

國立交通大學

交通運輸研究所

碩士論文

建立巨微觀機車混合車流模式

A Macro-Micro Model of Mixed Traffic Flow  
of Cars and Motorcycles

指導教授： 邱裕鈞 教授

研究生： 孫晟安

中華民國一〇二年六月

建立巨微觀機車混合車流模式

A Macro-Micro Model of Mixed Traffic Flow of Cars and Motorcycles

研究生：孫晟安

Student: Chen-An Sun

指導教授：邱裕鈞

Advisor: Yu-Chiun Chiou

國立交通大學

交通運輸研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Traffic and Transportation

College of Management

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master

in

Traffic and Transportation

June 2013

Taipei, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年六月

# 建立巨微觀機車混合車流模式

學生：孫晟安

指導教授：邱裕鈞 博士

國立交通大學交通運輸研究所碩士班

## 摘要

按照詳細程度來分，車流模式可以分為：巨觀(Macroscopic)、中觀(Mesosopic)與微觀(Microscopic)三種模式，分別應用時機關係到準確性與效率之間的權衡。巨觀車流模式在於求解大量車流行為之描述，優點在於處理時間效率高但準確性較為觀車流模式低；而微觀車流模式則針對於車輛與車輛間之刺激與反應，優點在於資料之詳細程度。為了呈現於長廊路段單純之車流行為與接近路口的複雜的車隊等候，分別利用巨觀模式描述單純的長廊路段與利用微觀模式描述鄰近路口路段可確保同時具有準確性與時效性。然而，如何求得最佳之巨微觀中間介面位置與如何設計界面資訊轉換機制即是巨微觀模式的核心問題。再者，為了解釋亞洲市區道路內主要小客車與機車混合車流，建立巨微觀混合車流模式有其必要性。

基於上述觀點，本研究嘗試建立一巨微觀車流模式以描述台灣混合車流。本研究所提出之巨微觀混合車流模式的創新思維有三點：1. 結合兩種模式的優點，並可正確流暢傳遞車流之資訊；2. 考慮機車插空隙的性質，並透過車種比例決定車種的擁擠密度；3. 加入多車道的模式，並考慮車道之間車輛的互動與變換車道。在模式驗證上，本研究以兩架攝影機自高樓拍攝一段長度為 300 公尺之三車道都市公路，並透過每秒擷取畫面記錄每輛小客車與機車之位置軌跡於長廊路段與鄰近路口路段。

本研究於不同介面設置位置比較所提出之模式的表現差異。準確性之評估準則係利用對稱平均絕對誤差百分比(SMAPE)比較實際資料與模擬流量每秒之結果於不同車道之小客車與機車。如同預期，介面越靠近路口，效率性越高但準確性則降低。然而，效率性改善與準確性降低的程度皆隨著介面越靠近路口而降低。小客車車流與機車車流均有合理之模擬結果。研究結果發現模擬機車車流之誤差率較小客車流量大，可能造成原因為受到轉向車流和路邊停車之影響。此外，長廊路段之誤差大於鄰近路口路段之誤差，因為車流於鄰近路口路段受到號誌影響。內車道之誤差較其他車道小，因為快車道禁止機車行駛。整體而言，本研究所提出之巨微觀模式表現是可靠的。

**關鍵字：**混合車流、機車、多車道、巨微觀轉換。

# A Macro-Micro Model of Mixed Traffic Flow of Cars and Motorcycles

Student: Chen-An Sun

Advisor : Dr. Yu-Chiun Chiou

Institute of Traffic and Transportation

National Chiao Tung University

## Abstract

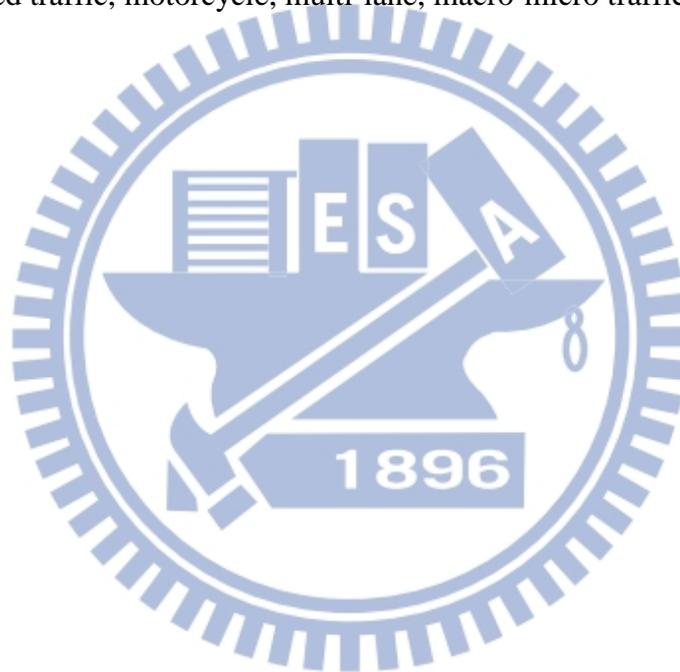
In light of the level of details, three categories of traffic flow models: macroscopic, mesoscopic, and microscopic, are independently adopted for the trade-off between simulation accuracy and efficiency. The macroscopic models accounting for the behaviors of a group of vehicles are obviously more efficient but less accurate than the microscopic models which replicate the movements of individual vehicles. However, to replicate the traffic movement behaviors along a corridor containing segments with simple traffic behaviors and intersections with complex queuing, weaving and turning behaviors, it is rationale to use of macroscopic models to simulate traffic behaviors moving along segments and use of microscopic models to replicate traffic behaviors approaching intersections for compromising simulation accuracy and efficiency. However, how to determine the optimal location of the interface of macro- and microscopic models and how to design the interfacing mechanism to convert macroscopic flows into microscopic flows are at the heart of the integrated models, namely, the macro-micro models. Furthermore, to acknowledge the prevailing mixed traffics of cars and motorcycles on Asian urban streets, mixed macroscopic and microscopic models are considered.

Based on these, this study attempts to develop a macro-micro model which can account for the mixed traffic condition in Taiwan. The novelties of the proposed macro-micro model are threefold: 1) Ability to convert upstream macroscopic traffic flow into downstream microscopic flow. 2) Consideration of the lateral drifts and transverse crossings of motorcycles by determining the jam density and free flow speed according to car-motorcycle density ratio. 3) Consideration of lane changing behaviors at the roads with more than three lanes. To calibrate and validate the proposed models, a video-taking of a three-lane urban street was conducted. Trajectories of all cars and motorcycles within the study segment (300m in length) and intersection were then frame by frame traced and recorded.

The performances of the proposed model under various locations of the interface are compared. Accuracy index is measured by the SMAPE values between real and simulated second-flows of cars and motorcycles at different lanes and distances to the intersection. Efficiency index is of course measured by the simulation times. As expected, the closer to

the intersection of the interface is, the higher efficiency but the lower accuracy it has. However, the improvement in efficiency and deterioration in accuracy is diminishing as the distance to the intersection decreases. Both flow of cars and motorcycles are well simulated. It is also found that the error rates of simulated motorcycle flows at different lanes are higher than those of simulated car flows. One of the reasons for that may be the influence of turning flow and parallel illegal parking. Furthermore, the error rates at the mid-road section are higher than at the intersection because the traffic flows are restricted by the signal control. The error rates of traffic flows in inner lanes are lower than those of outer lanes because of the prohibition of motorcycles in using the inner lane. Overall, the performance of the proposed model is promising.

**Keywords:** Mixed traffic, motorcycle, multi-lane, macro-micro traffic flow model.



## 誌謝

從一開始的起頭想法到之後論文的完成，絕對不是一個人可以辦到的。因為有許多人的幫助才有辦法完成。同時發現自己的能力實在有限，常常會因為遇到問題而失望。

謝謝邱裕鈞老師平日的教導與意見，總是覺得老師在研究上很認真，也在課堂上給予許多的幫助。在論文上的指導也是多鼓勵學生去嘗試看看，並在適時的時機將我們導正回來。也感謝所上的所有老師，有他們在任教的課程上也提供各樣的幫助，讓我們知道原來還有很多不懂的東西。感謝所辦的柳小姐和何小姐，除了日常的打工以外還幫我們處理許多行政事務，還願意包容我們這群什麼都要慢個幾天才能處理的小夥子們。

感謝這兩年一起努力的夥伴們，因為有你們，我的研究生生活多了很多樂趣。同一家的史蒂芬大力相挺，還有學園辦公室願意出借辦公大樓攝影。人很好的得政也在口試中幫了許多忙，統計很厲害的奎安在運輸實務上也提供了很多的點子。很會焦慮的育瑄雖然很少露面，一直提醒我們重要期限快到了。很快就考上了的榕芳也是非常厲害的把一切事情都處理妥當，帥哥豪邁的笑聲總是引起大家的歡樂。感謝家內的 RFTG 小組在忙碌的生活中帶來樂趣，還有第一研究室衝鋒陷陣的好夥伴。感謝一直陪我吃潛艇堡的冠宇，感謝很能聊的阿龍和提供點心的紹谷。謝謝很會拍照的丁丁，還有其他的同班同學。謝謝會一直來關心大家的 Victor，還有幫忙找尋有用電腦程式的 Jose。謝謝螃蟹學長辛苦帶我們做計劃，也提供了不少論文上的意見。感謝清潔阿姨的用心、鄭小姐、陳小姐的幫忙。

最後要感謝自己的父親給予很大的支持，無論是在程式上或是想法上，否則沒有辦法完成論文。還有母親的每日無時無刻的照顧，令我沒有後顧之憂。感謝弟弟平常的關心，聊許多事情。謝謝在這段時間很關心我也很愛我的子慧，傾聽我任何的難過和喜樂，能在這段時間認識妳真的是恩典。謝謝所有為我禱告的人，還有最有力的天父爸爸。帶我到這邊念書、學習、讓我經歷這一切。

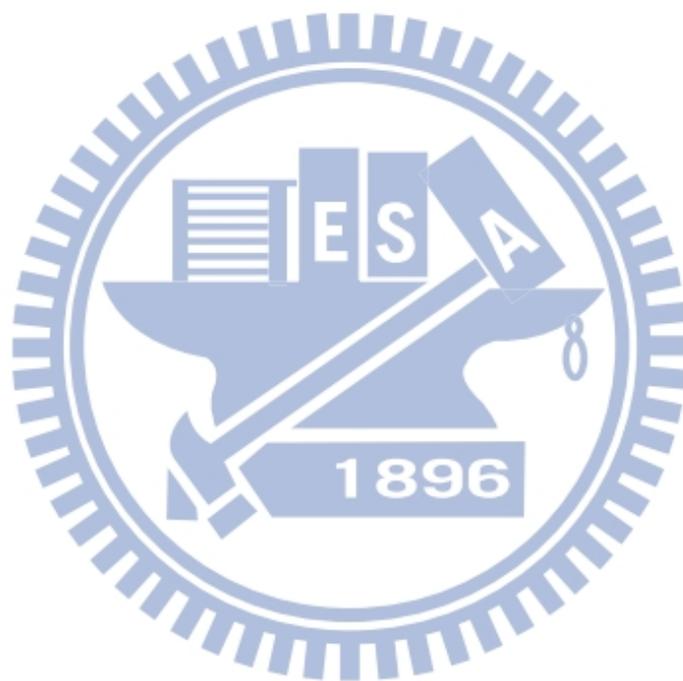
孫晟安 謹誌於

國立交通大學交通運輸研究所

中華民國一〇二年六月

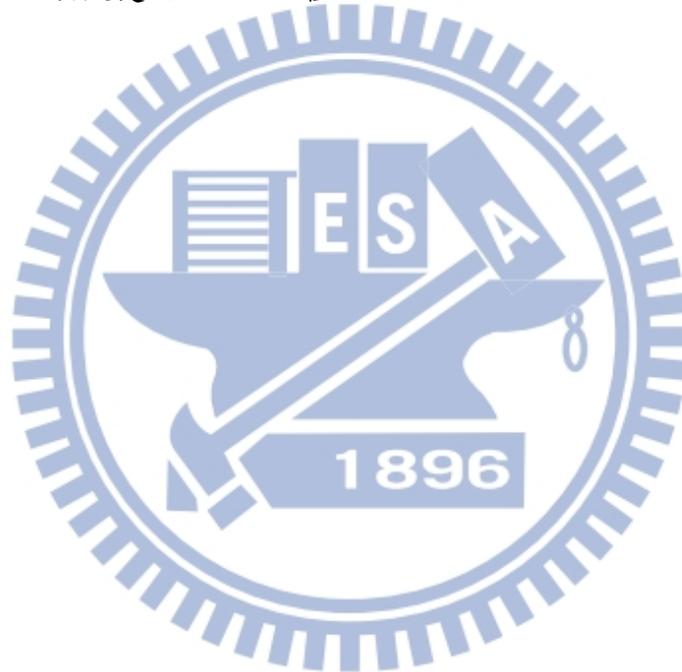
# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
誌謝 .....	iv
表目錄 .....	vii
圖目錄 .....	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 研究流程 .....	3
1.4 研究內容 .....	4
第二章 文獻回顧 .....	6
2.1 微觀車流模式 .....	6
2.1.1 微觀均質車流模式 .....	6
2.1.2 微觀混合車流模式 .....	7
2.2 巨觀車流模式： .....	8
2.2.1 巨觀均質車流模式 .....	9
2.2.2 巨觀混合車流模式 .....	11
2.5 巨微觀混合介面轉換 .....	18
2.6 小結 .....	20
第三章 模式建構 .....	21
3.1 巨觀混合車流模式 .....	21
3.2 巨微觀轉換模式 .....	27
3.3 微觀混合車流模式 .....	29
3.4 模式流程 .....	30
第四章 實驗分析 .....	32
4.1 實驗模擬 .....	32
4.2 實驗路段選擇 .....	41
4.3 資料處理 .....	42
第五章 模式驗證 .....	51
5.1 參數推估 .....	51
5.2 模式結果與驗證 .....	52
第六章 結論與建議 .....	66
6.1 結論 .....	66
6.2 建議 .....	67



# 表目錄

表 2-1 巨觀混合車流模式彙整表 .....	17
表 3-1 模式變數參數註釋表 .....	21
表 4-1 模擬參數設定表 .....	33
表 4-2 實地道路指示物 .....	46
表 5-1 參數推估表 .....	51
表 5-2 微觀模式參數表 .....	52
表 5-3 模擬道路長度分界表 .....	52
表 5-4 模式模擬情境時間效率 .....	53
表 5-5 SMAPE 數值評估準則 .....	54
表 5-6 路口處之 SMAPE 值 .....	55
表 5-7 距路口 100 公尺處之 SMAPE 值 .....	55



# 圖目錄

圖 1-1 研究流程圖.....	3
圖 1-2 實際研究範圍界定圖.....	5
圖 3-1 小客車與機車密度關係圖(一).....	25
圖 3-2 小客車與機車密度關係圖(二).....	25
圖 3-3 小客車速率與密度關係圖.....	26
圖 3-4 機車速率與小客車密度關係圖.....	27
圖 4-1 內車道車種密度資料之輸入.....	33
圖 4-2 中間車道車種密度資料之輸入.....	34
圖 4-3 外車道車種密度資料之輸入.....	34
圖 4-4 內車道小客車密度變化.....	35
圖 4-5 中間車道小客車密度變化.....	35
圖 4-6 外車道小客車密度變化.....	36
圖 4-7 中間車道機車密度變化.....	36
圖 4-8 外車道機車密度變化.....	37
圖 4-9 小客車於不同時階之密度分布圖.....	38
圖 4-10 機車於不同時階之密度分布圖.....	39
圖 4-11 內車道車輛產生時間.....	39
圖 4-12 中間車道車輛產生時間.....	40
圖 4-13 外車道車輛產生時間.....	40
圖 4-14 小客車密度衝擊變化(A)左車道(B)中間車道(C)外車道.....	40
圖 4-15 機車密度衝擊變化 (A)中間車道(B)外車道.....	41
圖 4-16 影像銜接圖.....	42
圖 4-17 觀測座標系統變換示意圖.....	43
圖 4-18 由量測點計算觀測者到原點之距離.....	45
圖 4-19 實際拍攝之影像.....	47
圖 4-20 車輛點擊程式使用畫面.....	48
圖 4-21 車道線之空間座標圖-調整前.....	49
圖 4-22 車道線之空間座標圖-調整後.....	49
圖 5-1 情境一(150-150)內車道巨微觀轉換-小客車.....	56
圖 5-2 情境一(150-150)中間車道巨微觀轉換-小客車.....	56
圖 5-3 情境一(150-150)中間車道巨微觀轉換-機車.....	57
圖 5-4 情境一(150-150)外車道巨微觀轉換-小客車.....	57
圖 5-5 情境一(150-150)外車道巨微觀轉換-機車.....	58
圖 5-6 情境二(200-100)內車道巨微觀轉換-小客車.....	58
圖 5-7 情境二(200-100)中間車道巨微觀轉換-小客車.....	59
圖 5-8 情境二(200-100)中間車道巨微觀轉換-機車.....	59

圖 5-9 情境二(200-100)外車道巨微觀轉換-小客車.....	60
圖 5-10 情境二(200-100)外車道巨微觀轉換-機車 .....	60
圖 5-11 情境三(250-50)內車道巨微觀轉換-小客車.....	61
圖 5-12 情境三(250-50)中間車道巨微觀轉換-小客車.....	61
圖 5-13 情境三(250-50)中間車道巨微觀轉換-機車.....	62
圖 5-14 情境三(250-50)外車道巨微觀轉換-小客車.....	62
圖 5-15 情境三(250-50)外車道巨微觀轉換-機車.....	63
圖 5-16 實際道路路口流量變化圖 .....	63
圖 5-17 情境一(150-150)路口流量變化圖 .....	64
圖 5-18 情境二(200-100)路口流量變化圖 .....	64
圖 5-19 情境三(250-50)路口流量變化圖 .....	65



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

車流理論的貢獻在於透過模式來描述車流在現實中的不同行為。從早期的跟車模式到近年來的連續流模式，許多研究致力於模式的建立。不同的模式所注重的行為也不盡相同。由觀察角度來區分，車流理論可以分為：巨觀、中觀與微觀。微觀車流所描述的是車與車之間的相互刺激與反應，視周遭情況來決定自身的加減速度；巨觀車流則能描繪整體車流的特性與變化。中觀車流模式則近似於巨觀，能夠描述個體對於前方道路密度的反應情形。在微觀車流模式中，所使用的變數為個體速度、車間距和加速度，最著名並廣泛被應用的模式為 GM 跟車模式。反之，巨觀則使用車流平均速度、密度、流量等車流整體變數，較為知名的模式為 LWR 連續流模式。然而，巨觀模式的不足在於無法提供詳細的互動行為，微觀則是無法於時間上有效率的處理大量的路網資料。因兩者的使用時機不同，若在不同面向之間能夠相互連結，則能夠依照不同需求以呈現車流，故巨微觀模式之建立有其必要性。此為本研究之動機之一。

早期的車流模式專注在均質車流和單一車道環境，日後有許多研究開始對混合車流和多車道的模式進行研究。儘管均質車流易於模化，卻於生活中較為少見，故混合車流有其發展性，也較符合現實情況。其解釋不同車種的理想速度和車體大小有所差異，使得車流間產生不同之行為與干擾。多車道的問題帶出轉換車道和超車等特殊行為，也相對增加模式的複雜度。國內車流最大的特色在於機車數量眾多，因其車身較小故其行為模式也較特殊。國外的研究相對較少提及機車行為，多數為探討大貨客車與小客車、快車與慢車之互動。機車體積小，故於道路壅塞時仍可藉由穿梭行為 (filtering) 繼續前進；機車並無車道分隔的概念，同一車道上能同時有一輛以上的機車並行前進。若單純以小客車當量來進行計算流量則會產生偏誤，並且機車超車時不一定需要變換車道。顯然國外之混合車流研究不適用於描述國內機車混合車流問題，故有發展機車混合車流模式之必要性。此為本研究之動機之二。

當考慮到機車與小客車之混合車流密度，就必須將多車道環境一併考慮。早期車流模式多是建立於單車道問題，但現實生活中車道數量往往與車流量成正比。多車道環境將會影響到車輛的轉移，並可討論變換車道之原因，可能是因為密度過高而使駕駛者無法達到滿意的速度，或是駕駛員本就有轉彎之預期而變換車道。此為本研

究之動機之三。

本研究針對不同的巨觀、微觀車流模式之回顧，比較各模式之特色。並檢視過去研究中是否有針對機車之混合車流，將機車與小客車之互動行為考慮進模式中。選擇其中適合用以處理混合車流之成熟模式，嘗試進行轉換。於建立巨微觀模式後也能針對其特性進行分析與驗證，以確保模式之貢獻與實用性。最後，對於此模式提出未來可以延續之研究與日後於號誌化路口之幫助。

## 1.2 研究目的

本研究將從過去的研究中，引用發展成熟之巨觀、微觀車流模式，並定義介面的轉換。其中需要考慮到混合車流，包含小客車和機車。在國內機車數量龐大且行為特殊，故必須將其考慮在內。在研究中也需顧及多車道的形式，進而產生的變換車道行為。本研究所研究之道路範圍為市區路口與路口間之路段，如圖 1-2 所示。因此，本研究的目的如下：

1. 找尋現有發展成熟之微觀混合車流模式，並能夠適用於國內機車車流行為的描述。將其使用於巨微觀混合車流模式中。
2. 於文獻中找尋發展成熟之巨觀混合車流模式，將其使用於巨微觀混合車流模式中，並加入機車混合車流所帶來之影響與相互作用。
3. 界定巨觀與微觀混合車流模式間之介面，解決車流與車輛之間的轉換問題，以因應不同資料需求，並期望模式可以應用於國內市區鄰近路口之道路。
4. 經由車流模擬軟體所得結果，驗證模式之準確性。並選定特定實驗路段，蒐集實際車流資料，利用兩者之車流特性變數，例如密度，來驗證模式。
5. 分析介面設置位置不同而造成之差異。透過道路中不同處的介面設置後的結果進行比較，檢視不同情境之下的效率與準確性，並解釋其差異之原因與結果。

### 1.3 研究流程

本研究之流程如圖 1-1 所示。

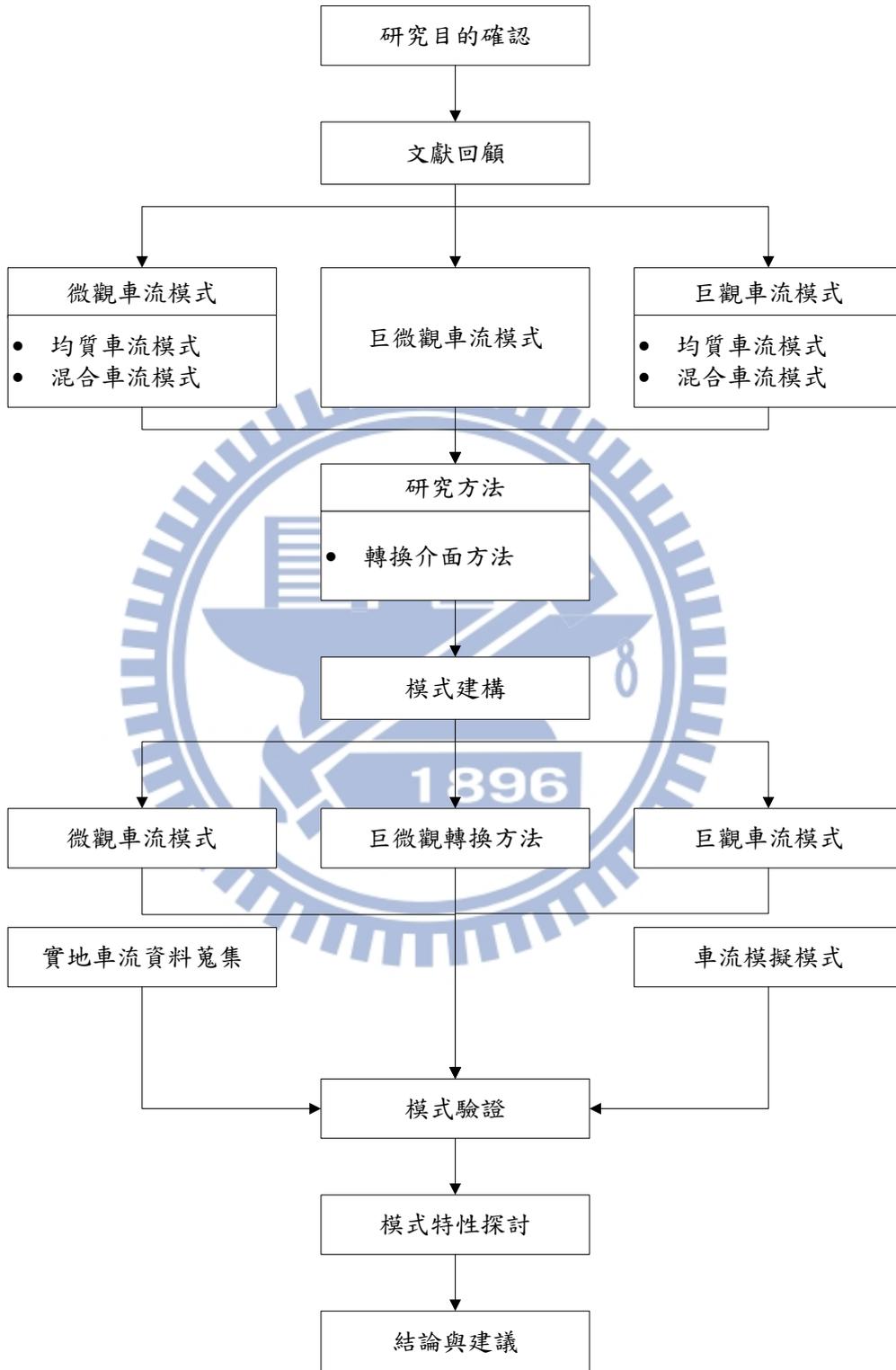


圖 1-1 研究流程圖

## 1.4 研究內容

依據前述之動機與目的，本研究之內容為建構適用於國內機車混合車流之巨微觀模式，參考國外相關文獻已進行模式之調整，並進行參數之推估，最後驗證模式之適用性，探討巨微觀介面之時空分析。故將研究內容分成下列項目：

### 1. 確認問題方向與研究目的

透過問題之觀察，確立研究之動機與目的。從國內現形之車流中找找出問題，並找出研究之動機，從建立本研究之五項研究目的，根據此方向逐步完成。

### 2. 回顧相關文獻

根據研究目的，閱讀相關研究與文獻。其中包含三個子部分：巨觀混合車流模式、巨微觀混合車流模式和微觀混合車流模式。了解現有之研究對於車流模式之發展與異同，並了解其所欠缺之部分與無法適當解釋國內機車混合車流行為。分別從巨、微觀兩面向回顧，並找出發展成熟之現有模式作為建立模式基礎。最後回顧關於巨微觀轉換之方法與模式，了解車流資訊如何順利傳遞。

### 3. 巨微觀機車混合車流模式之建立

透過文獻之回顧，依據不同面向找出合適之混合車流模式，並檢視其所欠缺之處，探討機車混合車流與非機車混合車流之差異，進行模式的調整。同時將多車道納入考慮，探討車道間之變換車道與超車行為於模式中，進而將三組模式結合，完成模式之建立。

### 4. 實地資料蒐集與模式驗證

為探討模式建立後之適用性，本研究將蒐集國內市區道路之實地機車混合車流資料。將於模式確認後進行參數之估計與模式配適度之探討。

### 5. 巨微觀介面之時空分析

在確認模式之完整性，則可探討於一市區道路上應如何設立巨微觀轉換介面，了解不同設置點所造成之差異，並分析其差異產生之原因。

## 6. 結論與建議

針對研究之結果，做研究結論總整理，歸納研究之貢獻，並對於尚未探討或不足之處，提出後續研究之建議。

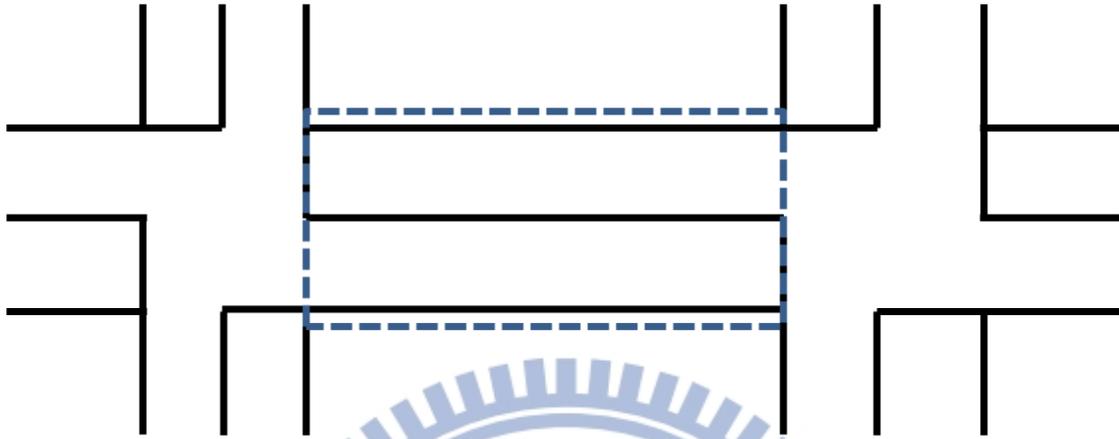
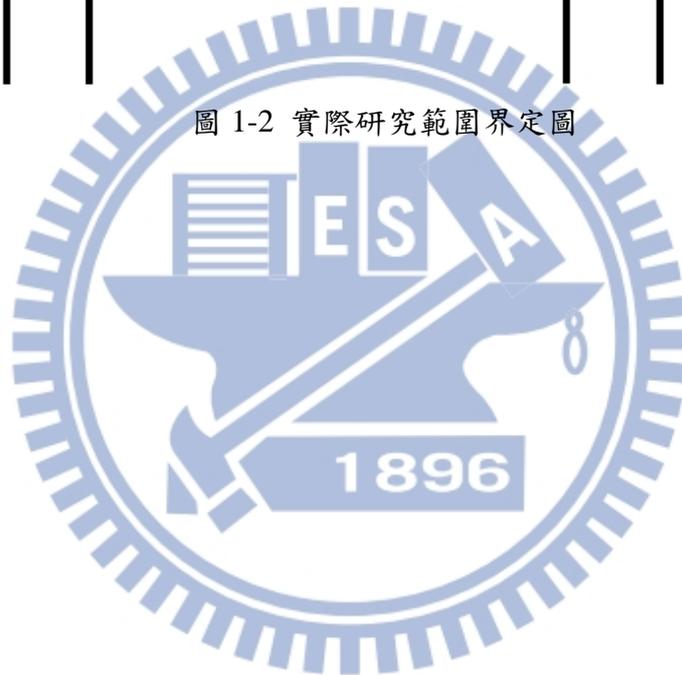


圖 1-2 實際研究範圍界定圖



## 第二章 文獻回顧

本研究將針對不同面向之車流模式間的連結作處理，故需要回顧現有的不同車流模式。其中可以分作巨觀車流模式與微觀車流模式兩項，並且將之細分為均質車流與混合車流兩類，並回顧機車車流相關之文獻。中觀車流性質較貼近巨觀車流，故將一並討論之。其中巨觀車流中較常被提出的模式有三類，分別是由 Lighthill 和 Whitham (1955) 並 Richards (1956) 所提出的 LWR 連續流模式、由 Payne (1979) 和 Whitham (1974) 建立的高階 PW 模式、由 Prigogine (1960) 所提出的氣體動力車流模式。此外，也包括對巨觀微觀之連結單獨出來進行文獻的回顧，檢視目前轉換介面上之處理方式。本研究文獻彙整如下：

### 2.1 微觀車流模式

微觀車流模式主要在探討車與車之間之互動。其所使用之動態變數包含了個體速度、時間車距與空間車距。其以車輛為單位，並以下方原則呈現車輛之反應：

$$Response = Sensitivity \cdot Stimulus$$

由車輛自身之敏感度與外在所施予之刺激，而導致車輛的加減速度。微觀車流模式係建立在單車道環境，故車子無法超越前車，只能對前車之行為作出行動。

#### 2.1.1 微觀均質車流模式

早期微觀車流模式發展較知名的為 GM 跟車模式，其亦為相關跟車模式之基礎。以簡易的形式呈現車子的動態加速度：

$$a_n(t) = cv_n^m(t) \frac{\Delta v(t-T)}{\Delta x^l(t-T)}$$

由此式可得知跟車模式為連續型模式。其描述加速度受到自身速度、與前車相對速度、與前車相對距離影響。不同的  $m$  值與  $l$  值能夠與不同的巨觀模式相連結。

Bando *et al.* (1995) 將各車輛的理想速度列入考慮，解釋個體以達到自身理想速度的方式決定加速度的改變，亦即 OVM (Optimal velocity model) 模式：

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = k[V(s_n - l_n) - v_n(t)]$$

其中 $l_n$ 為車輛 $n$ 之車長， $s_n$ 為車輛 $n$ 與前車之間距。然而理想速度模式所遭遇的問題為出現不實際的加減速度值，車輛可能產生突然急停至速度完全為零的情況，此現象並不符合實際。

Helbing 和 Tilch(1998)提出了 GFM(Generalized Force Model)模式，亦即廣義力模式，目的是為了改善原有的 OVM 模式的缺陷。OVM 模式中有時會出現過大的加速度或減速度值，卻依然產生事故的情形。其模式中之參數數量相對較少且意義明確，校估也相對容易。使用之參數包含：理想速度、加速時間、車間距、最小車距、剎車時間、加速減速互動範圍。車子之加速度是由廣義力的總和來決定，其不符合作用力等於反作用力之牛頓定理。其形式如下：

$$\frac{dv_n}{dt} = k(v_m - v_n(t)) + k(V(s) - v_m) + \lambda\Theta(-\Delta v)\Delta v$$

右手項之前兩項為加速力，後者為互動力。研究中發現此模式所模擬之結果與實際車流資料較符合，此模式也能夠延伸到多車道上。

Jiang *et al.*(2001)認為 GFM 模式仍有問題存在，最大的問題即其模式對於相對速度的敏感度不佳。經過模擬的結果，作者認為 GFM 模式在後車速度較前車慢時，兩車之速度差的影響不顯著，並不符合現實狀況。因此以 GFM 模式為基礎，建立 FVDM(Full Velocity Difference Model)模式。其加速度式如下：

$$\frac{dv_n}{dt} = k(v_m - v_n(t)) + k(V(s) - v_m) + \lambda\Theta(-\Delta v)\Delta v + \lambda\Theta(\Delta v)\Delta v$$

透過增加最後一項使得在跟車速度較慢時也得以產生影響。經模擬發現，其最大加速度不會超過 GFM 模式的值，並且能夠模擬較正確的延誤值。

### 2.1.2 微觀混合車流模式

在微觀車流模擬中，細胞自動機(Cellular Automata)被廣泛應用。因其操作簡易卻仍有效率的演算法能夠用以描述車流特性，最早用於車流領域的為 Nage 和 Schreckenberg(1992)所建立之模式。其模式演算程序為 1.加速 2.減速 3.隨機性 4.車輛移動，此四項步驟同時間應用到所有車輛上。而細胞的排列為一維並排，每個細胞最多只會有一輛車在其中，且為單一車種。其模擬結果散佈在車流基本關係圖中有不錯的表現。日後有許多相關研究將之應用在不同的路面幾何上，甚至是二維的多車道情

境。

Meng *et al.*(2007)使用細胞自動機模擬混合車流，其中包括機車跟小客車。此研究將單一車道分為三條子車道，因機車體積較小，故可同時存在於同一車道上。在模擬的過程中，將小客車的優先行駛的因素考慮進去。其模式給定一機車變換車道機率，以描述機車變換車道之行為，卻僅適用於單車道上。

Lan *et al.*(2009)利用細胞自動機模擬包括機車之混合車流與其無規律的行為。有鑑於機車體積與小客車不同，則設定小客車佔用 12(2x6)個格位，機車則只佔用 2(1x2)個格位。以此設定進行車流的模擬有助於描述機車的特殊行為，單一車道為三格之寬度，故得以呈現機車與小客車並行的情況。除了加減速等程序，另外包含平行的移動邏輯，如超車與變換車道。此研究能以能夠模擬多車道的行為，其中同時考慮機車和小客車的變換車道行為。

Lee *et al.*(2009)等人提出一微觀機車混合車流模式，用以應用於都市區域。主要針對機車之行為進行模式建立，並找到幾項重要與小客車相異之處，並以倫敦市中心之實地資料驗證模式。第一點差異為跟車距離，因考慮到機車體積小，能夠在前車緊急剎車時平行移動以避免擦撞，故其安全距離相較於小客車小，並以其煞車距離來計算。第二點為側向時空車距，因為機車超車與變換車道行為較小客車容易，故機車也會受到前方側邊車輛之影響。最後一點為機車之路徑選擇方法，其使用羅吉特模式決定其駛車行為。每個選項之效用受到前車與後車之距離、車種、速度等因素影響，並且又受到上一個時階的決定影響有關，以確保機車行為不會突然改變過大。

## 2.2 巨觀車流模式：

巨觀車流模式在於描述整體車流之特性與行為，其中包含車流之平均速率、密度與流量。三個變數之間互有關係且能以下式表示：

$$q = ku$$

流量為密度與速率之乘積。因此關係式，即為車流的基本關係式。將實地車流資料繪製到座標圖上，則可分別觀察密度與速率、密度與流量、流量與速率之關係。在此前提下使得許多的巨觀模式被建立。

### 2.2.1 巨觀均質車流模式

連續流的模式最早係由 Lighthill 和 Whitham (1955) 並 Richards (1956) 所提出。藉由流量守恆的關係，視車流作流體處理。其中包含流量守恆式：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

對密度作時間的偏微與對流量作空間的偏微，等號右邊於流量守恆之下為零。此外加上車流的基本關係，意即車流速度為密度之函數：

$$u = u_e(k)$$

然而此模式因簡單，故有些缺點存在。其在低流量時的準確性不佳，且車子會有突然加速或減速的狀況發生。最大的問題即車流行為受限於基本關係式上的一對一關係，只能描述均衡下的車流行為，並且無法對車速有更流暢的呈現。Payne(1979)和 Whitham(1974)建立了 PW 模式，其中加入了加速度的動量公式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{\tau} (U_e(k) - u) - c_0^2 \frac{k_x}{k}$$

加速度之動量守恆式能夠描述車輛大部分時間並處於非均衡之狀態，以描述車輛之加速度是受到前方車群之密度所影響。另外 Kerner 和 Konhäuser(1994)則建立的另一形式，能夠解釋更多的車流現象。其中包含紓解效果(relaxation)、壓力效果(pressure)和黏性效果(viscosity)：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u^e(k) - u}{\tau} - \frac{c_0^2(k)}{k} \frac{\partial k}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

此動量守恆式能描述車流的動態行為，可以解釋車流對均衡速度的反應、走停行為。然而其模式仍有欠缺，Daganzo(1995)批評 PW 模式的缺失，即其無法呈現車流的非等向性。流體和車流的不同點為流體粒子受到各個方向的刺激，而車體只受前方刺激影響。再者，車與車之間的互動是不對稱的，並且車有各自的特性。因此使得日後有許多新的車流理論被建立。

Denos(1962)提出於多車道的情境中，各個車道間的密度會相互作用影響，因此車道之密度並不會受限於均衡情形下。在車流行進時，密度會上下震盪。而解決方法為建立一兩車道交互作用之流量守恆式，並且考慮到反應時間在內。其假設條件為整個高速公路系統內之車輛總數並無增加或減少，意即沒有出入口的設置；並車道密度假

設於縱段位置各自獨立。透過設定每個車道有各自之均衡流量外，並以自身車道與鄰近車道之密度差做為主要影響因子。最後函數需要加上一敏感係數進行調整，若車流量保持在少量時則敏感係數可為定值；反觀於車道擁擠時，就算有意願變換車道但受限於車道擁擠而無法執行，故此時必須考量到敏感係數數值之增加。其研究顯示敏感係數最大不得超過 0.9。

Zhang(1998)提出於非均衡下的車流模式，因為車流大多時間是處在非均衡狀態下。其有三個假設，一為存在一均衡的速度密度基本關係；二為駕駛者對其前方的反應存在著延滯；三為密度是車速的函數。並建構一微觀承接巨觀車流模式：

$$\frac{dx_{n+1}(t+T)}{dt} = v_e(\rho(x_{n+1} + \Delta, t))$$

其中  $T$  為舒緩時間。以泰勒展開式處理，而小客車會呈現時間跟空間上的反應。其形式如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u^e(r) - u}{\tau} - \alpha k (u'_e(k))^2 \frac{\partial k}{\partial x}$$

其優點是除了改善原有 LWR 模式的問題之外，也解決反向車流(wrong way travel)的行為，並 LWR 模式可視為其中一個特例。

Gupta 和 Katiyar(2007)建立一套非等向性連續流模式。在許多高階連續流模式中經常存在逆向行駛的現象，而此模式包含一速度梯度項。其優點是能夠將等向性消除。一般而言為了減少複雜度，常會視時間車距(headway)為密度之倒數，而此模式建立於改善之跟車理論上，將時間車距以微擾級數的方式呈現之。並且進一步延伸，將之修改成適用混合車流的形式。其原本加速度公式如下：

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = a(u_e(b_n) - u_n(t)) + \alpha \lambda \Delta u$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = a(\bar{U}(k) - u) + a\bar{U}'(k) \left( \frac{1}{2k} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{6k^2} \frac{\partial^2 k}{\partial x^2} - \frac{1}{2k^3} \left( \frac{\partial k}{\partial x} \right)^2 \right) - 2\beta c(k) \frac{\partial u}{\partial x}$$

再者，令整體的密度為各車種之密度加總，進而將式子改寫成：

$$k(x, t) = \sum_{m=1}^M k_m(x, t)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} &= \frac{(\bar{U}_m(k) - u_m)}{\tau} + a\bar{U}_m(k) \left( \frac{1}{2k_m} \frac{\partial k_m}{\partial x} + \frac{1}{6k_m^2} \frac{\partial^2 k_m}{\partial x^2} - \frac{1}{2k_m^3} \left( \frac{\partial k_m}{\partial x} \right)^2 \right) \\ &\quad - 2\beta c(k) \frac{\partial u_m}{\partial x} \end{aligned}$$

其中 $\beta$ 為等向性指標。當 $\beta$ 趨近於無限大時，可以消除等向性特性。

Jin(2010)嘗試建立一連續流變換車道模式，用以描述高速公路的匯入與匯出。變換車道通常都是因為兩車道上的情況不平衡，而透過修改基本關係式：

$$u = U(\bar{k}) = U(k(1 + \epsilon))$$

其中 $\epsilon(x, t) = \frac{N_{LC}t_{LC}}{kLT}$ 為變換車道強度變數。在微觀 $\epsilon$ 為駕駛的特性，巨觀裡則是地理位置。

將上式帶入到流量守恆式則成為：

$$k_t + (U((1 + \epsilon)))_x = 0$$

變換車道之車輛的基本關係圖形會因 $\epsilon$ 的加入而降低，代表道路容量下降、擁擠密度變小，並多車道之換道行為於車流量稀少時可以忽略。

### 2.2.2 巨觀混合車流模式

Zhang 和 Jin(2002)提出一延伸的混合車流運動波模式。將自由車流速度設定成為整體車流速率為各車種流量之加總，除以總車流密度：

$$u_f = \frac{\sum_{i=1}^n k_i u_{fi}}{\sum_{i=1}^n k_i}$$

$$\begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} k_1 u(k_1, k_2) \\ k_2 u(k_1, k_2) \end{pmatrix}_x = 0$$

最後將模式修改成守恆式樣式，並以三角形的基本關係式呈現自由車流速率與擁塞情況時之情形。此模式需要假設任何車種均以同一速度行駛，此為較不合理之處。而其優點在於滿足先進先出規則，並且具有非等向性之特性。經由 Riemann 問題中求解，得知其可描述特徵波與衝擊波之表現。

Logghe 和 Immers(2008)指出原本的連續流理論無法解釋走停行為和混合車流。則其建立一混合車流的架構，流量守恆式的建構如下：

$$\frac{\partial K}{\partial t} + Q'_e \frac{\partial K}{\partial x} = 0$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix}, \quad Q'_e = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{e1}}{\partial k_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{e1}}{\partial k_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{en}}{\partial k_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{en}}{\partial k_n} \end{bmatrix}$$

同時該研究以不同車種的道路使用程度作區分，其原理近似於車種密度上的差異。假設車種  $i$  使用道路的比例表示為  $\alpha_i$ ，同等於車種的密度比例，在不同的模式中會以不同的形式表現之。則可以將其與基本關係式結合：

$$q_i = \alpha_i \cdot Q_{ei}^h \left( \frac{k_i}{\alpha_i} \right)$$

其針對混合車流以不同定義的  $\alpha_i$  之運動波模式做分類。可分成 7 種類別，分別是：

1. 多車種類別：當不同類的車種之駕駛行為都是固定時，可直接令  $\alpha_i = \frac{k_i}{k_{tot}}$ 。
2. 特別車道：Daganzo(1997)將 LWR 模式擴展成兩種車種，不同的車種可以行駛的車道也有不同，其中  $\alpha_i = \min \left( \frac{k_i}{k_{tot}}, \frac{m_d}{m} \right)$ ， $m$  為車道總數， $m_d$  則為可行駛的道路數。
3. 等空間：每種車有其各自的基本關係式，而車流量等於  $q_i = k_i \frac{Q_{ei}^h(k_{tot})}{k_{tot}}$ 。
4. 等間距：由 Benzoni-Gavage 和 Colombo(2002) 中所提出，假設不同種車之間的間距都一樣， $\alpha_i = dk_i + L_i k_i$ 。
5. 車間距與車長成比例：Chanut 和 Buisson(2003) 之作法令  $\alpha_i = \frac{\frac{k_i}{k_{ji}}}{\sum_{n=1}^N \frac{k_n}{k_{jn}}}$ ，以擁擠密度

作為解釋可用之路段。

6. 等速率：如 Zhang 和 Jin(2002) 的模式，將關係式寫成： $Q_{ei}^h(k_i) = \frac{1}{\tau_i} - \frac{k_i L_i}{\tau_i}$ 。此類表示不同車種在道路上的占有比例和車輛密度的關係。
7. 使用者均衡：藉由 Wardrop 所提出的使用者均衡，最小化旅行時間並最大化其速度的模式建構，意即沒有車輛能不透過影響慢車的速度來加速。再者，用三角形的基本關係式建構兩種車種的密度流量關係。

$$Q_{ei}^h(k) = \begin{cases} k \cdot u_{fi} & k \leq k_{Mi} \\ \frac{k_{Mi} u_{fi}}{(k_{Mi} - k_{Ji})} \cdot (k - k_{Ji}) & k > k_{Mi} \end{cases}$$

將情形分成三種：自由車流、半擁擠(semi-congestion)和擁擠。於自由車流時，各種車輛皆由自由車流速率在移動，由流量偏微式可得到兩特徵波為各自之自由車流。半擁擠的情形下，在使用者均衡的原則下慢車依然是處於自由車流速率行駛，而快車已經經歷擁擠狀態，但依然可以在不影響慢車速度的情形下行駛最大速率。在擁擠狀態時兩種車都無法以自由車流速率行駛，並小於慢車的自由車流速率。第一個特徵波就等同於車流速率，第二個則為(weighted congestion branch)。其中提及 Newell(1998)的移動瓶頸理論，將較緩慢的車形容成移動的瓶頸，其他車輛為了要超越慢車而產生了延滯和容量降低。並探究了不同的情境下衝擊波的移動與改變。本篇研究係利用使用者均衡之原則建構模式，並檢視於自由車流(Free flow)、同步流(Synchronized flow)、壅塞車流(Wide moving jam)三種不同車流現象中的模式表現。

Colombo(2002)建立 2x2 雙曲線車流模式，其模式如下：

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial((q - q_*) \cdot u)}{\partial x} = 0$$

$$u(k, q) = \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k_{Max}} \right) \cdot q$$

藉由最大密度 $k_{Max}$ 和動量門檻 $q_*$ 使模式能夠描述車流特性。藉由檢視特徵波(characteristic wave)可得知在高密度時剎車會產生衝擊波、加速會產生紓解波；密度低時則相反。Gavage 和 Colombo(2003)進一步建立混合車流模式：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \psi(r)(k_1 U_1, \dots, k_n U_n)}{\partial x} = 0$$

$$u_i = \psi(l_1 k_1 + \dots + l_n k_n) U_i$$

其中 $U_n$ 為車種 $n$ 的最大速度， $\psi(r)$ 為前方密度對車速的影響程度。由不同車種的車長決定速度，但不同車種之間距皆固定。其可對於大小不同的車種進行應用。

Wong 和 Wong(2002)從 LWR 模式為基礎，發展出一具有異質性駕駛的混合車流模式。每位駕駛會針對自己理想的速度來行駛，在特定車流密度之下會有一速度機率分佈。當密度越高，速度的變異也會越小，因為越擁擠車輛的速度會被迫趨於一致。整體車流的密度為各車種密度之加總，而所有車種都將遵守車流之基本關係式。文獻

中提到各車種的速度不僅受到自身密度影響，同時也受其他車種之密度影響。最後所  
 得出之流量守恆式如下：

$$\frac{\partial k_m(x, t)}{\partial t} + \sum_{n=1}^M \left( U_m \delta_{mn} + k_m \frac{\partial U_m}{\partial k_n} \right) \frac{\partial k_m(x, t)}{\partial x} = 0, \quad \forall m, n = 1, 2, \dots, M$$

其中  $U_m \delta_{mn} + k_m \frac{\partial U_m}{\partial k_n}$  為車種  $m$  對車種  $n$  的反應波速，亦即表現不同車種的特性。當  
 $M=1$  時就縮減成原本的 LWR 模式，也就是在均質之駕駛的情況下。其因以 LWR 模式  
 為基礎，故優點為方便執行，而能夠解釋的行為也相對較少。

Zhang(2003)認為在多車道的車流並沒有辦法維持等向性的特性，並且提出了一套  
 準則用以判定車流模式是否擁有此特性。等向性的特性出現係因波速度快過於車流的  
 速度，單車道的模式因沒有超車和變換車道的行為，故較具有非等向性之特性。

Ngoduy(2011)提到大部分的一階連續流模式因為簡單之特性而被廣為應用，卻仍  
 然無法描述散佈點(Widely scattered)形式的流量密度基本關係。經文獻得知高速公路之  
 容量對交通情形最為敏感，故以隨機變數的方式處理道路容量。令容量以 Weibull 形  
 式分佈，能描述非線性的車流現象如容量驟減。將整體的容量、擁擠密度和臨界密度  
 依據各個車種之小客車當量和車種比例決定。此以小客車當量之作法常被用於混合車  
 流模式中，卻無法正確描述機車在車流之間的行為。儘管高階的模式皆能描述非線性  
 隻車流事件，但因此方法之簡易程度，依然有其貢獻。

除連續流模式之外，尚有氣體動力模式之研究。氣體動力是在描述一群回小的氣  
 體分子在空間中產生隨機的行為。此類模式可被視為巨觀層級，其利用波茲曼公式描  
 述車流行為，並將車流視作氣體看待。最早由 Prigogine(1960)提出，以位置、速度、  
 理想速度、時間為變數解釋車流的相位空間密度。Wanger *et al.*(1996)建構一二階連續  
 流模式，其以類波茲曼模式(Boltzmann-like model)為基礎，將微觀的二階車流模式做  
 積分，進而導出巨觀車流模式。其形式如下：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial h}$$

Helbing(1997)以同樣方法進行多車道模式理論的探討。多車道模式必須考慮車與  
 車之間的互動行為，包括車道變換和超車行為。作者建立之流量守恆式如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{k}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\hat{k}_i u) + \frac{\partial}{\partial u}(\hat{k}_i f_i^0) \\ = \left(\frac{\partial \hat{k}_i}{\partial t}\right)_{ad} + \left(\frac{\partial \hat{k}_i}{\partial t}\right)_{vd} + \left(\frac{\partial \hat{k}_i}{\partial t}\right)_{int} + \left(\frac{\partial \hat{k}_i}{\partial t}\right)_{lc} + \hat{u}_i^+(x, u, u_0, t) \\ - \hat{u}_i^-(r, u, u_0, t) \end{aligned}$$

等號左邊第三項為加速度對相位空間密度的影響。等號右邊共有四部分：速度適應(ad)：藉由理想與實際的速度分佈差描述車流為追求理想速度對密度造成的影響。速度擴散(vd)：其中包含速度擴散函數，能夠描述因駕駛受到外在因素導致的速度波動。互動(int)：快慢車在相遇的時候有一定之超車機率。車道變換(lc)：表示因車輛變換車道導致的密度降低。車輛進出系統比率：則是表示系統中若有車輛進出亦影響整體車流密度。

然而其模式屬於微觀研究，巨觀則可將相位空間密度積分。則於巨觀中： $k_i(x, t) =$

$$\int du \int d u_0 \hat{k}_i(x, u, u_0, t)$$

$$u_i(x, t) = \int du u P_i(u; x, t)$$

最終所導出之單方向多車道車流模式，其考慮了車流的加減速、速度擴散、超車和換道行為。Helbing(1998)解釋PW模式和Bando模式之間的關係。透過密度和車間距的倒數關係自行假設車間距的分佈，並代入到高階的氣體動力模式中，完成巨觀和微觀中間的連結：

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial h} = -k \frac{\partial U}{\partial h} \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial h} \approx -\frac{1}{k} \frac{\partial(k\theta)}{\partial h} + \frac{1}{\tau} [U_e(k) - U] + \frac{1}{\tau} \frac{\partial U_e}{\partial k} \left( \frac{\partial k}{\partial h} \delta h + \frac{\partial^2 k}{\partial h^2} \frac{\delta h^2}{2} \right) \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial h} = -2\theta \frac{\partial U}{\partial h} - \frac{2}{\tau} \theta \end{aligned}$$

Hoogendoorn 和 Bovy(2000)提出以混合車流連續流模式。其中所用到的變數有三種，分別為：速度、速度變異、密度。其偏微分公式如下：

$$\frac{\partial k_u}{\partial t} + u \frac{\partial k_u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial u} \left( k_u \frac{w_u(u, u^0) - u}{\tau_u} \right) = \left( \frac{\partial k_u}{\partial t} \right)_{int}^- + \left( \frac{\partial k_u}{\partial t} \right)_{int}^+$$

於等號右邊兩項分別為與慢、快車之互動。各個車種以自己的理想速度作決策，並反應到同一車流密度上。其中又可分成兩個部分，連續過程與非連續過程。連續過程包含加速與調整到理想速度，非連續過程則為更換車道和減速。其加速度公式為：

$$\frac{du}{dt} = \frac{w_u - u}{\tau_u} \triangleq (1 - \theta_u) \frac{u^0 - u}{\tau_u^0} + \theta_u \frac{w^f - u}{\tau^f}$$

Cho和Lo(2002)更進一步建構動態多車道混合車流模式，其將道路視作二維空間，其好處是可以考慮到機車並非一部接一部在行駛。此研究於右手項列入兩項，分別為紓解(relaxation)和互動(interaction)。同樣是為了解是理想與現實速度之差距和車輛間的相互影響。研究中以交通域(traffic field)來描述每輛車個體都有自己的區域，且會間接影響到其他車輛。當兩車過於靠近時，車速會受到改變以避免碰撞發生。其形式如下：

$$E = \frac{e}{\varepsilon} \int_{\Omega} ((k - k_s)/\|X\|^2) d\Omega$$

模式如下：

$$\int_u \frac{\partial f(x, u, t)}{\partial t} \chi(x, u, t) du + \int_u [u \cdot \nabla_x f(x, u, t)] \chi(x, u, t) du + \int_u [eE \cdot \nabla_u f(x, u, t)] \chi(x, u, t) du = \int_u \left( \frac{\partial f(x, u, t)}{\partial t} \right)_{coll} \chi(x, u, t) du$$

等號左邊項為車與車遮間之互動關係。模式透過不同形式的 $\chi(x, u, t)$ ，分別代入 $1, u, \|u - u_e\|^2$ 可求得零次、一次、二次偏微的方程。文中提到一階式為流量守恆式，二階為動量守恆式，三階為速度變異式，而更高階的方程於車流中已不具任何實質意義，故沒有繼續開發之必要。其模式可延伸成混合車流之模式，透過兩個假設分別為：各自車種皆有其自身的守恆式；道路上之空間皆被各車種所共用。故此，許多複雜的變換車道問題可以被包含在內。

Minh *et al.*(2005)提到儘管距觀車流特性已被熟悉，卻很少有研究探討關於機車之車流特性。其利用攝影機蒐集不同路段之機車車流資料，其中地點包含了機車專用道、機車混合車流。在描述機車之速率、流量關係時因考慮到混合車流時，以機車當量處理差異。同時針對機車速率與時間車距之分佈進行探討，結論指出不同的車流組成會導致速率高低差異，包含機車專用道之地點的平均速率比其他地點高出約10(公里/小時)；而平均時間車距則被測出為1.16秒，其範圍從0.34秒到4.31秒不等，其標準差為0.65秒。

表 2.1 巨觀混合車流模式彙整表

作者	年分	模式基礎	車種間互動之處理	模式特性
Colombo, Gavage	2003	LWR	$u_i = \psi(l_1 k_1 + \dots + l_n k_n) U_i$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 考慮不同車種之車長</li> </ul>
Wong, Wong	2002	LWR	$\frac{\partial k_m(x, t)}{\partial t} + \sum_{n=1}^M \left( U_m \delta_{mn} + k_m \frac{\partial U_m}{\partial k_n} \right) \frac{\partial k_m(x, t)}{\partial x} = 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 考慮不同個性之駕駛行為</li> </ul>
Ngoduy	2011	LWR	$q_{cap} = q_{cap}^0 \sum_{n=1}^N \frac{\alpha_n}{\gamma_n}, r_{cr} = \frac{q_{cap}}{v_c} = r_{cr}^0 \sum_{n=1}^N \frac{\alpha_n}{\gamma_n}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 密度與車道容量以隨機變數呈現</li> </ul>
Hoogendoorn, Bovy	2000	Gas kinetic	$\frac{\partial k_u}{\partial t} + u \frac{\partial k_u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial u} \left( k_u \frac{w_u(u, u^0) - u}{\tau_u} \right) = \left( \frac{\partial k_u}{\partial t} \right)_{int}^- + \left( \frac{\partial k_u}{\partial t} \right)_{int}^+$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 均考慮不同類車與同類車種的互動</li> </ul>
Gupta, Katiyar	2007	High order	$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = a(\bar{U}(k) - u) + a\bar{U}'(k)T - 2\beta c(k) \frac{\partial u}{\partial x}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 非等向性</li> <li>● 只適用單車道</li> </ul>
Logghe, Immers	2008	LWR	$u_{slowest} = \min \left[ \frac{\alpha_1}{k_1} \cdot Q_{e1}^h \left( \frac{k_1}{\alpha_1} \right), \frac{1 - \alpha_1}{k_2} \cdot Q_{e2}^h \frac{k_2}{1 - \alpha_1} \right]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 非等向性</li> <li>● 以使用者均衡處理速度競爭</li> </ul>
Cho, Lo	2002	Gas kinetic	$E = \frac{e}{\varepsilon} \int_{\Omega} ((k - k_s) / \ X\ ^2) d\Omega$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 交通域概念處理車流互動</li> <li>● 考慮速度變異</li> </ul>

## 2.5 巨微觀混合介面轉換

本節將回顧巨微觀轉換介面過去研究之相關文獻，大部分著重在於介面前後資訊是否對等，是否有資訊遺失。不同的研究對於介面的處理方式也不同。

Bourrel 和 Lesort(2003)提出以 LWR 模式和 LWR 模式之跟車理論進行巨微觀轉換。其提到兩項限制：即轉換介面上之車輛必須守恆且資訊的傳遞必須正確。而巨微觀模式遭遇的問題往往為巨觀圍觀模式之相容性，並如何成功地轉換資訊。此研究之環境設定為單車道且為均質車種，目的為簡化問題。其模式透過供給需求之概念，並於介面間設定一轉換空間。巨觀轉微觀之空間中，給定一連續之生產時間，當時間到達且前方空間車距大於最小值時，則產生新的車輛。並藉由其與前方車輛之空間車距計算其車輛速度。因為從流量轉換成車輛，故所產生之車輛數不一定為整數，但不影響到轉換空間外的車輛情形。微觀轉巨觀之轉換空間中，則需要使用到虛擬車輛，以便顯示空間車距。虛擬車輛之速度係以前方巨觀車流密度算出。經由模擬不同車流狀況，發現仍然有少許不符合現實之情形產生，原因受到時階大小之影響。

Laval 和 Daganzo(2006)指出公路上的車間有車道轉換的行為，但很少有模式可以解釋。故其建構一簡易之模式，其中包含易得到之參數分別是：理想的變換車道比率、理想的直行比率、道路容量。模式中各車道均有其自身之流量守恆式，首先定義  $l$  車道之淨車道變換率  $\Phi_l$ ，因此車道流量守恆式如下：

$$\frac{\partial k_l}{\partial t} + \frac{\partial q_l}{\partial x} = \Phi_l$$

微觀的面向則是考慮到將道路分段，以供給(道路容量)、需求(變換車道率)之概念銜接格與格之間。在時間不連續之下，流量守恆式則如下所示：

$$\frac{k_{il}^{j+1} - k_{il}^j}{\Delta t} + \frac{q_{il}^j - q_{i-1,l}^j}{\Delta x} = \sum_{l' \neq l} \Phi_{i-1,l'l}^j - \Phi_{il,l'}^j$$

其混合模式所需要之參數只有紓解時間、自由車流速率、容量、擁擠密度，均於實地方便取得，故為其優點。並於模擬比較後，驗證其可解釋瓶頸路段的流量下降，和移動瓶頸之速度與其容量之關係。

Leclercq(2007)建立一混合 LWR 模式，其優點在於可以結合巨觀和微觀車流行為。

巨觀和微觀之車流模式皆有其優點，而在龐大的路網下需要因應不同的需求，此時需要使用混合模式。其研究以微觀和巨觀的層級解析 LWR 模式，並和理想速度模式產生連結。以尤拉座標(Eulerian grid)描述巨觀模式，敘述觀察者在定點觀察車流狀況；微觀層級則使用拉格朗日座標(Lagrangian grid)呈現，即觀察者隨著車流移動。利用 Daganzo(1995)和 Lebacque(1996)所提出的供給需求概念得知界面的流量，建立巨觀微觀之轉換介面機制。並設置一儲存容量於介面上，以確保流量的守恆。隨著時間變化，模式會更新巨觀之密度以及微觀車輛位置。此模式之特色在於介面點定義容易，不需要一間格的轉換區域，也不需要使用虛擬車輛。在模擬的結果中可以清楚的看到衝擊波的傳遞，且無延遲發生。

Leclercq 和 Moutari(2007)建立兩個高階混合模式，其基礎建立於微觀之主從模式(Follow-the-leader model)和巨觀 AR 模式。因所檢視的面向不同，第一個混合模式為巨觀-微觀 AR 模式，第二個則為中觀-微觀 AR 模式。從微觀看 AR 模式，令車輛(j-1)為車輛 j 之領導者，空間車距對時間的變化為兩車之速度差除以空間變化。故時間和空間的更新規則如下：

$$s_j^{n+1} = w_j^{n+1} - V_{max} + V_e \left( \frac{1}{\tau_j^{n+1}} \right)$$

$$x_j^{n+1} = x_j^n + \Delta t u_j^n$$

其中  $w_j = u + V_{max} - V_e \left( \frac{1}{\tau} \right)$ 。而中觀的定義為描述車隊之行為，以車隊為單位，且令車對中有 N 輛車。在離散的時空關係中，中觀的 AR 模式建構如下：

$$\begin{cases} s_i^{n+1} = s_i^n + \frac{\Delta t}{N \Delta x} (u_{i-1}^n - u_i^n) \\ w_i^{n+1} = w_i^n \end{cases}$$

在微觀轉巨觀的介面，以  $Q_{in}^{\Delta t} = \min\left(\frac{d}{D}, \frac{\Delta x}{\Delta x} (1 - \rho_{mac}^n)\right)$  計算流入之流量。 $d$  為潛在距離； $D$  為真正距離。再者更新下游車流密度和上游車輛位置。最後更新介面儲存容量，與一階模式不同的部分在於，上個時階之容量加上流入流量後，假使大於 1，則需要扣除整體的最小值，而巨觀轉微觀的介面則是以相反的邏輯運算。第二種混合模式為中觀轉微觀，意即車隊轉換為車輛。其方法將中觀車隊拆平均切割空間，拆解成  $N$  個子空間。

## 2.6 小結

回顧車流模式相關文獻，得知於不同面向之車流模式近期發展。於微觀車流模式多屬於跟車模式之改善，或是針對細胞自動機之研究，較少研究將混合車種作為考量要素。而細胞自動機之應用較多，因其簡易性緣故，具有較高的使用率。多篇研究也使用細胞自動機描述機車車流行為。而反觀巨觀模式則因其能解釋整體車流特性，故較容易建構多車道和混合車流模式。結構上巨觀車流理論可分為三大類：連續流模式、高階模式、氣體動力模式。連續流模式之最大優點為其簡單，能延伸不同的情境設定。而其最大缺點在於與實際車流情形不相符，且多數車流行為無法描述。高階模式則解決此問題，卻也令模式複雜度增加，而近期模式多以此類為主。氣體動力模式則偏向中觀層級，其好處即能夠對於車流間的相互影響(如變換車道、超車等)考慮在內，並將速度變異表示能量守恆之關係，能更明確的描述車流。然而其問題為參數數量過多，使用不易。而混合車流之研究，多數利用各車種擁有自身之理想速度、以車體長度或占用道路比例區隔不同車種。巨觀微觀混合模式之研究有幾項議題被探討，一為巨觀與微觀模式之相容性問題，二為兩模式之間的轉換過程是否流暢。然而，尚未有研究同時顧及到巨微觀的轉換與混合車流和多車道環境，特別是包含機車混合車流，故此處具有研究價值。本研究期望將機車混合車流納入考慮並探討機車與小客車之互動關係，最後連結巨觀微觀之車流模式。並探討因受到號誌干擾之車隊等候與車隊消散之行為。

## 第三章 模式建構

本研究之模式可分成巨觀、轉換介面、微觀三部分。為研究市區道路及相鄰近路口之車流研究，靠近路口的車流行為較為複雜，故必須因應不同的地區特性採用不同之車流模式。市區道路路段長度長且無側向干擾，故適合使用巨觀模式；反觀路口部分，車輛行為較為複雜，故適合使用微觀車流模式驗證。而表 3-1 為本章註釋表。

表 3-1 模式變數參數註釋表

符號	意涵	符號	意涵	符號	意涵
$k_i$	$i$ 車種密度	$t_c$	變換車道之時間	$u_f$	條件自由車流速率
$q_i$	$i$ 車種流量	$T$	行駛實驗路段之總時間	$k_{jmax}$	擁擠密度
$u_i$	$i$ 車種速率	$L$	實驗路段總長	$k_j$	條件擁擠密度
$\eta$	變動小客車當量	$\alpha_l$	$l$ 車道之平均換道次數	$k_{m*}$	機車剩餘密度
$\sigma$	固定小客車當量	$N_c$	變換車道車流之密度比例	$I(t)$	儲存函數
$\gamma$	小客車當量最大增量	$\beta_m$	平均變換車道參數		
$\varepsilon$	變換車道強度	$u_{fmax}$	自由車流速率		

### 3.1 巨觀混合車流模式

為涵蓋長路段區域，需以巨觀車流模式處理。在巨觀混合車流模式中，可由車流基本關係式  $q = ku$  來描述車流的整體密度。此外，為求解包含三個變數之模式，令車流速率為密度之函數，意即  $u = U(k)$ ，此函數有多種不同形式。而其中車流包含機車與汽車兩類車種，故將會分別得到兩者個別之密度。混合車流內車種間之相互互動和變換車道之行為也需要被考慮在內。在國內市區道路中，機車無法行駛於內車道，小客車則內外車道皆可行駛，故需要將不同車道分開考慮：

$$\frac{\partial k_l}{\partial t} + \frac{\partial k_l u_l}{\partial x} = s_l(x, t), \quad \forall l$$

$$\sum_l s_l(x, t) = 0$$

此式表示車流之流量守恆，等號右邊項為各車道之淨變換車道率，其可表現出變換車道的行為。另外假設此道路為封閉系統，故淨變換車道率之總和為零。其中流量為密度與速率的相乘，而整體的車流密度可以被視為兩種車種之加總，整體流量則以變動車當量來計算。為計算各車道之淨變換車道率 $s_l(x, t)$ ，將其形式寫作下式：

$$s_l(x, t) = \varphi \left( \left( \sum_{l' \neq l} k_{l'} - k_l \right) - \left( \sum_{l' \neq l} k_{el'} - k_{el} \right) \right)$$

其中 $\varphi$ 為敏感係數， $k_l$ 為車道 $l$ 之密度， $k_{l'}$ 為鄰近車道 $l'$ 之密度， $k_{el}$ 為車道 $l$ 之均衡密度。當自身車道之密度低於兩旁鄰近車道時，鄰近車道之車輛會希望變換車道至本車道，故此函數可描述車流會傾向變換到密度較低的車道上。而均衡密度表示車道自身於均衡時之車道密度，故其為定值，以描述不同車道之特性。然而於近乎自由車流情形下則不符合現實狀況，故須令敏感係數為一變動量，並取決於兩車道間之密度差。在求解過程中，需要求解整體車流特性變數時，整體車流之密度與流量可以由下式表示：

$$k = k_a + \eta k_m$$

$$q_i = k_i \cdot u_e \text{ for } i = a, m$$

其中 $k_a$ 表示小客車之車流密度， $k_m$ 表示機車車流密度。而車流整體密度為參考謝志偉(民99)所提出變動小客車當量之概念，用以描述機車混合車流。其中 $\eta$ 為一隨兩車種密度之比例而變動之小客車當量，用以呈現整體車流密度。以往的機車混合車流研究都以固定小客車當量轉換機車對於整體車流之貢獻，然而機車車流有穿梭和並排行駛之行為，故此方法會造成計算上之偏誤，低估實際道路之密度。至於各車種之流量，則可藉由各自之密度乘上均衡速率而得知。其中變動之小客車當量( $\eta$ )之形式，係以熵值 $H(k_i)$ 概念描述之，並呈現兩車之間密度比例關係。其考慮到當兩種車種分布情況均勻時，表示車種間之互動越頻繁，變動車當量也越高；反之，當密度比例懸殊時則影響較小，故可以呈現出混合車流車種間之互動影響。

$$\eta = \sigma + (\gamma H(k_i)) = \sigma - \left( \gamma \sum_i p_i(k_a, k_m) \log p_i(k_a, k_m) \right)$$

此變動小客車當量可用於求解車道間之變換車道率。另外，於多車道之環境中車輛能

夠變換車道，整體車流密度和限制變換車道之情況會不同，故實際之密度並無法直接帶入車流基本關係式中計算。Jin(2010)提出變換車道行為對於車流而言假設密度會增加，進而將所有變換車道之車輛於變換車道時間內以兩倍計算。其所使用之變換車道模式已能夠描述於兩車道上之車流行為，然而尚未考慮到多車種問題。其研究中導入有效密度之概念，將變換車道之車輛以兩倍計算，其形式如下：

$$\bar{k} = k(1 + \varepsilon(k))$$

其中 $\varepsilon(k)$ 為變換車道強度函數，用以呈現因變換車道所產生之差異。有效密度會比原有之車流密度高。在非混合車流情況下，其形式可被為表示如下：

$$\varepsilon = \alpha \frac{k_c t_c}{kT}$$

其中 $k_c$ 為變換車道車輛之密度， $t_c$ 為變換車道所花費之時間， $T$ 為平均車輛行經路段所花費之總時間，故其可被視為耗費在變換車道的時間佔所有行駛時間之比例。變數 $k_c$ 之求解可藉由變換車道率求得，透過車種之車流密度乘上變換車道率即可求得，需要注意因前述比率係由車道總密度計算而得，故換算機車變換車道密度 $k_{cm}$ 則須除以變動小客車當量以還原其密度。而變換車道強度函數應受到機車與汽車之密度影響，則形式如下式所推算：

$$\varepsilon_{il}(k_a, k_m) = \frac{t_c N_c}{kLT} = \alpha_l \frac{k_c t_c}{kT} = \alpha_l \frac{k_c t_c}{k \frac{L}{u}} = \alpha_l \frac{k_c t_c u}{kL} = \alpha_l \frac{(k_{ci} t_{ci}) u}{(k_a + \eta k_m) L}, \forall i$$

其中 $t_{ca}$ 和 $t_{cm}$ 為小客車和機車變換車道之時間，可經由文獻中取得相關數值並且代入計算。 $k_{ci}$ 為 $i$ 車種變換車道之密度可由淨變換車道率求得， $k_{ci} = k_i \cdot s(x, t)$ ； $\alpha$ 為一密度之函數，可被解釋成平均每車變換車道次數且受車道密度影響， $L$ 為測量之路段長度。然而於多車道情境下不同車道之車輛平均變換車道次數有差異，故需要分開來討論。以一般三車道公路而言，分別以 $\alpha_{left}$ 、 $\alpha_{center}$ 、 $\alpha_{right}$ 代表各車道車輛平均變換車道次數。以 $\alpha_{right}$ 為例，其位於道路最右端，變換車道只有一種行為，即移動至中間車道。本研究假設車輛變換車道之原因為自身車道之速率不能滿意駕駛者，且鄰近車道之密度較低。為求模式之簡化，故以線性形式考慮 $\alpha$ ，且以車流密度替代速率建構之。此外需要考慮到其車道之均速率以下列形式描述：

$$\alpha_{right} = \beta_{right} + \beta_1(k_{center} - k_{right})$$

$\alpha_{left}$ 則位置相反；至於 $\alpha_{center}$ 則可以變換至兩旁的車道，需考慮到兩旁車道之個別密度，分別以下式描述：

$$\alpha_{center} = \beta_{center} + \beta_2(k_{right} - k_{center}) + \beta_3(k_{left} - k_{center})$$

$$\alpha_{left} = \beta_{left} + \beta_4(k_{center} - k_{left})$$

依據上述對於 $\alpha$ 之描述，可對參數進行假設。求得變換車道強度函數後，則可以進一步代入得到整體車流受到變換車道情況下之密度與速率：

$$u = U(\bar{k})$$

速度的函數有很多種不同的形式，本研究以 Greenshields(1935)所提出之線性車流基本關係模式納入考慮，其優點為方便計算，其形式如下：

$$u = u_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)$$

其中 $u_f$ 為自由車流速率， $k_j$ 為擁擠密度。因形式簡易故易於應用，然則此線性模式僅適用於均質車流上。為考慮機車混合車流之車流特性，必須找出小客車與機車密度關係。可預期其型式為非線性，於小客車擁擠密度下，機車仍可以藉由穿梭而增加密度。並考慮個別車種速率對於兩車種密度比例之關係，即可得到對應密度與速率關係。首先考慮小客車平均速率與兩車種密度之比較，以往對於混合車流研究常以車種所佔道路面積大小決定車種密度之關係，其可被解釋成線性關係：

$$u_i = u_{if} \left(1 - \frac{\bar{k}_i}{k_j(k_a, k_m)}\right)$$

Greenshields 所提出之速度密度關係式包含擁擠密度與自由車流速率兩參數，於均質車流中為定值；於一般混合車流模式中則多以加權比例方式處理。然而因機車混合車流之特性，假設於不同小客車與機車比例下之擁擠密度均不同。擁擠密度表示於壅塞情況下到路上之車輛密度，而於機車混合車流因為機車體積小，而導致於小客車無法移動的情況下，機車依然能夠繼續穿梭前進，故考慮兩車種間假設密度關係並非完全線性。假設其關係圖如下：

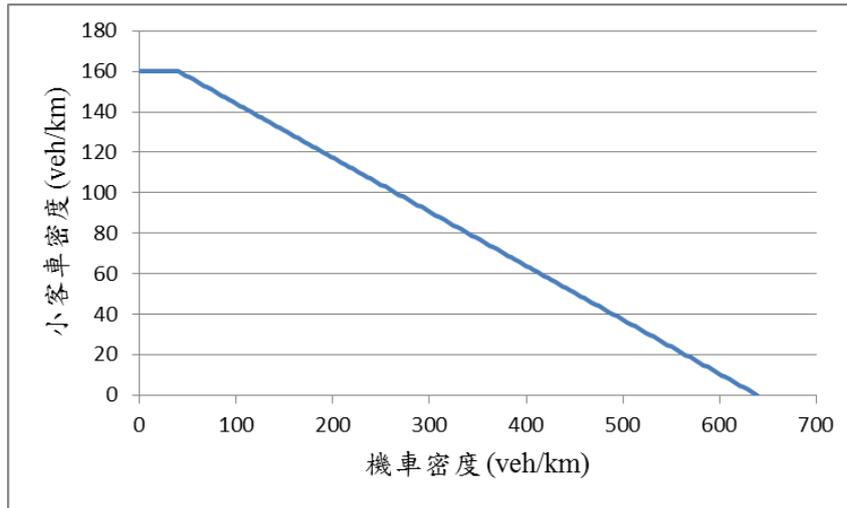


圖 3-1 小客車與機車密度關係圖(一)

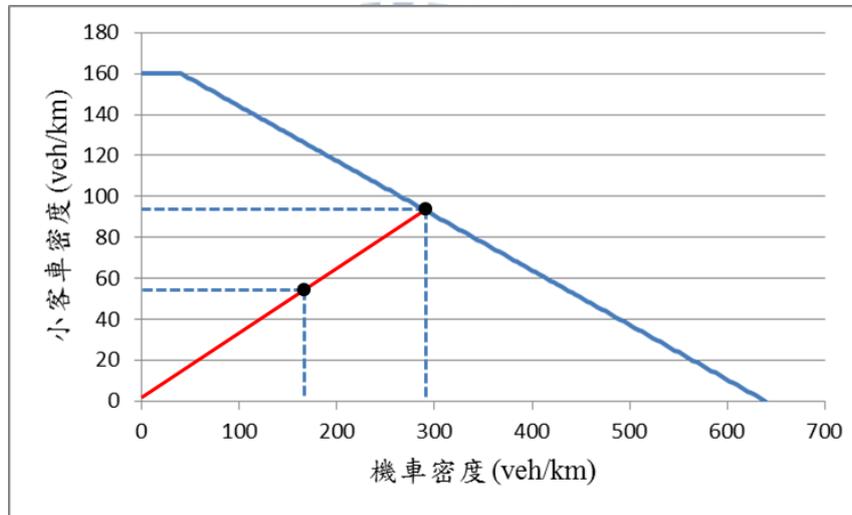


圖 3-2 小客車與機車密度關係圖(二)

在車流擁擠情況下，密度關係呈現負斜率，而小客車密度最大處，機車密度仍不固定。假設任一時間點下之個別車種擁擠密度為當下車種密度比例之放大，意即從原點延伸一直線經過當前車種密度比例點，與密度關係圖之交會點，此點為 $(k_{aj}, k_{mj})$ 。此處表示在目前車種密度比例下的擁擠密度。將此關係寫作函數則如下式所示：

$$k_{aj}(k_a, k_m) = \begin{cases} k_{ajmax} & , if k_a/k_m \geq k_{aj}/k_{m*} \\ \frac{k_a k_{ajmax} k_{mjmax}}{k_a(k_{mjmax} - k_{m*}) + k_m k_{ajmax}} & , if k_a/k_m < k_{aj}/k_{m*} \end{cases}$$

其中 $k_{m*}$ 代表機車剩餘密度，當小客車之密度到達擁擠密度時，機車因其體積小且可穿梭於車陣中之特性，故機車密度上可持續增加，而可增加之密度差額即為機車剩餘密度 $k_{m*}$ 。然而此函數需要注意到邊界條件，當機車密度為零之情況則不適用，

並直接以小客車擁擠密度計算。而從機車速率與密度關係式中可求得密度 $k_{m^*}$ 時之速率 $u_{m^*}$ ，如下列所示：

$$u_{m^*} = u_{mf} \left( 1 - \frac{k_{m^*}}{k_{mj}} \right)$$

當小客車與機車密度比例高於小客車均質車流擁擠密度除以機車剩餘密度時，道路最多可承受之小客車擁擠密度同等於小客車均質車流擁擠密度；當比例較低時，則道路最多可承受之小客車擁擠密度則會減少，而減少比例取決於小客車與機車面積比例決定。當擁擠密度決定後，尚有自由車流密度尚未決定，考慮於機車密度固定時，小客車平均速率與小客車密度之關係圖如下：

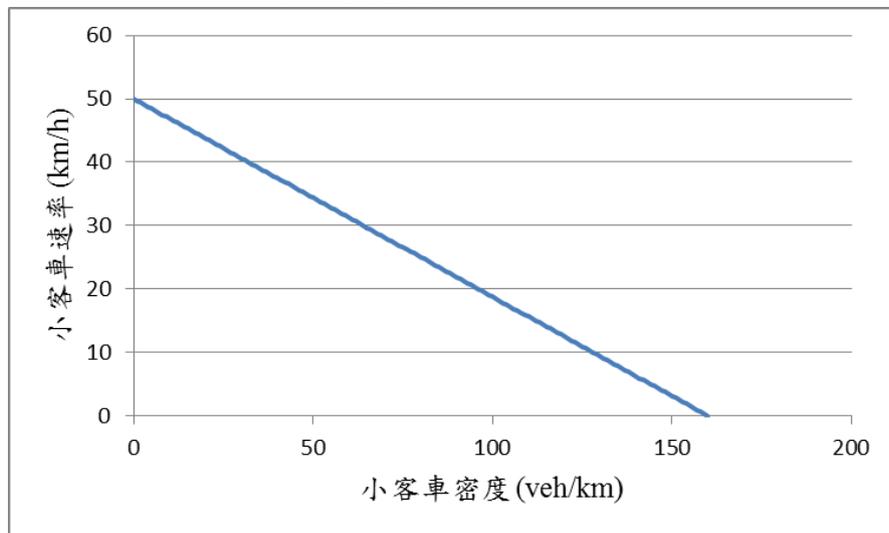


圖 3-3 小客車速率與密度關係圖

此情況之自由車流速率受到機車密度之影響，機車數量越多，小客車自由車流速率越低。假設其影響關係函數如下：

$$u_{af} = u_{afmax} \left( 1 - \frac{k_m}{k_{mj}} \right)$$

計算出自由車流速率與擁擠密度後，即可決定當下之小客車速率。以相同方法可以算出該時間點下之機車速率，並分別計算各車種下一時階之密度與流量。但有些許差異，在密度比例較大時，機車擁擠密度為當時之機車密度。為求機車速率則以當時之機車條件擁擠密度計算，意即當兩車種密度比例固定下之機車擁擠密度。其算式列於此：

$$k_{mj}(k_a, k_m) = \begin{cases} \frac{k_m k_{ajmax}}{k_a} & , \text{if } k_a/k_m \geq k_{aj}/k_{m*} \\ \frac{k_m k_{ajmax} k_{mjmax}}{k_a(k_{mjmax} - k_{m*}) + k_m k_{ajmax}} & , \text{if } k_a/k_m < k_{aj}/k_{m*} \end{cases}$$

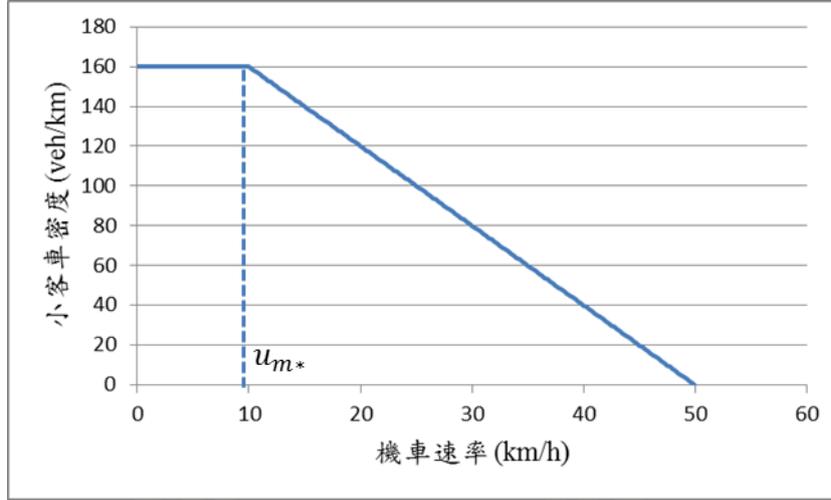


圖 3-4 機車速率與小客車密度關係圖

在此考慮三角形之車流基本關係，以臨界車流狀況作分段。故可將流量表示為：

$$Q(\varepsilon, k) = \begin{cases} u_{if} k_i & \text{if } 0 \leq k_i \leq k^* \\ \frac{k_i^*}{k_{ij} - k_i^*} u_{if} \frac{k_{ij} - k_i(1 + \varepsilon)}{(1 + \varepsilon)} & \text{if } k^* \leq k_i \leq k_j \end{cases}$$

其中  $u_{if}$  為  $i$  車種之自由車流速率， $k_i^*$  為  $i$  車中之臨界密度。其中考慮多車道時變換車道對於基本關係的影響，將上述之  $\varepsilon(k_a, k_m)$  代入關係式內。考慮到汽機車混合車流時，分別設定各車種之臨界參數值。

### 3.2 巨微觀轉換模式

在巨微觀介面轉換處，必須考慮到資訊的傳遞能夠順利，並且在車流與車輛間找出轉換關係。回顧相關文獻之研究多以密度與空間車距(spacing)進行轉換，用兩者互為倒數之關係來連結巨觀和微觀之車流理論。密度之概念為每公里佔有多少車輛；而空間車距則是代表車與車之間的距離差距，雖然兩者並不全然相等，卻：

$$k_i(x, t \rightarrow \Delta t) = \frac{1}{s_i^t(x, t)}$$

在處理巨觀轉微觀之介面處，Leclercq(2007)提到以介面兩邊之供給需求作為連結。其

模式適用於單車道均質車流上，優點在於介面點上，在上游之需求量與下游之供給量中取最小者為該處之車流流量，意即：

$$q(x, t) = \min(\Delta(x^-, t); \Omega(x^+, t))$$

其中上游需求可被寫作：

$$\Delta(k) = \begin{cases} kU(k) & \text{if } k \leq k^* \\ q^* & \text{if } k > k^* \end{cases}$$

下游供給可被寫作：

$$\Omega(k) = \begin{cases} q^* & \text{if } k \leq k^* \\ kU(k) & \text{if } k > k^* \end{cases}$$

當上游車流量尚未達臨界情況，表示此時道路尚未出現擁擠情況，則需求可被定義為即將進入下游之車輛數；反之則因擁擠狀況產生，流量無法超過車流臨界流量而以最大值代表。而供給量可被視為下游能夠通過之車輛數，以道路容量為基礎。當車流尚未到達臨界狀況時，所供給的容量持續保持最大量；反之則會因擁擠而降低。在微觀模式中則以空間車距作為輸入量，以 $\Delta(x, t)$ 為上游輸入量， $\Omega(x, t)$ 為下游供給量：

$$\Delta(x, t) = \begin{cases} q^* & \text{if } s_n < s^* \\ \frac{U(\frac{1}{s_n})}{s_n} & \text{if } s_n \geq s^* \end{cases}$$

$$\Omega(x, t) = \begin{cases} \frac{U(\frac{1}{s_n})}{s_n} & \text{if } s_n < s^* \\ q^* & \text{if } s_n \geq s^* \end{cases}$$

於巨觀轉微觀之介面上因需要產生車輛，則給予保存函數 $I(t)$ ，其數值介於零到一之間，意即 $I(t) \in [0, 1]$ 。當 $I(t)$ 超過1時則於介面間產生車輛，並令 $I(t) = I(t) - 1$ 重新計算。然而此模式只適用於均質車流中，故必須將模式擴充成為混合車流模式。為同時考慮機車的產生，故將不同車種之產生方式分開考慮。其中保存函數受到該車種流量影響，隨時間累積。其形式如下：

$$I_i(t + \Delta t) = I_i(t) + q_i(x, t)\Delta t$$

在道路壅塞之情形下可能會發生機車流量過高。導致機車之保存函數大於2的情況，此時同時生產兩輛機車於介面，並令 $I(t) = I(t) - 2$ 。車輛產生之位置決定則需要考慮到鄰近下游路段之車流狀況，而微觀混合車流模式之部分將於3.3章節說明。不同的車種會使用各自車種之流量以進行車輛之產生，而個別密度則是作為整體車流密

度之加總。不同的車種可同時考慮，使得機車與小客車能夠同時產生於同一個車道上。若下游因道路擁擠或受號誌管制影響，而使車流產生衝擊波回傳至上游路段，將會導致空間車距無法拉長至足夠空間產生車輛。當小客車已經回堵至介面處，而機車仍然可以透過與前方機車之間距產生下一輛車。

### 3.3 微觀混合車流模式

鄰近路口路段需要更細微的模式予以模化，故需要針對機車混合車流建構微觀模式。Lee *et al.* (2009)文中提到機車混合車流之處理，主要模式可細分成三個子部分，分別是：縱向車距模式、側向車距模式和機車路徑選擇模式。前兩者之目的在於解決機車對於周遭汽機車距離所產生之反應，後者為機車駕駛者於超車時該如何決定路徑。於縱向車距模式中，因為顧及到機車能夠及時轉向而避免與前車之碰撞，故安全車間距理當比小客車短。故從以往的安全車距和加入機車行為之安全車距中擇期較小的為其真正之安全車距。其中所需要輸入之資料有車輛之速度與速度差、加速度、橫向需要移動距離和反應時間。早期之跟車模式環境為單車道且均質車流，單純針對自身速度、與前車之速度差與空間車距作為影響加速度之因子。而於多車道中，車隊不再是單純串聯行進，且機車不受到車道的限制。本研究將利用 Bando *et al.*(1995)所提出之理想速度跟車模式為基礎，模擬車輛行進間對於加減速的反應。

機車之路徑選擇則以羅吉特模式描述，用以形容機車將以對於自身效用最大之路徑行駛。而不同車種有不同之效用函數，小客車需要考慮到自身速度、與前車之速度差、與前車之車距。多項羅吉特模式為個體選擇模式，其中包含數個不同的替選方案，各個替選方案之效用函數由數個共同或特定屬性所組成。效用函數之形式如下：

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in}$$

假設每位小客車與機車駕駛者擁三種不同的行為方案，分別為左前方超車( $V_l$ )、持續跟車( $V_c$ )和右前方超車( $V_r$ )。方案中考慮到鄰近前車與鄰近後車之速度、車種、前後方之車間距。同時需要考慮到駕駛者上一時階所作之決定。而小客車與機車決策之差別在於所考慮之因素不同。此參考李建豪(2012)所提出之機車選擇行為模式作為基礎，為結合於理想速度跟車模式上，故將原本在此列出小客車與機車各個之效用函數：  
小客車效用函數：

$$V_{al} = \delta_l + \delta_1 \Delta u_l + \delta_2 type_l + \delta_3 \Delta x_l + \delta_4 \Delta b u_l + \delta_5 \Delta b x_l + \delta_6 b type_l$$

$$V_{ac} = \delta_1 \Delta u_l + \delta_2 type_l + \delta_3 \Delta x_l$$

$$V_{ar} = \delta_r + \delta_1 \Delta u_r + \delta_2 type_r + \delta_3 \Delta x_r + \delta_4 \Delta bu_r + \delta_5 \Delta bx_r + \delta_6 btype_r$$

機車效用函數：

$$V_{ml} = \delta_l + \delta_1 \Delta u_l + \delta_2 type_l + \delta_3 \Delta x_l + \delta_4 \Delta bu_l +$$

$$\delta_5 \Delta bx_l + \delta_6 btype_l + \delta_7 dist_l + \delta_8 last_l$$

$$V_{mc} = \delta_1 \Delta u_l + \delta_2 type_l + \delta_3 \Delta x_l$$

$$V_{mr} = \delta_r + \delta_1 \Delta u_r + \delta_2 type_r + \delta_3 \Delta x_r + \delta_4 \Delta bu_r +$$

$$\delta_5 \Delta bx_r + \delta_6 btype_r + \delta_7 dist_r + \delta_8 last_r$$

其中 $\Delta u$ 為與前車之速度差， $type$ 為前車車種，其中汽車為1，機車為0， $\Delta x$ 為與前車之車距， $dist$ 為車輛與路口間之距離， $last$ 為上個時階所作之決定。

### 3.4 模式流程

綜合以上巨觀模式、微觀模式與巨微觀轉換模式，將程序中之流程依序排列。最初由巨觀模式開始進行演算，將輸入資料帶入後，依序隨著時間遞迴演算。並求得介面所需之訊息，經由轉換方法決定車輛產生之時間，最後透過微觀模式計算車輛於道路中之行為與決策。透過整個模式流程能夠清楚呈現每個子部分之運作，故於此小節多做說明。

巨觀模式中所需要得知之資料為數入之車流密度與平均速率，其中包含不同車種車流之資料，如機車車流密度與小客車車流密度等資料。

#### 1. 計算機車與小客車之混合車流密度

首先，為了計算機車與小客車之混合車流密度，故要先知道小客車與機車之比例，以熵值計算式求得。

#### 2. 更新各車種之密度

以車道整體密度計算變換車道率，再利用上個時階的密度與速率和上游之密度與速率，計算出各車種之密度更新。隨著時間遞迴演算直到巨觀路段最下端。

#### 3. 計算有效密度

第三步驟可以利用車道整體密度計算出個車道之 $\alpha$ 值和，而變換車道密度( $k_{ca}$ 、 $k_{ca}$ )也可進一步求得。此時將個別之車流密度與平均速率代入 $\varepsilon(k_i, u_i)$ 以計算出有效函數值。最後即可計算出因變換車道而產生之車道車種有效密度。

#### 4. 計算條件擁擠密度與條件自由車流速率

於先前得知兩車種間之密度比例，進而算出在不同車種比例下之各車種條件之擁

擠密度。經由條件擁擠密度之取得，即能夠得到因受到混合車流影響而縮減之自由車流速率。

5. 更新各車種之平均速率

將所獲得之條件自由車流速率與條件壅塞密度代入 Greenshields 的密度速率關係中，即可求得下一個時階之車流平均速率。

6. 產生車輛

藉由上游所帶來之輸入流量資料，計算出車輛產生之時間點。

在車輛產生之時間點上於下游是產生車輛，並令車輛以介面點上之平均速率行駛出去。

7. 跟車模式與路徑選擇

以理想速度之跟車模式決定車輛之加減速度，追蹤車輛位置。並更新車輛之速度、加速度、時空間距和前車車輛等資料。並透過個體選擇模式，在每個時間點上處理車輛路徑的選擇，如右邊超車、左邊超車或持續跟車。



## 第四章 實驗分析

巨微觀機車混合模式建構完整後，期望透過設計模式於電腦程式中，並給予隨機輸入數值以檢視結果。再者，為推估模式中參數與確認模式之準確性，有必要蒐集實地車流資料。為蒐集實際道路之車流資料，需選定適合之路段以進行實驗，並考慮如何處理蒐集來之原始資料，使其成為可用的資料格式。最後對於巨微觀機車混合模式中需推估之參數做處理。

### 4.1 實驗模擬

為實驗模式之有效性，故先以 Excel VBA 設計模式。假設一座三車道之無干擾道路，路上包含機車與小客車之混合車流。其參數事先給予，並嘗試繪製出各個車道及各個車種之密度變化於時空圖中。首先對於參數給予設定，如表 4-1 所示。

首先預估小客車與機車之面積比例約為 1:4，故小客車當量則設定為 0.25；自由車流速率則考慮市區道路速度限制多為 50 公里每小時，換算單位後則是 13.89 公尺每秒。擁擠密度則考慮一般研究界定為 160 車輛每公里，故設定為 0.16 車輛每公尺，因假設一般市區道路於壅塞狀況下，每公里可以容納 160 輛小客車；而機車擁擠密度則設定為 0.64。模擬的情境設計中，最內車道是禁止機車行走。隨機輸入上游之車流密度，模擬時間共 5 分鐘，時階初始設置為 1 秒，模擬道路長度為 300 格，每格 20 公尺，總長度共 6 公里。雖然實際道路並無如此長度，但模擬目的為確認模式之可用性與其結果之合理性。而因為其中  $\beta$  參數尚未推估，故以假設方式設定其數值。

首先，需要給定於此模擬路段之輸入資料，係為 300 秒之各個車道中，小客車與機車之密度資料。所提供之資料雖然為隨機設定，但依然有些原則，其中密度最高不會超過車種之擁擠密度，並考慮到外車道(慢車道)之機車數量較多；反觀內車道(快車道)則不容許機車之行駛。輸入資料如圖 4-1 到圖 4-3 所示。

表 4-1 模擬參數設定表

參數	數值	單位
格位長度	10	m
小客車平均換道時間	1.5	sec
機車平均換道時間	0.4	sec
$\beta_{left}$	0.1	
$\beta_{center}$	0.1	
$\beta_{right}$	0.1	
$\beta_1$	0.3	
$\beta_2$	0.3	
$\beta_3$	0.3	
$\beta_4$	0.3	
小客車當量	0.25	
小客車最大增加當量	0.2	
機車小客車面積比值	4	
自由車流速率(速限)	13.89	m/s
小客車擁擠密度	0.16	vpm
機車擁擠密度	0.64	vpm
機車剩餘密度	0.1	vpm

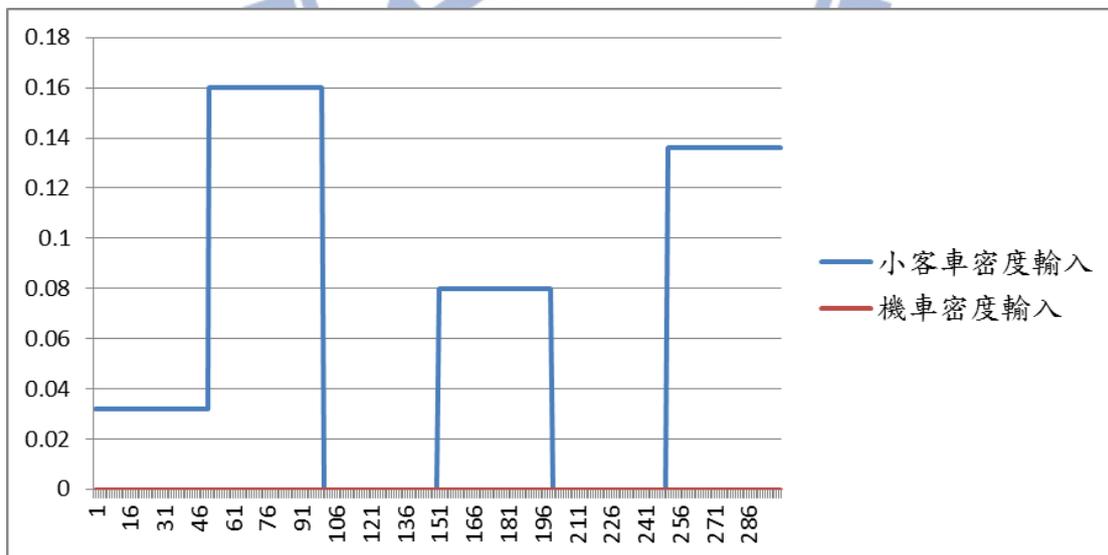


圖 4-1 內車道車種密度資料之輸入

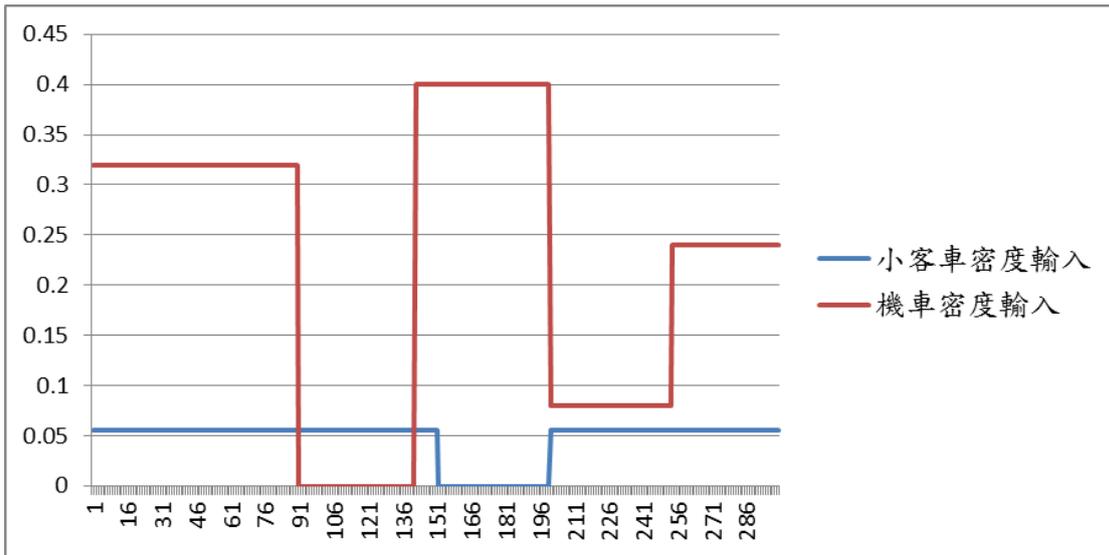


圖 4-2 中間車道車種密度資料之輸入

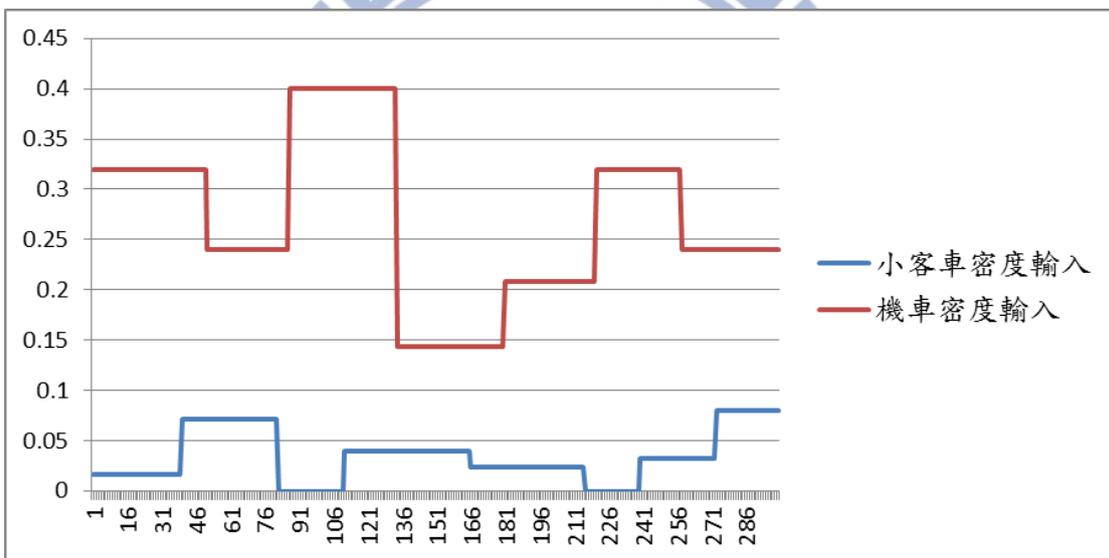


圖 4-3 外車道車種密度資料之輸入

經過程式的模擬，所模擬之結果如圖 4-4 至圖 4-8 所示。從圖中可以看到因為密度變動的關係所導致之衝擊波，並不同的顏色代表密度的高低，紅色代表最高密度；紫色則代表最低的密度。由於模式給予機車限制進入快車道，故機車於內車道並沒有任何變化。

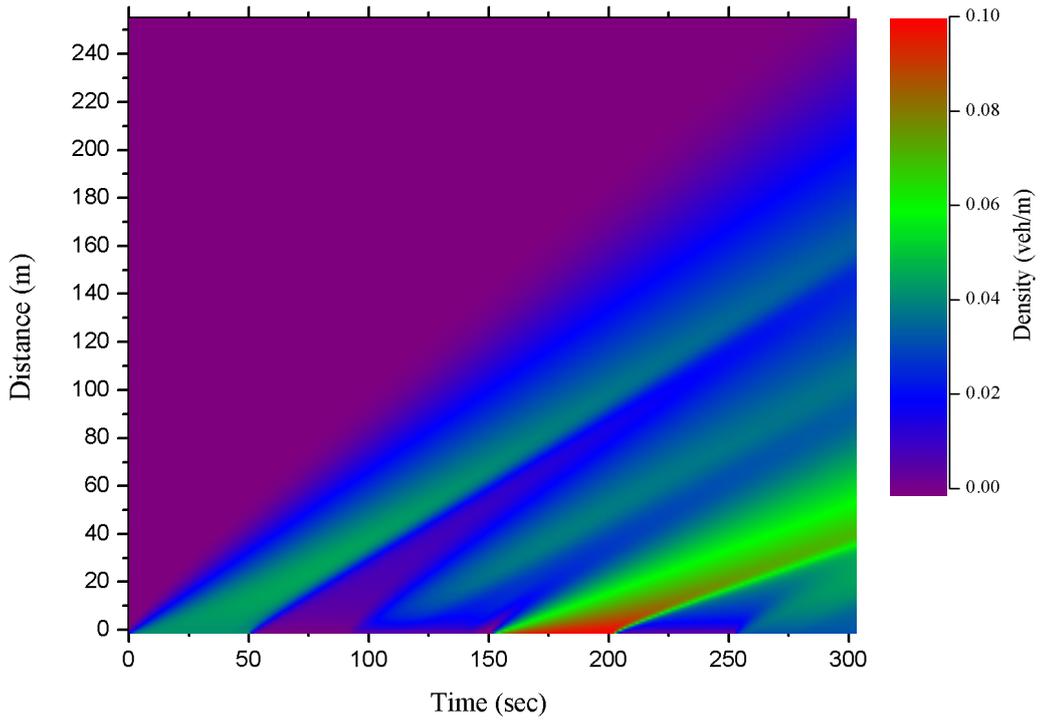


圖 4-4 內車道小客車密度變化

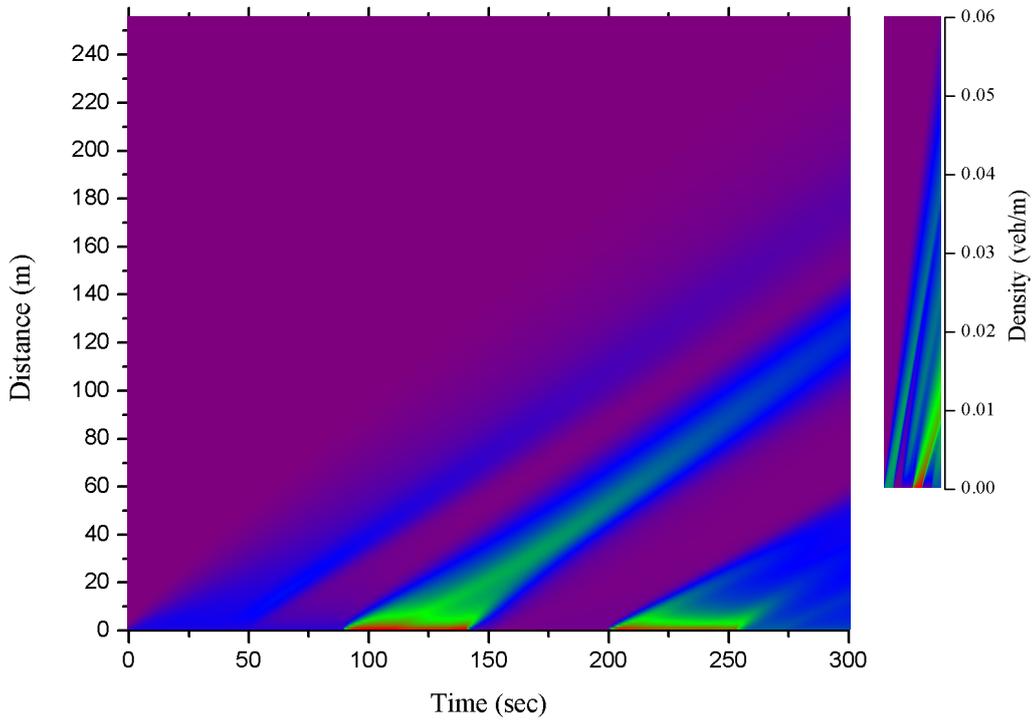


圖 4-5 中間車道小客車密度變化

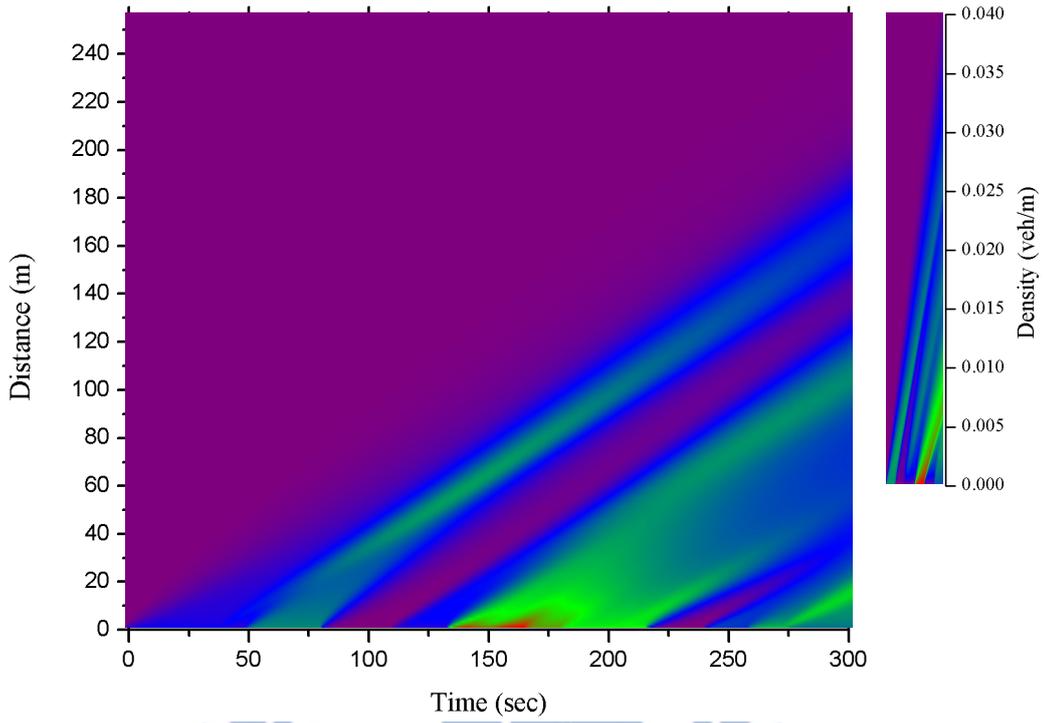


圖 4-6 外車道小客車密度變化

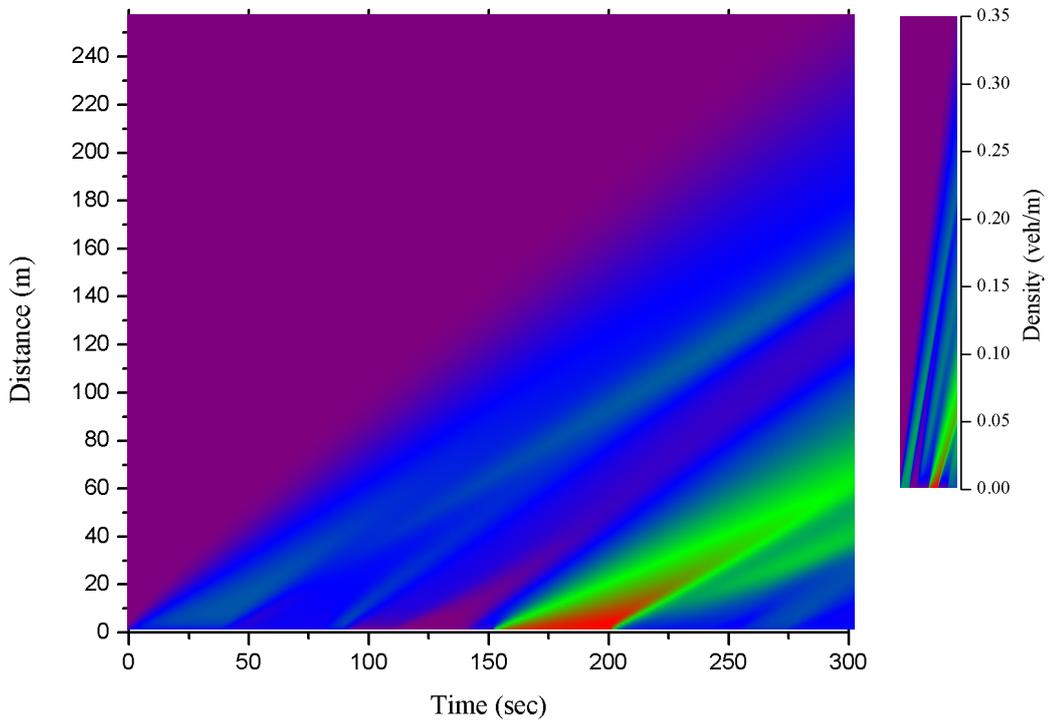


圖 4-7 中間車道機車密度變化

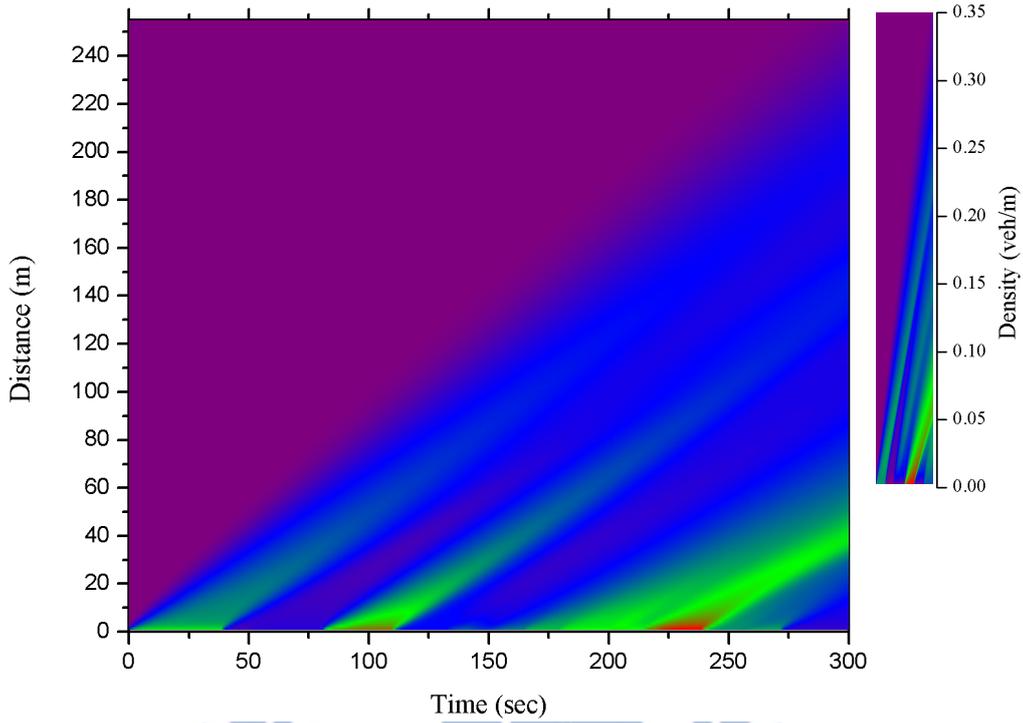


圖 4-8 外車道機車密度變化

在模式的模擬過程中，本研究發現時階的設置現階段為 1 秒，然而此於數值分析方法上卻會產生問題。車流之密度更新計算方式，係將模式中流量守恆式離散道路上之空間。而其公式推倒如下：

$$\frac{\partial k_l}{\partial t} + \frac{\partial k_l u_l}{\partial x} = s_l(k_l)$$

本研究將流量守恆式中的密度分別以時間和空間進行離散化，並將 Greenshields 速率密度關係導入。

$$\frac{k_n^t - k_n^{t-1}}{\Delta t} = s(k_l) - \frac{\left( k_n^{t-1} \left( u_f - \frac{u_f \cdot k_n^{t-1}}{k_j} \right) - k_{n-1}^t \left( u_f - \frac{u_f \cdot k_{n-1}^{t-1}}{k_j} \right) \right)}{\Delta x}$$

$$(k_n^t - k_n^{t-1}) = s(k_l) \Delta t - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( k_n^{t-1} \left( u_f - \frac{u_f \cdot k_n^{t-1}}{k_j} \right) - k_{n-1}^t \left( u_f - \frac{u_f \cdot k_{n-1}^{t-1}}{k_j} \right) \right)$$

$$k_n^t = s(k_l) \Delta t - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( k_n^{t-1} \left( u_f - \frac{u_f \cdot k_n^{t-1}}{k_j} \right) - k_{n-1}^t \left( u_f - \frac{u_f \cdot k_{n-1}^{t-1}}{k_j} \right) \right) + k_n^{t-1}$$

將公式整理過後可得到密度之更新函數，如上式所示。其中  $k_n^t$  表示第  $n$  格於第  $t$  秒之

密度，其受到該處於前一個時階的密度與同時間上游處之密度所影響。然而模擬所得之結果顯示每個時階中之密度影響程度僅發生在下一格，和實際情況並不符合。故在此考慮以不同長度之時階進行檢測，將第 10 秒之結果進行比較。本研究所提出之時階長度為 1 秒、0.5 秒、0.25 秒和 0.125 秒。最後模擬結果將小客車與機車分開進行檢視。從圖 4-10 中可以觀察到，當時階為 1 秒時，密度之分布較不平滑。而當時階低於 0.5 秒的情況則有所改善。而時階等於 0.125 秒時則發現其善幅度沒有太多，故不需要繼續檢視更小時階之情形。實際操作係令 0.25 秒至 1 秒間以同樣的資料輸入，經處理 4 個遞迴後取得結果。

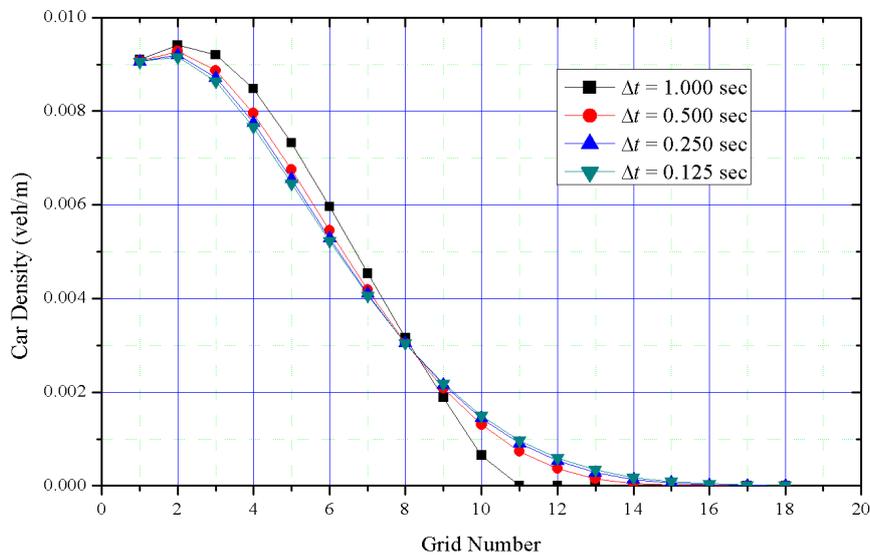


圖 4-9 小客車於不同時階之密度分布圖

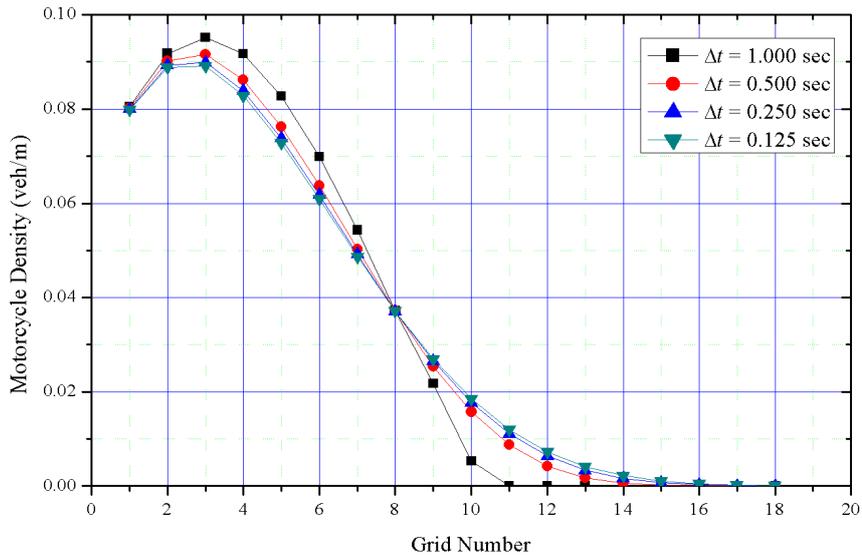


圖 4-10 機車於不同時階之密度分布圖

當模擬車流行經至道路最終點，以車流基本關係求得介面點上之流量。持續計算儲存函數  $I(t)$ ，可以求得各車種之車輛產生之時間點。圖 4-11 至 4-13 呈現各個車道所產生車輛之時間點，本研究將介面端設置在 100 格上。因道路設定起始條件為沒有任何車子，故可發現一開始車道上無車輛產生。

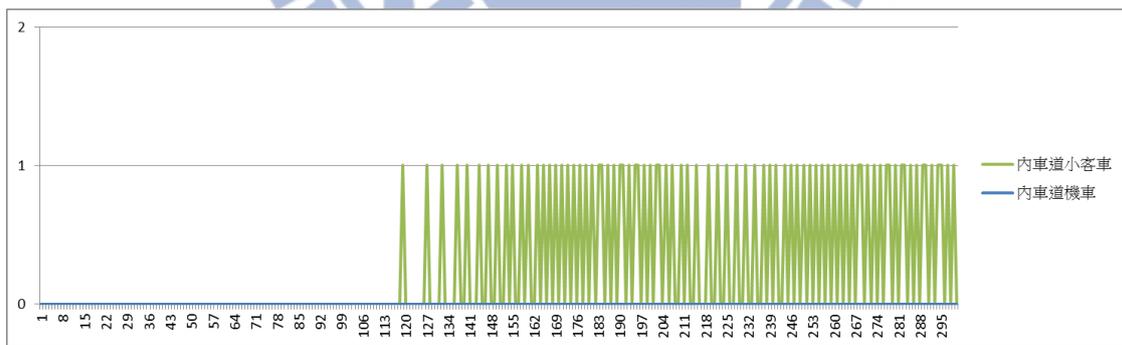


圖 4-11 內車道車輛產生時間

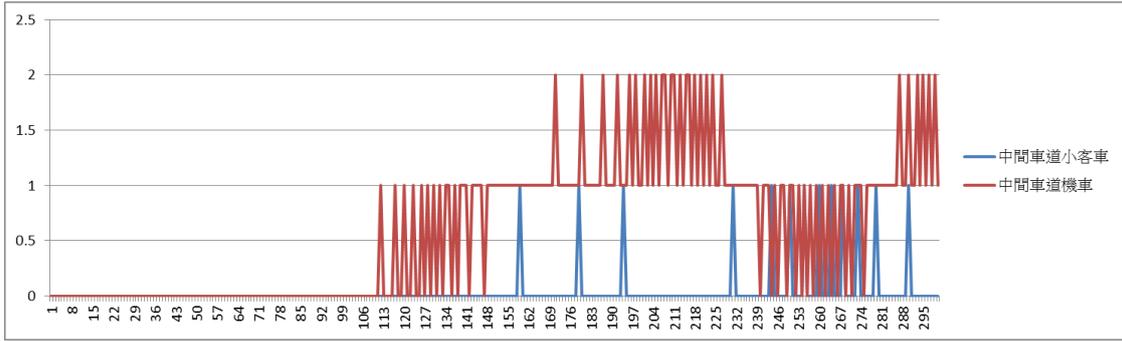


圖 4-12 中間車道車輛產生時間

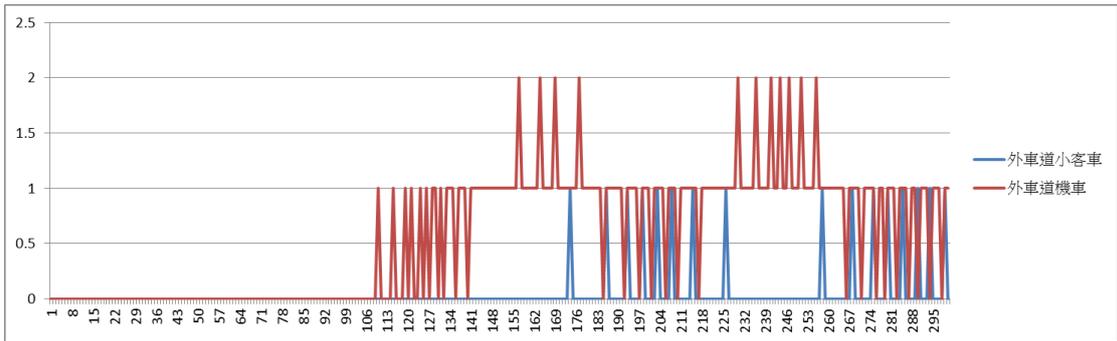


圖 4-13 外車道車輛產生時間

另外，為考慮車輛回堵之狀況，故另外模擬於 2 公里處有一干擾，使得車流產生延滯。為期 50 秒的干擾後，立即將干擾移除，使車流開始逐漸消散。所得盜跖模擬結果顯示於圖 4-14、圖 4-15。

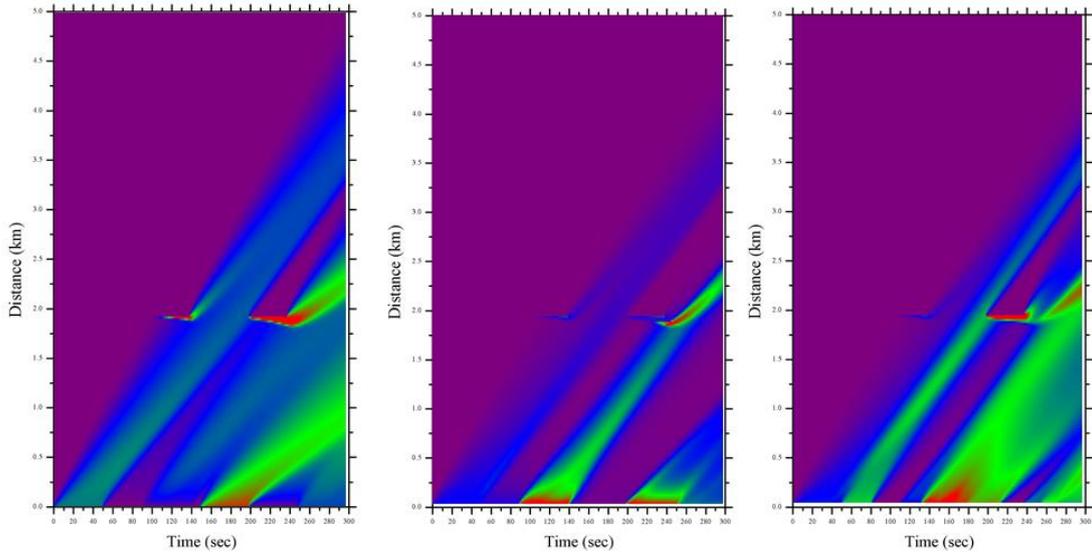


圖 4-14 小客車密度衝擊變化(a)左車道(b)中間車道(c)外車道

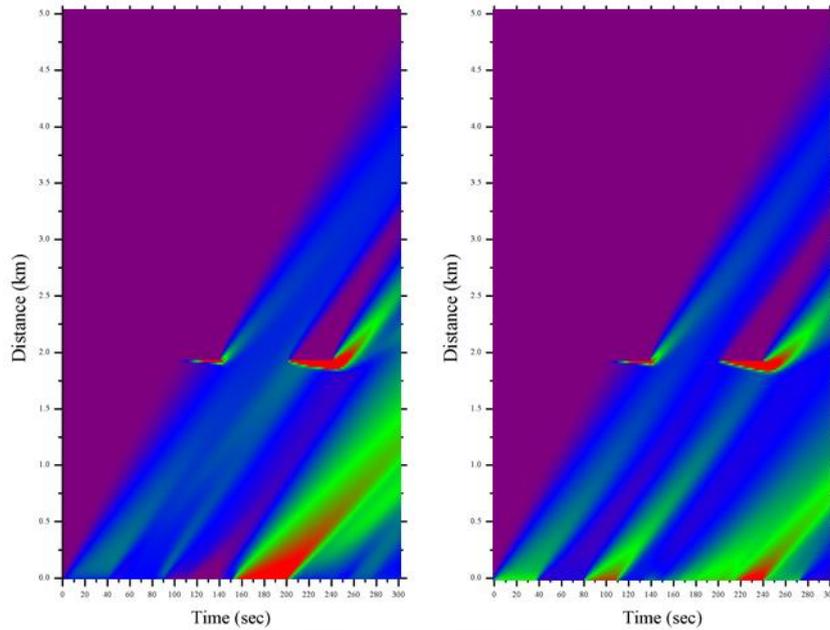


圖 4-15 機車密度衝擊變化 (a)中間車道(b)外車道

## 4.2 實驗路段選擇

本研究需蒐集實地之車流資料用以驗證模式，並推估模式之參數。為因應研究所需車流資料，需慎選實驗路段地點。蒐集之資料須包含特定因素，故此路段具有下列幾項特點：

1. 同時包含小客車與機車之混合車流，並擁有公車專用道。主要為考慮小客車與機車之互動關係，並不探討公車行為於其中，公車專用道有助於分隔公車與其他車種。
2. 附近存在高樓可供拍攝道路情況。在無法直接取得道路上空之空照圖，取代方式為架設攝影機於公路附近之高處拍攝，高度越高則可涵蓋到越大之道路範圍。
3. 鄰近號誌路口。期望車流能因號誌而產生停等車隊，為得到擁擠時之資料，亦可探討模式資訊傳遞之連貫性。再者，道路車流量亦須足夠，得到明顯之停等車隊長長度。
4. 道路為多車道形式。為研究多車道之混合車流模式，故需要探討多車道對於車種間之相互影響之關係。

集結上述之特性，最後選定實驗地點於台北市羅斯福路三段部分路段，總長約為300公尺，並於羅斯福路三段28號架設攝影機蒐集影像。拍攝日期為2013年2月23

日，為平常日之晨峰時間 7 點至 9 點。而單一攝影機無法取得長路段之資料，故同時架設兩支攝影機錄製同一連續路段。為事後之計算方便，兩支攝影機所涵蓋範圍須有部分重複，以路旁明顯標記物作紀錄，以確保影像之連續性。

### 4.3 資料處理

取得影像檔案後，需要進行資料之處理。因為資料來源為兩部不同之攝影機，則需要將分別影像結合。兩部攝影機拍攝角度有些微不同，但可透過 Adobe Premium 影像軟體進行圖像變形並銜接，達成一定之辨識度即可。利用手動調整兩影片畫面之比例，達到肉眼所能辨識之原則，完成後結果如下圖所示：

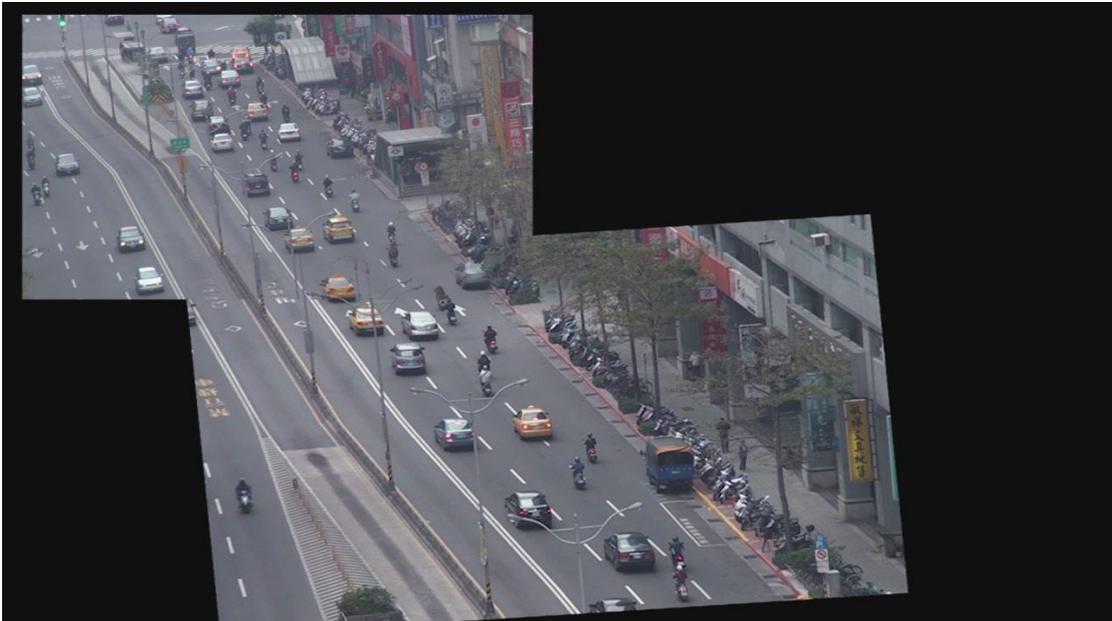


圖 4-16 影像銜接圖

因為攝影機架設於大樓上，無法取得真正之道路上空俯視圖，需要進行角度轉換。首先計算道路到觀測大樓之距離和大樓高度，算出攝影機拍攝之角度。實際道路屬於三維空間，必須分別對y軸和z軸校正。

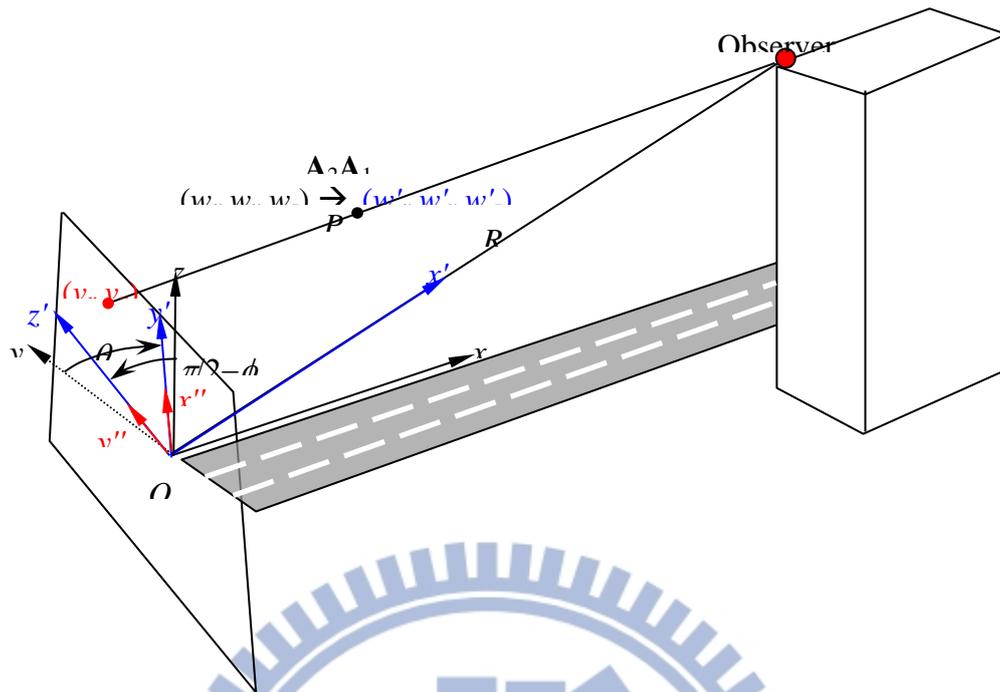


圖 4-17 觀測座標系統變換示意圖

由一建築物頂樓往一十字路口方向拍攝，我們可以將路面訂為  $x$ - $y$  平面，原點訂在道路右側路口的人行道前緣，並以道路右邊外側邊緣為  $x$  軸朝觀測者方向為正，如圖 4-15 所示。若將觀測者放置於正  $x$  軸方向與原點  $O$  距離  $R$  處，視平面將為  $y$ - $z$  平面。當觀測者移動到建築物頂樓，等於將座標系統先繞著  $z$  軸順時針轉  $\theta$  角，使得  $y$  軸轉成  $y'$  軸，然後再繞著新的  $y'$  軸順時針轉  $\pi/2 - \phi$  角，使得  $z$  軸轉成  $z'$  軸，視平面也因此變成  $y'$ - $z'$  平面。當座標系統先繞著  $z$  軸順時針轉  $\theta$  角時，其座標轉換矩陣  $\mathbf{A}_1$  為

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

接著繞著新的  $y'$  軸順時針轉  $\pi/2 - \phi$  角時候，其座標轉換矩陣  $\mathbf{A}_2$  為

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} \sin \phi & 0 & \cos \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \phi & 0 & \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

因此，若空間任一點  $P$  的座標原來為  $(w_x, w_y, w_z)$ ，經過如下的轉換就會變成在新的座標系統中的座標  $(w'_x, w'_y, w'_z)$ ：

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1 \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \cos \phi & -\sin \theta \cos \phi & \sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w'_x \\ w'_y \\ w'_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

而點  $P$  由觀測者所見到在視平面  $x''-y''$  (即  $y'-z'$  平面) 上的投影座標  $(v_x, v_y)$  則因為點投影效果應將  $(w'_y, w'_z)$  乘以一比例  $Q$ ，並成為：

$$\begin{aligned} v_x &= w'_y Q = w'_y \frac{R}{R - w'_x} \\ v_y &= w'_z Q = w'_z \frac{R}{R - w'_x} \end{aligned} \quad (4)$$

今於視平面看到  $x$  軸上的一點  $(w_x, 0, 0)$  投影座標  $(v_x, v_y)$  與原點連線的斜率  $\alpha_1$  為

$$\alpha_1 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{w'_y}{w'_z} = \frac{-w_x \cos \theta \cos \phi}{-w_x \sin \theta} = \frac{\cos \theta \cos \phi}{\sin \theta} = \frac{\cos \phi}{\tan \theta} \quad (5)$$

而於視平面看到  $y$  軸上的另一點  $(0, w_y, 0)$  投影座標  $(v_x, v_y)$  與原點連線的斜率  $\alpha_2$  為

$$\alpha_2 = \frac{-w_y \sin \theta \cos \phi}{w_y \cos \theta} = \frac{-\sin \theta \cos \phi}{\cos \theta} = -\tan \theta \cos \phi \quad (6)$$

將式(5)與式(6)相乘則可得  $\phi$  為

$$\phi = \cos^{-1} \sqrt{-\alpha_1 \alpha_2} \quad (7)$$

又將式(7)代入式(5)則可得  $\theta$  為

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\cos \phi}{\alpha_1} \quad (8)$$

由於投影於視平面的座標  $(v_x, v_y)$  的單位為實際單位(m)，但是在感光元件成像的像素座標為  $(v'_{x,i}, v'_{y,i})$ ，與  $(v_x, v_y)$  成一比例之比例常數  $\rho$  為未知，而且觀測者與原點之間的距離  $R$  也是未知。為了求得  $R$ ，現在將實地量測位於道路邊緣  $x$  軸上一系列的點  $(w_{x,i}, 0, 0)$ ，經轉換成為視平面像素座標分別為  $(v'_{x,i}, v'_{y,i})$ ，則由式(4)可知

$$v_{x,i} = \rho v'_{x,i} = (-w_{x,i} \sin \theta) \frac{R}{R - w_{x,i} \cos \theta \sin \phi} \quad (9)$$

式(9)經過整理之後可得  $R$  為

$$R = \frac{\rho v'_{x,i} w_{x,i} \cos \theta \sin \phi}{\rho v'_{x,i} + w_{x,i} \sin \theta} \quad (10)$$

以一拍攝影片中之其中一幅(如圖 4-14 所示，為將兩台往稍微有點差異的方向拍攝的攝影機所拍攝的影像結合而成之影像)為例，將前 14 個量測點的資料帶入式(10)可得

如圖 4-16 所示之結果，其中， $\rho$  有三個猜值。理想上，正確的  $\rho$  猜值會讓所有的量測點計算出來的  $R$  值為一定值；亦即，圖 4-16 中為水平線者，其使用之  $\rho$  為正確的猜值。實際上，在量測過程中，所有的特徵點在影像上正確的位置都不是很容易判定的，特別是當原點的位置只要稍微有誤差，越接近原點的特徵點之像素座標 ( $v'_{x,i}$ ) 誤差越大。另外，現場量測的長度因為障礙物(如靠路邊停放的車輛)與路面狀況(如水溝蓋或突起的路面)，會使量測結果 ( $w_{x,i}$ ) 有誤差，但這些誤差不會因為靠近原點與否而有所不同。因此，雖然圖 3 中每一條曲線都會上下振動，但從其個別的趨勢來看， $\rho = 0.295$  為最佳的猜值，而所得的  $R$  值為 440 m，與實際情況很接近。

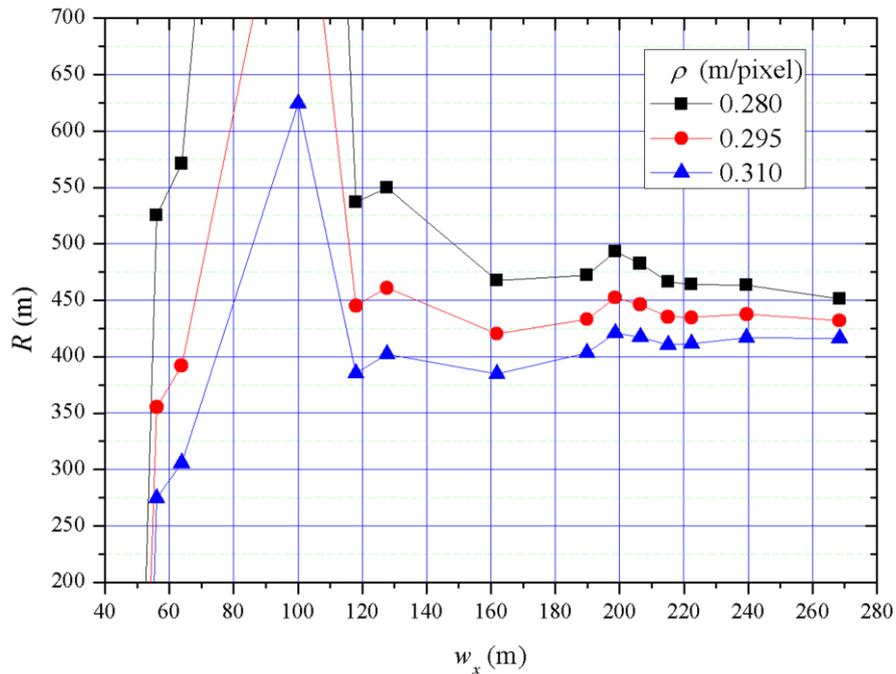


圖 4-18 由量測點計算觀測者到原點之距離

為了將每一車輛的位置轉換成在路面上的座標位置，在影像上先找到每一車輛的像素座標 ( $v'_x, v'_y$ ) 之後，若要轉換成為實際的  $x$ - $y$  平面座標以利統計車流量，必先求解 ( $w_x, w_y$ )。欲求解 ( $w_x, w_y$ )，我們須將此座標正向轉換為 ( $v'_x, v'_y$ )，其過程如下：

$$\begin{aligned}
 w'_x &= w_x \cos \theta \sin \phi + w_y \sin \theta \sin \phi \\
 w'_y &= -w_x \sin \theta + w_y \cos \theta \\
 w'_z &= -w_x \cos \theta \cos \phi - w_y \sin \theta \cos \phi
 \end{aligned} \tag{11}$$

今令視平面座標向量的斜率為  $\gamma$ ，則

$$\gamma = \frac{v'_y}{v'_x} = \frac{w'_z}{w'_y} = \frac{-w_x \cos \theta \cos \phi - w_y \sin \theta \cos \phi}{-w_x \sin \theta + w_y \cos \theta} \quad (12)$$

整理式(12)可得

$$A \equiv \frac{w_y}{w_x} = \frac{\gamma \sin \theta - \cos \theta \cos \phi}{\sin \theta \cos \phi + \gamma \cos \theta} \quad (13)$$

則由式(4)與式(12)可知  $v_x$  為

$$v_x = \rho v'_x = \rho w_x (-\sin \theta + A \cos \theta) \frac{R}{R - w_x (\cos \theta \sin \phi + A \sin \theta \sin \phi)} = \rho B \frac{R w_x}{R - C w_x} \quad (14)$$

其中， $B = -\sin \theta + A \cos \theta$ ， $C = \cos \theta \sin \phi + A \sin \theta \sin \phi$ 。化簡式(14)則可得車輛在車道平面座標( $w_x, w_y$ )為

$$\begin{cases} w_x = \frac{R \rho v'_x}{B R - C \rho v'_x} \\ w_y = A w_x \end{cases} \quad (15)$$

此外，為求解角度轉換矩陣尚需要得知於實驗道路上量測實際道路長度，故以道路路旁明顯之地標物為依據測量。路旁指示物於畫面中由上到下依序為：

表 4-2 實地道路指示物

1	號誌路口人行道端點
2	捷運二號出口尾端
3	人行道尾端
4	三號捷運出口尾端
5	三號捷運出口前端
6	告示牌
7	變電箱
8	路樹 1 號
9	路樹 2 號
10	路樹 3 號
11	路樹 4 號
12	路樹 5 號
13	藍色貨車尾端
14	第二支告示牌

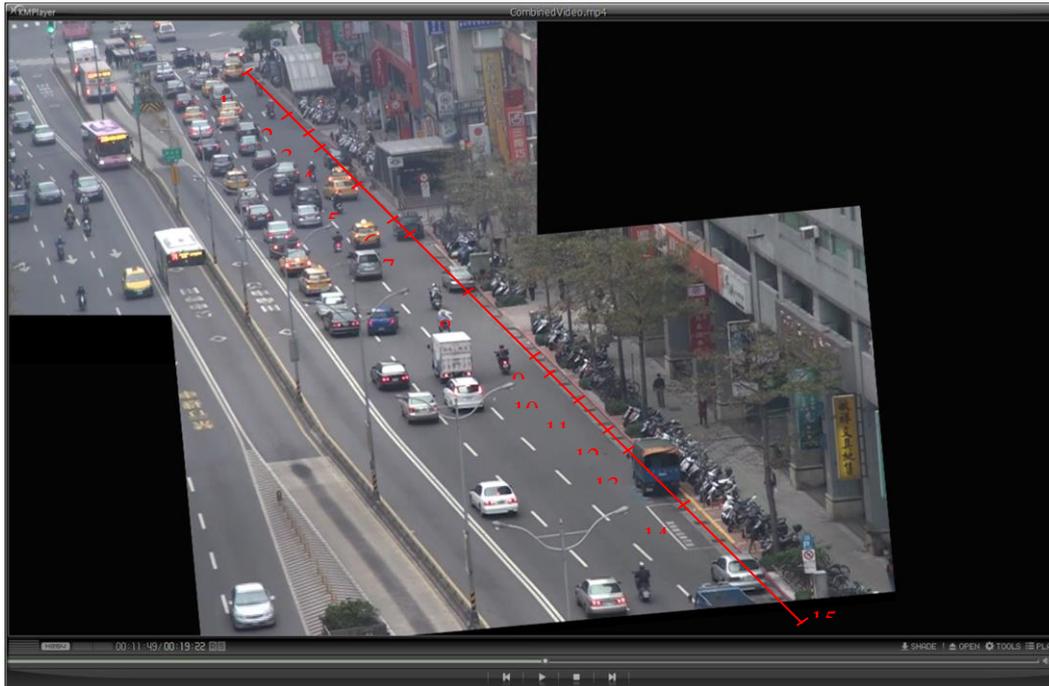


圖 4-19 實際拍攝之影像

因連續之影像檔案並無法直接用於分析，故將實際道路測量距離，透過攝影機拍攝角度計算出轉換矩陣。先將影片檔案以連續截圖方式轉成圖片檔，再以人工方式利用車輛點擊程式標出螢幕上之車輛座標，透過轉換矩陣計算出車輛實際於道路上之座標值。本研究以 Matlab 為開發工具，建立車輛點擊程式。程式能夠儲存每輛小客車和機車於畫面上之座標位置，並同時在下一時階的畫面中追蹤同一輛車的位置，依序記錄移動之位置。當有新的車輛進入實驗路段，則另外新增資料，並給予獨特的車輛編號；若是車輛行駛離開實驗路段，則將此車輛之編號資料停止，不再繼續追蹤。經由非連續的車輛座標可得到每輛車於道路上之行駛軌跡，並可得知車與車之間之空間車距，可用於求解微觀車流模式。為求解巨觀車流模式，故需計算上游道路長度  $L$  之路段內之車輛數，以得知上游路段之輸入車流密度，代入巨觀車流模式內計算。到達轉換介面時，得知上游車流之密度與速率，即可求解出該時階之流量，進而求得何時車輛被產生。如下圖所示，紀錄所有於時階為 1 時之車輛座標，紅點為小客車，綠點為機車。點擊的過程中，因為角度與畫面的扭曲關係，很難判斷車輛高度，亦無法準確量測車輛正中心所在座標，故統一以同樣方式點擊所有同種類車輛：車輛點擊位置於車尾車牌處；機車則點擊於輪胎與地面接觸的位置。

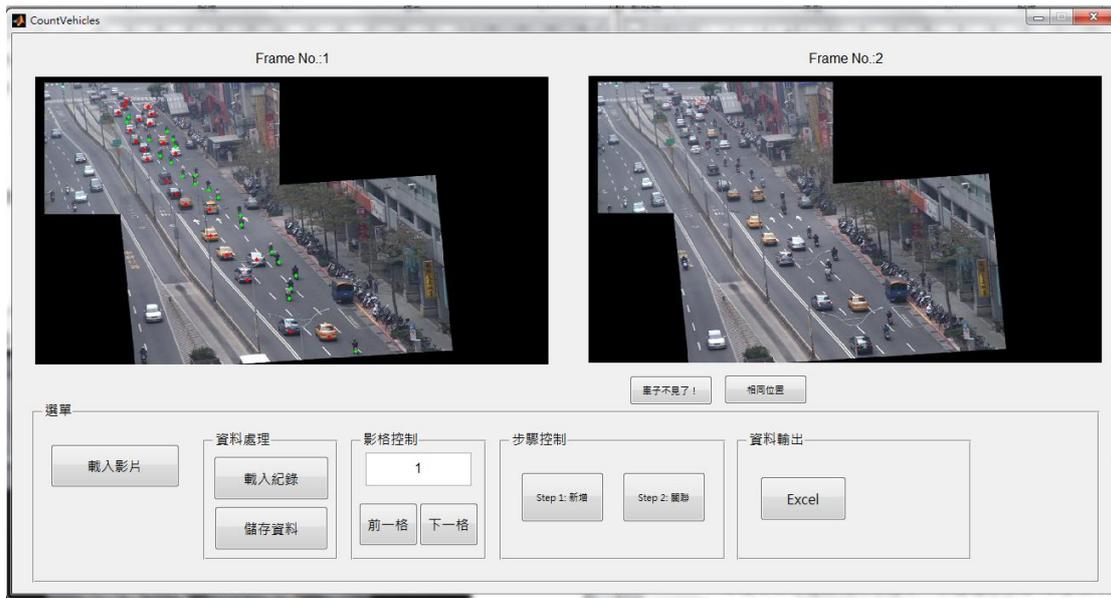


圖 4-20 車輛點擊程式使用畫面

當車輛座標資料取得後，進行切割道路區塊並以 Eulerian 座標描述上游巨觀路段，將道路分區段和不同車道，以個別區域為單位。

本實驗所蒐集之資料為一段連續時間上車輛之行駛軌跡，將所獲得之空間座標資料顯示後，發現道路線形並非為單純直線，因為公車專用道設置之緣故，使得實驗道路有部分彎曲。整體而言，道路曲度並不大，故求得道路中間之車道線之座標點資料，並顯示於座標圖中，如圖 4-19 所示。再以配適方法找出其趨勢線，最後以多項式形式，並順序選取至五階，求得兩條車道線之趨勢函數。最後以其趨勢線函數進行資料點的調整。經調整過後之結果如圖 4-20 所示。故將所有車輛座標資料以同樣方式調整。

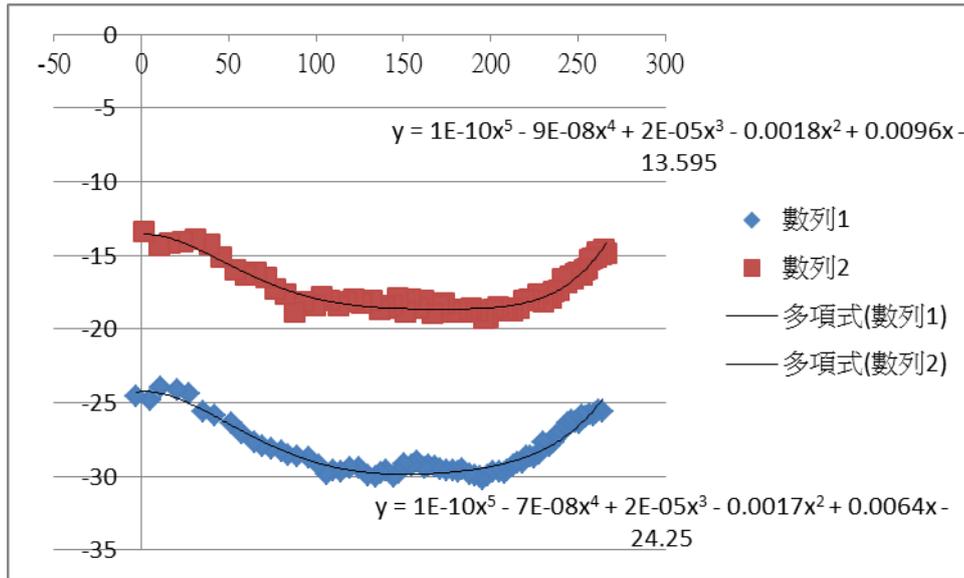


圖 4-21 車道線之空間座標圖-調整前

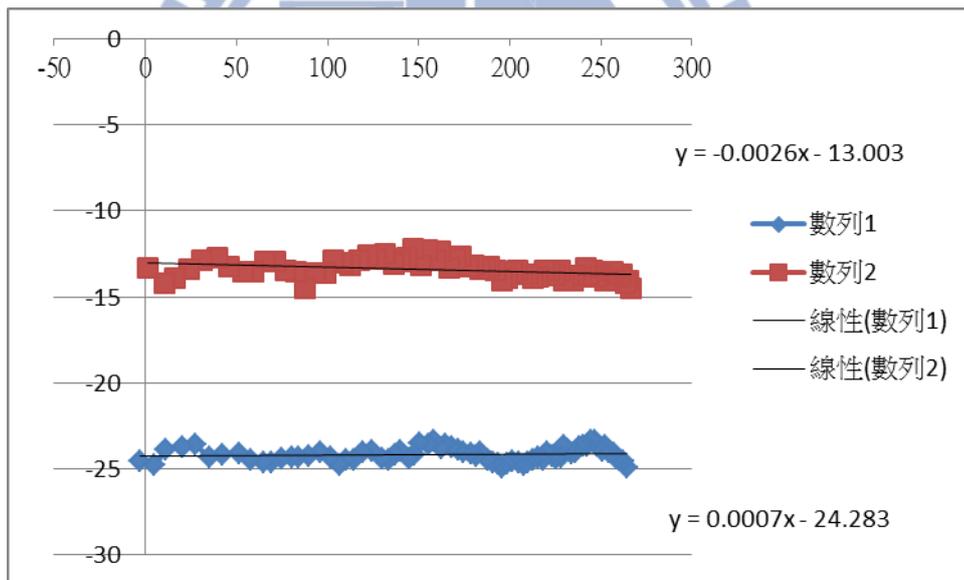


圖 4-22 車道線之空間座標圖-調整後

然而車輛座標本身仍然解析度過大，本研究所資料當把個別車輛之軌跡線資料篩選出來，並呈現於 x-y 座標上觀察車輛移動情況。圖 4-20 為以 Excel 呈現之數據資料表，其座標解析度高，然而對於以人工方式點擊之數據資料卻無法確保資料之準確性與精確度，故進行車輛軌跡平滑化作業。首先挑選出單一車輛，列出連續三秒之座標位置，並以加權方式取得其平滑座標，如下式所示：

$$(\bar{x}_2, \bar{y}_2) = \frac{(x_1, y_1) + 2(x_2, y_2) + (x_3, y_3)}{4}$$

透過此方式可剔除部分因人工作業造成之錯誤，也使得車輛軌跡表現較為平順。而因資料為人工蒐集且以多人分工形式完成，故需要將不同時間之資料做連結。在兩兩資料之間，取同一個時間點之資料進行比對。將所有車輛之座標位置進行距離差檢測，找出距離最小的即為同一車輛。結合的過程中發現有些許車輛被遺漏，其多為紅燈停等之車輛，故考慮將之視為於下一時階離開道路的車輛。



## 第五章 模式驗證

本研究建立巨微觀模式，以國內車流特性進行模化。同時也為確保模式之可用性，以模擬方式證實所呈現出之現象符合對車流之先驗知識與特性。然而仍需要以實際混合車流資料驗證，以確保其解釋力。此章節將介紹參數的推估與模式的驗證。

### 5.1 參數推估

本研究之巨微觀轉換模式中有一部分參數需要透過實際道路車流資料推估。於巨觀模式中假定 $\alpha$ 函數知形式與車流密度差為線性關係。自實際道路所獲得之資料，篩選出變換車道之小客車與機車樣本。檢視車輛變換車道之形式(從 $n$ 車道變換至 $m$ 車道)、車輛號碼、變換車道之時間點 $t$ 與發生變換車道之位置座標。並以每10秒為單位。首先，去除不適當之樣本，例如路旁停車所造成之變換車道，再進行參數推估。發現在越靠近路口處所發生的變換車道次數越多，而其原因可能為停等號誌所造成機車的鑽行，並且有部分車流在此路口有右轉的傾向。所推估之數值如表5-1所示。而在微觀當中需要推估之參數為路徑選擇參數，則參考李建豪(2012)所提出之參數，因其研究之實驗之地點與本研究為同一條道路，實驗時間也為尖峰時段，故以其參數為基礎。在本研究中為求簡化模式，故將偏移跟車併入跟車行為當中。此外，其中有幾項屬性因為不顯著而被移除，其數值如表5-2所示。

表 5-1 參數推估表

參數	數值
$\beta_{left}$	-0.354
$\beta_{center}$	0.017
$\beta_{right}$	0.327
$\beta_1$	1.21
$\beta_2$	2.78
$\beta_3$	4.108
$\beta_4$	13.066

表 5-2 微觀模式參數表

小客車參數	數值	機車參數	數值
$\delta_r$	-1.49	$\delta_r$	1.36
$\delta_l$	-0.662	$\delta_l$	2.04
$\delta_1$	-0.16	$\delta_1$	-0.15
$\delta_2$	--	$\delta_2$	--
$\delta_3$	0.03	$\delta_3$	0.021
$\delta_4$		$\delta_4$	
$\delta_5$	--	$\delta_5$	5.13

## 5.2 模式結果與驗證

為驗證模式之準確性，本研究利用所蒐集到之實地觀測資料進行驗證。將實驗路段分成上下游兩段，透過設置不同位置之介面做多次實驗。上下游路段長度分別設置為四個情境：

表 5-3 模擬道路長度分界表

情境	上游長度(公尺)	下游長度(公尺)
150-150	150	150
200-100	200	100
250-50	250	50
290-10	290	10

上游依據長度劃分格位，一格長度為 10 公尺。下游道路長度為 100 公尺，而橫斷面則分割成 9 個子車道。自上游開始輸入車流自實際道路所獲得之密度資料，並執行 2835 秒。因為模擬的時間較長，故在圖片中列出其中之 300 秒資料，並呈現出巨觀與微觀之間的轉換情形。

圖 5-1 至圖 5-5 為情境一從圖 5-1 描述 150-150 之內車道巨微觀轉換，因為此車道為均質車流，可以看到車輛行進的軌跡與車流密度的變化。而因為上游受到號誌的影響，車流流量呈現一波一波的型態往下游走。可以觀察到密度較高之區域，其下游之

空間車距也較小。圖 5-2 則是中間車道描述混合車流的現象，上游的車流為小客車密度變化；圖 5-3 下游路段則是呈現機車車流情形。而下游路段上，黑色線條表示小客車，灰色線條表示機車。兩張圖皆可看到密度和空間車距之變化。圖 5-4 和圖 5-5 則是呈現外車道之變化，可以發現其機車流量明顯相較於其他兩道多，小客車較少。同時可以觀察到雖然兩車種會相互干擾，但並非完全排斥。從圖中可以發現車輛於接近路口時，車隊之形成並不多，尚無影響到上游巨觀模式，意即衝擊波尚未抵達上游。

情境二(200-100)、情境三(250-50)則是將轉換介面往前移動到靠近下游路口處，觀察模擬的結，其結果顯示於圖 5-6 至圖 5-15。此兩種情境則可以觀察到衝擊波自下游向上衝擊，造成巨觀模式上之延滯。當介面移動到距離路口 50 公尺處時，則衝擊更為明顯。四種情境之差異在於介面之設置位置不同

為探討三種設置介面情境之差異，故紀錄各個情境於模擬之時間效率與準確度做比較並分析。首先，固定模擬時間為 1000 秒，模式於三種情下境所耗費之時間列於下表：

表 5-4 模式模擬情境時間效率

情境	時間(分:秒/模擬 1000 秒)
150-150	26:10
200-100	21:34
250-50	18:41
290-10	4:43

由表 5-4 可以發現巨觀模式涵蓋之範圍越多，執行時間效率則越好，其與期望相符，因巨觀模式執行效率較高的原因。本研究未將情境 10-290 納入考慮，因為其單位時間需要處理之車輛數過多導致計算時間過長，故無法確切得知。而上述四種情境之模擬時間比為 1570：1294：1121：283。情境一與情境二之時間效率比值為 1.21，情境二與情境三之時間效率比值為 1.15，情境三與情境四之時間效率比值為 3.96，可推論出介面向下游移動確實可提升時間效率。儘管情境四之時間效率最佳，然而其近似將整個路段範圍以巨觀模式涵蓋，相對失去兩模式連結之功能。

此外，為求模式之準確度，將記錄模式模擬結果 250 公尺與 300 公尺(路口流量)

處之流量，以 10 秒為單位繪製流量時間趨勢圖。並以平均絕對誤差百分比(MAPE)數值顯示模擬資料與實際資料之差異，MAPE 數值為配適時間序列評斷正確性之統計量。其計算方式如下：

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \times 100\%$$

其中 $A_t$ 為實際資料、 $F_t$ 為預測資料、 $n$ 為樣本數。而資料中顯示實際資料可能為零，故遇到此類樣本則以 $\frac{|A_t - F_t|}{2}$ 替代原式。由 MAPE 值之大小可判定預測或模擬之準確程度，並以表 5-5 為評估準則。

表 5-5 MAPE 數值評估準則

MAPE(%)	說明
<10	高準確的預測
10-20	優良的預測
20-50	合理的預測
>50	不準確的預測

圖 5-16 至圖 5-19 為實際道路與模擬各個情境之流量變化圖，並顯示各個車道與車種之 MAPE 值。然而 MAPE 數值容易受到離群值的影響，因為受到上游號誌之影響，車流為一波一波型式往下游走，下游號誌紅燈時相啟動時無車輛可經過，使得資料有約半數數值為零，意即單位時間內沒有任何車通過。故此型態之資料並不適合使用 MAPE 作為準則，故改採對稱平均絕對百分比(SMAPE)可改善此狀況。

$$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{(A_t + F_t)/2} \times 100\%$$

因為考慮到實際道路初始之車流情形並非完全沒車，與模擬資料有些許差異，故將前一分鐘之資料省去並計算 SMAPE 值。表 5-6 為各情境之 SMAPE 數值，其中觀察發現於任何情境下，小客車與機車於任何車道之數據都落在合理預測範圍之內，然而機車數值卻明顯較小客車高，理由可能為機車於現實情況下受號誌之影響較多加上實際道路上路口設有機車停等區，然而模式並無法描述。情境與情境間之比較後，發現對於內車道均質車流而言，介面設置位置越上游，其模擬準確性較佳，然而整體而言

均屬於合理之預測；其中準確性最低為情境四(290-10)，能原因為車流於巨觀模式中較為貼近非干擾車流，而較晚轉換成微觀則會造成與現實車流之行為誤差越大。再者，機車車流量於外車道之誤差又較中間車道大，可能原因為路邊停車、右轉車流之影響所造成。而四個情境中屬第一、二種情境較為精準。

除了觀察路口的流量外，同時亦對距離路口 100 公尺處紀錄流量。並以同樣方式算出 SMAPE 值，其結果列於表 5-7。因為距離路口較遠，亦表示觀察點可能落於巨觀模式或微觀模式中處理。相比較可發現其數值平均較路口的大，表示誤差較大，但都落於合理推測範圍內。其原因推論為路段中車流行進因擴散作用較無特定規律，而路口車流則受到號誌控制影響，車隊分隔較為明顯。情境間之比較，情境三與四之誤差百分比相同是因為兩者同以巨觀模式中之車流流量計算。整體表現來看，介面設位置不應太過接近路口，在車輛受到干擾之前就轉換成微觀模式處理。

表 5-6 路口處之 SMAPE 值

情境	內車道	中間車道	中間車道	外車道	外車道
	小客車(%)	小客車(%)	機車(%)	小客車(%)	機車(%)
150-150	9.7	8.8	12.7	3.8	14.3
200-100	8.7	9.2	12.6	3.9	13.5
250-50	10.4	8.1	15.8	4.6	14.6
290-10	15.4	10.9	14.4	4.9	25.6

表 5-7 距路口 100 公尺處之 SMAPE 值

情境	內車道	中間車道	中間車道	外車道	外車道
	小客車(%)	小客車(%)	機車(%)	小客車(%)	機車(%)
150-150	28.4	31.2	36.7	11.4	40.1
200-100	27.1	33.0	36.8	9.4	44.4
250-50	34.9	46.4	41.9	38.1	47.5
290-10	34.9	46.4	41.9	38.1	47.5

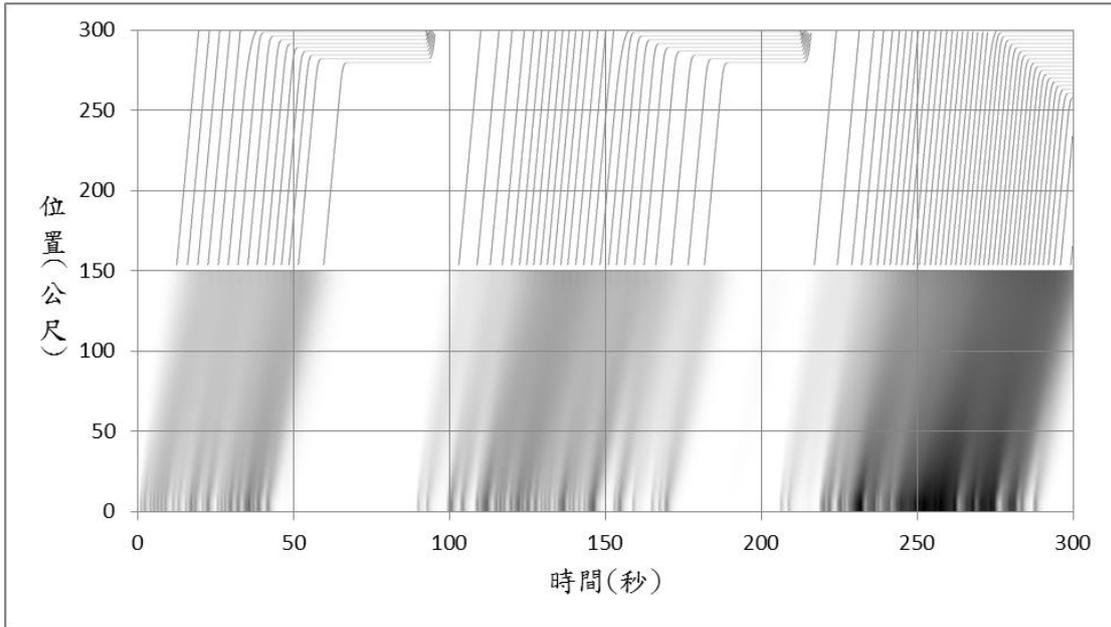


圖 5-1 情境一(150-150)內車道巨微觀轉換-小客車

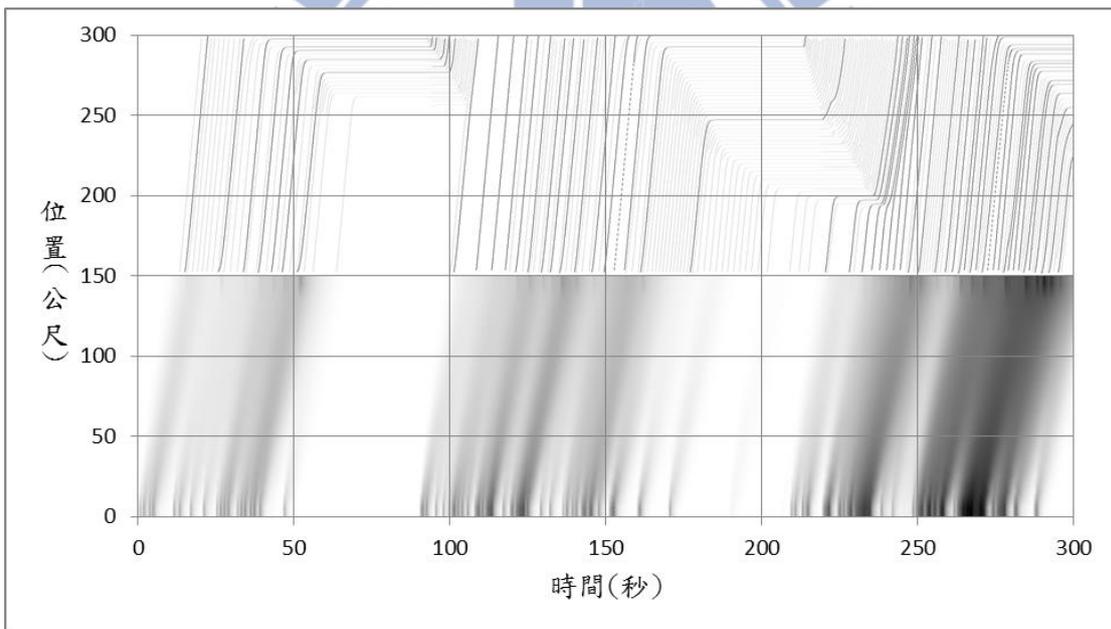


圖 5-2 情境一(150-150)中間車道巨微觀轉換-小客車

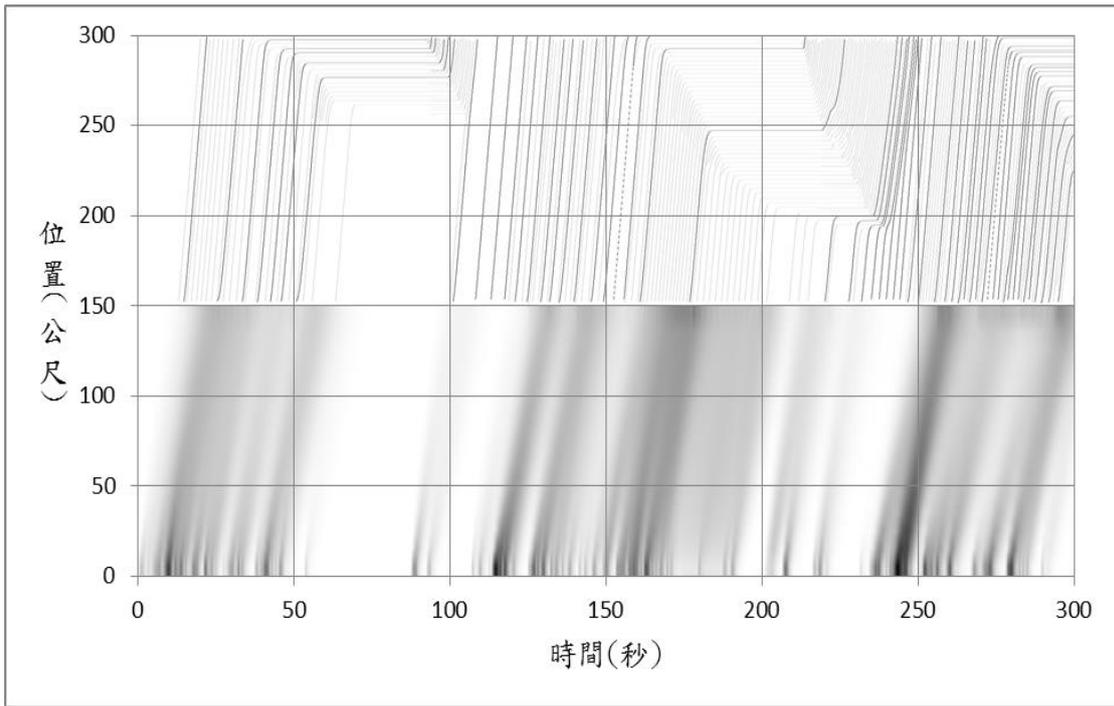


圖 5-3 情境一(150-150)中間車道巨微觀轉換-機車

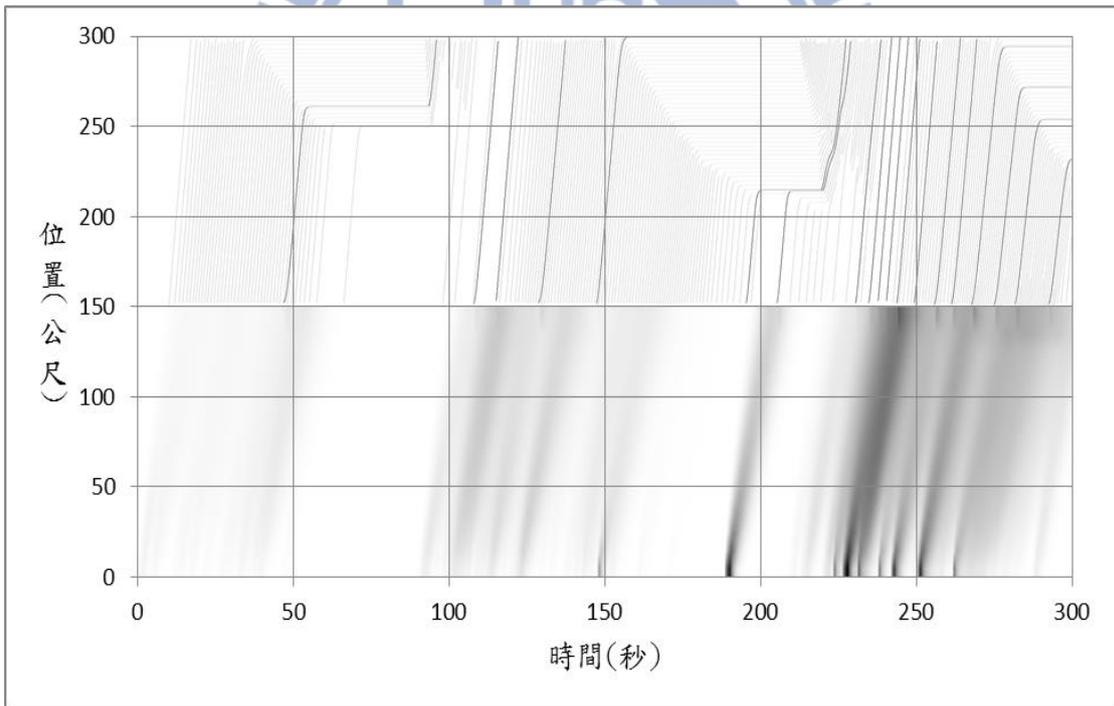


圖 5-4 情境一(150-150)外車道巨微觀轉換-小客車

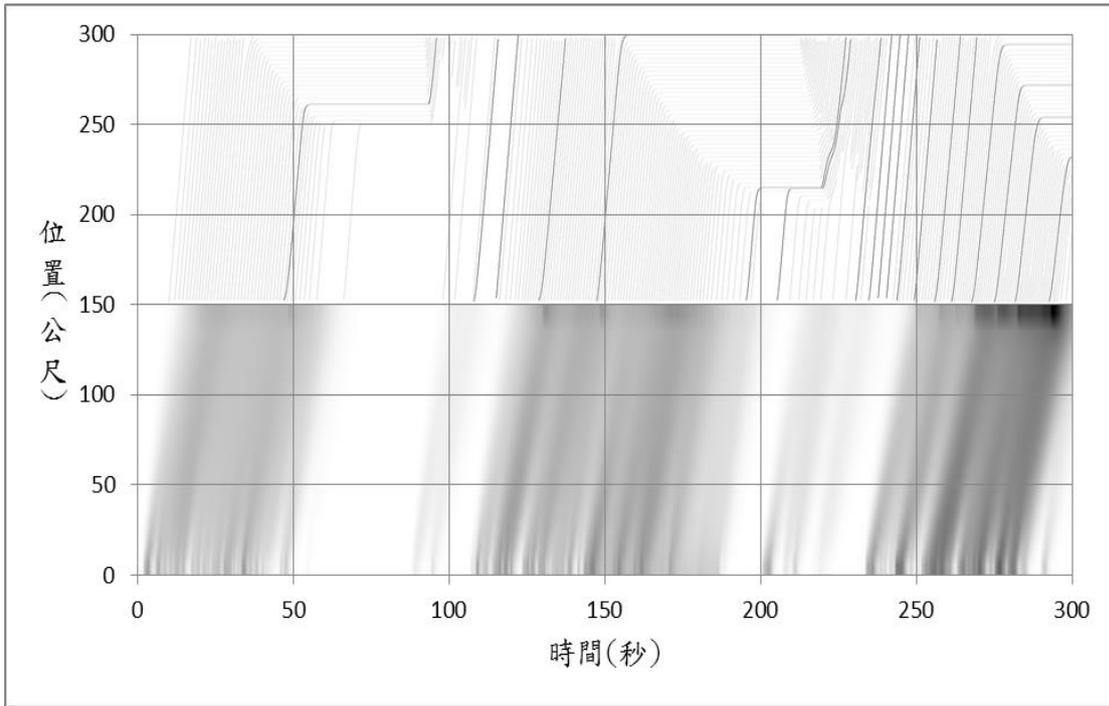


圖 5-5 情境一(150-150)外車道巨微觀轉換-機車

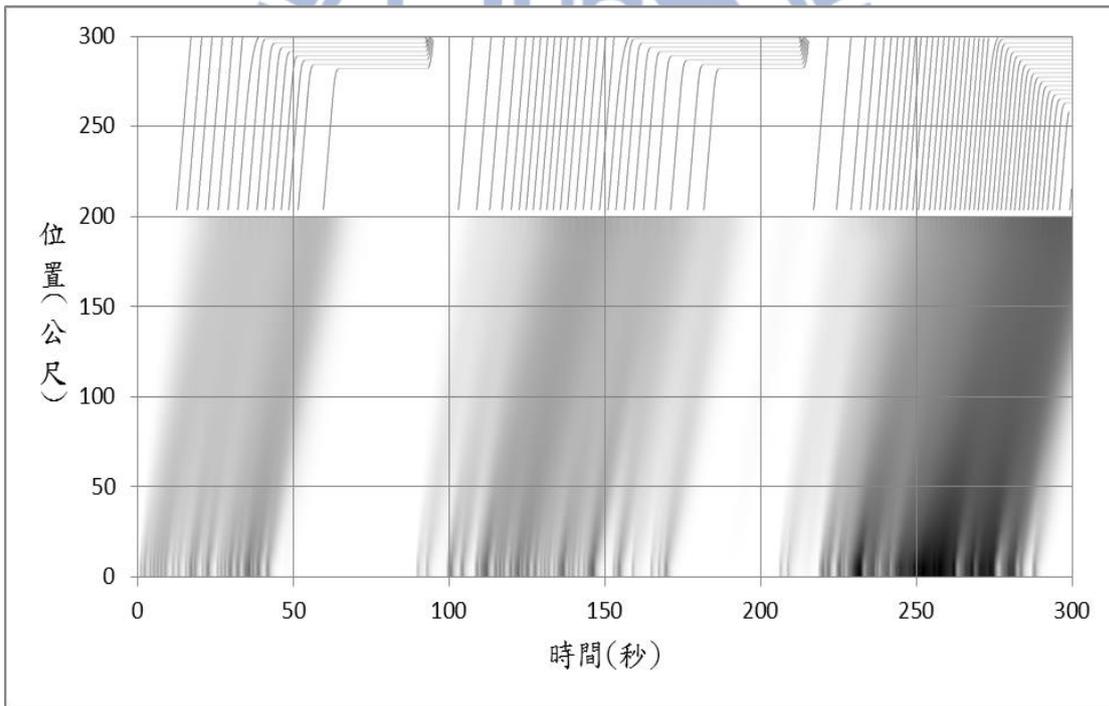


圖 5-6 情境二(200-100)內車道巨微觀轉換-小客車

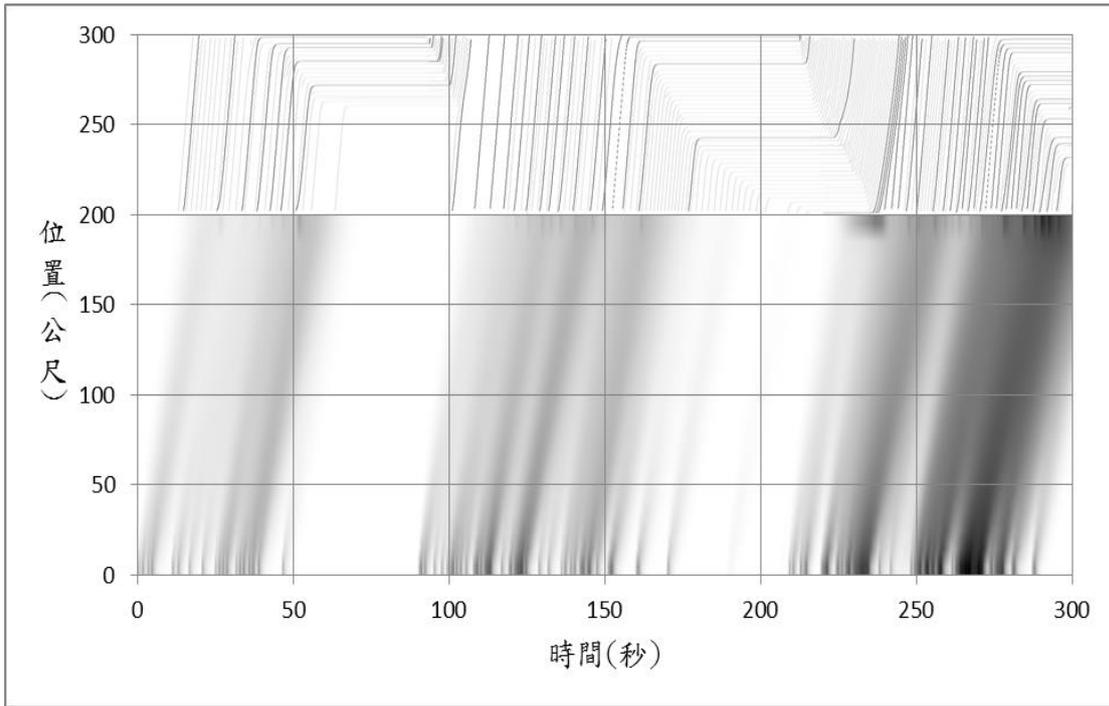


圖 5-7 情境二(200-100)中間車道巨微觀轉換-小客車

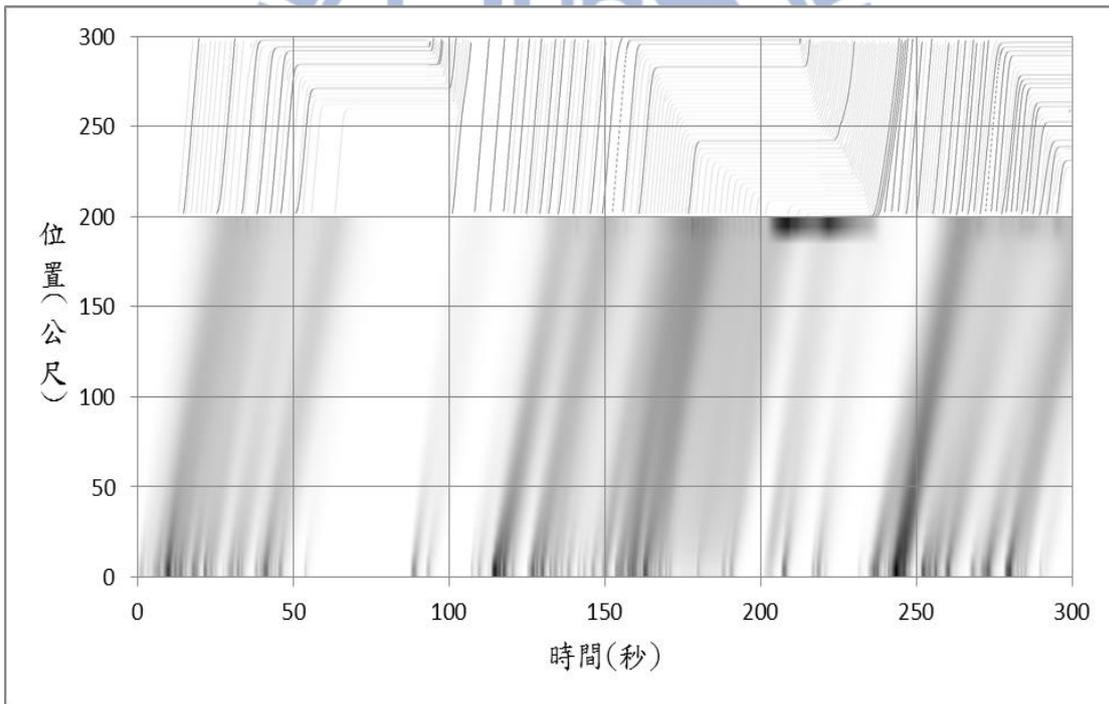


圖 5-8 情境二(200-100)中間車道巨微觀轉換-機車

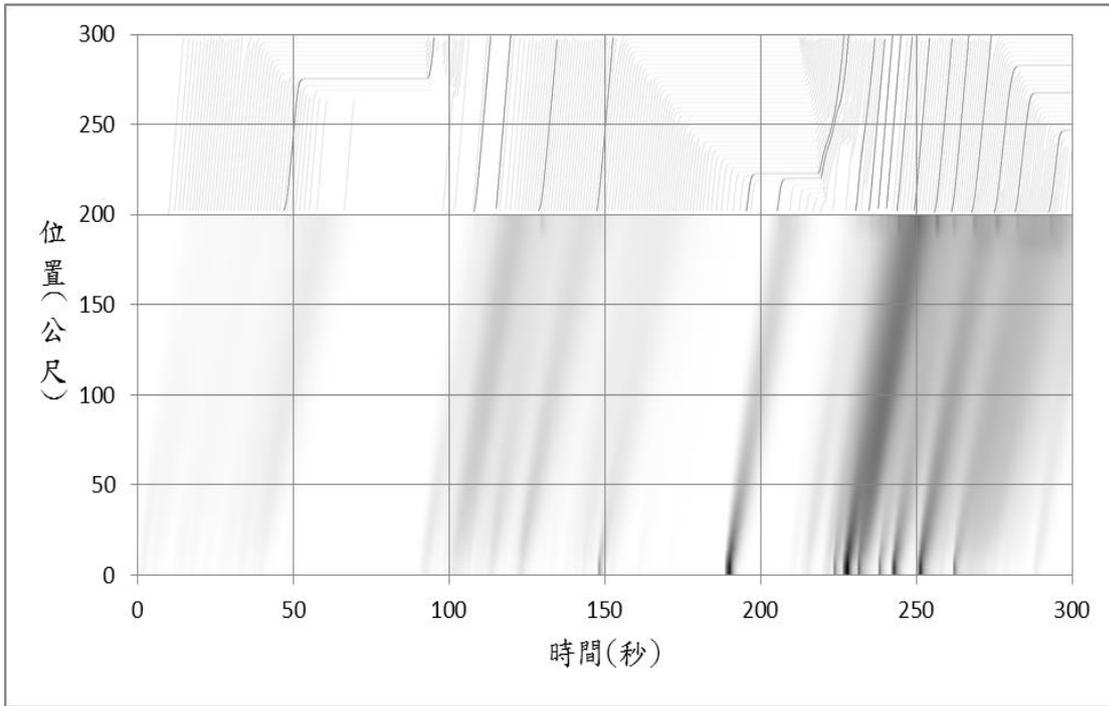


圖 5-9 情境二(200-100)外車道巨微觀轉換-小客車

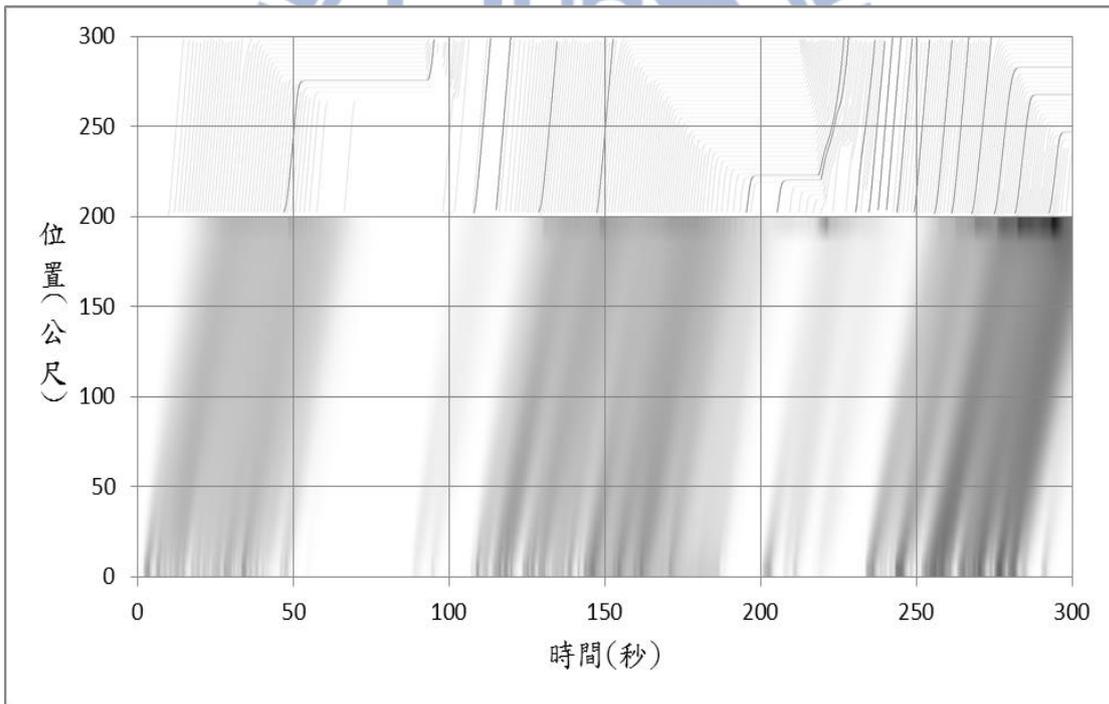


圖 5-10 情境二(200-100)外車道巨微觀轉換-機車

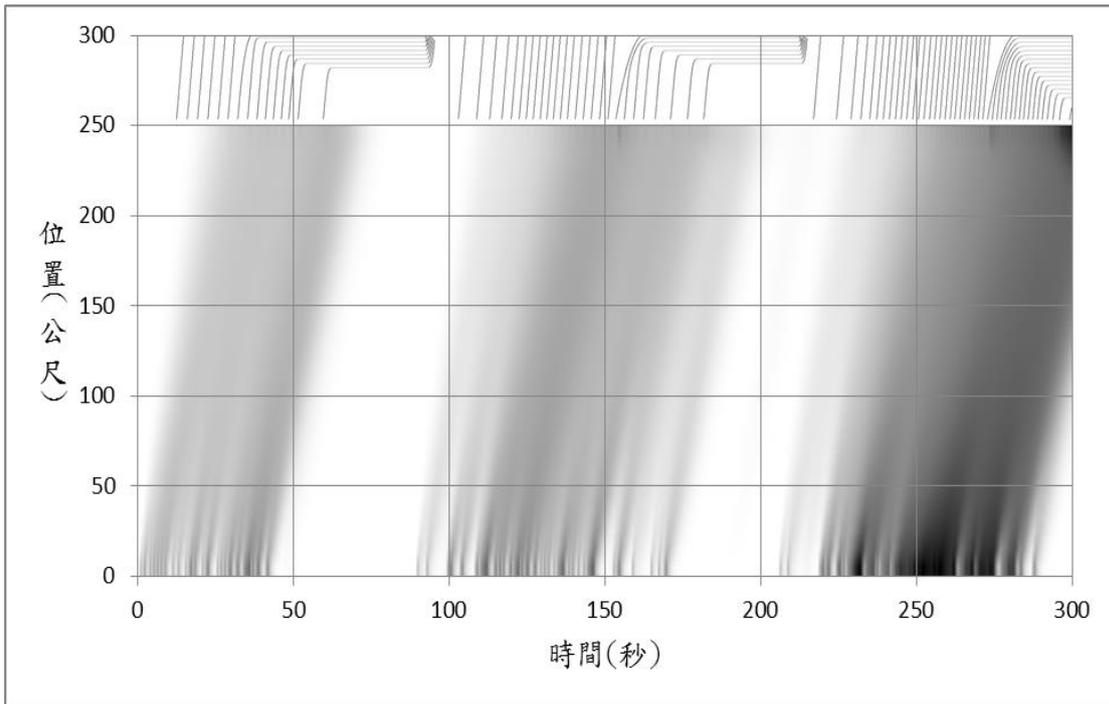


圖 5-11 情境三(250-50)內車道巨微觀轉換-小客車

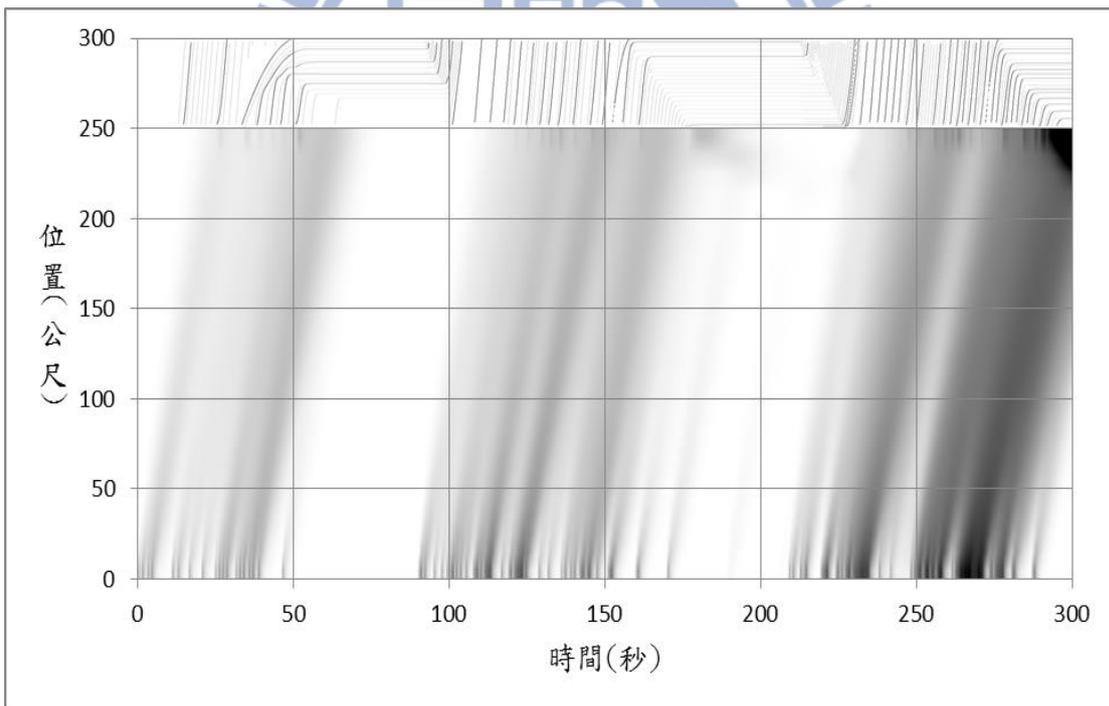


圖 5-12 情境三(250-50)中間車道巨微觀轉換-小客車

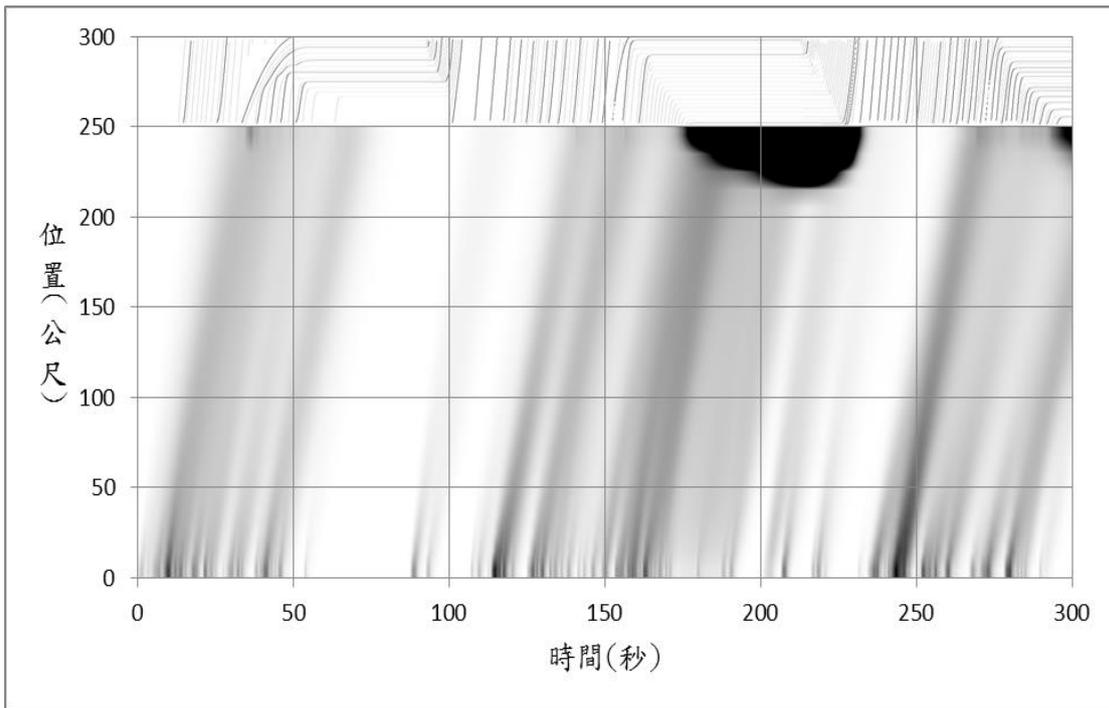


圖 5-13 情境三(250-50)中間車道巨微觀轉換-機車

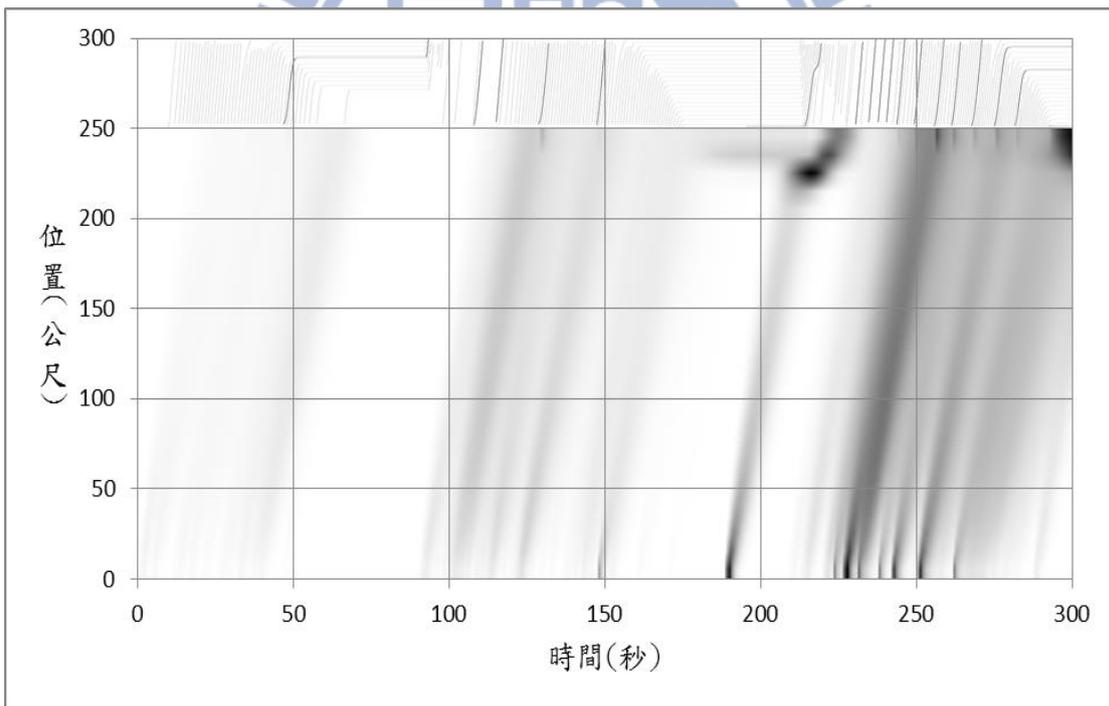


圖 5-14 情境三(250-50)外車道巨微觀轉換-小客車

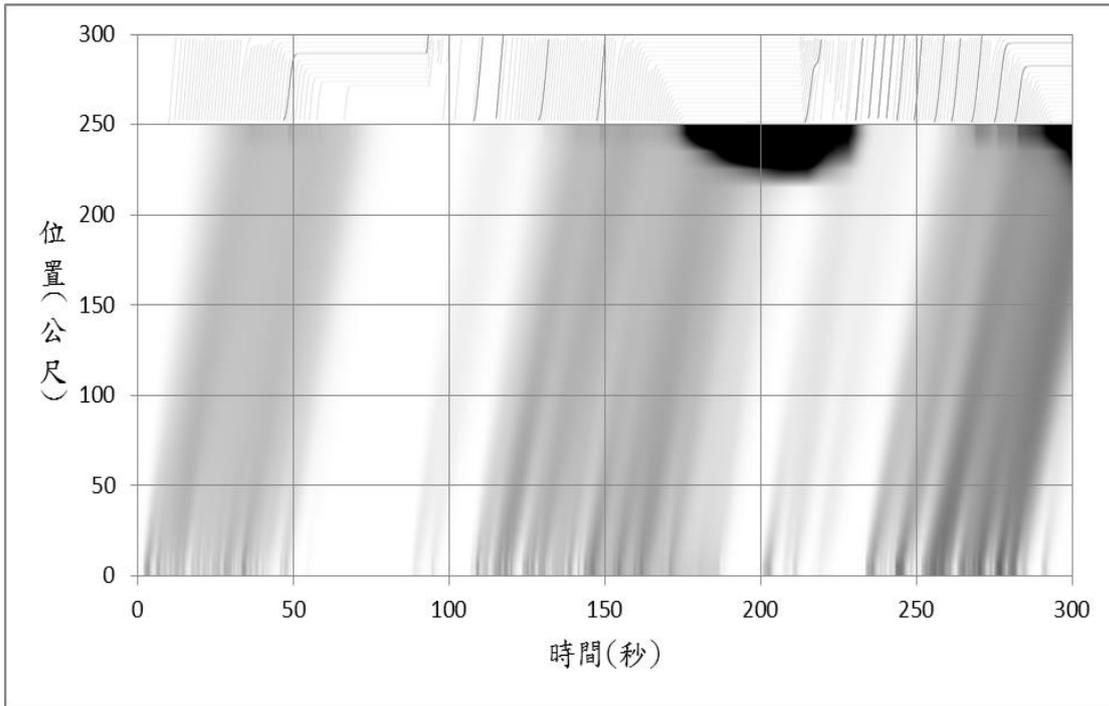


圖 5-15 情境三(250-50)外車道巨微觀轉換-機車

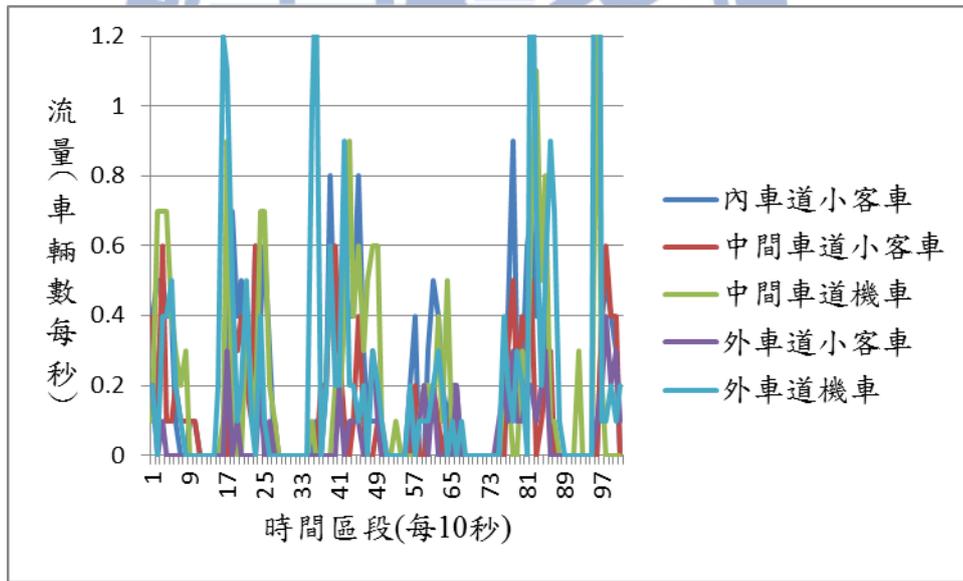


圖 5-16 實際道路路口流量變化圖

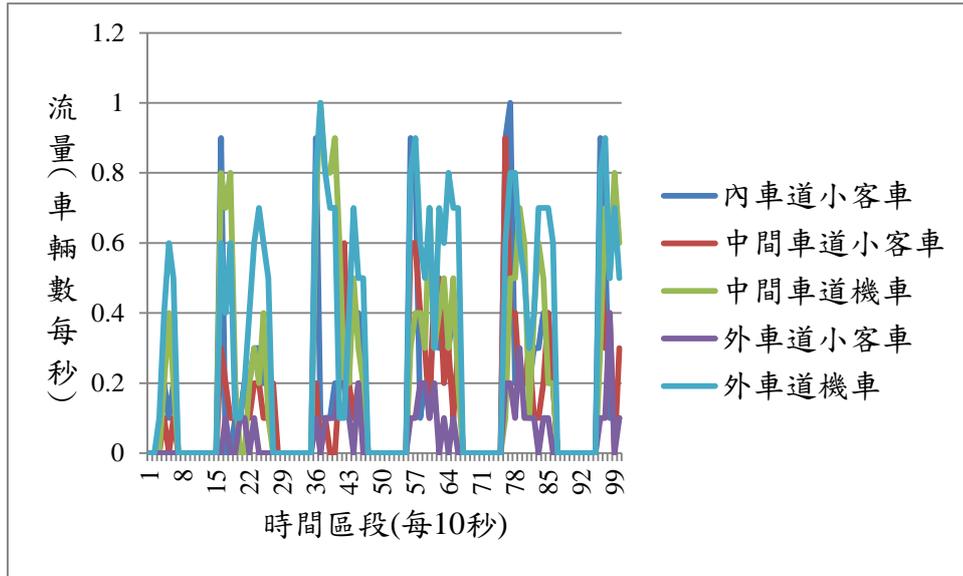


圖 5-17 情境一(150-150)路口流量變化圖

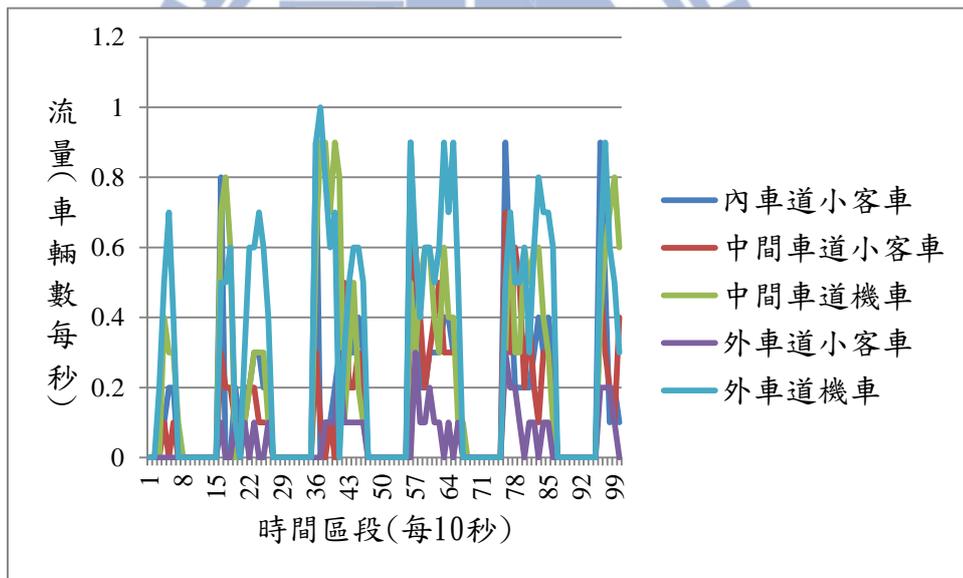


圖 5-18 情境二(200-100)路口流量變化圖

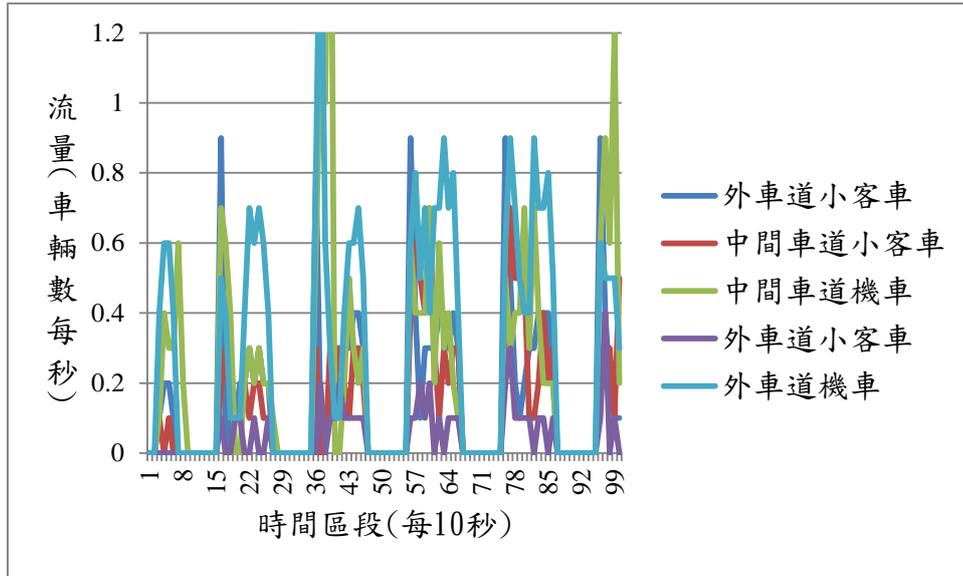


圖 5-19 情境三(250-50)路口流量變化圖



## 第六章 結論與建議

本研究為連結巨觀與微觀之車流模式，並且考慮小客車與機車互動行為與多車道之影響。顧慮到靠近號誌路口，車流之行為較為複雜，需要以微觀模式討論之；路段則以巨觀模式處理在國內機車數量眾多，其車流不可被忽視。而在模式中未處理其體積小且能變換車道之行為進行處理。以下為本研究所得出之結論與建議。

### 6.1 結論

1. 巨觀車流與微觀車流理論有各自之優劣，巨觀車流模式可以有效率地描述車流之特性，卻無法得知詳細的資訊；微觀車流模式則可以呈現每一輛車於道路上之刺激與反應，卻相對執行上較無效率。在市區道路上明顯為干擾車流為主，路口的轉向及號誌導致車輛行為複雜，而上游路段則干擾較少，故將兩者結合對於模擬市區道路有所幫助。本研究之模式能夠順利傳遞巨觀與微觀之訊息傳遞，轉換車流與車輛。
2. 為探討機車車流行為與多車道環境，本研究考慮車道間之變換率、車種之間相互干擾的條件擁擠密度與條件自由車流速率、機車與小客車之不同效用來解釋國內特有的機車混合車流。
3. 本研究利用模擬資料測試模式之運作情形，其結果呈現出衝擊波之擴散與混合車流和均質車流的表現差異。並蒐集實際市區道路車流資料，將其整理並從中推估出相關模式參數，使模式更加完整。
4. 於模式結果中，微觀模式描述接近號誌路口之路段，其干擾程度相較大，根據與實際車流資料做比對，可發現機車車流所受影響相較於小客車嚴重。
5. 將實際車流資料代入模式中計算，並觀察巨觀與微觀之間連結。可觀察到不同觀測點下所測得之車流流量變化，以對稱平均絕對誤差百分比做為確認模式準確性之準則，認為介面設位置不應太過接近路口，在車輛受到干擾之前就轉換成微觀模式處理。而就時間效率而言，除非介面設置過於極端，否則時間效率上之好壞並不顯著。

## 6.2 建議

1. 本研究主要探討包含機車與小車之混合車流，並未考慮到其他車種，如巴士等大型車輛。未來之研究可以將額外之車種納入，能夠更符合國內市區道路之車流特性。
2. 本研究針對路段至路口之車流情形，當車輛經過停止線則離開實驗路段。故沒有辦法呈現路口中車流行為與路口至路段的反向操作，未來研究可以考慮將研究規模擴大，以反應國內路網之特性。
3. 本研究假設混合車流之間互動干擾關係為線性，儘管可以描述機車之彈性，但仍有其幅度的限制，未來研究可以考慮以不同的假設關係進行探討，並比較其優劣。
4. 本研究儘管對於巨微觀之轉換介面設置位置分析及討論，但尚無針對最佳化界面位置求取最佳解，抑或是建立可移動之轉換介面。未來研究可以將介面點設置問題進行研究，並找出最佳之設置位置。
5. 本研究納入跟車模式以模化微觀車流，然而就有之研究均探討於長且無干擾之車道上車輛行為，並無法確切呈現因路口所影響之特殊行為，例如右轉或左轉車道車流、機車停等區。車輛並非因為單純密度大小而決定是否要變換車道，而是轉向需要而產生。路口對於機車車流影響尚有許多因素未納入考慮，未來研究可以對於鄰近路口建立其車流模式來描述車流。

## 參考文獻

- 謝志偉(2010)，「混合車流格位傳遞模式之建立與驗證」，國立交通大學交通運輸研究所，碩士論文。
- 李建豪(2012)，「市區幹道機車超車行為路徑選擇決策模式」，國立台灣大學土木工程系，碩士論文。
- Bourrel, E. & Lesort, J. B. (2003) Mixing micro and macro representations of traffic flow a hybrid model based on the LWR theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1852, 193-200.
- Cho, H. J. & Lo, S. J. (2002) Modeling self-consistent multi-class dynamic traffic flow. *Physica A*, 312. 342-362.
- Colombo, R. M. (2002) A  $2 \times 2$  hyperbolic traffic flow model. *Mathematical and Computer Modeling*. 35. 683-688.
- Daganzo, C. F. (1995) Requiem for second order fluid approximations of traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 4, 277-286.
- Daganzo, C. F. (1997) A continuum theory of traffic dynamics for freeways with special lanes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 31. 83-102.
- Daganzo, C. F. & Laval, J. A. (2006) Lane changing in traffic streams. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40. 251-264.
- Gavage, S. B. & Colombo, R. M. (2003) An n-populations traffic flow model for traffic flow. *European Journal of Applied Mathematics*, 14. 587-612.
- Gazis, D. C., Herman R. & Weiss G. H. (1962) Density oscillations between lanes of a multilane highway. *Operations Research*, 10. 658-667.
- Gupta, A. K. & Katiyar, V. K. (2007) A new multi class continuum model for traffic flow. *Transportmetrica*, 3. 73-85.
- Helbing, D. (1997) Modeling multi-lane traffic flow with queuing effects. *Physica A*, 242. 175-194.
- Helbing, D. (1998) From microscopic to macroscopic traffic models. *A Perspective Look at Nonlinear Media*, 503. 122-139.
- Helbing, D. & Tilch, B. (1998) Generalized force model of traffic dynamics. *Physical*

Review E, 58. 133-138.

- Hoogendoorn, S. P. & Bovy, P. H. L. (2000) Continuum modeling of multiclass traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34. 123-146.
- Jiang R., Wu, Q. & Zhu Z. (2001) Full velocity difference model for a car following theory. *Physical Review E*, 64. 017101.
- Jin, W. L. (2010) A kinematic wave theory of lane-changing traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44. 1001–1021.
- Leclercq, L. & Moutari, S. (2007) Hybridization of a class of second order models of traffic flow. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 15. 918-934.
- Lan, L. W., Chiou Y. C., Lin Z. S. & Hsu C. C. (2010) Cellular automaton simulations for mixed traffic with erratic motorcycles' behaviours. *Physica A*, 389. 2077-2089.
- Leclercq, L. (2007) Hybrid approaches to the solutions of the Lighthill Whitham Richards model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41. 701-709.
- Lee, T. C., Polak J. W. & Bell M. G. H. (2009) New approach to modeling mixed traffic containing motorcycles in urban areas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2140. 195-205.
- Logghe, S. & Immers, L. H. (2008) Multi-class kinematic wave theory of traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42. 523-541.
- Meng, J. P., Dai S., Dong L. & Zhang J. (2007) Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles. *Physica A*, 380 470-480.
- Minh, C. C., Sano K. & Matsumoto S. (2005) The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6. 1496-1508.
- Newell, G. F. (1998) A moving bottleneck. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32. 531-537.
- Ngoduy, D. (2011) Multiclass first-order traffic model using stochastic fundamental diagrams. *Transportmetrica*, 7. 111-125.
- Wanger, C., Hoffmann C., Sollacher R., Wagenhuber J. & Schurmann B. (1996) Second-order continuum traffic flow model. *Physical Review E*, 54, 5073-5085.
- Wong, G. C. & Wong, S. C. (2002) A multi-class traffic flow model an extension of

LWR model with heterogeneous drivers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36. 827-841.

- Zhang, H. M. & Jin, W. L. (2002) A kinematic wave traffic flow model for mixed traffic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1802. 197-204.
- Zhang, H. M. (1998) A theory of nonequilibrium traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32. 485-498.
- Zhang, H. M. (2003) Anisotropic property revisited—does it hold in multi-lane traffic? *Transportation Research Part B: Methodological*, 37. 561-577.
- Zhang, P. & Wong, S. C. (2006) Essence of conservation forms in the traveling wave solutions of higher-order traffic flow models. *Physical Review E*, 74. 026109.

