

國立交通大學

交通運輸研究所

碩士論文

模糊邏輯匝道儀控模式-細胞自動機之模擬分

析

Fuzzy Logic Ramp Metering Control Models - A Simulation
Analysis of Cellular Automaton

研究生：鐘仁傑

指導教授：邱裕鈞

中華民國九十七年六月

模糊邏輯匝道儀控模式-細胞自動機之模擬分析

Fuzzy Logic Ramp Metering Control Models - A Simulation Analysis of
Cellular Automaton

研究生：鐘仁傑

Student : Jen-Chieh Chung

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



Submitted to Department of 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 2008

Taipei, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年六月

模糊邏輯匝道儀控模式-細胞自動機之模擬分析

學生：鐘仁傑

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

匝道儀控是高速公路交通控制中最常見且有效的控制策略之一，以控制匝道併入車流量的方式達到維持主線服務水準、減少匝道等候車輛與預防事故發生的效果。因此，在過去三十年來已有許多學者針對匝道儀控進行許多的研究與應用。目前匝道儀控策略主要可分為三類：定時儀控、交通感應儀控(獨立型與整合型)以及可接受車距控制，其中交通感應儀控可適應性的即時反應交通狀況，因而受到許多學者大量的關注。過去已有許多交通感應儀控演算法，例如：ALINEA、SWARM、METALINE、連鎖匝道演算法、線性規劃等，其中大部分的方法都是以即時交通資訊透過數學模式進行儀控率推估。

然而，由於快速且明顯的交通狀況變化，並不適合以明確性方式進行匝道儀控。模糊邏輯控制(Fuzzy Logic Control, FLC)是由 if-then 規則所組成的專家系統，可以處理含糊不清或不明確的人類認知和判斷，是明確性專家系統所無法處理。因此，本研究首先建構車流型態判斷模式，以進行四種車流型態判斷，包括自由流、輕微同步流、強烈同步流和大範圍擁擠流。以模糊邏輯控制在考慮主線車流型態和匝道等候車輛數下，分別建構獨立型和整合型儀控策略，獨立型儀控策略是在只考慮局部的交通資訊下進行儀控率推估；整合型儀控策略則是加入上游匝道儀控率為狀態變數之一。為了進一步研究且比較不同匝道儀控策略的績效和車流型態的轉變，因此本研究將以細胞自動機(Cellular Automata, CA)發展微觀車流模擬模式。

透過簡例和實例證明本研究所研擬之獨立型和整合型儀控策略之績效，以不實施匝道儀控、定時匝道儀控、ANCONA 在不同幾何設計路段和交通情境下進行績效評比。從簡例和實例模擬結果來看，以不實施匝道儀控下的總旅行時間為比較基礎，在簡例中整合型儀控策略的改善程度為 2.16~6.66%；在實例中改善程度為 7.96%為最佳，其次為獨立型儀控策略。此外，更進一步觀察車輛的時空速率變化，可以發現在實施本研究所研擬之儀控策略下車輛速率的波動較平緩且平均速率較高。由此可知，本研究研擬之儀控策略的實用性和控制績效皆可獲得確認。

關鍵字：模糊邏輯控制，匝道儀控，細胞自動機

Fuzzy Logic Ramp Metering Control Models-A Simulation Analysis of Cellular Automaton

Student : Jen-Chieh Chung

Advisor : Dr. Yu-Chiun Chiou

Institute of Traffic and Transportation
National Chiao Tung University

Abstract

Ramp metering is one of the most popular and effective strategy for freeway traffic control. It aims to control on-ramp traffic so as to enhance mainline level of service, reduce on-ramp queue and prevent accidents. Numerous related researches have been conducted and even been field tested for over thirty years. The ramp metering algorithms can be divided into three main categories: pre-timed ramp metering, traffic responsive metering (isolated and integrated), and gap-acceptance merge control. Since traffic responsive metering can adaptively respond to real time traffic conditions, it has received intensive attentions from researchers. Many traffic responsive metering algorithms have been developed, such as ALINEA, SWARM, METALINE, linked-ramp algorithm, linear programming. Most of them employ mathematic models to determine the optimal metering rates by considering real-time traffic information.

However, due to the rapid and remarkable fluctuation of traffic conditions, it might be rather risky to control the on-ramp traffic based upon a clear-cut (crisp) judgment and control. Fuzzy logic controller (FLC), an expert system based on if-then fuzzy rules, has the advantages of treating ambiguous or vague aspects of human perception and judgment, with which a non-fuzzy expert system normally cannot deal. Thus, this study first develops a traffic phase determination model to indicate the traffic condition from four phases: free-flow, light synchronized, heavy synchronized, and wide moving jam. Fuzzy logic ramp metering models by considering mainline traffic phase and on-ramp queue length are then developed under two metering strategies: isolated and integrated. The former strategy is to determine the metering rate based the local traffic information alone, while the latter strategy further considers the upstream metering rate as an extra state variable. In order to further investigate and compare the performances and traffic phase transitions of various ramp metering strategies, a microscopic traffic simulation model,

cellular automata (CA), is then developed.

To demonstrate the performances of the proposed ramp metering models: isolated and integrated, case studies on an exemplified example and a field example of are conducted, respectively. Comparisons with non-metering, pre-time metering and ANCONA metering models under various geometric networks and traffic scenarios are also made. The results on both exemplified example and field example consistently show that the integrated fuzzy logic ramp metering model performs best, which can curtail 2.16~6.66% and 7.96% of total travel time of non-metering model under exemplified and field examples, respectively, followed by the isolated fuzzy logic ramp metering model. In addition, from the in-depth investigation of the temporal and spatial variations of vehicular speed, it indicates that the average speed can be largely increased while speed variations can be reduced under the proposed metering models. Thus, the applicability and performance of the proposed models have been validated.

Key Words: fuzzy logic control, ramp metering, cellular automata



誌謝

本論文得以順利完成，首先由衷感謝指導教授 邱裕鈞博士的悉心指導，恩師平日嚴謹的教學態度乃至於研究精神、待人處事皆令學生佩服，而老師於學生在方法論觀念上之啟發及對於論文內容鉅細靡遺的審閱，論文寫作期間的鼓勵指導，實為受益良多，在此致上最深的敬意與感謝。

論文口試時，承蒙明道大學 藍武王院長與成功大學 魏健宏教授殷切指正疏漏之處並惠賜諸多卓見，使本論文得以更趨完備，僅致上由衷的謝意。論文研討期間，所上 馮正民教授與 陳穆臻教授提供許多寶貴的意見，及論文審查時 黃承傳教授的諸多卓見，讓我能夠掌握論文的徵結。此外，特別感謝博士班志誠學長與日新學長，在模式建構與程式設計上遇到困難時，細心的為我解惑、幫助我；同時感謝 Gary 先生在撰寫程式時所給予的幫助，使得本論文的程式能順利如期完成。

兩年的研究時光中，同門奮鬥打拼的白少、世勛、建華與依潔，謝謝你們在這段日子陪伴我一起研究、相互幫忙與打氣，以及其他親愛的同學們，研究室內共同的生活、課業上的討論，因為有你們讓兩年研究所生活變的更為充實、精彩。在求學的過程中，感謝 Winnie 一路相伴，從研究所考試到順利完成論文，給予我諸多支持與鼓勵。

最後，感謝我的父母親與姐姐，感謝你們的細心栽培與照顧，由於你們多年來的支持，使我沒有後顧之憂得以順利完成學業，謹將這份碩士學位的榮耀與喜悅獻予你們，與你們一同分享。

鐘仁傑 謹誌於
交通大學交通運輸研究所
中華民國九十七年六月

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	IV
目錄.....	V
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.....	1
1.3 研究範圍與限制.....	2
1.4 研究內容與流程.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 細胞自動機之相關研究.....	5
2.2 匝道儀控之相關研究.....	13
2.3 文獻綜合評析.....	21
第三章 模式建構.....	22
3.1 細胞自動機模式.....	22
3.1.1 Nagel and Schreckengerg 模式(N-S).....	23
3.1.2 Velocity-Dependent-Randomization 模式(VDR).....	23
3.1.3 The time-oriented CA 模式(TOCA).....	24
3.1.4 Brake Light 模式(BL).....	24
3.1.5 Jiang and Wu 模式(J-W).....	25
3.1.6 Kerner-Klenov-Wolf 模式(KKW).....	26
3.1.7 Emmerich and Rank 模式(ER).....	27
3.1.8 Helbing and Schreckeberg 模式(HS).....	28
3.1.9 各模式比較.....	28
3.1.10 改良型細胞自動機模式.....	29
3.2 車流型態判斷.....	39
3.3 匝道儀控策略.....	46
3.3.1 擁擠型態自動匝道儀控策略(Automatic On-ramp Control of Congested patterns, ANCONA).....	46
3.3.2 模糊邏輯匝道儀控模式(FLRC).....	47
第四章 簡例驗證.....	52
4.1 簡例說明.....	52
4.2 參數設定.....	53
4.3 車流模擬模式驗證.....	53

4.4 瓶頸路段車流型態分析.....	54
4.5 車流型態驗證.....	55
4.6 績效評比.....	59
4.7 情境分析.....	61
第五章 實例應用.....	65
5.1 參數設定.....	66
5.2 控制績效評比分析.....	66
5.3 小結.....	68
第六章 結論與建議.....	70
6.1 結論.....	70
6.2 貢獻.....	71
6.3 建議.....	71
參考文獻.....	73



表目錄

表 2.1 細胞自動機文獻彙整.....	10
表 2.2 匝道儀控演算法文獻彙整.....	18
表 2.3 模糊邏輯匝道儀控文獻彙整.....	19
表 3.1 細胞自動機模式規則比較表.....	29
表 3.2 獨立型 FLRC 之規則庫.....	48
表 3.3 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率很低).....	50
表 3.4 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率低).....	50
表 3.5 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率普通).....	50
表 3.6 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率高).....	50
表 3.7 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率很高).....	51
表 4.1 車流型態判斷.....	58
表 4.2 簡例儀控績效比較表.....	60
表 4.3 情境一儀控績效比較表.....	62
表 4.4 情境二儀控績效比較表.....	62
表 4.5 情境三儀控績效比較表.....	63
表 4.6 情境分析儀控績效彙整表.....	63
表 5.1 實例流量表.....	65
表 5.2 總旅行時間彙整表.....	67

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	4
圖 3.1 模式架構圖.....	22
圖 3.2 基本單元、車輛細胞與道路格位的示意圖.....	30
圖 3.3 立方體時空範圍特定橫切面車流軌跡圖.....	33
圖 3.4 二車道道路小型車變換車道行為.....	37
圖 3.5 FLC 基本架構圖.....	39
圖 3.6 車流型態分布圖.....	42
圖 3.7 主線速度之隸屬函數型態.....	43
圖 3.8 主線流量之隸屬函數型態.....	43
圖 3.9 速度變化率之隸屬函數型態.....	43
圖 3.10 流量變化率之隸屬函數型態.....	44
圖 3.11 速度變化率/流量變化率之隸屬函數型態.....	44
圖 3.12 車流型態之隸屬函數型態.....	44
圖 3.13 最大隸屬度法解模糊化之示意圖.....	46
圖 3.14 匝道等候車輛數之隸屬函數型態.....	48
圖 3.15 匝道儀控率之隸屬函數型態.....	48
圖 3.16 面積法解模糊化之示意圖.....	49
圖 3.17 整合型模糊邏輯匝道儀控模式架構圖.....	51
圖 4.1 簡例示意圖.....	52
圖 4.2 流量-密度關係圖(cell/秒).....	54
圖 4.3 流量-密度關係圖(輛/小時).....	54
圖 4.4 純小型車車流速率時空變化圖(交流道間距=2km).....	55
圖 4.5 純大型車車流速率時空變化圖(交流道間距=2km).....	55
圖 4.6 混合車流瓶頸路段車流型態圖(交流道間距=2km).....	55
圖 4.7 純小型車車流速率時空變化圖(交流道間距>2km).....	55
圖 4.8 純大型車車流速率時空變化圖(交流道間距>2km).....	55
圖 4.9 混合車流速率時空變化圖(交流道間距>2km).....	55
圖 4.10 車流型態驗證時空軌跡圖.....	56
圖 4.11 第五分鐘車流型態分析圖.....	56
圖 4.12 第六分鐘車流型態分析圖.....	56
圖 4.13 第七分鐘車流型態分析圖.....	57
圖 4.14 第八分鐘車流型態分析圖.....	57
圖 4.15 第九分鐘車流型態分析圖.....	57
圖 4.16 第十分鐘車流型態分析圖.....	57

圖 4.17 第十一分鐘車流型態分析圖.....	57
圖 4.18 第十二分鐘車流型態分析圖.....	57
圖 4.19 第十三分鐘車流型態分析圖.....	58
圖 4.20 第十四分鐘車流型態分析圖.....	58
圖 4.21 三相車流理論流量-密度關係圖	58
圖 4.22 整合型 FLRC 車流速率時空變化圖.....	60
圖 4.23 獨立型 FLRC 車流速率時空變化圖.....	60
圖 4.24 ANCONA 車流速率時空變化圖.....	61
圖 4.25 定時儀控車流速率時空變化圖.....	61
圖 4.26 不實施儀控車流速率時空變化圖.....	61
圖 5.1 實例路段示意圖.....	65
圖 5.2 整合型 FLRC 車流速率時空變化圖.....	67
圖 5.3 獨立型 FLRC 車流速率時空變化圖.....	67
圖 5.4 ANCONA 車流速率時空變化圖.....	68
圖 5.5 定時儀控車流速率時空變化圖.....	68
圖 5.6 不實施儀控車流速率時空變化圖.....	68



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

隨著西部高速公路路網建設逐步完善，國內消費型態改變，我國小汽車比率逐年增加。國內高速公路交通量逐年巨幅成長，平常日都會區路段之上、下班尖峰時段及週末、假日常造成交通壅塞，尤其連續假期交通量較平常日增加約30%~50%，壅塞情形更為顯著，影響高速公路行車順暢及安全。有鑑於此，在有限的高速公路容量下提升服務能力實有其必要性。在高速公路交通管制中匝道儀控管制是最重要的管制策略之一，其控制目的在不影響高速公路主線服務水準下調節車輛適時適量匯入，以紓解車流，達到改善交通之目的。

目前匝道儀控策略可分為定時儀控、獨立交通感應儀控、整合性交通感應儀控等以降低高速公路壅塞為目的之控制策略，以及可接受車距控制、匯入控制等以強調匝道匯入安全為訴求之控制策略，然因問題複雜性之需要，上述最佳化模式常需面臨求解非線性或線性方程式之問題，非線性模式雖能精確描述問題，但求解不易且所需時間相當長。此外上述匝道儀控策略多以偵測交通參數作為匝道儀控之判斷，未考慮主線車流型態之轉變。雖然已有相關研究以細胞自動機(Cellular Automata, CA)觀察實行匝道儀控下主線車流型態之轉變與時空關係，但仍僅止於以細胞自動機作為車流模擬模式，尚未有以細胞自動機之模擬特性取得車流型態發展匝道儀控策略之研究，此乃本研究動機之一。

以往傳統的適應性號誌控制，大多數都以數學式來判斷其控制變數之門檻值，來作為控制邏輯之核心。然而，實務上，交通號誌控制往往容易受到不確定的干擾，而造成控制判斷上的誤斷，為能克服交通狀況之不確定性與控制機制之不穩定問題，過去許多研究乃採用模糊邏輯控制(Fuzzy Logic Controller, FLC)進行號誌控制，此乃本研究動機之二。

1.2 研究目的

基於上述之研究背景與動機，本研究之研究目的如下：

- 1、藉由細胞自動機的文獻評析，了解其基本理論、參數設定、模式型態，俾據以探討其應用於匝道儀控之可行性。
- 2、建構車流模擬模式，在細胞自動機模式上確定參數設定、模式型態、

輸出變數；在車流型判斷模式上確定狀態變數、控制變數、模糊規則、隸屬函數設定；在匝道儀控模式上確定狀態變數、模糊規則、隸屬函數設定，以細胞自動機和車流型態判斷模式輸出之變數透過模糊邏輯控制決定匝道儀控率。

- 3、發展獨立型與整合型模糊邏輯匝道儀控策略，並以巨觀車流理論驗證車流模擬模式，以簡例和實例應用分析匝道儀控策略績效及其實用性。

1.3 研究範圍與限制

本研究目的在以細胞自動機模擬分析模糊邏輯匝道儀控模式，研究對象包含獨立型與整合型匝道儀控系統，應用於包含三個上、下匝道之高速公路二線道路段。模式建構方面分為車流模擬模式、車流型態判斷模式與模糊邏輯匝道儀控模式三部分進行探討與應用，其中車流模擬模式乃針對高速公路二車道異質混合車流模式進行探討，分析其模式發展與控制應用，建立一車流型態模擬真實、判斷正確、控制過程有效率、控制績效良好之系統。



1.4 研究內容與流程

本研究之研究內容可分述如下：

1. 界定研究目的與範圍

本研究之研究目的在以細胞自動機結合模糊邏輯控制建構一模糊邏輯匝道儀控策略，應用細胞自動機模擬車流型態時空關係轉變，以高速公路主線車流型態與匝道等候車輛數透過模糊邏輯控制達到控制目的。分析對象為獨立型、整合型匝道儀控系統，實例應用擬以國道一號中部路段包含三組出、入口匝道之路段，評估整體系統控制績效。

2. 回顧相關文獻

(1)細胞自動機之相關文獻

藉由回顧細胞自動機之相關研究，了解其基本理論、應用限制、模式發展。彙析其模式型態、應用範圍、模式驗證...等，作為本研究車流模擬模式發展之參考。

(2) 匝道儀控之相關文獻

此部分區分為匝道儀控演算法與模糊邏輯控制於匝道儀控相關文獻之介紹，彙析其建構方法論、狀態變數、隸屬函數型態與等級數、設定方式、應用地區...等，參考相關文獻狀態變數選擇與模糊推論過程，發展本研究之模糊邏輯匝道儀控模式。

3. 模式建構

根據細胞自動機之相關文獻回顧結果發展二車道高速公路異質混合車流模擬模式，包含跟車規則、變換車道規則與匝道併入規則之研擬。利用模糊邏輯控制建構車流型態判斷模式，以主線車流型態作為匝道儀控策略狀態變數之一。結合匝道儀控演算法與模糊邏輯控制確定獨立型與整合型匝道儀控策略之狀態變數、語意變數選定、隸屬函數參數設定、解模糊化方法及控制變數。

4. 簡例驗證與比較分析

設計一簡例包含三組上、下匝道高速公路路段，以巨觀車流理論驗證車流模擬模式與車流型態判斷模式之真實性與正確性；以總旅行時間作為績效評比指標，比較不實施儀控、定時儀控、ANCONA、獨立型和整合型 FLRC 儀控之績效，並觀察匝道儀控對瓶頸路段上車流型態之影響。進行情境分析，比較在低、中、高車流情境下，實施不同匝道儀控策略之績效。

5. 實例應用

蒐集台灣地區中部路段高速公路主線與匝道之偵測器車流資料，以實際車流資料進行不同匝道儀控策略之績效評比，了解本研究所提模式應用於實際道路之實用性。

6. 結論與建議

綜合上述之研究成果提出結論與建議。

本研究之研究流程如圖 1.1 所示。

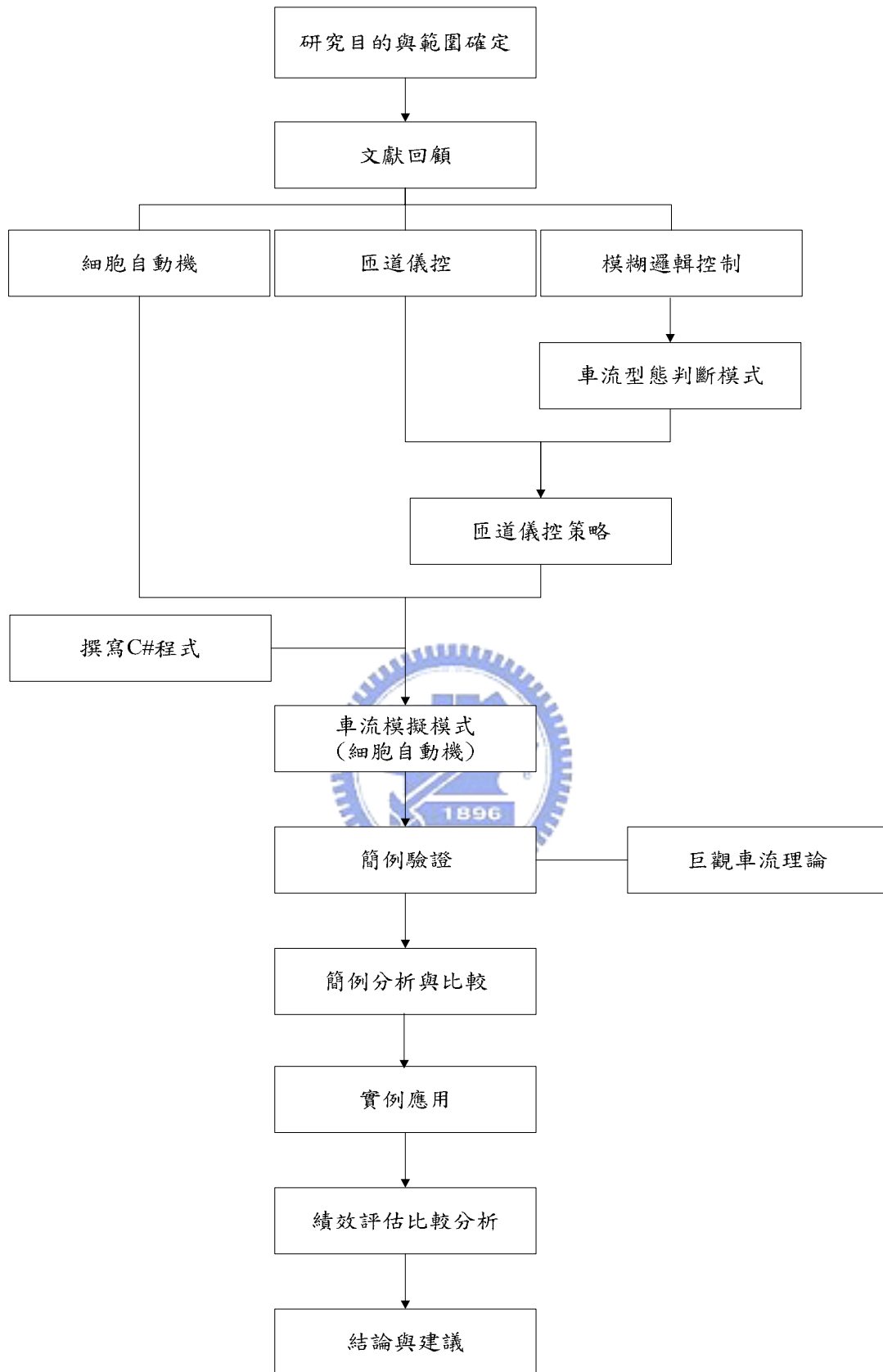


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究旨在運用細胞自動機建構匝道儀控系統，透過模糊邏輯控制挑選儀控策略。藉由回顧細胞自動機之相關研究，彙析其模式型態、應用範圍、模式驗證...等，作為本研究發展車流模擬模式之參考依據。第二部分為匝道儀控演算法與模糊邏輯控制於匝道儀控相關文獻的介紹，彙析其建構方法論、狀態變數、隸屬函數型態與等級數、設定方式、應用地區...等，作為本研究研擬匝道儀控策略與儀控規則之參考依據。茲就此二方面之相關文獻回顧分述如下：

2.1 細胞自動機之相關研究

細胞自動機是一種離散模型，在可算性理論、數學及理論生物學都有相關研究。在交通領域上的應用多著重在車流行為的分析，較少應用於號誌控制的發展。此段主要著重於細胞自動機應用於車流行為探討的文獻回顧評析，茲簡要敘述彙整如下列所述：

Nagel and Schreckenberg(1992)是第一篇以 CA 模式模擬車流行為的研究，本研究以一個封閉的圓環和一個開放的瓶頸路段比較模擬結果與實際交通資料。模式中空間、時間和車速是不連續量，而模式中的車道是假設分割成一格一格的，每一格最多只能容納一輛車，也有可能沒有車。車輛的速度是界於 0 至最大速限(V_{max})間的整數，經由蒙地卡羅模擬結果 V_{max} 採用 5。模式中車輛的移動採平行式的更新規則，而在 N-S(Nagel-Schreckenberg)模式中，為了能夠簡化而不脫離真實生活中駕車行為，將車流行為訂定下列四個更新規則：加速、減速、隨機減速、車輛移動。本研究將模擬結果繪成車輛軌跡的時空圖，可以明顯觀察車流型態的變化。後續許多研究相繼使用這種車輛軌跡的時空圖變化來觀察車流型態的轉變。且許多模式都以 N-S 模式為基礎，修改此模式讓模擬結果更具真實性。

Neubert *et al.*(1999)透過對單一車輛資料的分析建立車間距分配圖和最佳速度函數，並使用時間續列分析法區分車流型態。從車間距分配圖上可以明顯看出自由流(Free flow)和擁擠流(Congested flow)分配上尖峰的差異，自由流的間距較小且有兩個尖峰間距。從最佳速度函數(Optimal velocity function)可以明顯區分出自由流和同步流(Synchronized flow)，自由流下車速較同步流穩定。透過平均速度觀察可以區分出自由流和擁擠流；然而以交叉相關函數(Cross-correlation Function)可以區分出同步流和停止-前進流(Stop-and-Go flow)。當交叉相關係數接近 1 時為自由流或停

止-前進流；交叉相關係數接近 0 時為同步流，這種以時間序列分析法觀察車流型態改變的實證結果頗為精確。

因此這種分析法後續被應用於 CA 模擬中車流型態分析，Knospe *et al.*(2000)以 CA 模式微觀模擬高速公路交通型態，並以實際蒐集的資料作模式參數校估。本研究以 BL(Break Light)模式作車流模擬。以流量-密度關係圖比較模擬結果和實際資料發現極為相似，以流量和密度的交叉相關函數可以區分出三種不同的交通型態。以微觀的角度分析不同交通型態下的車間距可以發現在自由流車速下車間距分佈較小。此外本研究也針對不同交通組成型態下的車間距作分析，結果顯示當快車在慢車的車隊後面時車間距分布較小。隨著密度的增加，在同步流和停止-前進流下駕駛人對前車的預期行為變的衰退。因此在自由流車速下即使兩車間的間距已經相當小，後車仍然有可能以最大車速前進，然而這種不對稱的速度可以透過參數 P_b (前面車輛煞車下的煞車參數)作調整。

交通型態中以同步流型態最難以觀察，且無明確的流量-速度關係。因此許多模式企圖成功模擬同步流型態，其中 Wang *et al.*(2007)以單車道混合車流觀察同步流型態與交通型態的轉變。以 Jiang and Wu(2003)提出的 J-W 模式，另外在加速度規則上針對高、低速行駛下不同加速度能力作修正。為了模擬混合車流下對交通型態造成的影響，因而在系統中設定快(小型車)、慢(卡車)兩類車種。考慮到車長的不同因而以佔有率代替密度，並且因為慢車的車長較長所以本研究的安全間距採用 10 較其他研究使用的大。

從佔有率-流量關係圖可以看出混合車流的曲線會介於同質車流之間，且車長越長、車速越低會造成流量的降低。因此交通組成全部都是快車時流量最大，全部都是慢車時流量最小。但從佔有率-速度關係圖上則無法觀察出混合車流曲線介於同質車流之間的現象，反而是觀察到當交通組成全部都是慢車時車間距較大；全部都是快車時車間距較小。當交通組成是混合車流時，車間距會比同質車流大，且當快車在慢車後面時最大。此外從交互相關函數中看出混合車流和同質車流都有很大的關聯性，在自由流和擁擠流狀況下的交叉相關係數大約是 1；同步流下大約是 0.1。然而不同交通組成對於交通型態轉變的分析中可以觀察到，當交通組成全部是快車時同步流型態維持時間較全部是慢車來的短。此外同步流型態在混合車流中的維持時間會隨著起始狀態不同而改變。

Jiang and Wu(2003)改善 Knospe *et al.*(2000)所提出的 BL 模式，BL 模式在考慮駕駛人平穩且舒適的駕駛行為下的更新規則。然而本研究目的在改善 BL 模式無法描述輕微的同步流型態，因而以完全靜止車輛和減速車輛加速敏感度不同重新定義模式。改善後模擬結果顯示，可以清楚的觀察到車流中產生輕微的和強烈的同步流型態。在對完全靜止時間定義

的敏感度分析上可以看出當流量到達最大後，密度會隨著靜止時間而增加。意含駕駛人能保持較久的敏感度下，強烈的同步流型態能被持續的較久。

除了以上所述利用時間序列分析車流型態外，Kerner *et al.*(2004)利用模糊邏輯控制判斷車流型態。以速度、流量、速度變化率、流量變化率、速度/流量變化率為狀態變數，速度語意等級為四，流量語意等級為三，後三者語意等級皆為二，隸屬函數型態皆為梯形；車流型態為控制變數，車流型態區分為自由流、同步流、大範圍擁擠流。本文章在考量流量、速度外加入兩者的變化率與相對變化率，目的在考慮車流型態的時間動態轉變。從德國黑森 A67 快速道路實測結果來看，能有效精準預測每分鐘車流型態的轉變。

除了模擬同步流型態的研究外，有更大部分的研究在以 CA 模式觀察道路上車流型態的傳遞與轉變。Pottmeier *et al.*(2002)分析 BL 模式中局部擾動(Localized defect, P_d)設定對交通型態的影響，觀察在 $P_d \leq P$ 、 $P_d = P$ 、 $P_d \geq P$ 三種狀況下交通型態的改變。以較小的 P_d 模擬結果發現對於擾動較敏感，因而減少亞穩定狀態(Metastable states)持續的時間，所謂亞穩定狀態乃指在某一穩定車流狀態下，增加些微的擾動車流型態將轉變為擁擠流；減少些微的擾動將轉變為自由流。車輛在經過由單股大範圍擁擠流(Single wide jam)和自由流所組成的擁擠流型態時，不會受到擾動影響而產生擾動。因為這種車流型態和在 VDR(Velocity-Dependent Randomization)模式下沒有擾動的擁擠流型態是一樣的，因此作者將這種型態定義為 VDR 型態。以較大的 P_d 模擬的結果引起高密度車流，這種車流型態為停止-前進型態，然而在 VDR 模式中沒有擾動時卻無法發現這種車流型態。以 $P_d = P$ 模擬結果發現一種跨越現象，大範圍擁擠流會產生向後傳遞的現象，且輕微而短暫的擁擠流型態會產生。

Barlovic *et al.*(1998)以 N-S 模式為延申加入減速-起動(Slow-to-start)規則，企圖模擬車流的磁滯現象(Hysteresis effects)和密度的亞穩定狀態。以三種減速-起動規則作試驗，結果發現以 $V_{max}=1$ 的 T^2 規則和 VDR 模式下可產生亞穩定狀態。作者發現在這兩個模式中，因為降低擁擠駛出(Outflow regime of a jam)的密度是產生亞穩定狀態的重要因素。反觀傳統 N-S 模式由於尋航速度的限制且擁擠駛出密度無法降低，因而無法觀察到亞穩定狀態。

在模式的完整性上，開放式路網和多車道模式的發展讓模式更完整。Knospe *et al.*(1999)針對雙車道上考慮不同變換車道行為，及慢車在低車流密度下對車流造成的影響作分析。採用 Rickert *et al.*(1996)所提出的對稱性變換車道規則進行修正，以對稱性變換車道在同質車流下進行模擬的結果顯示在較小的煞車參數(P)下變換車道的機率會降低，且大約

在流量最大下的密度時機率最低。再以此模式分析對混合車流(5%的慢車)的影響，在單車道和雙車道下車流都受慢車支配，且慢車又因為和前車間距長無法觸動變換車道規則而增加影響時間。此外本研究也針對只有一台慢車對車流造成的影響作模擬，這一台慢車在外側車道行駛且不得變換車道。模擬結果在密度 $\rho > \rho_T$ 時，一台慢車就足以形成阻礙影響車流；密度 $\rho < \rho_T$ 時，快車會變換車道而造成內側車道的壅塞。從這兩種模擬結果可以看出來使用較低的 P 值將降低變換車道的機率，且整個道路會因為一部分慢車，甚至一台慢車而受到影響。即便以不對稱性變換車道規則模擬結果也相同。

對稱性或不對稱性變換車道規則皆是在安全準則下和鄰近車輛的間距必須夠大下進行變換車道，當車速更新規則在連續性下則可以較小車間距進行變換車道。以連續性模式模擬雙車道下同質車流變換車道的行為，發現無論在高密度或低密度下變換車道的機率都較先前模式高；混合車流下變換車道較不受慢車限制，變換車道機率隨著密度而增加。雖然以連續性更新模式模擬結果已得到改善但仍未符合實際狀況，因此本研究另外以考慮預期效果的平行性更新模式作模擬，此模式可以在兩相鄰快車間距較小下進行變換車道，模擬結果顯示可以有效抑制慢車產生的激烈影響。

除了多車道模式外，高速公路匝道對車流型態造成的影響與轉變也試圖以 CA 模擬。Kerner and Klenov(2002)模擬高速公路上有、無匝道下車流型態的變化與形成，並以擁擠型態圖(Congested patterns diagram)詳細的區分上匝道路段車流型態的轉變。此外，和以穩定狀態分析的流量-密度關係圖作比較，可以發現兩者所產生的車流型態看似相似，但在匝道和主線流量改變下兩者的車流型態會呈現不同的轉變現象。作者認為以三相車流理論(Three-phase-traffic theory)和擁擠型態圖分析的車流特性和以流量-密度關係圖分析的結果大不相同，以三相車流理論和擁擠型態圖分析的結果較精確。

在 Jiang *et al.*(2002)中更提到過去許多包含匝道的模擬都是針對匝道對主線造成的影響，並未探討主線對匝道造成的影響，因此本研究將主線對匝道的影響納入模式中討論。本研究使用決定性的 N-S 模式因此不考慮隨機規則，模擬路網為包含一個上匝道的單向單車道高速公路。模擬結果發現在 $V_{max}=1$ 時依主線和匝道流量變化下，主線和匝道交通型態分為兩種(I：皆為自由流 II：主線為自由流、匝道為擁擠流)； $V_{max}>1$ 時主線和匝道的交通型態分為四種(I：皆為自由流 II：主線為自由流、匝道擁擠流 III：主線擁擠流、匝道為自由流 IV：皆為擁擠流)。造成主線和匝道上交通型態的不同完全取決於兩者的到達率(a_1 、 a_2)，因此可由到達率判斷匝道和主線何者為瓶頸路段。

Kerner and Klenov(2003)以 Kerner and Klenov(2002)提出的雙車道變換車道模式，在上、下匝道和車道併入三種情境下觀察車流型態的變化。以三相車流理論分析高速公路瓶頸路段上交通時空型態變化，並以模擬結果分析每一種交通型態在不同路段上形成的原因與轉變。本研究將一般型態(General patterns)又區分為衰弱擁擠(Weak congestion)和強烈擁擠(Strong congestions)，通常衰弱擁擠多發生在下匝道路段，而強烈擁擠發生在上匝道路段。兩個相鄰的瓶頸路段則會因為下游瓶頸路段產生追趕作用(Catch effect)或擴張的擁擠型態(Expanded congestion patterns)而將擁擠型態向上游傳遞；上游瓶頸路段也會因為流量的增加而增強下游的擁擠型態。因此透過這些效果可以推斷在車道併入路段上會生局部同步流型態(Localized Synchronized flow Patterns, LSP)和強烈擁擠型態，在上匝道路段因為車流初始狀態的不同而產生同步流型態或一般型態。

Pederson and Ruhoff(2002)以 N-S 模式為基礎加入不對稱性的變換車道規則，此外模式中考慮主線上的車輛行為會受匝道上車輛影響。因此主線上與匝道平行的位置插入一影子車輛，後方車輛在受影子車輛影響下改變車輛更新規則。模擬結果顯示當主線上的車輛接近交織區域時受到上匝道車輛影響而降低車速且向左變換車道，因而產生空間讓匝道上的車輛併入主線車流。以巨觀車流理論的角度來看，本模擬下的流量、密度、速度關係圖和真實車流情形相近，成功的描述匝道車流併入的行為。

除了匝道車流型態造成的影響與改變外，匝道設計也有以 CA 模擬為方法的研究。Li *et al.*(2007)以 Jiang *et al.*(2002)為基礎，但在主線和匝道上同時佈置交通號誌，分析交通號誌對車流造成的影響。並提出主線和匝道上接近交織區域前面臨紅、綠燈時不同的車輛更新規則。模擬結果顯示本模式較 Rui 模式可增加主線容量、維持自由流型態且不會造成匝道上擁擠，並減少車速因為車輛無次序通過交織區域而造成的擾動，甚至避免 Rui 模式中交織區出現的車輛碰撞情形。因此作者認為同時在主線和匝道上佈置交通號誌對高速公路車流有正面的影響。

Jiang and Wu(2006)延伸 Jiang *et al.*(2002)匝道模式中考慮主線和匝道車流的交互影響，將兩者的影響範圍從一個網格擴展到一個區域。當影響範圍逐漸擴大時主線容量也隨之增加，但當影響範圍過大時將產生第一階的型態轉變，由自由流轉變為擁擠流。影響範圍過大時，在主線到達率未達到臨界值前駕駛人可以自由變換車道直到到達交織區域，但當到達率超過臨界值時因為駕駛人突然煞車而產生擁擠現象。

Jia *et al.*(2005)使用 CA 模式分析加速區域設計長度對主線車流造成的影響，模式中變換車道規則分為允許向左變換和允許向左、向右變換兩種。本研究模擬結果發現第一種變換車道規則相較第二種變換車道規

則有益，且隨著加速區域越長主線容量越大。此外第二種變換車道規則下加速區域對系統會產生負效果，比無加速區域下的容量還低。因此適當的加速區域長度和變換車道規則對主線容量有增加的效果。

綜觀 CA 發展從早期 N-S 模式開始，許多修改模式相繼產生，因此 Knospe *et al.*(2004)以單車道同質車流的高速公路，比較 N-S、VDR、TOCA(the Time-Oriented CA)、ER(Emmerich and Rank)、HS(Helbing and Schreckenberg)、BL 和 KKW(Kerner, Klenov, and Wolf)七種模式的限制與真實性。以微觀模擬得到的單一車輛車間距分佈圖、最佳速度函數，比較七種模式的真實性。模擬結果發現 ER、HS 這兩種修正距離規則的模式較不能呈現合理的流量-密度關係圖，且可能造成交通事故發生。其餘五種模式對於模擬高速公路的車流型態都相當具真實性，其中又以 BL 模式最佳。由於 BL 模式考慮的駕駛人加速行為較仔細，因此可以清楚呈現車流的三種不同型態。此外本研究提出要更接近現實的呈現車流型態，可透過仔細描述駕駛人行為達到目的。

茲就上述有關細胞自動機之相關文獻加以彙整如表 2.1 所示。

表 2.1 細胞自動機文獻彙整

作者	年份	模式型態	適用範圍	模式驗證
Nagel and Schreckenberg	1992	N-S 模式	封閉圓環與瓶頸路段	時空軌跡圖
Barlovic <i>et al.</i>	1998	VDR 模式	封閉圓環	流量-密度關係圖
Knospe <i>et al.</i>	1999	N-S 模式	雙車道高速公路	流量-密度關係圖、 密度-變換車道頻率圖
Neubert <i>et al.</i>	1999	—	三車道高速公路	車間距分佈圖、 最佳速度函數、 平均速度分佈圖、 交叉相關函數
Knospe <i>et al.</i>	2000	BL 模式	封閉圓環	流量-密度關係圖、 交叉相關函數、 車間距分佈圖

表 2.1 細胞自動機文獻彙整(續)

作者	年份	模式型態	適用範圍	模式驗證
Jiang <i>et al.</i>	2002	N-S 模式	單車道高速公路 (上匝道)	到達率-車流型態 關係圖
Kerner and Klenov	2002	KKW 模式	雙車道高速公路 (上匝道)	擁擠型態圖、 時空-速度圖
Pederson and Ruhoff	2002	N-S 模式	雙車道高速公路 (上匝道)	巨觀車流理論、 匝道流量-速度關係圖、 匝道流量-內側流量關係圖
Pottmeier <i>et al.</i>	2002	VDR 模式	單車道市區道路	流量-密度關係圖
Jiang and Wu	2003	J-W 模式	封閉圓環	流量-密度關係圖
Kerner and Klenov	2003	KKW 模式	雙車道高速公路 (上匝道、 下匝道、車道縮減)	擁擠型態圖、 時空-速度圖
Kerner <i>et al.</i>	2004	—	多車道高速公路(上 匝道、下匝道)	模糊邏輯控制
Knospe <i>et al.</i>	2004	N-S、VDR、 TOCA、 ER、HS、BL 和 KKW	單車道高速公路	車間距分佈圖、 最佳速度函數、 流量-密度關係圖
Jia <i>et al.</i>	2005	N-S 模式	雙車道高速公路 (上匝道)	到達率-車流型態 關係圖

表 2.1 細胞自動機文獻彙整(續)

作者	年份	模式型態	適用範圍	模式驗證
Jiang and Wu	2006	N-S 模式	單車道高速公路 (上匝道)	到達率-車流型態 關係圖
Li <i>et al.</i>	2007	N-S 模式	單車道高速公路 (上匝道)	到達率-車流型態 關係圖
Wang <i>et al.</i>	2007	J-W 模式	單車道高速公路	佔有率-速度關係 圖、 佔有率-流量關係 圖、 交叉相關函數、 車間距分佈圖



2.2 匝道儀控之相關研究

匝道儀控(Ramp Metering)為高速公路上經常使用之交通控制方法，藉由上匝道處之號誌、標誌、標線及相關輔助軟硬體，控制進入高速公路主線車輛數，以促進高速公路主線交通流暢，維持主線行駛速率及服務水準。國內外已有相當多匝道儀控相關研究，包含以不同方法論建構匝道儀控。此段主要著重於匝道儀控演算法與模糊邏輯控制於匝道儀控的文獻回顧評析，茲簡要敘述彙整如下列所述：

Gomes and Horowitz(2006)以近似細胞傳輸模式(Cell Transmission Model, CTM)的非對稱細胞傳輸模式(ACTM)來研擬匝道儀控策略。以非線性規劃補捉車流的自由流和擁擠流型態，並包含儀控率的上限和上匝道的等候長度。在任何車流型態下，以單一線性規劃可以得到非線性規劃問題的近似最佳解。本研究最後以南加州快速道路(包含 20 個上匝道)作模擬，模擬結果發現匝道儀控下加入匝道等候車輛限制下可以減少 17.3%的延滯時間；未限制匝道等候車輛下可減少 22.4%的延滯時間。

Huang(2002)以流體力學模式觀察匝道對主線車流造成的干擾，並找出主線與匝道流量間自由流與擁擠型態之間的轉變關係，作為研擬匝道儀控策略之用。作者認為造成主線擁擠型態的產生是因為短時間內主線和匝道車流量兩者的急速變化，當短時間內兩者間的車流量超過門檻值即產生擁擠型態。傳統的匝道儀控策略是在考慮上游的車流量下調整儀控率，作者則認為當匝道產生擁擠現象並向下游傳遞時可透過短暫關閉匝道消除擁擠型態；當擁擠型態開始向上游傳遞時則必需較長時間關閉匝道才能消除。

Zhang and Ritchie(1997)以類神經網路建構獨立式交通感應儀控系統，系統模式以流體力學形成非線性回饋控制規劃。透過類神經網路的自學能力達到適應交通型態的轉變，發展線上儀控系統。本研究在不超過臨界密度的狀態變數下決定儀控率，以模擬方式和ALINEA(Asservissement Line'aired'Entre'e Autoroutie're)比較。模擬結果顯示本模式在短時間內可以快速反應車流量變化調整儀控率，且將主線密度控制在臨界值下不產生擁擠型態。本研究仍直接以臨界密度為狀態變數，因而能有效控制使主線不產生擁擠型態，但本模式仍未發展到整合型儀控系統。

Wei(2001)將整個高速公路系統視為一個生命體，以類神經網路學習控制策略並做出反射動作，使整個高速公路系統具有感覺、反應與試誤性學習的能力。並以中山高速公路南下車道內湖至中壢路段為例，首先構建一具有時空特性之類神經網路儀控率推估模式，用以學習掌握高速

公路車流動態特性並推估儀控率。並構建一高速公路車流模擬模式，以作為觀察匝道儀控系統運作與評估績效的工具。以不實施匝道儀控與FREQ之績效進行評比，由結果發現類神經網路學習下總延車公里與總旅行時間績效較佳。

除上述非線性模式發展外 Papageorgiou and Kotasialos(2002)對匝道儀控作一個完整的回顧，包含定時儀控、交通感應儀控、非線性最佳控制儀控，並以包含 21 個上匝道口、20 個下匝道口的阿姆斯特丹外環道路比較無匝道儀控和使用非線性最佳控制儀控的差異。從模擬結果可看出無匝道儀控下匝道上等候車隊較長、主線密度較高。最後將非線性最佳控制儀控結果與未控制時在總旅行時間上作比較，發現可減少 36.6 %。

在應用細胞自動機於發展匝道儀控上 Kerner(2005)分析實行匝道儀控下匝道上產生的擁擠型態，發現在不同控制策略下會產生不同的擁擠核子作用。本研究以 Kerner and Klenov(2002)所發展的雙車道變換車道CA模式為基礎作自由流控制策略和擁擠流控制策略的比較，此外加入匝道路段上的併入規則讓模擬結果更貼近真實狀況。在自由流控制策略中採用ALINEA，模擬結果發現以ALINEA搭配適當的回饋偵測器位置能消除匝道上產生的一般型態，且降低主線旅行時間。然而因為亞穩定效果和偵測器的佈設位置不同可能影響消除一般型態的能力，因此後續研究以擁擠控制策略改善這些問題。在擁擠控制策略中採用ANCONA(Automatic On-ramp Control of Congested patterns)，以ANCONA可減少匝道車輛的旅行時間且增加主線容量。同時在ANCONA控制下車流只會產生局部同步流型態，且匝道上的擁擠型態不會因為亞穩定效果而向上游傳遞。

上述偏重於應用不同模式發展匝道儀控系統，在實行匝道儀控對車流型態的影響 Davis(2006)提出在下游容量固定下，如何調整匝道儀控率使下游路段流量達到最大，且主線車流能維持在自由流水準。本研究推翻 Kerner and Klenov(2004)提出下游容量決定車流型態轉變的觀點，認為下游流量和匝道儀控率存在線性關係；下游車流型態可透過匝道儀控率調整。本研究以包含加、減速限制的最佳速度模式(Optimal Velocity model, OV)建立匝道儀控率與下游流量的線性關係式。模擬結果發現在固定的上游流量下，調整匝道儀控率能有效提高下游流量且抑制同步流現象的產生。

Wu *et al.*(2007)提出在傳統分析匝道儀控的影響中主要針對道路效率和旅行時間，但本研究以匝道儀控對駕駛行為的影響作分析。本研究以高速公路上實測資料分析七種參數在有、無匝道儀控下的駕駛行為變化，包含：加減速、速度、間距、變換車道率、可接受間距、併入距離、併入速度。分析路段分為基本路段、匝道路段、匝道上游基本路段，以

偵測車、偵測器和攝影取得的資料分析有無匝道儀控造成的影響。在基本路段上有、無匝道儀控並無顯著差異；在匝道上游基本路段因為匝道儀控可以降低外側車道的流量，但對其他車道無顯著差異。匝道路段在實行匝道儀控下有助於增加可接受間距並降低併入速度，由此可降低車流併入的困難性。

Chen *et al.*(1990)以舊金山-奧克蘭海灣大橋為例，建構高速公路之模糊控制匝道儀控系統。其規則型態係依據 Tong(1984)所構建之專家模糊控制系統，其規則庫可處理事故及無事故之狀況。狀態變數分別為「擁擠程度」，語意等級為六、「擁擠程度變化率」，等級為五、「控制地區」、「事故」、「無事故」及「控制地區等候時間之長短」；而控制變數分別為「儀控率」，語意等級為八、事故期間之「維持等候時間之流量變化率」及「縮減等候時間之流量變化率」。

使用 FRECON2 軟體模擬十種不同車流情境，包括二項無事故及八項有事故狀況，績效評估分別為等候時間、高速公路之乘客小時時間及總乘客小時時間。比較模糊控制儀控結果與現有控制系統，顯示於小規模事故發生時，可節省約 148 乘客小時時間，發生大規模事故時，則可節省約 328 乘客小時時間，同時亦可減少事故所造成擁擠之長度。

Okushima *et al.*(2003)彙整數個匝道儀控方法並將其應用於日本 Osaka-Sakai 高速公路的一段路線上，此路線含三個上匝道。此篇文章彙整的儀控方法包括間斷控制、線性規劃控制及模糊控制，以車流模擬作績效評估，評估準則為擁擠減少之程度。狀態變數為擁擠長度、需求流量、上匝道之等候長度及擁擠變化，語意等級皆為三，第一、三等級為梯形隸屬函數，第二等級為三角形；控制變數為流量控制等級，語意等級為五，隸屬函數型態為三角形，使用規則數為十五。為考量上匝道等候之長度可能對鄰近平面道路造成影響，作者以此作為狀態變數，增加規則數至二十二條。然而為了不讓上匝道等候之長度超過設定值，因此增加規則數至二十三條。將模糊控制與間斷控制作比較，結果顯示模糊控制能有效減少 50%之擁擠(時間×距離)，且將最大之擁擠長度由 9.5 公里減少至 6.0 公里。

Taylor *et al.*(1998)以西雅圖 I-5 高速公路數個匝道之儀控系統為例，應用模糊邏輯構建匝道儀控系統。根據即時交通資料推估每二十秒為週期之儀控率，狀態變數為主線匯入處及下游的佔有率及速率、主線上游佔有率、入口匝道等候佔有率、入口匝道等候車輛是否回堵至平面道路之佔有率，語意等級為五之三角形隸屬函數；控制變數為儀控率，規則數共十七條，依據規則狀態變數給予不同之權重。以六種不同之車流情

境，使用 FRESIM 模擬軟體模擬儀控在旅行距離、平均速度、延滯三個指標的績效，結果顯示除在流量近似容量情境下模糊控制之績效均較定時控制、需求-容量控制及速率控制佳。

Sasaki and Akiyama(1988)以日本漢神高速公路 Osaka-Sakai 路線之上匝道控制為例，以模糊邏輯推理來建構符合真實管理過程之模糊控制系統，藉由限制收費站運作數目與封閉上匝道達到控制目的。除能減少管理者每次做決策時之負擔，且有助於發展一更具效率之管理程序。以主線擁擠長度及預期交通需求量為狀態變數，語意等級皆為三，規則數為五，參數校估之方式係依據一評估指標採取反覆地測試；控制變數為儀控率等級，結果顯示此控制與管理者實際判斷結果相近。並藉由增加一語意變數(收費站限制之連續時間)與一規則數，使得控制結果達到最佳化且避免人為控制的不連續現象。

Lee *et al.*(2000)以模糊邏輯系統與決策函數兩部分建構模糊邏輯控制系統，前半部以主線平均速度及平均速度變化率為狀態變數，等級為五，第一、五等級之隸屬函數型態為梯形，其餘為三角形；控制變數為號誌轉換機率，等級為五之明確隸屬函數。後半部係訂定一門檻值，並比較前半部之轉換機率，決定是否變換燈號，結果顯示模糊匝道儀控系統確實能有效穩定主線車流行進狀況並優於定時儀控系統。

除了上述以模糊邏輯控制發展匝道儀控系統外，更有學者提出結合基因演算法發展適應性模糊邏輯控制系統。Bogenberger *et al.*(2000)運用基因模糊邏輯推論構建交通感應匝道儀控系統，應用於德國慕尼黑 A9 快速道路，包含六個上匝道和兩個快速道路連接路段。利用具適應性之模糊邏輯方法推估每分鐘匝道儀控率，並週期性地每十五分鐘更新模糊系統之參數。狀態變數為主線流量及速率，語意等級皆為三之 Gaussian 曲線隸屬函數；控制變數為儀控率，等級三之 Gaussian 曲線隸屬函數，規則數為六條。GAs 調整模糊控制參數之目標在於系統總旅行時間最小，染色體長度為 $2 \times 3 = 6$ ，族群包含 30 條染色體，突變率為 $1/6$ ，即染色體長度之倒數。結果顯示經 20 世代數即收斂，經 100 世代尋優最佳狀態變數集合之參數。

以 Bogenberger *et al.*(2000)為延伸 Bogenberger and Keller(2001)應用適應性模糊邏輯構建整合性交通感應匝道儀控系統，狀態變數為主線上游速率、密度與佔有率、入口匝道等候佔有率與駛入佔有率、主線下游流量/容量比、主線下游速率，前三項之語意等級為三，隸屬函數型態為 Gaussian 曲線，後四項等級為一之三角形隸屬函數；控制變數為儀控率，等級為三之 Gaussian 曲線隸屬函數，使用九條規則，其中每一條規則依

其重要性給予不同之權重值，藉由基因演算法週期性地每十五分鐘更新模糊控制之隸屬函數參數。

此外，此篇文獻亦提出不同於一般基因演算法三大運算法則計算方式，分別為競賽式選擇(Truncation selection)、間斷交配(Discrete recombination)及實值突變(Real valued mutation)。以 FREQ 模擬軟體模擬德國慕尼黑 A9 高速公路車流資料，並依據 Payne's 巨觀車流模式推估總旅行時間，以最小化總旅行時間為控制目標。比較未控制與線性規劃控制結果，結果顯示適應性模糊邏輯控制系統不僅可減少總旅行時間，且可提升主線平均速度及節省燃料耗費量。

Chiou and Wang(2005)利用基因演算法建構適應性匝道儀控系統，應用於包含 6 個匝道口的國道一號北區路段。控制範圍可分為獨立型及整合型基因模糊系統，獨立型之儀控策略係以主線平均行駛速度及上匝道等候車輛數為狀態變數，以匝道儀控率作為控制變數；而整合型之控制策略則考量上游匝道儀控對於車流之影響，於獨立型策略基礎下另增設一項上游匝道儀控率作為第三個狀態變數，語意等級為五之三角形隸屬函數。分析控制結果並比較匝道不實施儀控、模糊匝道儀控模式、最佳定時儀控及基因模糊匝道儀控模式之績效，結果顯示獨立型與整合型匝道儀控模式分別可以減少 6.93%與 7.80%之總旅行時間，較其他模式為佳。此外，研究結果顯示本模式於交通量較高時之儀控績效較低交通量時為佳。

茲就上述有關匝道儀控系統之相關文獻概分為匝道儀控演算法與模糊邏輯匝道儀控兩部分加以彙整如表 2.2 與表 2.3 所示。

表 2.2 匝道儀控演算法文獻彙整

作者	年份	方法論	狀態變數	實證地區
Zhang and Ritchie	1997	類神經網路	臨界密度	模擬實驗
Wei	2001	類神經網路	速度、流量、密度、匝道等候車隊貯藏率	台灣國道一號
Papageorgiou and Kotsialos	2002	定時控制、交通感應、非線性最佳控制	主線容量、匝道容量、最小儀控率 匝道下游容量、匝道上游流量、匝道下游佔有率 等候車隊長度、密度、平均速度、匝道流量、上匝道需求	阿姆斯特丹外環道路
Huang	2002	流體力學	主線流量、匝道流量	模擬實驗
Kerner	2005	ALINEA、ANCONA	最佳佔有率、佔有率 擁擠速度、速度	模擬實驗
Davis	2006	—	下游流量	模擬實驗
Gomes and Horowitz	2006	非對稱細胞傳遞模式	匝道等候車流、儀控率	南加州快速道路
Wu <i>et al.</i>	2007	—	—	英格蘭 27 號高速公路

表 2.3 模糊邏輯匝道儀控文獻彙整

作者	年份	狀態變數	隸屬函數 型態及等 級數	推論規 則數	實證地區
Sasaki and Akiyama	1988	主線擁擠長 度、預期交通量	等級三	六	Sasaki <i>et al.</i>
Chen <i>et al.</i>	1990	擁擠程度、擁擠 程度變化率、控 制地區、事故、 無事故、控制地 區等候時間	前二項 等級分別 為六與五	一	舊金山 - 奧 克蘭海灣大 橋
Taylor <i>et al.</i>	1998	主線併入處及 其下游之佔有 率及速率、上游 佔有率、匝道等 候佔有率、匝道 等候車輛回堵 至平面道路之 佔有率	三角形， 等級五	十七	西雅圖 I-5 高速公路
Bogenberger <i>et al.</i>	2000	主線流量、速率	Gaussian 曲線，等 級三	六	慕尼黑 A9 高速公路
Lee <i>et al.</i>	2000	主線平均速 度、平均速度變 化率	等級一、 五梯形， 三角形， 等級五	二十五	模擬實驗
Bogenberger and Keller	2001	主線上游速 率、密度、佔有 率、入口匝道等 候佔有率、駛入 佔有率、主線下 游流量/容量 比、主線下游速 率	前三項 Gaussian 曲線等級 三，後四 項為三角 形等級一	九	慕尼黑 A9 高速公路

表 2.3 模糊邏輯匝道儀控文獻彙整(續)

作者	年份	狀態變數	隸屬函數 型態及等 級數	推論規 則數	實證地區
Okushima <i>et al.</i>	2003	擁擠長度、需求 流量、上匝道之 等候長度、擁擠 變化率	第一、三 等級為梯 形，第二 等級為三 角形，等 級三	二十三	日 本 Osaka-Sakai 高速公路
Chiou and Wang	2005	主線速度、上匝 道等候車輛 數、上游匝道儀 控率	三角形， 等級五	一百二 十五	台灣國道一 號



2.3 文獻綜合評析

綜觀以上細胞自動機與匝道儀控相關文獻回顧整理，可以發現以下幾點：

- 1、細胞自動機發展應用範圍從早期封閉圓環與瓶頸路段，隨著變換車道規則的加入轉變到多車道道路，並擴展到包含上匝道路段的高速公路路網；車流組成型態由同質車流轉換到異質車流行為。以上這些模式發展可以明顯的從模式規則中明顯看出來，隨著模式完整性的增強，模式規則也變的更為複雜。
- 2、在細胞自動機模式驗證上大約可分為四類。第一類是以傳統巨觀車流理論的流量-密度關係圖驗證模式的合理性；第二類是透過時間數列分析法中的交叉相關函數與最佳速度函數，以交叉相關函數分析車流型態；最佳速度函數驗證模式合理性。第三類以三相車流理論和擁擠型態圖解構車流型態，解釋車流型態的轉變與複雜的時間特性。第四類是 Kerner *et al.*(2004)提出以模糊邏輯控制判斷車流型態動態轉變，以實測結果來看頗為精確且可建立一套車流型態判斷的專家決策系統。
- 3、在匝道儀控方法上除了傳統演算法外，已有相當多研究應用不同演算法於發展匝道儀控策略。雖然其中也有以細胞自動機當作車流模擬軟體，比較 ALINEA 和 ANCONA 的控制績效，但在狀態變數的選擇上仍以傳統巨觀車流理論參數為主，並未加入任何以細胞自動機模式取得之狀態變數，細胞自動機僅作為車流行為模擬之用。
- 4、以模糊邏輯控制應用於匝道儀控時符合真實情況下專家決策過程，且可決解資料不足與資料模糊之問題。在模糊推論的狀態變數選擇上多採用數個變數，而控制變數以儀控率為主。

綜合以上幾點，本研究擬利用細胞自動機與模糊邏輯控制建立匝道儀控系統。在細胞自動機方面建立一包含三組上下匝道的二車道高速公路路段，以巨觀車流理論進行模式合理性驗證，透過模糊邏輯控制以主線速度、流量、速度變化率、流量變化率、速度/流量變化率判斷高速公路瓶頸路段上車流型態。以高速公路主線車流型態、匝道等候車輛數與上游匝道儀控率為狀態變數；匝道儀控率為控制變數，透過模糊邏輯控制達到即時且符合真實情況的專家決策系統。

第三章 模式建構

本章分為三節說明模式建構。如圖 3.1 模式架構圖所示，第一節包含介紹各細胞自動機模式，並提出本研究改良之細胞自動機模式以建構車流模擬模式，包含模式定義、交通變數定義、模式規則之說明。第二節說明如何使用模糊邏輯控制判斷車流型態，包含狀態變數與控制變數選取、隸屬函數型態與語意等級設定、邏輯規則之說明。第三節為本研究所提之控制策略，說明模糊邏輯匝道儀控模式操作與整體架構；並介紹擁擠型態自動上匝道儀控策略(ANCONA)，與本研究所提控制策略績效比較與分析。



圖 3.1 模式架構圖

3.1 細胞自動機模式

細胞自動機近十幾年來被物理學家廣泛的應用於交通車流理論的研究，主要目的在透過 CA 模式模擬車流行為，將現實複雜交通系統簡化為一個動態的物理系統，系統中細胞(車輛)彼此交互作用且完全不會達到均衡狀態，據此分析個體車輛交互作用所產生的交通車流型態，以解構

交通系統中複雜的動態型態轉變。細胞自動機模式，係指將車輛視為交通系統中佔用道路網格的細胞，每一部車輛依其不同車長可設定由不同細胞數目所組成，每一個網格可以被佔有或空的，車輛依循模式所設定的更新規則與周圍車輛交互作用，進行 CA 格位化更新。意即每一時階所有車輛會依據與前面車輛的間距、預期前車車速等外在條件，進行加速、減速、隨機減速的縱向移動；並依據側向車道上下游車間距、速度差，進行變換車道的橫向移動，並以平行或連續的方式，動態更新系統中每部車輛的位置與狀態，藉此模擬整個系統中車輛運行的行為。以細胞自動機模式達到交通工程、交通管理、交通控制分析目的。細胞自動機之各模式如后所示：

3.1.1 Nagel and Schreckengerg 模式(N-S)

本模式由 Nagel 和 Schreckenberg 於 1992 年提出，以 Wolfram(1983) 提出的 184 號規則模型為延伸。本模式為後續 CA 模式的基礎。N-S 模式屬於離散型交通流微觀模擬模式。本模式由多個細胞所組成，每個細胞可以被至少一輛車在不連續速度下被佔有或閒置，每個細胞的長度是 7.5 公尺。車輛根據以下四條規則進行平行更新，更新時間為 1 秒。

車輛更新規則如下所示 ($t < t_1 < t_2 < t+1$) :

(1) 加速： $v_n(t_1) = \min\{v_n(t) + 1, v_{\max}\}$

(2) 減速： $v_n(t_2) = \min\{v_n(t_1), d_n(t)\}$

(3) 隨機減速： $\text{if } P = P_{dec}, v_n(t+1) = \max\{v_n(t_2) - 1, 0\}$

$\text{otherwise, } v_n(t+1) = v_n(t_2)$

(4) 移動： $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$

3.1.2 Velocity-Dependent-Randomization 模式(VDR)

由 Barlovic *et al.* 於 1998 年提出，以 N-S 模式為基礎，目的在模擬交通型態的分離現象。在 N-S 模式的第一條更新規則前加入隨機參數判斷規則，加入隨機參數目的在重現磁滯現象。根據模擬結果發現當駕駛人駛離下游擁擠型態後會延遲加速行為，因此本模式也稱為減速-起動規則模式。

車輛更新規則如下所示 ($t < t_1 < t_2 < t+1$) :

- (0) 隨機參數： $p_{dec}(v_n) = \begin{cases} p_0 & \text{for } v = 0 \\ p & \text{for } v > 0 \end{cases}$
- (1) 加速： $v_n(t_1) = \min\{v_n(t) + 1, v_{\max}\}$
- (2) 減速： $v_n(t_2) = \min\{v_n(t_1), d_n(t)\}$
- (3) 隨機減速： $\text{if } P = P_{dec}, v_n(t+1) = \max\{v_n(t_2) - 1, 0\}$
 otherwise, $v_n(t+1) = v_n(t_2)$
- (4) 移動： $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$

3.1.3 The time-oriented CA 模式(TOCA)

由 Brilon *et al.* 於 1998 年提出，以 N-S 模式為基礎強化車輛間的相互影響範圍。只有在車間時距 $t_h = d(t)/v(t)$ 大於安全間距 t_s 時在機率 p_{ac} 下進行加速行為；當車間時距 t_h 小於安全間距 t_s 時在機率 p_{dec} 下進行減速行為。

車輛更新規則如下所示 ($t < t_1 < t_2 < t+1$) :

- (1) 加速： $v_n(t_1) = \min\{v_n(t) + 1, v_{\max}\}$ with probability P_{ac} ; if $t_h > t_s$
- (2) 減速： $v_n(t_2) = \min\{v_n(t_1), d_n(t)\}$
- (3) 隨機減速： $v_n(t+1) = \max\{v_n(t_2) - 1, 0\}$ with probability P_{dec} ; if $t_h < t_s$
- (4) 移動： $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$

3.1.4 Brake Light 模式(BL)

由 Knospe *et al.* 於 2000 年提出，以 VDR 模式為基礎在車輛相互影響範圍內後車受到前車踩煞車影響作反應，因此本模式稱為煞車燈模式。為了考慮精確的空間離散性，本模式中車輛允許佔有一個以上細胞。因

此兩相鄰車輛間的間距 $d_n = x_{n+1} - x_n - l$ (l 為車長)。 b_n 為煞車狀態， $b_n = 1(0)$ 代表煞車開(關)。

車輛更新規則如下所示 ($t < t_1 < t_2 < t+1$)：

$$(0) \text{ 隨機參數： } p_{dec}(v_n(t), b_{n+1}(t), t_h, t_s) = \begin{cases} p_b & \text{if } b_{n+1} = 1 \text{ and } t_h < t_s \\ p_0 & \text{if } v_n = 0 \\ p_d & \text{in all other cases} \end{cases}$$

$$(1) \text{ 加速： } v_n(t_1) = \min\{v_n(t) + 1, v_{\max}\} \text{ if } (b_{n+1} = 0 \& b_n = 0) \text{ or } t_h > t_s$$

$$(2) \text{ 減速： } v_n(t_2) = \min\{d_n^{eff}, v_n(t_1)\}$$

$$\text{where } d_n^{eff} = d_n + \max(v_{anti} - gap, 0); v_{anti} = \min(v_{n+1}(t_2), d_{n+1}(t_2))$$

$$\text{if } v_n(t_2) < v_n(t_1) \text{ then } b_n(t+1) = 1$$

$$(3) \text{ 隨機減速： if } rand() < P_{dec}, v_n(t+1) = \max\{v_n(t_2) - 1, 0\}$$

$$\text{if } P_{dec} = P_b \text{ and } v_n(t+1) = v_n(t_2) - 1 \text{ then } b_n(t+1) = 1$$

$$(4) \text{ 移動： } x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$$

3.1.5 Jiang and Wu 模式(J-W)

由 Jiang 和 Wu 於 2003 年所提出，以 BL 模式為基礎，考慮駕駛人在舒適且順暢的駕駛行為下的車輛更新規則。此模式與 BL 模式極為相似，除了在加速規則上考慮駕駛狀態為剛停止或完全靜止的加速能力不同。

以停止時間 t_{st} 判斷駕駛狀態，剛停止車輛的加速能力較完全靜止大。

車輛更新規則如下所示 ($t < t_1 < t_2 < t+1$)：

$$(0) \text{ 隨機參數： } p_{dec}(v_n(t), b_{n+1}(t), t_h, t_s) = \begin{cases} p_b & \text{if } b_{n+1} = 1 \text{ and } t_h < t_s \\ p_0 & \text{if } v_n = 0 \text{ and } t_{st} \geq t_c \\ p_d & \text{in all other cases} \end{cases}$$

(1) 加速 : if $((b_{n+1}(t) = 0 \text{ or } t_h \geq t_s) \text{ and } (v_n(t) > 0))$
 then $v_n(t_1) = \min\{v_n(t) + 2, v_{\max}\}$
 else if $(v_n(t) = 0)$ then $v_n(t_1) = \min(v_n(t) + 1, v_{\max})$
 else $v_n(t_1) = v_n(t)$

(2) 減速 : $v_n(t_2) = \min\{d_n^{eff}, v_n(t_1)\}$
 where $d_n^{eff} = d_n + \max(v_{anti} - gap, 0)$; $v_{anti} = \min(v_{n+1}(t_2), d_{n+1}(t_2))$
 if $v_n(t_2) < v_n(t_1)$ then $b_n(t+1) = 1$

(3) 隨機減速 : if $rand() < P_{dec}$, $v_n(t+1) = \max\{v_n(t_2) - 1, 0\}$

(4) 煞車判斷 : if $(v_n(t_1) < v_n(t))$ then $b_n(t_1) = 1$
 if $(v_n(t_1) > v_n(t))$ then $b_n(t_1) = 0$
 if $(v_n(t_1) = v_n(t))$ then $b_n(t_1) = b_n(t)$

(5) 停止時間判斷 : if $v_n(t_1) = 0$ then $t_{st} = t_{st} + 1$
 if $v_n(t_1) > 0$ then $t_{st} = 0$

(6) 移動 : $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$

3.1.6 Kerner-Klenov-Wolf 模式(KKW)

由 Kerner、Klenov 和 Wolf 三位學者於 2002 年所提出，本模式屬於完全離散型的空間連續微觀模式。模式由兩個部分組成，包含決定性規則和隨機性規則兩部分。第一部分中以 $v_{des}(t)$ 取代 N-S 模式中的加速規則讓模式更具完整性，影響範圍以 $D(v)$ 同步範圍代表，在同步範圍內車輛根據前車調整車速。第二部分中加入隨機變數 η 以達到與 VDR 模式相同的減速-起動效果。

車輛更新規則如下所示 ($t < t_1 < t + 1$) :

$$(1) \text{ 決定性規則 : } v_n(t_1) = \max\{0, \min\{v_{\max}, v_{safe}(t), v_{des}(t)\}\}$$

$$\text{where } v_{safe}(t) = d_n(t)$$

$$v_{des}(t) = \begin{cases} v_n(t) + a & \text{for } d_n > D(v_n(t)) - l \\ v_n(t) + \Delta(t) & \text{for } d_n \leq D(v_n(t)) - l \end{cases}$$

$$D(v) = D_0 + kv \quad \text{or} \quad D(v) = D_0 + v + \beta v^2$$

$$\Delta(t) = \begin{cases} -b & \text{if } v_n(t) > v_{n+1}(t) \\ 0 & \text{if } v_n(t) = v_{n+1}(t) \\ a & \text{if } v_n(t) < v_{n+1}(t) \end{cases}$$

$$(2) \text{ 隨機性規則 : } v_n(t+1) = \max\{0, \min\{v_n(t) + \eta_n, v_n(t) + a, v_{free}, v_{\max}\}\}$$

$$\text{where } \eta = \begin{cases} -1 & \text{if } r < p_b \\ 1 & \text{if } p_b \leq r < p_b + p_a \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_b(v) = \begin{cases} p_0 & \text{if } v = 0 \\ p & \text{if } v > 0 \end{cases}$$

$$p_a(v) = \begin{cases} p_{a1} & \text{if } v < v_p \\ p_{a2} & \text{if } v \geq v_p \end{cases}$$

3.1.7 Emmerich and Rank 模式(ER)

由 Emmerich 和 Rank 兩位學者於 1997 年所提出，以 N-S 模式為基礎增強車輛間相互影響範圍。藉由間距-速度矩陣精確的描述 N-S 模式中的減速規則，以速度相依安全規則為考量。本模式目的在改良 N-S 模式中短時間內速度的驟降，依據間距-速度矩陣在規定間距內緩慢調整速度。此外，本模式採用連續性更新規則，所有更新規則直接在選定車輛上實行，一個時階內對所有車輛進行一次更新。然而這種更新規則下可能造成一些缺點，例如車間時距可能受到偵測器佈設地點的影響。為了解決這個問題，系統設定一開始車輛間距最大、更新傳遞方向與車行方向相反。

3.1.8 Helbing and Schreckenberg 模式(HS)

由 Helbing 和 Schreckenberg 兩位學者於 1999 年所提出，以 Bando *et al.*(1995)所提出的分離性最佳速度模式為基礎。本模式仍是為了提供一個形成擁擠型態的替代模式，由於先前所提出的模式下車流型態以混沌的方式形成，而本模式以便隨機的方式形成。本模式採用的車輛更新規則與 N-S 模式極為相似，加速規則如下所式：

$$v_n\left(t + \frac{1}{2}\right) = v_n(t) + \left\{ \lambda [v_{opt}(d_n) - v_n(t)] \right\}$$

雖然本模式和先前提到模式極為相似，但本模式確可在一個時階內以大於 1 的加速度前進，且隨著 λ 的減少而降低車輛減速能力。此模式中可能造成事故的產生和不可預期的現象，為了解決這個問題 Knospe *et al.*(2004)提出改善規則。為了避免車輛相撞必需符合以下規則：

$$v_n(t+1) \leq d_n - 1 + v_{n+1}(t+1)$$

進而考慮當車輛到達擁擠區域盡頭時，如果前車在下一個時階仍靜止不動則可能產生碰撞。因此必需符合以下加速規則：

$$v_n(t+1) + \left\{ \lambda [v_{opt}(d_n) - v_n(t+1)] \right\} \leq d_n - 1$$

至於考量不發生碰撞和車輛不向後退狀況下，模式中 λ 的選擇可依據以下公式產生：

$$\lambda > \max \left\{ \frac{d - v - 1}{v_{opt}(d) - v} : v > v_{opt}(d) \right\}$$

$$\lambda \leq \min \left\{ \frac{v}{v - v_{opt}(d)} : v > v_{opt}(d) \right\}$$

3.1.9 各模式比較

綜觀 CA 發展從早期 N-S 模式開始許多修改模式相繼產生，比較 N-S、VDR、TOCA、ER、HS、BL、KKW 和 J-W 八種模式的規則與模擬真實性。從文獻中模擬結果比較發現 ER、HS 這兩種修正距離規則的模式較不能呈現合理的流量-密度關係圖，且可能造成交通事故發生。其餘六種模式對於模擬高速公路的車流型態都相當具真實性，其中又以 J-W

模式最佳。由於 J-W 模式在考慮駕駛人對延滯起動反應較細緻，因此可以將三相車流型態中的同步流又區分為輕微與強烈同步流。因此本研究後續將以 J-W 模式為基礎進行規則的修改，建構適用於高速公路匝道儀控之模式。細胞自動機模式規則比較如表 3.1 所示。

表 3.1 細胞自動機模式規則比較表

模式 規則	N-S (1992)	ER (1997)	VDR (1998)	HS (1999)	TOCA (1999)	BL (2000)	KKW (2002)	J-W (2003)
基本規則 (加速、減速、隨機減速、車輛移動)	V	V	V	V	V	V	V	V
距離更新規則		V		V				
隨機參數判斷規則			V			V	V	V
強化車輛間影響範圍					V	V	V	V
前車煞車影響						V		V

註:打 V 代表模式中有考慮此規則

3.1.10 改良型細胞自動機模式

本研究依據 Lan and Hsu(2005、2006)所建構之異質混合車流細胞自動機模式，其為在 J-W 模式為基礎下修改車輛更新規則與變換車道規則，並定義可建立混合車流環境的基本單元，改善傳統交通變數的定義，以新的交通變數計算混合車流大小車對交通系統的影響。以此異質混合車流模式為基礎，加入匝道車輛併入規則並改良為適用於開放式路段之細胞自動機模式，提出一個應用於高速公路之異質混合車流細胞自動機模式。對於模式定義、交通變數定義與模式規則詳述如后。

3.1.10.1 模式定義

模式中混合車流定義為不同型式與大小的車輛，型式可分為大車和小車。大小則係指車輛長度、寬度或高度的不同，用以對照型式大小均

相同的純車流。異質車流的定義則為車輛性能與駕駛行為的不同。車輛性能可能具有不同加減速能力、最大速度、啟動延滯等。駕駛行為則是在跟車、變換車道行為的不同與隨機項干擾。

本模式係以間斷不連續的時階，以及網格化的方式，模式化該交通系統。系統中有不同種類型的車輛，分別以占用不同格位數目來代表。其移動方式則建立在三維空間(縱軸直進、橫軸橫向位移、時間軸)，依據模式的規則，模擬車輛在時空的運動狀態，而車輛的運動狀態即成為車流的行為。模式組成基本定義如圖 3.2 所示：

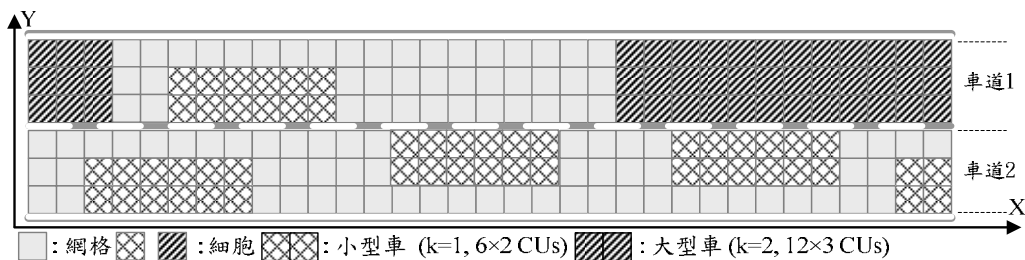


圖 3.2 基本單元、車輛細胞與道路格位的示意圖

資料來源:Lan and Hsu(2005)

1、基本單元(Common Unit)

交通系統係由單元網格所組成，稱為基本單元。為了反映台灣高速公路速限 110 公里/小時特性，本模式定義每個基本單元網格為長寬各 1 公尺×1.25 公尺的方形(視需求調整長或寬)。每個網格隨著時間演進只會有二種不同的狀態，不是被車輛佔有、就是空的。為了描述上述的二種狀態，須要進一步定義以下名詞。

2、細胞(Cell)

模式所稱細胞代表車輛的基本組成單元，被車輛佔有的基本單元網格則稱為細胞，故不同大小類型的車輛將由不同數目的細胞所組成。例如：一般的小型車以長 6 個細胞、寬 2 個細胞表示(即 6×2 cells)；大型車則為 12×3 個細胞。該定義是以實際車輛大小，加上運行過程動態安全距離而設定。

3、格位(Site)

模式所稱格位代表空間的基本組成單元，以此概念來描述距離、位

置、速率等空間單位。例如：一般 3.75 公尺的標準車道以寬 3 個格位；市區較窄道路可以寬 2 個格位表示。

3.1.10.2 交通變數定義

傳統交通系統中對於系統整體流量、密度、速率等變數衡量，係以車輛數為單位，如流量的量測係以單位時間，通過特定地點的車輛數，無法反映出大小車輛對交通系統造成的影響。在真實的交通環境中，大車佔用車道範圍較大，相對影響整體交通也較大，也會降低道路的服務水準，故以異質交通為研究背景時，傳統交通變數顯然無法精確呈現真實交通情況。因此 Lan and Hsu(2005、2006)提出新的交通變數定義，用來說明三維空間上車輛細胞在道路格位隨時階動態位移的特性。茲就時空交通變數的定義分述如下：

傳統車流密度定義係在特定的時間點(t)，在某個路段(長度 L)上的車輛數($n(t)$)，稱為密度，表示如(3.1)式前段。上下分母各乘一段很短的時間(Δt)，代表車輛在圖 3.3 虛線所圍成直立細條長方形的時空範圍內，所花費的時間，表示如(3.1)式後段。

$$k(t) = \frac{n(t)}{L} = \frac{n(t)\Delta t}{L\Delta t} \quad (3.1)$$

將前上述時間軸擴展到加總整段時間軸(T)，則車流密度變為圖 3.3 粗線所圍成方形的時空範圍(A)，車輛在上面所花費的時間($t(A)$)，表示如(3.2)式。

$$k(A) = \frac{\sum_{\Delta t} n(t)\Delta t}{\sum_{\Delta t} L\Delta t} = \frac{t(A)}{|A|} \quad (3.2)$$

相同地，傳統交通流量定義係在特定的觀測點(x)，經過一段觀測時間(T)上的通過的車輛數($m(x)$)，稱為流量，表示如(3.3)式前段。上下分母各乘一段很短的距離(Δx)，代表車輛在圖 3.3 虛線所圍成橫向細條長方形的時空範圍，車輛所行走的距離，表示如(3.3)式後段。

$$q(x) = \frac{m(x)}{T} = \frac{m(x)\Delta x}{T\Delta x} \quad (3.3)$$

將上述空間軸擴展到加總整段空間軸(L)，則交通流量變為圖 3.3 粗線所圍成方形的時空範圍(A)，車輛在上面所行走的距離($d(A)$)，表示如(3.4)式。

$$q(A) = \frac{\sum_{\Delta x} m(x)\Delta x}{\sum_{\Delta x} T\Delta x} = \frac{d(A)}{|A|} \quad (3.4)$$

將(3.4)式與(3.2)式相除，得到時空範圍 A 的空間平均速率((3.5)式前段)；上下消去 A 後，得到在時空範圍 A 車輛所行走距離除以花費時間，表示如(3.5)式後段。

$$v(A) = \frac{q(A)}{k(A)} = \frac{d(A)}{t(A)} \quad (3.5)$$

上述是交通變數在二維時空的定義，如前述分析無法精確表現整體交通在三維空間的行為。然而新的交通變數，包含道路的縱向、橫向二軸，加上時間軸所構成三維時空範圍，並且取代原本以車輛為單位的定義，改以更細緻的基本單元細胞與格位，期能更精確反應車流行為。原先密度的定義改採為某一特定時間路段佔有率($\rho(t)$)，即以觀測路段總格位數(N)為分母，在該時間被車輛佔有的細胞數($N_o(t)$)為分子((3.6)式後段)，而路段上佔有的細胞數則由每一個橫斷面該時間佔有數($N_{o\Delta y}(t)$)加總。

$$\rho(t) = \frac{N_o(t)}{N} = \frac{\sum_{\Delta y} N_{o\Delta y}(t)}{N} \quad (3.6)$$

以(3.6)式重複(3.1)式與(3.2)式的推導過程，可得到在三維時空範圍($S, L \times W \times T$)的一般化佔有率定義可表示如(3.7)式，代表車輛在該時空所花費的時間($t(S)$)。

$$\rho(S) = \frac{\sum_{\Delta t} N_o(t)\Delta t}{\sum_{\Delta t} N\Delta t} = \frac{t(S)}{|S|} \quad (3.7)$$

同樣地，三維時空範圍的一般化流量的定義可表示如(3.8)式，代表車輛在該時空所行走的距離($d(S)$)。

$$q(S) = \frac{\sum_{\Delta x} M_o(x)\Delta x}{\sum_{\Delta x} T\Delta x} = \frac{d(S)}{|S|} \quad (3.8)$$

將(3.8)式與(3.7)式相除，得到立體時空範圍 S 的空間平均速率((3.9)

式前段)；上下消去 S 後，得到在立方體時空範圍 S 車輛所行走距離除以花費時間，表示如(3.9)式後段。

$$v(S) = \frac{q(S)}{\rho(S)} = \frac{d(S)}{t(S)} \quad (3.9)$$

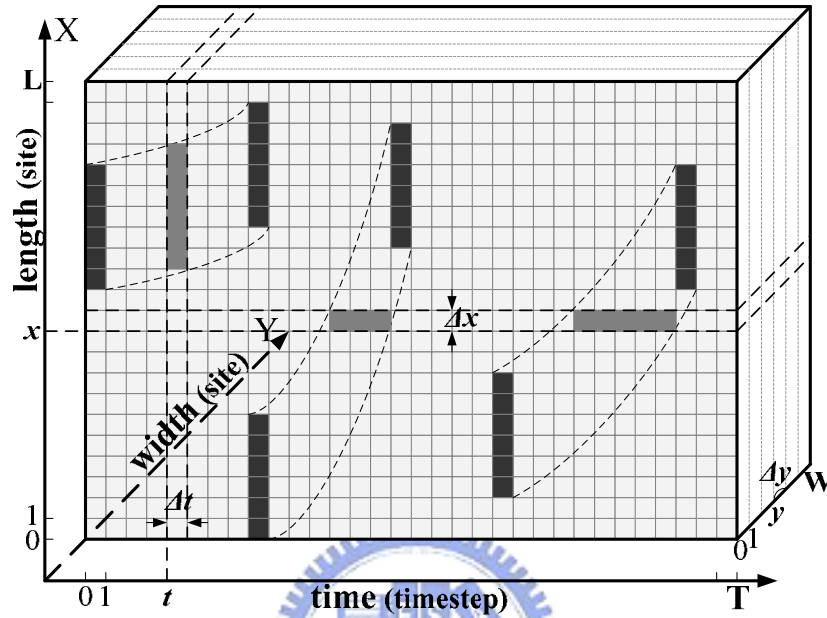


圖 3.3 立方體時空範圍特定橫切面車流軌跡圖

資料來源:Lan and Hsu(2005)

局部性交通參數的計算係以路段上佈設之偵測器取得某一定點之流量與佔有率，每秒計算通過該網格的細胞數與佔有率，如(3.10)式與(3.11)式所示。

$$O(t) = O(t-1) + \begin{cases} \frac{VL \times VW}{W \times v_i(t)} & \text{if } T_i(t) > ms \text{ and } H_i(t-1) < ms \\ \frac{H_i(t) - ms}{v_i(t)} \times \frac{VW}{W} & \text{if } H_i(t) \geq ms \text{ and } T_i(t) \leq ms \\ & \text{and } H_i(t-1) < ms \\ \frac{VW}{W} & \text{if } H_i(t) \geq ms \text{ and } T_i(t) \leq ms \\ & \text{and } H_i(t-1) \geq ms \text{ and } T_i(t-1) \leq ms \\ \frac{(ms - T_i(t) + 1) \times VW}{v_i(t)} \times \frac{VW}{W} & \text{if } (T_i(t) > ms) \\ & \text{and } H_i(t-1) \geq ms \text{ and } T_i(t-1) \leq ms \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$q(t) = q(t-1) + \begin{cases} VL \times VW & \text{if } T_i(t) > ms \text{ and } H_i(t-1) < ms \\ (H_i(t) - ms) \times VW & \text{if } H_i(t) \geq ms \text{ and } T_i(t) \leq ms \\ & \text{and } H_i(t-1) < ms \\ v_i(t) \times VW & \text{if } H_i(t) \geq ms \text{ and } T_i(t) \leq ms \\ & \text{and } H_i(t-1) \geq ms \text{ and } T_i(t-1) \leq ms \\ (ms - T_i(t) + 1) \times VW & \text{if } (T_i(t) > ms) \\ & \text{and } H_i(t-1) \geq ms \text{ and } T_i(t-1) \leq ms \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.11)$$

其中 $O(t)$ 為時間 t 的佔有率， $q(t)$ 為時間 t 的流量， ms 為偵測器佈設之位置， VL 為車長(cells)， VW 為車寬(cells)， $v_i(t)$ 為車輛 i 在時間 t 時通過偵測器的速度， $H_i(t)$ 為車輛 i 在時間 t 時車頭的位置， $T_i(t)$ 為車輛 i 在時間 t 時車尾的位置， W 為路寬(sites)。

因此，速率為流量與佔有率兩者相除，再除以路寬，如(3.12)式所示。

$$v(t) = \frac{q(t)}{O(t)W} \quad (3.12)$$

其中 $v(t)$ 為時間 t 時的速率。

3.1.10.3 模式規則

本模式之異質性車輛更新規則，係根據 Lan and Hsu(2005、2006) 建構之模式，以 Jiang and Wu(2003) 所提出的 J-W 模式為基礎修正而來，加上高速公路匝道車流併入設計車輛併入規則，提出適用於模擬開放式高速公路路段之車流模擬模式，本研究模式如下所示：

1、車輛更新規則

步驟 1、決定車輛干擾項的隨機值

P_b 代表前方不遠的車輛煞車； P_0 代表交通擁擠下游車輛的延滯啟動； P_d 代表其他狀況。

$$p(v_n(t), t_h, t_s, S_{n+1}(t)) = \begin{cases} p_b & : \text{if } S_{n+1} = -1 \text{ and } t_h < t_s \\ p_0 & : \text{if } v_n = 0 \text{ and } t_{st} \geq t_{k,c} \\ p_d & : \text{in all other cases} \end{cases}$$

其中 $t_h = d_n / v_n(t)$ ， $t_s = \min(v_n(t), h_k)$ ， t_{st} 代表車輛停止的時間必須超過

一段設定的時間 $t_{k,c}$ 才會讓駕駛變得較不敏感。 t_h 代表本車等速行駛到前車後方所需的時間， d_n 為本車與前車間距， $v_n(t)$ 代表本車在本時階的速度， h_k 代表本車道會受前面車煞車影響的範圍， S_{n+1} 代表前車狀態， k 代表車輛種類。

步驟 2、加速

如果前方車輛沒有煞車，本車也沒有煞車，或者行駛到前車的時間還很長，則代表本車在下一時階可以加速。

if $(S_{n+1}(t) \geq 0 \text{ and } S_n(t) \geq 0) \text{ or } (t_h \geq t_s)$ then $v_n(t+1) = \min(v_n(t) + a_k, v_{k,max})$
else $v_n(t+1) = v_n(t)$

其中 a_k 為 k 車種的加速度能力， $v_{k,max}$ 為模式所設定 k 車種的最大速度。

步驟 3、減速

如果預期前方有效的距離 (d_n^{eff} , Knospe *et al.*(2000))，小於本車以目前車速移動之距離時，代表車輛在下一時階要減速。

$$v_n(t+1) = \min(d_n^{eff}, v_n(t+1))$$

$$d_n^{eff} = d_n + \max(v_{anti} - gap_{safety}, 0)$$

其中 v_{anti} 為前車下一時階的預期車速， gap_{safety} 為安全間距。

步驟 4、隨機項

現實交通環境並非每個駕駛有一致的反應，故在模擬時亂數隨機取一個數值，與步驟 1 的隨機值比較，決定是否將速度值再減 1。

if $(rand() < p)$ then $v_n(t+1) = \max(v_n(t+1) - 1, 0)$

步驟 5、判斷下一個時階車輛的狀態為加速、減速或等速

$$S_n(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } v_n(t+1) > v_n(t) \\ 0 & \text{if } v_n(t+1) = v_n(t) \\ -1 & \text{if } v_n(t+1) < v_n(t) \end{cases}$$

步驟 6、計算車輛在擁擠車陣中停等的時間

$$t_{st} = \begin{cases} t_{st} = t_{st} + 1 & \text{if } v_n(t+1) = 0 \\ t_{st} = 0 & \text{if } v_n(t+1) > 0 \end{cases}$$

步驟 7、更新車輛位置

依據最後所決定的速度和這一時階的速度平均，更新車輛的位置，並返回繼續下一時階。

$$x_n(t+1) = x_n(t) + (v_n(t) + v_n(t+1)) / 2$$

2、變換車道規則

主線路段上的車輛依據下列的五個條件，進行變換車道與否的決策。

(1) 定位

假定小型車在圖 3.4 左邊車道，依其所在位置有二種可能的變換車道方式分別為 1→2→3 或 2→3；反之，在右邊車道亦然。主要取決於車輛所在位置而定。

(2) 變換動機

本車的車速大於前方車輛的車速，且欲變換的目標車道前方車輛的速度，大於本車所在車道前方車輛的速度，則本車具有變換車道的動機。

(3) 檢視前方空出的間距

本車欲變換的目標車道下一個時階前方所會空出的間距，大於本車所在車道下一個時階前方所會空出的間距，代表目標車道讓駕駛人有較大的空間前進，更會刺激其變換車道。

(4) 檢視安全間距

本車變換到目標車道時，所須橫越的道路範圍有無其他車輛會撞上來。

(5) 隨機項

當前述條件均符合，駕駛人並非完全依照規則變換車道，在此加入隨機項(P_c)模擬可能不依規則反應的行為。

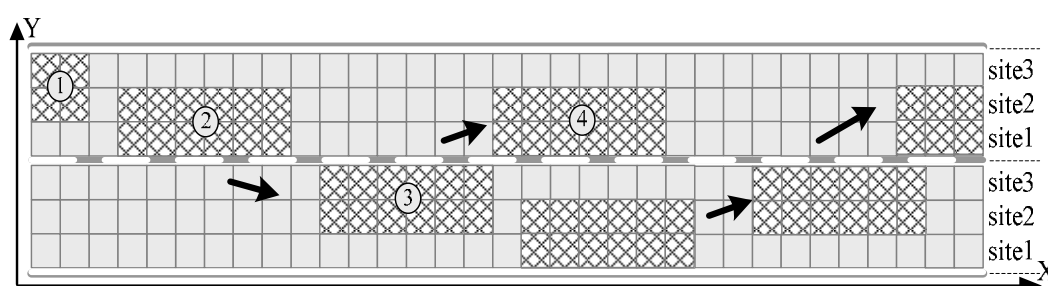


圖 3.4 二車道道路小型車變換車道行為

資料來源:Lan and Hsu(2005)

變換車道判斷規則可表示如下：

步驟 1、檢視變換動機

$$\text{If } v_{l,n}^+(t) > v_{l,n}(t) \text{ and } v_n(t) \geq v_{l,n}(t)$$

步驟 2、檢視安全間距

$$g_{l,n}^+(t) > \min(d_n^{eff}, v_n(t+1)) \text{ and}$$

$$g_{b,n}^+(t) > \min(d_{b,n}^{eff}, v_{b,n}^+(t+1))$$

其中， g 為間距，下標 b 代表目標車道上游鄰近的車輛； l 代表下游鄰近的車輛，上標+代表目標車道。

3、匝道車輛併入主線規則

上述變換車道規則適用於匝道併入區以外的主線車輛，然而在匝道

併入區內的車輛變換車道規則在提高併入機率與受併入區域長度影響下，其併入規則如下所示。匝道上車輛只需檢視主線車間距是否達到可併入之安全間距，此條件符合下匝道車輛即確定併入主線，亦不受隨機值影響。

步驟 1、檢視主線車道安全間距

檢視主線目標車道上游鄰近的車輛與下游鄰近的車輛間距是否大於可接受最小間距。

$$x_{l,n}^+(t) - x_{b,n}^+(t) > g_{on}^{(\min)}$$

$$g_{on}^{(\min)} = d_{b,n}^{eff} + f_m$$

其中 f 為車長，下標 m 代表併入車輛。

步驟 2、更新車輛位置

如果主線車道上下游鄰近車輛間距符合要求，則在下一時階讓匝道車輛併入目標車道上下游鄰近車輛之間。

$$x_n(t+1) = \min\left(\left(x_{l,n}^+(t+1) + x_{b,n}^+(t+1)\right)/2, x_e\right)$$

其中 x_e 為併入區的盡頭。

步驟 3、更新車輛速度

車輛在併入主線後，為避免與前、後車輛發生碰撞，在併入初始採前、後車輛的平均速率行駛。

$$v_n(t+1) = \left(v_{l,n}^+(t+1) + v_{b,n}^+(t+1)\right)/2$$

3.2 車流型態判斷

過去研究對於車流型態的判斷多採取主觀的認定，取得車流密度、流量資料，以時空軌跡圖主觀認定或巨觀車流理論的密度-流量關係圖分析車流型態的轉變。然而這種主觀認定的方式缺乏判斷的標準，且無法對道路上的車流型態作出即時性的判斷。Neubert *et al.*(1999)以交叉相關函數區分車流型態，在自由流和擁擠流狀況下的交叉相關係數大約是 1；同步流下大約是 0.1，然而此判斷方式亦無明確的數據範圍。因此本研究嘗試以模糊邏輯控制發展判斷車流型態規則，處理車流型態本身定義的不明確性，並達到即時性判斷的效果。

模糊邏輯控制(FLC)係以推論機為核心，利用領域專家之知識與經驗，建構以 If-then 邏輯規則所組成之知識庫，在依據受控對象之現狀推論出對應之控制策略，以便模仿專家做決策與控制行為，達到智慧化控制之目的。由於 FLC 僅需界定出知識庫後，即可進行控制，不需要建構模式及設計求解方法。因此，特別適用於無法以單純數值方法或數學模式加以求解的複雜問題。其基本架構如圖 3.5 所示，下面就其基本核心敘述如下：

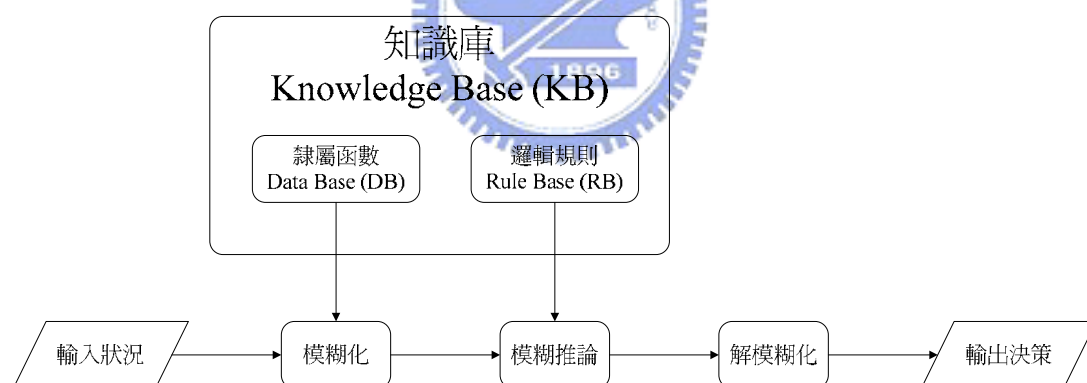


圖 3.5 FLC 基本架構圖

1. 隸屬函數 (Membership function)

語意變數依其在邏輯規則中所處之位置及功能，劃分為狀態變數及控制變數。狀態變數係用以陳述現有狀態之相關資料；控制變數則是控制系統輸出之結果。而各語意變數均有其一定型式的隸屬函數及語意等級，常見的隸屬函數如三角形、梯形、鐘形等，據以映射各狀態變數與控制變數之明確數值隸屬於各語意等級之程度，一般語意等級係以模糊集合代表，例如一般可以「很差」、「差」、「普通」、「好」、「很好」等五個等級來表示滿意程度。

2. 邏輯規則 (Logic rule)

邏輯規則係 FLC 的核心組成，是 If-then 的推理規則。一條邏輯規則通常包括前提及結論兩部分，即 If 前提，then 結論。更複雜的邏輯規則可能有三部分以上，例如，If 前提，then 結論 1，else 結論 2。每個 FLC 均由有限數量之 If-then 規則構成，各規則之推論組合結果即形成其推論機制。例如，當邏輯規則：If $X=x_1$ and $Y=y_2$ then $Z=z_3$ ，即代表當語意變數 X 觸動第一語意等級，而 Y 觸動第二語意等級時，將推論出 Z 為第三語意等級之決策行為，其中 X 與 Y 代表狀態變數， Z 則代表控制變數。

3. 模糊化 (Fuzzification)

如果輸入變數是明確數值，則為了解其觸動那些規則，又觸動多大的程度，因此必須利用前述資料庫中的隸屬函數計算其隸屬度，此即模糊化過程。

4. 模糊推論 (Fuzzy inference)

模糊推論係決定各邏輯規則運算方式。邏輯規則一般以 AND 或 OR 作為各狀態變數之連結運算元。其中 AND 之運算方式通常以取最小值為主，OR 則以取最大值為主。

5. 解模糊化 (Defuzzification)

由於同一個輸入狀態，可能同時觸動數條規則，而各規則的輸出結果均為一模糊資料，無法作為實際控制之依據。因此，解模糊化的目的即在將所有觸動規則的模糊輸出結果，利用特定方法予以綜整，並轉化為明確輸出，俾作為決策依據。常用的解模糊化方法有最大隸屬度化 (maximum-membership method)、加權平均法 (weighted average method)、重心法 (gravity method, center method)、面積法 (area method) 等四種。

本研究在車流型態判斷上參考 Kerner *et al.* (2004) 利用模糊邏輯控制，以主線速度、流量、速度變化率、流量變化率及速度變化率/流量變化率為狀態變數；車流型態為控制變數。以交集「AND」作為各狀態變數間之連結運算元，主觀設定邏輯規則與隸屬函數，而解模糊化之方法採用最大隸屬度法 (maximum-membership method)，以下茲就車流型態判斷於邏輯規則、隸屬函數建構以及解模糊化方法敘述如下：

1. 邏輯規則

參考 Kerner *et al.*(2004)設定規則，在考慮主線速度、流量、速度變化率、流量變化率、速度/流量變化及前一時階車流型態下判斷車流型態。本研究進一步將原本三相車流理論中的同步流型態區分為輕微同步流與強烈同步流，依據 Jiang and Wu(2003)所提出速率 90-60 公里/小時為輕微同步流，60-24 公里/小時為強烈同步流方式進行劃分，因此共區分為自由流、輕微同步流、強烈同步流、大範圍擁擠流四種車流型態，如圖 3.6 所示，依據不同狀態變數情境下可能發生的結果作邏輯推論，提出共計 15 條規則，如下所示：

- (1) If 「主線車流速度」=高，then 「車流型態」=自由流。
- (2) If 「主線車流速度」=很低，then 「車流型態」=大範圍擁擠流。
- (3) If 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=很低，then 「車流型態」=大範圍擁擠流。
- (4) If 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=低，then 「車流型態」=強烈同步流。
- (5) If 「主線車流速度」=中 and 「主線車流量」=高，then 「車流型態」=輕微同步流。
- (6) If 上一個時階「車流型態」≠大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=低 and 「速度變化率」=負 and 「流量變化率」=負 and 「速度變化率/流量變化率」=低，then 「車流型態」=大範圍擁擠流。
- (7) If 上一個時階「車流型態」=自由流 and 「主線車流速度」=中 and 「主線車流量」=高 and 「速度變化率」=負 and 「流量變化率」=負 and 「速度變化率/流量變化率」=低，then 「車流型態」=輕微同步流。
- (8) If 上一個時階「車流型態」≠大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=中 and 「主線車流量」=高 and 「速度變化率」=負，then 「車流型態」=輕微同步流。
- (9) If 上一個時階「車流型態」≠大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=中 and 「主線車流量」=高 and 「流量變化率」≠負，then 「車流型態」=輕微同步流。
- (10) If 上一個時階「車流型態」≠大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=低 and 「速度變化率」≠負，then 「車流型態」=強烈同步流。
- (11) If 上一個時階「車流型態」≠大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=低 and 「流量變化率」≠負，then 「車流型態」=強烈同步流。
- (12) If 上一個時階「車流型態」=大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=低 and 「速度變化率」=正 and 「流量變化率」=正 and 「速度變化率/流量變化率」=低，then 「車流型態」=強烈同步流。
- (13) If 上一個時階「車流型態」=大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=低 and

- 「主線車流量」=低 and 「速度變化率」=正 and 「流量變化率」=正 and 「速度變化率/流量變化率」=高，then 「車流型態」=大範圍擁擠流。
- (14) If 上一個時階「車流型態」=大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=低 and 「速度變化率」 \neq 負，then 「車流型態」=大範圍擁擠流。
- (15) If 上一個時階「車流型態」=大範圍擁擠流 and 「主線車流速度」=低 and 「主線車流量」=低 and 「流量變化率」 \neq 負，then 「車流型態」=大範圍擁擠流。

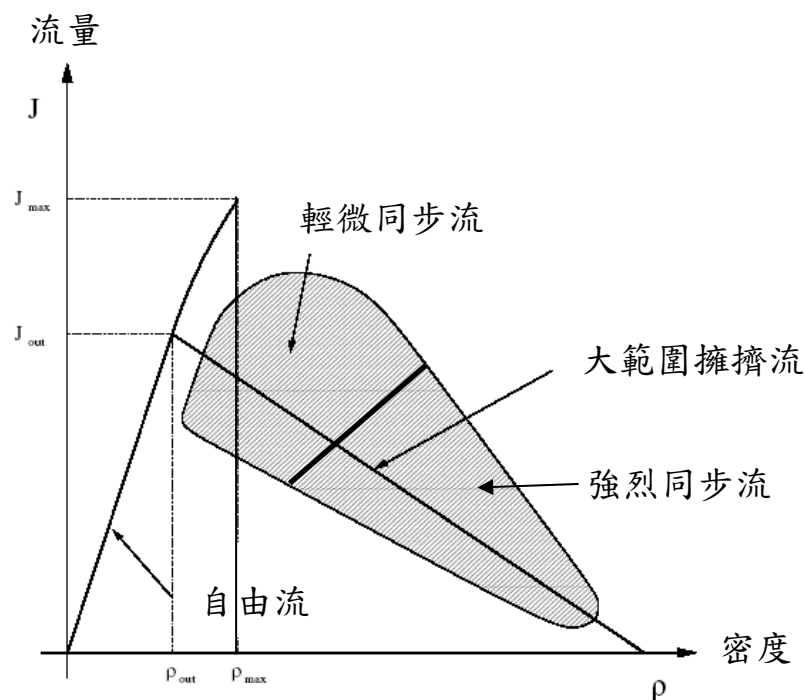


圖 3.6 車流型態分布圖

資料來源:Jiang and Wu(2003)

2. 隸屬函數

參考 Kerner *et al.*(2004)採取五個狀態變數及一個控制變數，分別為速度、流量、速度變化率、流量變化率、速度變化率/流量變化率及車流型態；反映台灣高速公路車流特性，速度與流量分別為語意等級四、三之梯形模糊數，速度變化率、流量變化率、速度變化率/流量變化率皆為語意等級二之梯形模糊數，車流型態為語意等級四之梯形模糊數，首先針對語意變數之最大值作設定，再以均等份方式決定各模糊數三個點之座標值，其形式如圖 3.7 至 3.12 所示。

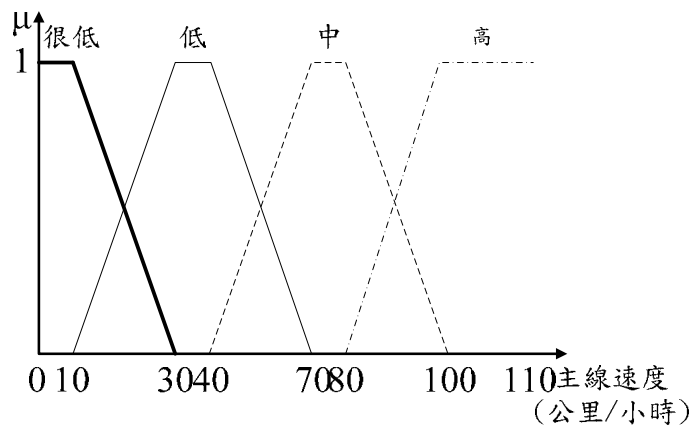


圖 3.7 主線速度之隸屬函數型態

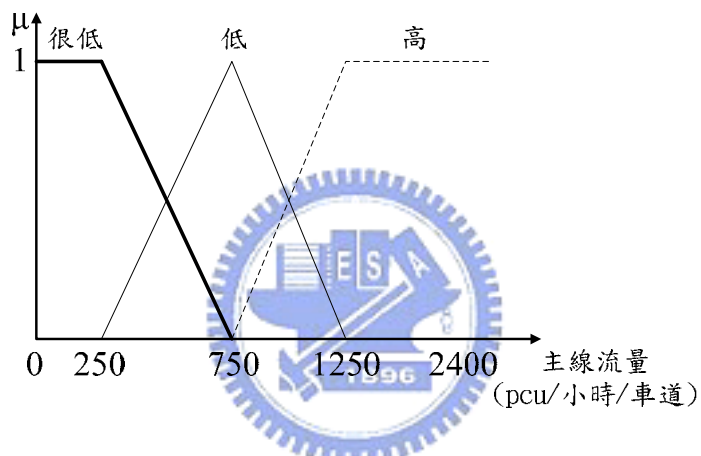


圖 3.8 主線流量之隸屬函數型態

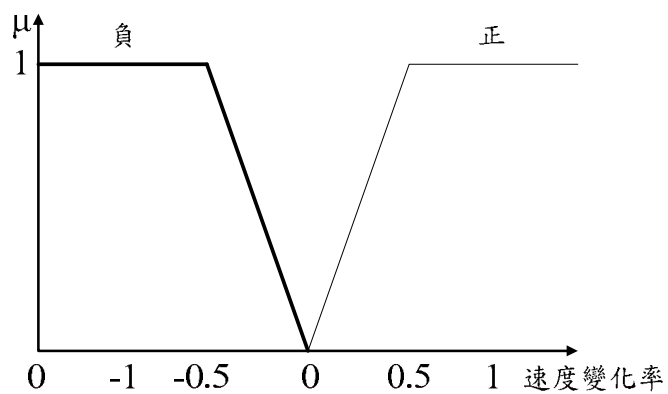


圖 3.9 速度變化率之隸屬函數型態

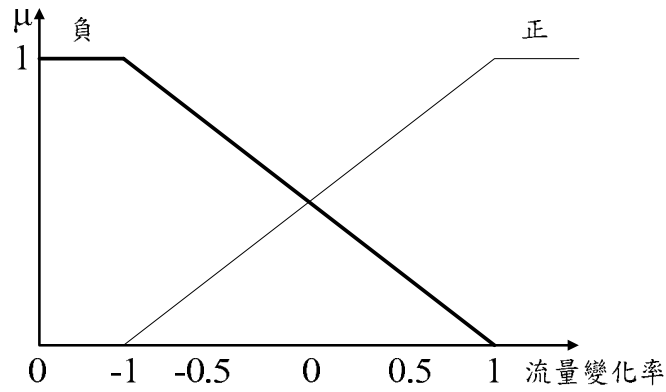


圖 3.10 流量變化率之隸屬函數型態

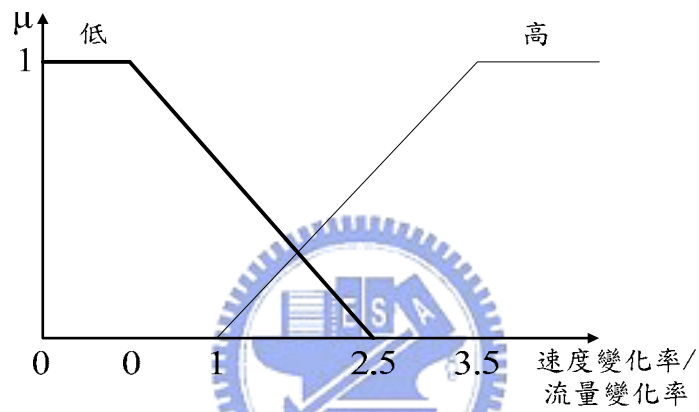


圖 3.11 速度變化率/流量變化率之隸屬函數型態

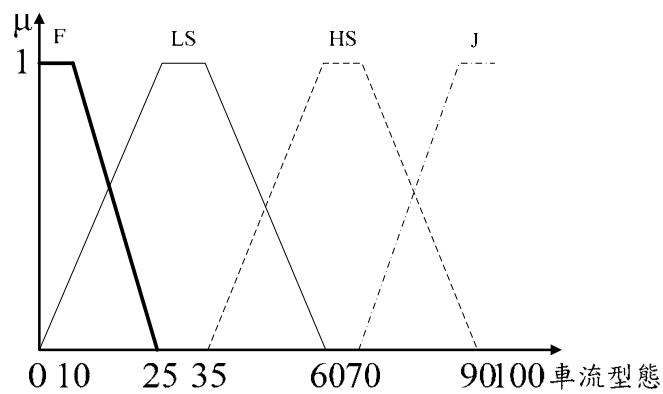


圖 3.12 車流型態之隸屬函數型態

速度變化率、流量變化率與速度變化率/流量變化率係根據公式 (3.13)、(3.14)、(3.15) 計算所得，公式如下所示：

$$\text{If } q(t) \leq q(t-1) \text{ then } d_q(t) = \frac{q(t) - \max(q(t))}{\Delta t} \text{ and}$$

$$\text{If } q(t) > q(t-1) \text{ then } d_q(t) = \frac{q(t) - \min(q(t))}{q(t)} \quad (3.13)$$

$$\text{If } v(t) \leq v(t-1) \text{ then } d_v(t) = \frac{v(t) - \max(v(t))}{\Delta t} \text{ and}$$

$$\text{If } v(t) > v(t-1) \text{ then } d_v(t) = \frac{v(t) - \min(v(t))}{v(t)} \quad (3.14)$$

$$c(t) = \frac{d_v(t)}{d_q(t)} \quad (3.15)$$

其中 t 為決策點， $t-1$ 為上一個決策點， $d_q(t)$ 為流量變化率， $d_v(t)$ 為速度變化率， $c(t)$ 為速度變化率/流量變化率。

3. 解模糊化

採用最大隸屬度法針對輸入值所觸動之規則進行解模糊化動作，以便輸出明確之判斷結果。以所有觸動規則中，觸動程度最大者的規則，其輸出模糊結果之中心值作為輸出結果，如圖 3.13 所示。此種解模糊化方法計算十分簡便，其主要觀念係以具有最大可能性的推論結果作為模糊輸出結果。

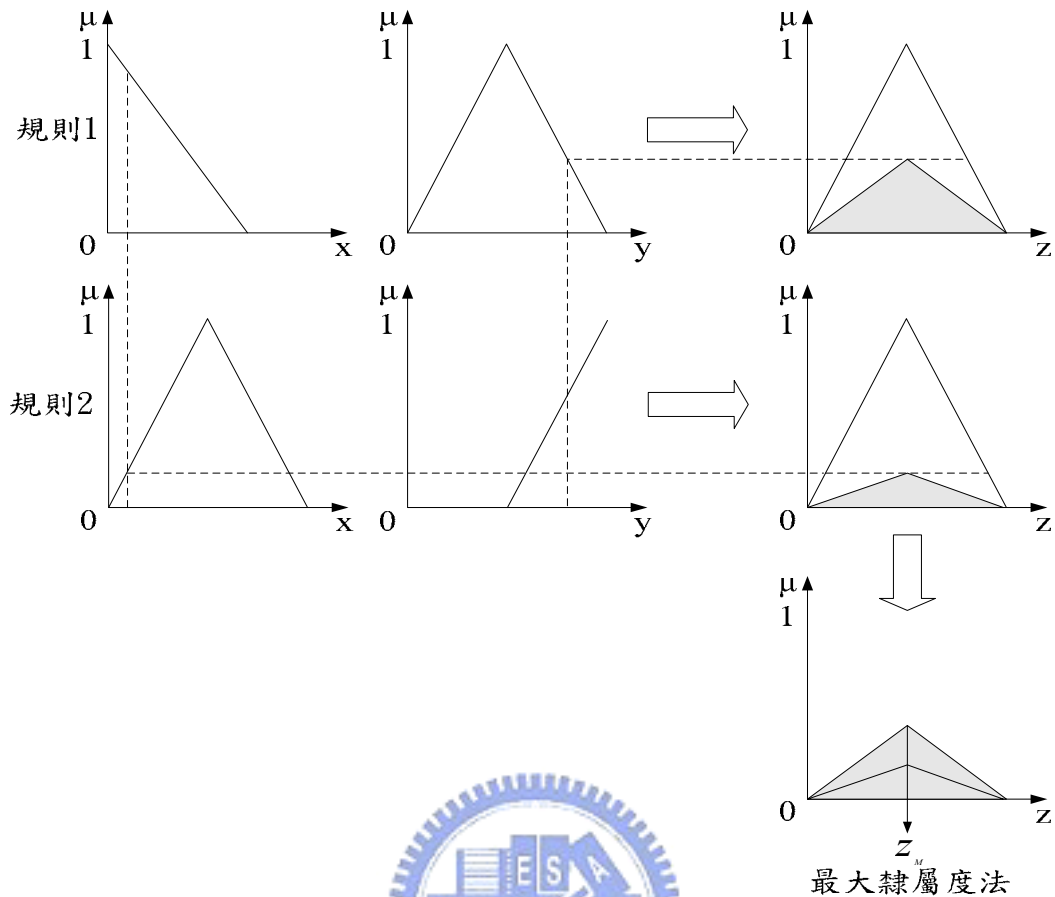


圖 3.13 最大隸屬度法解模糊化之示意圖

3.3 匝道儀控策略

3.3.1 擁擠型態自動匝道儀控策略 (Automatic On-ramp Control of Congested patterns, ANCONA)

擁擠型態自動匝道儀控策略為 Kerner(2005)所提出，其基本概念為允許主線瓶頸路段產生擁擠流，但盡可能讓擁擠流不向上游傳遞。以主線瓶頸路段車速決定儀控率，當主線瓶頸路段所測得車速高於擁擠車速則視同不需要限制進入車輛；當主線瓶頸路段所測得車速低於擁擠車速則必須對進入主線流量進行控制。因此，ANCONA 控制規則可以(3.16)式表示如下：

$$q_{on}^{(cont)}(t_s) = \begin{cases} q_{on1} & \text{if } v^{(det)}(t_s) \leq v_{cong} \\ q_{on2} & \text{if } v^{(det)}(t_s) > v_{cong} \end{cases} \quad (3.16)$$

其中 q_{on1} 和 q_{on2} 為兩種不同儀控率， $q_{on2} > q_{on1}$ 。 $V^{(det)}(t_s)$ 為在偵測器上所測得上一時階的速率， v_{cong} 為系統所設定擁擠速率。

3.3.2 模糊邏輯匝道儀控模式(FLRC)

本模式主要可分為兩種形式，一為獨立型匝道儀控模式，與整合型匝道儀控模式。獨立型模式主要係以主線及匝道交通狀況為基礎，直接決定單一匝道之儀控率，與其他匝道並無互動性，而本研究即以主線瓶頸路段上車流型態及匝道等候車輛數推估各時間匝道之儀控率；而整合型模式即在獨立型模式基礎下，另增加一項狀態變數用以推估匝道儀控率，亦即上游匝道儀控率，與獨立型模式之差異在於僅非以個別匝道為考慮對象，而同時兼顧上匝道來推估儀控率，故上游匝道之儀控結果將影響下游儀控率設定決策，尤其現階段之高速公路多兼具都會區內交通之功能，於都會區內之匝道數量多且密集，故以整體之觀點做考慮，有助於提升整體路網之服務效益。

本研究係依據已知交通資訊作為模糊控制系統之輸入，建置適當知識庫，透過模糊化、模糊推論及解模糊化等運算機制推估匝道控制系統各時間之儀控率，以構建具即時反應特性之適應性匝道儀控系統。在獨立型匝道儀控模式下採取主線瓶頸路段車流型態及匝道等候車輛數作為狀態變數，控制變數為匝道儀控率，以交集「AND」作為各狀態變數間之連結運算元，主觀設定邏輯規則與隸屬函數，而解模糊化之方法採用面積法(Area method)，以下茲就獨立型 FLRC 於邏輯規則、隸屬函數建構以及解模糊化方法敘述如下：

1. 邏輯規則

本研究係依據主線瓶頸路段車流型態「自由流」且匝道等候車輛數「很多」而匝道儀控率「很高」之基本原理建構模糊控制系統之規則庫，亦即以右上角至左下角為對角線，由對角線越往右下角其控制變數之語意等級越高，而越往左上角則越低，計採用 20 條規則，如表 3.2 所示。

表 3.2 獨立型 FLRC 之規則庫

儀控率 (pcu/小時)		車流型態			
		自由流	輕微同步流	強烈同步流	大範圍擁擠流
匝道等候車輛 數(輛)	很少	普通	低	很低	很低
	少	高	普通	低	很低
	普通	高	高	低	低
	多	很高	高	普通	低
	很多	很高	很高	高	普通

2. 隸屬函數

獨立型 FLRC 採取二個狀態變數及一個控制變數，分別為主線車流型態、匝道等候車輛數以及匝道儀控率，匝道等候車輛數與匝道儀控率皆為語意等級五之三角模糊數，首先針對語意變數之最大值作設定，再以均等份方式決定各模糊數三個點之座標值，其形式如圖 3.14、圖 3.15 所示。

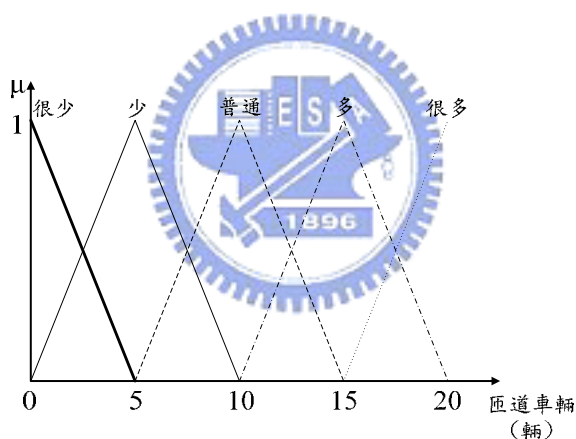


圖 3.14 匝道等候車輛數之隸屬函數型態

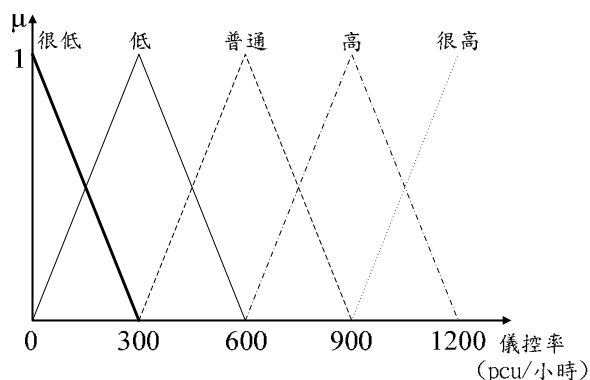
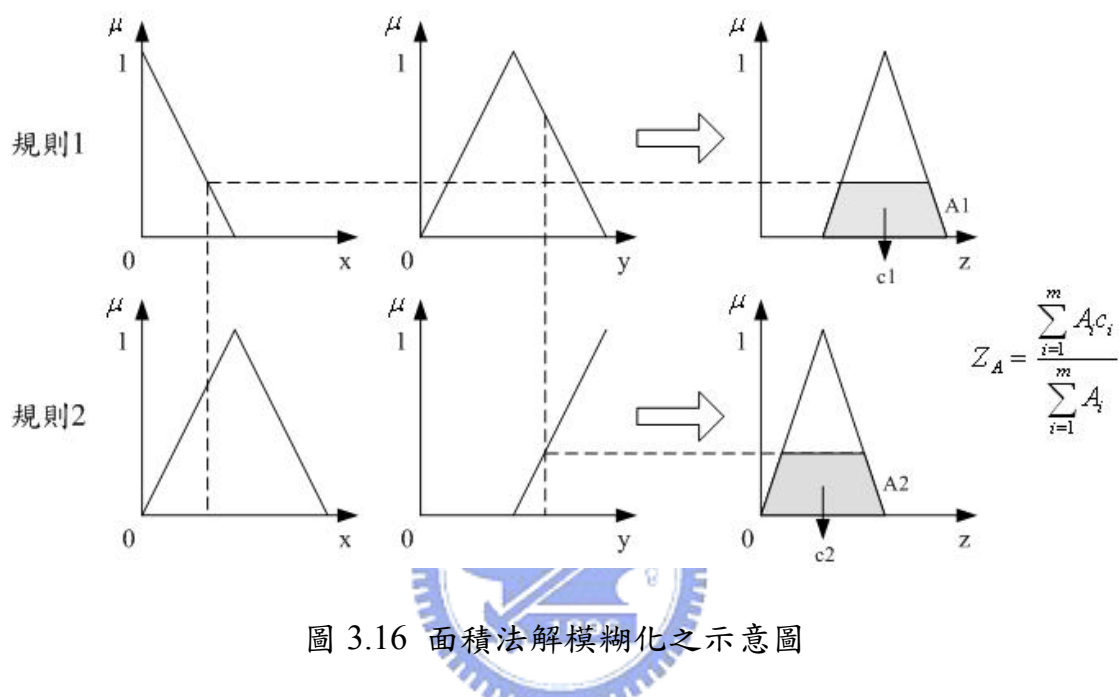


圖 3.15 匝道儀控率之隸屬函數型態

3. 解模糊化

解模糊化方法係採用面積法針對輸入值所觸動之規則進行解模糊化動作，以便輸出明確之數值來進行控制。經輸入值觸動各個規則前件部之隸屬度取其最小值，再計算各個規則後件部隸屬度下之面積及重心，最後以面積法加權求解綜整後之重心位置，亦即輸出之決策，面積法之示意圖及其計算方式如圖 3.16 所示。



其中， Z_A 為 FLRC 經面積法解模糊化後之明確數值， A_i 為第 i 條規則推論結果所圍成之面積， c_i 為該面積之重心位置， m 則為所觸動之規則數。

應用模糊邏輯控制判斷主線瓶頸路段上車流型態，並模擬匝道等候車輛數，以車流型態和匝道等候車輛數為狀態變數判斷下一時階匝道儀控率以控制匝道進入主線之車流量為獨立型模糊邏輯儀控模式。本研究以此方式在每一時階進行即時匝道儀控率判斷，最後以總旅行時間(包含主線旅行時間與匝道延滯時間)作為控制策略績效評比依據並觀察瓶頸路段車流形態之轉變。本研究並提出整合型模糊邏輯匝道儀控模式，其模式操作與獨立型差異在於整合型模式為加入上游匝道儀控率考量下進行儀控率判斷，其中隸屬函數型態和解模糊化方法設定與獨立型 FLRC 相同，邏輯規則設定原則在考慮上游匝道儀控率越高時，下游匝道儀控率較高；反之則反。在不同上游匝道儀控率程度下，下游匝道儀控率邏輯規則如表 3.3 到 3.7 所示，整合型模式架構圖如圖 3.17 所示，當下游儀控率推估時加入圖中虛線上游匝道儀控率此狀態變數時則為整合型模式。

表 3.3 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率很低)

儀控率 (pcu/小時)		車流型態			
		自由流	輕微同步流	強烈同步流	大範圍擁擠流
匝道等 候車輛 數(輛)	很少	低	很低	很低	很低
	少	普通	低	很低	很低
	普通	普通	普通	很低	很低
	多	高	普通	低	很低
	很多	高	高	普通	很低

表 3.4 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率低)

儀控率 (pcu/小時)		車流型態			
		自由流	輕微同步流	強烈同步流	大範圍擁擠流
匝道等 候車輛 數(輛)	很少	低	很低	很低	很低
	少	普通	低	很低	很低
	普通	普通	普通	低	很低
	多	高	普通	低	很低
	很多	高	高	普通	低

表 3.5 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率普通)

儀控率 (pcu/小時)		車流型態			
		自由流	輕微同步流	強烈同步流	大範圍擁擠流
匝道等 候車輛 數(輛)	很少	普通	低	低	很低
	少	普通	普通	低	很低
	普通	普通	高	普通	很低
	多	高	高	普通	低
	很多	高	很高	高	低

表 3.6 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率高)

儀控率 (pcu/小時)		車流型態			
		自由流	輕微同步流	強烈同步流	大範圍擁擠流
匝道等 候車輛 數(輛)	很少	普通	低	低	很低
	少	高	普通	低	很低
	普通	高	高	普通	很低
	多	很高	高	普通	低
	很多	很高	很高	高	低

表 3.7 整合型 FLRC 之規則庫(上游儀控率很高)

儀控率 (pcu/小時)		車流型態			
		自由流	輕微同步流	強烈同步流	大範圍擁擠流
匝道等 候車輛 數(輛)	很少	普通	低	低	低
	少	高	普通	低	低
	普通	高	高	高	低
	多	很高	高	高	普通
	很多	很高	很高	高	普通

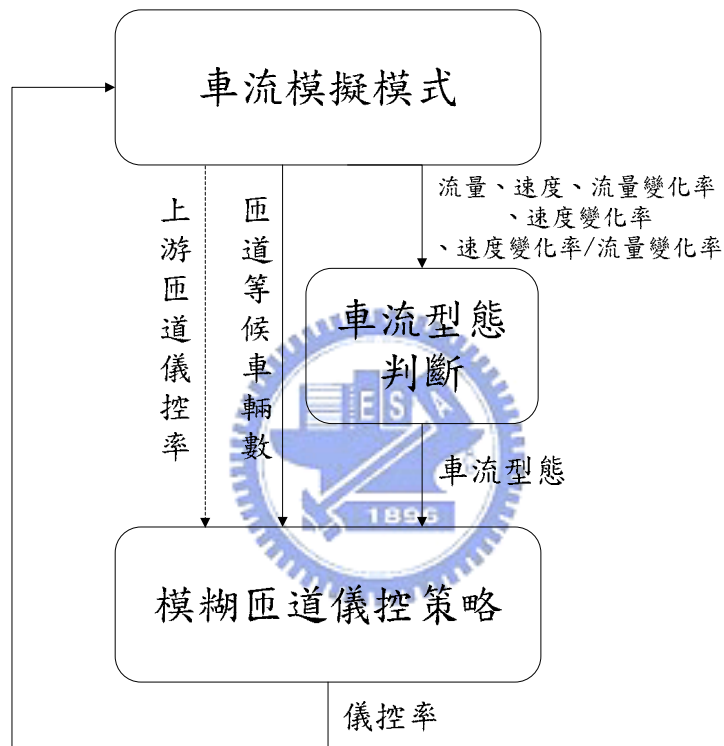


圖 3.17 整合型模糊邏輯匝道儀控模式架構圖

第四章 簡例驗證

本章目的在以一簡例說明本研究之匝道儀控模式應用於高速公路路段上之成效，並以模擬所得之車流資料進行車流模擬模式與車流型態判斷模式之驗證，利用巨觀車流理論驗證模式之真實性與正確性。針對流量低、中、高設計三種不同情境，比較在不同情境下模式控制績效，進行兩小時之模擬，以不實行匝道儀控、定時儀控、ANCONA、獨立型與整合型 FLRC 模式等五種儀控策略之績效比較。採用總旅行時間(包含主線旅行時間與各匝道延滯時間)作為績效評估指標並觀察主線瓶頸路段上車流型態的轉變，評估本研究之模式對於高速公路用路人總旅行時間之改善程度與高速公路瓶頸路段車流型態影響。

4.1 簡例說明

本研究針對簡例驗證部份設計一包含三組上、下匝道之高速公路路段，如圖 4.1 所示，包括 4 個子路段，三組匝道間距為 6 公里，上、下游長度各 1 公里，路段總長度為 15.5 公里，寬度為二個 3.75 公尺標準寬度車道。圖中編號 1 為高速公路上游，編號 2~7 為上、下匝道，主線為二線道；各上、下匝道皆為單車道。

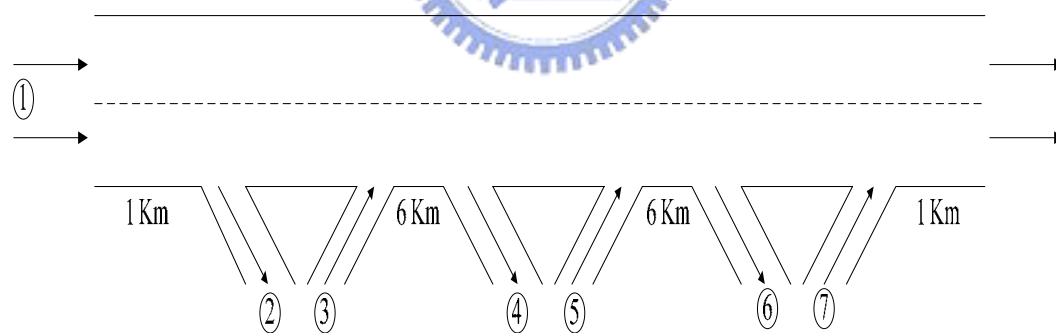


圖 4.1 簡例示意圖

針對高速公路各路段流量進行設計，流量設計可分為主線上游端進入流量、上匝道併入流量與下匝道匯出流量三個部份，主線與上匝道的到達率為 20 輛/分鐘；下匝道離開率為 4 輛/分鐘，依據到達率與離開率設定進行兩個小時模擬。將小型車與大型車的車種比例設定為 9:1，符合大部分高速公路路段的車種比例。

4.2 參數設定

車流模擬模式參數設定上，符合台灣高速公路速限設定小型車的最大速度為 31cells/sec(110 公里/小時)、大型車的最大速度為 25cells/sec(90 公里/小時)。小型車的加速度為 3cells/sec²(3 公尺/秒²)，車長為 6 公尺。大型車的加速度為 2cells/sec²(2 公尺/秒²)，車長為 12 公尺。小型車的 t_c 和 h 設定為 6，大型車為 8。模式的 P_b 為 0.94、 P_0 為 0.5、 P_d 為 0.1、 P_c 為 0.4， gap_{safety} 設定為 10。

車流型態判斷模式設定上，從模擬時間第五分鐘開始，蒐集前五分鐘內每分鐘的速度、流量、速度變化率、流量變化率與速度變化率/流量變化率進行車流型態判斷，車流型態判斷更新周期為一分鐘。

匝道儀控模式設定上，ANCONA 模式根據 Kerner *et al.*(2005) 設定方式， q_{on1} 為 360 輛/小時、 q_{on2} 為 600 輛/小時， v_{cong} 為 85 公里/小時，偵測器位置佈設於上匝道上游 200 公尺處。獨立型與整合型 FLRC 模式，偵測器位置則佈設於上匝道下游 100 公尺處。此外，除了定時儀控模式儀控率為固定外，ANCONA、獨立型與整合型 FLRC 模式儀控率更新週期為一分鐘。

4.3 車流模擬模式驗證

進行車流模擬模式驗證，以系統整體交通參數透過巨觀車流理論的流量-密度關係圖驗證車流模擬模式的真實性，以簡例之流量設計在不實施匝道儀控下進行模擬。圖 4.2 為模式模擬之結果，換算為傳統交通變數的單位如圖 4.3。從圖 4.3 分析結果發現在純小型車模擬下流量最大，約為 2,200 輛/小時/車道，略低於 2000 年公路容量手冊所估算的 2,400 輛/小時/車道。在混合車流模式中(小型車:大型車，80:20)，最大的流量約為 1,500 輛/小時/車道。純大型車模擬下最大流量約為 750 輛/小時/車道，較其他車流組合下來的低，此仍是因為大車的車長較長，因而所能通過的最大流量較低。但從原本車流模擬所計算的流量(cell/秒)來看，因為大車所佔有的網格數是小型車的三倍，因而從相同的衡量單位來看，純大型車模擬下的最大流量高於混合車流與純小型車。

從以上不同車流組合模擬下，可以發現當匝道上不實施任何儀控策略時，主線的流量會持續增加，到達最大流量的飽和點後，隨著密度的增加而造成流量下降，主線車流因而產生擁擠現象。為了避免主線因為匝道車輛持續併入而造成擁擠，如何有效的控制匝道併入主線的流量，使得主線流量盡可能的維持在最大流量，此為本研究後續儀控策略控制

之目標。

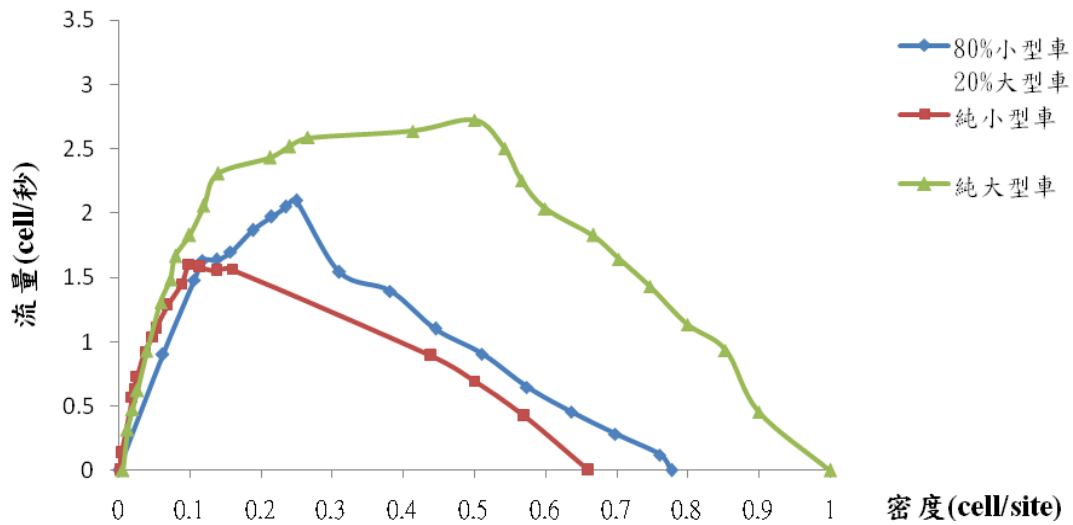


圖 4.2 流量-密度關係圖(cell/秒)

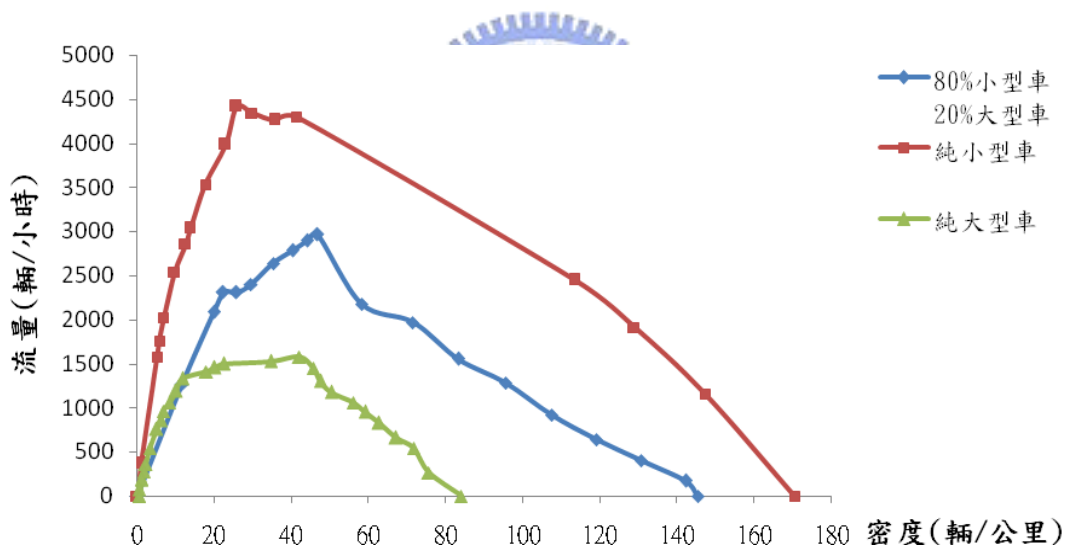


圖 4.3 流量-密度關係圖(輛/小時)

4.4 瓶頸路段車流型態分析

進一步分析匝道併入車流量對主線瓶頸路段上車流型態之影響，以簡例之流量設定在不實施匝道儀控下進行模擬。當兩組匝道間距低於 2 公里，模擬路段較短時，主線車流密度較高，匝道車流併入造成主線瓶頸路段上的擁擠現象向上游傳遞。如圖 4.4 至 4.6 車流速率時空變化圖所示，X 軸為空間、Y 軸為時間、Z 軸為速率，匝道位置位於 X 軸 1000 處，

觀察時間為三十分鐘，速率介於 0 到 110 之間，在不同車流模擬情境下，瓶頸路段上的擁擠現象以不同速度向上游傳遞，以混合車流下傳遞速度最快，車流型態從原本的自由流轉變為同步流，同步流型態向上游傳遞，隨著併入車流增加而產生大範圍擁擠流。

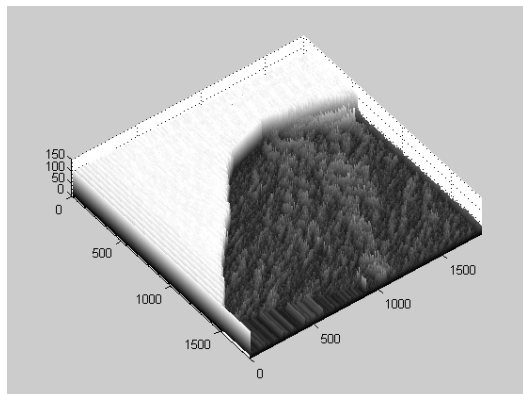


圖 4.4 純小型車車流速率時空變化圖(交流道間距=2km)

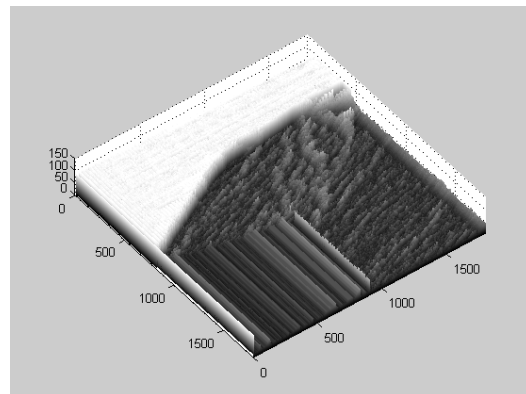


圖 4.5 純大型車車流速率時空變化圖(交流道間距=2km)

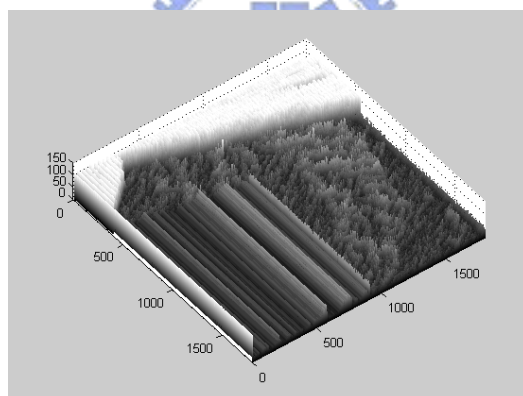


圖 4.6 混合車流瓶頸路段車流型態圖(交流道間距=2km)

然而當兩組匝道間距拉長，模擬路段亦增長後，主線車流密度降低，主線瓶頸路段上車流型態向上游傳遞情形會較為平緩。從圖 4.7 至 4.9 觀察在不同車流組成模擬下，瓶頸路段上車流型態由原本的自由流轉變為同步流，並在一段時間後逐漸向上游傳遞。由此可知，匝道間距和車流密度會影響到瓶頸路段上車流型態傳遞情形，在匝道間距較短，車流密度較高的路段下，瓶頸路段上車流型態傳遞速度較快，傳遞情形較明顯。反觀匝道間距較長，車流密度較低的情境下，瓶頸路段上車流型態傳遞速度較慢，傳遞情形也較平緩，擁擠現象的上游會固定在上匝道處緩慢的向上游傳遞。

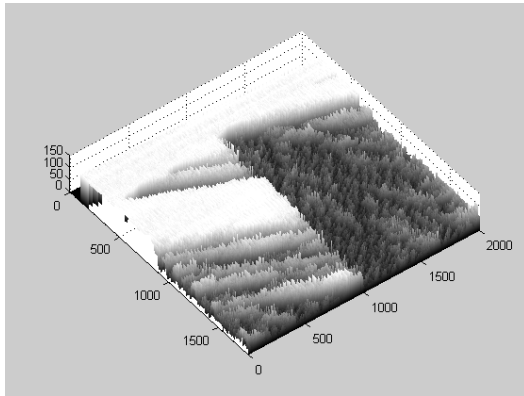


圖 4.7 純小型車車流速率時空變化圖(交流道間距>2km)

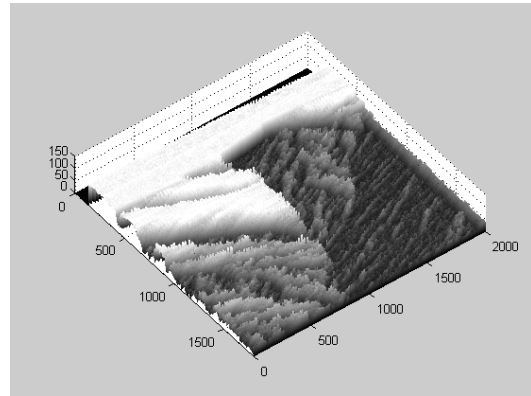


圖 4.8 純大型車車流速率時空變化圖(交流道間距>2km)

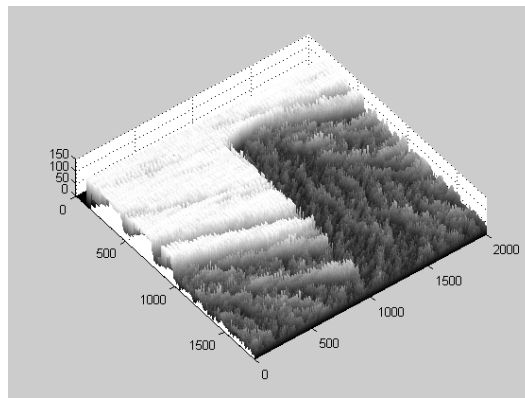


圖 4.9 混合車流速率時空變化圖(交流道間距>2km)

4.5 車流型態驗證

以偵測器上所得之局部的交通參數透過巨觀車流理論的流量-密度關係圖進行車流型態驗證，將模擬所得之車流資料透過移動平均法以流量-密度關係圖作車流型態分析，以流量-密度關係圖分析結果和模糊邏輯控制判斷結果比對以驗證模糊邏輯控制判斷之正確性。車流型態判斷模式從第五分鐘開始，每分鐘進行一次型態判斷。以簡例實施整合型 FLRC 為例，偵測器位置位於第二個上匝道下游 100 公尺處，取車流型態判斷開始後十分鐘結果進行驗證。圖 4.10 為時空軌跡圖，X 軸為模擬時間從模擬開始到第十四分鐘，Y 軸為空間，上匝道位置在 8000；偵測器位置在 8100。過去對車流型態判斷方式多半是從車輛時空軌跡圖上進行主觀認定，缺乏客觀判斷的依據且無法進行線上即時判斷。而圖 4.11 到 4.20 為以巨觀車流理論的流量-密度關係圖分析之車流型態，表 4.1 為以模糊

邏輯控制判斷之結果，及進行判斷時所取得之流量與速率。

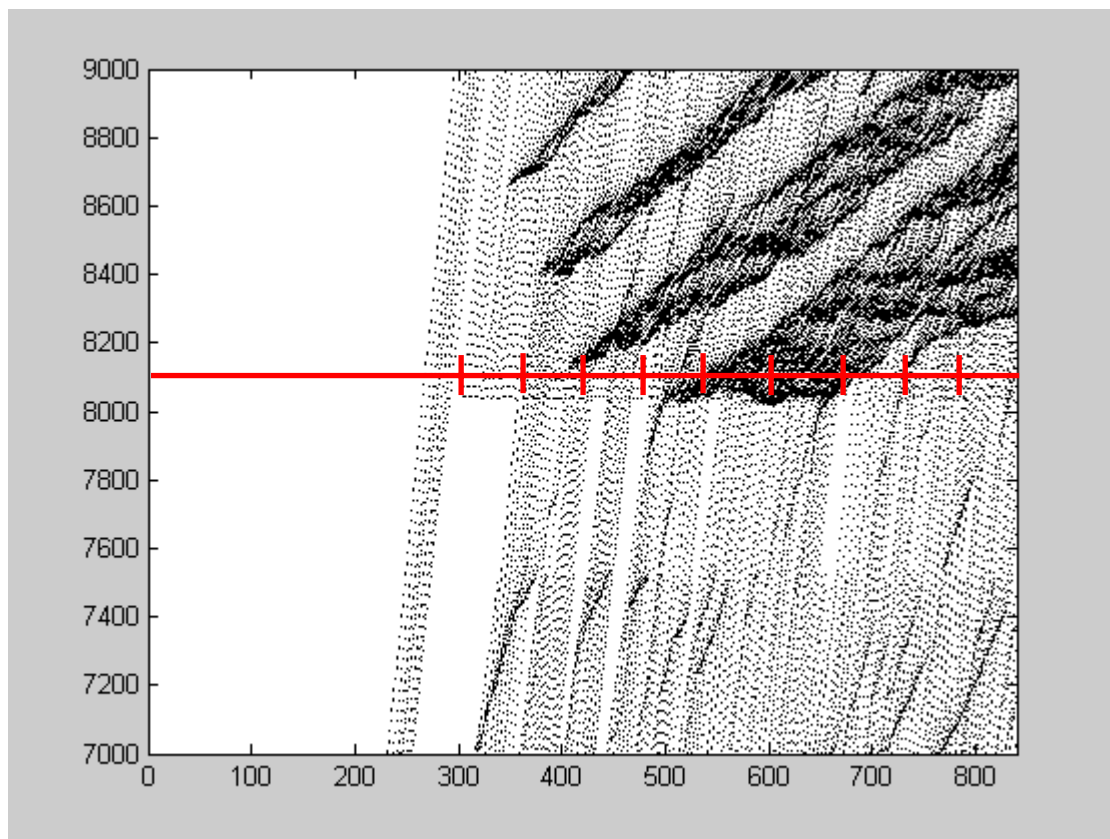


圖 4.10 車流型態驗證時空軌跡圖

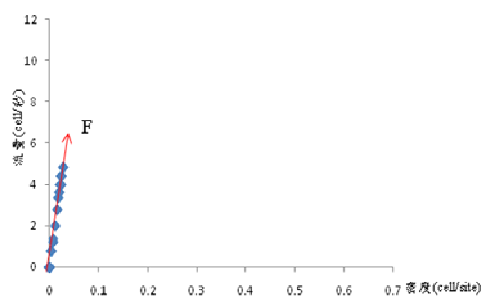


圖 4.11 第五分鐘車流型態分析圖

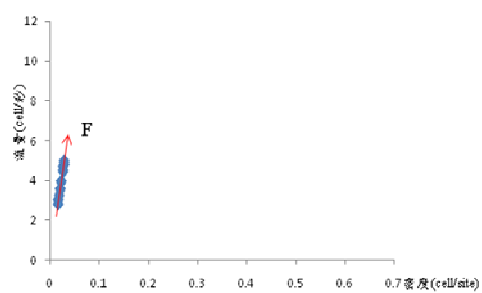


圖 4.12 第六分鐘車流型態分析圖

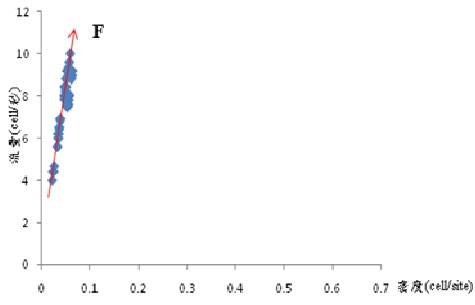


圖 4.13 第七分鐘車流型態分析圖

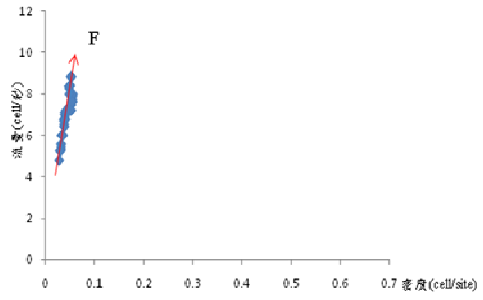


圖 4.14 第八分鐘車流型態分析圖

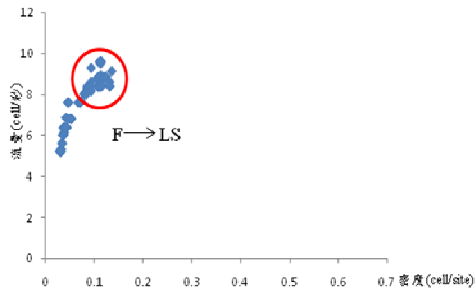


圖 4.15 第九分鐘車流型態分析圖

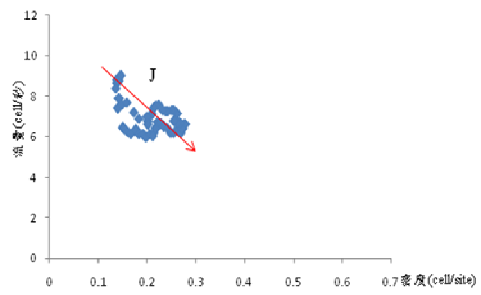


圖 4.16 第十分鐘車流型態分析圖

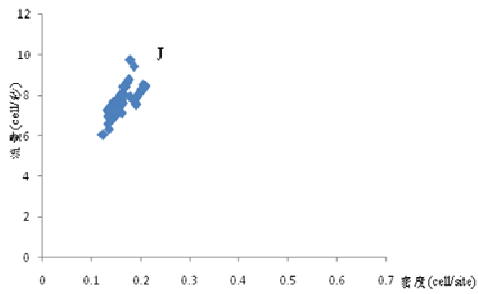


圖 4.17 第十一分鐘車流型態分析圖

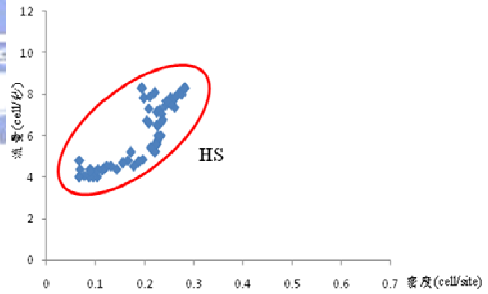


圖 4.18 第十二分鐘車流型態分析圖

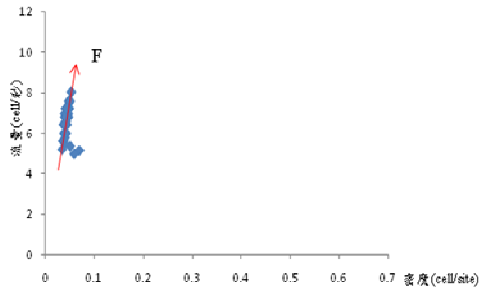


圖 4.19 第十三分鐘車流型態分析圖

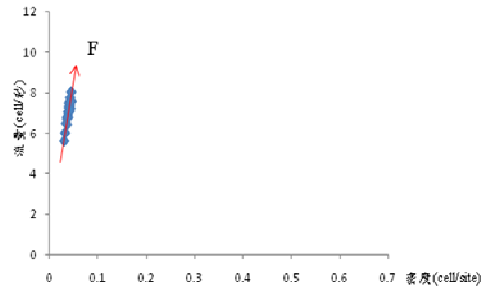


圖 4.20 第十四分鐘車流型態分析圖

表 4.1 車流型態判斷

模擬時間	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
車流型態	F	F	F	F	LS	J	J	HS	F	F
速率 (公里/小時)	105	103	93	100	49	19	27	21	97	102
流量 (pcu/小時/車道)	360	600	1260	960	1200	1020	1200	780	1020	1080

從車輛時空軌跡圖、流量-密度關係圖分析結果和模糊邏輯控制判斷結果來看，大致上車流型態判斷結果均相同，從速率和流量來看也符合對車流型態判斷的先驗知識。觀察總模擬時間內流量-密度關係的轉變情形，如圖 4.21，可以發現車流資料分佈情形符合三相車流理論對車流型態的定義，也顯示出車流模擬結果的真實性。

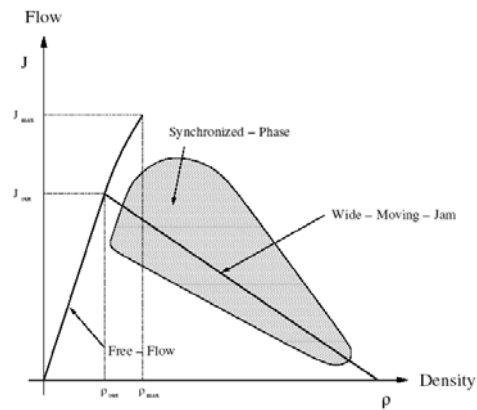
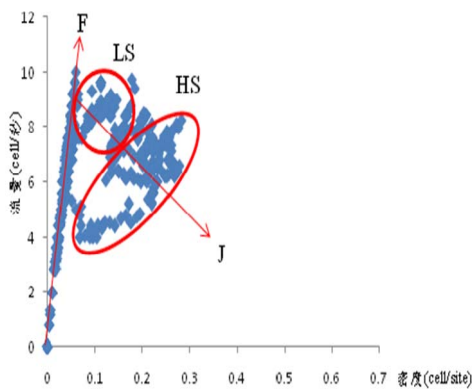


圖 4.21 三相車流理論流量-密度關係圖

4.6 績效評比

此節說明簡例路段各匝道於兩個小時控制後，比較匝道不實施儀控、定時儀控、獨立型與整合型 FLRC 模式、ANCONA 之控制績效。

1、不實施儀控

當匝道未進行任何管制時，即鄰近聯絡道路車輛可自由進入高速公路，而無號誌控制進入車流量，於兩個小時內，所有用路人總花費之時間為 4657.8 小時。

2、定時儀控

根據目前高速公路入口匝道儀控系統時制計畫表，嘗試在各種不同儀控率實行下總旅行時間最低之組合，各匝道在兩個小時模擬時間內儀控率最佳組合為三個匝道儀控率均 900pcu/小時。在此儀控率最佳組合下，於兩個小時之實施結果顯示總旅行時間為 4599.9 小時。

3、ANCONA

此種儀控策略係參考 Kerner *et al.*(2005)所提出以瓶頸路段上車速推估匝道儀控率，於兩個小時之實施結果顯示總旅行時間為 4597.2 小時。

4、獨立型 FLRC 模式

此種儀控策略係採模糊邏輯控制依據主線車流型態及匝道等候車輛數推估匝道儀控率，於兩個小時之實施結果顯示總旅行時間為 4551.2 小時。

5、整合型 FLRC 模式

此種儀控策略係採模糊邏輯控制依據主線車流型態、匝道等候車輛數，並為兼顧整體路網之服務效益加入上游匝道儀控率推估匝道儀控率，於兩個小時之實施結果顯示總旅行時間為 4547.5 小時。

表 4.2 簡例儀控績效比較表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	4657.8	—
定時儀控	4599.9	1.24
ANCONA	4597.2	1.30
獨立型 FLRC	4551.2	2.29
整合型 FLRC	4547.5	2.37

此外，圖 4.22 到 4.26 為在五種不同控制策略下，第二組交流道上匝道處上、下游 1 公里內的時空速率變化圖。圖形上 X 軸代表空間，上匝道位置在圖上 1000 處；Y 軸代表時間，觀測時間為開始實施匝道儀控後十五分鐘到四十五分鐘間；Z 軸代表速率，從 0 到最大速限 110 之間。比較五種控制策略下對瓶頸路段上車流型態的影響，可以看到不實施儀控下，匝道上車輛大量的擁入主線，因此造成主線下游產生嚴重的大範圍擁擠流，但並未向上游傳遞。相反的實施 ANCONA 模式時，減少了匝道車輛併入主線的流量，因而主線下游車流型態仍然維持在自由流與輕微同步流之間，但卻增加了匝道車輛的延滯時間。介於此兩種現象之間的整合型 FLRC、獨立型 FLRC 和定時儀控下，在瓶頸路段上車流型態轉變介於輕微同步流與強烈同步流之間，其中以整合型 FLRC 下游車速較高。

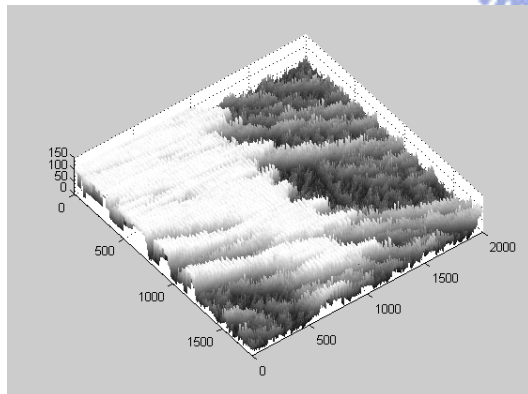


圖 4.22 整合型 FLRC 車流速率時空變化圖

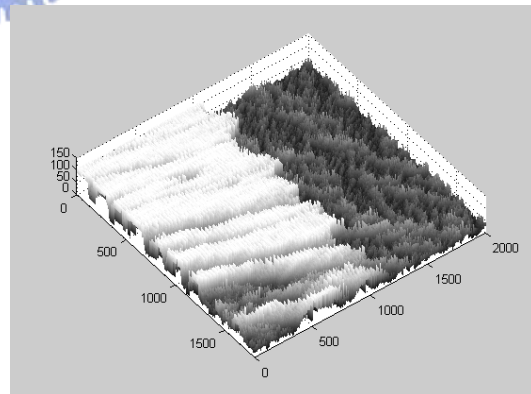


圖 4.23 獨立型 FLRC 車流速率時空變化圖

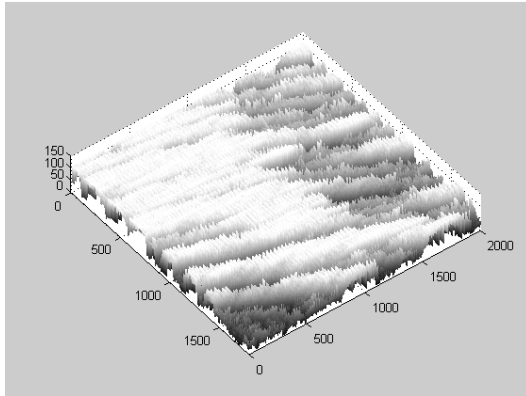


圖 4.24 ANCONA 車流速率時空變化圖

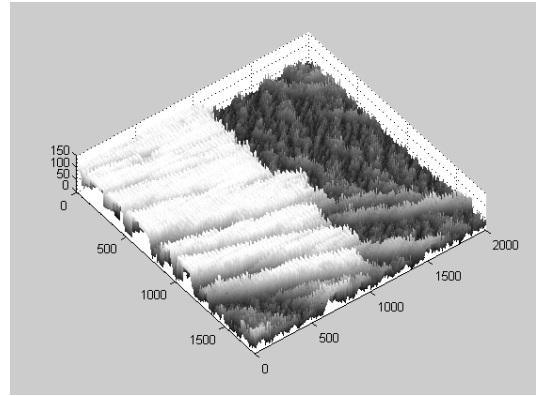


圖 4.25 定時儀控車流速率時空變化圖

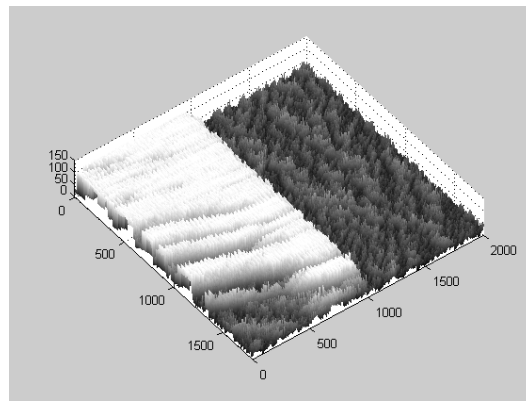


圖 4.26 不實施儀控車流速率時空變化圖

4.7 情境分析

本研究於簡例驗證部份依流量變化設計三種不同情境，以匝道不實施儀控作為績效評估基準，比較分析於不同交通量下各匝道儀控模式之控制績效。

以 4.1 節簡例之到達率與離開率設計為情境二，依據情境二之到達率調整流量產生情境一及情境三。情境一為主線到達率 15 輛/分鐘，上匝道到達率亦為 15 輛/分鐘，下匝道離開率為 4 輛/分鐘。情境三為主線到達率 30 輛/分鐘，上匝道到達率亦為 30 輛/分鐘，下匝道離開率為 4 輛/分鐘。本研究所構建之匝道儀控模式即在此三種模擬情境下評估各模式之控制績效並做比較。

1、情境一：

- (1) 匝道不實施儀控時，模擬兩小時之總旅行時間為 3253.0 小時。
- (2) 匝道採定時儀控時，模擬兩小時之總旅行時間為 3240.9 小時，儀控率最佳組合為三個匝道儀控率均為 900pcu/小時。
- (3) 匝道實施 ANCONA 時，模擬兩小時之總旅行時間為 3224.3 小時。
- (4) 獨立型 FLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 3203.2 小時。
- (5) 整合型 FLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 3182.8 小時。

表 4.3 情境一儀控績效比較表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	3253.0	—
定時儀控	3240.9	0.37
ANCONA	3224.3	0.88
獨立型 FLRC	3203.2	1.53
整合型 FLRC	3182.8	2.16

2、情境二：

- (1) 匝道不實施儀控時，模擬兩小時之總旅行時間為 4657.8 小時。
- (2) 匝道採定時儀控時，模擬兩小時之總旅行時間為 4599.9 小時。
- (3) 匝道實施 ANCONA 時，模擬兩小時之總旅行時間為 4597.2 小時。
- (4) 獨立型 FLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 4551.2 小時。
- (5) 整合型 FLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 4547.5 小時。

表 4.4 情境二儀控績效比較表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	4657.8	—
定時儀控	4599.9	1.24
ANCONA	4597.2	1.30
獨立型 FLRC	4551.2	2.29
整合型 FLRC	4547.5	2.37

3、情境三：

- (1) 匝道不實施儀控時，模擬兩小時之總旅行時間為 6003.7 小時。
- (2) 匝道採定時儀控時，模擬兩小時之總旅行時間為 5711.1 小時，儀控率最佳組合三個匝道儀控率均為 900pcu/小時。
- (3) 匝道實施 ANCONA 時，模擬兩小時之總旅行時間 5667.4 為小時。
- (4) 獨立型 FLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 5615.9 小時。
- (5) 整合型 FLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 5603.8 小時。

表 4.5 情境三儀控績效比較表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	6003.7	—
定時儀控	5711.1	4.87
ANCONA	5667.4	5.60
獨立型 FLRC	5615.9	6.46
整合型 FLRC	5603.8	6.66

以下茲就上述各情境下儀控績效彙整如表 4.6 所示。

表 4.6 情境分析儀控績效彙整表

情境	交通量	儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
一	低	不實施儀控	3253.0	—
		定時儀控	3240.9	0.37
		ANCONA	3224.3	0.88
		獨立型 FLRC	3203.2	1.53
		整合型 FLRC	3182.8	2.16

表 4.6 情境分析儀控績效彙整表(續)

情境	交通量	儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
二	中	不實施儀控	4657.8	—
		定時儀控	4599.9	1.24
		ANCONA	4597.2	1.30
		獨立型 FLRC	4551.2	2.29
		整合型 FLRC	4547.5	2.37
三	高	不實施儀控	6003.7	—
		定時儀控	5711.1	4.87
		ANCONA	5667.4	5.60
		獨立型 FLRC	5615.9	6.46
		整合型 FLRC	5603.8	6.66

比較各種情境下之控制績效分析，可得到以下幾點結果：

- 1、比較定時儀控與 ANCONA 對總旅行時間之改善程度，可以發現此兩種控制策略在三種情境設計下改善程度差異不大，因為 ANCONA 模式對儀控率的設定只有兩種水準，因此在最佳定時儀控率控制下，ANCONA 與定時儀控之控制績效差異不大，不具有實行 ANCONA 模式的意義。
- 2、由表 4.12 比較獨立型與整合型 FLRC 模式可知，此兩種模式在總旅行時間上改善程度雖然差異不大，但在三種情境下整合型 FLRC 控制績效均優於獨立型 FLRC。
- 3、由表 4.12 可知，以不實施匝道儀控作為基準，整合型 FLRC 在各種情境設計下儀控績效最佳，其次為獨立型 FLRC、ANCONA、定時儀控。由情境三顯示，整合型 FLRC 模式之改善程度為 6.66%、獨立型 FLRC 為 6.46%、ANCONA 為 5.60%、定時儀控為 4.87%。
- 4、流量設定較低時，整合型 FLRC 對於總旅行時間之改善程度為 2.16%，流量設定為中等流量時為 2.37%，而流量設定為高流量時之改善程度 6.66%，由此可知，當高速公路車流量越大時，整合型 FLRC 之控制績效顯示越佳。

第五章 實例應用

本研究為了進一步探討模糊邏輯匝道儀控模式於高速公路實際道路之實用性，實例應用部份係以國道一號中區路段為例，如圖 5.1 所示。本研究欲控制之匝道為台中至豐原 3 組上、下匝道，分別為台中、大雅和豐原，從南屯至台中系統間主線為單向三線道；上匝道為單線道。由南往北單方向行車，起點南屯至迄點台中系統交流道，其中包括 4 個子路段，由南至北各子路段長度分別為 2.8、4.4、6.1、2.6 公里，控制路段總長度為 15.9 公里。

資料收集方面係以中區交通控制中心所彙集車流資料為主，資料當中包括每一分鐘主線各子路段及各上、下匝道併入、匯出車流量，而本研究係以 2007 年 11 月 14 日，星期三下午 5 點至 7 點兩個小時之第二、三車道流量資料，進行匝道儀控並計算其控制後之總旅行時間，評估本模式之改善績效，模擬時間內各路段到達、離開率設定如表 5.1 所示。其中主線第二車道之車種組成，小型車:大型車為 1:14；第三車道之車種組成，小型車:大型車為 2:1；上匝道車種比例，小型車:大型車為 0.95:0.05。

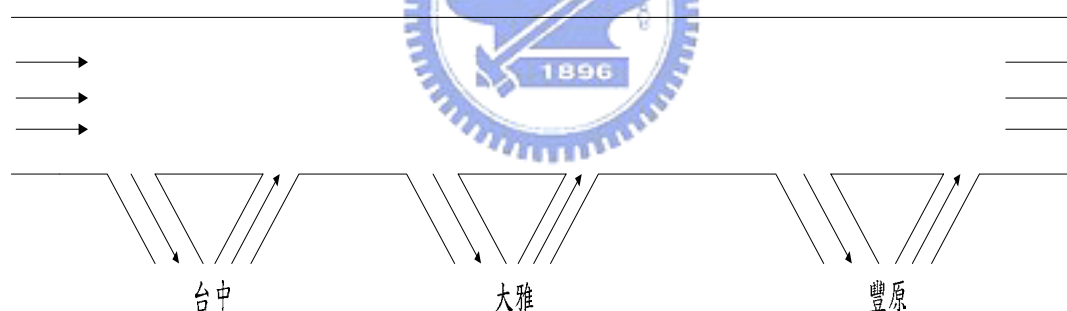


圖 5.1 實例路段示意圖

表 5.1 實例流量表

	路段						
	主線	台中交流道		大雅交流道		豐原交流道	
		下匝道	上匝道	下匝道	上匝道	下匝道	上匝道
到達率/ 離開率	30 輛/ 分鐘	19 輛/ 分鐘	27 輛/ 分鐘	1 輛/ 分鐘	14 輛/ 分鐘	8 輛/ 分鐘	13 輛/ 分鐘

5.1 參數設定

車流模擬模式參數設定上，符合台灣高速公路速限設定小型車的最大速度為 31cells/sec(110 公里/小時)、大型車的最大速度為 25cells/sec(90 公里/小時)。小型車的加速度為 3cells/sec²(3 公尺/秒²)，車長為 6 公尺。大型車的加速度為 2cells/sec²(2 公尺/秒²)，車長為 12 公尺。小型車的 t_c 和 h 設定為 6，大型車為 8。模式的 P_b 為 0.94、 P_0 為 0.5、 P_d 為 0.1、 P_c 為 0.4， gap_{safety} 設定為 10。

車流型態判斷模式設定上，從模擬時間第五分鐘開始，蒐集前五分鐘內每分鐘的速度、流量、速度變化率、流量變化率與速度變化率/流量變化率進行車流型態判斷，車流型態判斷更新周期為一分鐘。

匝道儀控模式設定上，實施定時匝道儀控策略之儀控率乃依據高速公路中區交控中心所提供之時制計畫表，嘗試在不同儀控率組合下所挑選出績效最佳之儀控率組合，最佳儀控率組合為台中交流道為1400pcu/小時；大雅和豐原交流道均為900pcu/小時。ANCONA模式根據Kerner *et al.*(2005)設定方式， q_{on1} 為360輛/小時、 q_{on2} 為600輛/小時， v_{cong} 為85公里/小時，偵測器位置佈設於上匝道上游200公尺處。獨立型與整合型FLRC模式，偵測器位置則佈設於上匝道下游100公尺處。此外，除了定時儀控模式儀控率為固定外，ANCONA、獨立型與整合型FLRC模式儀控率更新週期為一分鐘。

5.2 控制績效評比分析

本模式在真實高速公路路段之控制部份，於兩個小時模擬後，其結果茲列舉如下：

- 1、 匝道不實施儀控時，總旅行時間為 3094.9 小時。
- 2、 匝道採定時儀控時，總旅行時間為 2988.4 小時。
- 3、 匝道採 ANCONA 時，總旅行時間為 2902.4 小時。
- 4、 匝道採獨立型 FLRC 模式時，總旅行時間為 2880.7 小時。
- 5、 匝道採整合型 FLRC 模式時，總旅行時間為 2848.4 小時。

由上述之控制結果顯示 ANCONA、定時儀控、獨立型 FLRC 及整合型 FLRC 等儀控模式得確能夠減少用使用者的總旅行時間，提高系統服務容量，其中又以實施整合型 FLRC 模式之效果最佳。各種控制策略下總旅行時間的比較，在不實施儀控為基準下改善程度如表 5.2 所示。

表 5.2 總旅行時間彙整表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	3094.9	—
定時儀控	2988.4	3.44
ANCONA	2902.4	6.22
獨立型 FLRC	2880.7	6.92
整合型 FLRC	2848.4	7.96

此外，圖 5.2 到 5.6 為在五種不同控制策略下，大雅交流道上匝道處上、下游 1 公里內的時空速率變化圖。圖形上 X 軸代表空間，上匝道位置在圖上 1000 處；Y 軸代表時間，觀測時間為開始實施匝道儀控後十五分鐘到四十五分鐘間；Z 軸代表速率，從 0 到最大速限 110 之間。比較五種控制策略下對瓶頸路段上車流型態的影響，可以看到不實施儀控下，匝道上車輛大量的擁入主線，因此造成主線下游產生大範圍擁擠流，並向上游傳遞。相反的實施 ANCONA 模式時，減少了匝道車輛併入主線的流量，因而主線下游車流型態仍然維持在自由流與輕微同步流之間，但卻增加了匝道車輛的延滯時間。介於此兩種現象之間的整合型 FLRC、獨立型 FLRC 和定時儀控下，在瓶頸路段上車流型態轉變介於輕微同步流與強烈同步流之間，甚至可達到自由流車流型態，且獨立型與整合型 FLRC 視主線瓶頸路段上車流型態等因素作儀控率調整，因此下游擁擠現象並未向上游傳遞；反觀定時儀控下隨著時間下游擁擠現象有向上游傳遞的現象。

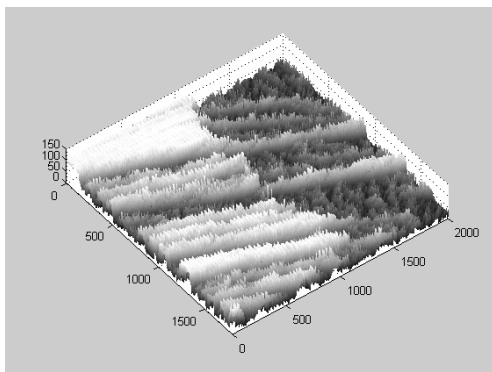


圖 5.2 整合型 FLRC 車流速率時空變化圖

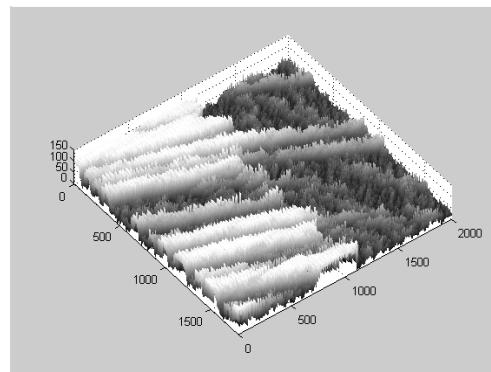


圖 5.3 獨立型 FLRC 車流速率時空變化圖

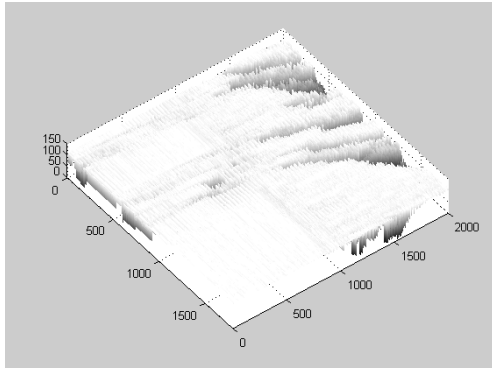


圖 5.4 ANCONA 車流速率時空變化圖

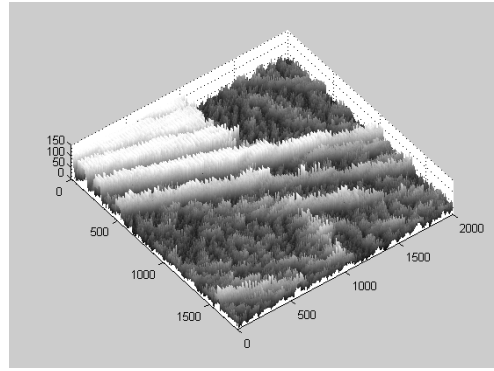


圖 5.5 定時儀控車流速率時空變化圖

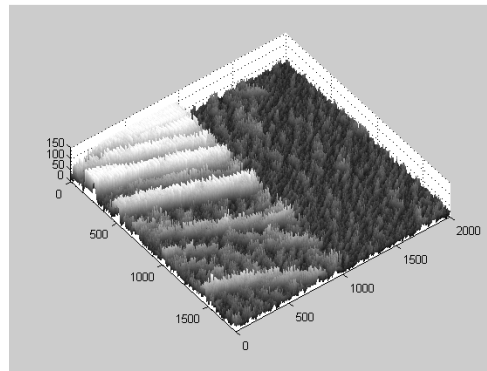


圖 5.6 不實施儀控車流速率時空變化圖

5.3 小結

比較各種儀控模式於實例應用下之控制績效分析，可得到以下幾點結論：

- 1、根據表 5.1 結果顯示，定時儀控、ANCONA、獨立型 FLRC、整合型 FLRC 之改善程度分別為 3.44%、6.22%、6.92%、7.96%，顯示本研究之儀控模式的確能夠改善總旅行時間，且以整合型 FLRC 之控制績效為最佳。
- 2、由表 5.1 比較各儀控策略下，總旅行時間改善程度，ANCONA 和獨立型 FLRC 差異不大，整合型 FLRC 明顯優於 ANCONA 和獨立型 FLRC，且 ANCONA、獨立型與整合型 FLRC 又明顯優於定時儀控，由此可見在不等長的匝道間距下，整合型 FLRC 較獨立型 FLRC 具有較佳的控制績效。
- 3、從圖 5.2 觀察五種匝道儀控策略對主線瓶頸路段上車流型態的影響，結果顯示在考慮主線車流順暢與匝道延滯下，獨立型 FLRC 與整合型

FLRC 儀控績效較佳，在此兩種儀控模式下，瓶頸路段上車流型態大都能維持在同步流的車流型態。



第六章 結論與建議

本研究旨在應用細胞自動機模擬包含上下匝道之高速公路瓶頸路段上車流型態時空關係轉變，以模糊邏輯控制判斷車流型態，根據判斷所得主線車流型態及模擬之匝道等候車輛數兩個狀態變數，推估匝道每分鐘之儀控率，模擬實行適應性匝道儀控策略下主線旅行時間及匝道等候延滯時間，加總之總旅行時間作為績效指標。依據本研究之研究成果，得到以下幾點結論及建議。

6.1 結論

- 1、過去的匝道儀控策略在求解儀控率過程中，常需面臨求解非線性或線性方程式之問題，非線性模式雖能精確描述問題，但求解不易且所需時間相當長，此外因為交通參數取得的干擾而造成儀控率的誤斷，因此本研究擬以模糊邏輯控制建構匝道儀控模式。此外過去的匝道儀控策略多以偵測交通參數作為匝道儀控之判斷，未考慮主線車流型態之轉變。本研究利用細胞自動機之特性分析車流型態之轉變，進而建立車流型態判斷之模式，以車流型態作為匝道儀控中主線車流狀況衡量的主要依據。
- 2、本模式所研擬之匝道儀控模式可分為兩種形式，一為獨立型匝道儀控模式，與整合型匝道儀控模式。獨立型模式主要係以主線車流型態及匝道等候車輛數，直接決定單一匝道之儀控率，與其他匝道並無互動性；而整合型模式即在獨立型模式基礎下，增加上游匝道儀控率用以推估匝道儀控率，與獨立型模式之差異在於僅非以個別匝道為考慮對象，而同時兼顧上、下游匝道以推估儀控率，由於現階段之高速公路多兼具都會區內交通之功能，於都會區內之匝道數量多且密集，故以整體之觀點做考慮，有助於提升整體路網之服務效益。
- 3、本研究利用細胞自動機建構模擬二車道高速公路路段之車流模擬模式，與模糊邏輯控制建構車流型態判斷模式，以巨觀車流理論驗證車流模擬模式與車流型態判斷模式，從流量-密度關係圖分析結果，顯示車流模擬模式之真實性與車流型態判斷模式之正確性。
- 4、本研究依流量低、中、高設計三種不同情境，定時儀控之改善程度為 0.37%~4.87%、ANCONA 為 0.88%~5.60%、獨立型 FLRC 為 1.53%~6.46%、整合型 FLRC 為 2.16%~6.66%，整體而言，顯示匝道儀控有益於改善用路人之總旅行時間，又以本研究所研擬之獨立型和整合型模式較佳，當主線交通量越高時，總旅行時間之改善程度越佳。
- 5、於實例應用部份，結果顯示定時儀控之總旅行時間改善程度為

3.44%、ANCONA 為 6.22%、獨立型 FLRC 為 6.92%、整合型 FLRC 為 7.96%，說明了本模式於真實高速公路應用方面，對於用路人之總旅行時間亦可獲得改善。

- 6、無論在簡例或實例中，五種匝道儀控策略對主線瓶頸路段上車流型態的影響，結果顯示在考慮主線車流順暢與匝道延滯時間下，獨立型 FLRC 與整合型 FLRC 儀控績效較佳，且在此兩種儀控模式下，瓶頸路段上車流型態大都能維持在同步流的車流型態，保持主線瓶頸路段上車流之順暢。

6.2 貢獻

- 1、本研究所建構之車流模擬模式乃針對二車道高速公路之異質混合車流模擬模式，過去以細胞自動機模擬高速公路路段之研究僅止於同質混合車流模擬，且僅探討單一匝道之影響或無實行儀控策略。
- 2、本研究所建構之車流型態判斷模式可針對四種車流型態進行判斷，包含自由流、輕微同步流、強烈同步流與大範圍擁擠流。過去雖然有學者以同樣方法進行車流型態判斷，但僅止於三種車流型態之判斷。
- 3、過去無論是線性、非線性或適應性匝道儀控策略，在狀態變數選取上係以局部性或整體性交通參數進行儀控率之推估，未曾有使用車流型態為狀態變數之儀控策略，主要原因係車流型態無法進行即時性判斷。本研究以車流型態判斷結果，即能取代局部性或整體性交通參數作為匝道儀控主要狀態變數。
- 4、本研究整合細胞自動機與模糊邏輯控制，可藉由模糊邏輯控制達到適應性匝道儀控功能，亦可利用細胞自動機之特性模擬匝道儀控下車流型態之時空特性。

6.3 建議

- 1、本研究所建構之車流模擬模式僅適用於二車道高速公路路段，後續研究可將變換車道規則延伸，建構三車道或多車道高速公路路段之車流模擬模式。
- 2、在車流模擬模式中匝道併入規則之研擬，後續研究可嘗試以不同的駕駛行為規則建構車輛併入規則；此外，在參數設定上，也可以不同的參數值進行模擬，藉以觀察不同駕駛行為下的車流變化。
- 3、本研究所構建之整合型 FLRC 模式係以上游匝道之儀控率作為第三個狀態變數來進行各匝道儀控率推估，建議後續研究可加入其它相關變數進行模式構建，以考量匝道間相互關聯性，期使控制結果更佳。

例如，上游匝道車流型態、下游匝道儀控率等。

- 4、本研究所提之模糊邏輯匝道儀控模式，對於狀態變數與控制變數之隸屬函數參數和邏輯規則設定係以主觀方式設定之，並非模式最佳化之結果，日後研究可採人工智慧方式校估參數與邏輯規則設定。



參考文獻

1. 細胞自動機文獻

- 【1】 Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y., 1995, “Dynamic model of traffic congestion and numerical simulation,” *Physical Review E* 51, pp.1035-1042.
- 【2】 Barlovic, R., Santen, L., Schadschneider, A. and Schreckenberg, M., 1998, “Metastable states in cellular automata for traffic flow,” *The European Physica Journal B*, 5, pp.793-800.
- 【3】 Brilon, W., Huber, F., Schreckenberg, M., and Wallentowitz, H., 1998, *Traffic and Mobility*, Springer Berlin.
- 【4】 Jia, B., Jiang, R. and Wu, Q. S., 2005, “The effects of accelerating lane in the on-ramp system,” *Physica A*, 345, pp.218-226.
- 【5】 Jiang, R., Wu, Q. S. and Wang, B. H., 2002, “Cellular automata model simulating traffic interactions between on-ramp and main road,” *Physical Review E* 66, 036104.
- 【6】 Jiang, R. and Wu, Q. S., 2003, “Cellular automata models for synchronized traffic flow,” *J. Phys A: Math. Gen.*, 36, pp.381-390.
- 【7】 Jiang, R. and Wu, Q. S., 2006, “Phase transition at an on-ramp in the Nagel-Schreckenberg traffic flow model,” *Physica A*, 366, pp.523-529.
- 【8】 Kerner, B. S. and Klenov, S. L., 2002, “A microscopic model for phase transition in traffic flow,” *Journal of Physics A: Math. Gen.*, 35, L31-L43.
- 【9】 Kerner, B. S. and Klenov, S. L., 2003, “Microscopic theory of spatial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks,” *Physica Review E*, 68, 036130.
- 【10】 Kerner, B. S., Rehborn, H., Aleksic, M. and Haug, A., 2004, “Recognition and tracking of spatial – temporal congested traffic patterns on freeways,” *Transpn Res.-C*, Vol.12, pp.369-400.
- 【11】 Kerner, B. S., 2005, “Control of spatiotemporal congested traffic

patterns at highway bottleneck,” *Physica A*, 355, pp.565-601.

- 【12】 Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A. and Schreckenberg M., 1999, “Disorder effects in cellular automata for two-lane traffic,” *Physica A*, 265, pp.614-633.
- 【13】 Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A. and Schreckenberg, M., 2000, “Towards a realistic microscopic description of highway traffic,” *J. Phys. A:Math. Gen.*, 33, L477-L485.
- 【14】 Knospe, W. Santen, L. Schadschneider, A. and Schreckenberg, M., 2004, “Empirical test for cellular automaton models of traffic flow,” *Physical Review E*, 70, 016115.
- 【15】 Lan, L. W. and Hsu, C. C., 2005, “Using cellular automata to explore spatiotemporal traffic patterns,” Proceedings, 10th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, pp.210-219.
- 【16】 Lan, L. W. and Hsu, C. C., 2006, “Formation of spatiotemporal traffic patterns with cellular automaton simulation,” *Transportation Research Board*, 85th Annual Meeting, Washington, DC, in CD-ROM.
- 【17】 Li, F., Gao, Z. Y. and Jia, B., 2007, “Traffic behavior in the on-ramp system with signal controlling,” *Physica A*, Vol. 385, Issue 1, 1, pp.333-342.
- 【18】 Nagel, K. and Schreckenberg, M., 1992, “A cellular automaton model for freeway traffic,” *J. Phy. I France* 2, pp.2221-2229.
- 【19】 Neubert, L., Santen, L., Schadschneider, A. and Schreckenberg, M., 1999, “Single-vehicle data of highway traffic : A statistical analysis,” *Physical Review E*, Vol.60, No.6, pp.6480-6490.
- 【20】 Pederson, M. M. and Ruhoff, P. T., 2002, “Entry ramps in the Nagel-Schreckenberg model,” *Physical Review E*, 65, 056705.
- 【21】 Pottmeier, A., Barlovic, R., Knospe, W., Schaschneider, A. and Schreckenberg, M., 2002, “Localized defects in a cellular automaton model for traffic flow with phase separation,” *Physica A*, Vol.308, Issue 1-4, pp.471-482.
- 【22】 Rickert, M., Nagel, K., Schreckenberg, M. and Latour, A., 1996 , “A

Two lane traffic simulations using cellular automata,” *Physica A*, 231, pp.534-550.

- 【23】 Wang, R., Jiang, R., Wu, Q. S. and Liu, M., 2007, “Synchronized flow and phase separations in single-lane mixed traffic flow,” *Physica A*, 378, pp.475–484.
- 【24】 Wolfram S., 1983, “Statistical mechanics of cellular automata.” *Rev. Mod. Phys.*, 55, pp.601-644.

2. 匝道儀控文獻

- 【1】 Bogenberger, K., El-Araby, K. and Keller, H., 2000, “Design of a genetic fuzzy approach for ramp metering,” *IEEE Intelligent Transportation System Conference Proceedings*, pp.470-475.
- 【2】 Bogenberger, K. and Keller H., 2001, “An evolutionary fuzzy system for coordinated and traffic responsive ramp metering,” *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- 【3】 Chen, L., May, A. and Auslander, D., 1990, “Freeway ramp control using fuzzy set theory for inexact reasoning,” *Transpn Res.-A*, Vol.24A, No.1, pp.15-25.
- 【4】 Chiou, Y.C. and Y.C. Wang, 2005, “Development of genetic fuzzy logic controller-based ramp metering strategies,” *presented at the 10th International Conference for Hong Kong Society of Transportation Studies*, Hong Kong, Dec.10~12.
- 【5】 Davis, L. C., 2006, “Controlling traffic flow near the transition to the synchronous flow phase ,” *Physica A*, 368, pp.541–550
- 【6】 Gomes, G. and Horowitz, R., 2006, “Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model,” *Transpn Res.-C*, 14, pp.244-262.
- 【7】 Huang, D. W., 2002, “Highway on-ramp control,” *Physical Review E*, Vol. 65, 046103.
- 【8】 Kerner, B. S., 2005, “Control of spatiotemporal congested traffic patterns at highway bottlenecks,” *Physica A* , 355, pp.565–601
- 【9】 Lee, S., Teng, Y. and Wang, W., 2000, “Highway ramp control via

fuzzy logic,” *The Ninth IEEE International Conference on*, Vol.1, pp.274-278.

- 【10】 Okushima, M., Takihi, Y. and Akiyama, T., 2003, “Fuzzy traffic controller in ramp metering of urban expressway,” *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.7, No.2, pp.207-214.
- 【11】 Papageorgiou, M. and Kotsialos, A., 2002, “Freeway ramp metering : An overview,” *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, Vol.3, No.4, pp.271-281.
- 【12】 Sasaki, T. and Akiyama, T., 1988, “Traffic control process of expressway by fuzzy logic,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.26, pp.165-178.
- 【13】 Taylor, C., Meldre, D. and Jacobson, L., 1998, “Fuzzy ramp metering design overview and simulation results,” *Transportation Research Record 1634*, pp.10-18.
- 【14】 Tong, R. M., 1984, “A retrospective view of fuzzy control systems,” *Fuzzy Sets and Systems*, 14, pp.199-210.
- 【15】 Wei, C. H., 2001, “Analysis of artificial neural network models for highway ramp metering control,” *Artificial Intelligence in Engineering*, 15, pp.241-252.
- 【16】 Wu, J., McDonald M. and Chatterjee K., 2007, “A detailed evaluation of ramp metering impacts on driving behavior,” *Transpon Res.-F*, 10, pp.61-75.
- 【17】 Wattleworth, J. A. and Berry, D. S., 1965, “Peak-period control of a freeway system - some theoretical investigations,” *Highway Res. Rec.* 89, 1-25.
- 【18】 Zhang, H. and Ritchie, S., 1997, “Freeway ramp metering using artificial neural networks,” *Transpn Res.-C*, Vol.5, No.5, pp.273-286.