尼係數相關試驗

本研究參考 He 等人[16][17]所訂定之彈簧係數與阻尼係數設定值如表 3.1 作為參考，但為使本研究所使用之車款種類於自行車實際騎乘量測與模擬程式進行比對且座墊處之垂向加速度值為本研究主要參考指標，故額外進行實驗量測與計算本研究座墊避震之彈簧係數與阻尼係數。

表 3.1 自行車避震系統參數設定[16][17]

	彈簧係數(N/m)	阻尼係數(N-s/m)
座墊避震	48650	1000
前後輪	134000	272

座墊避震之彈簧係數以拉線式位移計如圖 3.11 進行量測，以鐵塊做為載重，分別用磅秤量測每塊鐵塊重量並使其保持約每 12kg 左右一間距之載重，得到不同載重下座墊彈簧之位移量，共進行三次，如表 3.2 之 A, B 及 C 所示，量測實驗整體架構如圖 3.12，再將載重(N)與位移(m)之關係求其迴歸線，斜率即為彈簧係數 K 值，如圖 3.13 ~ 圖 3.15。將三次實驗之斜率加總取平均值，得自行車座墊避震之彈簧係數平均為 67957(N/m)。但於實際實驗狀況，欲使載重能平穩加載於座墊上方，並非將載重直接施加於座墊彈簧正上方，故求得之彈簧係數依照實際擺放位置與座墊彈簧之實際尺寸進行修正，示意圖如圖 3.16，因此經虎克定律(Hooke's law)之外力與位移量成正比修正後，求得自行車座墊避震之彈簧係數值 k'_1 為 33978.5(N/m)，此值較表 3.1 中 He 之研究值為低，但仍為合理值。

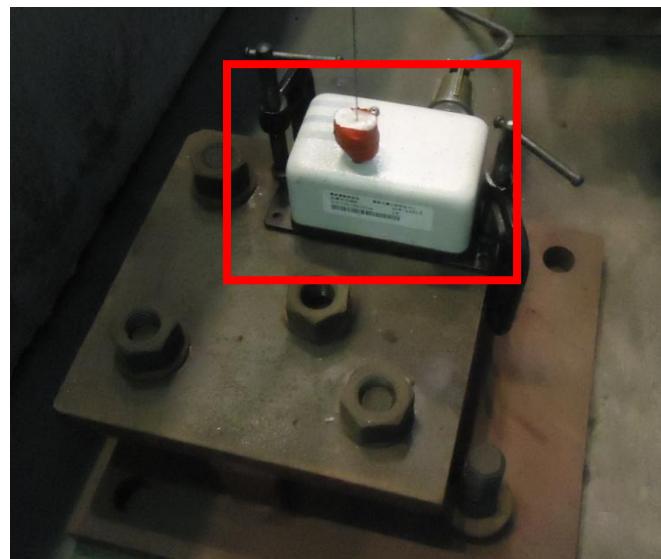


圖 3.11 拉線式位移計

表 3.2 自行車座墊彈簧載重與位移關係之數據

次 數	載重 (kg)	載重 (N)	位移 (m)	次 數	載重 (kg)	載重 (N)	位移 (m)	次 數	載重 (kg)	載重 (N)	位移 (m)
A				B				C			
1	0	0	0.45937	1	0	0	0.4593	1	0	0	0.459
2	12	117.72	0.4574	2	12	117.72	0.4575	2	12	117.72	0.4574
3	23	225.63	0.4565	3	23	225.63	0.4563	3	23	225.63	0.4562
4	35	343.35	0.4545	4	35	343.35	0.4546	4	35	343.35	0.4542
5	47	461.07	0.4526	5	47	461.07	0.4527	5	47	461.07	0.4521
6	59	578.79	0.4509	6	59	578.79	0.4511	6	59	578.79	0.4502

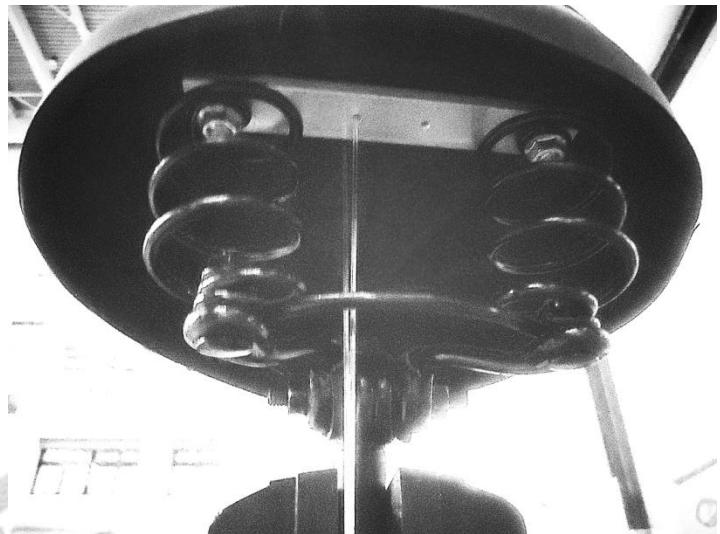
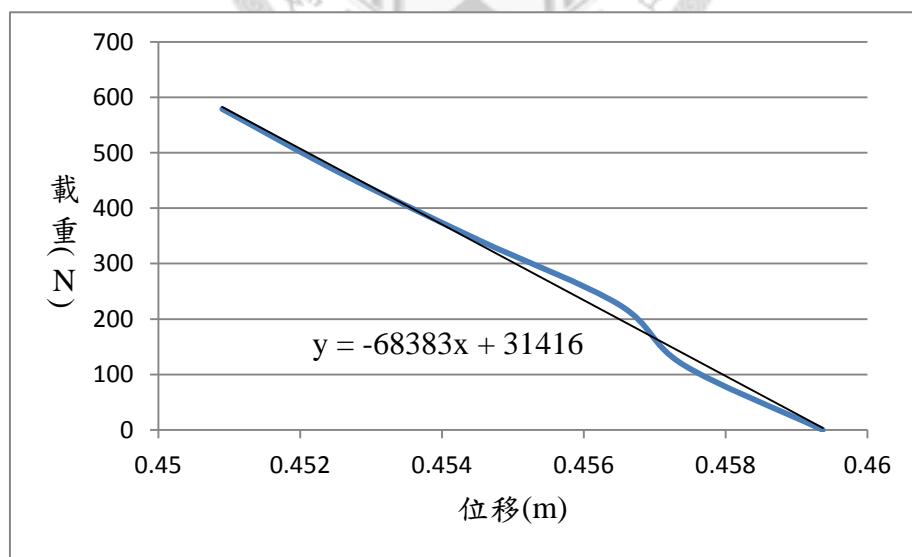


圖 3.12 量測自行車座墊彈簧係數整體架構



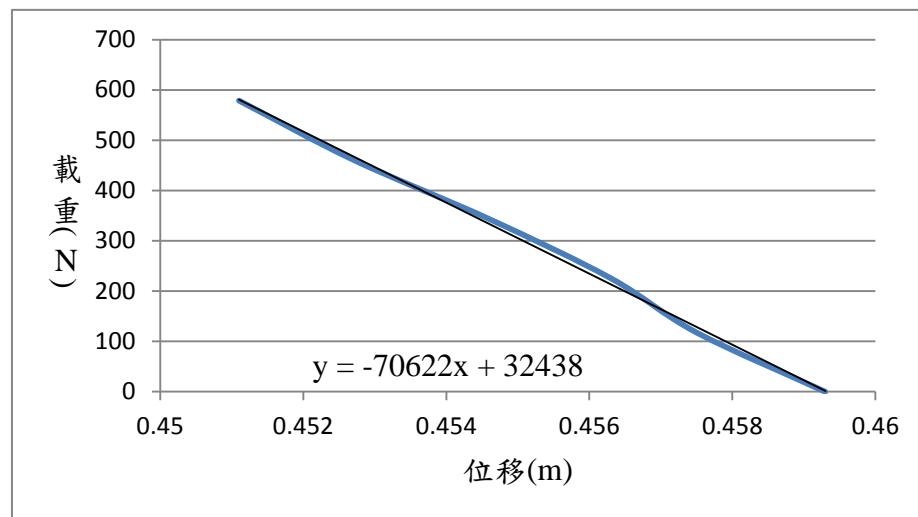


圖 3.14 載重與位移關係圖(B)

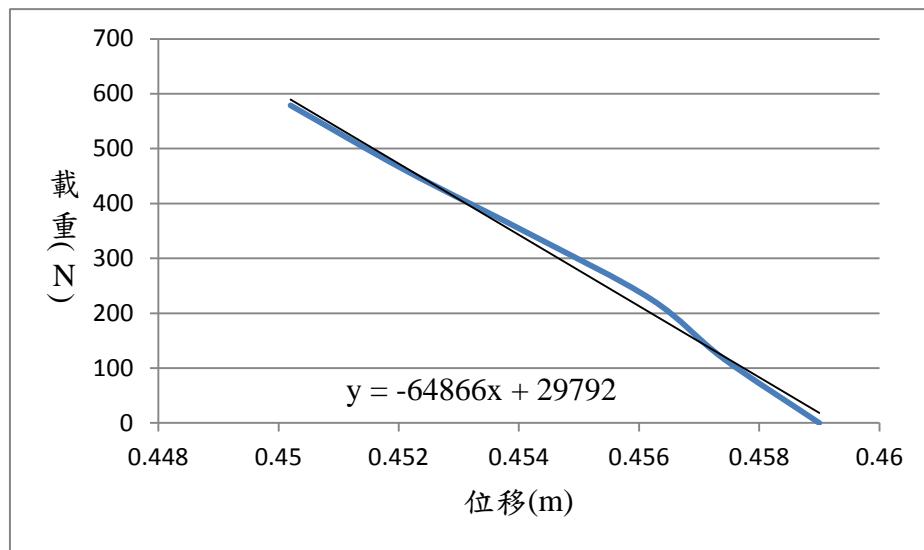


圖 3.15 載重與位移關係圖(C)

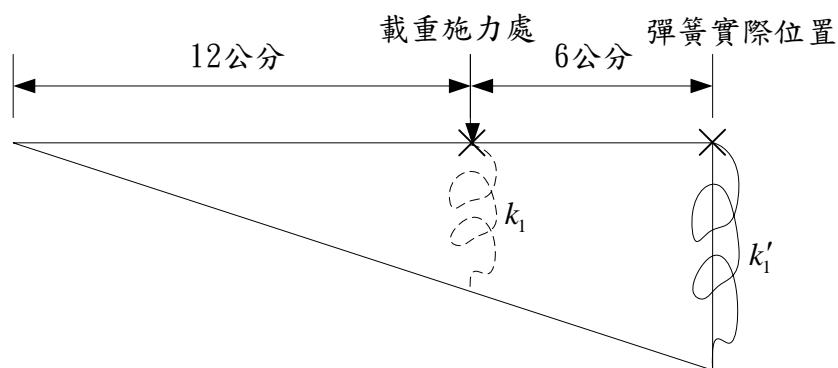


圖 3.16 彈簧係數比例轉換示意圖

自行車座墊彈簧阻尼係數則直接採用本研究所裝設於座墊下之加速度規進行量測，加速度規設備裝載如圖 3. 2(a)，加載少量鐵塊(24 公斤)確認其穩固性並於自行車座墊與鐵塊以膠帶將其固定至穩固如圖 3. 17，利用釣魚線固定於座墊下方，此時釣魚線下拉整體自行車座墊一段距離後，將釣魚線剪斷，自行車座墊將隨受力放開後進行自由振動，並收取加速度歷時資料共三次如圖 3. 18 ~ 圖 3. 20，用以計算自行車座墊彈簧阻尼係數。



圖 3.17 加載鐵塊於自行車座墊上

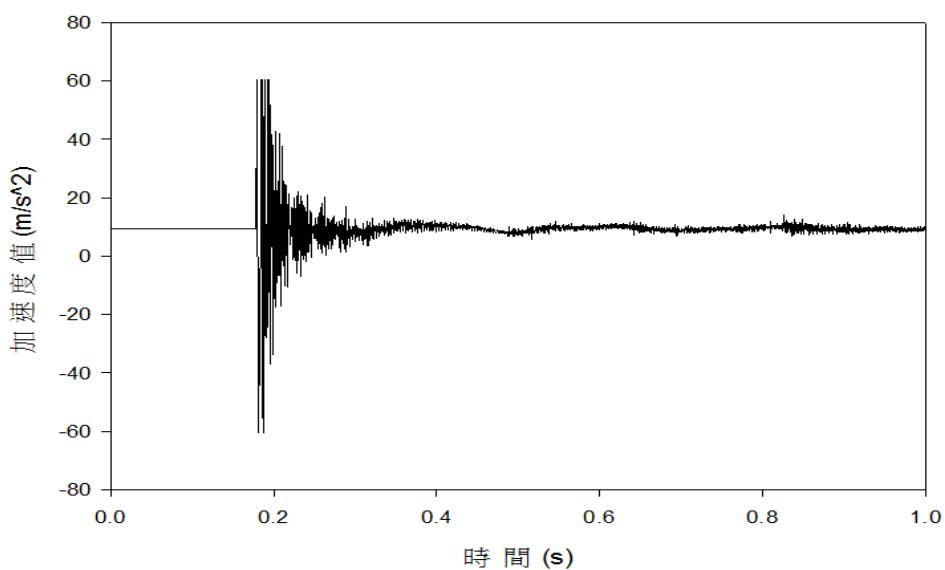


圖 3.18 加速度歷時圖(一)

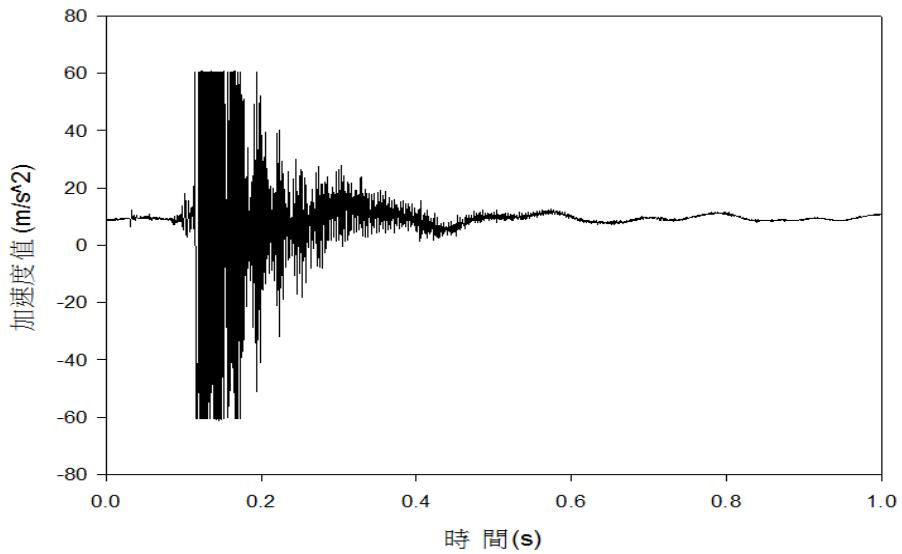


圖 3.19 加速度歷時圖(二)

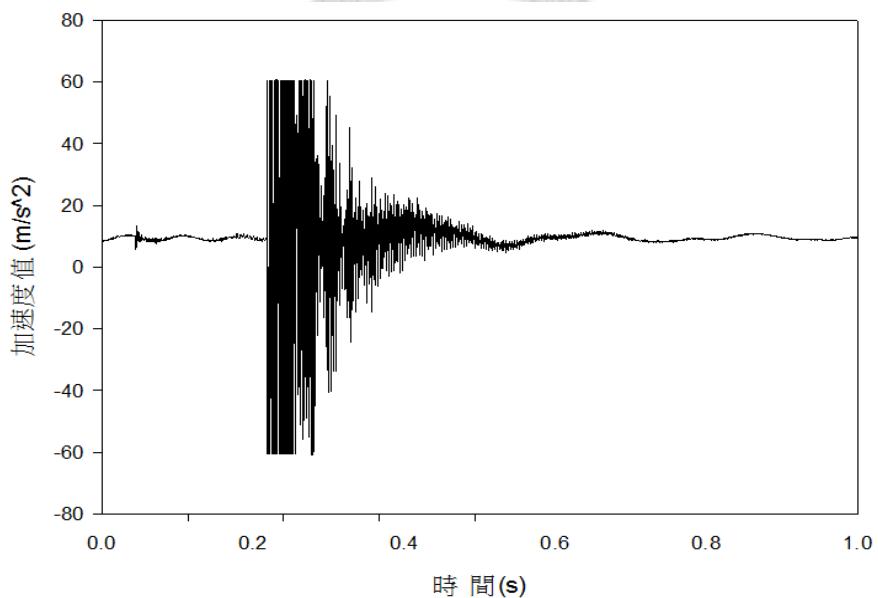


圖 3.20 加速度歷時圖(三)

阻尼自由振動之阻尼係數可由半功率帶寬法(Half-Power Bandwidth Method)[18][19]求得，其原理為根據自由振動系統達到共振時的振幅放大因子曲線如圖 3.21 來推算系統結構的阻尼比，計算式如式 3.1，其中 ξ 為阻尼比、 f_n 為結構主頻率、 f_b, f_a 分別為結構主頻率振幅 $1/\sqrt{2}$ 處之頻率。

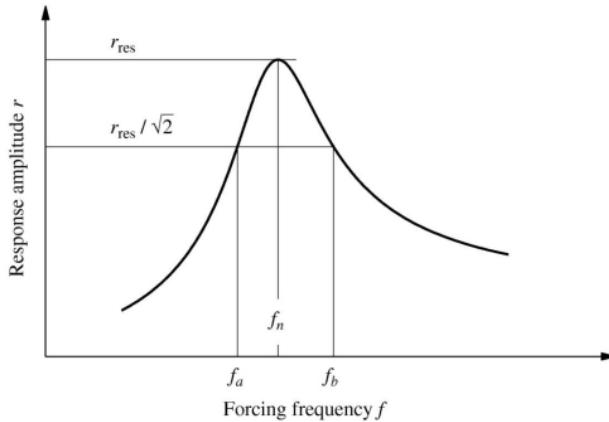


圖 3.21 頻率響應曲線[19]

$$\xi = \frac{f_b - f_a}{f_n} \quad \text{式 3.1}$$

結構主頻率 f_n 可透過快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)求得，其原理為以離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform, DFT)為基礎，設 $f(n)$ 為一離散時域訊號，DFT 之計算公式如式 3.2，傅立葉轉換之主要功能可將時域訊號轉換至頻率域訊號，再繪製成功率頻譜圖。而 FFT 優於 DFT 之處仍是可節省大量頻譜計算量時間，但 FFT 沿襲著 DFT 之限制條件，額外增加了 FFT 之限制條件，主要為以下三點[20]：

1. 須為受測訊號最高成分頻率的兩倍或兩倍以上。
2. 取樣週期須為受測訊號週期之整數倍。
3. 受測訊號須為週期性資料，且取樣數須為 2^N 個資料。

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j \frac{2nk\pi}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) W_N^{nk} \quad \text{式 3.2}$$

式中， $n, k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ； $W_N = e^{-j \frac{2\pi}{N}}$

將阻尼量測試驗之實測加速度值歷時資料經過 FFT 處理如圖 3.22~圖 3.24。取其平均後，得到此結構系統主頻率為 575.6Hz。分別找出主頻率所對應之振幅 $1/\sqrt{2}$ 倍處之頻率值 f_b, f_a ，代入式 3.1 即可算出各阻尼比如表 3.3，取其平均得阻尼比約為 0.0041。

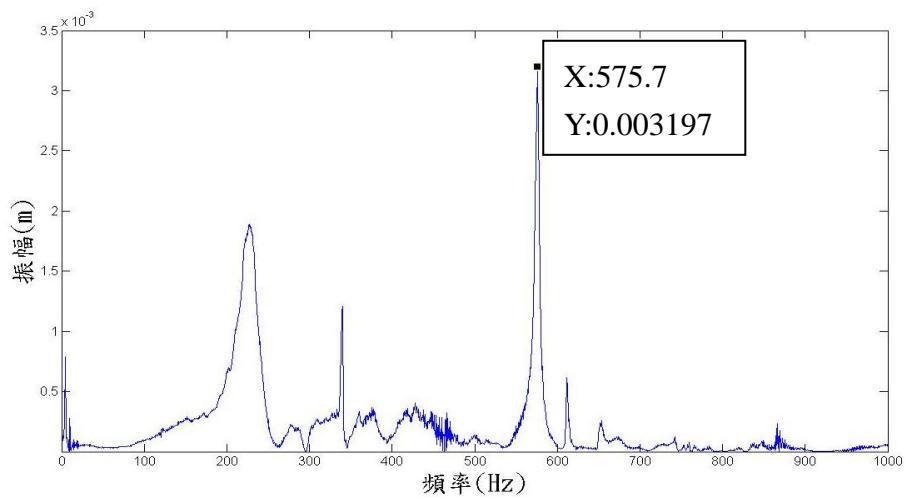


圖 3.22 自行車座墊阻尼頻率響應曲線(一)

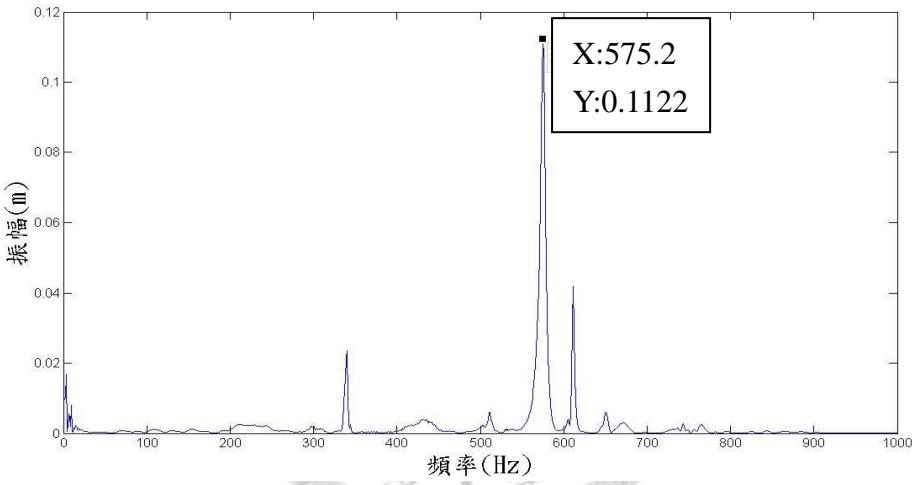


圖 3.23 自行車座墊阻尼頻率響應曲線(二)

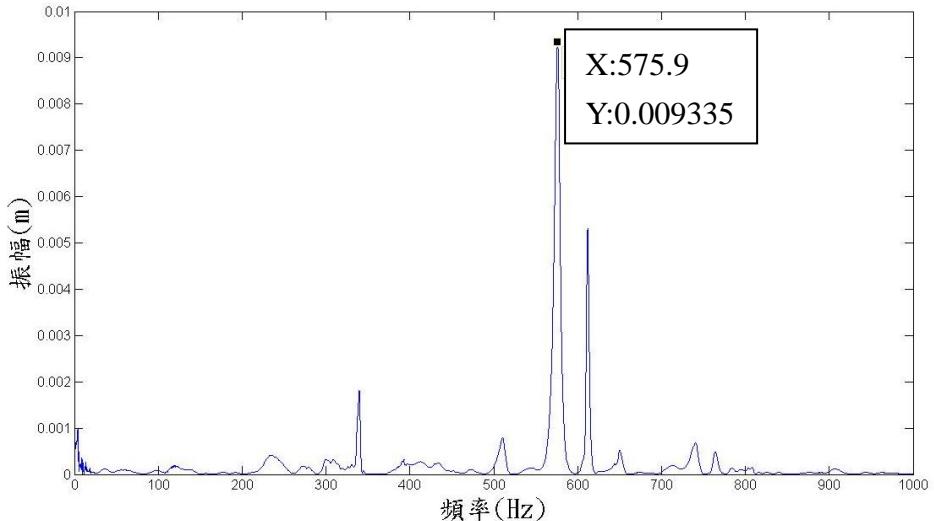


圖 3.24 自行車座墊阻尼頻率響應曲線(三)

表 3.3 自行車座墊阻尼比

	阻尼比
阻尼試驗一	0.003629
阻尼試驗二	0.003991
阻尼試驗三	0.00469

阻尼比與阻尼係數之關係可透過黏滯阻尼自由振動之推導公式如式 3. 3~式 3. 7[21]，並已知結構主頻率 f_n 值代入式 3. 6，求得 ω_n 值；加載之鐵塊與座墊整體質量共為 24.5 (kg)，分別將 ω_n 、m 、 ξ 代入式 3. 7，求得自行車座墊阻尼係數值約為 $727 (N \cdot s/m)$ ，此值亦較表 3.1 中為低，與前述實驗所得之彈簧係數狀況一致，故推論因本研究所使用之自行車為一般市售，彈簧較為普通所致，但所計算數值確為合理範圍。

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad \text{式 3.3}$$

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = 0 \quad \text{式 3.4}$$

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad \text{式 3.5}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n \quad \text{式 3.6}$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} \Rightarrow c = 2m\omega_n\xi \quad \text{式 3.7}$$

3.4 自行車道騎乘舒適度實測結果分析與評估指標構想

本節主要針對自行車實際騎乘所收取之實測加速度歷時資料，進行一系列處理與分析，參考國際標準 ISO2631-1 規範中所訂定之人體所感受之垂直加速度值做為舒適性之評量指標[5][6]，並輸出各路段所代表之代表值，流程如圖 3. 25。以下對此分析流程進行說明。

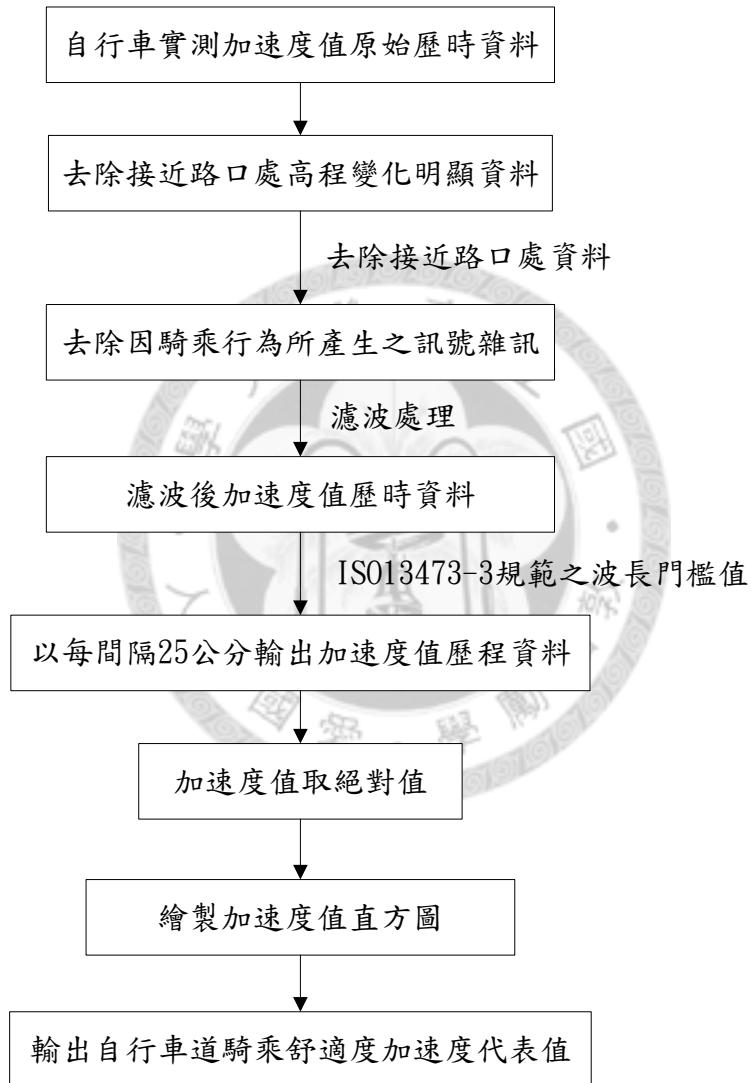


圖 3.25 自行車實測加速度值資料處理流程

自行車實測加速度值原始歷時資料可能因騎乘行為不同導致訊號當中有些許雜訊存在如圖 3.26，故進行帶通濾波(Bandpass)去除雜訊。尋找濾波門檻值方法可透過 FFT 得到其頻率域資料，其原理同於 3.3 節所使用之 FFT 處理方法。

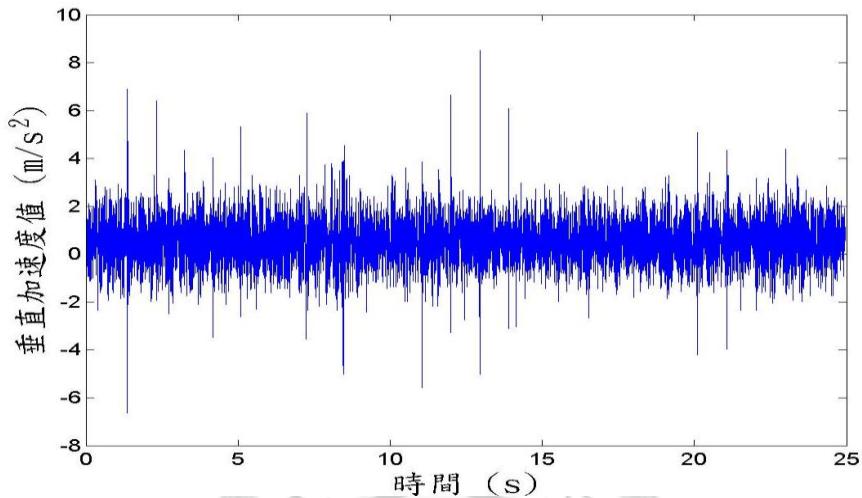


圖 3.26 自行車實測加速度值原始歷時資料

為找尋加速度值歷時資料高低通濾波之濾波門檻，考量至自行車於靜止狀況下即可能所產生訊號雜訊之頻率作為低通濾波門檻，其加速度歷時資料透過 FFT 得知其主頻率如圖 3. 27 之峰值處，其範圍約 415Hz~425Hz，；自行車靜止狀況下且受到人載重下對儀器本身造成之低頻訊號，即為長波長的發生作為高通濾波門檻值如圖 3. 28，並可觀察其頻譜圖具有雙峰值之狀況，其一即為自行車靜止時之高頻主頻率，其範圍約 400Hz~409Hz，以此值訂定低通濾波門檻值以濾除儀器本身造成的高頻訊號雜訊；二即為自行車靜止且受到人載重下之低頻主頻率，其範圍約 4Hz~7Hz，以此值訂定高通濾波門檻值以濾除人體載重造成的低頻訊號雜訊。

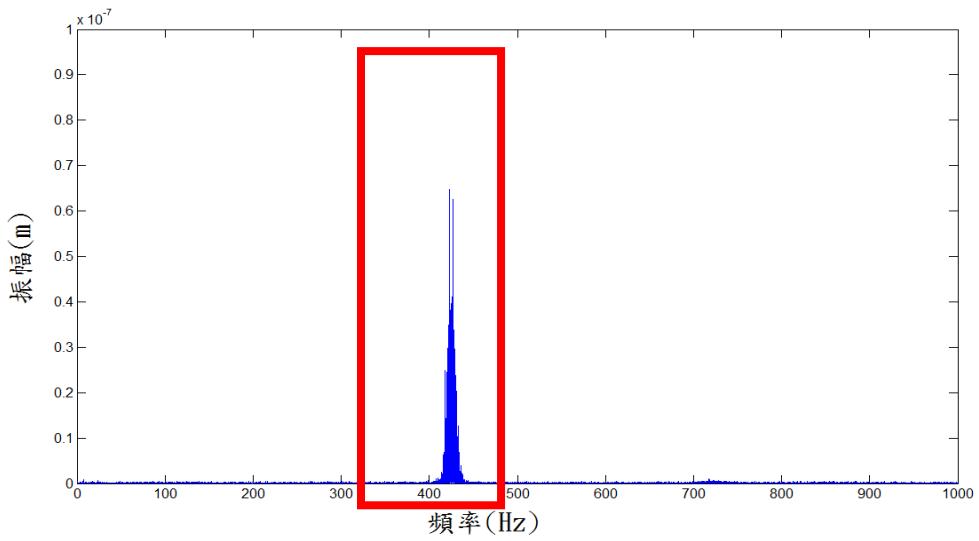


圖 3.27 自行車靜止狀況下之功率頻譜圖

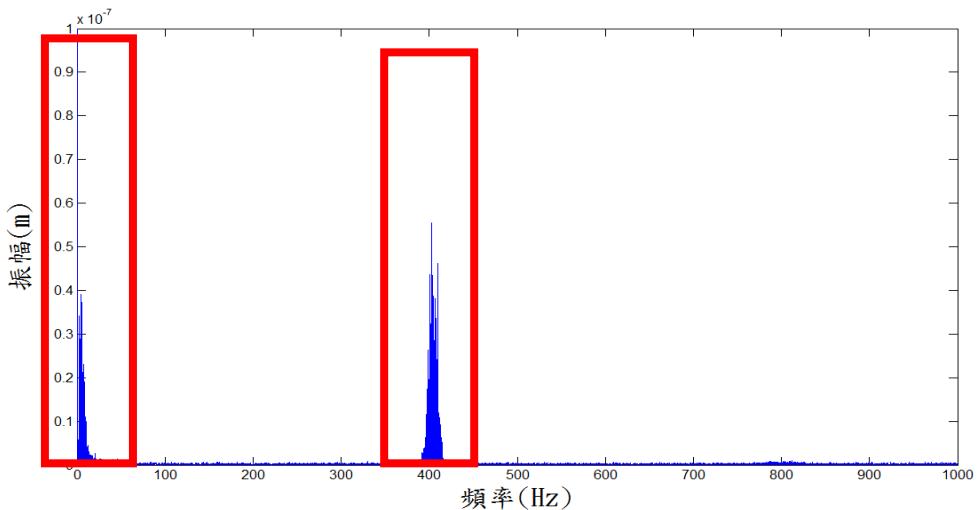


圖 3.28 自行車靜止時騎乘者加載狀況之功率頻譜圖

經過上述所訂定之帶通濾波設定截止頻率後可明顯減少不必要之雜訊，圖 3.26 經濾波後可得如圖 3.29。考量自行車舒適度受到市區內自行車道多種材質所影響，並不考慮路口高程變化大之處以及明顯凸起或凹陷所造成之加速度值振幅大小變化，以整段單一相同材質自行車道之舒適度而言，瀝青鋪面最優，彩色鋪面次之、磚面中以小塊磚感受最為不佳。在處理剖面距離之間隔輸出以 ISO13473-3 規範[22]訂定巨質紋理之波長門檻值為標準，其波長門檻為 5~500 公釐，故將加速度值以每間隔 25 公分輸出其相對加速度值，並將加速度值取絕對值

找出加速度值振幅大小，再以間隔每 0.01 m/s^2 進行直方圖繪製，計算加速度值於每間隔處所佔之百分比，最後採用累積百分比達 90% 之加速度值做為各路段加速度代表值，以利於作為後續自行車實測與模擬結果之比對。

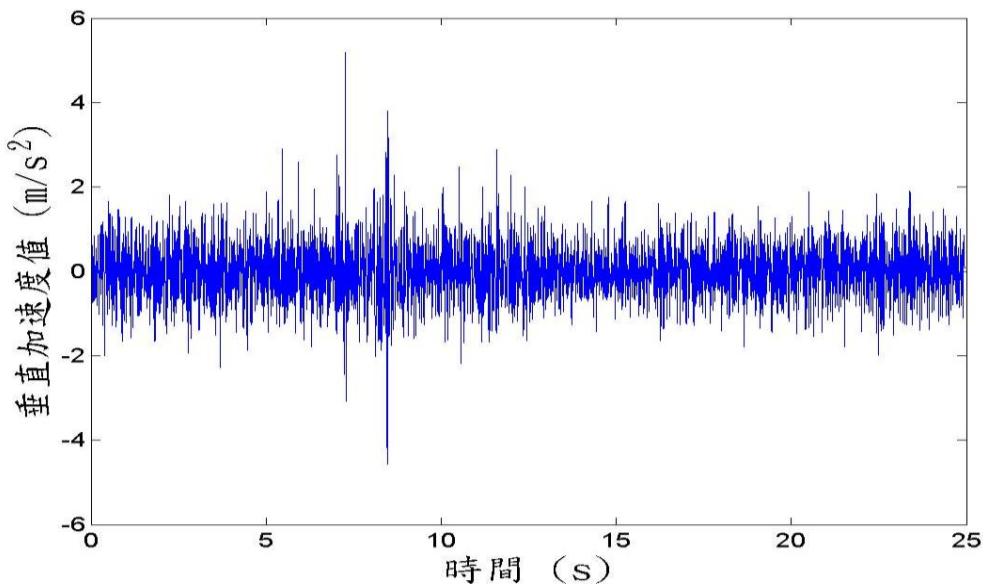


圖 3.29・自行車實測加速度值濾波後歷時資料

自行車實際騎乘量測，分別由三位不同體重之人員實際騎乘自行車，其體重分布由低至高依序為 A、B、C，將自行車實測加速度值原始資料依照圖 3.25 分析流程輸出各量測人員於各路段之代表值，得知實測加速度值隨量測人員之重量而下降如表 3.4、圖 3.30。雖實測加速度值隨人員之體重而有變化，但於本研究 5.3 節所訂定自行車道騎乘舒適度代表值時應輸入固定檢測人員重量進行模擬，比較國人所訂定之標準體重公式可因人體的身高、年齡而有所不同，故本研究設定 52 公斤作為固定重量，將輸入不同剖面資料做為其變數，方能以統一標準下來評估各路段之好壞，並提出各路段之代表值。

表 3.4 各檢測人員自行車實測加速度值

量測路段	量測人員		
	A(45kg)	B(52kg)	C(70kg)
	加速度代表值(m/s^2)		
磚面人行道 1	2.91	2.77	2.24
磚面人行道 2	5.87	5.48	4.5
彩色鋪面 1	3.13	3.09	2.5
彩色鋪面 2	3.21	2.83	2.29
彩色鋪面 3	2.17	1.6	1.39
瀝青鋪面 1	1.91	1.82	1.19
瀝青鋪面 2	1.73	1.46	1.27
瀝青鋪面 3	2.02	1.64	1.01

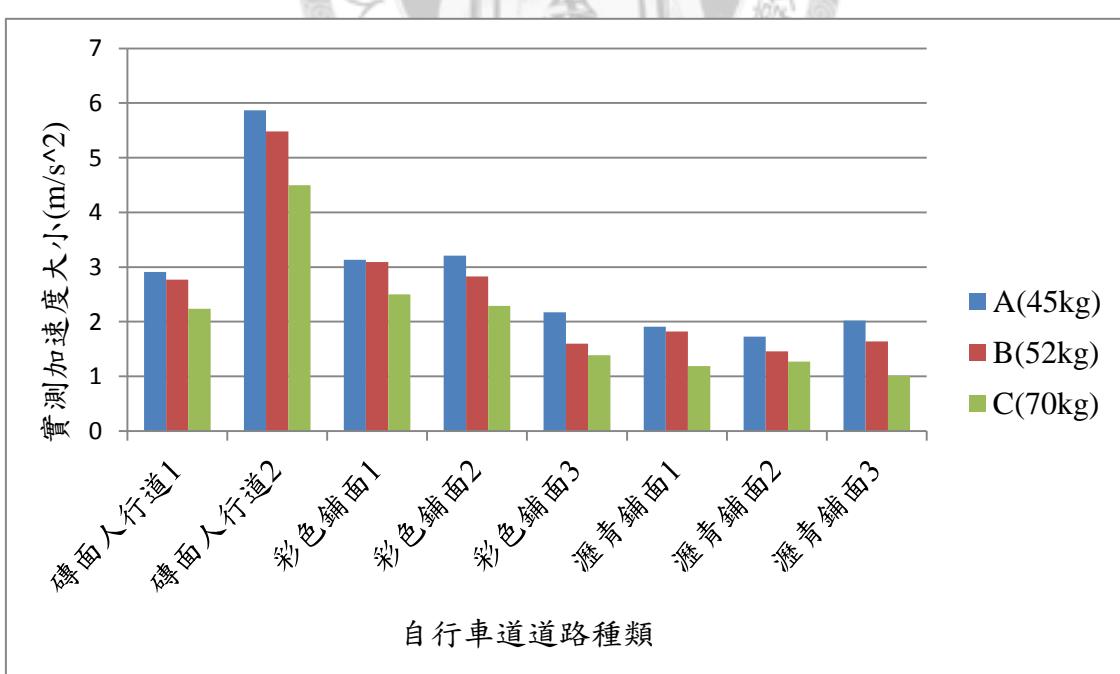


圖 3.30 各檢測人員自行車實測加速度值比較



第四章 自行車模擬模型建置與驗證方法

本章首先針對自行車模擬模型之建置與方法並將詳細介紹其推導流程，接著介紹自行車結構之相關參數訂定方法，以及介紹本研究所採用之數值模擬方法，最後提出將自行車模擬模型簡化成單自由度、雙自由度時之解析解驗證方法。

4.1 自行車模擬模型建置與方法

本研究選用一般市售通勤型用之自行車來代表市區自行車通勤者所騎乘之自行車款，針對其車體結構與力學特性，於全車避震系統中僅考慮座墊避震器，即座墊下方之避震彈簧，將 3.1 節提及之選用車款實車構圖如圖 4.1。依其參考車款，建立一符合其車體結構與力學特性之自行車簡化模型如圖 4.2 作為本研究主要自行車模擬模型之建構。

為使分析更有效率，參考文獻[16]中常見之基本假設與配合本研究之設計流程將實際自行車之動態行為透過以下幾點基本假設作為簡化模型之推導。於實際騎乘自行車過程中，對騎乘者與車體有以下假設：

1. 將車架與前後輪視為一剛體。
2. 騎乘者之載重永施加於座墊上。
3. 騎乘者不改變騎乘姿勢。
4. 忽略腳踏處施力。
5. 假設座墊彈簧與阻尼為線性彈性。
6. 假設車輪為正圓形，即不可變形體。

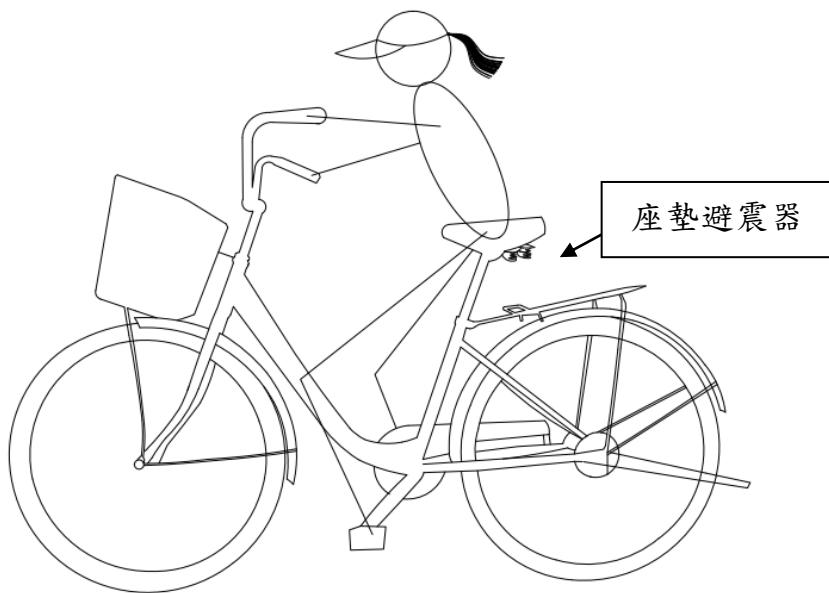


圖 4.1 自行車實車構圖

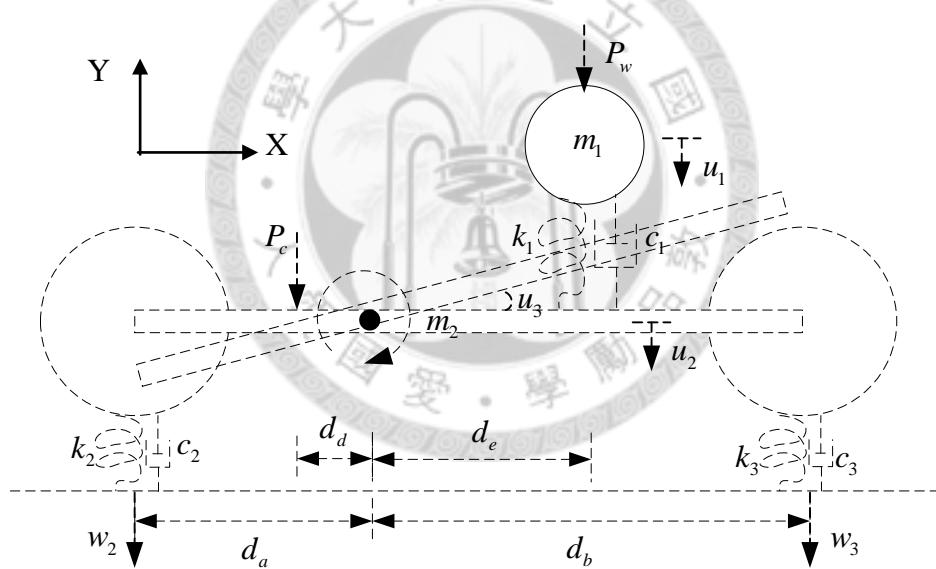


圖 4.2 自行車之簡化模型

圖 4.2 中自行車簡化模型各參數代表符號意義如下： m_1 ：座墊質量、 m_2 ：車架質量； k_1 ：座墊避震器彈簧係數、 k_2 ：前輪彈簧係數、 k_3 ：後輪彈簧係數； c_1 ：座墊避震器阻尼係數、 c_2 ：前輪阻尼係數、 c_3 ：後輪阻尼係數； u_1 ：座墊位移量、 u_2 ：車架位移量、 u_3 ：車架轉角； w_2 ：前輪輸入剖面高程值、 w_3 ：後輪輸入剖

面高程值； P_w ：騎乘者重量、 P_c ：電腦重量； d_a ：前輪距形心之距離、 d_b ：後輪距形心之距離、 d_d ：電腦距形心之距離、 d_e ：騎乘者距形心之距離； J ：轉動慣量。依照其參數設定進行自行車運動方程式之推導，分別釋放 u_1 、 u_2 、 u_3 、 w_2 、 w_3 各自由度如圖 4.3~圖 4.7，自由度方向則是施力以向上為正、彎矩以逆時針為正。當釋放 u_1 自由度時，其力平衡方程式如式 4.1~式 4.3；當釋放 u_2 自由度時，其力平衡方程式如式 4.4~式 4.6；當釋放 u_3 自由度時，其力平衡方程式如式 4.7、式 4.8；當釋放 w_2 自由度時，其力平衡方程式如式 4.9、式 4.10；當釋放 w_3 自由度時，其力平衡方程式如式 4.11、式 4.12。綜合以上力的分布繪製於各質量之自由體圖如圖 4.8，將力平衡方程式經整理過後即為本研究所推導之自行車運動方程式如式 4.13。

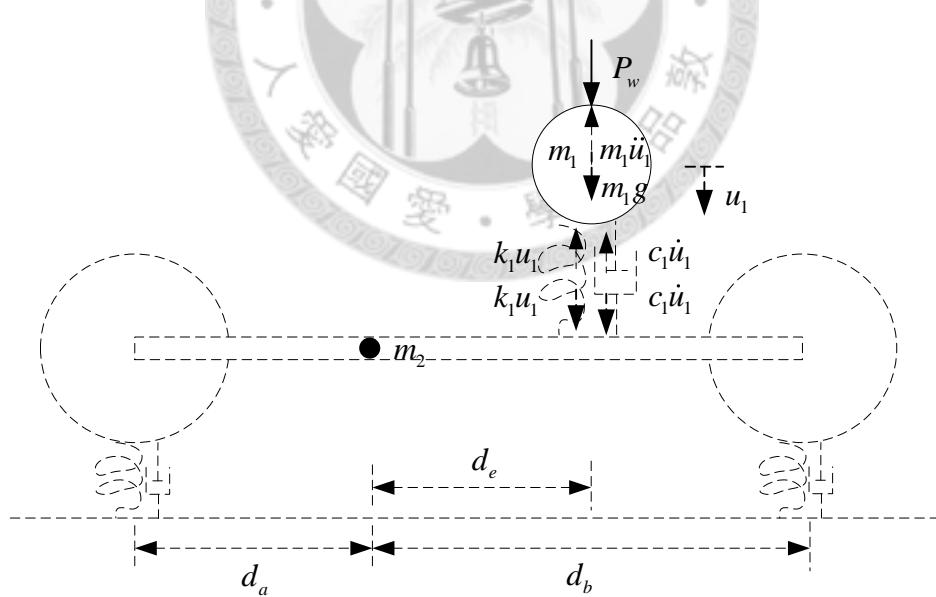


圖 4.3 釋放 u_1 之自由度

$$\sum F_{m_1} : m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 - P_w - m_1 g = 0 \quad \text{式 4.1}$$

$$\sum F_{m_2} : -c_1 \dot{u}_1 - k_1 u_1 = 0 \quad \text{式 4.2}$$

$$\sum M_{m_1+m_2} : m_1 d_e \ddot{u}_1 - P_w d_e - m_1 g d_e = 0 \quad \text{式 4. 3}$$

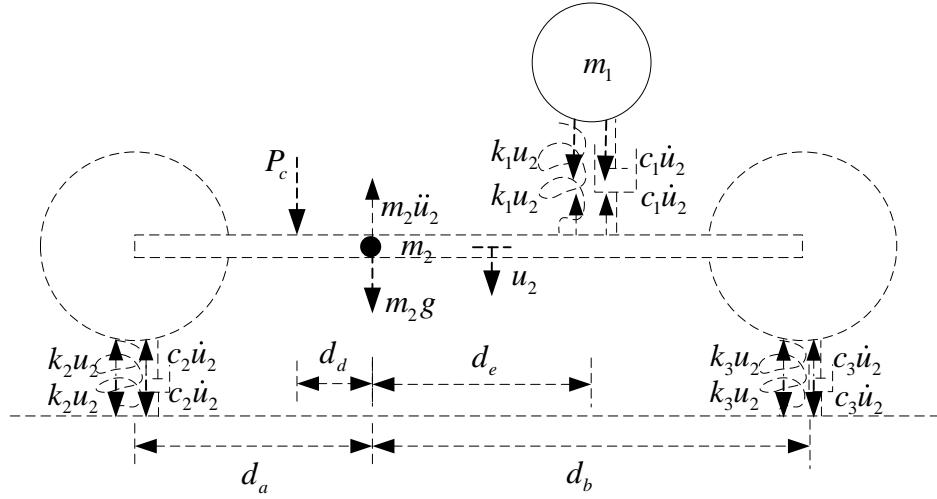


圖 4.4 釋放 u_2 之自由度

$$\sum F_{m_1} : c_1 \dot{u}_2 - k_1 u_2 = 0 \quad \text{式 4. 4}$$

$$\sum F_{m_2} : m_2 \ddot{u}_2 + (c_1 + c_2 + c_3) \dot{u}_2 + (k_1 + k_2 + k_3) u_2 - m_2 g - P = 0 \quad \text{式 4. 5}$$

$$\sum M_{m_1+m_2} : (-c_2 d_a + c_3 d_b) \dot{u}_2 + (-k_2 d_a + k_3 d_b) u_2 - P d_d = 0 \quad \text{式 4. 6}$$

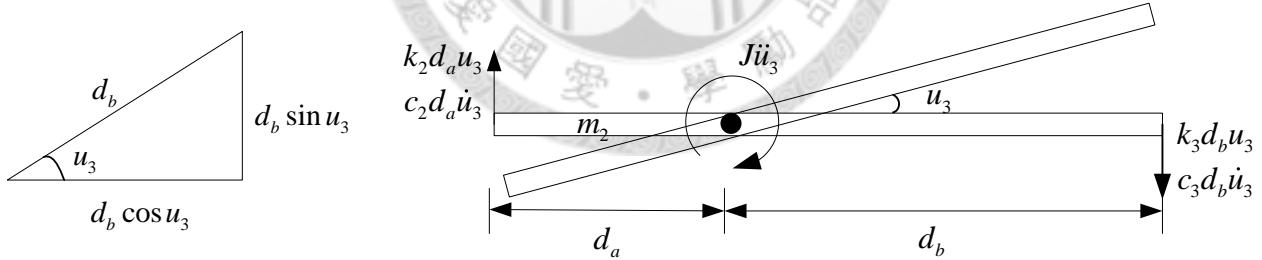


圖 4.5 釋放 u_3 之自由度

$$\sum F_{m_2} : (c_2 d_a - c_3 d_b) \dot{u}_3 + (k_2 d_a - k_3 d_b) u_3 = 0 \quad \text{式 4. 7}$$

$$\sum M_{m_1+m_2} : -J \ddot{u}_3 + (-c_2 d_a^2 - c_3 d_b^2) \dot{u}_3 + (-k_2 d_a^2 - k_3 d_b^2) u_3 = 0 \quad \text{式 4. 8}$$

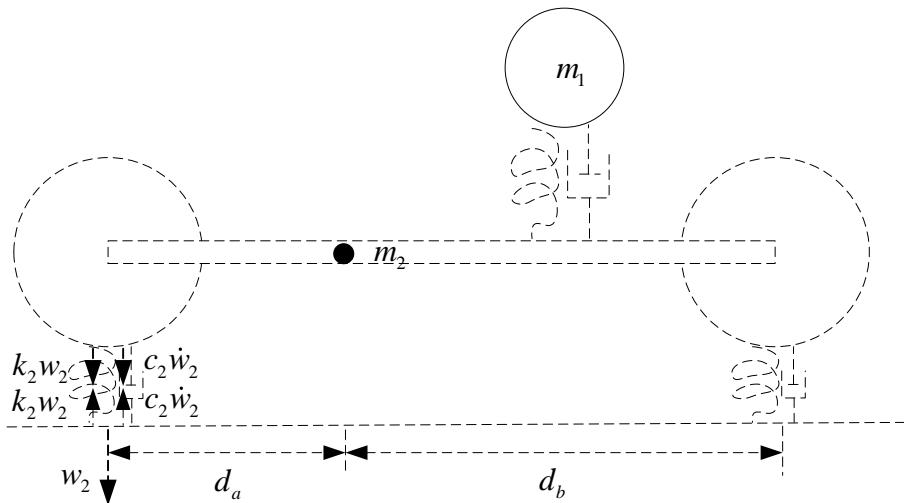


圖 4.6 釋放 w_2 之自由度

$$\sum F_{m_2} : -c_2 \dot{w}_2 - k_2 w_2 = 0 \quad \text{式 4.9}$$

$$\sum M_{m_1+m_2} : c_2 d_a \dot{w}_2 + k_2 d_a w_2 = 0 \quad \text{式 4.10}$$

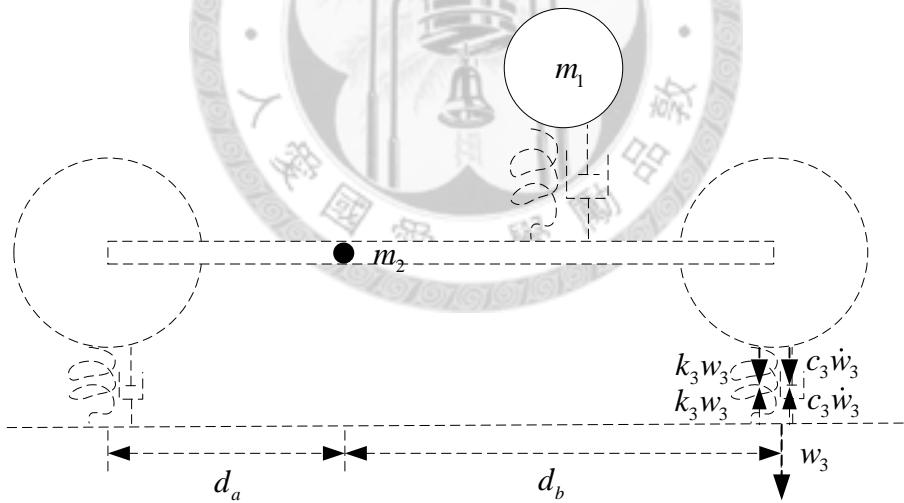


圖 4.7 釋放 w_3 之自由度

$$\sum F_{m_2} : -c_3 \dot{w}_3 - k_3 w_3 = 0 \quad \text{式 4.11}$$

$$\sum M_{m_1+m_2} : -c_3 d_b \dot{w}_3 + k_3 d_b w_3 = 0 \quad \text{式 4.12}$$

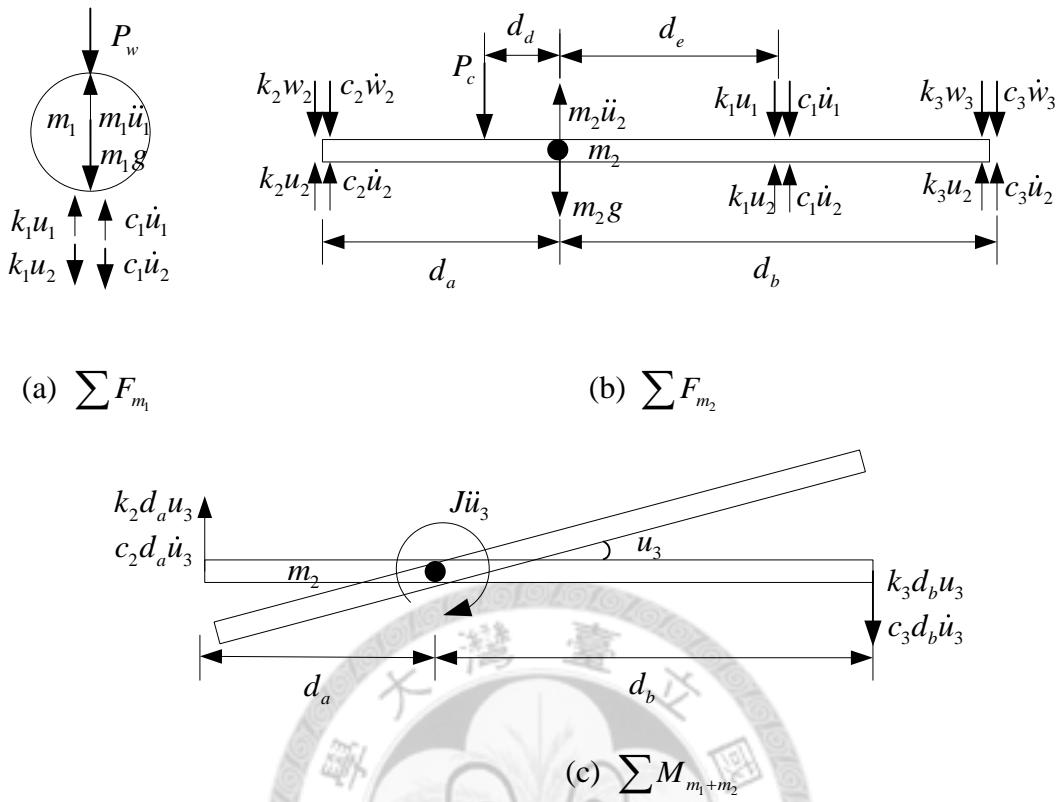


圖 4.8 自行車簡化模型各部分自由體圖

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{ccc} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ -m_1 d_e & 0 & J \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} + \left[\begin{array}{ccc} c_1 & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 + c_3 & c_2 d_a - c_3 d_b \\ 0 & c_2 d_a - c_3 d_b & c_2 d_a^2 + c_3 d_b^2 \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{Bmatrix} \\
 & + \left[\begin{array}{ccc} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 + k_3 & k_2 d_a - k_3 d_b \\ 0 & k_2 d_a - k_3 d_b & k_2 d_a^2 + k_3 d_b^2 \end{array} \right] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_w + m_1 g \\ P_c + m_2 g + k_2 w_2 + k_3 w_3 + c_2 \dot{w}_2 + c_3 \dot{w}_3 \\ -P_w d_e - m_1 g d_e + P_c d_d + k_2 w_2 d_a - k_3 w_3 d_b + c_2 \dot{w}_2 d_a - c_3 \dot{w}_3 d_b \end{Bmatrix} \quad \text{式 4.13}
 \end{aligned}$$

4.1.1 自行車模擬模型參數訂定

將 4.1 節所推導之自行車運動方程式之各參數求得，包含 m_1 座墊質量、 m_2 車架質量、彈簧係數 K 值(k_1 、 k_2 、 k_3)、阻尼係數 C 值(c_1 、 c_2 、 c_3)、 P_w 騎乘者重量、 P_c 電腦重量、 J 轉動慣量、車架形心位置以訂定車體各部件距形心之距離(d_a 、 d_b 、 d_d 、 d_e)，分別依序介紹如下。

1. m_1 座墊質量、 m_2 車架質量、 P_w 騎乘者重量、 P_c 電腦重量：可利用磅秤而量得，整理如表 4. 1。其中騎乘者重量又分為三種重量，主因配合自行車實際騎乘量測之狀況，觀察其垂向加速度值大小與重量之關係，用以比對是否與自行車模擬程式之加速度值趨勢達一致性。

表 4.1 自行車各部件重量

部件名稱	重量(公斤)
座墊	0.5
車架	14.5
騎乘者	45/52/70
電腦	2

2. 彈簧係數 K 值(k_1 、 k_2 、 k_3)與阻尼係數 C 值(c_1 、 c_2 、 c_3)：於 3.3 節透過實驗求得座墊彈簧之彈簧係數與阻尼係數，並參考文獻中前後輪之彈簧係數與阻尼係數[16][17]，整理如表 4. 2。

表 4.2 自行車避震系統參數設定

	彈簧係數(N/m)	阻尼係數(N-s/m)
座墊避震	33978.5	727
前後輪	134000	272

3. 車架形心位置：將車架依照其相似管徑大小約略分為九個區塊如圖 4. 9，假設車架為圓形空心柱，實際量得每根桿件之直徑、長度、管壁厚度求得算其各桿件之體積，並以踏板處為圓心(0,0)，根據實際尺寸標出各桿件中心點座標，代入形心公式如式 4. 14、式 4. 15[23]，其中 X_i, Y_i 為各桿件之座標點、 V_i 為各桿件之體積、 V 為各桿件總體積、 X_c, Y_c 為車架形心座標，計算得形心位置於座標(-0.19134, 0.239168)處，單位：公尺。已知形心位置即可計算車體各部件距形心之距離。

$$X_c = \frac{\sum X_i V_i}{V} \quad \text{式 4. 14}$$

$$Y_c = \frac{\sum Y_i V_i}{V} \quad \text{式 4. 15}$$

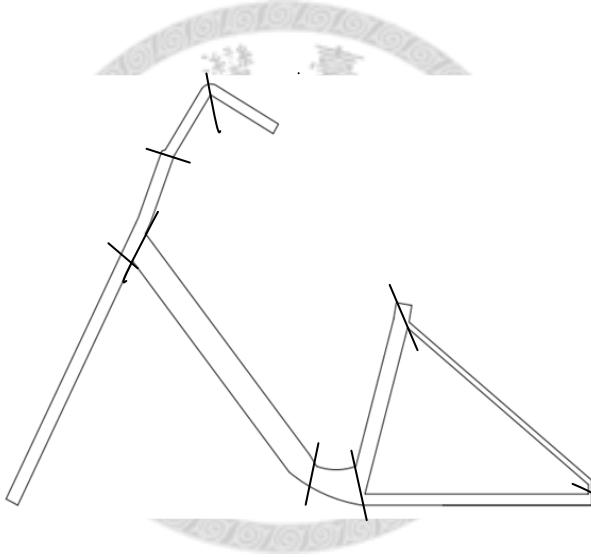


圖 4.9 自行車車架圖

4. 轉動慣量[23]：本研究將車架與前後車輪部分簡化為單一樑桿件，於二維 xy 平面上，設一車架轉角 u_3 因路面起伏高低而產生之不同轉角，即車架繞著 z 軸所轉動，已知圓柱體如圖 4. 10 之轉動慣量公式如式 4. 16、式 4. 17，將車架桿件視為圓形空心柱其截面如圖 4. 11，依其轉動慣量計算公式並套入車架質量與各桿件之長度、管徑大小、直徑求得車架轉動慣量 I_x, I_y 如式 4. 18、式 4. 19，又根據垂直軸定理(Perpendicular Axis Theorem)得式 4. 20，即可計算轉動慣量 J。再者，考量車輪、量測用之電腦、騎乘者之重量亦會影響其轉動慣量，故

借由平行軸定理(Parallel Axis Theorem)將其各轉動慣量計算出並進行加總，其定理為剛體對於一通過質心的質心軸之轉動慣量，算出剛體對平行於質心軸的另一直軸之轉動慣量，如圖 4. 12。其公式為式 4. 21。其中 I_{CM} 為剛體對於質心軸的轉動慣量、 M 為剛體質量、 d 為另外一直軸 zz' 軸與質心軸的垂直距離 [23]。

$$I_x = \frac{1}{2}mR^2 \quad \text{式 4. 16}$$

$$I_y = \frac{1}{12}m(3R^2 + L^2) \quad \text{式 4. 17}$$

$$I_x = \frac{1}{2}mR_1^2 - \frac{1}{2}mR_2^2 \quad \text{式 4. 18}$$

$$I_y = \frac{1}{12}m(3R_1^2 + L^2) - \frac{1}{12}m(3R_2^2 + L^2) \quad \text{式 4. 19}$$

$$J = I_z = I_x + I_y \quad \text{式 4. 20}$$

$$I_z = I_{CM} + Md^2 \quad \text{式 4. 21}$$

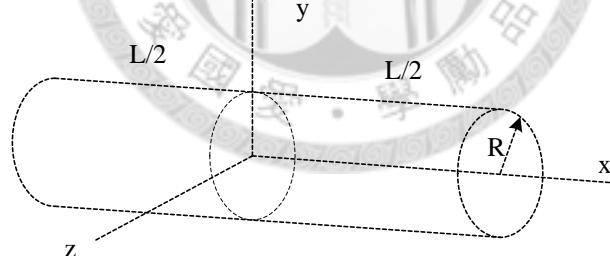


圖 4. 10 圓形柱示意圖[23]

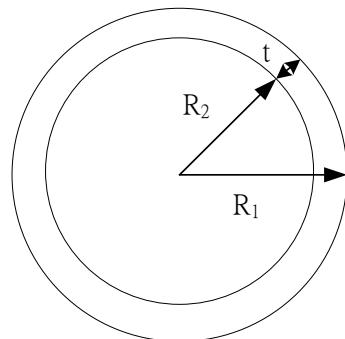


圖 4. 11 車架管徑截面圖

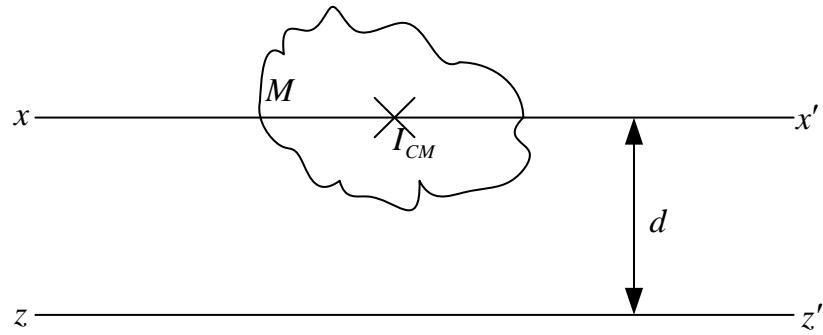


圖 4.12 平行軸定理示意圖[23]

4.1.2 中央差分法(Central Difference Method, CDM)

本研究所推導之自行車運動方程式，其求解方法主要使用中央差分法來進行數值求解計算方式，於本小節，主要針對中央差分法的基本概念進行介紹。

當求解之運動方程式為 $m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p$ 之型式時，可利用中央差分法進行求解，示意圖如圖 4.13，其計算流程如下[21]。

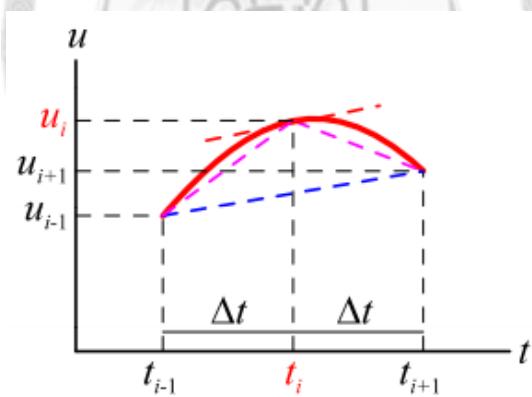


圖 4.13 中央差分法示意圖[21]

1. 設一運動方程式在 i 時刻其型式如式 4.22。

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + ku_i = p_i = p(t_i) \quad \text{式 4.22}$$

2. 中央差分法之概念，在 i 時刻的速度、加速度可表示如式 4.23、式 4.24。

$$\dot{u}_i \approx \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad \text{式 4.23}$$

$$\ddot{u}_i \approx \frac{\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta t} - \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad \text{式 4.24}$$

3. 將式 4.23、式 4.24 代入式 4.22，經化簡後得式 4.25，亦指若已知 u_i, u_{i-1}, p_i ，即可求得 u_{i+1} 。

$$\left[\frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i+1} = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad \text{式 4.25}$$

4. 為求得 u_{i-1} ，代入初始狀態， $i=0$ 時，式 4.23、式 4.24 可整理如式 4.26、式 4.27，將兩式解聯立方程組，即可求得 $i=0$ 時刻下之 u_{i-1} 如式 4.28。

$$\dot{u}_0 = \frac{u_1 - u_{-1}}{2\Delta t} \quad \text{式 4.26}$$

$$\ddot{u}_0 = \frac{u_1 - 2u_0 + u_{-1}}{(\Delta t)^2} \quad \text{式 4.27}$$

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_0 \quad \text{式 4.28}$$

5. 不斷迭代位移量 u_i ，如式 4.29，並代入上述公式中，即可求得各時刻之位移量、速度、加速度值。

$$u_{-1} = u_0, u_0 = u_1 \quad \text{式 4.29}$$

本研究所推導之自行車運動方程式，將其整理為矩陣型式以便於 Matlab 程式撰寫運算，但因矩陣運算與純量運算略有不同，將式 4.23、式 4.24 代入式 4.22 重新推導 u_{i+1} 之公式，其計算流程如式 4.30~式 4.33，式 4.33 即為 u_{i+1} 之公式。透過 Matlab 程式撰寫將此計算流程程式化，並輸入 4.1.1 節所設定之自行車各部件參數，以及自行車道剖面高程資料輸入程式，即可算出座墊處之位移量、速度以及加速度值，其中加速度值為主要用來判定自行車道騎乘舒適度之良窳指標。

$$\frac{1}{\Delta t^2} \bar{m} (\bar{u}_{i+1} - 2\bar{u}_i + \bar{u}_{i-1}) + \frac{1}{2\Delta t} \bar{c} (\bar{u}_{i+1} - \bar{u}_{i-1}) + \bar{k} \bar{u}_i = \bar{p}_i \quad \text{式 4.30}$$

$$(\bar{m} + \frac{\Delta t}{2} \bar{c}) \bar{u}_{i+1} = \bar{m}(2\bar{u}_i - \bar{u}_{i-1}) + \frac{\Delta t}{2} \bar{c} \bar{u}_{i-1} - \Delta t^2 \bar{k} \bar{u} + \Delta t^2 \bar{p}_i \quad \text{式 4. 31}$$

$$\text{令 } Q = (\bar{m} + \frac{\Delta t}{2} \bar{c}) \quad \text{式 4. 32}$$

$$\bar{u}_{i+1} = \bar{Q}^{-1} \bar{m}(2\bar{u}_i - \bar{u}_{i-1}) + \bar{Q}^{-1} \frac{\Delta t}{2} \bar{c} \bar{u}_{i-1} - \bar{Q}^{-1} \bar{k} \Delta t^2 \bar{u}_i + \bar{Q}^{-1} \bar{p}_i \Delta t^2 \quad \text{式 4. 33}$$

4.2 自行車模擬模型驗證方法

本節主要將自行車模擬模型簡化為單自由度不含阻尼之自由振動模型、單自由度含阻尼之自由振動模型、雙自由度不含阻尼之自由振動模型共三種情形，介紹其解析解(Aalytical Solution)之推導過程，將於第五章比對其解析解與數值解(Numerical Solution)是否達到一致性，以驗證模型所推導之自行車運動方程式的正確性。

4.2.1 單自由度不含阻尼之自由振動模型解析解介紹

將自行車模擬模型簡化為單自由度不含阻尼之模型結構如圖 4.14，其解析解如式 4.34~式 4.36[24]：

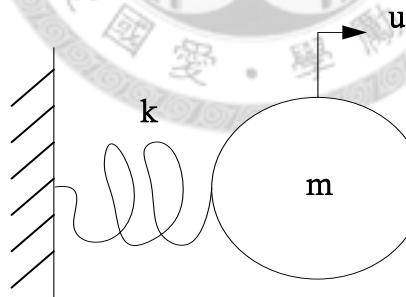


圖 4.14 單自由度不含阻尼模型結構示意圖

$$m\ddot{u} + ku = 0 \Rightarrow \ddot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad \text{式 4. 34}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi \left(\frac{1}{T} \right) \quad \text{式 4. 35}$$

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{式 4. 36}$$

4.2.2 單自由度含阻尼之自由振動模型解析解介紹

將自行車模擬模型簡化為單自由度含阻尼之自由振動模型結構如圖 4. 15，其自由振動運動方程式為式 4. 37，透過臨界阻尼係數(critical damping coefficient)與阻尼比(damping ratio)計算如式 4. 38、式 4. 39，可求得阻尼系統之分類。當 $\xi > 1$ 為過阻尼系統(overdamped system)；當 $\xi = 1$ 為臨界阻尼系統(critically damped system)；當 $\xi < 1$ 為低阻尼系統(underdamped system)，其位移量解析解公式如式 4. 40[21][24]。

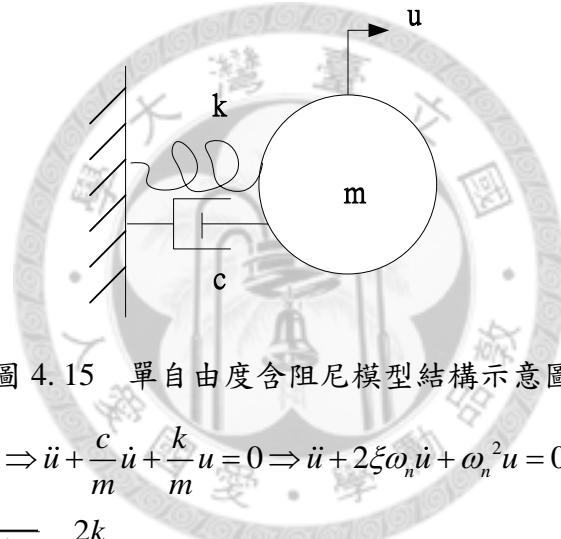


圖 4.15 單自由度含阻尼模型結構示意圖

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \Rightarrow \ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = 0 \Rightarrow \ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad \text{式 4. 37}$$

$$c_{cr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \quad \text{式 4. 38}$$

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad \text{式 4. 39}$$

$$u(t) = e^{-\xi\omega_D t} [u(0)\cos\omega_D t + \left(\frac{\dot{u}(0) + \xi\omega_n u(0)}{\omega_D}\right) \sin\omega_D t] \quad \text{式 4. 40}$$

4.2.3 雙自由度不含阻尼之自由振動模型解析解介紹

將自行車模擬模型簡化為雙自由度不含阻尼之模型結構示意圖如圖 4. 16，其自由振動運動方程式如式 4. 41，假設節點位移為正弦函數如式 4. 42，整理為矩陣型式其位移與加速度各可表示為如式 4. 43、式 4. 44。將式 4. 43、式 4. 44 代入式 4. 41 可得式 4. 45~式 4. 47。以特徵值問題 (Eigenvalue Problem) 解式 4. 47 可得式

4.48，令 $\omega^2 = A$ 將式 4.48 整理成式 4.49 並求得 A 為式 4.50， ω_1, ω_2 可透過 \sqrt{A} 求得。將 ω_1, ω_2 代入式 4.47 如式 4.51、式 4.52 即可求得 $a_{11}, a_{21}, a_{12}, a_{22}$ 。最後利用震態疊加改寫式 4.43 如式 4.53，得質量 m_1, m_2 之位移量函數公式如式 4.54、式 4.55。經過三角函數將正弦函數化簡後，即為質量 m_1, m_2 之位移量解析解公式如式 4.56、式 4.57，其中 C_1, C_2, C_3, C_4 可透過將上述初始條件代入求得[21][24]。

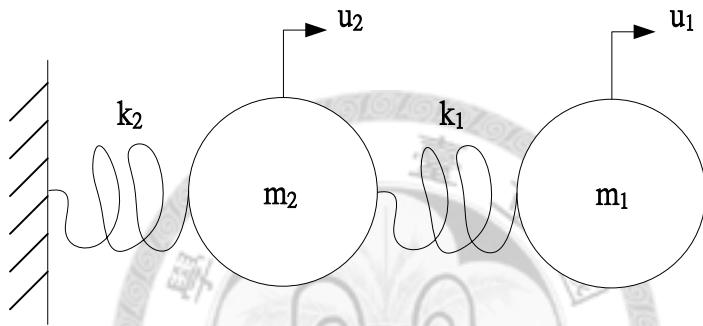


圖 4.16 雙自由度基本模型示意圖

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad \text{式 4.41}$$

$$u_i = a_i \sin(\omega t - \alpha) \quad \text{式 4.42}$$

$$\{u\} = \{a\} \sin(\omega t - \alpha) \quad \text{式 4.43}$$

$$\{\ddot{u}\} = -\omega^2 \{a\} \sin(\omega t - \alpha) \quad \text{式 4.44}$$

$$-\omega^2 [M] \sin(\omega t - \alpha) + [K] \{a\} \sin(\omega t - \alpha) = [0] \quad \text{式 4.45}$$

$$\{[K] - \omega^2 [M]\} \{a\} = \{0\} \quad \text{式 4.46}$$

$$\begin{bmatrix} k_1 - \omega^2 m_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{式 4.47}$$

$$\begin{vmatrix} k_1 - \omega^2 m_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 - \omega^2 m_2 \end{vmatrix} = 0 \quad \text{式 4. 48}$$

$$m_1 m_2 A^2 - [(k_1 + k_2)m_1 + k_1 m_2]A + k_1 k_2 = 0 \quad \text{式 4. 49}$$

$$A = \frac{(k_1 + k_2)m_1 + k_1 m_2 \pm \sqrt{[(k_1 + k_2)m_1 + k_1 m_2]^2 - 4m_1 m_2 k_1 k_2}}{2m_1 m_2} \quad \text{式 4. 50}$$

$$\begin{bmatrix} k_1 - \omega_1^2 m_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 - \omega_1^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{式 4. 51}$$

$$\begin{bmatrix} k_1 - \omega_2^2 m_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 - \omega_2^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{式 4. 52}$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = C'_1 \begin{Bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \end{Bmatrix} + C'_2 \begin{Bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \end{Bmatrix} \quad \text{式 4. 53}$$

$$u_1(t) = C'_1 a_{11} \sin(\omega_1 t - \alpha_1) + C'_2 a_{12} \sin(\omega_2 t - \alpha_2) \quad \text{式 4. 54}$$

$$u_2(t) = C'_1 a_{21} \sin(\omega_1 t - \alpha_1) + C'_2 a_{22} \sin(\omega_2 t - \alpha_2) \quad \text{式 4. 55}$$

$$u_1(t) = C_1 a_{11} \sin \omega_1 t + C_2 a_{11} \cos \omega_1 t + C_3 a_{12} \sin \omega_2 t + C_4 a_{12} \cos \omega_2 t \quad \text{式 4. 56}$$

$$u_2(t) = C_1 a_{21} \sin \omega_1 t + C_2 a_{21} \cos \omega_1 t + C_3 a_{22} \sin \omega_2 t + C_4 a_{22} \cos \omega_2 t \quad \text{式 4. 57}$$



第五章 自行車道舒適度指標代表值驗證比對與訂定

本章首先針對自行車模擬模型之驗證比對結果進行比對，接著針對自行車實際騎乘之加速度值與模擬程式進行比對，最後提出自行車道騎乘舒適度代表值。

5.1 自行車模擬模型驗證比對結果

本節主要藉由 4.2 節所完成之單自由度不含阻尼之自由振動模型、單自由度含阻尼之自由振動模型及雙自由度不含阻尼之自由振動模型共三種情形之解析解，比對由本研究所推導自行車運動方程式之模擬程式所得之數據數值解是否達一致，以驗證模型所推導之自行車運動方程式的正確性。

5.1.1 單自由度不含阻尼之自由振動模型解析解與數值解比對結果

假設模型結構簡化示意圖如圖 5. 1，各參數為 $m_1 = 50.5(kg)$, $m_2 = 15(kg)$, $k_1 = 33978.5(N/m)$, $k_2 = k_3 = 10000000(N/m)$ ，即為彈簧係數極大，視為固定端， $c_1 = c_2 = c_3 = 0(N \cdot s/m)$ ，時間步長 $dt = 0.00125(s)$ ，外力、初始位移、初始速度、初始加速度皆為零，由質量塊自重驅動使其自由振動，比較質量塊 m_1 解析解與數值解之週期。由 4.2.1 節所推導之解析解公式如式 5. 1 求得其解析解之週期，並與數值解結果如圖 5. 2 算出其週期如式 5. 2，可得 $T_a \approx T_n$ ，解析解與數值解之結果可達一致性。

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{33978.5} = 0.2422(s) \quad \text{式 5. 1}$$

$$T_n = 0.3625 - 0.12 = 0.2425(s) \quad \text{式 5. 2}$$

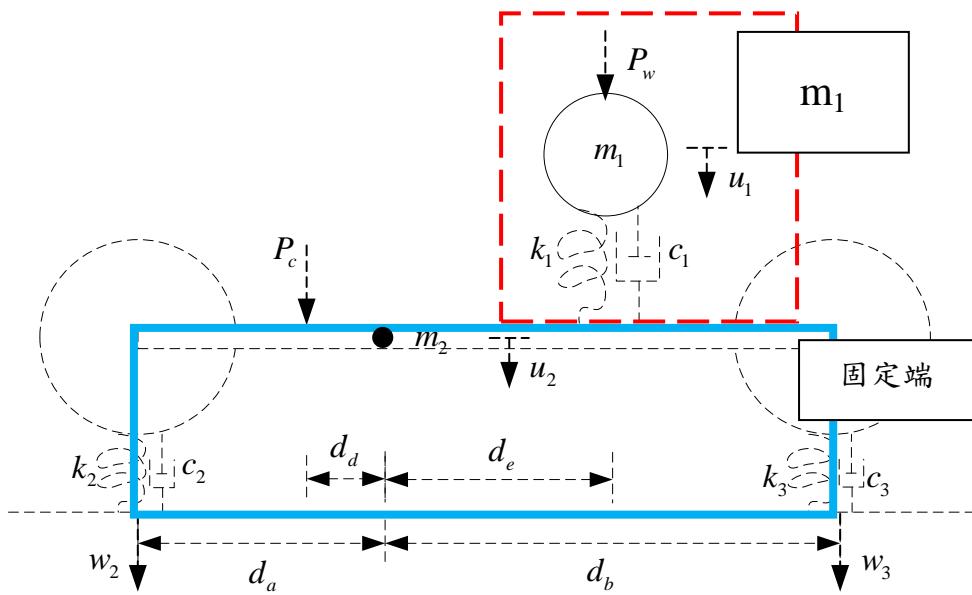


圖 5.1 單自由度模型結構示意圖

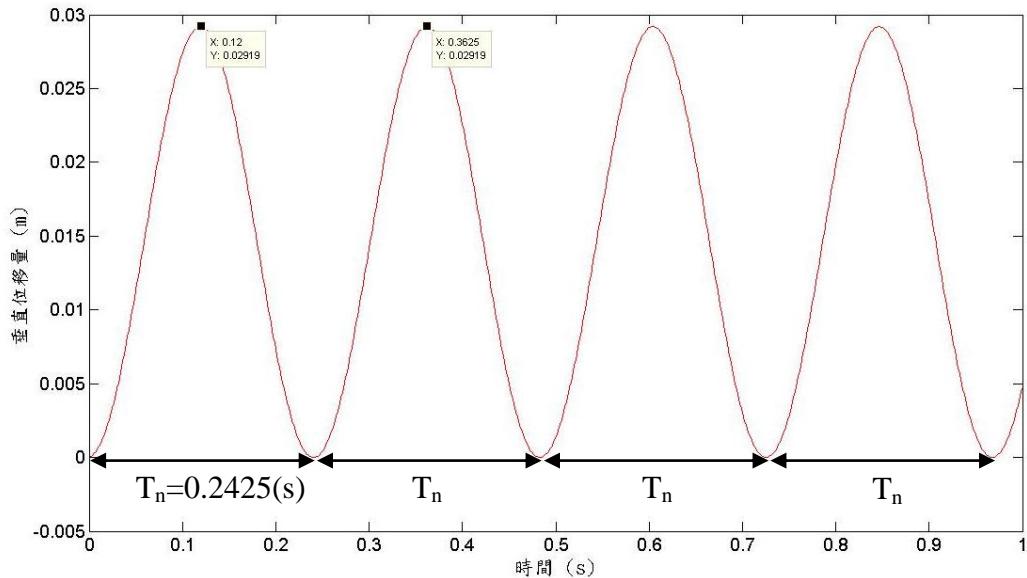


圖 5.2 單自由度模型無阻尼數值解

5.1.2 單自由度含阻尼之自由振動模型解析解與數值解比對結果

假設模型結構簡化示意圖如圖 5. 1，各參數為 $m_1 = 24.5(kg)$, $m_2 = 15(kg)$, $k_1 = 33978.5(N/m)$, $k_2 = k_3 = 10000000(N/m)$ ，即為彈簧係數極大，視為固定端， $c_1 = 727(N - s/m)$, $c_2 = c_3 = 0(N - s/m)$ ，時間步長 $dt = 0.00125(s)$ ，外力、質量塊初始速度、初始加速度皆為零，質量 m_2 初始位移為 $0(cm)$ ，主要由質量 m_1 純予 $1(cm)$ 位移量以驅動模型使其產生自由振動，比較質量 m_1 解析解與數值解之位移量變化，由 4.2.2 節所推導之解析解公式，可得本系統為低阻尼系統，其位移量公式如式 5. 3[21][23]，單自由度含阻尼之數值解與解析解比對結果如圖 5. 3，顯示其趨勢完全一致。可知模型推導結果與解析解完全吻合，可得相同計算值。

$$u(t) = e^{-\xi\omega t} [u(0)\cos\omega_D t + \left(\frac{\dot{u}(0) + \xi\omega u(0)}{\omega_D}\right)\sin\omega_D t] \quad \text{式 5. 3}$$

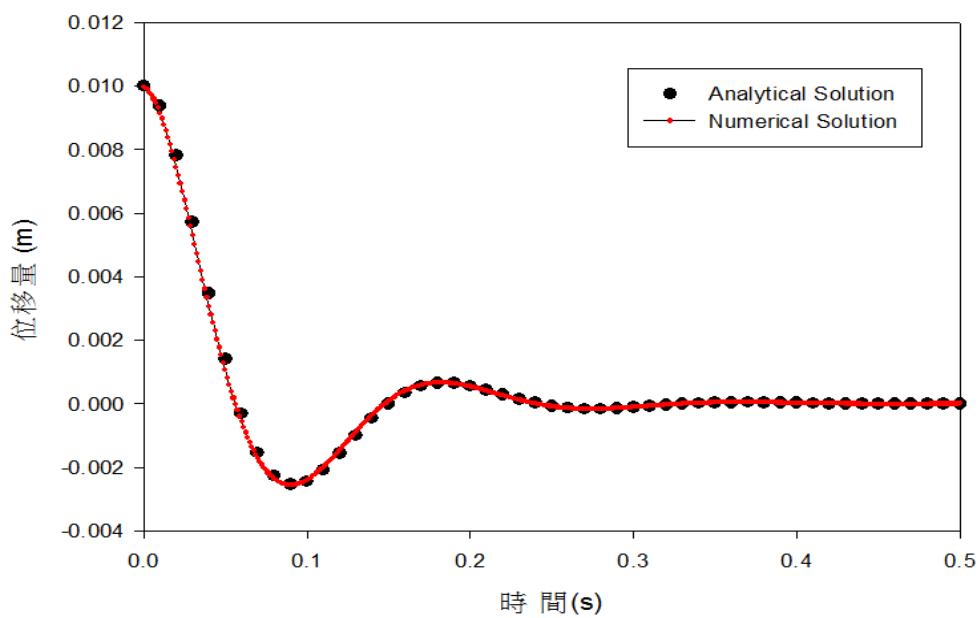


圖 5.3 質量 m_1 位移量之解析解與數值解比較圖

5.1.3 雙自由度不含阻尼之自由振動模型解析解與數值解比對結果

雙自由度不含阻尼之自由振動模型可分為兩種方法進行驗證，法一為將 k_2 , k_3 視為並聯，即 $k'_2 = k_2 + k_3$ ；法二為將 k_2 , k_3 視為各自獨立，即為本研究之自行車簡化模型結構。

1. 將 k_2 , k_3 視為並聯：假設模型結構簡化如圖 5.4，各參數為 $m_1 = 1(kg)$, $m_2 = 1(kg)$, $k_1 = 10(N/m)$, $k'_2 = k_2 + k_3 = 10(N/m)$, $c_1 = 0(N-s/m)$, $c'_2 = c_2 + c_3 = 0(N-s/m)$ ，時間步長 $dt = 0.00125(s)$ ，外力、質量塊初始速度、初始加速度皆為零，質量 m_1 初始位移為 $0(cm)$ ，主要由質量 m_2 純予 $1(cm)$ 位移量以驅動模型使其產生自由振動，比較質量 m_1 與 m_2 解析解與數值解之位移量變化，其質量 m_1, m_2 之位移量解析解公式如式 5.4、式 5.5，其中 C_1, C_2, C_3, C_4 可透過將上述初始條件代入求得[23][24]。質量 m_1 與 m_2 位移量之數值解與解析解比較圖如圖 5.6、圖 5.7，得模擬所得結果與解析解完全一致。
2. 將 k_2 , k_3 視為各自獨立：假設模型結構簡化如圖 5.5，各參數為 $m_1 = 1(kg)$, $m_2 = 1(kg)$, $k_1 = 10(N/m)$, $k_2 = k_3 = 5(N/m)$, $c_1 = c_2 = c_3 = 0(N-s/m)$ ，時間步長 $dt = 0.00125(s)$ ，外力、質量塊初始速度、初始加速度皆為零，質量 m_1 初始位移為 $0(cm)$ ，主要由質量 m_2 純予 $1(cm)$ 位移量以驅動模型使其產生自由振動，比較質量 m_1 與 m_2 解析解與數值解之位移量變化。質量 m_1 與 m_2 位移量之數值解與解析解比較圖如圖 5.8、圖 5.9，亦如預期，其結果達完全吻合。

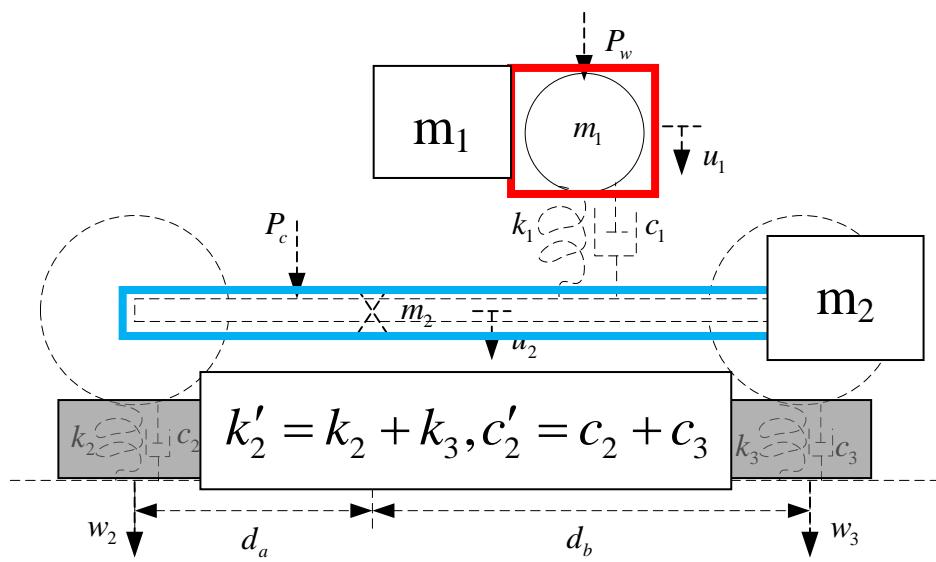


圖 5.4 雙自由度模型結構(法一)

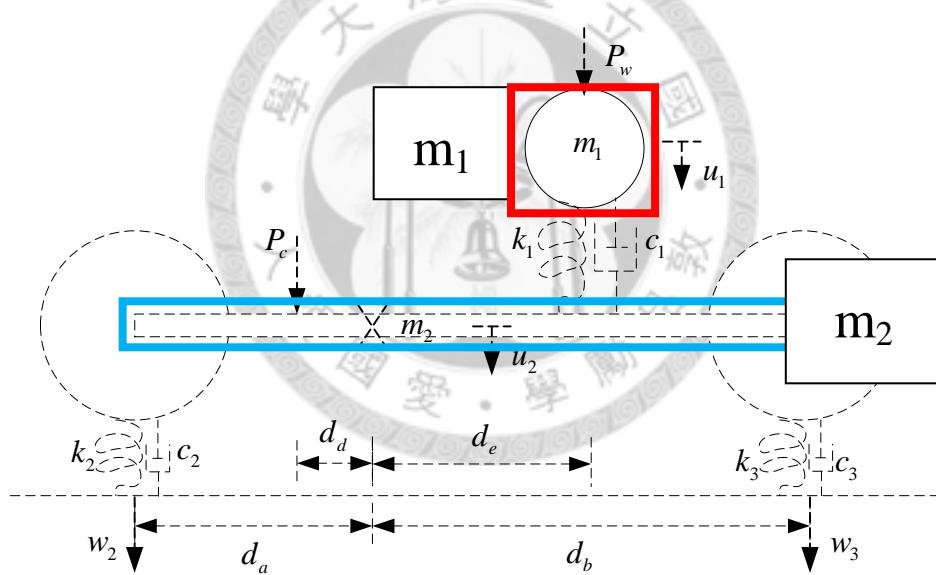


圖 5.5 雙自由度模型結構(法二)

$$u_1(t) = C_1 a_{11} \sin \omega_1 t + C_2 a_{11} \cos \omega_1 t + C_3 a_{12} \sin \omega_2 t + C_4 a_{12} \cos \omega_2 t \quad \text{式 5.4}$$

$$u_2(t) = C_1 a_{21} \sin \omega_1 t + C_2 a_{21} \cos \omega_1 t + C_3 a_{22} \sin \omega_2 t + C_4 a_{22} \cos \omega_2 t \quad \text{式 5.5}$$

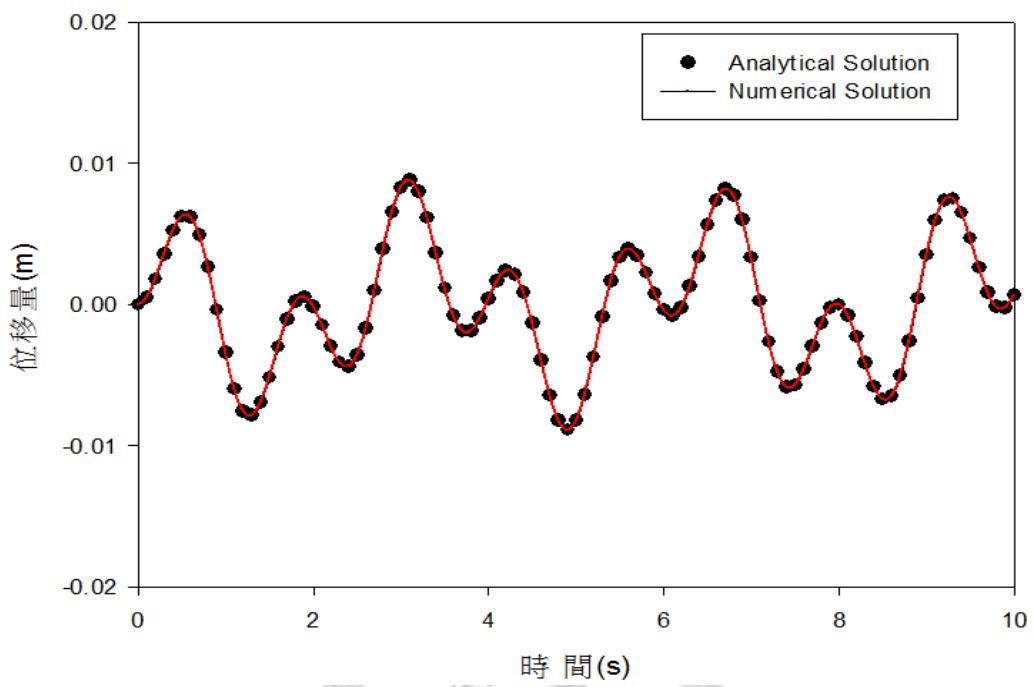


圖 5.6 質量 m_1 位移量之解析解與數值解比較圖

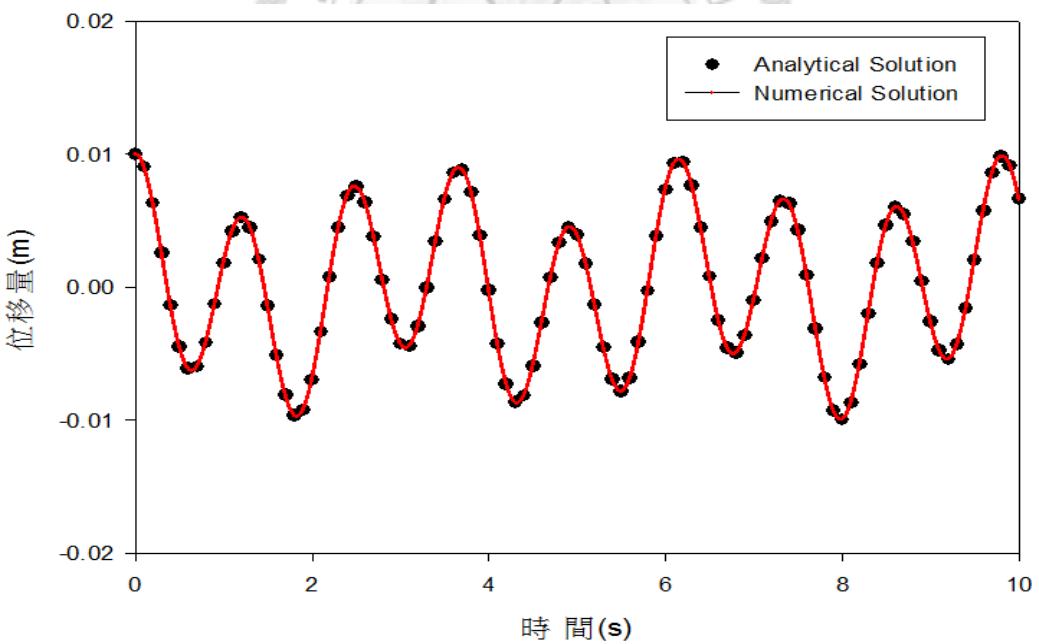


圖 5.7 質量 m_2 位移量之解析解與數值解比較圖

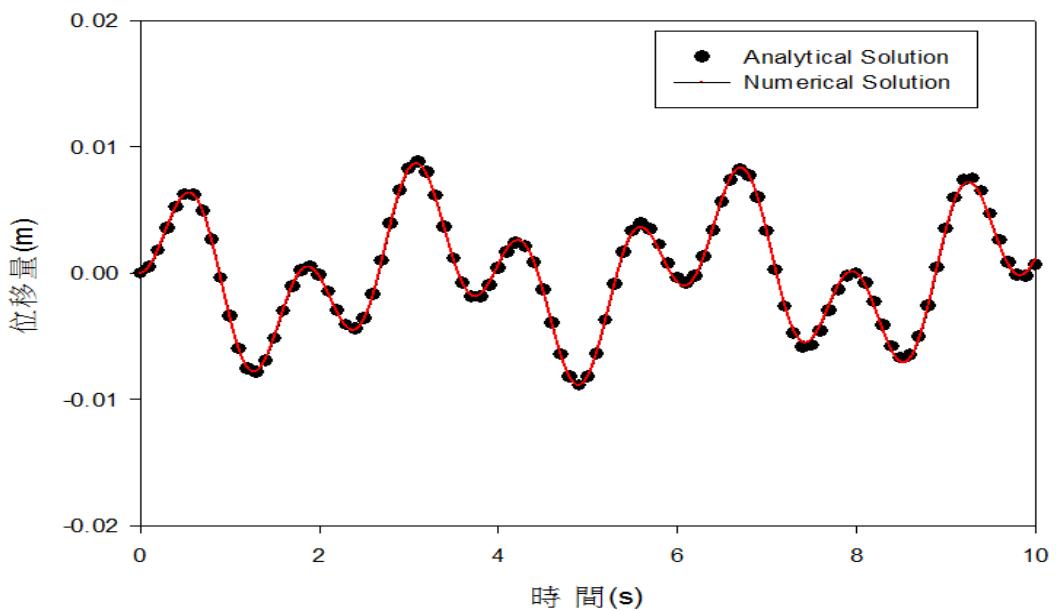


圖 5.8 質量 m_1 位移量之解析解與數值解比較圖

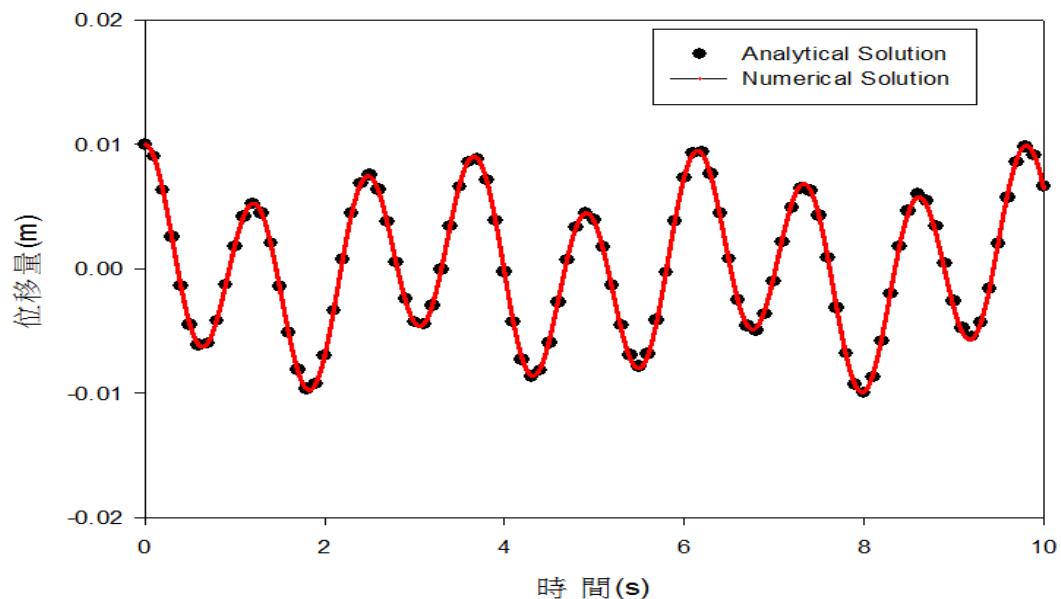


圖 5.9 質量 m_2 位移量之解析解與數值解比較圖

由 5.1.1 節~5.1.3 節之數值解與解析解之比對結果，分別在單自由度不含阻尼之自由振動模型、單自由度含阻尼之自由振動模型、雙自由度不含阻尼之自由振動模型共三種情形皆有達到一致性，驗證本研究所推導之自行車模擬模型運動方程式與理論求解相符，證明建構模型的合理性與穩定性。

5.2 自行車實測作業與模擬程式結果探討

本節針對自行車實際騎乘量測之實測加速度值與自行車模擬程式之模擬加速度值結果進行比對，針對自行車道常見鋪面材質，主要為瀝青鋪面、彩色鋪面、磚面人行共用道為本研究所研究對象，各取一路段並設以固定載重，當量測人員為 52 公斤之資料進行比對，分別詳述於 5.2.1~5.2.3 節，最後利用比對自行車模擬程式是否能夠實際反應出不同量測人員之實測加速度值變化趨勢，證實自行車模擬程式之可用性。其數據分析比對流程如圖 5. 10。

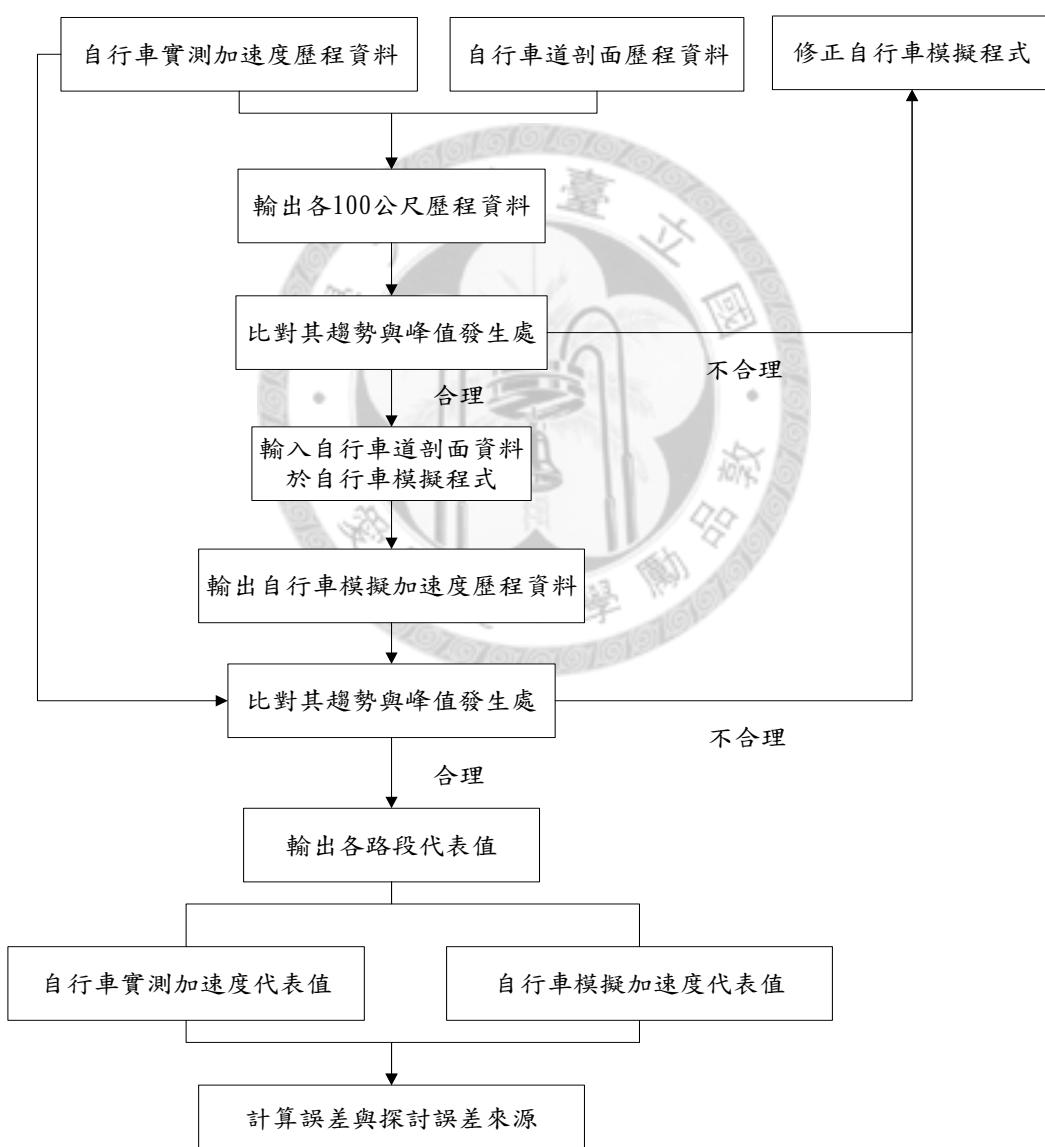


圖 5. 10 自行車實測數據與模擬程式比對流程圖

首先，比對自行車實測加速度值歷程資料與自行車道剖面歷程資料，於同一路段相同材質取各 100 公尺作為比對其整體趨勢與峰值發生處。接下來將該路段之自行車道剖面歷程資料輸入自行車模擬程式，輸出模擬加速度歷程資料與自行車實測加速度歷程資料進行比對其整體趨勢與峰值發生處，若峰值特徵達到一致性，即輸出自行車實測資料與自行車模擬資料之各路段代表值，其路段代表值將依照 3.4 節所述之方法計算，即為加速度值以間隔每 0.01 m/s^2 繪製直方圖並計算每間隔處所佔之百分比，採用累積百分比達 90% 之加速度值作為其代表值，最後相互比對其誤差百分比並探討可能之誤差來源。

以量測人員 B 為例(52kg)，以下 5.2.1 節~5.2.3 節分別為各材質路段之比對資料，分別為瀝青鋪面、彩色鋪面、磚面人行共用之自行車道共三種類型。

5.2.1 自行車實測作業與模擬程式於瀝青鋪面比對結果

瀝青鋪面自行車道如圖 5. 11，其自行車道瀝青鋪面剖面歷程圖如圖 5. 12 與自行車於瀝青鋪面實際量測加速度歷程圖如圖 5. 13 進行比對，兩者產生峰值皆為 20~40 公尺之間，接下來比對自行車於瀝青鋪面實際量測加速度歷程圖如圖 5. 13 與其剖面模擬加速度歷程圖如圖 5. 14，雖與上述峰值出現處稍有偏移，但於 20~40 公尺之間仍有一峰值出現，再分別輸出其代表值如表 5. 1，誤差百分比為-6.99%，計算式如式 5. 6。

$$\text{誤差百分比} = \frac{\text{實測}-\text{模擬}}{\text{實測}} \times 100\% \quad \text{式 5. 6}$$



圖 5. 11 瀝青鋪面自行車道實際照片

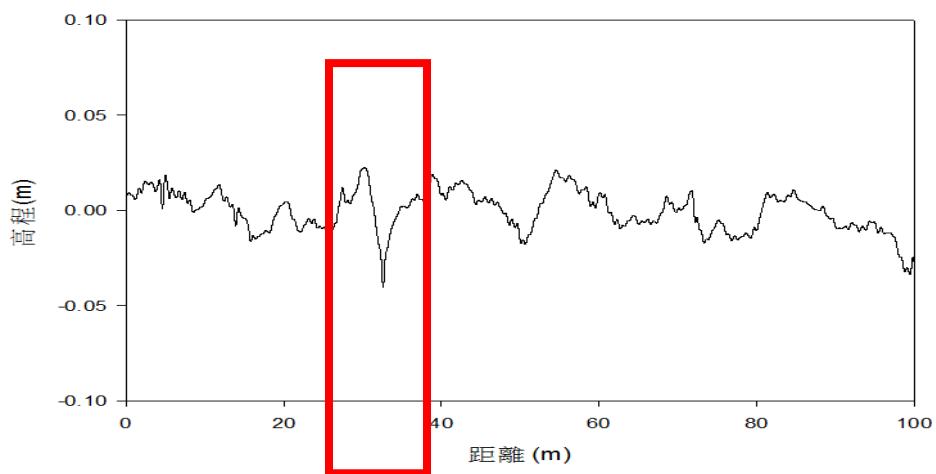


圖 5.12 自行車道瀝青鋪面剖面歷程圖

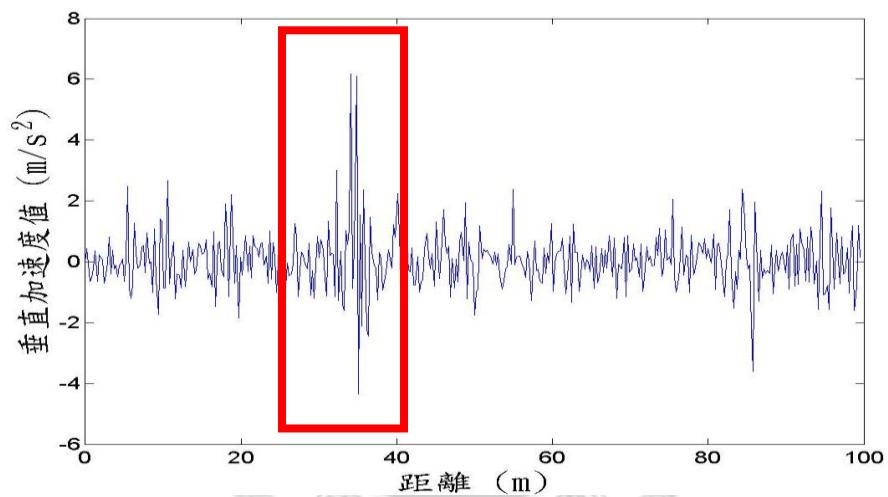


圖 5.13 自行車於瀝青鋪面實際量測加速度歷程圖

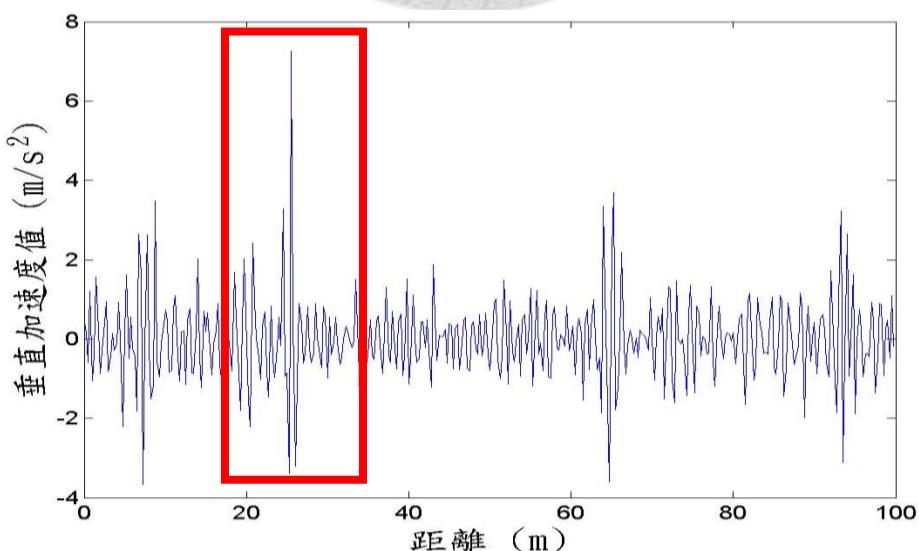


圖 5.14 瀝青鋪面自行車道模擬加速度歷程圖

表 5.1 漆青鋪面實測與模擬之加速度代表值比較

	加速度代表值(m/s^2)
漆青鋪面實測結果	1.43
漆青鋪面模擬結果	1.53

5.2.2 自行車實測作業與模擬程式於彩色鋪面比對結果

彩色鋪面自行車道如圖 5.15，其自行車道彩色鋪面剖面歷程圖如圖 5.16 與自行車於彩色鋪面實際量測加速度歷程圖如圖 5.17 進行比對，兩者產生峰值皆為 10~30 公尺之間，接下來比對自行車於彩色鋪面實際量測加速度歷程圖如圖 5.13 與其剖面模擬加速度歷程圖如圖 5.18，雖與上述峰值出現處稍有偏移，但於 10~30 公尺之間仍有一峰值出現，再分別輸出其代表值如表 5.2，誤差百分比為 5.45%，計算式如式 5.6。



圖 5.15 彩色鋪面自行車道實際照片

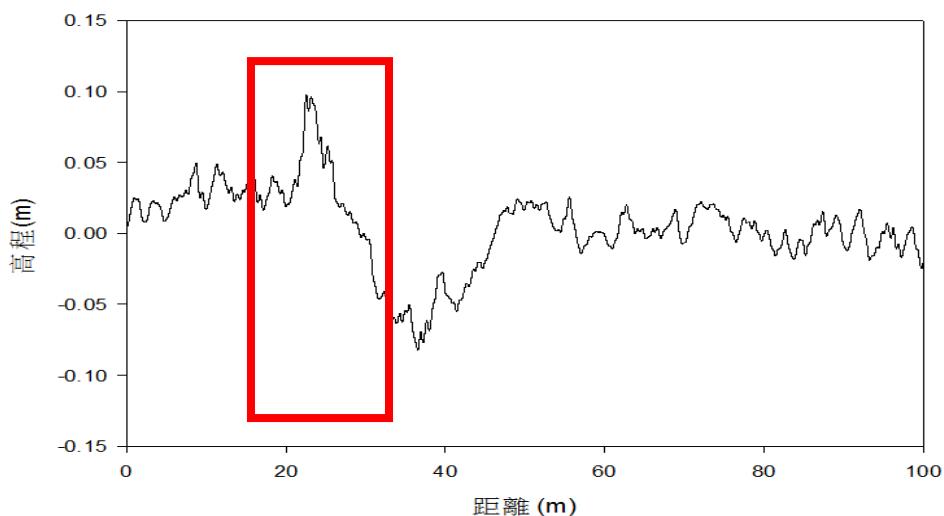


圖 5.16 自行車道彩色鋪面剖面歷程圖

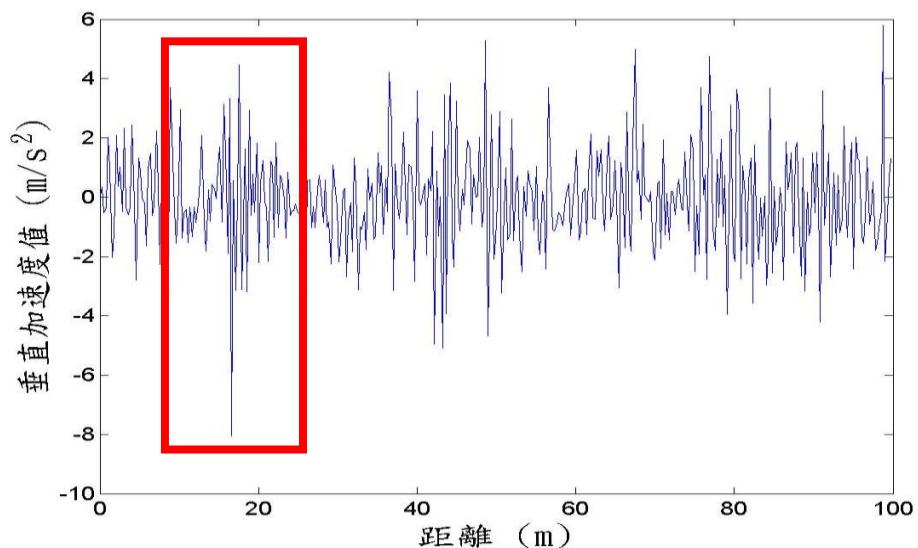


圖 5.17 自行車於彩色鋪面實際量測加速度歷程圖

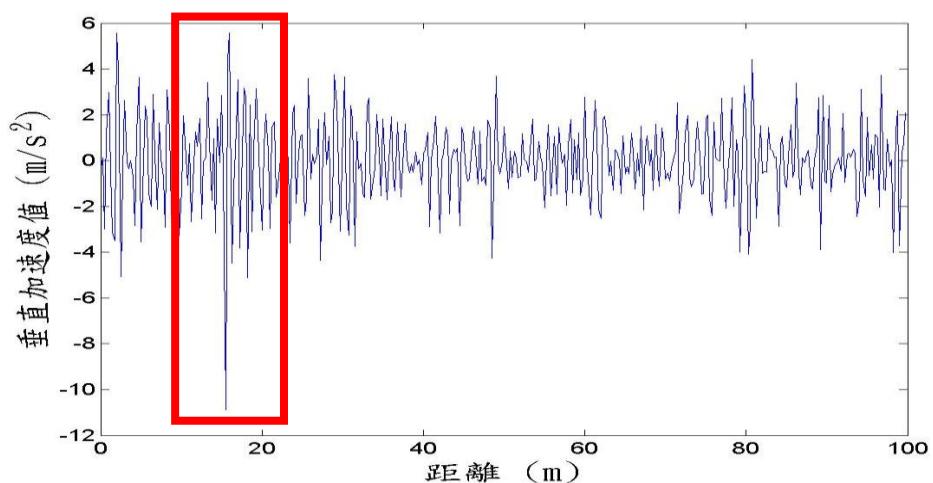


圖 5.18 彩色鋪面自行車道模擬加速度歷程圖

表 5.2 彩色鋪面實測與模擬之加速度代表值比較

	加速度代表值(m/s^2)
彩色鋪面實測結果	3.12
彩色鋪面模擬結果	2.95

5.2.3 自行車實測作業與模擬程式於磚面人行共用道比對結果

磚面人行共用之自行車道如圖 5.19，其磚面人行共用之自行車道剖面歷程圖如圖 5.20 與自行車於磚面人行共用之自行車道實際量測加速度歷程圖如圖 5.21 進行比對，兩者產生峰值皆為 80~100 公尺之間，接下來比對自行車於磚面人行共用之自行車道實際量測加速度歷程圖如圖 5.21 與其剖面模擬加速度歷程圖如圖 5.22，雖與上述峰值出現處稍有偏移，但於 80~100 公尺之間皆有一峰值出現，再分別輸出其代表值如表 5.3，誤差百分比為 14.67%，計算式如式 5.6。



圖 5.19 磚面人行共用之自行車道實際照片

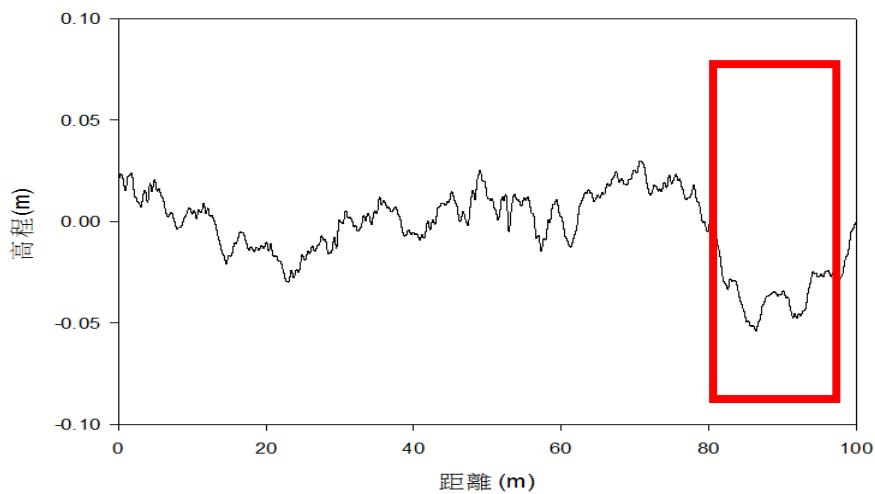


圖 5.20 磚面人行共用之自行車道剖面歷程圖

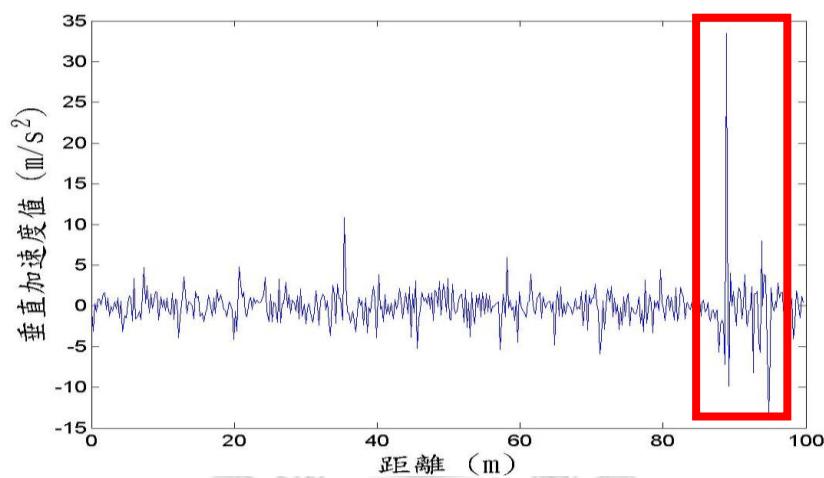


圖 5.21 自行車於磚面人行共用之自行車道實際量測加速度歷程圖

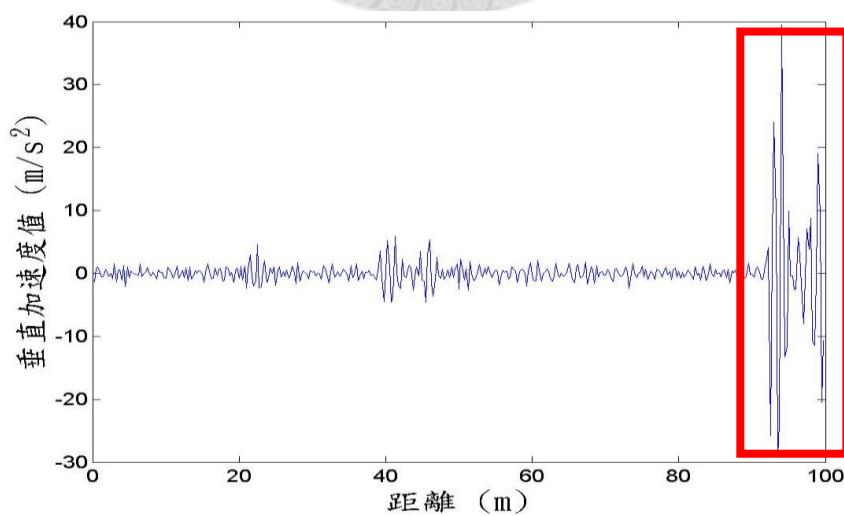


圖 5.22 磚面人行共用之自行車道模擬加速度歷程圖

表 5.3 磚面人行共用之自行車道實測與模擬之加速度代表值比較

	加速度代表值(m/s^2)
磚面人行共用之自行車道實測結果	3
磚面人行共用之自行車道模擬結果	2.56

5.2.4 自行車實測作業與模擬程式比對結果

依照 5.2.1 節~5.2.3 節之比對方法，於三種材質路段並各取其 100 公尺，共為八條路段，分別為不同量測人員之體重設定，依序為 A(45kg)、B(52kg)、C(70kg)。將不同量測人員於各種材質之實測與模擬加速度各輸出其代表值整理如表 5. 4、圖 5.23~圖 5.25，其不同量測人員於各種材質之實測與模擬之代表值誤差百分比如表 5.5、圖 5.26。

表 5.4 各量測人員實測與模擬加速度代表值

量測路段	量測人員					
	A(45kg)		B(52kg)		C(70kg)	
	實測	模擬	實測	模擬	實測	模擬
瀝青鋪面樣本 1	1.71	1.6	1.43	1.53	1.26	1.31
瀝青鋪面樣本 2	1.84	1.91	1.35	1.36	1.25	1.26
彩色鋪面樣本 1	3.24	3.16	3.12	2.95	2.62	2.26
彩色鋪面樣本 2	3.05	3.31	2.98	2.99	2.58	2.5
彩色鋪面樣本 3	3.04	2.64	2.7	2.4	2.26	2.05
彩色鋪面樣本 4	2.82	2.45	2.59	2.42	1.91	1.98
磚面人行道樣本 1	3.1	2.74	3	2.56	2.51	2.49
磚面人行道樣本 2	5.31	4.69	4.92	4.37	4.43	4.18

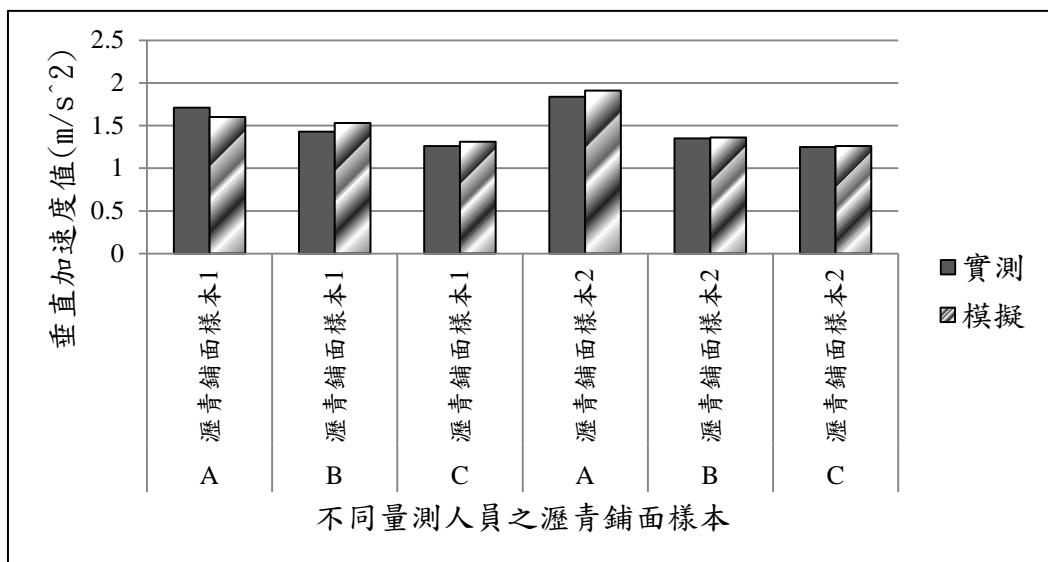


圖 5.23 瀝青鋪面各量測人員實測與模擬加速度代表值比較

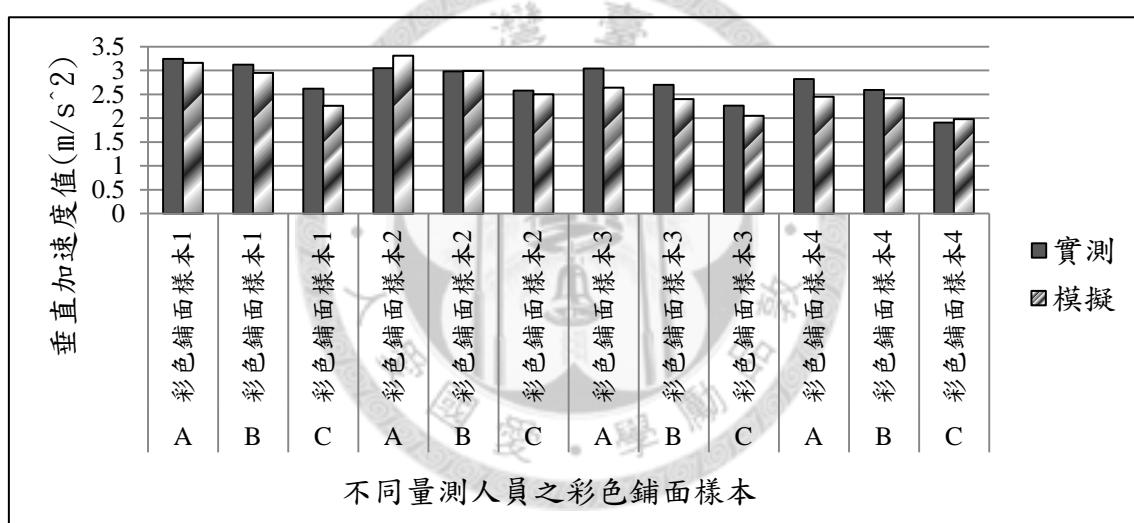


圖 5.24 彩色鋪面各量測人員實測與模擬加速度代表值比較

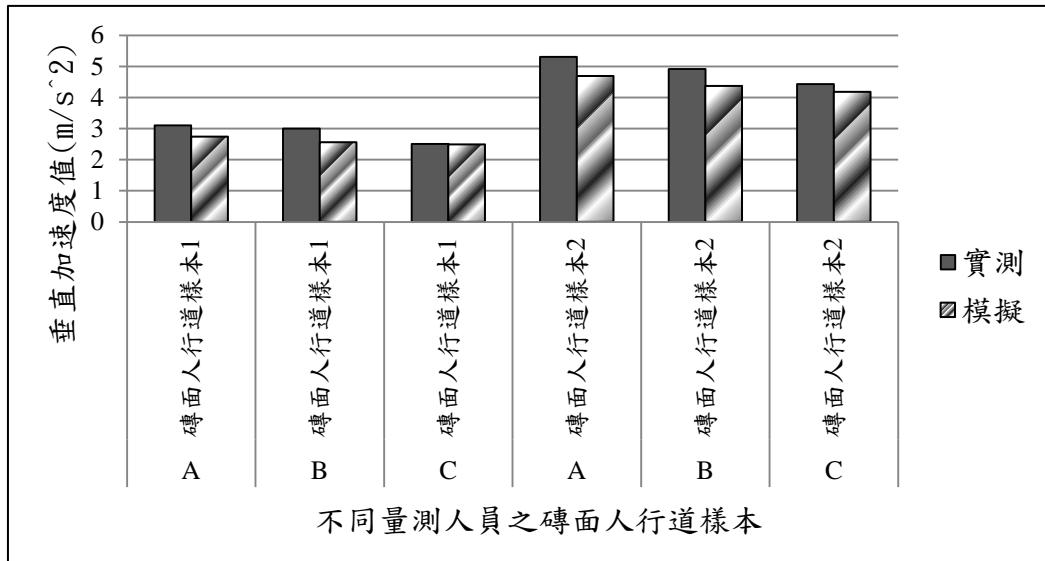


圖 5.25 磚面人行道各量測人員實測與模擬加速度代表值比較

表 5.5 各量測人員實測與模擬加速度代表值誤差百分比

量測路段	量測人員		
	A(45kg)	B(52kg)	C(70kg)
加速度代表值誤差百分比(%)			
瀝青鋪面 1	6.43	-6.99	-3.97
瀝青鋪面 2	-3.80	-0.74	-0.80
彩色鋪面 1	2.47	5.45	13.74
彩色鋪面 2	-8.52	-0.34	3.10
彩色鋪面 3	13.16	11.11	9.29
綠色鋪面 4	13.12	6.56	-3.66
磚面人行共用道 1	11.61	14.67	0.80
磚面人行共用道 2	11.68	11.18	5.64

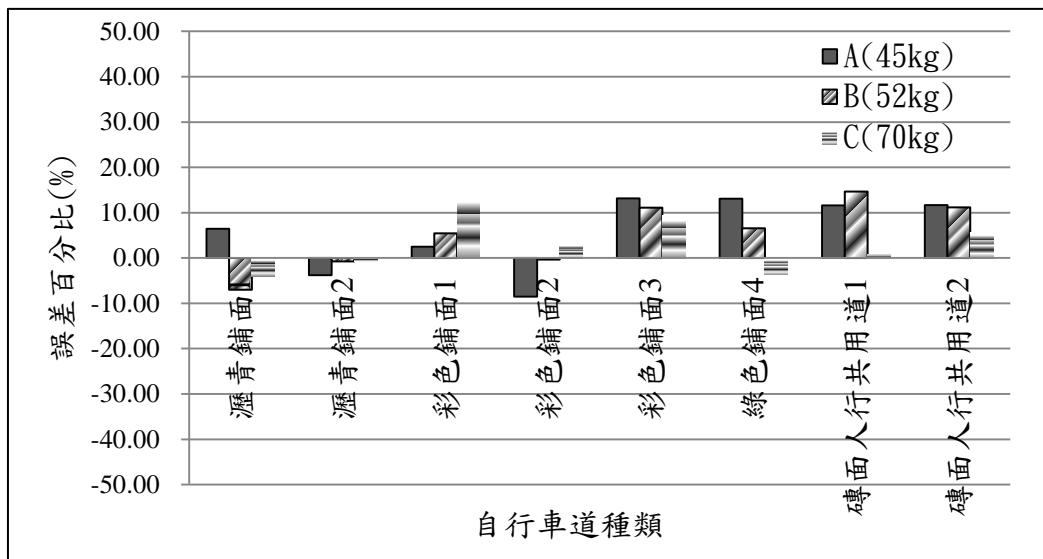


圖 5.26 各量測人員實測與模擬加速度代表值誤差百分比

由表 5.4、圖 5.23~圖 5.25 可看出各量測人員於不同體重下，其實際騎乘與程式模擬之加速度值於不同材質之自行車道皆具有相同的趨勢，即為隨體重增加則加速度值減少。而表 5.5、圖 5.26 可看出各量測人員於不同體重下，其實際騎乘與程式模擬之加速度值於不同材質之自行車道所造成的誤差百分比。於瀝青鋪面，誤差百分比皆小於 10%；於彩色鋪面，誤差百分比多小於 10%，但有三筆資料誤差百分比大於 10%，研判其因彩色鋪面其鋪設路段並非為自行車道特別設計及鋪設，而是在原有外側車道上加鋪彩色顏料，其本身多有凸起或凹陷狀況且路段間常伴隨著人孔蓋，若三位量測人員於自行車騎乘之測線與輕量型慣性式平坦儀所行經之測線不同時，使之產生誤差來源；於磚面人行共用道則於量測人員 A、B 之誤差反而皆大於 10%，而量測人員 C 之誤差百分比則小於 10%，造成此情形判定因磚面若其本身底部掏空，使得自行車行駛通過產生跳動，但此種情形對於輕量型慣性式平坦儀經此種路段量測時，雷射位移感測器與車輪具有前後縱向距離差，並非於同一垂直位置點上，造成其車輪行經磚面產生跳動，但位移感測器無法量得其磚面跳動之情形，使誤差較大，又於自行車實際騎乘時，若量測人員本身體重較重，亦使得其實測加速度值較小，故誤差百分比較小。

5.3 自行車道騎乘舒適度指標代表值訂定

自行車道舒適度指標代表值之訂定，主要透過由輕量型慣性式平坦儀所實際量測得之自行車路段剖面輸入自行車模擬程式計算後求得各自行車道路段騎乘舒適度指標代表值，以訂定一自行車道騎乘舒適度指標建議代表值。其中模擬程式中之自行車避震系統以參考文獻中[16][17]所訂定為主如表 5.6，以進行各自行車道騎乘舒適度指標代表值之計算，並將騎乘者之重量設定於 52 公斤，固定其參數設定。

自行車道實測路段剖面共分為三種鋪面材質，包括瀝青鋪面、彩色鋪面、磚面人行共用道。依照台北市現有市區通勤型之常見自行車道種類，多為磚面人行共用道，其次為彩色鋪面，瀝青鋪面較為少數。因此，本研究共收集了瀝青鋪面約 1 公里，共 3 條路段；彩色鋪面約 10 公里，共 8 條路段；磚面人行共用道約 10 公里，共 10 條路段。扣除路口、明顯凹陷或凸起處、加減速區，總分析路段長度約為 10 公里，將其自行車道剖面資料輸入自行車模擬程式當中，並將各路段以 100 公尺為單位輸出一自行車道舒適度代表值，若該路段大於 100 公尺則取其平均後作為該路段之自行車道舒適度代表值，其流程如圖 5.27。

欲符合 2.1.4 節所介紹之 ISO2631-1 規範中之加速度值訂定範圍如表 2.2，作為自行車道舒適度之評比，於本節將探討於 3.4 節所訂定之自行車道之加速度代表值，分別探討其加速度累積直方圖之累積百分比達 50%、60%、70%、80%、90% 時之加速度值大小，找出適用於 ISO2631-1 規範中之加速度值訂定範圍作為評斷自行車道路段良窳之標準。

表 5.6 自行車避震系統之參數設定[16][17]

	彈簧係數 (N/m^2)	阻尼係數 ($N \cdot s/m$)
座墊避震	48650	1000
前後車輪	134000	272

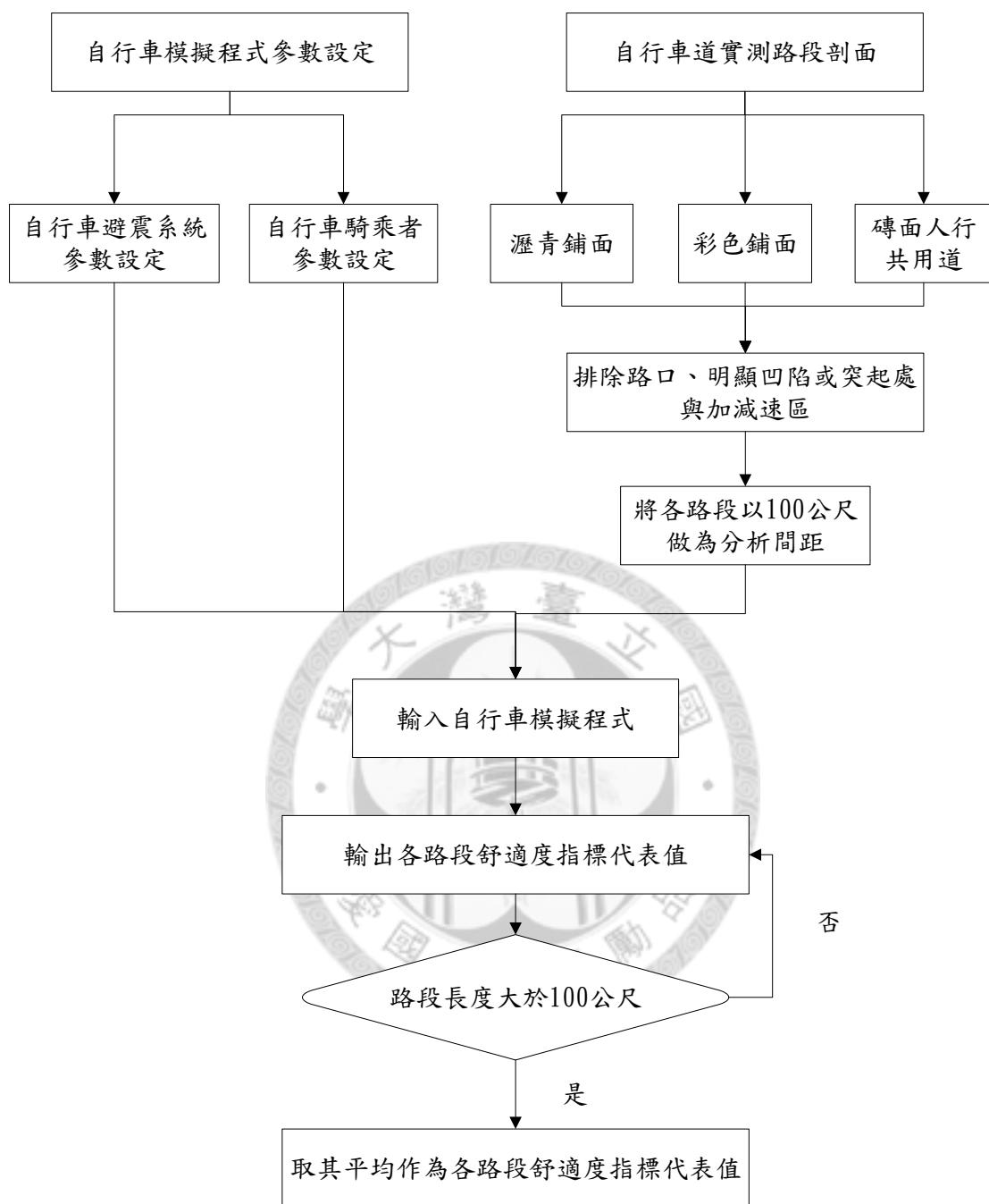


圖 5.27 自行車道舒適度指標代表值運算流程

5.3.1 自行車道加速度直方圖累積百分比達 50%

於各路段不同材質之自行車道加速度直方圖累積百分比達 50% 時之代表值整理如圖 5.28，其中最大值出現於彩色鋪面 3 為 $1.46(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為不舒適；最小值出現於瀝青鋪面 2 為 $0.65(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為一般不舒適。此所分布之範圍較為集中，鑑別度較差。

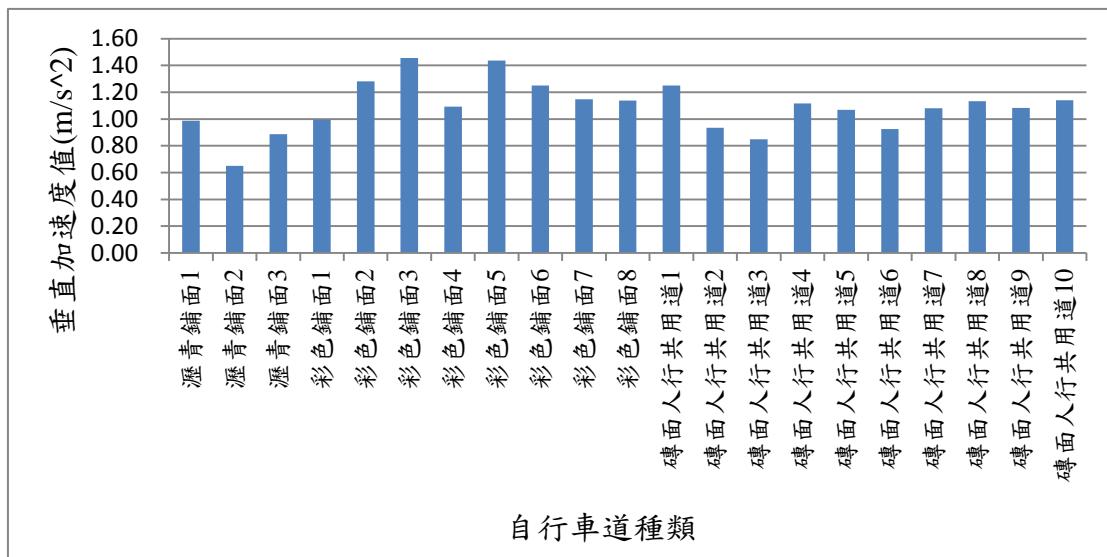


圖 5.28 各路段累積百分比達 50%之比較圖

5.3.2 自行車道加速度直方圖累積百分比達 60%

於各路段不同材質之自行車道加速度直方圖累積百分比達 60% 時之代表值整理如圖 5.29。其中最大值出現於彩色鋪面 3 為 $1.85(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為非常不舒適；最小值出現於瀝青鋪面 2 為 $0.8(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為一般不舒適。此所分布之範圍仍較為集中，鑑別度相對較差。

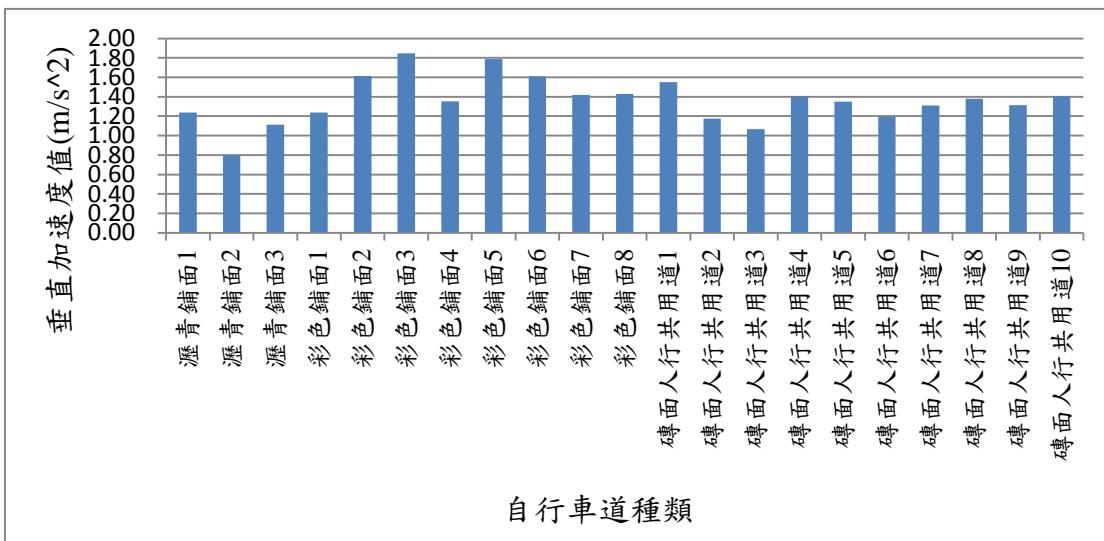


圖 5.29 各路段累積百分比達 60% 之比較圖

5.3.3 自行車道加速度直方圖累積百分比達 70%

於各路段不同材質之自行車道加速度直方圖累積百分比達 70% 時之代表值整理如圖 5.30。其中最大值出現於彩色鋪面 3 為 $2.26(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為非常不舒適；最小值出現於漆青鋪面 2 為 $0.99(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為一般不舒適。此所分布之範圍較廣，具有較佳之鑑別度。

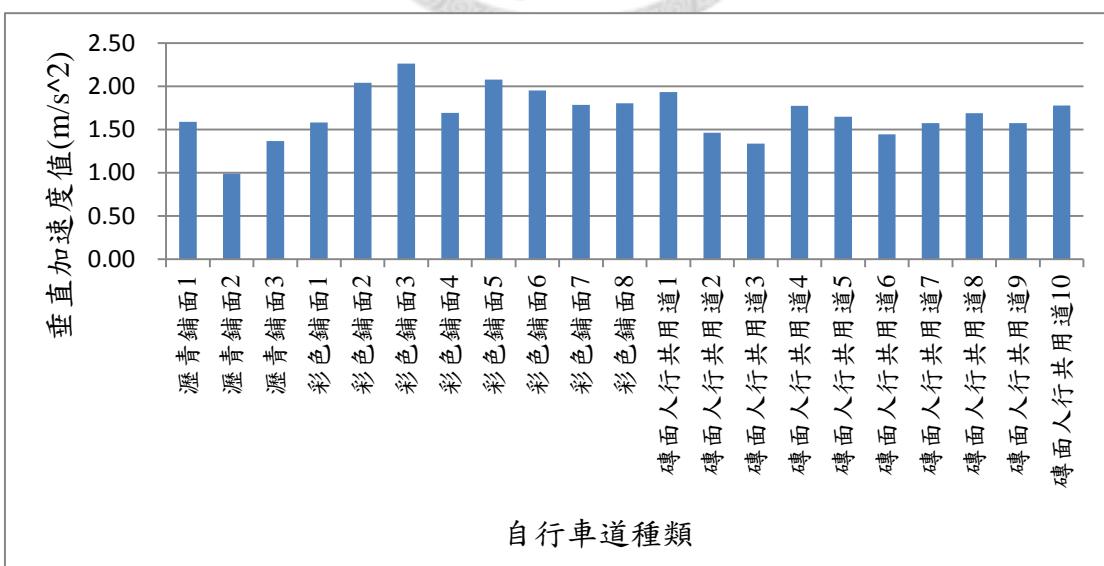


圖 5.30 各路段累積百分比達 70% 之比較圖

5.3.4 自行車道加速度直方圖累積百分比達 80%

於各路段不同材質之自行車道加速度直方圖累積百分比達 80% 時之代表值整理如圖 5.31。其中最大值出現於彩色鋪面 3 為 $2.85(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為極度不舒適；最小值出現於瀝青鋪面 2 為 $1.21(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為不舒適。此所分布之範圍仍較為集中，鑑別度較差。

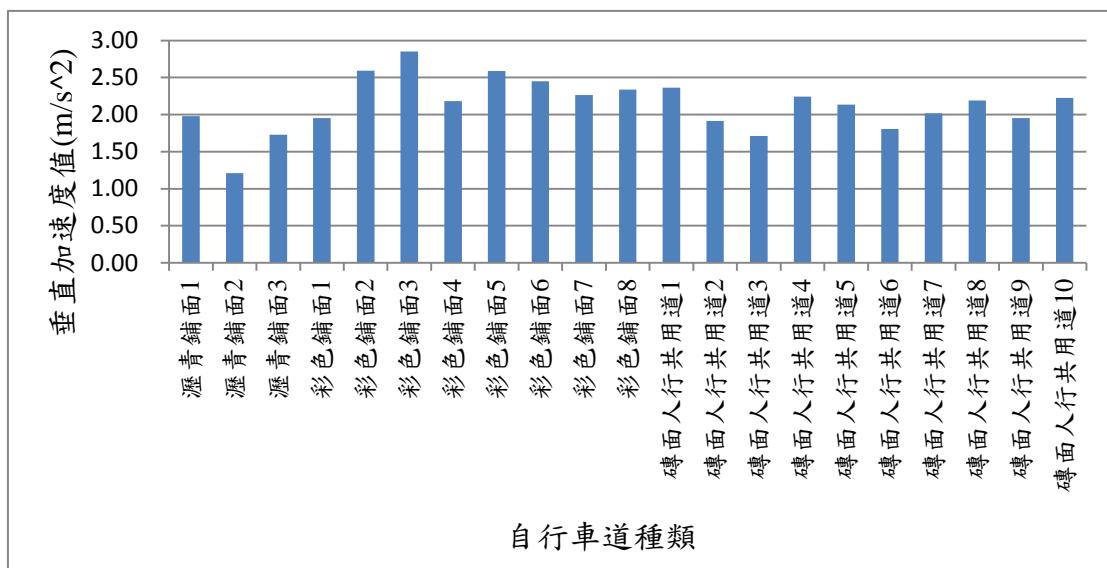


圖 5.31 各路段累積百分比達 80%之比較圖

5.3.5 自行車道加速度直方圖累積百分比達 90%

於各路段不同材質之自行車道加速度直方圖累積百分比達 90% 時之代表值整理如圖 5.32。其中最大值出現於彩色鋪面 3 為 $3.72(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為極度不舒適；最小值出現於瀝青鋪面 2 為 $1.66(m/s^2)$ ，根據 ISO2631-1 規範中訂定為非常不舒適。此所分布之範圍之加速度值均偏大，鑑別度較差。

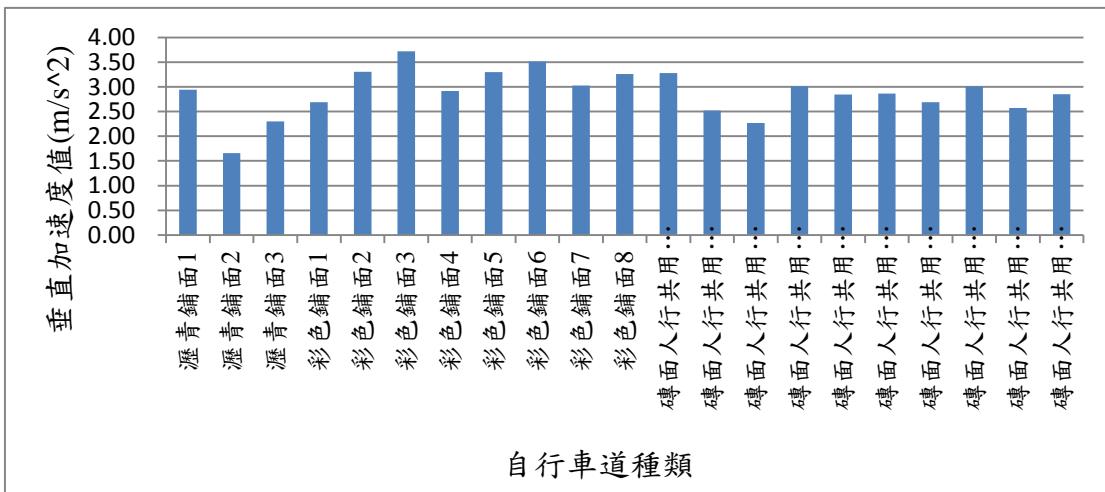


圖 5.32 各路段累積百分比達 90%之比較圖

5.3.6 小結

透過 5.3.1 節~5.3.5 節之比較後，依照 ISO2631-1 規範中訂定之加速度值評估標準如表 5.7，共分為六個分級，可得自行車道之代表值則其累積百分比達 70% 之加速度值於不同材質路段中分布範圍較廣，共涵蓋四級，具有較高之鑑別度如表 5.8。於 ISO2631-1 規範中所訂定門檻值於加速度大小分級具有部分重疊之現象，故本研究提出一自行車道舒適度建議門檻值訂定如表 5.9。於依本研究之探討之鋪面材質對自行車舒適性之良窳透過累積百分比達 70% 之加速度值以求其各材質之加速度平均值如圖 5.33，瀝青鋪面較優，分級於不舒適，其次為磚面人行共用道，分級於非常不舒適，彩色鋪面較差，但仍分級於非常不舒適，現有之自行車道三種鋪面材質皆尚未達極度不舒適之分級，故亦可判定當達分級為極度不舒適時方為施工養護或重鋪之門檻依據。

表 5.7 ISO2631-1 附錄 C 舒適度評估標準

範圍 (m/s^2)	舒適度	範圍 (m/s^2)	舒適度
小於 0.315	A(不會不舒適)	0.8~1.6	D(不舒適)
0.315~0.63	B(略為不舒適)	1.25~2.5	E(非常不舒適)
0.5~1	C(一般不舒適)	大於 2	F(極度不舒適)

表 5.8 自行車道剖面實測路段輸出模擬加速度代表值比較表

累積百分比(%)	加速度範圍(m/s^2)	舒適度涵蓋分級範圍
50	0.65~1.46	C~D(共兩級)
60	0.8~1.85	D~E(共兩級)
70	0.99~2.26	C~F(共四級)
80	1.21~2.85	D~F(共三級)
90	1.66~3.72	E~F(共兩級)

表 5.9 自行車道舒適度建議門檻值訂定

範圍(m/s^2)	舒適度	範圍(m/s^2)	舒適度
小於 0.315	A(不會不舒適)	1~1.25	D(不舒適)
0.315~0.5	B(略為不舒適)	1.25~2	E(非常不舒適)
0.5~1	C(一般不舒適)	大於 2	F(極度不舒適)

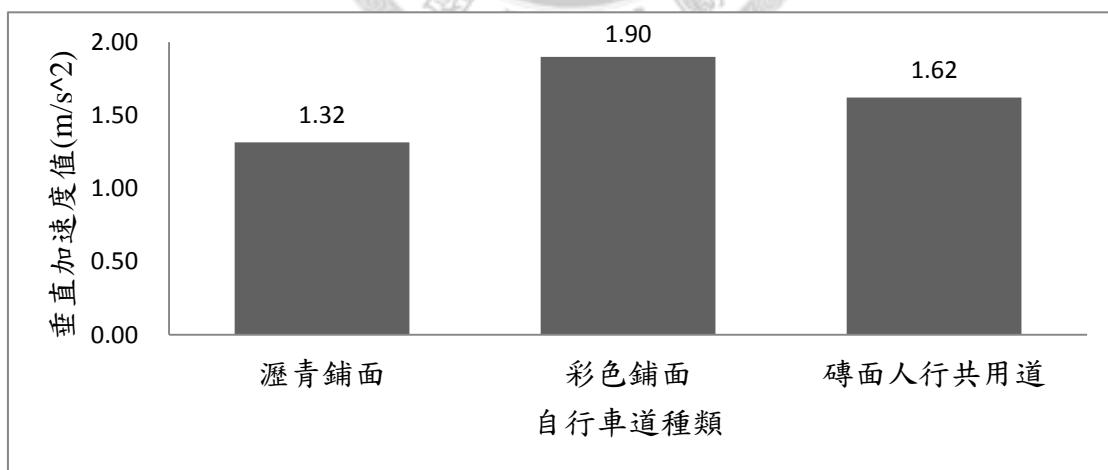


圖 5.33 自行車道舒適度各材質之加速度平均代表值



第六章 結論與建議

本研究首先以文獻回顧方式了解公路與市區道路常用之鋪面平坦度與舒適度指標、常見且具代表性之平坦度檢測儀器、自行車發展史與其結構組成、現有之自行車道設計準則作為本研究之基礎。接著參考 ISO2631-1 規範所訂定之舒適性指標作為自行車檢測設備之開發量測要項，即為以人體座式時臀部位置之垂向加速度值作為自行車道騎乘舒適度指標，並使用臺灣大學於 100 年所開發之輕量型慣性式平坦儀作為自行車道剖面收集儀器且將其改良為更符合於自行車道量測上。於自行車模擬加速度值之反應，首先針對自行車座墊之彈簧係數與阻尼係數進行量測，再分別量測與計算出車體各部分重量、形心位置、轉動慣量等項目，作為輸入模擬程式之用。本研究將上述實測與模擬之加速度驗證與比對結果彙整於 5.1、5.2 小節，並於 5.3 節採用收集自行車道剖面路段共 21 公里探討自行車道騎乘舒適度指標之代表值大小來適用於 ISO2631-1 規範當中，並提出一自行車道舒適度建議門檻值。

6.1 結論

本節總結前述各章節之研究成果，其內容分述如下：

1. 開發一套自行車檢測相關設備，主要透過加速度規與距離感測器為主之量測設備，藉由檢測人員實際騎乘於自行車道上即可得自行車實測之加速度值歷時或歷程資料。並透過實驗求得其座墊處之彈簧係數與阻尼係數，建立一套作為自行車道騎乘舒適度評估指標之儀器。
2. 應用國立台灣大學於 100 年所開發之輕量型慣性式平坦儀作為收取剖面之主要儀器，將其改良為更能貼近應用於自行車道之量測平坦度儀器，檢測速度為 30 公里/小時，可大量且快速地收集自行車道剖面作為路網之建置與分析。
3. 本研究所推導之自行車運動方程式與撰寫之自行車模擬程式可用於輸入自行車道剖面，並輸出一自行車道騎乘舒適度代表值，以代表其舒適度之良窳。

4. 將輸入模擬程式求得之加速度值，以累積百分比達 70%之加速度值作為代表值，並套用 ISO-2631-1 規範中所訂定之舒適度門檻值，以判斷該路段自行車道舒適度，作為施工水準判別之依據。

6.2 建議

本節針對前述各章節之研究成果，提出建議方向，其內容分述如下：

1. 本研究目標為市區通勤型之自行車道之騎乘舒適度指標代表值訂定，未來仍可利用本研究之概念，一併將休閒型自行車道訂定出其適用舒適度代表值，使得自行車道舒適度之訂定上有量化數值之依循，以作為道路主管機關施工水準判別之依據。
2. 若能將本研究當中自行車模型建構之基本假設納入考量，所得之加速度值應可更加符合實體車體設計。



參考文獻

- [1] 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, pp.76-85, 1986.
- [2] 張孟孔、陳建旭、許阿明，評估鋪面平坦度檢測指標之探討，台灣公路工程，第 33 卷第 7 期，頁 4，民國 96 年。
- [3] 陳怡先，機場鋪面平坦度評估指標研擬之研究，國立台灣大學土木工程學系博士論文，民國 93 年 6 月。
- [4] Sayers,M.W.,“Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements,” World Bank Technical Paper No.46, 1986.
- [5] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1General requirements, International Organization for Standardization, 1997.
- [6] 周家禧，「路面品質績效量測設備開發先導計畫」，交通部運輸研究所委託研究報告，民國 94 年 4 月。(MOTC-IOT-93-EBB003)
- [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系碩士論文，民國 95 年 10 月。
- [8] 賴怡樺，建置慣性式平坦儀認證程序與人員教育訓練制度，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，民國 98 年 8 月。
- [9] 施雅蓉，慣性剖面儀載具與速度對檢測績效之影響，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，民國 100 年 7 月。
- [10] ASTM E950, Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling

Reference, 2004.

- [11] . 杜世宏，利用 ADAMS 軟體探討避震器對自行車之動態影響，華梵大學機電工程系碩士論文，民國 99 年。
- [12] . 余俊德、陳志揚、許亞茹、黃美華，臺灣自行車發展歷史之初探，國際體育運動與健康休閒發展趨勢研討會專刊，2010 年，吳鳳科技大學，嘉義。
- [13] . 許修豪、曾志煌、許書耕，交通部推動自行車道系統政策之研究，中華民國運輸學會 98 年學術論文研討會，2009 年 12 月，開南大學，桃園。
- [14] . 詹詩姿、蘇瑛敏，淺談市區型自行車道之規劃原則-以台北市為例，中華民國建築師公會全國聯合會第五屆台灣建築論壇-建築創意文化，2008 年 12 月，台北。
- [15] . 交通部運輸研究所，自行車道系統規劃設計參考手冊(第二版)，民國 99 年 10 月。
- [16] . 楊銘賢，自行車各種避震器影響乘坐舒適性之研究，國立成功大學機械工程系碩士論文，民國 97 年 7 月。
- [17] . He, Q., Fan, X., Ma, D., Full Bicycle Dynamic Model for Interactive Bicycle Simulator, Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol.5/373, pp.373-380, December, 2005.
- [18] . 應懷樵、張占一、李磊、王亞濤，半功率帶寬與 INV 法在阻尼測試中適用範圍的研究，東方振動與噪聲技術研究所，全國振動工程及應用學術會議，2006 年，昆明，雲南。
- [19] . Chopra Anil K., “Dynamics of Structures”, Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [20] COEDIC 應用於 FFT 64-point, pp.2-5。2012 月 6 月查詢。
http://eshare.stut.edu.tw/EshareFile/2010_6/2010_6_a78298c9.pdf
- [21] 洪李陵，結構動力學授課講義，國立成功大學土木工程學系所，2010 年。
- [22] . PIARC, “International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture

and Skid Resistance Measurement.” Final report, No.01.04.T, to the Technical Committee on Surface Characteristics, World Road Association (PIARC), Paris, 1995

[23] . Riley, W. F. and Sturge, L. D., “Engineering Mechanics Dynamics”, John Wiley and Sons Inc, 1995.

[24] . 周佳俞, 解析解與數值解的相互驗證, 國立中央大學土木工程學系(內部報告), 2011 年。





簡歷



姓名：林宜蓉

出生地：台南市

出生日期：民國 77 年 9 月 6 日

聯絡地址：臺南市東區小東路 250 號之一

電子信箱：r99521516@ntu.edu.tw

學歷： 國立台灣大學土木工程學研究所碩士(101)

國立成功大學土木工程學系學士(99)

臺南市立大灣高級中學畢業(95)

臺南市立後甲國民中學畢業(92)

臺南市立東光國民小學畢業(89)