

國立交通大學  
運輸科技與管理學系

碩士論文

行人流行人跟隨行為特性與模式之研究

The Characteristics and Modeling of Microscopic  
Pedestrian-following Behavior within  
Pedestrian Flow



研究生：蔣益彰

指導教授：吳水威

中華民國九十八年六月

行人流行人跟隨行為特性與模式之研究

The Characteristics and Modeling of Microscopic  
Pedestrian-following Behavior within Pedestrian Flow

研究生：蔣益彰

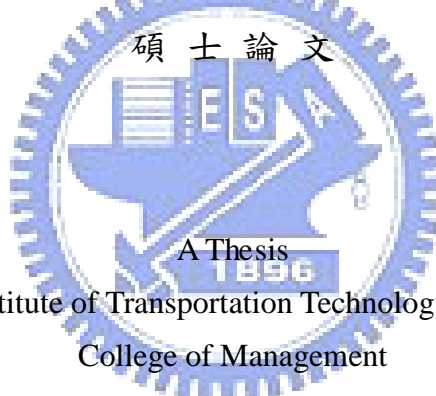
Student：Yi-Chang Chiang

指導教授：吳水威

Advisor：Dr. Shoei-Uei Wu

國立交通大學  
運輸科技與管理學系

碩士論文



Submitted to Institute of Transportation Technology and Management

College of Management

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Transportation Technology and Management

June 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

# 行人流行人跟隨行為特性與模式之研究

研究生：蔣益彰

指導教授：吳水威

國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班

## 摘要

本研究目的在建構一微觀行人跟隨模式，以探討影響行人跟隨行為之顯著變因，及分析行人跟隨行為之特性。經現場錄影觀察，符合本研究所需之行人跟隨行為樣本占所有觀察行人數目的 6.93%。並由資料發現行人行為與領導者行人速度、跟隨者行人速度、行人速度差、跟隨距離、起始跟隨距離、性別、跟隨時間等影響變數有關，本研究依觀察資料首先引入跟車理論之模式，再建構線性行人跟隨距離模式及線性行人跟隨速度模式，並進行比較，以預測行人於跟隨行為發生後之跟隨距離與跟隨速度。與現有車流理論中跟車模式比較，發現本研究建構之行人跟隨距離模式，模式解釋能力 $R^2$ 為 0.511，平均絕對值誤差率為 0.122，在四種模式中的預測誤差為最小。顯示線性行人跟隨距離模式能有效預測行人跟隨行為。

**關鍵詞：**行人跟隨行為、跟車理論、微觀行人跟隨模式、平均絕對值誤差率、線性行人跟隨距離模式



# The Characteristics and Modeling of Microscopic Pedestrian-following Behavior within Pedestrian Flow

Student : Yi-Chang Chiang

Advisor : Dr. Shoei-Uei Wu

Department of Transportation Technology & Management  
National Chiao Tung University

## Abstract

The main purposes of this study are to construct a microscopic pedestrian-following model and analyze the characteristics of pedestrian-following behavior. The data of pedestrian-following behavior was investigated in commercial area in Taipei. Statistical tests show that the significant factors affecting pedestrian-following behaviors include leader's speed, follower's speed, following distance, gender and following time. First of all, study is going to use two models of car-following theory, to see if they could describe pedestrian-following behavior, and to construct new linear pedestrian-following distance model. After comparing the results, we found that the  $R^2$  of new pedestrian-following distance model is 0.511, and MAPE is 0.122. The linear pedestrian-following distance model can predict well with the least error over all four models we tested. It is said that pedestrian-following distance model which we constructed can satisfactorily capture the nature of pedestrian-following behavior.

**Keywords :** Pedestrian-following behaviors, Car-following theory, Microscopic pedestrian-following model, MAPE(mean absolute percentage error), Linear Pedestrian-following distance model

## 誌 謝

能夠完成這篇論文，首先要感謝的是我的父母，從小到大，即便是現在已經二十八歲的我，仍然依靠家裡對我的支持，才能夠在大學畢業，當完兵後，同意我進入社會求職，最後回到學校完成研究所學業，還是需要家人在背後的莫莫支持，現在我完成了人生中求學的階段任務，接下來是要負起承擔家庭的重責大任，期能不負父母所望。

再來要感謝我的指導教授 吳水威老師，在求學期間，指導進行計畫案的研究，不僅僅是在學術上的學習，更重要的是讓我學到做人處事的道理，以及縝密的思緒，於論文撰寫期間，不斷耐心指導與細心的教學，實為學生學習之典範。在生活上，老師待人處事的圓融，也給予我相當大的啟發，獲益匪淺。同時也要感謝 龍教授天立與 楊教授宗璟兩位口試委員，在百忙之中，不辭辛勞撥空來給予學生指導與建議。

當我在社會中打拼，能有幸考上運管所，最大的助力便是我的同學兼好友藍博士，沒有他的教學指導，我真不可能有機會回到學校繼續唸書，無論在生活上或是論文的問題，他都不厭其煩的以最簡單易懂的方式讓我瞭解，真的很慶幸能有這樣的好友。另外還有蕭入、老總、強翰、臉很臭、包子，在我無聊的時候總是能夠提供很多笑點，與我鬥嘴，讓我有個練習打嘴砲的快樂時光。我的小蘋果也在適當的時候提供我精神上的幫助，雖然出車禍骨折了，希望妳在我的論文交出去的時候就可以復元囉。當然還有一些人，雖不是學習的好對象，但能讓我知道尊師重道的重要性，作為反面教材真的是再適合不過了。要感謝的人很多，總而言之，因為有你們，讓我的人生更豐富更多彩多姿。

我還有很多事要做，揮揮手不帶走一片雲彩，離開交大，下一個階段才要開始，仍然需要不斷努力以求精進。

蔣益彰 謹  
2009年 6月

# 目錄

摘要 .....	I
Abstract .....	II
誌謝 .....	III
目錄 .....	IV
圖目錄 .....	VI
表目錄 .....	VIII
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 研究範圍與對象.....	2
1.4 研究方法.....	3
1.5 研究流程.....	3
第二章 文獻回顧 .....	7
2.1 人行空間.....	7
2.1.1 人行步道.....	7
2.1.2 捷運車站.....	9
2.2 行人行為特性.....	10
2.2.1 影響行為因素觀測文獻.....	10
2.2.2 行為模擬分析文獻.....	14
2.3 綜合評析.....	17
第三章 理論基礎與研究方法 .....	20
3.1 理論基礎.....	20
3.1.1 車流理論.....	20
3.1.2 跟車理論.....	20
3.1.2.1 Pipe' s Theory.....	22
3.1.2.2 GM model.....	22
3.1.3 人流理論.....	23
3.1.3.1 巨觀人流理論.....	23
3.1.3.2 微觀人流理論.....	26
3.1.4 小結.....	27
3.2 研究方法.....	27
3.2.1 文獻評析法.....	27
3.2.2 攝影調查法.....	27
3.2.3 成對樣本 t 檢定.....	27
3.2.4 卡方檢定.....	28
3.2.5 單因子變異數分析.....	28

3.2.6 迴歸分析.....	29
3.2.7 檢定指標.....	31
第四章 資料調查與分析 .....	32
4.1 引言.....	32
4.2 調查地點.....	32
4.3 資料收集與處理.....	34
4.4 行人跟隨行為特性分析.....	38
4.4.1 性別.....	39
4.4.2 速度.....	39
4.4.3 加速度.....	44
4.4.4 跟隨距離.....	44
4.5 跟隨時間.....	49
4.6 小結.....	53
第五章 行人跟隨模式建立與驗證分析 .....	56
5.1 Pipe 行人跟隨模式建立 .....	56
5.1.1 整體迴歸式.....	57
5.1.2 男性迴歸式.....	60
5.1.3 女性迴歸式.....	63
5.1.4 Pipe 行人跟隨模式小結.....	65
5.2 GM 行人跟隨模式建立 .....	66
5.2.1 GM 男性行人跟隨模式.....	67
5.2.2 GM 女性行人跟隨模式.....	67
5.2.3 GM 行人跟隨模式小結.....	67
5.2.4 修正 GM 行人跟隨模式.....	68
5.3 線性行人跟隨模式建立.....	69
5.3.1 線性行人跟隨模式.....	69
5.3.2 線性跟隨距離模式.....	70
5.3.3 線性跟隨速度模式.....	76
5.4 模式驗證與比較分析.....	82
第六章 結論與建議 .....	85
6.1 結論.....	85
6.2 建議.....	87
參考文獻 .....	89

## 圖目錄

圖 1	研究流程圖	5
圖 2	研究架構圖	6
圖 3	單向雙向人流示意圖	12
圖 4	行為決策流程圖	13
圖 5	MOVE、AVOID、SWIRL 示意圖	15
圖 6	模擬行人自我組織圖	16
圖 7	行人研究發展歷程圖	17
圖 8	跟車模式示意圖	21
圖 9	行人速度與密度關係圖	24
圖 10	行人流量與空間關係圖	24
圖 11	行人速度與流量關係圖	25
圖 12	行人速度與空間關係圖	25
圖 13	行人跟隨示意圖	32
圖 14	攝影現場地點示意簡圖	33
圖 15	錄影現場照片圖	34
圖 16	行人跟隨行為判斷圖	35
圖 17	行人資料收集流程圖	38
圖 18	前後行人速度百分比次數分配直方圖	40
圖 19	性別與速度間差異相關示意圖	43
圖 20	前後行人加速度之百分比次數分配圖	44
圖 21	行人跟隨距離示意圖	45
圖 22	跟隨距離 D1 次數分配圖	46
圖 23	跟隨距離 D2 次數分配圖	47
圖 24	跟隨距離 D3 次數分配圖	47
圖 25	不同跟隨終止原因與其平均跟隨時間圖	52
圖 26	整體行人迴歸標準化殘差次數圖(D1)	58
圖 27	整體行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D1)	58
圖 28	整體行人迴歸標準化殘差次數圖(D3)	59
圖 29	整體行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D3)	59
圖 30	男性行人迴歸標準化殘差次數圖(D1)	60
圖 31	男性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D1)	61
圖 32	男性行人迴歸標準化殘差次數圖(D3)	62
圖 33	男性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D3)	62
圖 34	女性行人迴歸標準化殘差次數圖(D1)	63
圖 35	女性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D1)	63



圖 36 女性行人迴歸標準化殘差次數圖(D3).....	64
圖 37 女性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D3).....	65
圖 38 跟隨距離模式標準化殘差圖.....	73
圖 39 跟隨距離模式殘差 P-P 圖.....	74
圖 40 行人跟隨距離模式比較圖.....	75
圖 41 跟隨速度模式標準化殘差圖.....	79
圖 42 跟隨速度模式殘差 P-P 圖.....	80
圖 43 行人跟隨速度模式比較圖.....	81



## 表目錄

表 1	行人通道服務水準分級表	8
表 2	人與人空間距離特性	11
表 3	應用行人模擬法簡表	14
表 4	歷年相關人流文獻比較表	18
表 5	成對樣本 T 檢定	36
表 6	卡方檢定	36
表 7	性別與跟隨型態交叉比較表	39
表 8	性別交叉比較表	39
表 9	前後行人速度統計表	40
表 10	前後行人速度成對 T 檢定表	41
表 11	前後行人速度相關表	41
表 12	前後行人速度迴歸係數分析表	41
表 13	前後行人速度變異數分析表	41
表 14	前後行人速度迴歸殘差統計表	42
表 15	後方跟隨者速度與性別獨立 T 檢定	42
表 16	假設情況分類統計量表	42
表 17	假設情況分類獨立 T 檢定	43
表 18	起始跟隨距離統計表	45
表 19	跟隨者性別與起始距離之獨立 T 檢定	46
表 20	跟隨距離與前後方性別之獨立 T 檢定	48
表 21	前後性別分組之距離統計表	48
表 22	性別與距離相關分析表	49
表 23	跟隨時間統計表	49
表 24	跟隨時間與性別之獨立 T 檢定	50
表 25	終止原因與跟隨時間同質性檢定表	50
表 26	終止原因與跟隨時間 ANOVA 表	51
表 27	LSD 法多重比較表	51
表 28	自由流跟隨統計表	52
表 29	PIPE 整體行人迴歸估計表(D1)	57
表 30	PIPE 整體行人迴歸 ANOVA 表(D1)	57
表 31	PIPE 整體行人迴歸估計表(D3)	58
表 32	PIPE 整體行人迴歸估計表(D3)	59
表 33	PIPE 男性行人迴歸估計表(D1)	60
表 34	PIPE 男性行人迴歸 ANOVA 表(D1)	60
表 35	PIPE 男性行人迴歸估計表(D3)	61
表 36	PIPE 男性行人迴歸估計表(D3)	61

表 37 PIPE 女性行人迴歸估計表(D1)	63
表 38 PIPE 女性行人迴歸 ANOVA 表(D1)	63
表 39 PIPE 女性行人迴歸估計表(D3)	64
表 40 PIPE 女性行人迴歸估計表(D3)	64
表 41 PIPE 行人跟隨模式比較表	65
表 42 PIPE 行人跟隨模式整理表	66
表 43 GM 行人跟隨模式參數估計表	67
表 44 GM 男性行人跟隨模式參數估計表	67
表 45 GM 女性行人跟隨模式參數估計表	67
表 46 GM 行人跟隨模式整理表	68
表 47 修正 GM 行人跟隨模式參數表	69
表 48 跟隨距離模式變數相關分析表	70
表 49 跟隨距離模式摘要表	70
表 50 跟隨距離模式 ANOVA 表	71
表 51 跟隨距離模式刪除變數表	71
表 52 跟隨距離模式共線性診斷表	71
表 53 跟隨距離模式係數表	72
表 54 跟隨距離模式殘差分析表	73
表 55 跟隨速度模式變數相關分析表	76
表 56 跟隨速度模式自變數逐步迴歸篩選表	77
表 57 跟隨速度模式 ANOVA 表	77
表 58 跟隨速度模式共線性診斷表	78
表 59 跟隨速度模式係數表	78
表 60 跟隨速度模式係數表	79
表 61 行人跟隨模式	82
表 62 行人跟隨模式比較表	82
表 63 行人跟隨模式驗證比較表	84

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

人類最古老的交通工具就是利用步行來達成移動的目的，即便到了現代，除了應用大眾運輸工具及私人運具達到快速且方便的大範圍移動之外，要真正到達最後的目的仍然需要憑藉著雙腳來進行。截至 2008 年底，台灣人口數已突破 2300 萬人[1]，其中大多數比例集中在各大都會區中，又根據行政院經濟建設委員會[2]的人口估計於五年內可達到 2370 萬人，由此可見，未來在都會區的行人設施上會產生可觀的衝擊。「人行空間」應該是從事都市運輸規劃與設計時最應受到重視的內容，但卻往往最被忽視。步行絕對不只是一種通過性的行為，人行空間也不能視為純粹的通過性地帶。步行除了是一種最簡單、普及、無污染的移動方式之外，同時還是一種社會學習過程，它引發了各種都市與社交活動。人行空間是都市發展的重要元素，更是永續運輸的目標下急需去推廣的課題，如果都市發展能夠規劃良好的行人步行空間，提供對於行人步行美好的願景，將會為我們的都市環境產生重大的變化。因此，研究及分析行人的移動行為與相關影響因素，將會對設計良好的行人設施有相當的助益，著實為一項值得研究的課題。

過去對於行人行為的相關研究大多著墨於外在環境影響因素的探討，以及利用系統模擬的模式來分析、模擬行人的行為，雖然在巨觀與微觀方面已有相當的成果，然而針對行人本身移動行為特性的討論卻相當地缺乏或是僅以模擬方式帶過，其原因可能為行人個體間的差異非常大，不論是個人習慣的問題或是人類大腦的資訊處理過程，亦或是對外在刺激的接受程度、反應速度，都使得行人行為變得非常隨機，難以透過簡單與容易計算的數學模式解釋行人的行為，而使得模式過於複雜無法順利研究。

有鑑於上述背景與動機，可清楚瞭解到行人流動實為都市街道容量分析的主要部份，而其特性在運輸系統設計與運作上更是重要的考量因素。人行空間系統於都市空間中為一極重要且可及性最高的公共交通設施，而在行人動線設計上則須考慮行人的安全性、旅運型態與便利性。在公共場所、運輸場站、百貨公司、電影院等地方容易發生密度集中的行人流。因此本研究參考引用車流相關理論及行人移動行為之相關文獻作為分析行人移動特性之依據，歸納分類建立行人跟隨行為模式，並判斷行人移動之影響參數，且探討行人移動之相關特性，以作為後續研究與設計人行設施之參考依據，並希望可以更進一步對行人行為做預測，以期提供更多資訊給相關單位做為行人設施的建設或改良參考。同時期望能為將來對於行人的微觀研究提出一個新的方向與工具。塑造以人為本的交通環境。

## 1.2 研究目的

本研究係探討行人跟隨行為之移動方式與特性，以及影響行人的因素，將對行人流動相關特性進行分析，以瞭解行人在各種不同情況下與人流特性之關係性，而建構微觀行人跟隨模式。因此本研究之具體研究目的如下：

1. 蒐集相關文獻：將行人行為相關文獻、人流理論進行研析、整理與比較，再從中選擇合適之部分以做為本研究之基礎理論。
2. 資料分析：將蒐集調查之人流資料與相關影響因素，匯整後應用統計分析法，進行歸納分類可提供進一步建構行人跟隨模式。
3. 建立模式：根據實地調查行人之移動特性及各時段流量，應用統計分析方法並結合資料統計分析結果，找出影響行人移動行為選擇之相關因素，結合 Pipe's Theory 與第五代 GM 跟車模式，進而發展行人跟隨行為之模式。
4. 分析結果並比較：將研究所得資料分析，並提出對於未來行人設施之設計建議及行人研究之方向。

## 1.3 研究範圍與對象

由於本研究係研究人行設施上行人之特性及行為，以行人為主，不包括汽車、機車或腳踏車，主要觀察人行設施上之行人，故將針對「行人」進行研究，主要研究範圍在於行人通過具有專用時相號誌之行人穿越道時的跟隨行為模式及其特性。應用實地攝影調查，取得商業區交岔路口之行人樣本資料後，再利用統計分析方法找出影響行人決策之因子，並進一步預測行人對於不同情況其相對應的行為模式。

行人穿越道路的過程是一連續性行為，行人會依據當時不同的外在情況與內在心理因素的改變而連續不斷修正本身的行為，為因應此隨機的過程，本研究將不探討行人穿越道路時行為改變的情況，只考慮在跟隨行為發生後，行人與行人之間互動所產生的影響，且主要探討前方有行人之後方行人行為。

但由於研究經費與人力限制，研究地點將設置於商業區內行人流動量較高處以方便資料收集，其餘地區之研究則希望將來可繼續進行，取得資料以研討並分析各地行人之行為模式是否有差異。

## 1.4 研究方法

本研究將從既有之國內外文獻回顧與評析，建立研究之架構，資料之蒐集乃至於行人的特性分析。主要內容有以下三項，茲將內容分述如下：

1. 文獻評析法：為瞭解過去專家學者對於行人的研究以及行人行為之基本特性，本研究廣泛收集國內外人流相關文獻，並對文獻資料作深入的研讀與評析。
2. 攝影調查法：藉由錄影方式客觀且不影響被觀察行人之原則蒐集行人穿越行人穿越道時之跟隨行為的資料，並瞭解行人對於本身因素、外在環境因素以及行走時周圍行人的影響因素，再利用統計分析，確定各變數間的相關與其影響性。
3. 統計分析法：應用統計分析方法中成對 t 檢定、獨立 t 檢定、ANOVA 分析，將蒐集所得之行人跟隨行為相關資料進行分析與研究，以探討行人行為之特性。
4. 迴歸分析法：將觀察所得之行人資料，利用現有 Pipe 模式與 GM 模式，以迴歸分析探討適用於行人模式之參數，並建構線性行人跟隨行為模式與進行模式間之驗證與比較。

## 1.5 研究流程

依據前述研究動機、目的、對象、範圍等構思，本研究研議圖 1 之研究流程圖，而進行各項研究工作如下：

1. 確立研究方向與目的：

目前行人行為相關的研究不少，但行人的行為仍未有個確定的模型可以完整表達行人的行為。因此，本研究利用相關文獻、方法與行人調查而研析行人行為特性，進而以微觀角度來構建行人的跟隨模式，可供研究者及相關機構單位參考。

2. 文獻回顧與分析：

為瞭解過去專家學者對於行人的研究以及行人行為之基本特性，本研究廣泛收集國內外相關文獻，並對文獻資料作深入的研讀與評析，以期作為本研究理論基礎與研究方法之參考依據。

3. 界定研究範圍與對象：



經由文獻的回顧與整理，加深對於相關理論的瞭解，進而深入探討本研究之方向與目的，而能將研究範圍及研究的對象加以界定，由大範圍的行人型態，研擬一套能夠套用於個體行人身上的模式，若能夠確認則將使得研究更深入更具價值。因此，本研究將以商業區人行設施上之交叉路口行人穿越道為主要範圍，而以行人為對象。

#### 4. 引用理論基礎與研究方法：

依文獻回顧整理後所得之理論與方法，選擇使用適當之理論基礎，與相關應用分析研究方法，以做為後續研究、資料調查蒐集分析與模式構建之依據。本研究將引用攝影調查法、統計檢定等，進行變數相關檢定分析、建構模式與驗證。

#### 5. 調查蒐集行人資料：

選定符合欲研究之商業區人行設施後，在確認實驗錄影範圍後，進行實際攝影調查，再將所蒐集人流相關資料系統化整理統計並製表，利用統計分析與檢定方法加以驗證並予以歸類，以利於後續從事行人行為特性之研析。

#### 6. 建立國內都市商業區行人跟隨行為模式：

利用蒐集之行人流資料與相關文獻，將調查所得資料利用統計迴歸分析、模式參數估計與相關檢定，期望構建行人跟隨模式。

#### 7. 模式校估與驗證：

針對所構建之人流模式進行參數校估，並且蒐集符合研究範圍之新樣本資料對模式進行驗證之工作，以檢視模式本身之預測準確性，利用統計方法與相關性檢定來驗證其模式的正確度，並確認本研究的結果，更期待能夠符合行人流的狀況。

#### 8. 結論與建議：

綜合本研究所獲得之人流特性，進而提出結論與建議，以期望未來將可提供相關單位規劃改善人行設施與相關措施、控制策略之參考依據，並期望提供未來相關研究之參考，使國內對於行人流的研究、發展有更近一步的成果。

本研究流程如圖 1 所示：

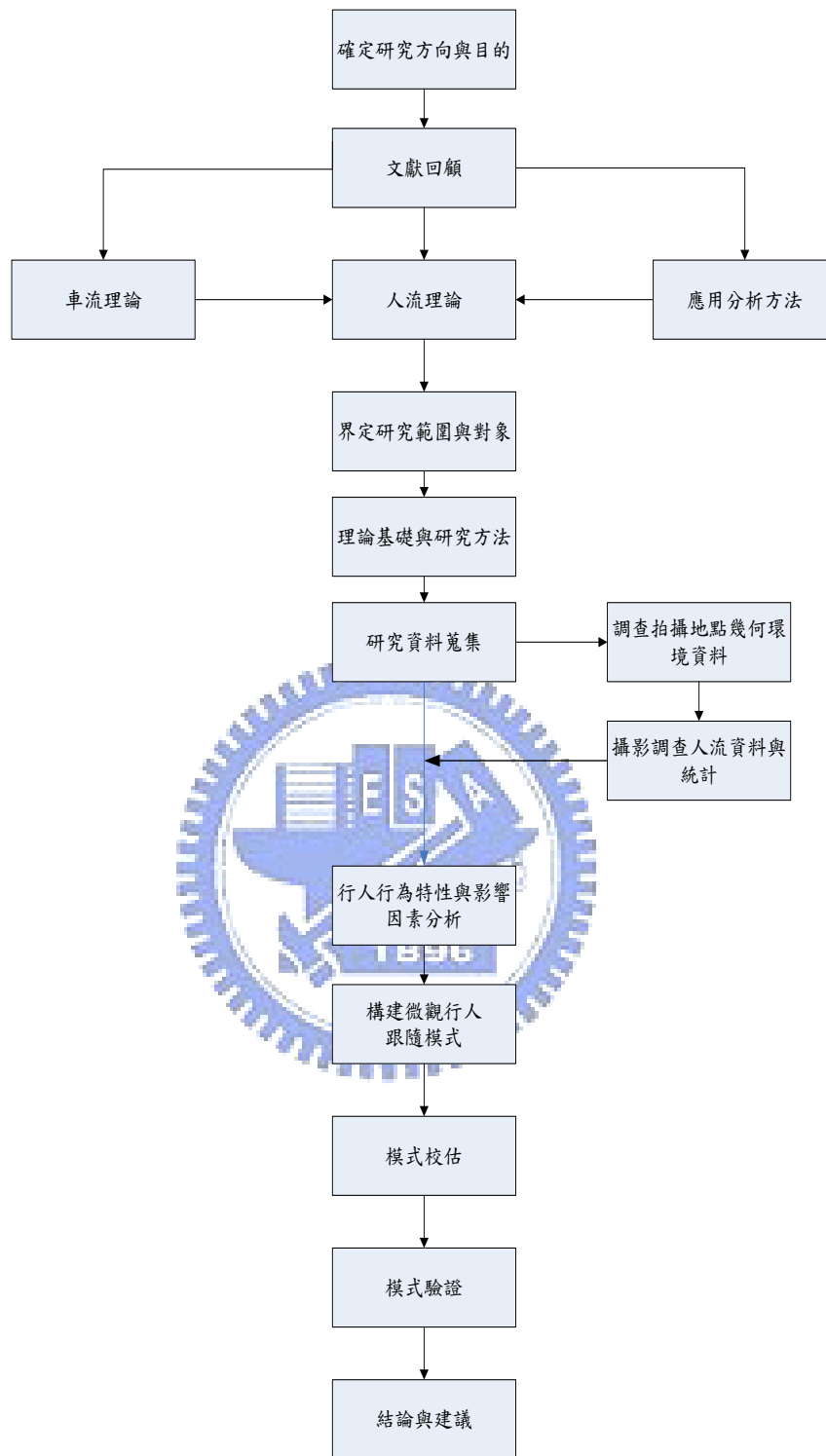


圖 1 研究流程圖



## 1.6 研究架構

本研究之主要研究架構，首先進行現場資料蒐集與後端數據分析，利用統計方法找出行人跟隨行為之特性。在模式構建方面，引用現有車流模式中 Pipe 模式與 GM 模式，套用行人資料以建立行人跟隨模式，再利用分析之特性結果，以線性複迴歸分析方法進行線性行人跟隨模式之構建。最後，針對構建之四組行人跟隨行為模式進行模式驗證，以檢視模式本身之預測適用性與準確率，並將四組行人跟隨行為模式之優劣順序進行比較。本研究架構圖如圖 2 所示：

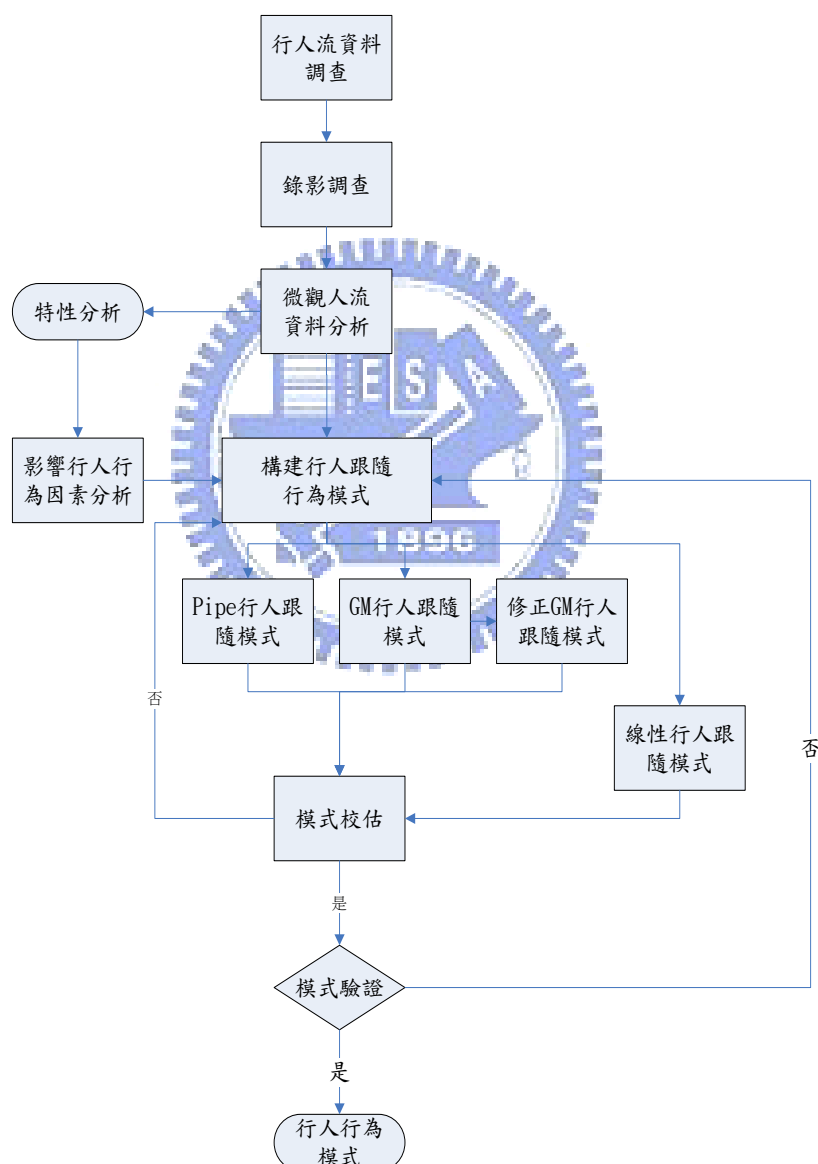


圖 2 研究架構圖

## 第二章 文獻回顧

本章將對於行人流相關文獻進行評析，首先對於有關行人流理論與環境設施之研究做一整理，再針對國內外有關行人行為特性之研究進行回顧與整理以瞭解目前於行人行為之研究方法、行人分析方式、探討影響行人流之因素及相關研究所使用之研究方法與結果，以作為本研究理論基礎與研究方法之參考依據。最後則對以上文獻做一統整研析。

### 2.1 人行空間

行人環境與場所是提供行人步行的空間及設施，本研究首先針對以往對人行設施進行研究的文獻，以及研究捷運車站行走環境的文獻進行回顧。

#### 2.1.1 人行步道

本研究主要針對行人步行設施進行研究，因此藉由相關對於人行步道的研究加強對行人之瞭解。

黎韋利[3]以類似車流理論為基礎利用密度、速度、流量等易於量化指標，界定人行道服務水準之方法，改變以行人主觀感受做為人行道服務水準評估之方法。並引入模糊理論，藉以處理此具有質化性質之主觀判斷與模糊問題的衡量，如此能有效且較為適切的描述，在處理方法上也較具有彈性與簡便，因此在衡量行人本身主觀感受之服務水準滿意程度的問題中，提供一個可行的方向。經實例驗證，以行人主觀感受為出發點之服務水準評估方法較傳統的評估方法更能真切反應行人之主觀認知感受。

黃俊杰[4]探討都市人行道介面組成型態對於行人知覺之影響，透過問卷和照片的訪談，調查台北市主要道路之戶外人行道空間介面型態與實質因子，以各種情境模擬因子透過實驗設計分析行人的知覺是否有交互影響，並對整體行人偏好提出預測模式。

林上閔[5]透過兩階段問卷調查方式，第一階段乃是以五等分態度量表萃取出受訪行人重視的步道屬性，第二階段則是採用敘述性偏好方法輔以照片說明屬性值定義與步道類型方案來陳述步道情境，讓受訪者填答喜好程度及第一第二偏好，再利用個體需求模式中的多項羅吉特模式與模糊修正模式來校估選擇模式。以探討出都市商業區行人對步道類型選擇偏好。

Mehammed S. Tarawneh [14]現場調查顯示，位於約旦穿越斑馬線上的行人通過速率與性別、年齡、人群大小、街道寬度有顯著之影響。調查得之平均行走速率為 1.34 公尺/秒。

1. 性別：男性行走平均速率（1.35 公尺/秒）略高於女性（1.33 公尺/秒）。
2. 年齡：21 至 30 歲之平均行走速率最快（1.49 公尺/秒），超過 65 歲平均行走速率最慢（1.17 公尺/秒）。
3. 人群大小：三人以上人群之行走速率慢於一個人或兩個人。
4. 街道寬度：行走在寬路幅的速率比窄路幅的速率快。

Abishai Polus 等[15]以現場錄影觀測分析以色列商業區的人行道上之行人特性，其中在 Solel Boneh 調查得男性平均速率為 1.28 公尺/秒，女性平均速率為 1.14 公尺/秒，且發現行走速率與密度呈現負斜率之直線關係，參數校估結果顯示以三區段的直線迴歸關係式較為適合，並依此建立人流之服務水準可做為規劃及設計參考。

李協政[6]選取台北市信義區商圈路口人行設施作為觀測地點，區分尖峰及離峰時段行人，參考引用車流相關理論及行人移動行為之相關文獻作為分析行人流動特性之依據。將行人行為細分為三類，超越前方行人、僅作橫向偏移與跟隨前方行人，考慮前後行人速度差異、跟隨間距、前方總瞬時密度、性別與性別異同等影響變因參數，構建判別函數與多項羅吉斯迴歸模式，用以解釋所觀察到之行為表現。結果發現，性別變數無論尖峰或離峰時段均不會影響行人行為，而性別異同變數僅在尖峰時段對於行人行為有顯著影響，且研究所構建之模式在判別分類以及行為預測上均可達 85%以上之整體準確率。

我國內政部營建署[13]所做之人行道研究，將行人通道服務水準之服務等級劃分如表 1：

表 1 行人通道服務水準分級表

服務水準	描述	行人佔有空間 (公尺 <sup>2</sup> /人)	行人平均速率 (公尺/秒)	行人流量 (人/公尺/分)	v/c
A	完全自由	>5.6	>1.30	<16	<0.21
B	偶受阻礙	3.7~5.6	1.27~1.30	16~23	0.21~0.31
C	受限制	2.2~3.7	1.22~1.27	23~33	0.31~0.44
D	中度擁擠	1.4~2.2	1.14~1.22	33~49	0.44~0.65
E	嚴重擁擠	0.75~1.4	0.75~1.14	49~75	0.65~1.0
F	塞滿人群	<0.75	<0.75	無數據	無數據

資料來源：內政部營建署[13]

## 2.1.2 捷運車站

許添本等[7]選定捷運台北車站內聯外通道，於擁擠時刻調查行人流動特性。調查方法乃是採用錄影調查法：使用錄影機將調查路段拍攝成錄影帶，配合 1/100 秒之計時器反覆觀察分析攝影畫面。錄影調查法的優點是可將調查現場畫面反覆觀察，並且可經由畫面定格器仔細分析每一時刻之行人之特性；而缺點是攝影機必須放置於適當位置，並且觀測物體會因攝影機之俯仰角度、高度而有觀測的誤差。

一般行人密度的量測乃是利用車流理論中  $Q=K*V$  的流量公式，經由觀測人流的流量及速率而推導得密度，而作者考慮到捷運車站乃是人潮大量聚集的公共場站必須維持人行動線的安全性、流暢性及便利性，因此期望透過直接觀測密度反映出行人流密度與流量的關係性。於是作者於捷運車站走道之參考線前後 0.5、1、2 公尺範圍內進行密度直接量測方式，並利用 Greenshield's 的速率與密度線性模式，最後推導出該走道單方向之流量。將此調查與各國資料進行比較，發現我國捷運車站之行人流密度較高且速度較快，顯得我國搭乘捷運旅客較外國乘客為急躁。

林廉凱[8]針對捷運車站通道動線干擾問題，以忠孝復興站走道為分析對象，採用巨觀與微觀尺度建立面積法、帶寬法與刺激與反應等分析方法，並配合現場觀測與錄影觀察方法進行分析，得到結果：乘客受到干擾後所採取的趨避方式主要有二：改變行走方向及調整步伐速率，而當走道上密度較高時，「跟人行為」較為明顯，而可適用於  $Q=K*V$  的流量公式；但當密度未達一定的水準時，跟人行為並不明顯，且乘客與乘客的趨避行為可視為一連串的刺激與反應的調整適應行為。

William H.K. Lam [16] [17] 依各場所如號誌化路口、輕軌車站(LRT)之交叉路口、廣九鐵路(KCR)車站、捷運車站(MRT)等人行設施進行人行流特性蒐集與分析。採用錄影蒐集法及現場計數方式調查，並對於行人進行提問。分析結果顯示：

1. 行走距離：搭乘 KCR 車站乘客行走距離較 LRT 及 MRT 乘客為長。原因乃是 KCR 車站為市郊與都市之鐵路運輸，服務站距較長。
2. 行走速率：行人在室外的行走速率明顯高於室內。而在號誌化交叉路口，行人紅燈穿越較在綠燈行走速率為快。

速率與密度之關係：在室內適合採用線性的 Greenshield's model；室外則適用 Underwood's model；交叉路口適用 Bell's model；LRT 之交叉路口則適用 Underwood's model。作者說明沒有一種單一模式可以適合所有人行設施，而必須更廣泛蒐集更多資料以建立完整的模式。

美國HCM2000 定義每單位寬度行人流量是指單位時間與單位距離內所通過的行人數量，通常以人/分/公尺(p/min/m)為單位。行人密度是指在每單位人行道或排隊地區的平均行人數量，以每平方公尺多少行人表示(p/m<sup>2</sup>)。與車流一樣，流量、密度與速度存在以下關係：

$$V_{ped} = S_{ped} * D_{ped}$$

其中  $V_{ped}$  為流量，  
 $S_{ped}$  為行人速度，  
 $D_{ped}$  為行人密度。

行人步道的概念被用來分析行人流量，與分析高速公路流量類似。然而步道的概念不應該被用在行人分析，因為研究顯示行人並不會走在有組織的路上。為了避免干擾，美國 HCM2000 指出當兩個行人面對面經過時，每個人至少要有 0.8 公尺的走道寬度。而側身行走的情形只有在最擁擠的情況下產生。

## 2.2 行人行為特性

交通模型的研究往往忽略行人的因素，但是行人會對於交通狀況有所影響，行人的行為有哪些特性，以及哪些因素會影響行人做出選擇，則少有相關研究，大多數對於行人的研究分為兩類：影響行人的外在因素研究，與行人行為模擬分析。因此本研究首先回顧一般影響行人行為之因素研究與人流理論，第二部分則回顧現有電腦模擬行人模式。

### 2.2.1 影響行為因素觀測文獻

Muhammad and Robert[18]對於行人的速度選擇模式進行分析，發現有一些重要的參數會對行人選擇行為有很大的影響，其中像是速度、交通號誌、與旁人可容忍的間距，以及 QKV 之間的關係圖。因為行人可以擁有很大的自由，像是可選擇的路徑很多，受到的範圍限制也不大，甚至行走的方向、從何處開始行走、要走哪一邊，在在都顯示出行人選擇的自由度很高，同時也與行人本身遵守交通規則的程度有關連。

Alexandra Wills[19]指出行人的個體偏好，如：速度、距離、位置，會被本身的個性、現場的情況，以及外在的環境所影響，而且行人極可能會被社會力量（與附近的行人）所影響而導致本身去選擇當時最理想的路程來到達目的地。並在其研究中發現，年紀、性別、移動能力、團體大小、一天中不同時間，以及不同地點，會對行人移動特性造成顯著的影響。該學者也說明，為了成為一個好的、有價值的預測工具，模式的本身必須要能模擬出現實的行為。



溫日宏[9]指出，行人步行行為具有下列特性：

1. 係靠雙腳進行位移，其移動速度皆較其他運具慢。
2. 肉體無法與剛性物體相抗衡，故需有行人保護設施。
3. 人體受體力限制，步行距離較短。
4. 行人特性複雜，行為難以預料。
5. 行人體力有限，不喜歡走上、下較高的坡度。
6. 行人交通屬短程移動，活動地點集中在較小地區。
7. 行人年齡會影響交通安全，小孩行走漫不經心，老年者則行動緩慢。

行人在步行過程中追求的是一舒適的感受（即不受阻礙、自由選擇行走速率及方向），此涉及人的尺度、人體所佔的空間大小及人與人間的距離等因素。根據Koichi Tonuma的觀念，人類以自身的軀體、感官、知覺所發展出來的一種與自然界和諧相處的衡量系統，亦是一種心靈的及實體感知的價值系統。其中實體感知方面，實際設計與評估屬於較容易量度的部分有四種尺度：

1. 以人軀體當作衡量的尺度，主要是人的坐、站立所佔有的空間，稱為軀體尺度（body scale）。
2. 以人的步伐當作衡量的尺度，以東方人而言，大步伐約為 0.91 公尺，小步伐約為 0.61 公尺。
3. 以人的感官之知覺距離作為衡量尺度，及利用人體的眼、耳、鼻等感官所測得的資料。
4. 以人體的生存空間或生理時鐘當做衡量的尺度。

一個人站立所佔有的空間約為肩寬 60 公分、體厚 45 公分，與 Fruin[20]所提出的橢圓形身體尺寸相近。當行人身體接觸時，每人約佔 0.3 平方公尺；而身體不接觸時，每人則佔有 0.7 平方公尺；當行人欲從人行中穿越時，依其通行順利與否，分別為 1.0 平方公尺與 1.3 平方公尺。

Hall[21]提到人與人的距離可以分為密接距離、個人距離、社會距離、公眾距離（見表 2）。當行人行走時會與他人及周圍障礙物保持 30-45 公分的自衛距離，因此步道寬度設計上必須滿足人體空間與人與人保持的距離之基本條件。

表 2 人與人空間距離特性

人與人距離	長度(m)	特性
密接距離	0.2 以下	人與人接觸，感觸對方熱氣
個人距離	0.7 ~ 1.2	伸手可處及對方
社會距離	1.2 ~ 3.7	伸手無法觸及對方
公眾距離	3.7 以上	行人遇危急時，所需預防或避難空間

資料來源：Hall[21]

Teknomo[22]建構一微觀人流之模式，模式中每個行人都視為單獨且自主的個體，可自由選擇路線與設施(參見圖 3)，每位行人的範圍則設為一直徑 50-90cm 的圓，並有其起始位置、起始時間、起始速率，可隨機選擇做為輸入。系統中每個行人都會受到兩種外力影響，一為同向前進的力，另一則為互斥力，當系統中有二個以上之行人時，兩力中的同向力會與互斥力同時發生。一力會驅使行人前進，而另一力則會與周遭的其它行人產生強大互斥，第一種互斥力表示行人間相遇與超越追趕之行為。

單一人行道之一般模式如下：

$$m \frac{d^2 p_i(t)}{dt^2} + \frac{d p_i(t)}{dt} = \mu_{\max} \left\{ \frac{e(t) - p_i(t)}{\alpha \|e(t) - p_i(t)\|} + \frac{2r - y(t)}{x \|p_k(t) - p_i(t)\|} + \sum_j \left( \frac{2r}{\|p_j(t) - p_i(t)\|} - 1 \right) \left( \frac{p_j(t) - p_i(t)}{\beta \|p_j(t) - p_i(t)\|} \right) \right\}$$

其中  $y$  代表其他行人侵入鄰近範圍之行為， $r$  則為行人之影響半徑。

模式中等號右邊的第一部份表示向前推動，第二部份則為避免碰撞而向其他方向移動，以保持兩靠近的行人間之距離，第三部份可保證無重疊的情況發生。模式中的四個參數包括： $m, \alpha, \beta, \chi$ ，其中  $m$  是供當其他三個參數僅應用於個別的力時，予以將三力結合一起。

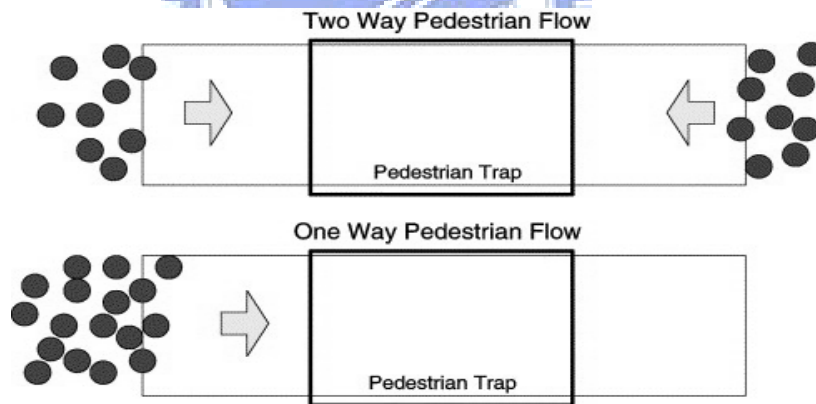


圖 3 單向雙向人流示意圖[22]

Hoogendoorn, Bovy, Daamen[23]對於行人行為的過程分成三個等級，策劃 (Strategic)、戰術 (Tactical)、運作 (Operation)。在策劃的時期，行人會決定要採取什麼樣的行為以及要不要採取這個行為；在第二階段，行人會根據上一階段的策略做短期的決定，決定這個行為該從那裡做、路徑的選擇，並且可以回饋給第一階段再重新策劃，是屬於雙向的溝通。第三階段則是選擇要走或是等，速度或快或慢。根據這三個階段的作用決定行人為什麼選擇該時間的行為。該三階段示意圖如圖 4。

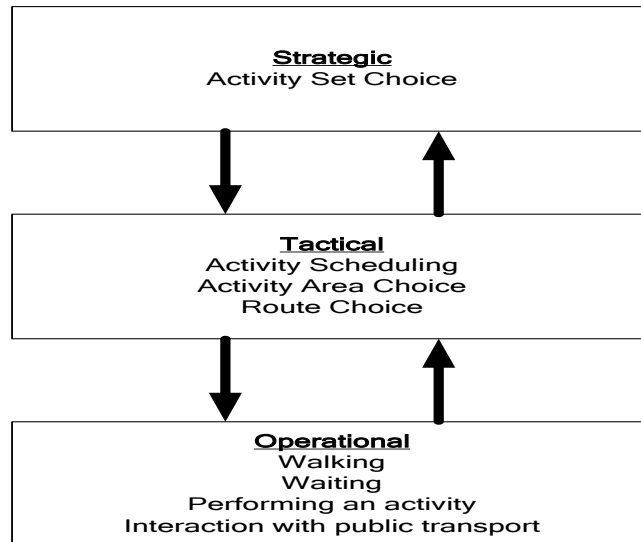


圖 4 行為決策流程圖

資料來源：Hoogendoorn, Bovy, Daamen[23]

Inger and Gitte[24]於研究中以年紀與性別來研究行人行為特性，利用問卷調查所得資料以卡方檢定來分析，發現老年人在穿越較寬的道路會比較困難，因為他們需要更多的時間與注意力來對於各種方向的狀況進行掌握，所以年紀越大人其行為動作會越慢，反應時間較久，對交通有一定程度的影響。

行人速度是平均行人行走速度，一般以每秒多少公尺(m/s)為單位。行人步行速率受許多因素影響，例如年齡、健康情形、障礙物之存在、交通設施之性質、行人密度等。丁育群[10]指出行人於自然情形下，易受下列因素影響：

1. 環境條件：季節、時間、週遭環境(步道長度、寬度)...
2. 生理條件：性別、健康、年齡...
3. 服裝：行李、穿著...
4. 心理條件：旅次目的、環境對心理的影響...

Hoogendoorn and Bovy[25]認為步行旅次與其他種類旅次存在很大的不同，所以需要發展專用的理論基礎與模型工具來研究在步行設施上的行人行為。行人在公共區域的移動自由幾近無限，也就是可供選擇的路線有無限多條，此時一般網路模式將會較不適合應用於行人的路線選擇。應該利用以行為為基礎的模式會較能符合現實情況。但是這個模式無法將行人的行為考慮進來，並假設行人會優先考量本身的行程，以不耽誤為準。選擇過程中會被外部和內部因素所影響，外在因素包括設施的設置、交通量、天氣、周邊環境等；內部因素則有行人本身的特性像是性別、年紀、時間壓力、旅次目的等。

Yordphol Tanaboriboon[26]採用錄影調查方式，調查主要行人集中道路的人行道、走道等設施，進行行人行走速率、流量及密度關係之研究。同樣採用



Greenshield's 的速率與密度線性迴歸模式，求出流量與密度之關係式。作者在分析過程中將行人以性別、年齡予以分群，發現男人較女人行走速率每分鐘快 10 公尺而年輕人較老人快 20 公尺。並將調查結果與西方國家比較發現，新加坡人行走速率較西方人為慢但最大流量則較為高。

### 2.2.2 行為模擬分析文獻

行人的行為模式是一個很複雜的課題，都市交通規劃者對於行人在與其他人步行的同時會有怎麼樣的影響、行人如何決定要不要穿越道路、如何決定本身的速度，很有興趣，但是還沒有一個非常理想的方法可以完全解決這些問題。隨著電腦科技的發達，模擬技術已經能夠將周遭環境的因子輸入模式中，並且模擬出符合現實行人步行情景。一些比較常用的模型有：以二維座標將行人行為利用質點或是圓形表現的模式、擁擠的行人移動以流體來呈現、應用細胞自動機

(Cellular Automata, CA) 等模型。茲將現有模型應用於模擬行人的移動整理如表 3：

表 3 應用行人模擬法簡表

提出學者	年代	模式名稱或特性	
Helbing & Molnar	1995	利用社會力量模型將行人以二維空間中的質點或圓圈表示其行為特性。	
Werner & Helbing	2003		
Seyfried et al.	2006		
Henderson	1974	將行人擁擠的移動過程以流體的方式來比喻及分析。	
Helbing	1992		
Hughes	2003		
Brichall <i>et al.</i>	1994	PAXPORT	應用 CA 及 Agent-based 開發之商用行人模擬程式。
Maw & Dix	1990	PEDROUTE	
Still	2000	LEGION	
Kerridge <i>et al.</i>	2001	PEDFLOW	
Daamen	2004	SIMPED	
Teknomo	2006	MPSM	

資料來源：本研究整理

Motoharu Hosoi[28]建立行人之動態模式，假設人之行為乃非隨機過程而是確定性過程，有著相同的行為機制，只是隨著個人之不同有著不同的參數。分別描述行人之趨避行為、跟隨行為、轉彎行為、靜止行為模式而進行模擬方法。最後進行模擬行人於轉角與通道突縮的行人設施時之行為表現。

Weng, Shen, Fan[29]等人提出一行為基準模型可以適用在行進中的行人，假設行人有三種基本行為：移動 (Move)，避免 (Avoid)，打旋 (Swirl) 如下圖 5 所示。步行的方向決定於走路權重，利用基本行為與權重比率的乘積加總而得。此模型可以模擬根據不斷更新的時間間隔所對應的行人速度來模擬行人的移動。本模型是利用二維框架內之氣體模型來模擬行人流，當行人前進方向無障礙，此時即為基本行為中的「移動」；當行人的動線上有其他行人阻擋，會選擇避開，此時即為基本行為中的「避免」；當行人前進遇到反向前進的行人，或是前方同向行人的速度較慢，為了避免碰撞，會選擇避開或是超越，此為基本行為中的「打旋」。但是當行人遇到前方行人與自己有同樣速度與方向時，行人將選擇排隊在後面而不會超越。而本模型行人之移動只有四個方向，根據上述假設，行人的行為會以三大基本行為做加權，取四個方向中加權數值最大的，從而決定下一個時間點移動的方向，當加權後對四各方向的數值為零，則行人不會移動。

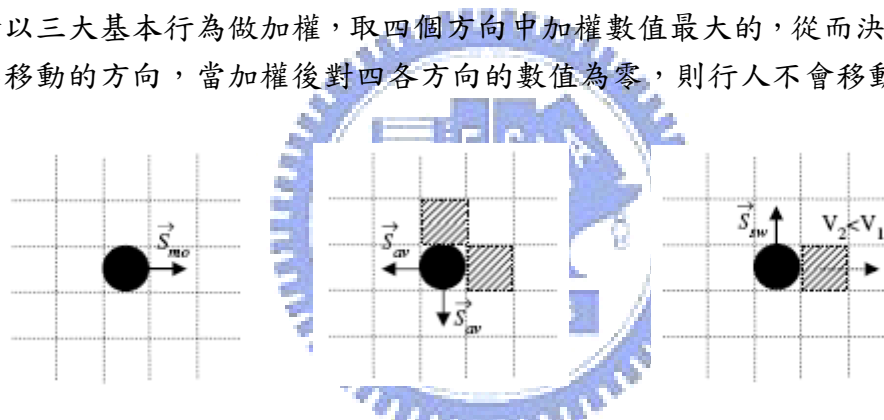


圖 5 Move、Avoid、Swirl 示意圖[29]

Armin[30]對行人流動提出一個修正的模擬模式保證不會發生預期速度為負值的情況，並且行人的行為只會直接被前面一個行人的行為所影響。同時可以再生出巨觀下正確的密度和速度，但卻不必然能夠正確地描述微觀的情形，並且也發現到在平均速度下行人的空間需求比平均空間需求少許多，這個現象解釋為模式的「短視」(short-sighting)，因為行人不只有對前面的人立刻適應速度，同時也對更前面的情形做適應。

D. Helbing, P. Molnar, F. Schweitzer[32]利用模擬找出行人於擁擠時的動態行為，假設有一無形的社會力量會在行人與行人之間產生加速力與排斥力，透過錄影來與模擬結果進行比較分析，發現行人之間會有一種自我組織的現象。Helbing & Molnar[33]認為行人的移動可以描述為有一社會力來推動，而這種社會力量不是直接表現在行人的特質上而是要從行人之間互動行為之中量測而得。主要有三種表現：加速至超越前方行人，與前方行人保持一固定距離，吸引效果的表現。並成功利用模擬表現出行人於同向走道步行的行為，以及在一個狹窄走道上的行

為。圖 6 為模擬行人於走道上會產生同方向的自我組織行為。

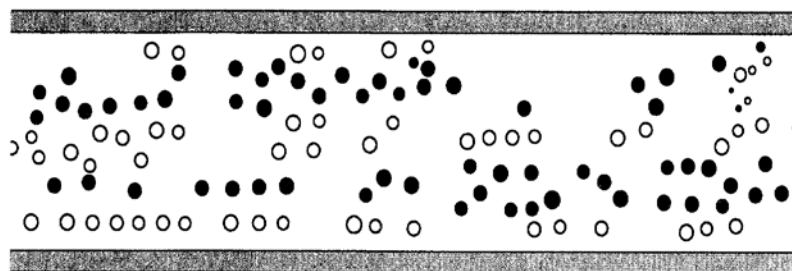


圖 6 模擬行人自我組織圖[33]

Kerridge *et al.*[34]因應對行人研究所需要的模擬工具，提出一個模擬行為微觀行為的模型稱為 PEDFLOW，利用混合模擬方法，該模型將每個行人當成一個代理，並可以自己決定下一步，這個界面是建立於 JAVA 平台，提供很良善的使用界面，並且期望可以做為都市規劃者用來評估建設的工具，以改進都會區行人步行環境。

鍾隆文[11]藉由視覺影像處理及二維向量分析的概念，探討行人偵測及行人模擬的方法。行人偵測方面依偵測的目的不同有以下三種分別：基本偵測方法，例如行人流量、速度、密度的偵測；輔助偵測方法，如行人趨勢、及行人頻率偵測；面式偵測方法，如行人軌跡的偵測。行人模擬方面則因行人的行進方式傾向面式二維的移動，無法以傳統車流模擬方法建立模擬系統，而為解決此困難，作者則採用向量分析分別依無干擾行動模式、有設施的干擾行動模式、有行人的干擾模式等三種形式建立二維行人模擬模式。而利用行人偵測所得的面式資料進行二維模擬模式驗證，並利用個人電腦動畫表現行人模擬系統的成果。

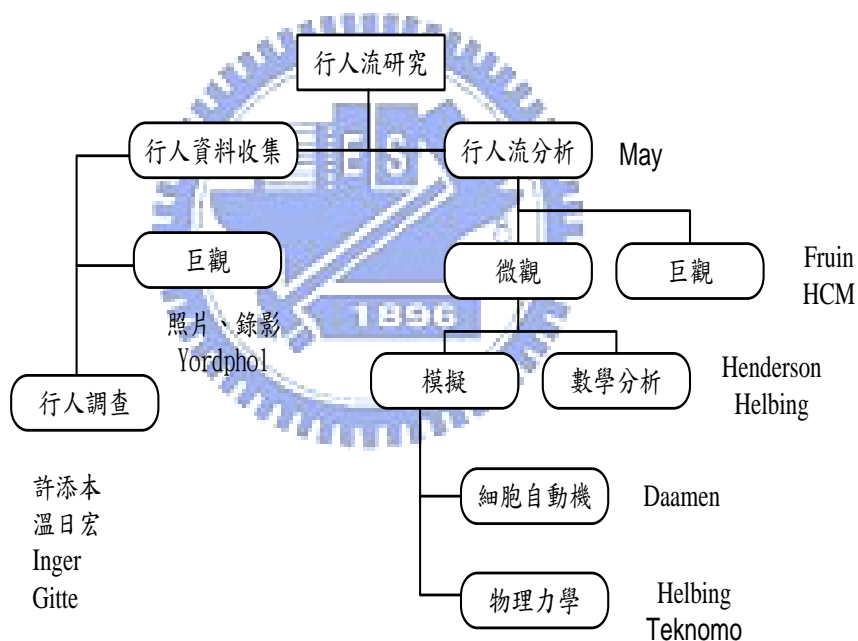
V.J. Blue[35]則以細胞自動機模式來說明行人的移動模式，作者的方法是將行人的行走路徑模式分割為「跳」格子連貫動作，而在「跳」下一個格子的每一步都會遵守遊戲規則（Rule Set），如選擇路線最短及避免與他人碰撞。這樣的行人流模式已被廣泛應用於大的開放空間，如巴士場站、購物中心、辦公大廳等具有衝突性干擾移動的高容量場所。細胞格狀體透過個別的行爲規則提供了重現個別行人詭譎多變的渾沌現象的可能性。藉由以極短時間片段（short-term time step）為一個階段，描述每個個體（entity）如同在西洋棋盤的平面空間中的格子移動，而每個個體在移動下一步的格子時，因為個體與個體間有局部法則的規定限制而具有邏輯的判斷如何去移動下一步的能力。因此可以根據每個個案的背景及地點的幾何關係不同，清楚描述出個別行人與個別行人的行為與互動關係。而根據這些局部法則讓每個模擬個體都像真正的行人一樣，可以隨性的變換行走速率以及經常性的加減速。因此藉由 CA 模式可以模擬行人行走的情況。

Masakuni Muramatsu[36]以格子狀氣體模式（lattice gas model）模仿一

左、右對向人行流在通道上的行為表現，其中每個行走個體可以有向前、及左右等三個方向的行進路線，而模型由自由流動的低密度狀態到行走停滯的高密度狀態，觀察整個動態擁塞的發生之時間序列。發現當密度達到一臨界密度(Critical Density)，行走速度發生劇烈的陡降，很快的速度即成為零，而空間佔有率(Occupancy)也於同時陡昇至飽和。

### 2.3 綜合評析

總結回顧之文獻，不難發現，對於行人的研究也分為巨觀與微觀兩大類，與車流理論的研究相似，其中巨觀人流的研究多數以錄影資料及問卷調查為收集資料的手段；微觀人流研究則發展為模擬模式以取代數學分析的研究。本研究參考Teknomo[27]學者的研究繪製行人研究發展歷程圖如圖 7，可更清楚瞭解過去及目前學者們對行人研究的貢獻。



(資料來源：本研究整理)

圖 7 行人研究發展歷程圖

綜觀國內外研究行人的文獻，可以發現從最早的 Fruin 學者即開始著手行人流之研究，之後陸續如 Henderson、Helbing、Hoogendoorn、Teknomo 等學者的研究，使得行人流這門學問逐步完善。多數研究都採用錄影調查法收集行人的資料，再將所得之影像資料輸入至軟體以模擬分析行人步行之特性，根據這些研究

已經發展出許多行人步行模式，對於行人隨機的步行已有不錯的應用成果。我國亦為一人口密度高的島國，也極易產生與行人相關的問題，我國學者許添本、吳水威等均有涉略行人流方面之相關研究。綜合上述文獻，發現目前研究多將焦點放置於巨觀行人流，從微觀角度細看行人流之相關文獻則為近年研究主題，因此，本研究將以攝影調查方式取得相關人流特性變數，從微觀角度切入探討行人於人行設施上移動之跟隨行為。

表 4 歷年相關人流文獻比較表

年代	作者	方法	方法概述	優缺點及貢獻
1971	L.F. Henderson	流體或氣體力學	行人個體比擬為氣體或流體粒子，控制粒子速度和數量，以及幾何空間的容量和形狀，並利用物理方程式來表現系統內的移動，以模擬行人流和幾何空間的關係。	缺點在於，氣體粒子與行人個體間在『認知』程度上有所差別，例如行人會採取減速措施以避免碰撞，但氣體粒子會直接碰撞，而且流體動力方程式多為偏微分方程式，通常難以得到精確解，應用不易。
1986	Yordphol	錄影調查	調查新加坡主要行人集中道路的人行道、走道等設施，進行行人行走速率、流量及密度關係之研究。	採用 Green shields 的速率與密度線性迴歸模式，求出流量與密度之關係式，並將調查結果與西方國家比較。
1997	V.J. Blue	細胞格狀體 (Cellular Automata, CA)	將行人的行走路徑模式分割為「跳」格子連貫動作，而在「跳」下一個格子的每一步都會遵守遊戲規則。	可以根據每個個案的背景及地點的幾何關係不同，清楚描述出個別行人與個別行人的行為與互動關係。
1997	林上閔	二階段問卷調查、多向羅吉特模式、模糊理論	第一階段是以五等分態度量表萃取受訪行人重視的步道屬性，第二階段則是採用敘述性偏好方法輔以照片說明屬性值定義與步道類型方案來陳述步道情境。	利用個體需求模式中的多項羅吉特模式與模糊修正模式來校估選擇模式。以探討出都市商業區行人對步道類型選擇偏好。
2000	許添本	錄影調查	使用錄影機將調查路段拍攝成錄影帶，配合 1/100 秒之計時器反覆	利用 Green shields 的速率與密度線性模式，推導出捷運車站內走道單方向之流



			觀察分析攝影畫面。	量，並將此調查與各國資料進行比較。
2002	Takashi Nagatani	隨機偏向行人 格狀氣體模型 (lattice-gas model of biased-random walkers)	以類似粒子碰撞的方 式作 CA 模擬，模仿 左、右對向人行流在通 道上的行為表現，其中 每個行走個體可以有 向前、及上下等三個方 向的行進路線。	模擬的行為者規則都很簡 化，而模型由自由流動的低 密度狀態到行走停滯的高 密度狀態，發現當密度達到 一臨界密度會出現壅塞轉 換過程。
2002	林廉凱	錄影調查、面 積法、帶寬法	以忠孝復興站走道為 分析對象，採用巨觀與 微觀尺度建立面積 法、帶寬法。	乘客受到干擾後所採取的 趨避方式主要有二：改變行 走方向及調整步伐速率，而 當走道上密度較高時，「跟 人行為」較為明顯，而可適 用於 $Q=K*V$ 的流量公式； 但當密度未達一定的水準 時，跟人行為並不明顯。
2003	陳文彬	問卷調查、灰 色理論、層級 分析法	以「節點(公共設施)、 節線(通道、路徑標 示)」的網路概念，探 討乘客於地下車站接 受一連串動線服務設 施的績效。	以滿意度分析進行綜合評 估。最後並以台北火車站、 捷運公館站兩種不同類型 車站做比較驗證其實用 性，結果顯示在不同特性的 車站，乘客所重視的指標屬 性皆不同。
2006	W.G. Weng	基本行為人格 氣體模型 (behavior-based lattice-gas model)	假設行人三種獨立之 基本行為並以類似氣 體碰撞的方式作模 擬，利用加權計算基本 行為產生最終移動方 向。	加入行人基本行為並利用 不同權重模擬行人流動的 方向，可能會出現行人向反 方向移動的問題。
2007	李協政	錄影調查、羅 吉特模型	利用多項羅吉特建立 行人行為選擇模式。	將行人分為跟隨、超越及橫 移三類，並建立行人之選擇 模式，發現預測率達 85% 以 上。

資料來源：本研究整理

## 第三章 理論基礎與研究方法

本研究係以商業區人行系統行人流動特性研析與模式建立，並期望構建其微觀模式，故本研究將依微觀人流理論、行人跟隨行為作為理論基礎，再依文獻評析、攝影調查、統計迴歸分析，作為本研究之研究方法，本研究可能將引用之各項理論基礎與研究方法說明如下：

### 3.1 理論基礎

#### 3.1.1 車流理論

由於本研究係以人流為研究主體，Fang[31]等提出，行人的移動比車流更複雜而且更有彈性，但是有一些模式可用來模擬雙向行人流動。所以本研究認為車流與人流有類似之處，故車流理論將可提供研究之參考；因相關人流理論藉由車流理論之基礎以發展，故先對於跟車理論相關文獻進行回顧。一般對模擬車流之對象區分，則可分為三種：1.微觀車流；2.介觀車流；3.巨觀車流。三種層次分述如下：

##### 1. 微觀車流(Microscopic traffic flow)

其主要係以個別車輛其相互運作與影響之關係為研究之方向，其處理過程較為複雜，且較不易模擬較大型之網路，但可細部探討個別車輛運作之影響因素分析。

##### 2. 介觀車流(Mesosopic traffic flow)

其主要係以車隊之形式為研究之方向，使用調查資料之平均數值作為描述車流行為之特性，將可避免車輛間複雜的相互運作與影響，即不處理車輛間相互干擾等複雜因素，進而達到節省時間之效用，亦可用於較大型之網路。

##### 3. 巨觀車流(Macroscopic traffic flow)

其主要係以整體之車流狀況為其研究之方向，透過流量(Q)、密度(K)與速率(V)三項指標作為其基本指標，其並不針對個別車輛間之行為運作與影響做描述。

#### 3.1.2 跟車理論

所謂跟車(Car Following) 係描述在道路上行駛車輛間的相互關係，是為研究

後車如何跟隨前車的行為。假設前車和跟隨車輛在行駛過程中，不斷地調整其行車速率及間距，使其維持一安全距離，以便在發生突發事件時，後車能夠及時煞停而不致於與前車碰撞的動態行為，故跟車理論主要是研究當跟車行為發生時，前後車間速度(speed)、車間距(spacing)和加減速(acceleration and deceleration)等的互動關係。跟車理論是以模擬流體力學之理論，考慮流體在管道中之流動，其質點一個接一個，且一個影響著一個，也就是說每一個運動質點緊跟著前一個質點而以其與前一質點之特性而決定其運動方式，故其基本假設為下列數點：

1. 單一車道：以達管流之要求
2. 不准超車：需一部車尾隨一部車
3. 高密度：間距能發揮影響效果，及車與車間能有受激反應之相互作用
4. 密度在小時段變化不大，以其均值代表此時段之密度
5. 速度在連續小車隊間變化不大，以其均值代表此小車隊之速度

而依據模式建構的理念不同，共分為四種：四大限制方程式、刺激-反應方程式、行為門檻模式、以及應用物理學理論所建構之模式。

基於如上假設，考慮第  $n+1$  部車尾隨第  $n$  部車行駛，如圖 8。當車輛行駛過程中會受到所跟隨前車不同車種特性之影響，而致使駕駛人觀感上之差異。假設行人於行走過程中，與車輛跟車行為相似，若人潮洶湧無法任意依本身喜好速度行走時，必須受限於週遭環境，跟隨前方行人移動，並且可能依前方行人行走特性而決定其下一時刻之行為。

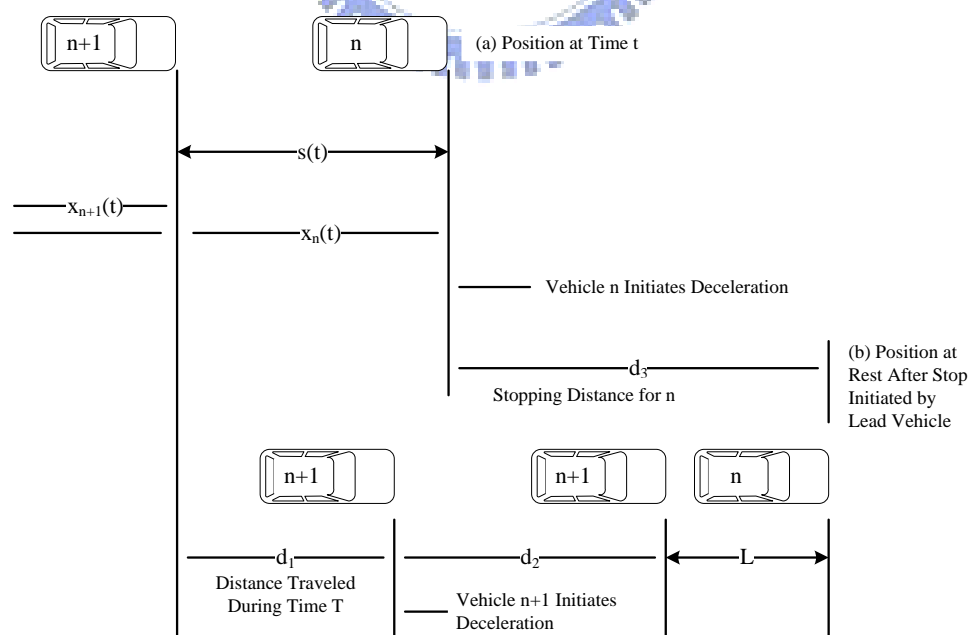


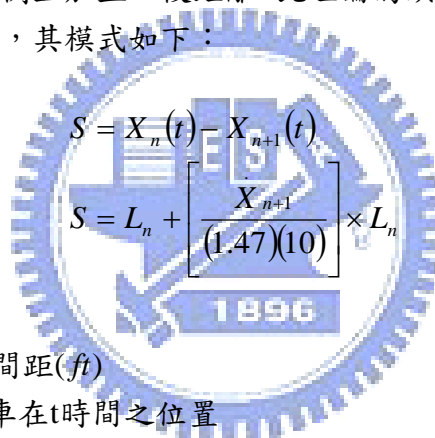
圖 8 跟車模式示意圖 [37]



車輛前進時，後面的車輛通常不會落後前方車輛太多，而會跟隨著前車保持一段距離，此為跟隨條件。若以安全角度考慮，當後車的車速長時間大於前車則會與前車產生碰撞，因此後車的速度通常是在前車車速的範圍內做加減速的動作，稱此為車速條件。而如同前面的跟隨條件，後車在跟隨前車時通常會和前車保持一段認知的安全距離，稱為距離條件。因此所謂的牽制性就是指在跟隨條件的情形下，車速條件和距離條件構成了跟車行駛時的牽制，亦即前車的車速牽制著後車的車速及兩車的距離。跟車時，須經常調整其行車速度以便和前車保持一安全車間距離的動態行為。而此觀念乃建立於「刺激－反應」之基礎上，故出現了所謂的「刺激－反應方程式」。

### 3.1.2.1 Pipe's Theory

Pipe首先將運動中車輛之間的關係公式化，其以安全距離的觀念來表示後車的車速與前車間距離的關係，假設每一位駕駛者與前行車輛維持的空間與後車的速度成比例且加上一段距離，此理論的缺點為在低速與高速情況下會出現低估的現象，其模式如下：



$$S = X_n(t) - X_{n+1}(t)$$

$$S = L_n + \left[ \frac{X_{n+1}}{(1.47)(10)} \right] \times L_n$$

$S$ ：前後車間距( $ft$ )

$X_n(t)$ ：第 $n$ 車在 $t$ 時間之位置

$X_{n+1}(t)$ ：第 $n+1$ 車在 $t$ 時間之位置

其中， $X_{n+1}$ ：第 $n+1$ 車在 $t$ 時間之速度( $nph$ )

$L_n$ ：車長( $ft$ )

數值(1.47)：單位轉換值

數值(10)：每10mph就要有一台車身之安全距離

### 3.1.2.2 GM model

美國通用汽車研究群(GM group)利用統計方法，由現場調查資料來建立 $m, l$ 矩陣來建立刺激-反應方程式，五代模式繼續改進而將敏感項一般化，將跟車者速度與距離間距改為指數型態，模式在引入 $m$ 與 $l$ 兩個指數後變為微觀跟車理論通式，其通式如下：

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha [V_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{\Delta S^l} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$$

$a_{n+1}(t + \Delta t)$ : 車輛 $\Delta t$ 秒後之加速率

$V_{n+1}(t + \Delta t)$ : 車輛 $\Delta t$ 秒後之速率

$[V_n(t) - V_{n+1}(t)]$ : 車輛與前車之速率差

其中， $\Delta S$ : 前後車間距

$\alpha$ : 跟車敏感度參數

$m$ : 後車對速度反應之敏感度參數

$l$ : 後車對車間距反應之敏感度參數

GM 第五代跟車模式特性有四：

1. 將敏感度參數一般化，將後車速度和前、後車間距以指數型態表示。
2. 第五代模式為GM 跟車模式的通式，其第一至四代皆為第五代模式的特例。
3. 若將其GM 每代跟車模式的 $m, l$  值彙整，則有以下結論：
  - (1) 當 $m = 0, l = 0$  可將GM 第五代跟車模式轉換成GM 第一及第二代模式。
  - (2) 當 $m = 0, l = 1$  可將GM 第五代跟車模式轉換成GM 第三代跟車模式。
  - (3) 當 $m = 1, l = 1$  可將GM 第五代跟車模式轉換成GM 第四代跟車模式。
4. 當 $m = 0, l = 0$  時，敏感度參數為常數； $m = 0, l \neq 0$ 時，會受到前、後車間距的影響； $m \neq 0, l = 0$ ，會受到反應時間後，後車速度的影響； $m \neq 0, l \neq 0$ 時，表示會同時受到前、後車間距及反應時間後，後車速度的影響。

### 3.1.3 人流理論

#### 3.1.3.1 巨觀人流理論

美國 HCM2000 引用了 Fruin、Oeding、Navin and Wheeler 與 Pushkarev and Zupan 的研究，將人流特性中的流量、速度、密度之間的關係繪製出比較圖，以下逐一說明：

#### 1. 速度-密度關係

介於行人流速度與密度及流量的基本關係與車流相似。當流量與密度增加時，行人速度降低。當密度增加與行人空間減少時，行人個體的移動力程度降低，即行人平均速度降低。圖 9 顯示學生、通勤者與購物者三種行人的速度與密度關係。

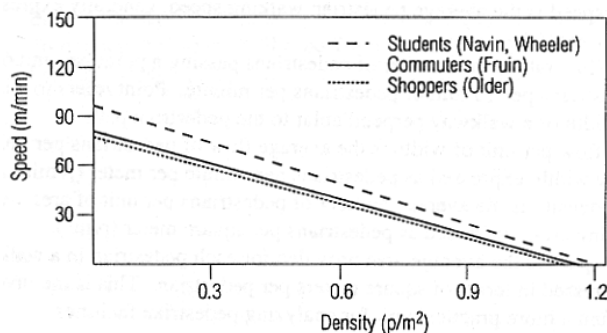


圖 9 行人速度與密度關係圖

資料來源[38]

## 2. 流量-密度關係

由於人流與車流類似，流量、密度與速度存在如前章式的關係，然而使用密度的倒數-行人空間可更為清楚表達，可更改為：

$$V_{ped} = S_{ped} / M$$

其中 $V_{ped}$ 為流量， $S_{ped}$ 為行人速度， $M$ 為行人空間。

藉由多位學者的調查，基本的流量與空間關係圖如圖 10 所示：

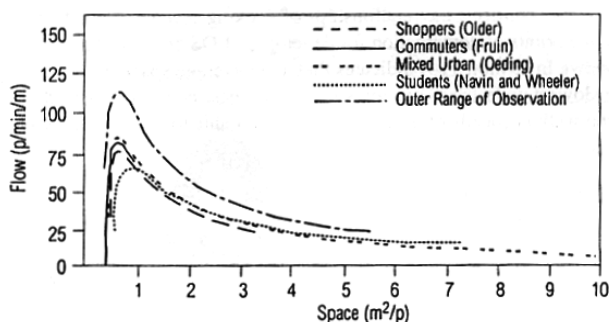


圖 10 行人流量與空間關係圖

資料來源[38]

此圖顯示最大單位的流量會落於狹小的密度區間內，約位於每人 0.4~0.9 平方公尺的地方，當每人空間少於 0.4 平方公尺時，流率將會驟減。若每人最小空間只剩下 0.2~0.3 平方公尺時，所有移動將會停止。

### 3. 速度-流量關係

圖 11 顯示行人速度與流量之關係，此圖與車流類似，顯示出當較少行人於通道上時，他們有足夠的空間選擇較高的行走速度。當流量增加，因為人與人間較接近的互動致使速度降低。當位於臨界流量時，移動變的更加困難，流量與流速同時降低。

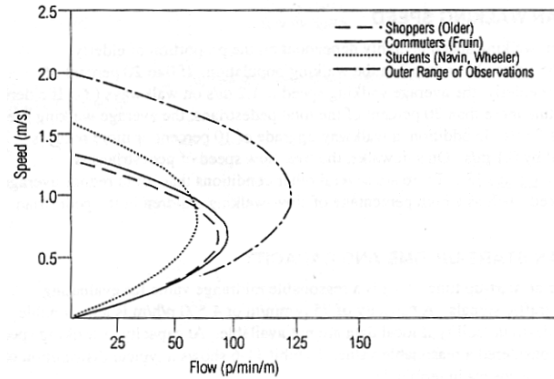


圖 11 行人速度與流量關係圖  
資料來源[38]

### 4. 速度-空間關係

圖 12 顯示行走速度與每人空間的關係，移動速度超出一般範圍的行人中，在平均每人空間少於 1.5 平方公尺時，即使最慢速的行人也無法到達他們的期望行走速度，以每秒鐘 1.8 公尺移動較快速的行人也必須要在平均每人空間超過 4 平方公尺時才可達到他們的行走速度。

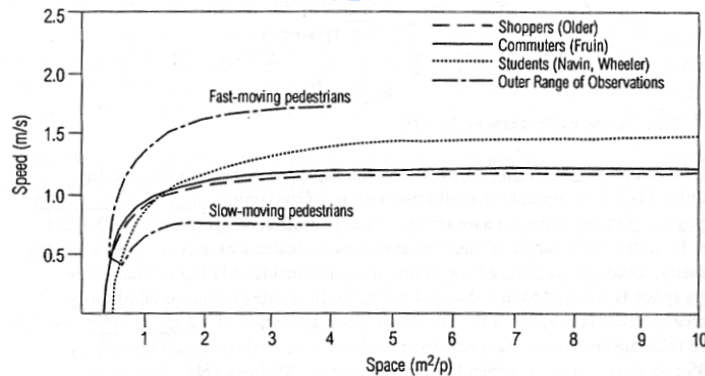


圖 12 行人速度與空間關係圖  
資料來源[38]

人流系統與車流系統中重要特性變數：流量(Q)-密度(K)-速率(V)，三者之關係乃是透過方程式  $Q=K*V$  來描述，關於行人設施服務水準方面的研究，乃是源由於車流觀念。服務水準在車流系統中乃是指用路人對於現場操作狀況的一種「質的量測」，同樣將服務水準觀念移植到而在行人流系統中，例如採用錄影調

查或現場觀測方式，調查主要行人集中道路的人行道、行人穿越道等設施，進行行人行走速率、流量及密度關係之研究，以及經由調查資料與統計，採用適當的速率與密度迴歸模式，如線性的 Greenshield's model，得流量與密度之關係式。並可以針對流量、密度、速率等參數予以分等級，訂定服務水準(Level of Service, LOS)。

行人的服務水準除了考慮如車流的密度、速度、流量等，還有一些行人專屬的量測因子，如選擇自己想要的速度及超越他人的自由度[5]，穿越行人的難易度（或超越慢行者的可能性）、與主要行人流反向行走的能力、不必改變步行速度或步伐且不與他人產生衝突的行為能力[39]。

### 3.1.3.2 微觀人流理論

目前在微觀人流的相關研究中，多數皆以系統模擬的方式來解析行人步行的特性，所以本研究對於微觀人流理論將暫不考慮模擬類的文獻，其餘可應用於本研究的理論如下。

Gianluca Antonini 和 Michel Bierlaire[39]奠基 Discrete Choice Models (DCM) 上，繼續將行人模式分成驅使性與非驅使性的行為，而驅使性又可分為強迫性互動與吸引性互動，前者指衝突避免行動，後者則指領導跟從行為。首先其假定：

1. 距離變因：用資料證明人會直接地行動至最終目的地，這是策略性並且經由人理性抉擇過的。
2. 維持方向變因：人會盡量的縮小與最適行動角度的角度差。
3. 自由流量加速變因：人具有察覺速度變動的傾向，且當人受吸引時，行動速度會減緩。

接著其依據以上已證明的假說推演出以下的解釋：

1. 衝突避免行動：
  - A. 當人行走時，越可能遇到可預見障礙物的路徑，越具較低的效益。
  - B. 移動較快的障礙物比較慢的障礙物具有更大的負面行動影響。
  - C. 當迎向障礙物所佔視野角度越大，行走改變方向的角度也越大。
2. 領導跟從行為：
  - A. 如果先行領導者距離該行人越遠，領導行走行為的能力越弱。
  - B. 先行領導者速度越快，行人速度也會越快。
  - C. 如果先行領導者與行人的相關角度越大，其影響能力就越小。

藉由上述理論，本研究假設之行人跟隨行為，意指所觀察之行人於跟隨過程中，持續跟隨前方行人者。



### 3.1.4 小結

本研究目的在探討並分析行人步行時發生之跟隨行為，透過車流理論中的微觀車流理論，主要以個別行人其相互運作與影響之關係為研究之方向。再根據車流理論中的跟車理論，發現人流也具有相似的運作原理，故探討行人跟隨行為應可應用車流理論中的構想，轉化為本研究之研究基礎。

透過人流理論，瞭解行人之領導跟從行為，將其中符合本研究所需之行人跟隨行為部分，以其假說設定為本研究行人跟隨行為之基本理念，如此則更穩固本研究中對於行人跟隨行為之描述與判定。

## 3.2 研究方法

本研究主要應用之研究方法有文獻評析法、攝影調查法、迴歸分析法、成對樣本 t 檢定、卡方檢定等，茲說明如下：

### 3.2.1 文獻評析法

文獻評析法係一傳統探索性之研究方法，透過蒐集國內外相關之研究論著，分析其研究方法、結果及建議，以作為進一步研究之基礎，此種方式可協助初次從事某課題之研究者，以避免缺乏理論與根據而致偏頗缺失。故本研究蒐集並研析國內外人流模式之相關文獻，探究其理論與內涵，並加以綜合歸納其論著所使用之研究方法、結果之優劣，作為本研究之理論基礎。

### 3.2.2 攝影調查法

攝影調查法係透過數位攝影機、照數位相機等攝錄影像之器材，對某一特定對象、事物或地點進行靜態或動態的攝錄，用以瞭解該對象所表達之意象。本研究攝影調查對於行人於行人設施上進行相關之調查，透過攝影調查以獲得人流行為特性等資料，再經由後續影像資料的判讀，以獲得行人步行資料，藉由資料分析，進而構建人流模式。

### 3.2.3 成對樣本 t 檢定

成對樣本 t 檢定(Paired-Sample t test)，是使用於相依樣本，最常用於相依樣本下的重覆量測設計，兩組之間每對視為等同的關係，檢定成對母體中兩個相關變數之平均數間的關係，究竟是等於、大於或小於的統計方法。本研究用以決定觀察時間間隔及相依樣本平均數是否相同，其研究假設方法如下：

虛無假設  $H_0$  :  $u_1 = u_2$  (無顯著差異)

對立假設  $H_1$  :  $u_1 \neq u_2$  (有顯著差異)

成對樣本 t 檢定的統計量如下：

$$t = \frac{\bar{D} - u_0}{S_0 / \sqrt{n}} \quad \text{自由度為 } n-1$$

因此檢定假設為雙尾檢定，故當檢定統計量之 P-value  $\geq (1 - \alpha / 2)$  或 P-value  $\leq (\alpha / 2)$  時，則檢定結果拒絕虛無假設，即為在  $(1 - \alpha)$  的信賴水準下，成對樣本之平均數有顯著差異；反之則接受虛無假設，代表樣本之平均數沒有顯著差異。

### 3.2.4 卡方檢定

卡方檢定主要是用於類別資料的分析。所謂類別資料是指將觀察值按照不同類別予以分類，而各類別所含之數據即為該類別出現的次數。而有多項式母體比例的檢定、齊一性檢定、獨立性檢定、適合度檢定。適合度檢定主要在檢定樣本與母體是否為同一分配。其研究假設如下：

虛無假設  $H_0$ ：樣本與母體為同一分配(無顯著差異)

對立假設  $H_1$ ：樣本與母體不為同一分配(有顯著差異)

從母體隨機抽出樣本大小為  $n$  的樣本，將此  $n$  個觀察值分成  $k$  組，可得每一組的觀察次數  $f_i$ ，並在假設的分配下求每一組的理論次數  $e_i$ 。該檢定的檢定統計量為：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - e_i)^2}{e_i} \quad \text{拒絕域為 } \chi^2 > \chi_{\alpha}^2(k - d - 1)$$

其中  $d$  = 在求得各組的理論次數時，所需用到的參數估計值的個數。若卡方之 P-value  $> \alpha$  則不拒絕虛無假設，代表樣本與母體為同一分配。

### 3.2.5 單因子變異數分析

單因子變異數分析乃檢定單因子(factor)在不同組別的平均數是否有顯著差異。ANOVA 也常用於實驗設計中，此時因子又稱為處理(treatment)，每組為一種水準(level)，且每組的樣本數相同。One-Way ANOVA 的基本假設有三：

1. 常態性假設：變異數分析需處理超過三個以上的平均數，並假設樣本是抽取自常態化母群體，即  $Y_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ ，當樣本數愈大，常態化的假設愈不易違反。

2. 變異數同質性假設：多個樣本平均數的比較，必須建立在各組樣本的變異數相等的基础上，如果樣本的變異數不同質，將造成推論上的偏誤。
3. 可加性假設：由於變異數分析牽涉到變異量的拆解，因此，各種變異來源的變異量須相互獨立，且可以進行累積與加減，稱為可加性假設。在進行加總時，係使用離均差平方和，而非變異數本身。

變異數分析係將一組資料的變異，依可能發生的變異來源，分割為數個部份。衡量這些不同的變異來源，可瞭解各種變異來源是否有顯著差異；若有差異，則表示某變異來源對資料具有顯著的影響作用。在 One-Way ANOVA 中，主要的變異來源為因子所引起，故以 F 統計量來進行檢定。當組間變異與組內變異的比率愈大，則 F 值愈大，愈容易達到顯著水準，亦即各組間的平均數之差異達到顯著水準，拒絕虛無假設。

當變異數分析 F 值達顯著水準，即推翻了平均數相等的虛無假設，表示至少有兩組平均數之間有顯著差異存在，代表多組平均數整體效果達顯著水準。當整體檢定顯著後，還必須檢定到底哪幾組平均數間有顯著不同，故須進行多重比較檢定來檢驗。多重比較檢定乃在作完整體 F 檢定之後所進行，也稱為事後比較檢定。其中 Scheff 法適用於 n 不相等的多重比較檢定技術。此一方法對分配常態性與變異一致性兩項假設之違反頗不敏感，且犯第一類型錯誤的機率較小，可以說是最嚴格、檢定力最低的一種多重比較檢定方法。

### 3.2.6 迴歸分析

迴歸分析同樣將研究之變數區分為依變數及自變數，並建立兩者之函式模型，再依據樣本所得之資料來估計模型之參數，主要用以解釋資料過去現象及預測依變數未來可能之數值，迴歸按自變數之多寡，可分為簡單線性迴歸與複迴歸分析。簡單線性迴歸用一個自變數來解釋一個依變數的迴歸分析，其表示如下式：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon$$

$\beta_0$  為常數， $\beta_1$  為迴歸係數， $\varepsilon$  為誤差

複迴歸則用兩個或兩個以上自變數來解釋一個依變數之迴歸分析，其表示如下式：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

$\beta_0$  為常數， $\beta_1 \sim \beta_n$  為迴歸係數， $\varepsilon$  為誤差

通常估計非線性迴歸模式之參數有兩種方法：第一種方法是依照『非線性迴歸(Nonlinear Regression)』統計方法，第二種方法是 SPSS 自動進行『曲線估計(Curve Estimation)』。其最大的區別在於使用第一種方法求解時必須先知道



非線性方程式，並自定其參數之初始值，缺點為必須知道模式，但可以有許多自變數。而使用第二種方法是SPSS 自動檢核所要研究的模式而不需先瞭解方程式型態為何，但其缺點為一次僅能對一個自變數進行分析，但可以找出最佳的模式型態。其建構非線性複迴歸模型之步驟如下：

- 1、自變數與依變數必須是數值型變數；分類變數必須是二元變數或其它類型的對照變數。
- 2、可藉由曲線估計程序進行預先分析或藉助散佈圖的功能撮合其決定係數。
- 3、根據經驗或繪製散佈圖，選擇適當的非線性迴歸方程。
- 4、運用變數代換，把非線性迴歸方程化作為線性迴歸方程。
- 5、運用線性迴歸中所採用的方法，來確定各迴歸係數的值。
- 6、對各係數進行顯著性檢定。

複迴歸方程式可解釋每個自變項在控制其它自變項之情況下，對應變項之獨立影響力為何，而透過複相關之分析，可知所有自變項綜合起來對Y之整體影響力為何，也就是說，可計算一複相關係數R，以及複決定係數 $R^2$ 。建立迴歸模式時，一方面希望包含較多的預測變項，以求得較準確之預測；另一方面，基於經費及控制程度的考慮，希望模式中的預測變項數目能儘量減少因此希望能以較少的預測變項，達到足以解釋整個模式的變異程度。通常選取預測變項的方法可分兩大類：一為所有可能迴歸法，一為逐步選取法。

#### 1、所有可能迴歸法：

(1)複相關係數平方法( $R^2$ )：估算全部可能的迴歸模式之 $R^2$ 值，相互比較，以選取最大之 $R^2$ 為最佳、最有效的迴歸模式。

(2)校正後的複相關係數平方法( $R^2$ )：估算全部可能的迴歸模式之 $R^2$ 值，相互比較，以選取最大之 $R^2$ 為最佳最有效的迴歸模式。

(3)Mallows(1973)的  $C_p$ 法：估算全部可能的迴歸模式之 $C_p$ 值，相互比較，以選取最小之值  $C_p$  為最佳、最有效的迴歸模式。

#### 2、逐步選取法：

(1)順向選擇法(FORWARD)：在每一次選擇的步驟中，選出一個變項，對模式的貢獻最大者，進入迴歸方程式中，並對尚未進入迴歸程式的預測變項加以考驗，以決定某一個預測變項是否有資格被納入迴歸模式中。而進入的標準為是否具有最小 F 機率值，通常SAS/PC的內設值 0.50，若預測變項的F 值小於此者，將被選取進入。

(2)反向淘汰法(BACKWARD)：首先將所有預測變項放入迴歸方程式中，而後在每一次淘汰的步驟中，剔出一個變項，對模式的貢獻最小者，並對留在迴歸方程式中的預測變項加以考驗，以決定某一個預測變項是否應繼續被保留在迴歸模式中。而剔除的標準為是否具有最大F 機率值，通常SAS/PC內設值為 0.10，若預測變項的F 值大於此者，將被選取剔除。

(3)逐步迴歸法(STEPWISE)：是傾向選擇法與反向淘汰法的綜合。首先模式中不包含任何預測變項。然後採順向選擇法，根據對模式的貢獻最大者，挑選預測變項進入迴歸模式中。而在每一步驟中，已被納入模式的預測變項則必須再經過反向淘汰法的考驗，以決定該變項要被淘汰亦或留下。通常在SAS/PC中，逐步迴歸法的進入標準(F機率值)為 0.15，剔除標準則為 0.15。

(4)最大R<sup>2</sup>法：亦即採取最大R<sup>2</sup>，依次導出在預測變項數目逐一增加時，選出各個最佳的迴歸方程式。

(5)最小R<sup>2</sup>法：亦即採取最小R<sup>2</sup>，依次導出在預測變項數目逐一增加時，選出各個最佳的迴歸方程式。

### 3.2.7 檢定指標

為了可比較建立之模式之間差異及效能，以統計指標表示模型適配之程度。本研究使用之指標包括以下兩種：

#### 1. 均方誤差(RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_t - \hat{X}_t)^2}{N}}$$

#### 2. 平均絕對值誤差率(MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \frac{|X_t - \hat{X}_t|}{X_t}$$

在式中，N為資料數，X<sub>t</sub>為觀測值， $\hat{X}_t$ 為預測值。當RMSE、MAPE之值越接近0，表示模式精度愈高，但RMSE值會受觀察值大小影響，若模式間應用的觀察值單位不同，則無法直接比較，而MAPE則為誤差與觀察值的比例，即使單位不同也可進行比較，於本研究中若兩數值結果不同，則以MAPE為主要模式檢定指標。

## 第四章 資料調查與分析

### 4.1 引言

本研究引用車流理論中的跟車理論，嘗試描述行人於步行過程中的跟隨前方行人之行為。研究首先將回顧行人相關研究之文獻，尋找可能影響行人的行為，並利用現場錄影調查，從行人步行資料進而分析出可能的關鍵因素，其中對於樣本的選擇，將只篩選出具有跟隨形式的行人組合。其影響變數如：前方行人速度、後方行人速度、跟隨行為中保持的距離等，示意圖如圖 13。

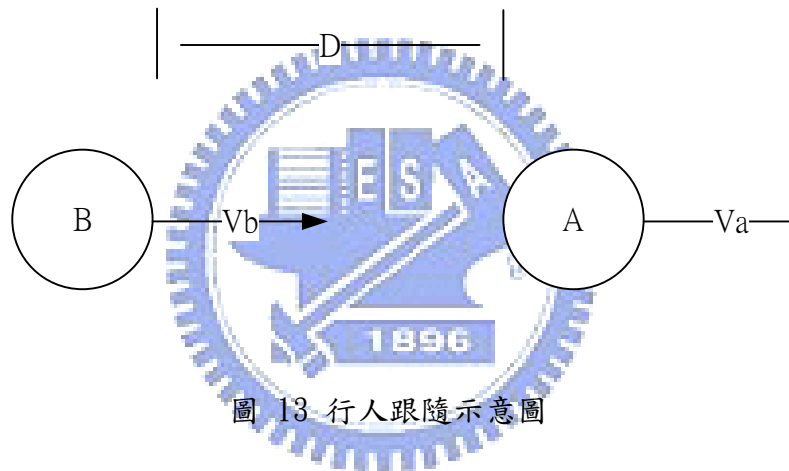


圖 13 行人跟隨示意圖

本研究根據文獻[18][19]，假設跟隨行為發生時，兩人間距  $D$  必大於或等於行人間最小相接距離，即為兩人不會碰觸的最小距離，同時最大跟隨距離則因沒有相關研究，則以本研究錄影資料取得。將分析(1)跟隨距離之量度，係以前面行人之正面或是背面為基準，(2)行人跟隨係以距離、速度或加速度之刺激及反應之變數進行研析，以確定刺激及反應之變數。同時進行多種不同跟隨模式建立與分析。

### 4.2 調查地點

本研究採用現場實地觀測攝影法進行資料調查，拍攝地點為台北市市民大道與承德路交叉口行人穿越道，並於臨近行人穿越道之天橋架設攝影機，以取得行人穿越道之初步人流資料，現場調查時有許多注意事項，應透過適當之調查步驟來逐一進行，以下將就本研究實地調查之步驟予以說明。

1. 於天橋架設攝影機（約高 7.6 公尺），並於攝影角架下方垂吊重物，以避免高樓風大而造成攝影機架設不穩或掉落。
2. 因拍攝地點無法以垂直角度觀察行人於穿越道之行為，故以側向拍攝以取得行人移動距離。
3. 由於主要研究目的為微觀行人行為，因此拍攝過程適當拉近鏡頭以作細部觀察。

圖 14 為台北市市民大道與承德路交叉路口行人穿越道拍攝現場地點示意圖，圖片正下方為北方，東西向行人穿越道長度為 18 公尺，英文字母 A 為拍攝行人資料攝影機位置。調查時間為民國九十七年十二月二十七日。圖 15 為錄影現場照片，位於天橋上之攝影點。

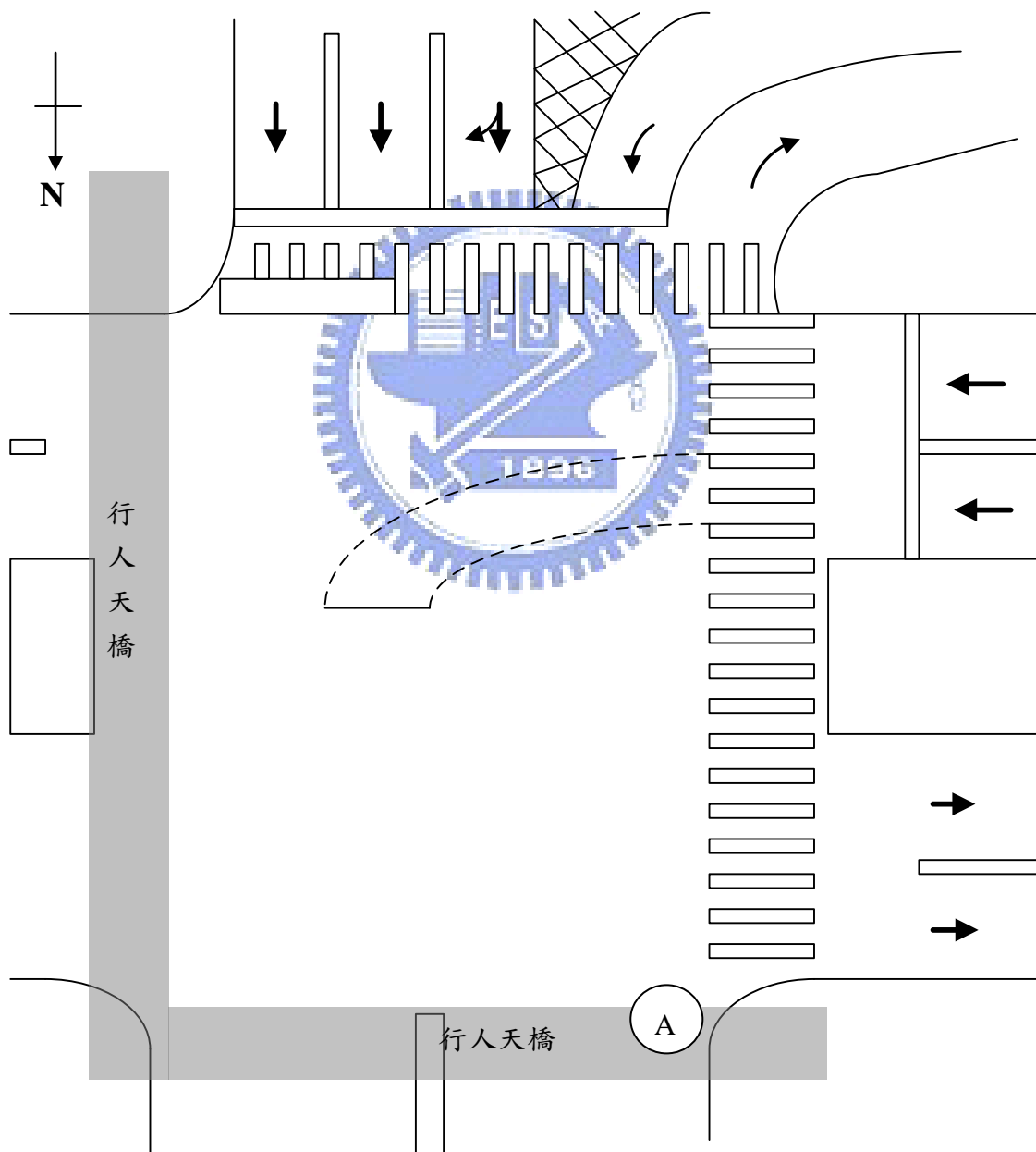


圖 14 攝影現場地點示意簡圖



圖 15 錄影現場照片圖

### 4.3 資料收集與處理

由於本研究係以客觀錄影方式取得行人步行資料，對於心理層面因素，如：心情、是否有特殊跟隨偏好、是否有設定自我步行速度…等，無法透過錄影資料取得，故本研究將不討論行人內在主觀因素，而以客觀可觀察之資料進行分析。則本研究所稱之行人跟隨行為(詳見圖 16)，係指：

(A)一對一之行人組合，後方之行人以一定距離行走於前方行人之後，不碰撞亦不遠離前方行人，此處所稱不碰撞距離係指行人間最小相接距離，而不遠離係指從本研究收集資料中判斷之二公尺距離；

(B)而其行走方向與路徑需與前方行人相同，係指後方行人的行走方向需與前方行人平行，而後方行人頭部必需在前方行人身體寬度之內，確保受到前方行人之影響。

跟隨行為的起始必需符合此兩條件，始為本研究之樣本，而有任一條件不符時，即為跟隨行為終止。研究若有後方行人加快速度以致超越前方行人時，其加速過程中若行向仍與前方行人相同，則該資料亦計入研究樣本，唯其超越時必須



變換行向，此行為將使本研究條件(B)無法滿足，故當其正進行變換行向角度動作時，即為跟隨行為之終止。

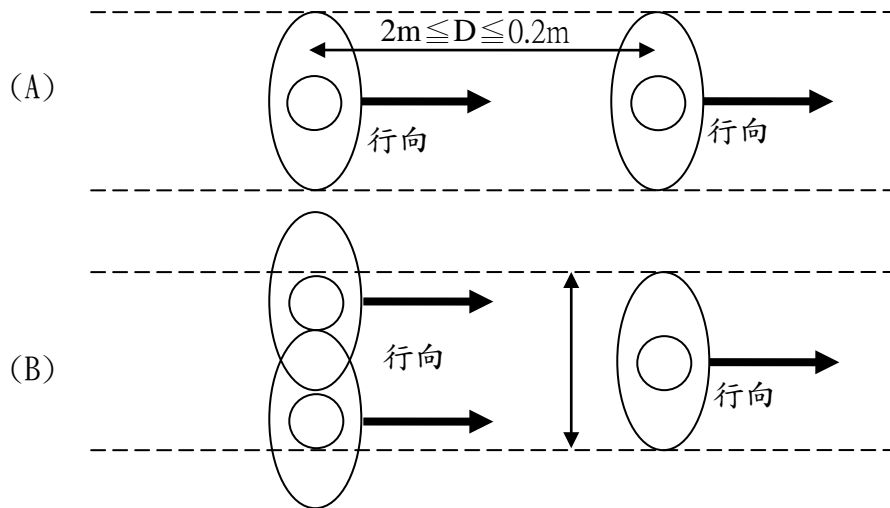


圖 16 行人跟隨行為判斷圖

本研究所得之錄影資料，需進行後續判讀與計算始能獲得所需之資料，因行人於步行過程中，速度與距離會隨時間而有所變化，故以錄影資料細分每秒 30 畫格(frames)，將每一畫格中顯示之移動距離、移動速度、當時行人流量，再將具有跟隨行為之前後行人設為一組合，將其自跟隨起始至跟隨結束的過程中數據資料如跟隨距離、前方行人速度、後方行人速度、性別等，取出進行分析。其中移動距離之參考點為道路上之行人穿越道枕木紋，根據我國 道路交通標誌標線 號誌設置規則 第 185 條：枕木紋行人穿越道線，設於交岔路口，其線型為枕木紋白色實線，線段長度以三公呎至八公呎為度，寬度與間隔均為 40 公分，本研究將以此規則作為行人位移距離的判斷依據。

距離的判定為本研究中重要之影響因素，速度與加速度都需從正確的移動距離中求出，由於錄影場地限制無法以垂直方式取得行人移動資料，而以側面錄影，故本研究需利用參考點以減少讀取誤差，參考點的設定則以道路上現有之枕木紋行人穿越道線，將每格 40 公分寬度再細分為 4 等分，以取得行人移動距離。

由於資料的取得須以人工方式判讀，故需進行訓練以降低誤差，因為沒有相關研究說明行人的移動應取多少間距，故也於訓練中一併利用統計檢定方式找出較佳的判讀，訓練方法為將行人實際移動的距離與時間切割後的加總距離進行比較，從中找出誤差最小，即最接近實際距離者以利後續研究進行。本研究所稱行人實際移動距離，係以自跟隨行為發生時至跟隨行為結束止，該行人的總移動距離；觀察移動距離則為自跟隨行為發生時，固定一時間間隔(time interval)進



行資料判讀，再將之加總。由於行人速度不高，以文獻研究中亞洲人平均行速約 130 cm/s，若以 1/30 秒為間隔抓取資料，則每時間間隔移動距離平均為 4~5 cm，但本研究無法以此刻度進行判讀，會導致實際移動距離與觀察移動距離會具有相當的誤差，故本研究選取 1/6、1/3、1/2 及 1 秒等時間間隔，首先採取 30 筆資料進行檢定分析，目的在找出其中一種時間間隔下，行人步行距離資料誤差最小或無顯著差異，同時能提供最多資料數量，且能代表母體之樣本，即為本研究之時間間隔，則假設如下：

$H_0$ ：各時間間隔(N)下，實際步行距離( $\mu_o$ )=觀察步行距離( $\mu_N$ )

$H_1$ ：各時間間隔(N)下，實際步行距離( $\mu_o$ ) $\neq$ 觀察步行距離( $\mu_N$ )

成對樣本t檢定，為兩組樣本有成對的關係檢定兩組平均數是否有差異，若拒絕 $H_0$ 則有顯著差異。本研究以 95%之信賴水準進行統計，結果如表 5。

表 5 成對樣本 t 檢定

N 成對 樣本	平均數	標準差	平均數的 標準誤	t	顯著性 (雙尾)
N=1/6	-40.93	35.81	6.54	-6.260	.000
N=1/3	-15.33	20.84	3.81	-4.030	.000
N=1/2	3.17	14.99	2.74	1.156	.257
N=1	2.00	14.24	2.60	.769	.448

同時再根據卡方檢定之適合度檢定發現表 6 之結果：

表 6 卡方檢定

時間間隔	1/6	1/3	1/2	1
P-value	0.0000	0.004	0.955	0.947
結果	拒絕	拒絕	不拒絕	不拒絕

由表 5 及表 6 可知，在 95%之信賴水準下，當N為 1/2 秒及 1 秒時，成對樣本t檢定之統計結果接受 $H_0$ ，即代表此兩組時間間隔下，實際步行距離與觀察步行距離無差異。另當N為 1/2 秒及 1 秒時，卡方適合度檢定接受 $H_0$ ，同時說明可以此兩組時間間隔之樣本代表母體。因本研究需要相當數量之樣本資料，以 1/2 秒為基準之資料量為 1 秒之兩倍，故本研究將以 1/2 秒之時間間隔做為後續資料收集之標準。

由於行人移動具有較高的自由度，故本研究根據文獻[35]，針對錄影資料中行人跟隨行為進行以下研究假設與限制：

- (1) 如果前方領導者距離該行人越遠，領導的影響能力越弱。配合本研究觀察資料假設當前後行人距離超過2公尺，則排除於觀察資料之外。
- (2) 前方領導者速度越快，行人速度也會越快。反之亦然。
- (3) 如果前方領導者與行人的相關角度越大，其影響能力就越小。本研究假設行人跟隨行為是後方行人與前方行人在該時點之移動方向一致，若發生移動方向不一致時即認定該跟隨行為中止，並紀錄原因為前方離開或後方離開。
- (4) 因道路上並非只有行人，觀察會受往來車流影響如行人影像被車輛遮蔽無法觀察，故本研究觀察對象僅對於不受車流影響為主。
- (5) 如觀察對象發生第四點原因致無法繼續觀察時，若影響因素消滅後該觀察對象仍有跟隨行為，則紀錄為持續跟隨。

由上述五點建立之觀察法則，同時配合經過統計結果確定觀察之時間間隔後，本研究將以一定之流程進行行人跟隨資料之收集：

- (1) 以 1/30 秒慢速撥放錄影資料，逐步檢視行人之移動是否具有一定之跟隨行為，亦即跟隨距離不超過 2 公尺。
- (2) 找到不受車流影響之觀察對象，則回轉至跟隨行為發生時點，改以 1/2 秒間隔撥放以確定移動距離、跟隨間距及性別等變數。
- (3) 紀錄完成後重覆第一步驟直到完成所需組數。
- (4) 根據紀錄資料計算速度、加速度，以建立行人跟隨模式之用。

故本研究行人資料之收集流程如圖 17 所示：

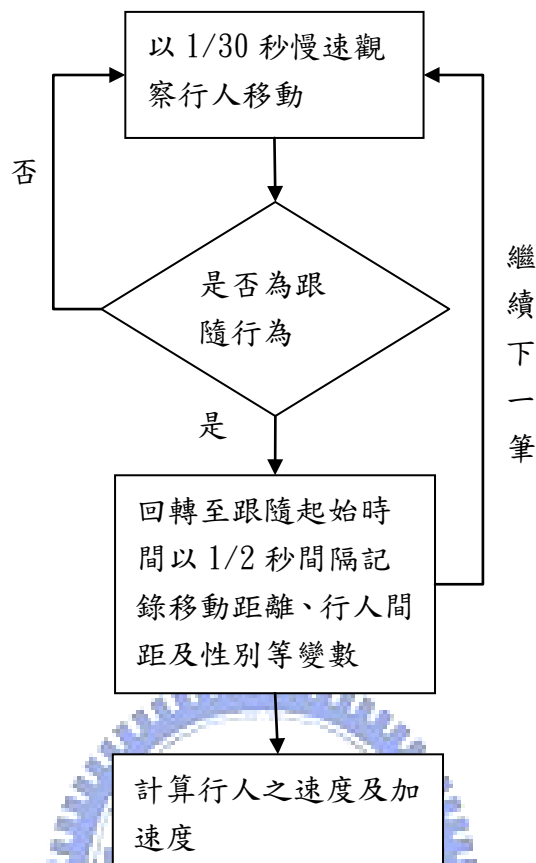


圖 17 行人資料收集流程圖

#### 4.4 行人跟隨行為特性分析

根據前一節提出之時間間隔，本研究於台北市承德路與市民大道交岔路口行人天橋上之觀察總共收集具有跟隨行為之樣本 100 組，數據資料中距離資料共計 704 筆、速度資料共計 604 筆，加速度資料共計 504 筆行人移動資料。其中，在所有通過路口人數 1442 人中，發生符合本研究限制及觀察之跟隨行為人數為 100 人，占全部對象之 6.93%。而其相關變數如前後行人之速度、加速度、跟隨距離、跟隨時間及性別等資料，將分節討論之。其中如年紀、外觀美醜等因素或有影響，但其屬主觀判斷成份較高，故不納入本研究探討之特性。

在觀察時間之後有 3 種情形，分別為前方離開、後方離開及繼續跟隨；前方離開表示該組前方行人步行方向轉變、速度增加，以致後方無跟隨行為；後方離開表示該組後方行人步行方向轉變、速度減慢或超越前方行人；繼續跟隨表示該組行人持續跟隨至離開路口。其中有 48% 之觀察對象會持續跟隨前方行人直到通過該路口為止，再以跟隨者性別區分，在後方轉向的部分以男性比例較高，共 15 人約占後方轉向人數的 68%，而其交叉比較表如表 7 所示：

表 7 性別與跟隨型態交叉比較表

性別		型態			總和
		前方轉向	後方轉向	持續跟隨	
女	人數	21	7	28	56
男	人數	9	15	20	44
總和	人數	30	22	48	100

同時根據列聯表的卡方檢定，Pearson 卡方值為 7.713，其 P-value 為 0.021 小於顯著水準 0.05，則性別與跟隨型態之間有顯著相關。

#### 4.4.1 性別

在性別方面，後方跟隨者性別中，男性占 44%，女性占 56%；但如果前方領導行人為女性，則後方有較多行人願意跟隨，占符合研究觀察者的 58%，而其結果如表 8 所示。

表 8 性別交叉比較表

		前方		Total
		男性 人數	女性 人數	
後方	男性 人數	19	25	44
	女性 人數	23	33	56
Total		42	58	100

#### 4.4.2 速度

本節將分析行人之速度概況，速度資料的取得係依據錄影資料中行人之位移距離而得，採用公式如下：

$$V_n = \frac{\Delta S_n}{\Delta t}$$

其中  $V_n$  為第  $n$  個時間點行人速度 (cm/s)

$\Delta S_n$  為該行人於  $n-1$  到  $n$  時間點移動距離 (cm)

$\Delta t$  為觀察時間間隔，為 1/2 秒

根據錄影資料，共取得 100 組跟隨行人之速度，依時間間隔區分後，共取得 604 筆前後行人之速度，計算前方領導行人平均速度為 116.89 cm/s，後方跟隨

行人平均速度為 115.55 cm/s，其統計資料表如表 9 及次數分配圖如圖 18 所示。其中後方跟隨行人速度在 200 cm/s 以上者，代表該行人為小跑步加速跟隨，而非以步行方式。

表 9 前後行人速度統計表

	前方速度 (cm/s)	後方速度 (cm/s)
平均值	116.89	115.55
最小值	40	60
最大值	200	240

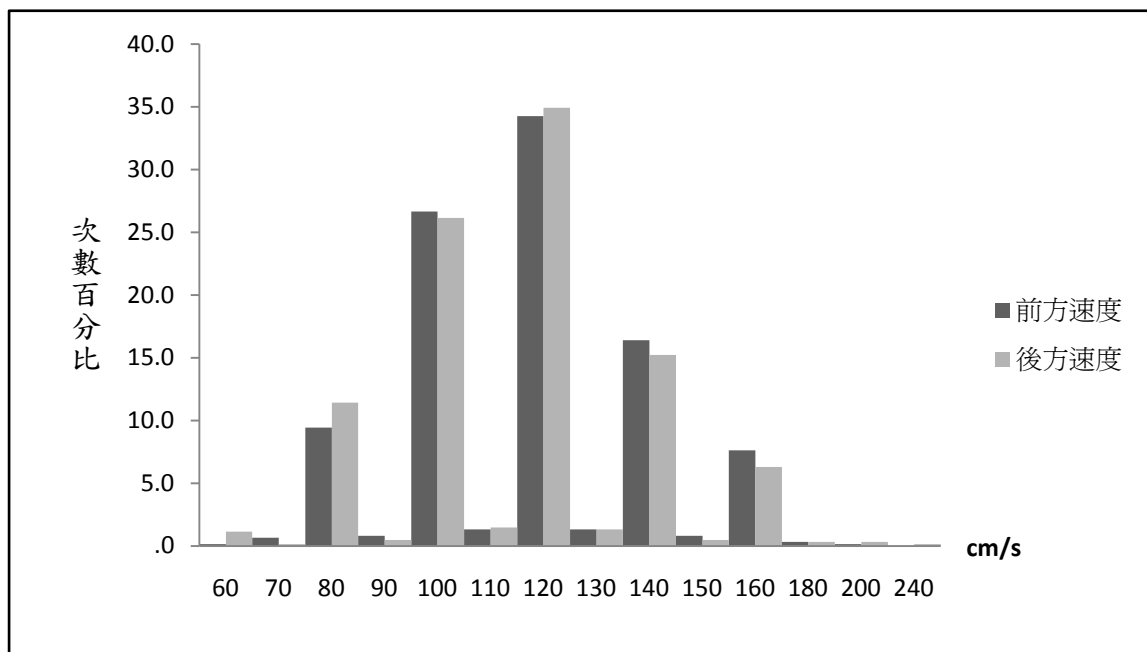


圖 18 前後行人速度百分比次數分配直方圖

由圖 18 可發現不論是前方領導行人或是後方跟隨行人，速度多集中於 100 cm/s 以及 120 cm/s，且前後行人平均速度相近，故本研究進行檢定，確認後方行人於跟隨行為下之平均速度與前方行人平均速度是否有顯著差異，則假設如下：

$H_0$ ：前方行人速度與後方行人速度無顯著差異

$H_1$ ：前方行人速度與後方行人速度有顯著差異

檢定結果如表 10 所示，在 95%的信賴水準下，P-value 為 0.116 > 0.05，故代表行方行人速度與後方行人速度無顯著差異。另如表 11 可知，前方行人速度與後方行人速度具有統計上顯著相關，其相關係數為 0.594 屬於中度相關。

表 10 前後行人速度成對 t 檢定表

統計檢定量	t	自由度	顯著性 (雙尾)
前方速度 - 後方速度	1.64	603	0.102

表 11 前後行人速度相關表

組別		前方速度	後方速度
前方速度	Pearson 相關	1	.589**
	顯著性 (雙尾)		.000
後方速度	Pearson 相關	.589**	1
	顯著性 (雙尾)	.000	

若將後方行人速度與前方行人速度做線性迴歸分析，可得到下列迴歸式

$$V_{後} = 43.656 + 0.615V_{前}$$

由表 12 可知本迴歸式之 $R^2$ 為 0.347 代表性不高，但係數分析中常數項與自變項均有顯著結果，於表 13 之變異數分析中，統計量 $F=320.022$ ，其 $P\text{-value} < 0.001$ ，說明前方行人與後方行人速度確實有線性迴歸關係，並與研究假設相符，亦即前方行人速度越快，後方行人速度也越快。本迴歸式的殘差統計表如表 14 所列。

表 12 前後行人速度迴歸係數分析表

模式	未標準化係數		t	顯著性	R	R 平方
	B 之估計值	標準誤差				
(常數)	44.442	4.053	10.966	.000	0.589	0.347
前方速度	0.608	0.034	17.889	.000		

表 13 前後行人速度變異數分析表

模式	平方和	df	平均平方和	F	顯著性
迴歸	114143.497	1	114143.497	320.022	.000
殘差	214717.430	602	356.673		
總數	328860.927	603			



表 14 前後行人速度迴歸殘差統計表

	最小值	最大值	平均數	標準離差	個數
預測值	68.775	166.109	115.629	13.758	604
殘差	-73.942	98.224	.000	18.870	604
標準預測值	-3.405	3.669	.000	1.000	604
標準殘差	-3.915	5.201	.000	.999	604

本研究認為性別對於速度會有影響，所以將進行資料分組，首先利用獨立 t 檢定確定跟隨者的速度是否因性別的不同而有差異，得到結果表示女性跟隨者平均速度為 112.91(cm/s)，男性跟隨者平均速度為 119.41(cm/s)，其變異數檢定為相等，其 t 值為-3.399，P-value 為  $0.001 < 0.025$ ，此結果說明，跟隨者的性別不同，對於其速度也會有顯著不同，而以男性速度較女性速度快，檢定結果如表 15 所示。

表 15 後方跟隨者速度與性別獨立 t 檢定

		變異數相等的 Levene 檢定			平均數相等的 t 檢定			
	後方性別	平均速度	F 檢定	顯著性	t	自由度	顯著性 (雙尾)	
後方速度	女	112.91	假設變異數相等	.315	.575	-3.405	602	.001
	男	119.41	不假設變異數相等			-3.399	539.491	.001

由於上述結果，本研究尚需對於以下幾種假設情況做統計檢定：

1. 後方跟隨者速度是否因前方領導者性別不同而有差異。
2. 前方領導者為女性時，後方跟隨者的速度在性別上是否有差異。
3. 前方領導者為男性時，後方跟隨者的速度在性別上是否有差異。

表 16 假設情況分類統計量表

		性別	平均數	標準差
情況 1	後方速度	前方男性	117.85	27.648
		前方女性	114.04	20.062
情況 2	前方女性之後方速度	後方男性	115.19	19.876
		後方女性	113.19	20.204
情況 3	前方男性之後方速度	後方男性	126.13	27.387
		後方女性	112.50	26.563

表 17 假設情況分類獨立 t 檢定

		變異數相等的 Levene 檢定			平均數相等的 t 檢定		
			F 檢定	顯著性	t	自由度	顯著性
情況 1	後方 速度	假設變異數 相等	18.963	.000	1.947	596	.052
		不假設變異 數相等			1.826	396.3	.069
情況 2	前女 後速	假設變異數 相等	1.088	.298	.940	359	.348
		不假設變異 數相等			.942	332.7	.347
情況 3	前男 後速	假設變異數 相等	2.820	.094	3.810	235	.000
		不假設變異 數相等			3.785	192.1	.000

由表 16 及表 17 可以發現，對於情況 1 而言，在 95% 的信賴水準下，沒有證據支持當前方性別不同時，後方速度會有顯著差異；而在情況 2，同樣沒有顯著的證據支持當前方性別為女性時，後方速度在性別上會有顯著差異；但在情況 3 中，根據檢定結果則有顯著差異。綜合此三種情況，可說明男性行走速度較女性快，而當前方領導者為女性時，因為跟隨行為的發生，導致男性降低本身速度，所以有此結果，從圖 19 中可了解其關係。

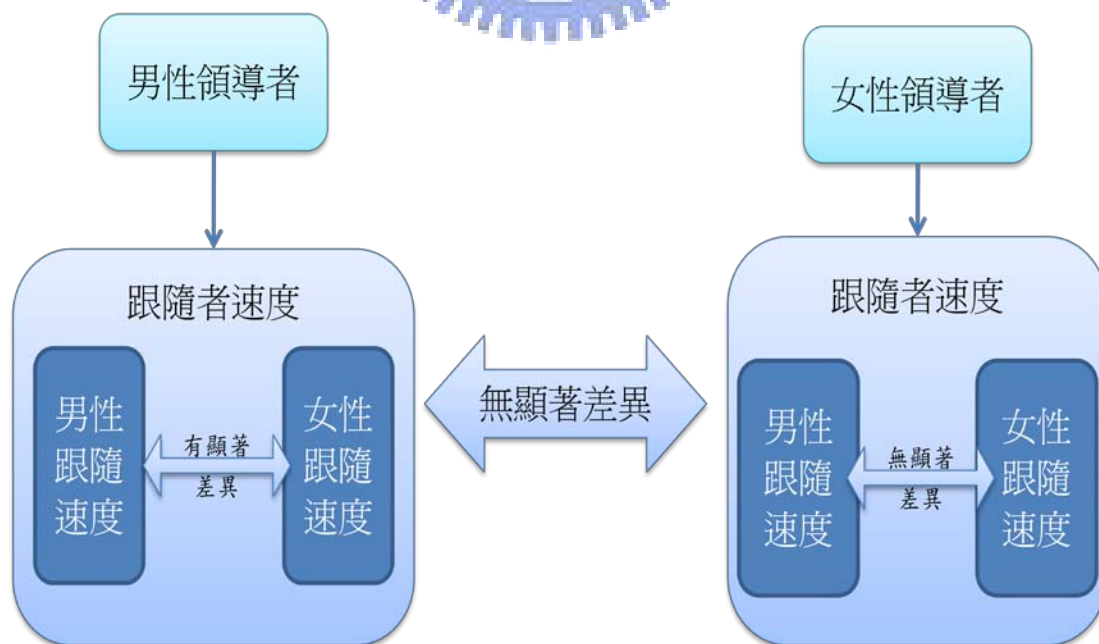


圖 19 性別與速度間差異相關示意圖

#### 4.4.3 加速度

加速度之計算係由前後行人之速度變化，依據公式求得，其式如下。

$$a_n = \frac{V_{n+1} - V_n}{\Delta t}$$

其中， $V_n$  為第  $n$  個時間點行人速度(cm/s)

$V_{n+1}$  為第  $n+1$  個時間點行人速度(cm/s)

$\Delta t$  為觀察時間間隔，為 1/2 秒

依據 4.4.2 節之行人速度資料表，可以求得每位行人之加速度值，在車流模式中，加速度為一重要之變數，故本研究也將行人加速度狀況進行分析。首先為前後行人加速度之百分比次數分配圖，參見圖 20。從圖中可發現，具有跟隨行為之行人，其加減速度多集中於  $0 \text{ cm/s}^2$ 、 $\pm 40 \text{ cm/s}^2$  及  $\pm 80 \text{ cm/s}^2$ ，共計分別有 92.7% 及 91.3% 的比例。

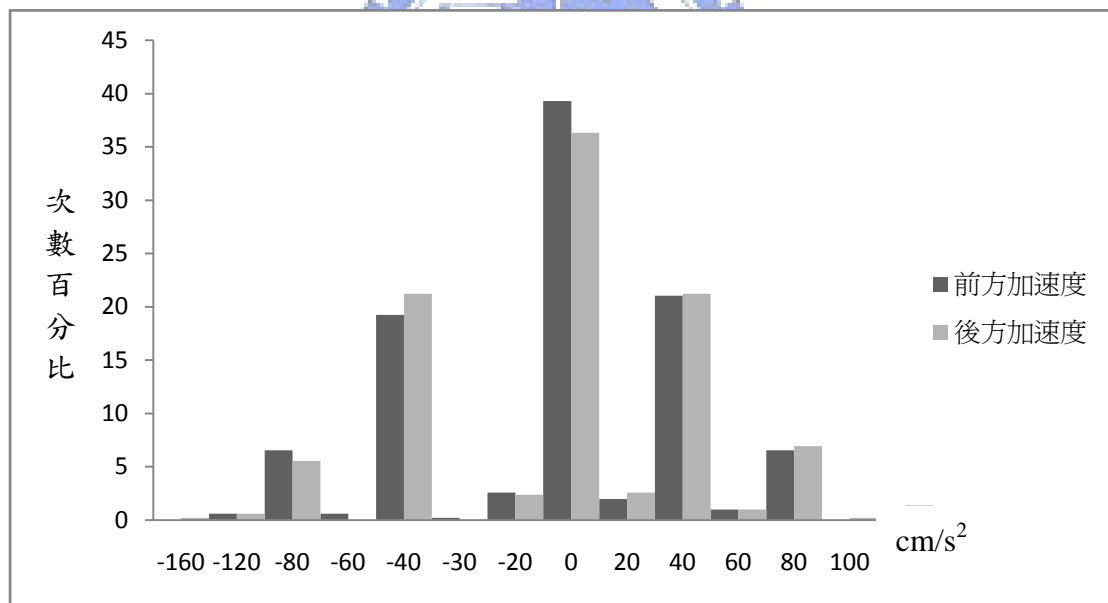


圖 20 前後行人加速度之百分比次數分配圖

#### 4.4.4 跟隨距離

行人跟隨行為一項重要之因素即為跟隨距離，根據車流理論，跟車距離為刺激反應模式中的刺激變化量，故於行人流中也應收集此資料，但並無文獻說明行人間距應取參考點為何，故本研究選取三種情形之跟隨距離，分別為(1)前後行

人之頭間距，D1；(2)前方後腳跟至後方前腳尖間距，D2；(3)前方身體至後方頭部間距，D3。本研究將依此三種距離進行分析，示意圖如圖 21：

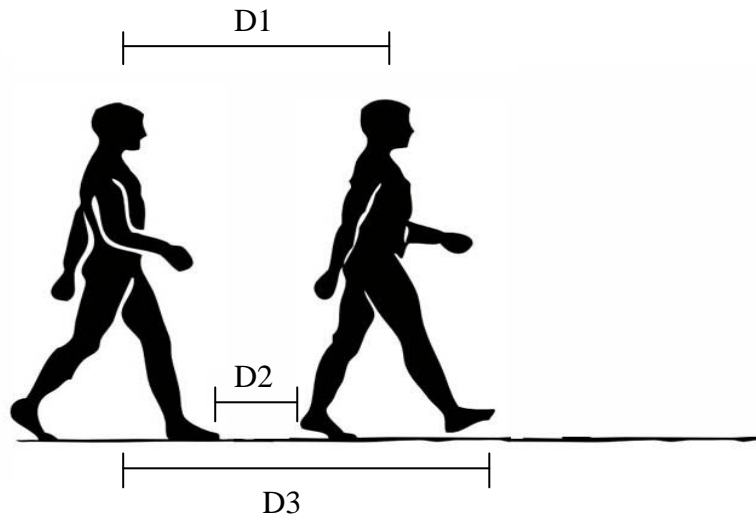


圖 21 行人跟隨距離示意圖

依資料所得 100 組跟隨行人之平均起始跟隨距離整理如表 18：

表 18 起始跟隨距離統計表

組別	D1(cm)	D2(cm)	D3(cm)
平均距離	114.25	67.3	135.0
平均距離(男)	119.66	72.95	138.41
平均距離(女)	110.00	62.86	132.32
標準差	26.793	32.282	29.215
最小值	70	10	80
最大值	200	180	220

表 18 中，男性跟隨者平均起始距離比女性要長一些，但表 19 之獨立 t 檢定則顯示，若以性別分組，則 3 種距離在男性與女性間的差異不大，也就是沒有顯著證明男性跟隨者之起始跟隨距離大於女性跟隨者，不過 D1 之 P-value 為 0.073，相當接近臨界值 0.05，推測是因男性樣本較少，僅 44 筆資料，若資料數量增加應可達到顯著。

表 19 跟隨者性別與起始距離之獨立 t 檢定

組別		變異數相等的 Levene 檢定		平均數相等的 t 檢定		
		F 檢定	顯著性	t	自由度	顯著性
D1	假設變異數相等	.080	.777	-1.810	98	.073
	不假設變異數相等			-1.794	89.021	.076
D2	假設變異數相等	.478	.491	-1.564	98	.121
	不假設變異數相等			-1.548	88.598	.125
D3	假設變異數相等	.030	.863	-1.035	98	.303
	不假設變異數相等			-1.039	93.747	.302

圖 22-24 表示三種跟隨間距距離之次數分配圖，其中 D1 最大距離為 200 cm，此為本研究假設，若跟隨距離超過此限制，其跟隨行為較不具代表性。D2 為前後行人間，前人腳跟至後人腳尖之距離，故最短有 0 cm，而 D3 實為 D1 加上前方行人之前腳步伐或身軀寬，故距離較 D1 長，可接受到 230 cm 為止。

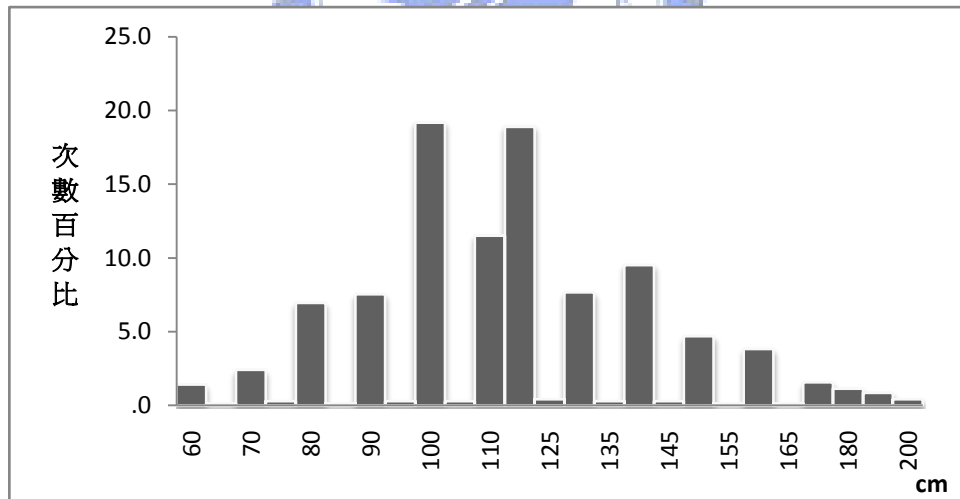


圖 22 跟隨距離 D1 次數分配圖

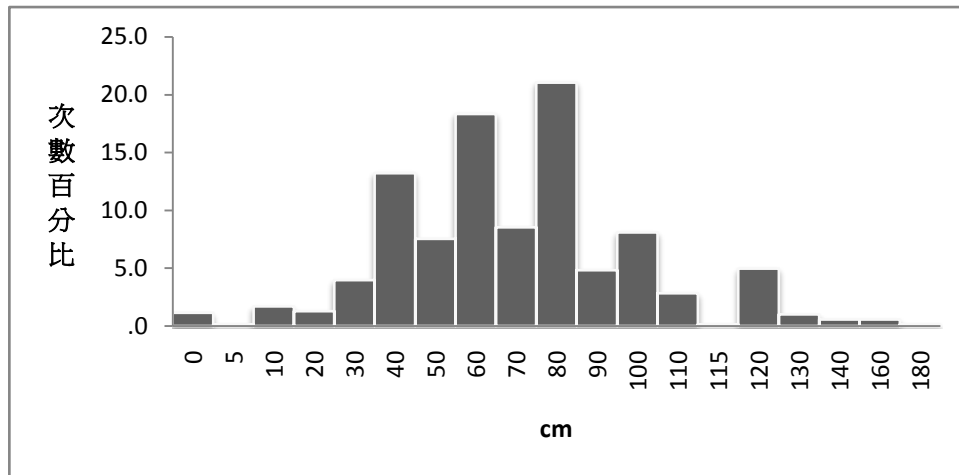


圖 23 跟隨距離 D2 次數分配圖

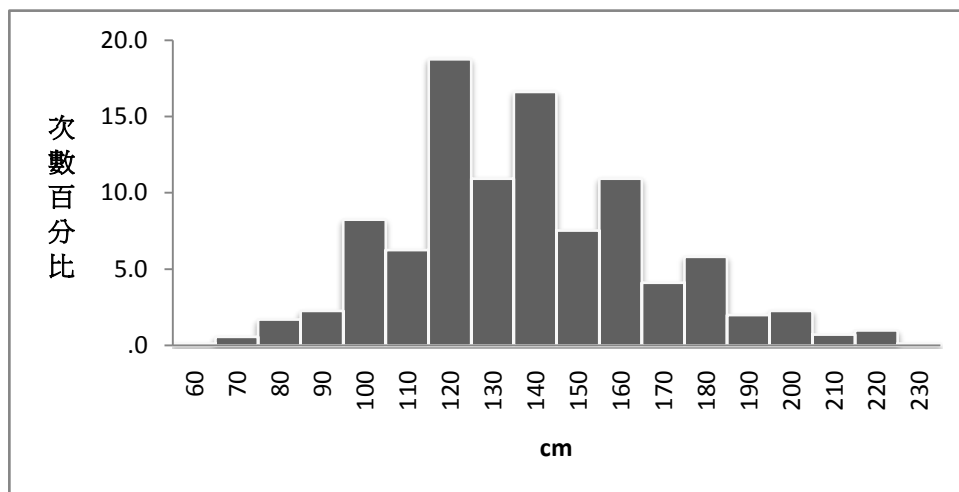


圖 24 跟隨距離 D3 次數分配圖

由於性別因素仍然為本研究考慮之重點，經由表 18 中發現，男性跟隨者的起始跟隨距離較女性跟隨者距離為長，但並無顯著差異，故繼續進行統計檢定，將自跟隨開始至跟隨結束止的資料全部依性別分組，而檢定結果如表 20 所示，就後方跟隨者性別與跟隨距離檢定中，D1 與 D3 之變異數檢定為有顯著差異，且後方男性跟隨距離與後方女性跟隨距離並無顯著差異，D2 之變異數檢定為無顯著差異，且跟隨距離有顯著差異。但在前方領導者性別與跟隨距離之檢定中，三組距離變異數檢定皆為無顯著差異，且 D1 與 D3 具有顯著差異，此現象說明，當前方領導者為男性時，後方跟隨者不分性別，其保持之跟隨距離會比當前方領導者為女性時要長，換句話說，若前方為男性，則後方跟隨距離較遠；若前方為女性，則後方跟隨距離較近。



表 20 跟隨距離與前後方性別之獨立 t 檢定

組別		變異數相等的 Levene 檢定		平均數相等的 t 檢定			
		F 檢定	顯著性	t	自由度	顯著性	
前方性別與跟隨距離之檢定	D1	假設變異數相等	.304	.582	3.080	702	.002
		不假設變異數相等			3.068	584.271	.002
	D2	假設變異數相等	.628	.428	.561	702	.575
		不假設變異數相等			.560	588.791	.576
	D3	假設變異數相等	3.274	.071	4.063	702	.000
		不假設變異數相等			4.021	571.638	.000
後方性別與跟隨距離之檢定	D1	假設變異數相等	9.246	.002	1.013	702	.311
		不假設變異數相等			1.039	685.969	.299
	D2	假設變異數相等	2.793	.095	2.512	702	.012
		不假設變異數相等			2.556	673.834	.011
	D3	假設變異數相等	13.068	.000	-.726	702	.468
		不假設變異數相等			-.751	695.365	.453

表 21 前後性別分組之距離統計表

距離組別	性別	前方		後方	
		平均數(cm)	標準差	平均數(cm)	標準差
D1	男	119.53	26.248	116.97	23.608
	女	113.37	25.763	114.95	27.795
D2	男	70.14	28.424	72.53	26.317
	女	68.92	28.199	67.13	29.444
D3	男	143.06	29.637	136.67	25.389
	女	134.04	28.237	138.28	31.568

同時再輔以相關檢定，檢定結果如表 22，可發現，D1 與 D3 對於前方性別變數具有顯著相關，但相關係數不高，屬於低度相關。其中 D1、D2、D3 之間相關係數很高，原因為 D1 與 D3 間的差別只在於行人的體寬，實際上差距的數值並不大，故具有高度相關，而 D2 則是 D1 將體寬扣除，但還有每人步伐長度不一的因素，故也具有中度相關。

表 22 性別與距離相關分析表

		D1	D2	D3	前方性別	後方性別
D1	Pearson 相關	1	.756**	.896**	.115**	.038
	顯著性		.000	.000	.002	.311
D2	Pearson 相關		1	.625**	.021	.094*
	顯著性			.000	.575	.012
D3	Pearson 相關			1	.152**	-.027
	顯著性				.000	.468

#### 4.5 跟隨時間

本節主要探討行人發生跟隨行為後，至跟隨行為結束為止，中間經過時間的長度，總共 100 組行人資料故共有 100 筆跟隨時間之紀錄，但因觀察地點之車流影響，故實際上之跟隨時間應大於本研究之紀錄，此為研究限制之一，本研究將就觀察所得之確切跟隨時間進行研究分析。由下表 23 可得知，整體平均跟隨時間為 3.008 秒，最短跟隨時間為 1.5 秒，最長跟隨時間為 8.5 秒。

表 23 跟隨時間統計表

性別		最小值	最大值	平均數	標準差
<b>跟隨時間</b>		1.50	8.50	3.0080	1.16400
前方	女			3.1517	1.32655
	男			2.8095	.86920
後方	女			3.1250	1.22567
	男			2.8591	1.07581

將前方性別分組計算跟隨時間與將後方性別分組計算跟隨時間，發現當前方領導者為女性時，平均跟隨時間為 3.15 秒，較前方領導者為男性之 2.81 秒要多；同樣當後方跟隨者為女性時，其跟隨時間為 3.125 秒也較男性跟隨者長。故再進行獨立檢定，確定是否此一顯著性差異。

表 24 跟隨時間與性別之獨立 t 檢定

組別	變異數相等的 Levene 檢定		平均數相等的 t 檢定			
	F 檢定	顯著性	t	自由度	顯著性 (雙尾)	
前方性別	假設變異數相等	3.954	.050	1.459	98	.148
	不假設變異數相等			1.557	97.149	.123
後方性別	假設變異數相等	.160	.690	1.136	98	.259
	不假設變異數相等			1.154	96.754	.251

由表 24 中可知道，雖然平均數上性別的不同使得跟隨時間有不同，但是在統計檢定上，其結果均不顯著，推測應為本研究樣本組數僅有 100 組，而有此一結果。

若將跟隨終止的原因與跟隨時間一併考慮，需利用 ANOVA 檢定來判斷組間與組內的差異，首先需滿足進行 ANOVA 的條件，即為變異數檢定需為相等，結果檢定值為 0.81，大於 0.05，故滿足此條件，可繼續進行檢定。

表 25 終止原因與跟隨時間同質性檢定表

Levene 統計量	分子自由度	分母自由度	顯著性
2.579	2	97	.081

而 ANOVA 檢定結果如表 26，其整體 F 值為 9.204，相伴機率為 0.00 小於顯著水準 0.05，拒絕虛無假設，表示跟隨時間在 3 種終止原因組別有顯著差異，同時根據多重比較表中的 LSD 法(表 27)，可以看出，除了前方轉向與後方轉向組間的跟隨時間沒有顯著差異外，另外 2 種組合皆有顯著差異。

表 26 終止原因與跟隨時間 ANOVA 表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
組間	(組合)	21.396	2	10.698	9.204	.000
	一次項					
	未加權	16.273	1	16.273	14.001	.000
	加權	18.340	1	18.340	15.780	.000
	離差	3.055	1	3.055	2.629	.108
組內		112.738	97	1.162		
總和		134.134	99			

表 27 LSD 法多重比較表

		(I) 原因	(J) 原因	平均差異 (I-J)	標準誤	顯著性
LSD	前轉	後轉		-.04734	.30481	.877
		持續		-.94511*	.25258	.000
	後轉	前轉		.04734	.30481	.877
		持續		-.89777*	.27667	.002
	持續	前轉		.94511*	.25258	.000
		後轉		.89777*	.27667	.002

\*表平均差異在 0.05 水準為顯著

由圖 25 中可清楚顯現，在 3 種不同組別間，其平均跟隨時間的差異與其值，跟隨持續組之平均跟隨時間為 3.5 秒，比另 2 組之平均跟隨時間要長約 1 秒左右，此結果也支持跟隨時間越長，其願意繼續保持跟隨行為之可能也越高，反之則會發生前方轉向離開，或是後方轉向、加速超越…等情況。

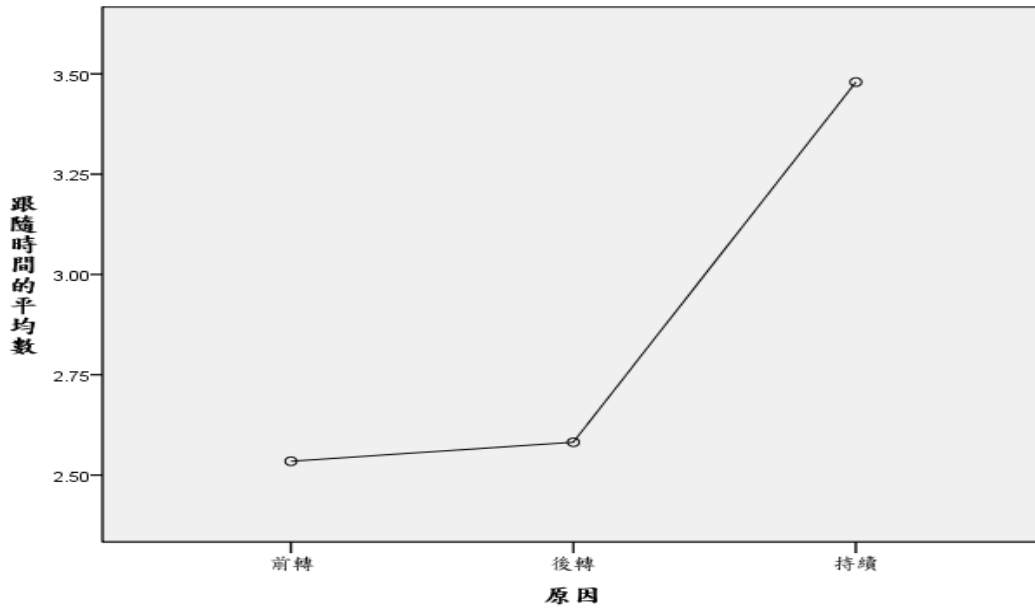


圖 25 不同跟隨終止原因與其平均跟隨時間圖

在此 100 組樣本中，有 6 組樣本發生在自由流 (free-flow) 的情況下，即跟隨行為發生當時，該路段上僅有前後兩人以跟隨行為前進，不受到其他行人干擾，其跟隨時間資料如表 28。可以發現性別組合上前後行人皆為同性別，推測在自由流速時，與前方領導同樣性別的跟隨者才能以相似速度前進，而不發生其他行為 (如超越行為)，此 6 組中於資料紀錄後仍然保持跟隨狀態者有 4 組。發生有前方轉向及後方轉向者各有 1 組，且其跟隨時間僅在 2.5 秒與 3 秒。而更深入之研究則因本研究所取得資料不足無法進行。

表 28 自由流跟隨統計表

組號	跟隨時間 (秒)	跟隨終止情況	前方性別	後方性別
24	8.5	持續跟隨	女	女
59	5	持續跟隨	女	女
60	6.5	持續跟隨	女	女
64	2.5	前方轉向	女	女
65	3	持續跟隨	男	男
76	3	後方轉向	男	男

## 4.6 小結

本研究為探討行人跟隨行為之移動方式與特性，以及影響行人的因素，將對行人流動相關特性進行分析，以瞭解行人在各種不同情況下與人流特性之關係性，而建構微觀行人跟隨模式。經過現場錄影收集台北市市民大道與承德路交叉路口行人穿越道，並依研究所需定義行人跟隨行為，從錄影資料中總計觀察人數 1442 人，發生符合本研究限制及觀察之跟隨行為人數為 100 人，占全部對象之 6.93 %。在 100 組行人跟隨行為資料中，計男性跟隨者 44 人，女性跟隨者 56 人。以下將依速度、加速度、起始跟隨距離、跟隨距離及跟隨時間等行人行為特性統整。

### (1) 在性別方面：

若前方領導者為女性，則其後方跟隨者不分性別，會有 58% 的比例跟隨；若前方領導者為男性則後方跟隨者不分性別約有 42% 的比例跟隨。

### (2) 在終止跟隨原因方面：

依觀察結果分類 3 組，分別為前方轉向、後方轉向與持續跟隨。將此特性以跟隨者性別分組進行相關分析，根據列聯表的卡方檢定，Pearson 卡方值為 7.713，其 P-value 為 0.021 小於顯著水準 0.05，顯示出性別與跟隨型態之間有顯著相關。

### (3) 在跟隨速度方面：

領導者平均速度為 116.89 cm/s，跟隨者平均速度為 115.55 cm/s，在 95% 的信賴水準下，前方領導者速度與後方跟隨者速度無顯著差異。但前方領導者速度與後方跟隨者速度具有統計上顯著相關，其相關係數為 0.594 屬於中度相關。檢定結果也提供本研究一結論，當跟隨者的性別不同，其速度也具有顯著差異，而以男性速度較女性速度快。

另外本研究提出 3 種假設：

1. 後方跟隨者速度是否因前方領導者性別不同而有差異。
2. 前方領導者為女性時，後方跟隨者的速度在性別上是否有差異。
3. 前方領導者為男性時，後方跟隨者的速度在性別上是否有差異。

在 95% 的信賴水準下，情況 1 沒有顯著的證據支持當前方領導者性別不同時，後方跟隨者速度會有顯著差異；而在情況 2，同樣沒有證據支持當前方領導者性別為女性時，後方男性跟隨者與女性跟隨者之速度有



顯著差異；但在情況 3 中，根據檢定結果則有顯著差異。綜合此三種情況，及前一統計結果，男性行走速度較女性快，可說明當前方領導者為女性時，因為跟隨行為的發生，會導致後方男性跟隨者降低本身速度以符合前方女性領導者的速度。

(4) 在加速度方面：

具有跟隨行為之行人，其加減速度多集中於  $0 \text{ cm/s}^2$ 、 $\pm 40 \text{ cm/s}^2$  及  $\pm 80 \text{ cm/s}^2$ ，共計分別有 92.7% 及 91.3% 的比例。因加速度係由速度資料換算所得，故無更詳細分析。

(5) 在起始跟隨距離方面：

本研究設定 3 種距離，分別為前後行人之頭間距，D1；前方後腳跟至後方前腳尖間距，D2；前方身體至後方頭部間距，D3。其平均距離分別為：114.25 cm、67.3 cm、135 cm。其中男性跟隨者平均起始距離比女性長，但獨立 t 檢定則顯示，沒有顯著證明男性跟隨者之起始跟隨距離大於女性跟隨者。

(6) 在跟隨距離方面：

就後方跟隨者性別與跟隨距離檢定中，D1 與 D3 之變異數檢定為不相等，且後方男性跟隨者之跟隨距離與後方女性跟隨者之跟隨距離並無顯著差異；D2 之變異數檢定為相等，且跟隨距離有顯著差異。在前方領導者性別與跟隨距離之檢定中，3 組距離之變異數檢定皆為相等，且 D1 與 D3 具有顯著差異。綜合此現象說明，當前方領導者為男性時，後方跟隨者不分性別，其保持之跟隨距離會比當前方領導者為女性時要長，換句話說，若前方為男性，則後方跟隨距離較遠；若前方為女性，則後方跟隨距離較近。

(7) 在跟隨時間方面：

探討行人發生跟隨行為後，至跟隨行為結束為止，中間經過時間的長度，本研究依觀察所得之確切跟隨時間進行研究分析。整體平均跟隨時間為 3.008 秒，最短跟隨時間為 1.3 秒，最長跟隨時間為 8.5 秒。而當前方領導者為女性時，後方平均跟隨時間為 3.1517 秒，較前方領導者為男性之 2.8095 秒要多；同樣當後方跟隨者為女性時，其跟隨時間為 3.125 秒也較後方男性跟隨者長。故再進行獨立檢定但結果均不顯著。

(8) 在終止原因與跟隨時間方面：

在 3 種不同終止原因組別間，透過 ANOVA 分析，持續跟隨組之平均跟隨時間顯著比另 2 組之平均跟隨時間要長，此結果也支持跟隨時間越長，其願意繼續保持跟隨行為之可能也越高，反之則會發生前方轉向離開，或是後方轉向、加速超越…等情況。

(9) 自由行人流方面：

在此觀察樣本中，共有 6 組樣本發生在自由行人流的情況，可以發現該性別組合中前後行人皆為同性別，推測在自由流速時，與前方領導同樣性別的跟隨者才能以相似速度前進，而不發生其他行為(如超越行為)，仍然保持跟隨狀態者有 4 組，且跟隨時間皆大於 3 秒。發生有前方轉向及後方轉向者各有 1 組，且其跟隨時間僅在 2.5 秒與 3 秒。

本研究至此對於行人於跟隨行為中的客觀行為特性已有初步瞭解，例如，跟隨行為中，後方跟隨者速度會受前方領導者速度影響而且具有顯著正相關；女性領導者較容易吸引跟隨者進行跟隨行為…等。然而過去車流理論模式中因為不易觀察到駕駛的性別，故沒有此一變數，但本研究則發現行人的性別對於一些變數仍然具有影響力，故後續行人跟隨行為模式之建構，將納入前方領導者性別與後方領導者性別之變數，期能獲得更佳的模式解釋能力。

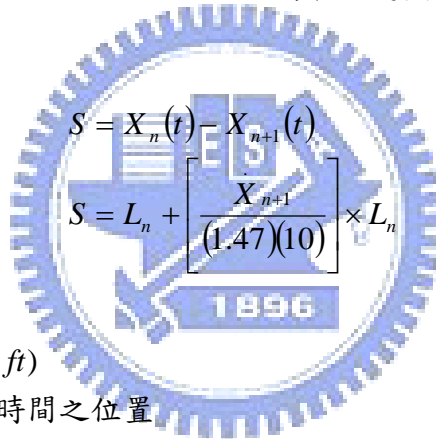


## 第五章 行人跟隨模式建立與驗證分析

本研究目的在探討行人跟隨行為之移動方式與特性，以及影響行人的因素，對行人流動相關特性進行分析，以瞭解行人在各種不同情況下與人流特性之關係性，進而建構微觀行人跟隨模式。故本章將以車流理論中跟車模式為基礎，對行人跟隨模式進行建構與分析，以下將分三種模式進行探討，分別為Pipe's Theory，以及第五代GM模式，與本研究修正之GM模式及自行建立之行人跟隨模式，再進行模式適合度比較，以確定行人之跟隨模式。

### 5.1 Pipe 行人跟隨模式建立

Pipe首先將運動中車輛之間的關係公式化，其以安全距離的觀念來表示後車的車速與前車間距離的關係，假設每一位駕駛者與前行車輛維持的空間與後車的速度成比例且加上一段距離，此理論的缺點為在低速與高速情況下會出現低估的現象，其模式如下：



$$S = X_n(t) - X_{n+1}(t)$$

$$S = L_n + \left[ \frac{X_{n+1}}{(1.47)(10)} \right] \times L_n$$

$S$ ：前後車間距( $ft$ )

$X_n(t)$ ：第 $n$ 車在 $t$ 時間之位置

$X_{n+1}(t)$ ：第 $n+1$ 車在 $t$ 時間之位置

其中， $\dot{X}_{n+1}$ ：第 $n+1$ 車在 $t$ 時間之速度( $nph$ )

$L_n$ ：車長( $ft$ )

數值(1.47)：單位轉換值

數值(10)：每10mph就要有一台車身之安全距離

由於式中數值之單位與本研究所用單位不符，且原式中速度單位與長度單位不同故需經過單位轉換才可使用，然而本研究中單位值皆為公分，無需單位轉換值。而理論中的每10 mph就要有一台車身之安全距離則因行人行速不同，故需經由迴歸之最小平方法求得，本研究假設其值為 $\omega$ ，則公式如下：

$$S = L_n + \left[ \frac{\dot{X}_{n+1}}{(\omega)} \right] \times L_n$$

經過移項轉換可得：

$$\frac{S}{L_n} = 1 + \left[ \frac{\dot{X}_{n+1}}{(\omega)} \right]$$

$$\frac{S}{L_n} - 1 = \frac{1}{\omega} \left( \dot{X}_{n+1} \right)$$

利用 SPSS 之套裝軟體以上式的型式進行簡單線性迴歸，因為跟隨距離與前方領導者性別有相關，故本研究將進行三組迴歸分析，首先將所有行人不分組一次迴歸，再以前方領導者性別分兩組各別迴歸，再比較此三種行人模式是否具有解釋能力。每組迴歸中，因為跟隨距離取值的不同，故針對 D1 及 D3 兩種距離再各別進行比較。其中 D1 表前後行人之頭間距；D3 表前方身體至後方頭部間距。

### 5.1.1 整體迴歸式

本節將以單位轉換後之 Pipe's Theory 公式，以 100 組行人跟隨樣本資料利用 SPSS 執行線性迴歸，其結果如下：

#### 1. 跟隨距離為 D1

當跟隨距離 S 以 D1 為值時，迴歸之  $R^2$  為 0.862，ANOVA 分析中速度變數具有顯著解釋能力，其 P-value 為 0.00，RMSE 為 0.66，模式結果如表 29、30：

表 29 Pipe 整體行人迴歸估計表(D1)

模式	B 之估計值	標準誤差	t	顯著性	R 平方
S=D1	.014	.000	61.47	.000	.862

表 30 Pipe 整體行人迴歸 ANOVA 表(D1)

模式	平方和	df	平均平方和	F	顯著性
迴歸	1653.488	1	1653.488	3778.593	.000 <sup>a</sup>
殘差	263.869	603	.438		
總數	1917.357 <sup>b</sup>	604			

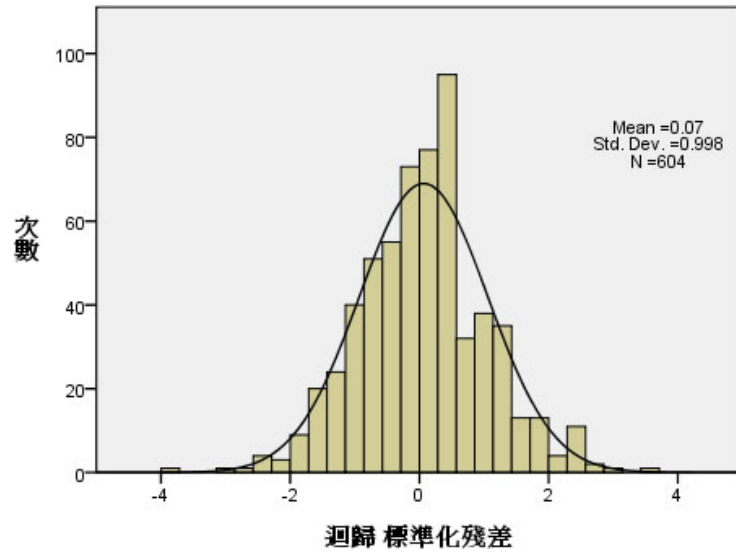


圖 26 整體行人迴歸標準化殘差次數圖(D1)

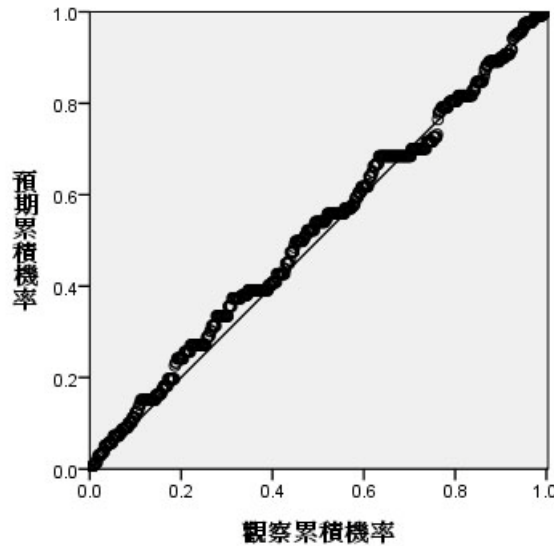


圖 27 整體行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D1)

由圖 26、27 可發現對 D1 跟隨距離來說標準化殘差具有常態分配，在 P-P 圖中樣本點的分佈則差異較大。另根據迴歸式中，變數的係數值為 0.014，即為  $\omega$  的倒數，經過計算可得  $\omega$  為 71.43 cm/s，依 Pipe 理論，此值代表行人速度為 71.43 cm/s 時，就要有一個行人體寬的距離以保持不發生碰撞。

## 2. 跟隨距離為 D3

當跟隨距離 S 以 D3 為值時，迴歸之  $R^2$  為 0.892，ANOVA 分析中速度變數具有顯著解釋能力，其 P-value 為 0.00，RMSE 為 0.75，模式結果如表 31、32：

表 31 Pipe 整體行人迴歸估計表(D3)

模式	B 之估計值	標準誤差	t	顯著性	R 平方
S=D3	.018	.000	70.667	.000	.892

表 32 Pipe 整體行人迴歸估計表(D3)

模式	平方和	df	平均平方和	F	顯著性
迴歸	2795.968	1	2795.968	4993.887	.000 <sup>a</sup>
殘差	337.607	603	.56		
總數	3133.575 <sup>b</sup>	604			

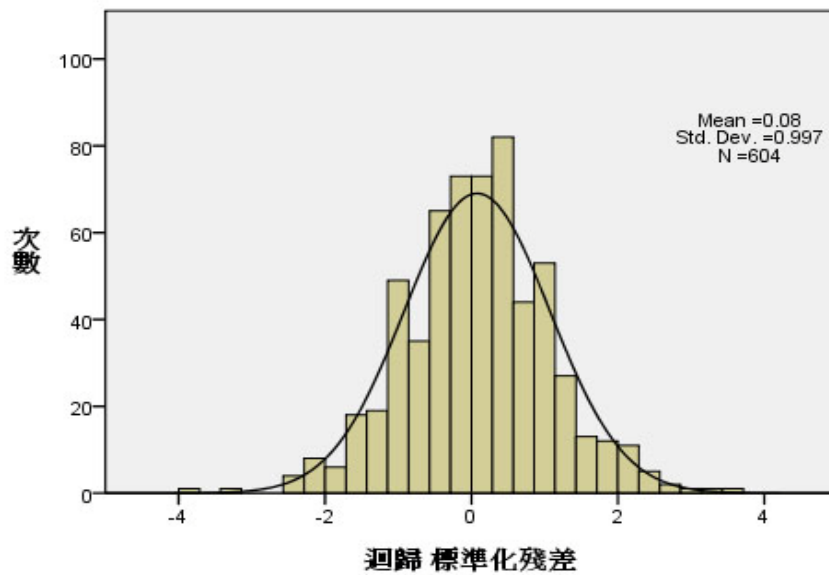


圖 28 整體行人迴歸標準化殘差次數圖(D3)

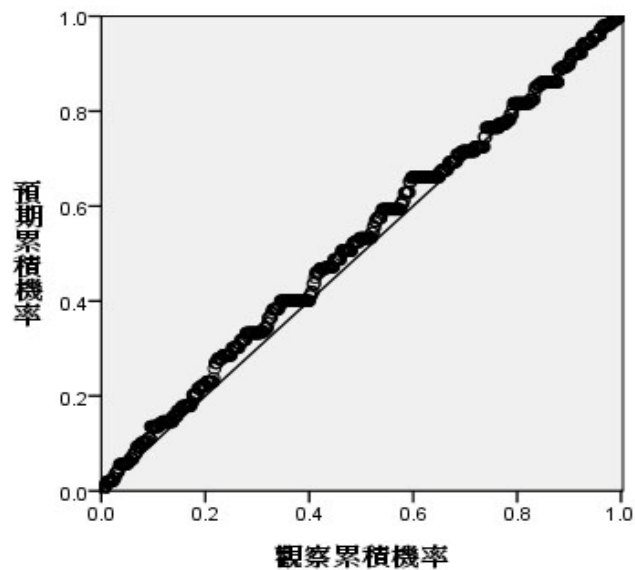


圖 29 整體行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D3)



由圖 28、29 可發現對 D3 跟隨距離來說標準化殘差具有常態分配，在 P-P 圖中樣本點的分佈則較 D1 差異小。另根據迴歸式中，變數的係數值為 0.018，即為  $\omega$  的倒數，經過計算可得  $\omega$  為 55.56 cm/s，依 Pipe 理論，此值代表行人速度為 55.56cm/s 時，就要有一個行人體寬的距離以保持不發生碰撞。

### 5.1.2 男性迴歸式

#### 1. 跟隨距離為 D1

當跟隨距離 S 以 D1 為值時，迴歸之  $R^2$  為 0.847，ANOVA 分析中速度變數具有顯著解釋能力，其 P-value 為 0.00，RMSE 為 0.58，模式結果如表 33、34：

表 33 Pipe 男性行人迴歸估計表(D1)

模式	B 之估計值	標準誤差	t	顯著性	R 平方
S=D1	.011	.000	36.197	.000	.847

表 34 Pipe 男性行人迴歸 ANOVA 表(D1)

模式	平方和	df	平均平方和	F	顯著性
迴歸	447.802	1	447.802	1310.245	.000 <sup>a</sup>
殘差	80.658	236	.342		
總數	528.46 <sup>b</sup>	237			

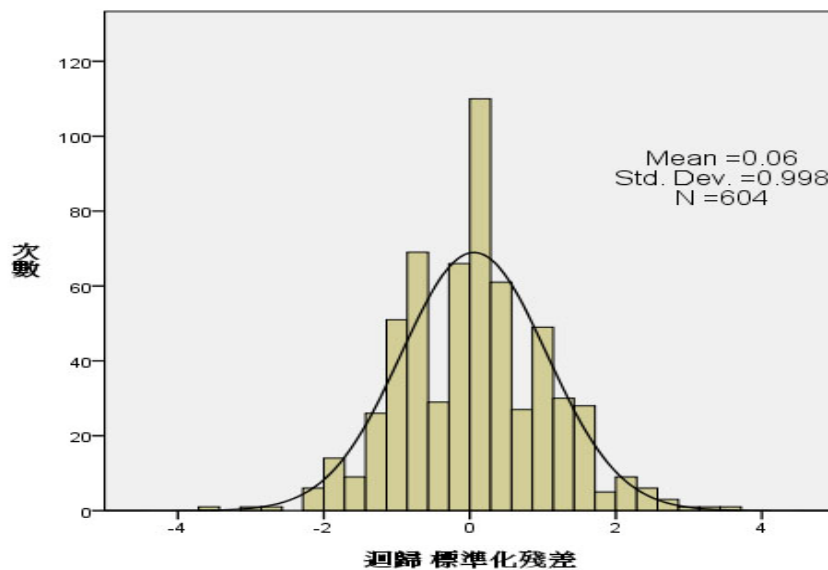


圖 30 男性行人迴歸標準化殘差次數圖(D1)

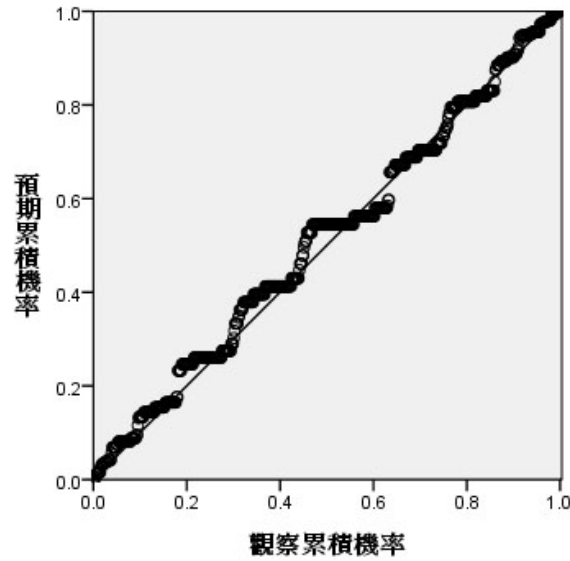


圖 31 男性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D1)

由圖 30、31 可發現對 D1 跟隨距離來說標準化殘差具有常態分配，在 P-P 圖中樣本點的分佈則差異較大。另根據迴歸式中，變數的係數值為 0.011，即為  $\omega$  的倒數，經過計算可得  $\omega$  為 90.91 cm/s，依 Pipe 理論，此值代表行人速度為 90.91 cm/s 時，就要有一個行人體寬的距離以保持不發生碰撞。

## 2. 跟隨距離為 D3

當跟隨距離 S 以 D3 為值時，迴歸之  $R^2$  為 0.885，ANOVA 分析中速度變數具有顯著解釋能力，其 P-value 為 0.00，RMSE 為 0.67，模式結果如表 35、36：

表 35 Pipe 男性行人迴歸估計表(D3)

模式	B 之估計值	標準誤差	t	顯著性	R 平方
S=D3	.015	.000	42.561	.000	.885

表 36 Pipe 男性行人迴歸估計表(D3)

模式	平方和	df	平均平方和	F	顯著性
迴歸	811.267	1	811.267	1811.46	.000 <sup>a</sup>
殘差	105.693	236	.448		
總數	916.96 <sup>b</sup>	237			

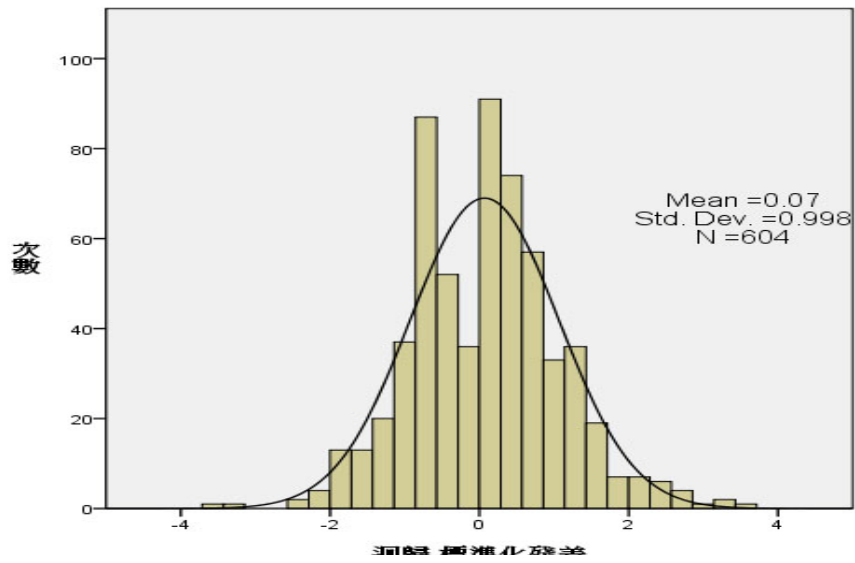


圖 32 男性行人迴歸標準化殘差次數圖(D3)

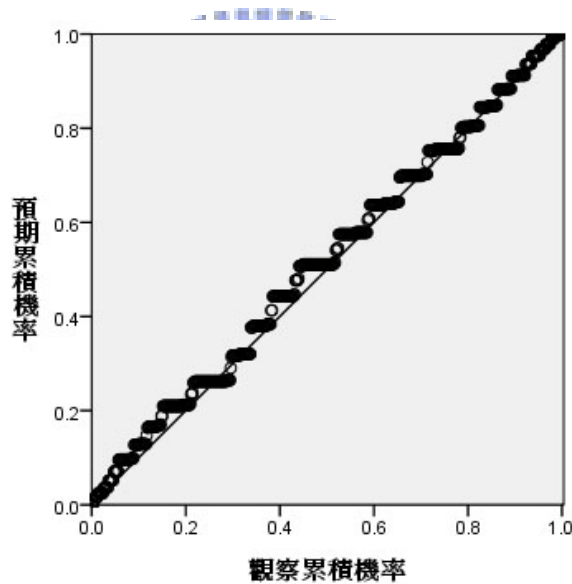


圖 33 男性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D3)

由圖 32、33 可發現對 D3 跟隨距離來說標準化殘差具有常態分配，在 P-P 圖中樣本點的分佈則較 D1 差異小。另根據迴歸式中，變數的係數值為 0.015，即為  $\omega$  的倒數，經過計算可得  $\omega$  為 66.67 cm/s，依 Pipe 理論，此值代表行人速度為 66.67 cm/s 時，就要有一個行人體寬的距離以保持不發生碰撞。

### 5.1.3 女性迴歸式

#### 1. 跟隨距離為 D1

當跟隨距離S以D1 為值時，迴歸之 $R^2$ 為 0.898，ANOVA分析中速度變數具有顯著解釋能力，其P-value為 0.00，RMSE為 0.62，模式結果如表 37、38：

表 37 Pipe 女性行人迴歸估計表(D1)

模式	B 之估計值	標準誤差	t	顯著性	R 平方
S=D1	.016	.000	56.788	.000	.898

表 38 Pipe 女性行人迴歸 ANOVA 表(D1)

模式	平方和	df	平均平方和	F	顯著性
迴歸	1245.920	1	1245.920	3224.865	.000 <sup>a</sup>
殘差	141.017	365	.386		
總數	1386.938 <sup>b</sup>	366			

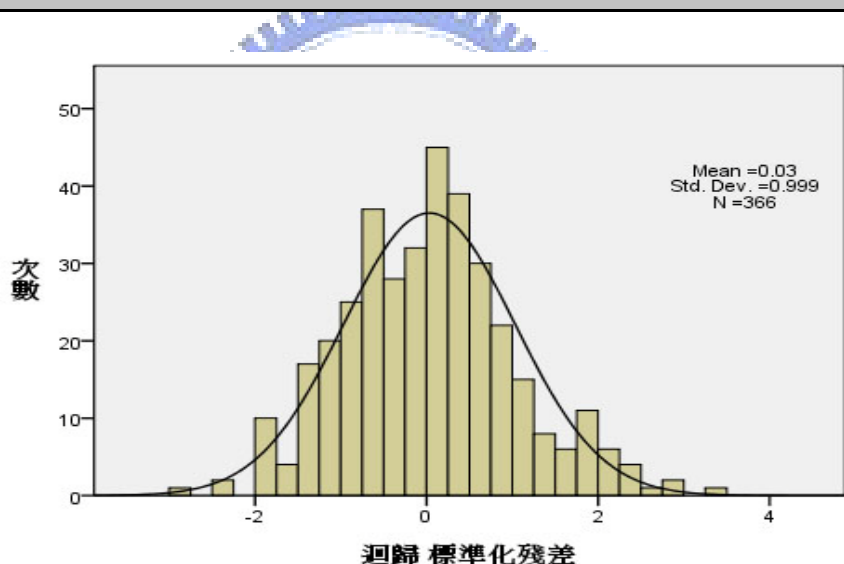


圖 34 女性行人迴歸標準化殘差次數圖(D1)

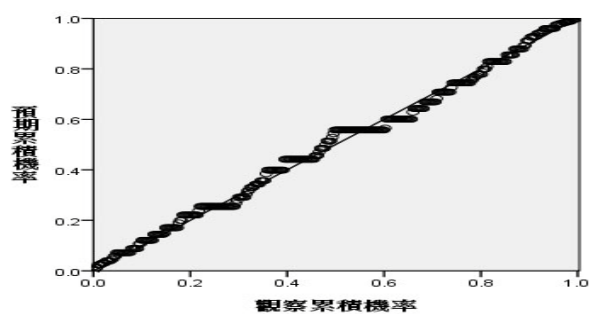


圖 35 女性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D1)

由圖 34、35 可發現對 D1 跟隨距離來說標準化殘差具有常態分配，在

P-P 圖中樣本點的分佈則差異較大。另根據迴歸式中，變數的係數值為 0.016，即為 $\omega$ 的倒數，經過計算可得 $\omega$ 為 62.5 cm/s，依 Pipe 理論，此值代表行人速度為 62.5 cm/s 時，就要有一個行人體寬的距離以保持不發生碰撞。

## 2. 跟隨距離為 D3

當跟隨距離S以D3 為值時，迴歸之 $R^2$ 為 0.919，ANOVA分析中速度變數具有顯著解釋能力，其P-value為 0.00，RMSE為 0.70，模式結果如表 39、40：

表 39 Pipe 女性行人迴歸估計表(D3)

模式	B 之估計值	標準誤差	t	顯著性	R 平方
S=D3	.02	.000	64.162	.000	.919

表 40 Pipe 女性行人迴歸估計表(D3)

模式	平方和	df	平均平方和	F	顯著性
迴歸	2033.114	1	2033.114	4116.724	.000 <sup>a</sup>
殘差	180.261	365	.494		
總數	2213.375 <sup>b</sup>	366			

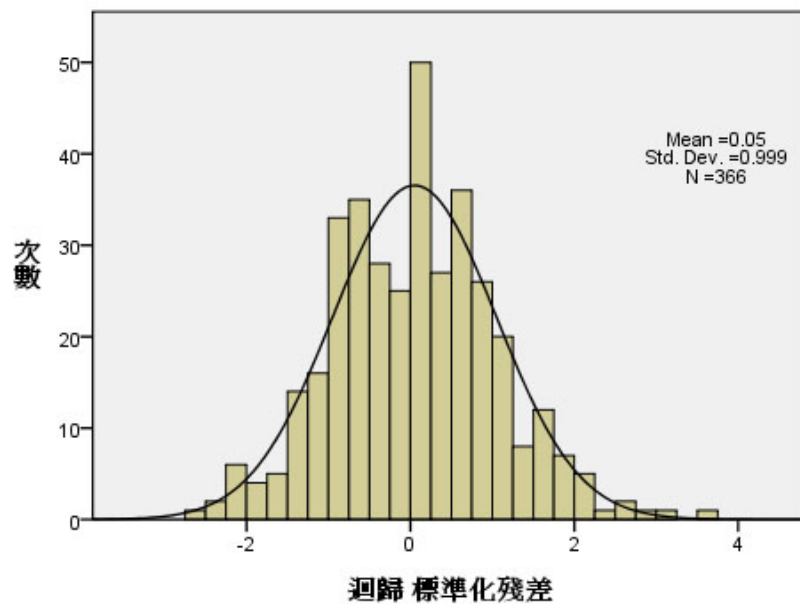


圖 36 女性行人迴歸標準化殘差次數圖(D3)

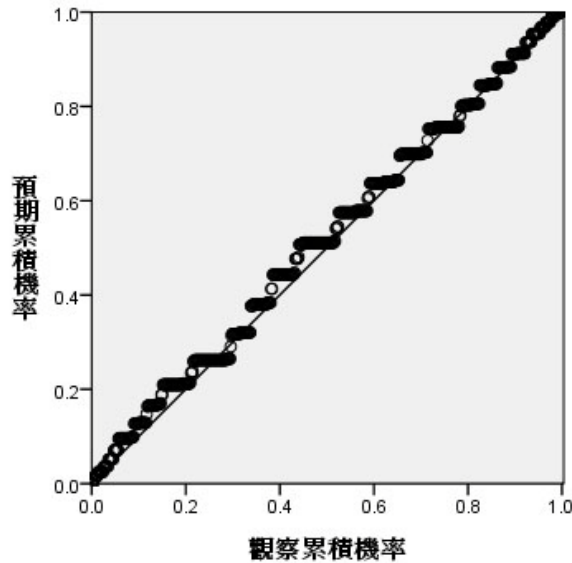


圖 37 女性行人迴歸標準化殘差常態 P-P 圖(D3)

由圖 36、37 可發現對 D3 跟隨距離來說標準化殘差具有常態分配，在 P-P 圖中樣本點的分佈則較 D1 差異小。另根據迴歸式中，變數的係數值為 0.02，即為  $\omega$  的倒數，經過計算可得  $\omega$  為 50 cm/s，依 Pipe 理論，此值代表行人速度為 50cm/s 時，就要有一個行人體寬的距離以保持不發生碰撞。

#### 5.1.4 Pipe 行人跟隨模式小結

本研究將資料進行迴歸分析後，所得之 Pipe 行人跟隨模式統整如下：

表 41 Pipe 行人跟隨模式比較表

	整體		前方男性		前方女性	
	D1	D3	D1	D3	D1	D3
$R^2$	0.862	0.892	0.847	0.885	0.898	0.919
RMSE	0.66	0.75	0.58	0.67	0.62	0.7
MAPE	0.400	0.315	0.415	0.317	0.333	0.275
$\omega$ 值	71.43	55.56	90.91	66.67	62.5	50

由表 41 可知，套用車流模式中 Pipe's Theory 於行人跟隨模式，其迴歸之  $R^2$  皆相當高，其中若跟隨距離的抓取是以 D3 為主的數值又較 D1 高，說明 D3 與速度的相關性較高，而前方領導者為女性之數值則高達 0.919。若以模式間比較 MAPE 值，則仍然以 D3 距離之絕對均方誤較小，故應選取 D3 為模式之行人跟隨距離。

故以 Pipe's Theory 為基礎之整體行人跟隨模式建立如下表：



表 42 Pipe 行人跟隨模式整理表

組別	Pipe 行人跟隨模式
整體行人	$S = L_n + \left[ \frac{\dot{X}_{n+1}}{(55.56)} \right] \times L_n$
前方為男性	$S = L_n + \left[ \frac{\dot{X}_{n+1}}{(66.67)} \right] \times L_n$
前方為女性	$S = L_n + \left[ \frac{\dot{X}_{n+1}}{(50)} \right] \times L_n$

另外以 10 組資料進行整體行人之模式驗證，計算所得之 MAPE 為 0.153，因比建立模式時產生之 MAPE(0.315)要小，故具有良好之水準，說明本行人跟隨模式為一可用之模式。

## 5.2 GM 行人跟隨模式建立

美國通用汽車研究群(GM group)利用統計方法，由現場調查資料來建立m, l 矩陣來建立刺激-反應方程式，五代模式繼續改進而將敏感項一般化，將跟車者速度與距離間距改為指數型態，模式在引入m與l兩個指數後變為微觀跟車理論通式，本研究引入其通式如下：

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{a[V_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{\Delta S^l} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$$

$a_{n+1}(t + \Delta t)$ : 跟隨行人 $\Delta t$ 秒後之加速率( $cm/s^2$ )

$V_{n+1}(t + \Delta t)$ : 跟隨行人 $\Delta t$ 秒後之速率( $cm/s$ )

$[V_n(t) - V_{n+1}(t)]$ : 前後行人之速率差( $cm/s$ )

其中， $\Delta S$ : 前後行人間距( $cm$ )

$\alpha$ : 跟人敏感度參數

$m$ : 跟隨者對速度反應之敏感度參數

$l$ : 跟隨者對間距反應之敏感度參數

在式中之  $\alpha$ 、 $m$ 、 $l$  三個敏感度參數為校估之重點，由於第五代GM跟車模式為

一非線性模式，故需利用最小平方方法逐步找出參數值，本研究利用SPSS軟體之非線性模式，以反覆最小平方方法進行分析，得到行人模式之參數，整體 $R^2$ 為 0.286，並不具有良好之解釋能力，但與以往跟車研究比較則相去不遠。同時，此模式之RMSE為 37.63，MAPE為 0.8，皆不甚良好。

表 43 GM 行人跟隨模式參數估計表

參數	$\alpha$	$m$	$l$	$R^2$
估計值	0.362	0.355	0.102	0.286

而 GM 行人跟隨模式可寫為：

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{0.362[V_{n+1}(t + \Delta t)]^{0.355}}{\Delta S^{0.102}} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$$

### 5.2.1 GM 男性行人跟隨模式

GM 男性行人跟隨模式，係以跟隨者性別分類，就男性跟隨者進行參數分析，得到 $R^2$ 為 0.264，不具有良好之解釋能力，此模式之RMSE為 36.20，MAPE為 0.83，皆不甚良好。

表 44 GM 男性行人跟隨模式參數估計表

參數	$\alpha$	$m$	$l$	$R^2$
估計值	0.036	0.332	-0.378	0.264

### 5.2.2 GM 女性行人跟隨模式

GM 女性行人跟隨模式，係以跟隨者性別分類，就女性跟隨者進行參數分析，得到 $R^2$ 為 0.302，不具有良好之解釋能力，此模式之RMSE為 38.54，MAPE為 0.78，皆不甚良好。

表 45 GM 女性行人跟隨模式參數估計表

參數	$\alpha$	$m$	$l$	$R^2$
估計值	0.7	0.463	0.333	0.302

### 5.2.3 GM 行人跟隨模式小結

綜合以上結果，可發現若將GM模式引用在行人跟隨行為中，不論是在模式解

釋能力或是模式誤差值，皆沒有良好的結果，此可能原因為行人之行為變化較多元，其變數之間的關係並不能以單純之刺激—反應函數表示之。於GM模式中前後行人速度差為零時，代表前後行人速度在觀察時點為同速前進，對應到模式中，則不論其他變項是否有影響，皆使行人之加速度值為零，但是與實際觀察的結果不同，跟隨行人即使與前方速度一致，仍然會因為前方的加減速而自身發生有加速與減速之行為。而此結果也同樣表現於機車跟車行為的研究中，藍武王、張瓊文[12]利用GM模式建立機車跟車模式，所得之模式 $R^2$ 為0.2-0.29間，與本研究結果相近，GM模式雖為一非線性模式，但仍然不具有能力說明行人之跟隨行為。

表 46 GM 行人跟隨模式整理表

組別	GM 行人跟隨模式	$R^2$
整體行人	$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{0.362[V_{n+1}(t + \Delta t)]^{0.355}}{\Delta S^{0.102}} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$	0.286
男性跟隨者	$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{0.036[V_{n+1}(t + \Delta t)]^{0.332}}{\Delta S^{-0.378}} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$	0.264
女性跟隨者	$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{0.7[V_{n+1}(t + \Delta t)]^{0.463}}{\Delta S^{0.333}} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$	0.302

#### 5.2.4 修正 GM 行人跟隨模式

在5.2.3節中，本研究發現，現有GM跟車模式套用於行人跟隨行為中，得到之模式解釋能力僅有0.286，其原因初步分析為等號右邊之前後行人速度差值，造成模式與實際行人行為不符合的情況。本研究將對於此變項進行修正，期能獲得更良好之結果。

首先將行人跟隨資料中，前方行人速度與後方行人速度差值為0之資料剔除，再把剩餘資料重新帶入式中計算，如此將能避免當此值為0時，不論其他變數影響，加速度值皆為0之情況，因此情況與現實情況不相符合，預計此結果將能使模式解釋能力上昇。

經過實際資料帶入，本研究發現，模式中各參數皆無變化，而 $R^2$ 則上昇到0.388，則可以確定本項變數為0時會使模式解釋能力降低，所以應將此變項進行修正。因為要避免原式中速度差的產生，故嘗試以前後行人速度比代替之，若前後行人速度比越大則代表後方行人速度越慢，若要保持跟隨狀態則需進行加速以趕上前方行人；為了保持等號兩邊單位一致，故乘上前方速度及其反應參數 $n$ ；但因原式中利用前後行人速度差表示加減速的符號，本研究以 $(-1)^k$ 代替速度差產生之正負號，以提供加速或減速之需要，其中 $k$ 為0, 1, 2，當 $k$ 為2時，表示前

後速度差大於 0；當 k 為 1 時，表示前後速度差小於 0；當 k 為 0 時，表示前後速度差等於 0。

最後修正模式如下：

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{a[V_{n+1}(t + \Delta t)]^m [V_n(t + \Delta t)]^n \left( \frac{V_n(t)}{V_{n+1}(t)} \right) (-1)^k}{\Delta S^l}$$

將資料帶入重新計算，可得到以下結果：

表 47 修正 GM 行人跟隨模式參數表

參數	$\alpha$	$m$	$l$	$n$	$R^2$
估計值	0.74	3.626	0.737	-1.752	0.211

由表 47 中可發現，修正後之  $R^2$  為 0.211，比原模式更不具有解釋能力，本研究推測原因為在非線性模式下，增加自變數的個數，會較不容易使模式優化，同時上式中仍無法完全避免原式中前後行人速度差為 0 的問題，故修正後的結果也不良好。故本研究將改以線性方式來建立行人跟隨模式。

### 5.3 線性行人跟隨模式建立

前兩小節已將行人跟隨資料套用於現有車流模式，發現在線性模式中以跟隨距離為依變數之 Pipe 模式能夠有效描述行人跟隨行為時，跟隨距離的變化；在非線性模式之 GM 模式則因前後行人速度差的問題而無法有效表現行人之跟隨行為。本研究將著手利用現有行人跟隨行為資料分析結果發展行人跟隨模式。

#### 5.3.1 線性行人跟隨模式

根據 5.2 節之研究結果，以線性模式來建立之行人跟隨模式，在解釋能力的表現比非線性模式來得好，故本研究將利用線性迴歸找出行人跟隨模式。在車流理論中，因觀察之限制無法知道駕駛者之性別，故在建立的模式中並無性別變數，但依本研究中第四章之資料分析，可以發現，行人之性別會對於跟隨距離、跟隨速度產生影響，故性別變數將為本研究引入之主要變數。

本文將設定兩種模式，模式一將依變數設為跟隨距離，模式二將依變數設為跟隨者速度，模式建立之初，需將以相關分析法，探討依變數與自變數間之相關強度，進而利用顯著具關聯性的自變數進行模式構建。

其中因為自變數中存在類別變數，故需進行轉換以供迴歸使用，首先在性別變數方面，只有男性與女性兩類，故設定當值為 0 時代表女性；當值為 1 時代表男性。另因跟隨終止原因有三種，故需新增虛擬變數 R1，其值可表示為：

$(R, R1)=(0, 0)$ ：表示跟隨終止原因為持續跟隨

$(R, R1)=(1, 0)$ ：表示跟隨終止原因為前方轉向

$(R, R1)=(0, 1)$ ：表示跟隨終止原因為後方轉向

以此為模式分析之基礎進行下列分析：

### 5.3.2 線性跟隨距離模式

根據文獻回顧之結果與本研究之資料分析，本模式中依變數為跟隨距離(D3)，自變數則設為前方行人速度(Vf)、後方行人速度(Vb)、前後行人速度差( $\Delta V$ )、前方行人性別(G1)、後方行人性別(G2)、起始距離(D)、跟隨時間(T)、流量(Q)等八項。以 100 組行人資料共 604 筆樣本，進行模式中依變數與自變數間相關分析，並取出相關程度較高者進行模式構建。

表 48 跟隨距離模式變數相關分析表

自變數 \ 依變數		前方 性別 (G1)	後方 性別 (G2)	前方 速度 (Vf)	後方 速度 (Vb)	速度差 ( $\Delta V$ )	起始 距離 (D)	跟隨 時間 (T)	流量 (Q)
跟隨 距離 (D3)	Pearson 相關	.159**	-.048	.373**	.245**	.130**	.582**	-.157**	-.222**
	顯著性 (雙尾)	.000	.242	.000	.000	.001	.000	.000	.000

\*\*表相關顯著

由表 48 可知，自變數中以前方性別(G1)、前方行人速度(Vf)、後方行人速度(Vb)、前後行人速度差( $\Delta V$ )、跟隨時間(T)、起始距離(D)及流量(Q)等七項變數對於跟隨距離有顯著相關，除了跟隨時間與流量是負相關，其餘變數皆為正相關。其中相關程度較高者為起始跟隨距離、前方行人速度及後方行人速度。本研究將以此七項變數進行複迴歸分析。則統計結果如表 49 所示。

表 49 跟隨距離模式摘要表

模式	R	R 平方	調整後的 R 平方	估計標準誤
所有可能	.718	.516	.511	20.368

迴歸法

表 50 跟隨距離模式 ANOVA 表

模式		平方和	df	平均平方和	F	顯著性
所有	迴歸	263799.180	6	43966.530	105.977	.000 <sup>a</sup>
可能	殘差	247676.813	597	414.869		
迴歸	總數	511475.993	603			

表 51 跟隨距離模式刪除變數表

模式	刪除變數	共線性統計量		
		允差	VIF	最小允差
所有可能迴歸	後方速度	.000	.	.000

由表 50 中可發現，當利用所有可能迴歸法時，本跟隨距離模式的 $R^2$ 為 0.516，但因複迴歸模式需進行調整，調整後之 $R^2$ 為 0.511，已具有一定水準。再經由 ANOVA 表可得知模式在  $\alpha=0.05$  時具有相當之顯著水準。複迴歸模式中仍需注意模式中自變數之間的共線性問題，若自變項間相關程度過高，會造成自變項與因變項共變分析上的扭曲現象，通常利用允差 (tolerance)：某一自變項無法被其他自變項所解釋的殘差比，其值介於 0~1 (愈大愈好)，允差太小，表示此變項與其它自變項間有共線性問題。與變異數膨脹因子 VIF (Variance Inflation Factor) 與允差互為倒數 (愈小愈好)，VIF 的值愈大，表示自變項的容忍度愈小，表示迴歸模式愈有多元共線性問題。整體迴歸模式的共線性診斷可以透過特徵值 (eigenvalue) 與條件指數 (conditional index; CI) 來判斷。各變量相對的變異數比例 (variance proportions)，可看出自變項之間多元共線性的結構特性。當任兩變項在同一個特徵值上的變異數比例接近 1 時，表示存在共線性組合。

而表 51 中後方速度之變數，因允差為 0，表示具有高共線性問題，所以於分析中先被排除，但其餘變數仍需進行共線性診斷，診斷表如下：

表 52 跟隨距離模式共線性診斷表

模式	維	特徵值	條件指	變異數比例
----	---	-----	-----	-------



度	標	(常數)	前方 性別	前方 速度	速度 差	起始 距離	跟隨 時間	流量
所有	1	5.200	1.000	.00	.01	.00	.00	.00
可能	2	1.008	2.271	.00	.01	.00	.72	.00
迴歸	3	.580	2.994	.00	.86	.00	.01	.02
	4	.107	6.962	.01	.12	.03	.01	.03
	5	.067	8.832	.00	.00	.05	.01	.04
	6	.028	13.627	.02	.00	.30	.18	.86
	7	.010	23.085	.97	.00	.62	.07	.07

由表 52 中可以發現任兩變項沒有在同一個特徵值上的變異數比例接近 1，故可說明本模式剩餘六項自變數並無共線性問題。則本模式係數表如下：

表 53 跟隨距離模式係數表

模式	未標準化係數		t	顯著性	共線性統計量	
	B 估計值	標準誤差			允差	VIF
(常數)	50.732	7.165	7.081	.000		
前方性 別(G1)	4.816	1.751	2.750	.006	.939	1.064
前方速 度(Vf)	.239	.043	5.578	.000	.732	1.366
速度差 ( $\Delta V$ )	.242	.046	5.266	.000	.747	1.338
起始距 離(D)	.619	.031	20.151	.000	.893	1.120
跟隨時 間(T)	-3.035	.612	-4.956	.000	.901	1.110
流量 (Q)	-.293	.057	-5.167	.000	.914	1.095

故本研究之行人跟隨距離模式表示如下：

$$D_3 = 50.732 + 4.816(G_1) + 0.239(Vf) + 0.242(\Delta V) + 0.619(D) - 3.035(T) - 0.293(Q)$$

模式中常數項與六項自變數在統計上皆達到顯著，說明可以本式來說明行人跟隨距離，其中性別變數，表示若前方行人為男性，則跟隨距離會增加；當前方行人速度加快，則跟隨距離也會增加；當前後行人速度差增加，跟隨距離會隨之增加；若起始距離越長，則跟隨距離也越長；但當跟隨時間越長，則跟隨距離越可能縮短；當時流量越大，跟隨距離越短。

而本模式之殘差分析如表 54，可發現本模式之殘差平均值為 0，及圖 38 之標準化殘差圖。而本模式之 RMSE 為 20.25、MAPE 為 0.12，說明本模式具有良好的預測水準。

表 54 跟隨距離模式殘差分析表

	最小值	最大值	平均數	標準離差	個數
預測值	89.0511	211.9104	137.9967	20.91597	604
殘差	-69.11810	73.44492	.00000	20.26675	604
標準預測值	-2.340	3.534	.000	1.000	604
標準殘差	-3.393	3.606	.000	.995	604

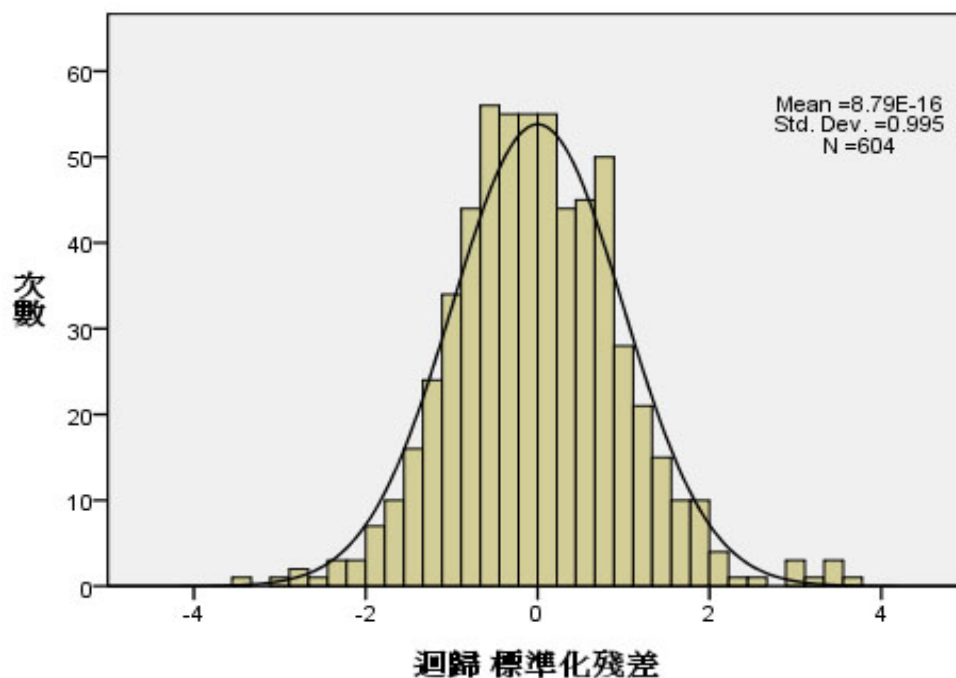


圖 38 跟隨距離模式標準化殘差圖

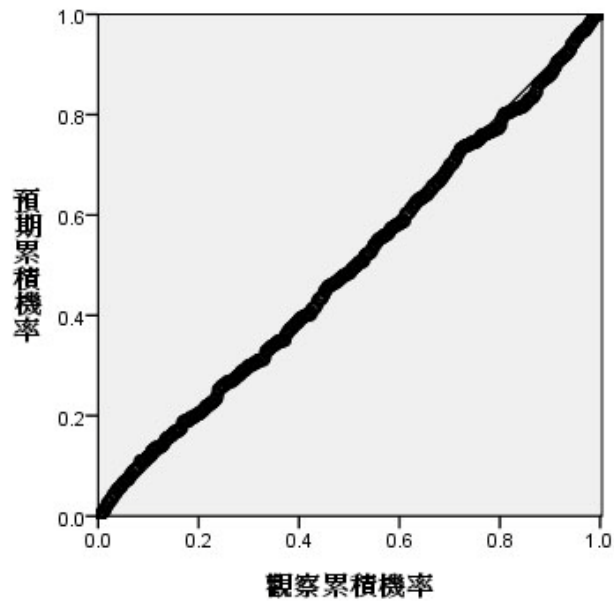


圖 39 跟隨距離模式殘差 P-P 圖

圖 40 顯示出本模式對於跟隨距離之預測值與觀察值間之誤差，圖下方之誤差線為絕對值誤差率(APE)，從圖中可看出，本模式多數的預測值與實際觀察值差距不大，其中偶有誤差率超過 50%，但整體而言仍為可接受之範圍，故本模式利用前方性別(G1)、前方行人速度(Vf)、前後行人速度差( $\Delta V$ )、跟隨時間(T)、起始距離(D)及流量(Q)等六項自變數求得之行人跟隨距離模式具有一定解釋能力，為可用之模式。

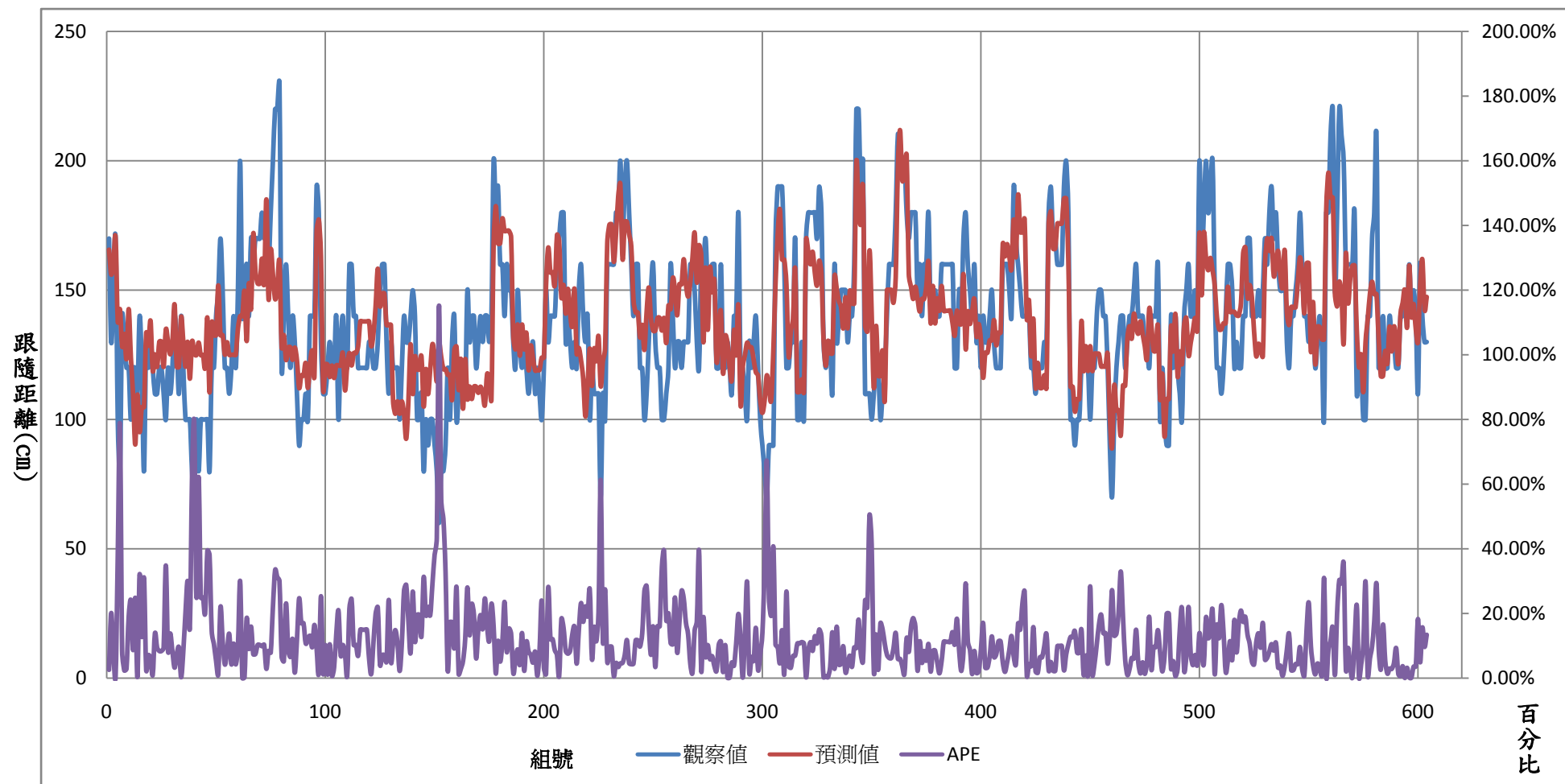


圖 40 行人跟隨距離模式比較圖

### 5.3.3 線性跟隨速度模式

根據文獻回顧之結果與本研究之資料分析，本模式中依變數為跟隨速度(Vb)，自變數則設為前方行人速度(Vf)、前後行人速度差( $\Delta V$ )、前方行人性別(G1)、後方行人性別(G2)、跟隨距離(D3)、跟隨時間(T)、跟隨終止原因(R)。以 100 組行人資料進行模式中依變數與自變數間相關分析，並取出相關程度較高者進行模式構建。

表 55 跟隨速度模式變數相關分析表

依變數 \ 自變數	前方 性別 (G1)	後方 性別 (G2)	跟隨 距離 (D3)	前方 速度 (Vf)	速度 差 ( $\Delta V$ )	起始 距離 (D)	跟隨 時間 (T)	流量 (Q)
Pearson	.076	.137**	.245**	.589**	-.481**	.283**	-.071	-.195**
後方 速度 相關 顯著性 (雙尾)	.061	.001	.000	.000	.000	.000	.083	.000

\*\*表相關顯著

由表 55 可知，自變數中以後方性別(G2)、跟隨距離(D3)、前方行人速度(Vf)、前後行人速度差( $\Delta V$ )、起始距離(D)及流量(Q)等六項變數對於後方行人跟隨速度有顯著相關，除了前後行人速度差與流量是負相關，其餘變數皆為正相關。其中相關程度較高者為前方行人速度、前後行人速度差、起始跟隨距離、及跟隨距離。但因速度差變數中數值的取得與依變數有關，若以所有可能迴歸法分析，會使模式產生錯誤。

故本研究刪除速度差變數，此時利用顯著影響判斷自變數的方式已不適用，故改用逐步迴歸法使模式自行選擇貢獻度高的變數，則將前方性別(G1)與跟隨時間(T)重新納入待選變數中。此時利用迴歸法中的逐步迴歸法進行變數篩選，首先模式中不包含任何預測變項，然後採順向選擇法，根據對模式的貢獻最大者，挑選預測變項進入迴歸模式中。而在每一步驟中，已被納入模式的預測變項則必須再經過反向淘汰法的考驗，以決定該變項要被淘汰亦或留下。

經過計算分析，統計中變數篩選結果如表 56 所示。

表 56 跟隨速度模式自變數逐步迴歸篩選表

模式	選入的變數	R	R 平方	調過後的 R 平方	刪除的變數	方法
1	前方速度(Vf)	.589	.347	.346	.	逐步迴歸分析法
2	起始距離(D)	.630	.397	.395	.	(準則:
3	跟隨距離(D3)	.643	.414	.411	.	F-選入的機率
4	流量(Q)	.652	.425	.421	.	<= .050
5	前方性別(G1)	.655	.429	.424	.	F-刪除的機
6	後方性別(G2)	.658	.433	.427	.	率 >= .100)。

表 57 跟隨速度模式 ANOVA 表

模式		平方和	df	平均平方和	F	顯著性
1	迴歸	114143.497	1	114143.497	320.022	.000 <sup>a</sup>
	殘差	214717.430	602	356.673		
	總數	328860.927	603			
2	迴歸	130564.263	2	65282.131	197.858	.000 <sup>b</sup>
	殘差	198296.664	601	329.945		
	總數	328860.927	603			
3	迴歸	136038.345	3	45346.115	141.102	.000 <sup>c</sup>
	殘差	192822.582	600	321.371		
	總數	328860.927	603			
4	迴歸	139675.514	4	34918.878	110.560	.000 <sup>d</sup>
	殘差	189185.413	599	315.835		
	總數	328860.927	603			
5	迴歸	140984.831	5	28196.966	89.749	.000 <sup>e</sup>
	殘差	187876.097	598	314.174		
	總數	328860.927	603			
6	迴歸	142324.283	6	23720.714	75.917	.000 <sup>f</sup>
	殘差	186536.644	597	312.457		
	總數	328860.927	603			

由上述表格中可發現，當利用逐步迴歸法時，本跟隨速度模式的 $R^2$ 為 0.433，但因複迴歸模式需進行調整，調整後之 $R^2$ 為 0.427，不甚良好。再經由ANOVA表可



得知模式在  $\alpha=0.05$  時具有相當之顯著水準。而模式中自變數之間的共線性問題，進行共線性診斷，因表格龐大，故只截取最後步驟之結果，診斷表如下：

表 58 跟隨速度模式共線性診斷表

模式	維度	特徵值	條件指標	變異數比例						
				(常數)	前方速度	起始距離	跟隨距離	流量	前方性別	後方性別
6	1	5.764	1.000	.00	.00	.00	.00	.00	.01	.01
	2	.622	3.044	.00	.00	.00	.00	.00	.54	.39
	3	.470	3.501	.00	.00	.00	.00	.00	.44	.57
	4	.082	8.369	.00	.03	.01	.04	.56	.00	.00
	5	.037	12.519	.01	.40	.30	.03	.00	.00	.00
	6	.014	20.273	.05	.08	.55	.93	.15	.01	.02
	7	.011	23.240	.94	.49	.14	.00	.29	.00	.00

由表 58 中可以發現任兩變項沒有在同一個特徵值上的變異數比例接近 1，故可說明本模式剩餘六項自變數並無共線性問題。則本模式係數表如下：

表 59 跟隨速度模式係數表

模式		未標準化係數		標準化	t	顯著性	共線性統計量	
		B 之估計值	標準誤差	Beta 分配			允差	VIF
6	(常數)	36.510	6.079		6.006	.000		
	前方速度	.618	.035	.598	17.507	.000	.814	1.229
	起始距離	.270	.032	.331	8.450	.000	.620	1.612
	跟隨距離	-.163	.034	-.204	-4.745	.000	.516	1.936
	流量	-.175	.049	-.115	-3.551	.000	.906	1.104
	前方性別	3.156	1.495	.066	2.112	.035	.971	1.030
	後方性別	3.071	1.483	.065	2.070	.039	.966	1.035

故本研究之行人跟隨速度模式表示如下：

$$Vb = 36.51 + 0.618(Vf) + 0.27(D) - 0.163(D3) - 0.175(Q) + 3.156(G1) + 3.071(G2)$$

模式中常數項與六項自變數在統計上皆達到顯著，說明可以本式來說明行人跟隨速度，其中性別變數，表示若前方行人為男性，則跟隨速度會增加；若後方行人為男性，則跟隨速度會增加；當前方行人速度加快，則跟隨速度也會增加；

當起始跟隨距離越長，跟隨速度會隨之增加；但當跟隨距離越長，則跟隨速度越慢；當時流量越大，跟隨速度越慢。

而本模式之殘差分析如表 60，可發現本模式之殘差平均值為 0，及圖 41 之標準化殘差圖。而本模式之 RMSE 為 17.57、MAPE 為 0.123，說明本模式具有良好的預測水準。

表 60 跟隨速度模式係數表

	最小值	最大值	平均數	標準離差	個數
預測值	65.1917	165.7055	115.6291	15.36317	604
調整預測值	65.3289	165.8963	115.6279	15.36891	604
殘差	-71.08698	86.16896	.00000	17.58828	604
標準殘差	-4.022	4.875	.000	.995	604

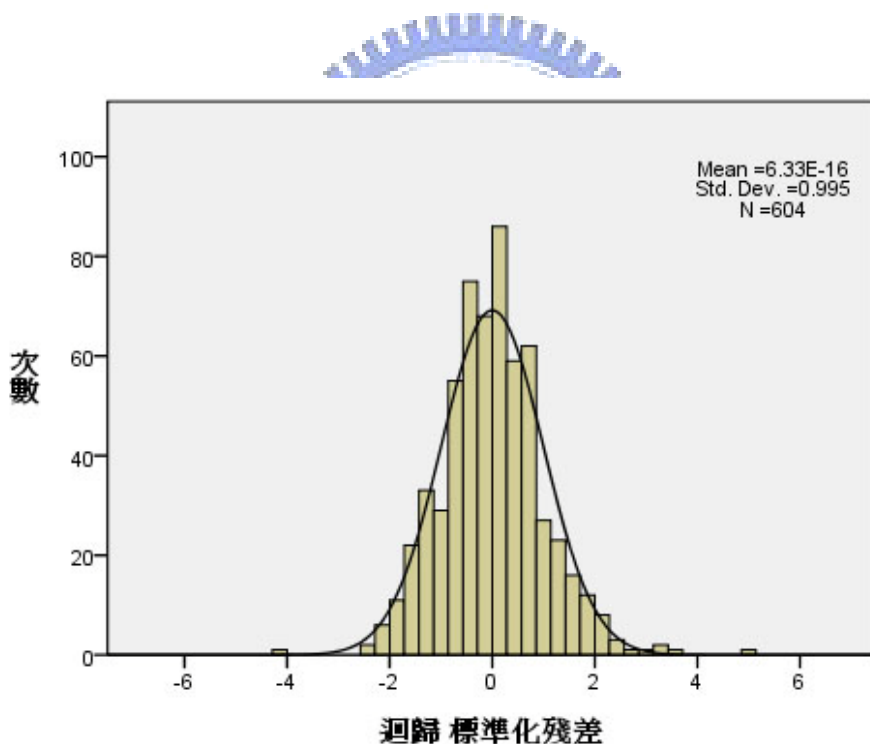


圖 41 跟隨速度模式標準化殘差圖

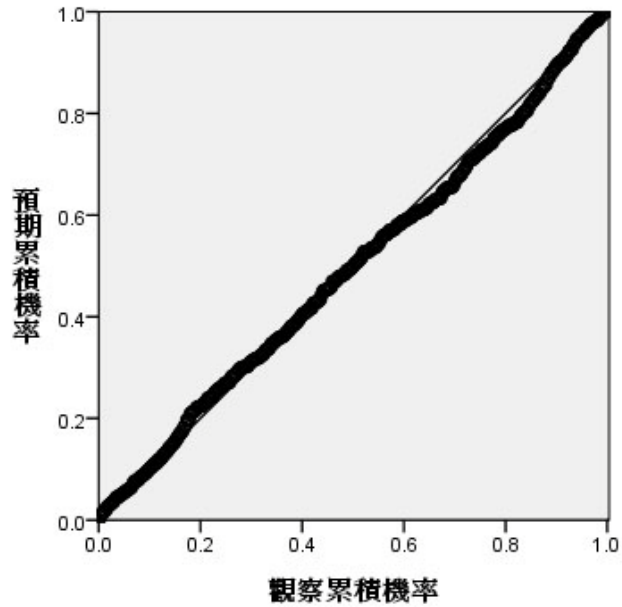


圖 42 跟隨速度模式殘差 P-P 圖

圖 43 顯示出本模式對於跟隨速度之預測值與觀察值間之誤差，圖下方之誤差線為絕對值誤差率(APE)，從圖中可看出，本模式多數的預測值與實際觀察值差距不大，其中偶有誤差率超過 50%，但整體而言仍為可接受之範圍，故本模式利用前方性別(G1)、後方性別(G2)、前方行人速度(Vf)、跟隨時間(D3)、起始距離(D)及流量(Q)等六項自變數求得之行人跟隨速度模式具有一定解釋能力，為可用之模式。

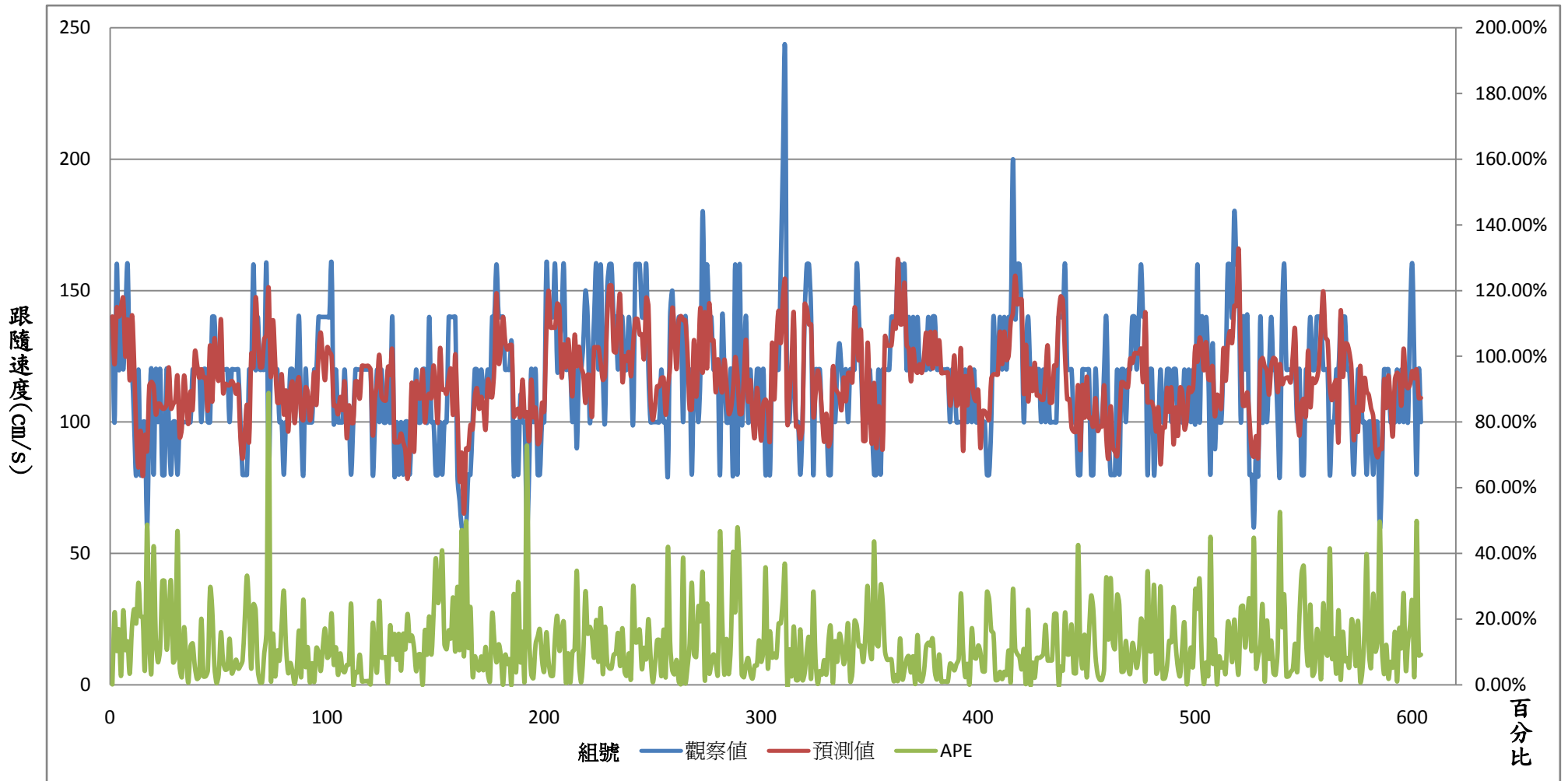


圖 43 行人跟隨速度模式比較圖

## 5.4 模式驗證與比較分析

本研究應用實地攝影調查，取得商業區交岔路口之行人樣本資料，利用統計方法進行分析，首先引用車流模式中 Pipe 理論與 GM 跟車理論之跟車模式，建立行人跟隨模式以及修正 GM 模式，爾後再利用現有行人跟隨資料建立行人跟隨距離模式與行人跟隨速度模式，但因修正之 GM 模式不比原有模式良好，故不進行驗證與比較，而所有建立之模式如表 61 所示：

表 61 行人跟隨模式

模式名稱	模式形式
Pipe 行人跟隨模式	$S = L_n + \left[ \frac{\dot{X}_{n+1}}{(55.56)} \right] \times L_n$
GM 行人跟隨模式	$a_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{0.362[V_{n+1}(t + \Delta t)]^{0.355}}{\Delta S^{0.102}} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$
行人跟隨距離模式	$D_3 = 50.732 + 4.816(G_1) + 0.239(Vf) + 0.242(\Delta V) + 0.619(D) - 3.035(T) - 0.293(Q)$
行人跟隨速度模式	$Vb = 36.51 + 0.618(Vf) + 0.27(D) + 0.163(D3) - 0.175(Q) + 3.156(G1) + 3.071(G2)$

經過統計分析結果，可以發現四種行人模式在 $R^2$ 的解釋能力上都有相當的差距，其中以Pipe行人跟隨模式最佳，高達 0.892；以GM模式解釋能力最差， $R^2$ 僅 0.286，並未達到可接受之門檻，而本研究建立之線性迴歸式則有 0.511 及 0.427 的解釋能力。相關比較表格如下：

表 62 行人跟隨模式比較表

模式	R 平方	RMSE	MAPE
Pipe 行人跟隨模式	0.892	0.75	0.315
GM 行人跟隨模式	0.286	37.63	0.801
線性行人跟隨距離模式	0.511	20.25	0.122
線性行人跟隨速度模式	0.427	17.57	0.123

表 62 中四種模式中的 $R^2$ 都不盡相同，但卻不能只以 $R^2$ 做為模式的優劣比較參數，因為此數值表示應變數能被自變數解釋的比例，也就是自變數能解釋依變數的能力。若要進行模式之間的比較，一般應用RMSE與MAPE來比較誤差的程度與比例，其中RMSE為均方誤差，此值會根據預測值與觀察值的大小而有所不同，例如本研究中Pipe跟隨模式中，RMSE為 0.75，係因為計算時所有預測值與觀察值的誤差皆為小數，才有此一結果，與其他模式的比較，會顯得小很多。但當我們以MAPE平均絕對值誤差率來比較時，則從公式中可以知道，MAPE係計算預測值與觀察值間的絕對誤差率，此值不會受到目標值大小的影響，即使預測值與觀察值皆很小，都可以有效表現出誤差的比率。

本研究中四個行人模式之 MAPE 值，以行人跟隨距離模式最小，為 0.122，其次為行人跟隨速度模式，為 0.123，其次為 Pipe 行人跟隨模式，為 0.315，最後則為 GM 行人跟隨模式，為 0.801。模式優劣順序如下：

線性跟隨距離模式 > 線性跟隨速度模式 > Pipe 模式 > GM 模式

由上述分析結果可以說明，本研究建立之行人跟隨距離模式為目前行人跟隨模式中解釋能力相對好的模式。

分析所得之模式共有以上四種，於研究之結尾，為了瞭解此模式是否可應用於觀察樣本之外，及其他商業區路口，本研究進行模式驗證，以確定行人跟隨距離模式為預測能力較佳之模式，利用額外取得之 11 筆跟隨資料，並帶入模式中求得各相關誤差值如表 63：



表 63 行人跟隨模式驗證比較表

	Pipe		GM		跟隨距離		跟隨速度	
	觀察值	預測值	觀察值	預測值	觀察值	預測值	觀察值	預測值
1	3.25	1.80	-	-	170	171.62	100	129.52
2	3	2.52	80	49.992	160	161.94	140	131.15
3	3.25	2.88	40	0	170	166.72	160	141.88
4	2	1.44	-	-	150	167.38	80	130.54
5	2.2	2.16	80	70.989	160	157.7	120	128.91
6	2.4	2.52	40	24.842	170	162.48	140	139.64
7	2.2	2.16	-40	23.663	160	167.32	120	141.27
8	2.5	2.88	-	-	140	162.44	160	153.73
9	2.5	2.88	0	26.570	140	152.82	160	141.37
10	2.5	2.52	-40	0	140	148.04	140	129.01
11	3	2.16	-40	0	160	152.88	120	125.75
<b>RMSE</b>	0.587		36.692		10.523		21.114	
<b>MAPE</b>	0.153		0.682		0.056		0.149	

經由驗證資料分析中，我們仍可確定，以 MAPE 值來看，模式預測的誤差率由優至劣依次為：線性跟隨距離模式 > 線性跟隨速度模式 > Pipe 模式 > GM 模式，此結果與本研所得之結果一致，更說明本研究建立之行人跟隨距離模式可以應用於商業區行人跟隨行為之解釋與預測其行為。

## 第六章 結論與建議

本研究為分析台北市商業區具行人專用時相號誌化路口行人穿越道上行人跟隨行為特性，以及影響行人的因素，對行人流動時之跟隨特性進行分析，以瞭解行人與人流特性之關係性，並構建行人跟隨行為模式，以作為後續行人跟隨行為相關研究及相關單位設計與建置行人穿越道等參考依據，所得之結論與建議如下。

### 6.1 結論

1. 在微觀行人跟隨特性，我們發現以下結論：

(a) 在終止跟隨原因方面：

分為前方轉向、後方轉向與持續跟隨。將此特性以跟隨者性別分組進行相關分析，根據列聯表的卡方檢定，Pearson 卡方值為 7.713，其 P-value 為 0.021 小於顯著水準 0.05，顯示出性別與終止跟隨型態之間有顯著相關。

(b) 在跟隨速度方面：

領導者平均速度為 116.89 cm/s，跟隨者平均速度為 115.55 cm/s，在 95% 的信賴水準下，前方領導者速度與後方跟隨者速度無顯著差異。但前方領導者速度與後方跟隨者速度具有統計上顯著相關，其相關係數為 0.594 屬於中度相關。檢定結果也說明，當跟隨者的性別不同，其速度也具有顯著差異，而以男性速度較女性速度快。另外在 95% 的信賴水準下，統計結果發現男性行走速度較女性快，當前方領導者為女性時，因為跟隨行為的發生，會導致後方男性跟隨者降低本身速度以符合前方女性領導者的速度。

而在相關分析中以後方性別、跟隨距離、前方行人速度、前後行人速度差、起始距離及流量等六項變數對於後方行人跟隨速度有顯著相關，除了前後行人速度差與流量是負相關，其餘變數皆為正相關。

(c) 在起始跟隨距離方面：

本研究設定 3 種距離，分別為前後行人之頭間距，D1；前方後腳跟至後方前腳尖間距，D2；前方身體至後方頭部間距，D3。其平均距離分別為：

114.25 cm、67.3 cm、135 cm。其中男性跟隨者平均起始距離比女性長，但獨立 t 檢定則顯示，沒有顯著證明男性跟隨者之起始跟隨距離大於女性跟隨者。此結果說明起始跟隨距離並無一定產生模式。

(d) 在跟隨距離方面：

當前方領導者為男性時，後方跟隨者不分性別，其保持之跟隨距離會比當前方領導者為女性時要長，換句話說，若前方為男性，則後方跟隨距離較遠；若前方為女性，則後方跟隨距離較近。在相關分析中，我們發現，前方性別、前方行人速度、後方行人速度、前後行人速度差、跟隨時間、起始距離及流量等七項變數對於跟隨距離有顯著相關，除了跟隨時間與流量是負相關，其餘變數皆為正相關。

(e) 在跟隨時間方面：

探討行人發生跟隨行為後，至跟隨行為結束為止，中間經過時間的長度，本研究依觀察所得之確切跟隨時間進行研究分析。整體平均跟隨時間為 3.00 秒，最短跟隨時間為 1.5 秒，最長跟隨時間為 8.5 秒。而當前方領導者為女性時，後方平均跟隨時間為 3.1517 秒，較前方領導者為男性之 2.8095 秒要多；同樣當後方跟隨者為女性時，其跟隨時間為 3.125 秒也較後方男性跟隨者長。故再進行獨立檢定但結果均不顯著。

(f) 在終止原因與跟隨時間方面：

透過 ANOVA 分析結果，說明跟隨時間越長，其願意繼續保持跟隨行為之可能也越高，反之則會發生前方轉向離開，或是後方轉向、加速超越…等情況。

(g) 自由行人流方面：

在此觀察樣本中，共有 6 組樣本發生在自由行人流的情況，可以發現該性別組合中前後行人皆為同性別，推測在自由流速時，與前方領導同樣性別的跟隨者才能以相似速度前進，而不發生其他行為(如超越行為)，仍然保持跟隨狀態者有 4 組，且跟隨時間皆大於 3 秒。發生有前方轉向及後方轉向者各有 1 組，且其跟隨時間僅在 2.5 秒與 3 秒。

(h) 性別因素：

在所有可能影響原因中，性別因素為本研究認為與車流模式的不同重要因素，我們發現在行人流中，跟隨行為發生以後，不論是速度的變化、跟隨距離的保持、跟隨終止原因等，都與跟隨者的性別及領導者的性別

有很大的關係，此變數係行人模式中特有之影響因子，故納入模式構建以期達到較佳之結果。

2. 在微觀行人跟隨行為模式，本研究做出以下結論：

(a) 引用車流現有模式：

由於行人跟隨流動仍與車流中跟車行為相似，經過引跟車理論中的線性Pipe's Theory及非線性模式的GM model，將研究之行人跟隨資料代入現有模式中，並進行模式參數校正後，發現以線性模式之Pipe行人跟隨模式之解釋能力較好， $R^2$ 達到 0.892，模式預測誤差MAPE則為 0.315；而非線性GM模式之 $R^2$ 則僅有 0.286，模式預測誤差MAPE高達 0.8。由此可以說明以現有跟車理論套用在行人跟隨模式上，以線性模式之預測能力較非線性模式好，若能將GM model中的前後速度差值修正，或許可以獲得更佳的結果。

(b) 建立線性行人跟隨模式：

從前一步分析中得知以線性模式來解釋行人跟隨行為較佳，故嘗試建立線性行人跟隨模式，依變數以後方行人的反應為設計，選取跟隨距離及跟隨速度兩項做為兩個模式之構建，自變數的刺激項則根據相關分析及統計迴歸法選取變數，並完成模式建立。

對於行人跟隨距離模式，共選取六項自變數，迴歸所得之調整後的 $R^2$ 為 0.511，對於模式預測誤差MAPE則為 0.122；相對於行人跟隨速度模式之調整後的 $R^2$ 為 0.427，模式預測誤差MAPE則為 0.123，則以行人跟隨距離模式的變數解釋能力較好、模式預測誤差較小。

經過驗證資料分析結果，說明本研究建立之行人跟隨距離模式為具有良好之模式解釋能力，以及良好模式預測能力之行人微觀跟隨行為模式。

## 6.2 建議

1. 本研究以實地攝影調查行人穿越道上行人移動情形後，再以人工的方式取得行人之速度、跟隨間距、性別、流量等資料，用以分析行人行為特性，雖在資料誤差上以由統計結果說明與實際狀況無差異，但仍建議未來應發展電腦自動判別系統，協助取得行人步行之位移資料，以求得更精確之速度、加速度等資料，應有助於改善模式之誤差，並能減少資料判讀時間。

2. 本研究受限錄影地點，無法從高點以垂直角度拍攝行人移動過程，並且觀測時會受到現場車流影響，對於行人跟隨行為的判定造成許多限制，建議未來可找尋更合適之地點，能清楚看出行人行為，以及不受到車流影響之處進行拍攝，以驗證本研究行人行為模式之代表性與實用性。
3. 本研究對於行人跟隨行為之假設過多，造成真正符合本研究所稱之跟隨行為僅占全部通過路段行人數的 7%，未來研究將可放鬆限制，逐步採用群體行人對群體行人之跟隨行為、一對多、多對一等不同跟隨型態，以擴大研究的適用性。
4. 本研究以攝影調查法蒐集之行人資料屬外在、客觀之影響因素，建議未來研究可利用問卷調查法，瞭解行人心理層面之影響因素例如行人是否有特殊跟隨偏好、是否有設定自我步行速度、是否趕時間，或可配合計畫行為理論，用以對模式進行改良。或嘗試使用其他不同之研究方法，如：類神經模式，構建行人行為模式，以提升預測率，並可作不同方法適用性上之比較。
5. 在非線性 GM 模式中，其刺激—反應模式變數中，造成模式預測偏差過大的速度差項，建議未來行人模式研究可嘗試修正此變項，以建立符合行人跟隨行為之非線性模式。



## 參考文獻

1. 內政部戶政司，「戶籍人口統計年報」，民國 98 年 4 月。
2. 行政院經濟建設委員會，「中華民國臺灣 97 年至 145 年人口推計報告」，民國 97 年 9 月
3. 黎韋利，「人行道服務水準評估之研究」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 88 年 6 月。
4. 黃俊杰，「都市人行道界面組成型態對行人知覺影響之研究」，台灣大學碩士論文，民國 87 年 6 月。
5. 林上閔，「都市商業區行人對步道類型選擇偏好之研究」，國立交通大學碩士論文，民國 86 年 6 月。
6. 李協政，「商業區人行系統行人流動特性研析與行為模式-以台北市信義商圈路口為例」，國立交通大學碩士論文，民國 97 年 6 月。
7. 許添本、田欣雷、賴以軒，「捷運車站行人流特性分析」，都市交通季刊，第 15 卷第 1 期，1-11 頁，民國 89 年 3 月。
8. 林廉凱，「捷運車站乘客動線人流模式與干擾量度之研究」，國立交通大學碩士論文，民國 91 年 6 月。
9. 溫日宏，「新市鎮行人步道系統規劃與設計之研究：以高雄新市鎮綜合示範社區為例」，國立交通大學碩士論文，民國 84 年 6 月。
10. 丁育群，「建築物逃生器具之種類及其設計」，建築師，民國 77 年 6 月。
11. 鍾隆文，「視覺式行人偵測與二維向量行人模擬之研究」，國立台灣大學博士論文，民國 86 年 6 月。
12. 藍武王、張瓊文，「GM 與 ANFIS 機車跟車模式之比較」，運輸計畫季刊，第 33 卷第 3 期，511-536 頁，民國 93 年 9 月。
13. 內政部營建署，「市區道路工程規劃及設計規範之研究」，民國 95 年 4 月。
14. Mehammed S. Tarawneh. (2001). *Evaluation of Pedestrian in Jordan with Investigation of Some Contributing Factors*. Journal of Safety Research, 32, p.p. 229-236.
15. Abishai Polus, Joseph L. Schofer and Ariela Ushpiz. (1982). *Pedestrian Flow and Level of Service*. Journal of Transportation Engineering, p.p.46-56.
16. William H.K. Lam, John F. Morrall, Herbert Ho. (1995). *Pedestrian Flow in Hong Kong*. Transportation Research Record, 1487, p.p.56-62.
17. William H.K. Lam, Chung-yu Cheung. (2000). *Pedestrian Speed/Flow Relationship for Walking Facilities*. Journal of Transportation Engineering, p.p.45-50.
18. Muhammad M. I. and Robert B.N..(2007). *Behavioural Issues in Pedestrian Speed Choice and Street Crossing Behaviour: A Review*. Transport Reviews,



- 28:1, p.p.61 – 85.
19. Alexandra Wills. (2004). *Human movement behaviour in urban spaces: implications for the design and modelling of effective pedestrian environments*. Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 31, p.p. 805 -828.
  20. Fruin, J.J. (1990). *Pedestrian Planning and Design*. Elevator World Educational Services Division, Mobile, AL..
  21. Hall, D. (1966). *The Hidden Dimensions*. Doubleday and Co., New York, N.Y.
  22. Teknomo, K. (2006). *Application of microscopic pedestrian simulation model*. Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour Vol 9 issues 1, p.p.15-27.
  23. Hoogendoorn SP., Bovy PHL., Daamen W..(2003). *Walking infrastructure design assessment by continuous space dynamic assignment modeling*. Journal of Advanced Transportation, Vol . 38, Issue:1, p.p.69-92.
  24. Inger Marie Bernhoft, Gitte Carstensen. (2007). *Preferences and behaviour of pedestrians and cyclists by age and gender*. Transportation Research Part F, p.p.83–95.
  25. Serge P. Hoogendoorn, Piet H.L. Bovy. (2005). *Pedestrian Travel Behavior Modeling*. Networks and Spatial Economics, Issue:5, p.p.193–216.
  26. Yordphol Tanaboriboon, Sim Siang Hwa, Chin Hoong Chor. (1986). *Pedestrian Characteristics Study in Singapore*. Journal of Transportation Engineering. Vol. 112, No. 3, pp. 229-235.
  27. Teknomo, K. (2002). *Microscopic Pedestrian Flow Characteristics:Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model*. PhD Dissertation. Japan.
  28. Motoharu Hosoi, Shintaro Ishijima, and Akira Kojima. (1996). *Dynamical Model of a Pedestrian in a Crowd*. IEEE International Workshop on Robot and Human communication, p.p.44-49.
  29. Weng, W.G., Shen, S.F., Yuan, H.Y., Fan, W.C. (2007). *A Behaviot-Based Model for Pedestrian Counter Flow*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications Vol. 375, Issue: 2, p.p.668-678.
  30. Armin Seyfried, Bernhard Steffen, Thomas Lippert. (2006). *Basics of modeling the pedestrian flow*. Physica A 368, p.p.232-238.
  31. Fang W., Yang L., Fan W.. (2003). *Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model*. Physica A, 321, p.p. 633 – 640.
  32. D. Helbing, P. Molnar, F. Schweitzer.(1998). *Computer Simulations of Pedestrian Dynamics and Trail Formation*. Evolution of Natural Structures, p.p. 229-234.
  33. D. Helbing, P. Molnár.(1995). *Social force model for pedestrian dynamics*. Physical review. D. Particles and fields, Vol. 51, Issue:5, p.p. 4282-4286.

34. R. Kukla, J. Kerridge, A. Willis, J. Hine.(2001). *PEDFLOW: Development of an Autonomous Agent Model of Pedestrian Flow*. Transportation Research Record, Vol. 1774, p.p. 11-17.
35. V.J. Blue, M.J. Embrechts and J.L. Adler. (1997). *Cellular Automata Modeling of Pedestrian Movement*. IEEE, p.p.2320-2323.
36. Masakuni Muramatsu. (1999). *Jamming Transition in Pedestrian Counterflow*. Physica A.
37. Gerlough, D.L., Huber, M.J. (1975). *Traffic Flow Theory: A Monograph*.
38. Washington, D.C. (2000). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board Special Report 209.
39. Antonini, G., Bierlaire, M., Weber, M. (2006). *Discrete choice models of pedestrian walking behavior*. Transportation Research Part B, 40, p.p.667-687.

