

逢甲大學
交通工程與管理學系碩士班
碩士論文

應用基因模糊邏輯建構適應性匝道儀控系統

A Genetic Fuzzy Logic Controller-based
Adaptive Ramp Metering System

指導教授:邱裕鈞

研 究 生:王雲慶

中 華 民 國 九 十 四 年 七 月

誌 謝

緊湊的研究所生涯隨著論文的完成將告一個段落，細細回顧過去的日子，點滴在心頭。本論文得以順利完成，首先由衷感謝 邱裕鈞教授的悉心指導，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。

論文口試期間，承蒙交通大學 馮正民教授及成功大學 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。感謝論文撰寫期間，系上 劉霈教授與 林大傑教授提供許多寶貴的意見，讓我能夠逐步地完成這本論文。此外，非常感謝系上其他老師與三位助教在課業上與生活上的教導、幫助及照顧，也謝謝周助教在學生平時生活上及每當事情處理上遇到瓶頸時，細心的為我解惑、幫助我。

兩年的研究過程中，同門奮鬥打拼的曜彰、宇軒與彥斐，謝謝你們在這段日子陪伴我一起研究、相互幫忙與打氣，尤其彥斐在我論文修改期間心情低落的時候，陪我小酌、聊天一起度過，謝謝你，我會永遠珍惜這段我們曾一起生活、一起努力過的歲月。另外感謝好友銘嘉以及世章學長在我撰寫程式這段期間遇到瓶頸時為我解惑，同窗好友炯男、光鎧於論文觀念的啟發及處理事情態度上的提醒，好友德峰陪我一起寫論文、玩樂，也謝謝守潔學長在我論文初期感到疑惑時幫助我，以及其他親愛的同學們，不論任何難題我們都一起度過，不論任何歡樂我們也一起度過，我會好好珍惜這段緣分的。

最後，感謝一路陪我走來的父母親與家人，感謝你們的細心栽培與照顧，由於你們多年來在背後默默地支持，使我沒有後顧之憂，謹將這份完成碩士學位的榮耀與喜悅獻給你們，與你們一同分享。

王雲慶 謹誌於

逢甲大學交通工程與管理學系碩士班

中華民國九十四年七月

摘要

匝道儀控係高速公路交通控制中常見且有效之控制策略，因此，在過去三十年來已有許多學者針對匝道控制進行相關之研究與應用，由於模糊邏輯控制(FLC)方法之發展，逐漸有許多研究依此建構匝道儀控系統並分析其控制績效。然普遍研究於 FLC 模式構建時，經常採主觀方式設定隸屬函數及邏輯規則，因此控制結果並不理想，故後續之研究透過樣本學習方式，利用基因演算法(GAs)來建構適應性匝道儀控系統，稱基因模糊邏輯匝道儀控(GFLRC)，除可避免隸屬函數及邏輯規則之主觀設定，亦可具體提升控制績效，基此，本研究嘗試利用 GFLRC 建構匝道儀控系統並驗證其應用性。

本模式依控制範圍可分為獨立型 GFLRC 及整合型 GFLRC，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。在交通量已知情況下，以控制時段內所有高速公路使用者之旅行時間為績效評估指標，採巨觀車流概念進行模擬與控制結果推估。

於簡例部份，本研究以 4 個上下匝道之控制路網分析模式控制結果，另以包括 6 個匝道口之真實路網(國道一號北區路段)加以驗證本模式之應用性與儀控績效。自行模擬簡例中每五分鐘之車流量，同時彙集以五分鐘為單位之實際車流資料，分析控制結果並比較匝道不實施儀控、FLRC 模式、最佳定時儀控及 GFLRC 模式之儀控績效，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，最佳定時儀控(1 段式)減少 4.81%，最佳定時儀控(4 段式)為 7.22%，而 FLRC 模式則約為 0.45%，於實際路網應用方面亦可得到相似之結果。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。最後，本研究針對各模式儀控結果對於用路人公平性做探討，顯示以 FLRC 模式最為公平，獨立型 GFLRC 最為不公平。

關鍵字：基因模糊邏輯控制、匝道儀控、車流模擬

ABSTRACT

Ramp metering might be the most popular and effective strategy for freeway traffic control. Thus, the researches and practices regarding ramp metering have been conducted and implemented over thirty years. Especially, due to the break-through development of fuzzy logic controller (FLC), many researches explore the applicability and performance of FLC ramp metering. However, most of these studies developed the FLC ramp-metering strategy by subjectively setting the membership functions of linguistic variables and selecting the inference rules. As a result, the performance and applicability of these models is negatively affected. Thus, hundreds of studies employed genetic algorithms to design an adaptive fuzzy logic controller (FLC) by learning from examples, namely genetic fuzzy logic controller (GFLRC). GFLC models can not only avoid the subjective settings of membership functions and inference rules, but also enhance the performance of control. Based on that, this paper attempts to develop and validate a genetic fuzzy logic ramp-metering controller (GFLRC).

The present paper proposes two GFLRC strategies: independent and integrated. The independent GFLRC strategy uses mainline average traveling speed and on-ramp queuing length as two state variables, metering rate as control variable. For considering the effects of upstream metering traffic, the integrated GFLRC strategy uses an additional state variable, the metering rate of upstream ramp, based on the independent strategy. The performance of the models is measured by the total travel time of all users during the control period under given traffic flow rates. Besides, the techniques of macroscopic traffic simulation and fluid approximation are adopted to simulate and compute the performances.

For investigating the applicability and control performance of proposed models, studies on an exemplified example with four interchanges and field case with six interchanges (the northern network

of the Taiwan first freeway) are conducted. Five-minute flow rates are simulated for the exemplified example or collected for the field case, respectively. In corresponding to the interval of traffic flow data, the decision horizon of the models is also set as five minutes. The performance of without ramp-metering, FLRC model and optimal single ramp metering strategies are also conducted and analyzed for the comparisons. The results of case study on exemplified example shows that independent and integrated GFLRC can curtail the total travel time by 6.93% and 7.80%, respectively; while the proposed optimal single ramp metering strategy can reduce the total travel time by 4.81% and 7.22%, the FLRC model can reduce the total travel time only by 0.45% at most, comparing with the strategy of without ramp-metering. The field study also concludes the similar results. We also find that the GFLRC models perform better in heavy traffic than in light traffic. At last, we also analyze the unfairness of users caused by implementing these ramp-metering strategies. The results shows FLRC model is rather fairness, while the independent-GFLRC is the most unfairness.

Key Words: genetic fuzzy logic controller, ramp metering, fluid approximation

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究內容與流程.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 匝道儀控演算法之相關研究.....	5
2.2 基因演算法之相關研究.....	14
2.3 基因模糊邏輯推論之相關研究.....	16
第三章 模式建構.....	25
3.1 模式績效之計算.....	25
3.2 適應性匝道儀控模式.....	29
3.3 基因模糊邏輯匝道儀控模式.....	34
3.3.1 邏輯規則與隸屬函數之編解碼.....	35
3.3.2 遺傳運算法則之運作.....	38
3.3.3 GFLC 反覆演化準則.....	41
3.4 最佳定時儀控模式.....	43
3.4.1 編解碼方式.....	43
3.4.2 遺傳運算法則之運作.....	44

第四章 簡例驗證.....	45
4.1 簡例說明.....	45
4.2 模式參數分析及設定.....	47
4.3 結果分析.....	49
4.4 情境分析.....	56
第五章 實例應用.....	63
5.1 控制績效分析.....	63
5.2 敏感度分析.....	65
第六章 結論與建議.....	67
6.1 結論.....	67
6.2 建議.....	68
參考文獻.....	69



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	4
圖 2.1 邏輯規則編解碼方式示意圖.....	20
圖 2.2 隸屬函數編解碼方式示意圖.....	20
圖 3.1 流量-速度巨觀車流型態.....	26
圖 3.2 匝道等候延滯示意圖.....	28
圖 3.3 多時段匝道等候延滯示意圖.....	29
圖 3.4 FLC 之基本架構圖.....	30
圖 3.5 主線平均速度之隸屬函數示意圖.....	33
圖 3.6 匝道等候車輛數之隸屬函數示意圖.....	33
圖 3.7 匝道儀控率之隸屬函數示意圖.....	33
圖 3.8 面積法解模糊化之示意圖.....	34
圖 3.9 GFLRC 之邏輯規則編解碼示意圖.....	36
圖 3.10 主線平均速度之隸屬函數編解碼示意圖.....	37
圖 3.11 蒙地卡羅轉盤示意圖.....	38
圖 3.12 雙點交配示意圖.....	40
圖 3.13 GFLC 之反覆演化運作示意圖.....	42
圖 3.14 最佳定時儀控(2 段式)之編解碼示意圖.....	43
圖 3.15 最佳定時儀控建構流程圖.....	44
圖 4.1 高速公路幾何狀況.....	45
圖 4.2 主線上游端之流量型態.....	46
圖 4.3 上匝道之流量型態.....	46
圖 4.4 最佳定時儀控(多時段)之控制績效.....	50
圖 4.5 獨立型模式之主線平均速度最佳隸屬函數示意圖.....	53
圖 4.6 獨立型模式之匝道等候車輛數最佳隸屬函數示意圖.....	53

圖 4.7 獨立型模式之匝道儀控率最佳隸屬函數示意圖.....	54
圖 4.8 獨立型模式之演化尋優過程.....	54
圖 4.9 整合型模式之主線平均速度最佳隸屬函數示意圖.....	55
圖 4.10 整合型模式之匝道等候車輛數最佳隸屬函數示意圖.....	55
圖 4.11 整合型模式之上游匝道儀控率最佳隸屬函數示意圖.....	56
圖 4.12 整合型模式之匝道儀控率最佳隸屬函數示意圖.....	56
圖 5.1 實例高速公路示意圖.....	63



表目錄

表 2.1 模糊邏輯控制於匝道儀控系統之文獻彙整.....	11
表 2.2 匝道儀控演算法之文獻彙整.....	13
表 2.3 基因模糊邏輯推論之文獻彙整.....	19
表 3.1 流量-速度對應表.....	27
表 3.2 FLRC 之規則庫.....	32
表 4.1 簡例中時段二之 O-D 表.....	47
表 4.2 情境設計表.....	47
表 4.3 交配率、突變率參數分析.....	48
表 4.4 族群數參數分析.....	48
表 4.5 最佳定時儀控(多時段)之控制績效.....	50
表 4.6 最佳定時儀控(1 段式)之儀控率組合.....	51
表 4.7 最佳定時儀控(4 段式)之儀控率組合.....	51
表 4.8 獨立型 GFLRC 模式之最佳邏輯規則組成.....	52
表 4.9 情境一模式績效比較表.....	57
表 4.10 情境二模式績效比較表.....	58
表 4.11 情境三模式績效比較表.....	59
表 4.12 模式績效之彙整表.....	59
表 4.13 匝道公平性.....	61
表 5.1 實例應用最佳定時儀控(1 段式)之儀控率組合.....	64
表 5.2 實例應用最佳定時儀控(4 段式)之儀控率組合.....	64
表 5.3 模式績效比較表.....	65
表 5.4 匝道容量之敏感度分析.....	65

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

我國西部走廊自高速公路通車以來，國內經濟亦隨之快速成長，家戶持有小客車的比率逐日增加，使原先設計的道路容量漸不敷使用，其後雖因高速公路路網的擴充而稍見紓緩，惟交通需求持續增加，每逢上下班之尖峰時段，或例假日、連續假日，高速公路出現塞車幾無可避免，在高速公路容量不易提升情況下，實施交通管理策略，採取適當的管制措施為另一可行之方案。在眾多的交通管制措施當中，交通部國道高速公路局曾於民國 82 年之連續假期試辦匝道儀控管制，對提高主線行駛速率方面，已獲良好之成效。因此，為改善高速公路擁擠狀況，於交流道入口實施匝道儀控，調節進入高速公路車流量，維持高速公路主線一定的服務水準，確實有其必要。

匝道儀控為高速公路交通管理的重要方法之一，其控制之目的在於有效平衡高速公路主線上下游及入口匝道之交通需求，期在不影響高速公路主線之服務水準下，使匝道進入車輛數最大，以有效疏解平面道路交通，並緩和高速公路壅塞，預防衍生交通事故。而目前匝道儀控概可分為定時儀控、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，以及可接受車隙控制、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，故本研究嘗試以模糊邏輯控制（FLC）來構建匝道儀控系統，預先建立合適之知識庫，輸入控制所需資料即可迅速產生輸出結果，可針對即時交通狀況做出適當之反應。另為考量整體系統最佳化效果，而非個別匝道最適化，將結合數個匝道口加以構建本儀控系統，以考慮高速公路整體績效，提升服務水準。

此外，由於傳統 FLC 之構建方式係透過專家訪談而採主觀設定，

可能涉及訪談專家是否具備代表性或正確性等問題，故近幾十年來，有多許研究嘗試利用基因演算法（Genetic Algorithms,GAs）或類神經網路（Artificial Neural Network,ANN）透過輸入與輸出資料間之關係，客觀地建構知識庫。基此，本研究將應用 GAs 作邏輯規則選擇及隸屬函數參數之校估，期使控制結果達最佳。

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. 回顧國內外模糊邏輯匝道控制及基因模糊邏輯推論相關文獻，了解其基本理論、變數選定、控制績效評估指標及參數校估機制，作為本研究模式構建之學習與參考。
2. 建構適應性匝道儀控模式，在模糊邏輯控制部份，確立狀態變數與控制變數，經由模糊推論及解模糊化程序，輸出控制結果；第二階段為基因演算法之應用，以總旅行時間作為基因演化之適合度值，挑選出最佳邏輯規則及校估隸屬函數參數。
3. 依據控制時段建置最佳定時儀控模式，應用基因演算法進行總旅行時間最小化問題求解，搜尋最佳儀控率組合。

1.3 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

本研究之分析對象為國道一號出、入口匝道，根據主線速度及匝道交通狀況，建立適應性儀控系統(Adaptive Ramp Metering System)，由原先之獨立型匝道擴充為整合型匝道以考量整體路網績效，藉由 GAs 校估模糊邏輯控制參數，期使控制結果達最佳。另參考國外模糊邏輯演算法係以 20 秒為一筆之資料作為輸入，擬以北區交控系統所彙整每五分鐘之車流資料，加以驗證本模式之應用性。

2. 回顧相關文獻

(1) 匝道儀控演算法

回顧匝道儀控演算法之相關文獻，主要著重於模糊邏輯控制演算法之回顧，以了解其在匝道儀控系統之應用，包括狀態變數、控制變數、規則數、隸屬函數型態、模糊推論機制等，以及其績效評估指標，以為本研究模式建構之參考。

(2) 基因模糊邏輯推論

回顧國內外基因模糊邏輯推論之相關文獻，以了解其運作方式，主要包括複製、交配及突變等 GAs 之三大運算法則，並探討其在邏輯規則挑選及隸屬函數校估時之編解碼方式。

3. 模式建構

進行本模式之建構，包括語意變數之選定及隸屬函數參數之設定，其後依據模糊化、模糊推論、解模糊化等模糊推理步驟完成初步階段。其次，藉由GAs之編解碼機制並評估模糊控制系統之績效，開始遺傳法則運作，持續演化以達搜尋至模糊控制系統之最佳規則庫與隸屬函數參數。

4. 簡例驗證

本研究設計含括4個上下匝道口路網之簡例，依據流量高低設計三種不同情境，以總旅行時間作為系統控制後績效評估指標，進行匝道不實施儀控、最佳定時儀控、獨立型GFLRC及整合型GFLRC模式之績效比較。

5. 實例應用

實例應用方面本研究將依據北區交控系統所蒐集之車流資料，以竹北至林口為本研究之控制路段，期間包括6個交流道，進一步驗證

本模式之應用性。

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。

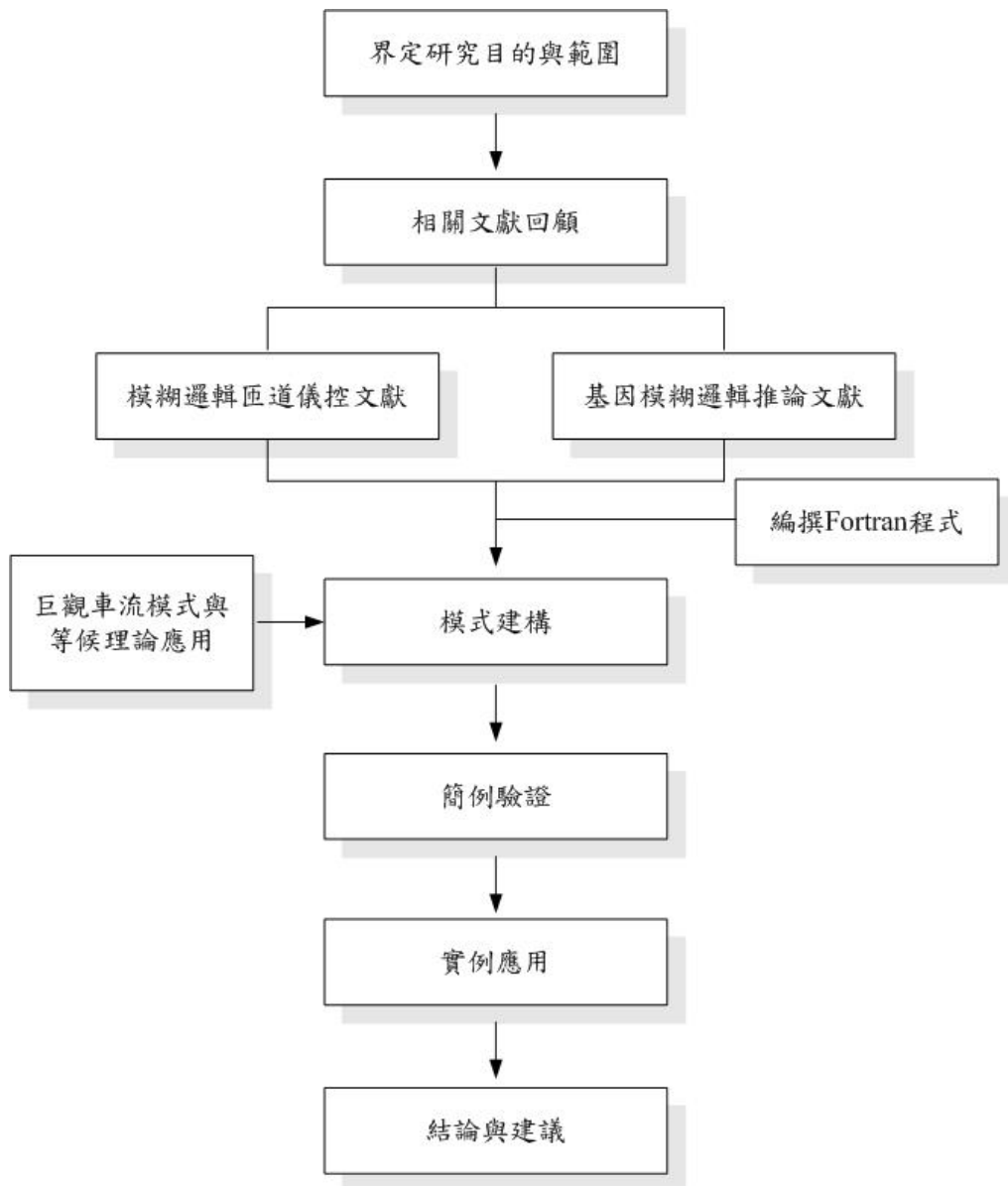


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究旨在運用人工智慧方法 (Artificial Intelligent Method) 之模糊邏輯控制 (Fuzzy Logic Controller, FLC) 建構匝道儀控系統，並利用基因演算法 (Genetic Algorithms, GAs) 進行 FLC 之邏輯規則挑選及隸屬函數參數之校估，避免過去上述兩部分經常性採取主觀方式設定之問題，改以客觀設定控制系統參數進而提升控制績效。藉由匝道儀控演算法之相關研究，著重模糊邏輯於匝道控制文獻之回顧以為本研究構建儀控系統之參考，同時回顧基因演算法以了解其運作流程及基因模糊邏輯推論 (Genetic fuzzy logic inference) 針對控制系統參數校估之機制，供高公局未來採取匝道管制時，對於儀控率估算之參考。茲就此三方面之相關文獻回顧分述如下：

2.1 匝道儀控演算法之相關研究

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，為一非線性回饋控制問題，係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。其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，最佳規則為六條，解模糊化之方法為重心法。GAs 調整模糊控制參數之目標在於系統總花費時間為最小，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。

Chen, *et al.* (1990) 以模糊控制建構高速公路之匝道儀控系統，其規則型態係依據 Tong (1984) 所構建之專家模糊控制系統，此模糊控制的架構結合了現存手冊與自動控制策略，其規則庫可處理事故及無事故之狀況，包括了六個狀態變數及三個控制變數，狀態變數分別為「壅塞程度」，語意等級為六、「壅塞程度變化率」，等級為五、「控制地帶」、「事故」、「無事故」及「控制地帶等候時間之長短」；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」。

利用 FRECON2 軟體模擬舊金山-奧克蘭海灣大橋 (SFOBB) 十種不同車流情境，包括二項無事故及八項有事故狀況，績效指標分別為等候時間、高速公路之乘客小時時間及總乘客小時時間 (TPH)，其中以 TPH 為最重要之評估依據。將模糊控制儀控結果與現存控制系統作比較，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) 整理相關匯入控制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，上匝道處以柵欄 (booths) 控制車輛通行，此篇文章整理的匯入控制方法包括分離匯入控制、線性規劃控制及模糊控制，結合車流模擬與匯入控制以作績效評估用，評估準則為壅塞減少之程度。此模糊控制之狀態變數為壅塞長度、需求流量、上匝道之等候長度及壅塞變化率，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。將模糊控制與分離匯入控制作比較，結果顯示模糊控制能有效減少 50% 之壅塞量，且將最大之壅塞長度由 9.5 公里減少至 6.0 公里。

Keller *et al.* (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，使用主線上游速率、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、主線下游速率等七個狀態變數，前三項之語意等級為三，隸屬函數型態為 Gaussian 曲線，而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，解模糊化方法為重心法。

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，而邏輯規則則固定不做任何更新。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 模擬軟體模擬慕尼黑(德國東南部城市)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。

Taylor *et al.* (1998) 應用模糊邏輯構建西雅圖 I-5 高速公路數個匝道之儀控系統，根據即時交通狀況推估每二十秒為週期之儀控率，使用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等七個狀態變數，語意等級為五之三角形隸屬函數；控制變數為儀控率，計使用十七條規則，依據規則型態給予不同之權重。設計六種不同之車流情境，使用 FRESIM 模擬軟體模擬儀控績效，結果顯示模糊控制之績效均較定時控制、需求-容量控制及速率控制為佳，惟交通量近似容量時顯示速率控制較佳。

Sasaki *et al.* (1988) 提出以模糊邏輯推理來描述交通管理者判斷的過程及一交通控制系統以推估上匝道自動化控制模式，建構一符合真實管理過程之模糊控制系統，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。以實際 Hanshin 高速公路 Osaka-Sakai 路線之上匝道控制為例，應用模糊邏輯控制構建匝道控制系統，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；控制變數為儀控等級，結果顯示此控制與管理者實際判斷行為是相近的。此外，可藉著修改語意變數、增減規則數，使得控制結果達到最佳化。

Lee *et al.* (2000) 應用模糊邏輯構建一高速公路匝道儀控系統，主要包含模糊邏輯系統與決策函數兩部分，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，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。

Papageorgiou *et al.* (2002) 彙整分析定時儀控、交通感應式調節器及非線性最佳控制等儀控方法，並以大規模（阿姆斯特丹之外環道，長 32 公里，銜接四條高速公路，計 21 個上匝道口、20 個下匝道口）之例子加以驗證此非線性最佳匝道儀控方法於交通之改善程度，最後將其儀控結果與未控制時在總旅行時間上作比較，發現可改善 36.6 %。

Bellemans *et al.* (2004) 應用預測型控制模式 (MPC) 及動態交通指派模式建構預期型 (anticipative) 匝道儀控系統，利用 METANET 作為預測模式，將駕駛者因控制而產生之自發重新選擇路線行為納入考量。目前存在著多個推估駕駛者最佳路線之方法，係依據 Wardrop's 原理推導而得，在此引用之方法為連續平均法 (Method of the Successive Average)，其為一反覆型靜態均衡交通指派法，係考量車流影響之節線成本。假設情境為主線四線道，中間路段分支為各兩線道之雙道路，一為長 6 公里之主車道，其中端含一匝道口，主車道下游於上午 5 點 30 分為施工期間，因此車道須由原本二線道縮減為單線道；另一為長 8 公里之次要車道，模擬結果與無匝道控制比較，顯示總花費時間分別為 3781 veh.h 與 4886 veh.h，改善了 22%。

魏健宏與吳耿毓 (1997) 以具時空特性之類神經網路學習控制策略，根據交通參數資料求出適合的儀控率，配合自我修正模式之專家系統，評估先前時段儀控之績效，研擬修正控制策略，並產生修正訓練範例，提供時空類神經網路做線上回饋訓練之用，據以構建出一智慧型自動化匝道儀控系統。以隨機性事件掃描中觀車流模擬模式進行系統控制績效之測試，於基本交通量與增加交通量兩種模擬情境下，經由觀察匝道儀控系統運作與分析各項績效指標，結果顯示此系統在

一般流量狀況下具較佳之控制績效，當流量增高時，其控制績效則介於未控制與 FREQ 模式之間。除此，系統亦能夠記取歷次錯誤的經驗，藉以修正行為，朝向所設定之目標逐漸改善。

蘇志強等人（2002）應用專家系統構建高速公路上匝道控制系統，此專家系統具備處理三個連續匝道之能力，可採六種匝道管制策略。使用 FRESIM 微觀車流模擬軟體，計有 32 種主線流量與匝道流量組合，每個組合模擬時間長度 20 分鐘，每 5 分鐘輸出流量及佔有率資料，因此每個時段有 4 筆資料，共有 128 筆即時資料可供模擬。評估結果顯示，專家系統能整合運用各種模式，其控制績效比單獨使用需求-容量、ALINEA 或佔有率等控制模式為佳。

鍾志成、呂文玉（1999）以混合二元整數規劃來構建整合性交通感應式匝道儀控模式，同時考慮各種型式之交流道系統，以增加模式的適用性。以台北市重慶北路交流道、圓山交流道及內湖交流道為例，並利用 FRESIM 模擬軟體加以驗證其可行性，結果顯示此模式除可在合理的時間內求解，亦可減少研究路段內之旅行時間。

蘇志強與蘇梓見（1997）利用微觀車流模軟體 FRESIM 模擬高速公路車流資料，主線流量每次遞增 100 輛/小時，而匝道流量則包含五種不同需求流量，計 490 種流量組合，進而模擬出六筆流量與佔有率資料，透過非線性迴歸分析，得出最適曲線，據以建立流量-佔有率關係圖，而推估匝道儀控率。

朱榮祥（1991）以 FREQ8PE 模擬軟體模擬中山高速公路三重至內湖路段交通狀況，考慮於三重入口匝道設置儀控，以 FREQ8PE 最佳化子模式，儀控率於 180 輛/小時至 900 輛/小時之間設定 20 種不同儀控率，分別模擬 20 次，以旅行時間、汽油消耗量、車輛污染物為評估準則，結果顯示三重入口匝道在下午 5 點到 6 點半尖峰時段之最佳儀控率為 820 輛/小時至 840 輛/小時。

許添本與簡正銓（2001）考量實際車流不均質與隨機到達之特

性，採用布朗運動理論將隨機車流模型、即時密度變異數納入匝道儀控控制邏輯中，研發出一種新的匝道儀控方法，稱為密度穩定法。係依據隨機車流模式與每分鐘密度標準差，求得每分鐘發生擁擠機率與預估未來擁擠發生時間來決定目標密度，藉由車流模擬軟體 VISSIM 模擬結果並將目標密度保持在低於臨界密度兩個標準差，以確保儀控系統之穩定。同時考量效率性、安全性、系統穩定性三方面，結果顯示可比 ALINEA 法以臨界密度為目標密度的匝道儀控法為佳。

賴建華（2002）應用基因模糊邏輯控制（GFLC）於獨立路口號誌控制設計，狀態變數為綠燈方向下之總車輛到達率、紅燈方向下之總停等車輛數，控制變數為現有方向綠燈時間之延長，語意等級為皆為五之三角形隸屬函數，邏輯規則經 GAs 校估後使用六條規則。控制上以台北市中正路文林路號誌化交叉路口為例，結果顯示 GFLC 模式較現場調查之時制控制減少 19% 總延滯，亦比韋伯定時號誌減少 16% 總延滯。

陸勇奇（2002）結合馬可夫鏈與蒙地卡羅法用以構建模擬模式，運用模糊邏輯控制建構匝道儀控系統，以主線速度、密度變化及入口匝道流量為狀態變數，語意等級分別為三、二、二，皆為梯形隸屬函數，而控制變數為儀控率，語意等級為五。以服務水準為績效指標，結果顯示模糊控制較未控制與定時控制為佳。

張堂賢與莊國欽（2004）在 Payne 離散方程式之基礎下，以泰勒展開式及連鎖率推導出二階之非線性速率方程式，考量上匝道流量、上匝道佇列以及兩公路匯流之匝道佇列等限制方程式，以主線流量最大化為目標，構建非線性之整合型匝道儀控模式。另以林貴璽所推導之車流模式為基礎，校估本身所採用之流量－速率模式。進行晨昏峰各為三小時之模擬，計算週期為 20 秒，控制績效與匝道未控制作比較，顯示除可維持主線較高流量外，亦可提升行駛速率、降低車流密度，並有效紓解主線壅塞。

茲就上述有關匝道儀控系統之相關文獻概分為模糊邏輯匝道儀控與匝道儀控演算法兩部分加以彙整如表 2.1 與表 2.2 所示。

表 2.1 模糊邏輯控制於匝道儀控系統之文獻彙整

作者 (年份)	狀態變數 與控制變數	隸屬函數型態 與等級數	設定 方式	應用地區 (適用性)
Sasaki et al. (1988)	主線擁擠長度、預期交通量	等級三	主觀	日本 Osaka-Sakai 高速公路
	儀控率等級	—		
Chen, L. et al. (1990)	壅塞程度、壅塞程度變化率、控制地帶、事故、無事故、控制地帶等候時間	前二項等級分別為六與五	主觀	舊金山-奧克蘭海灣大橋
	儀控率、維持等候時間之流量變化率、縮減等候時間之流量變化率	儀控率之等級為八		
Taylor et al. (1998)	主線匯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	主觀	西雅圖 I-5 高速公路
	儀控率	—		
Bogenberger et al. (2000)	主線流量、速率	Gaussian 曲線，等級三	客觀	慕尼黑 A9 高速公路
	儀控率	Gaussian 曲線，等級三		

表 2.1 模糊邏輯控制於匝道儀控系統之文獻彙整 (續)

作者 (年份)	狀態變數 與控制變數	隸屬函數型 態與等級數	設定 方式	應用地區 (適用性)
Lee et al. (2000)	主線平均速度、平均速度變化率	等級一、五梯形，餘三角形，等級五	主觀	高速公路匝道儀控系統
	號誌轉換機率	垂直線，等級五		
Keller et al. (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	客觀	慕尼黑 A9 高速公路
	儀控率	Gaussian 曲線，等級三		
Okushima et al. (2003)	壅塞長度、需求流量、上匝道之等候長度、壅塞變化率	第一、三等級為梯形，第二等級為三角形，等級三	主觀	日本 Osaka-Sakai 高速公路
	流量控制等級	三角形，等級五		
賴建華 (2002)	綠燈方向下之總車輛到達率、紅燈方向下之總停等車輛數	三角形，等級五	客觀	獨立路口號誌控制設計
	現有方向綠燈時間之延長時間	三角形，等級五		
陸勇奇 (2002)	主線速度、密度變化、入口匝道流量	梯形，等級分別為三、二、二	主觀	國道一號中區三個交流道
	儀控率	等級五		

綜觀上述文獻可發現模糊邏輯理論應用在匝道儀控系統構建時於邏輯規則與隸屬函數參數經常採取主觀方式設定之，而在邏輯規則設定上皆採同等重要性。不過，近幾年來已有相關研究應用基因演算法來校估模糊控制系統之參數，且顯示出其控制績效均較單純使用模糊邏輯控制為佳。同時，在邏輯規則部分則視其需求、重要性而給予不同之權重值。此外，亦可發現文獻之模式中採用多個狀態變數，而控制變數多以一個為設計原則。

表 2.2 匝道儀控演算法之文獻彙整

年份	作者	演算法	使用軟體
2002	Papageorgiou et al.	非線性最佳匝道儀控	—
2004	Bellemans et al.	預期型匝道儀控	METANE
1997	魏健宏、吳耿毓	類神經網路、自我修正模式之專家系統	FREQ
2002	蘇志強、莊弼昌、蘇梓見	專家系統	FRESIM
1999	鍾志成、呂文玉	混合二元整數規劃	FRESIM
1997	蘇志強、蘇梓見	佔有率－儀控率表	FRESIM
1991	朱榮祥	—	FREQ8PE
2001	許添本、簡正銓	密度穩定法	VISSIM
2004	張堂賢、莊國欽	非線性整合儀控模式	—

車流模擬軟體就模擬的對象及觀念而言可分為：(1)巨觀模式，著重於整體車流現象之概況描述，對於車輛行為以密度、速率、流量之平均數值來處理，並不模擬個別車輛間之運作，如 FREQ、CORFLO、FREFLO 模式等。(2)中觀模式，著重於車隊間之推進處理，如 INTEGRATION 模式。(3)微觀模式，著重於車輛與車輛間之個別運作處理，如 FRESIM、CORSIM 模式等。

藉由表 2.2 可知除傳統幾種儀控演算法外，近幾年來亦有許多研究發展新的演算法來構建匝道儀控系統，依據研究所需選擇適合之車流模擬軟體，模擬所需之車流資料，進行模式之構建與績效評估。而模擬軟體的運用除可免去實際資料調查之人力、財力及時間，亦可捕捉一些較不易獲得之交通狀況。

2.2 基因演算法之相關研究

張立偉(2001)於大規模災害搶修程序上，應用基因演算法(GAs)求解搶修工程隊之最佳排程及各災點搶修順序，以搶修單位之旅行時間最小化、災點搶修時間最小化及災點搶修風險最小化構建多目標式，作為基因演化運算之適合度，考量具時窗限制之車輛繞徑問題(Vehicle Routing Problem)作為解題架構。於世代演化過程中，保留一半前世代中較佳之母代染色體，另一半則另以隨機方式產生以擴大搜尋空間。族群內各染色體透過蒙地卡羅轉盤進行篩選；針對整體群體最佳解作考量，採群體位元交配(Population Byte Crossover)方式，族群內之染色體係以整體位元方式進行交換；初始突變率設定為 0.1，爾後每經過一世代之演化則減少 0.01。進行案例測試，顯示求解結果與原例題正確最佳解相同且求解效率尤佳。

彭浚忠(2002)擬於大規模災害發生時，規劃災後人員疏散與指派構建一區位指派模式(Location-Allocation Model)，以達成在疏散時間限制、有限避難空間及人員之擁擠程度等限制下，將人員公平指派進行疏散，基於上述三項因素構建一模糊多目標疏散指派模式，針對三個目標式相對應之總目標達程度，作為適合度進行基因演算法(GAs)

之運作。以台中市進行實例分析，區分為 223 個里與 113 個避難所，所建立染色體之長度為 223，族群數為 30，採取單點交配，突變技巧係自母代染色體隨機產生 6 個點，並從 113 個避難所中隨機取 6 個避難位置進行突變以產生一組新的染色體。分析結果顯示以旅行距離為 1 公里而擁擠度為 3 人/m² 時，所求得之整體滿意度為最佳，且求解所得之旅行時間亦符合所設定時間內。

吳心琪(2002)探討於地震災害發生後，擬規劃國內公路網搶修之最適排程，伴隨災點搶修工作陸續完成進而恢復完整公路網，用路人之旅行時間亦可獲得減少，故本文以單位時程內之累積節省旅行時間作為排程最佳化指標，應用簡單基因演算法(SGA)來處理災點搶修順序之問題。族群數為 20，以整數值表各災點進行編碼，為盡量保留搶修順序特性而採用 OX(Order crossover)交配方式，採反轉(Inversion)運算方式完成突變之運作。以 8 個災點、3 個工作站之受災路網為例，運用窮舉法求出最佳解後，與 SGA 解法進行求解績效比較，顯示可求得不錯之最佳近似解。另以 8 個路段、4 處交流道共 12 個災點之實例加以驗證，結果顯示族群數 30 經 50 世代尋獲近似最佳解，此外，由原先 6 個搶救工作隊增加為 7 隊時，可縮短總搶通之時程。

蘇恆磊(2002)應用基因演算法於零工式生產排程系統問題(Job-Shop Scheduling Problem)，用以求解最適生產排程，以總完工時間為績效衡量標準，即總完工時間最小化為目標。採用 Operation-based representation 方式進行編碼，假設 n 個工作及 m 台機器設備，則染色體長度為 $n \times m$ ，交配方式為研究重點，可分為 Partial-mapped crossover(PMX)、單點交配(One-point crossover)及 Job-based order crossover(JOX)三種方式，搭配位置互換突變(Swap Mutation)方式建立三種不同基因運算元運算機制。以四個標準檢查程序例子進行測試，驗證結果顯示此三種基因演算法確實適用於求解 JSP 問題，而以單點交配所得之最佳解為佳，且交配率越高時求解所得之總完工時間越少。

綜合上述基因演算法(GAs)之相關文獻可知，此種啟發式解法應用之範圍相當廣泛，鑑於 GAs 具處理組合最佳化問題特性且求解效率頗佳之特性，近年來廣受各方領域研究所採納應用。面對大規模、求解困難問題，GAs 之運用可在合理時間內求得一近似最佳解，適合於求解 NP-hard、NP-complete 組合最佳化之問題。

基因演算法之運作初始係針對問題特性產生多組可行解，以此組合形成母代染色體，進行最佳解的搜尋，較佳解經複製而保留，再針對各染色體之基因進行重組，以產生新的可行解，重組過程中較差的解將被淘汰，以此程序來改善染色體中的基因，進而產生較佳的下一代，逐漸朝問題之最佳解逼近運算。

首先係針對求解問題之特性進行編碼動作，以數個基因組成一條染色體；決定演化族群之大小，即群體中所含之染色體數目，族群大小對於求解效率有直接的影響，若族群過大會耗費過多的搜尋時間，而族群過小將產生提早收斂狀況；確立適合度，用以評估族群內染色體之優劣，作為之後產生新族群選取之依據，然並非所有目標函數值直接作為適合度進行評估，有時會經過正規化(Normalization)處理之後再作為評斷之標準。基因演算法運算核心部份係透過複製、交配及突變三個基本運算元重複運作來達到演化之目的，複製係加入一些揀選之方法，保留較佳適合度之染色體而對於一些較差之染色體予以剔除；交配為提供染色體基因一個交換之機制，透過交配讓子代同時擁有父母雙方部份之優良基因，以擴大整個搜尋空間，有助於跳脫局部最佳解進而朝全域最佳解逼近；突變之運作係避免於基因演化過程中，不會因複製或交配等過程而遺漏重要訊息或陷入局部最佳解。訂定演化停止條件，一般判斷之準則係當搜尋的解趨於一致而不再有較佳解出現時，即可停止演化作業。

2.3 基因模糊邏輯推論之相關研究

Chin et al. (1998) 運用基因演算法(GAs)在維持一定的控制績效水準下，自知識庫中挑選最佳之規則庫，以達最少規則數之原則，並

舉一非線性之鐘擺系統為例，比較初始規則與經基因演算法搜尋後之規則，以驗證此方法應用於模糊邏輯控制之輸出表現。影響 GAs 世代演化的速度在於族群數、染色體長度及複製(選擇)機率，每條規則以 4 個基因表之，初始族群數為 50，最大演化世代數設定為 100，交配率(均勻交配)為 0.8，突變率為 0.01，假設三種初始條件(不同角度)，結果顯示初始的 56 條規則經挑選為 43 條規則後，其控制績效較佳。

Yang et al. (2002) 應用基因演算法(GAs)於 PARAMICS 微觀模擬環境下校估 ALINEA 策略之最佳參數值，推估之四個參數值分別為儀控率之更新循環時間(Δt)、調整參數(Kr)、匝道下游之偵測器裝設位置及佔有率。首先界定校估參數之範圍，計 4 個參數待校估，Jump 突變率為 0.02、Greep 突變率為 0.32，此外，為考量搜尋深度與廣度同等重要，族群規模與演化世代數皆設定為 10，結果顯示應用 GAs 能夠有效地縮減初始界定參數之範圍，且第一世代之平均總旅行時間比固定時制減少 1%，第十代與第一代比較，減少了 2.5%，匝道下游最佳需求佔有率之範圍分別為 19 ~ 21%與 30 ~ 31%。

Gurocak (1999) 利用基因演算法 (GAs) 調整模糊邏輯控制之規則庫，係藉更新模糊集合之波峰點來調整規則庫，輸入變數為所有模糊集合之波峰點，以向量形式表之，規則庫之「推論輸出」與「需求輸出」間差異達最小化為目標。起先以傳統 PD 控制系統進行二階系統定位控制之設計，使用九條規則，每個波峰點以 12 個基因表之，計 11 個模糊集合，故每一條染色體有 132 個基因，族群數為 20，突變率為 0.02，經 30 世代尋優最佳之波峰點，結果顯示系統經調整後，雖反應速度稍慢，但並無超越(overshoot)且穩定狀態之誤差極小。

其次，以鐘擺系統為例，使用九條規則，每個波峰點以 12 個基因表之，為使波峰位置之型態為一對稱分配，故此處將調整參數之數目由 11 個減為 7 個，故每一條染色體有 84 個基因，族群數為 20，突變率為 0.015，經 40 世代尋優最佳之波峰點，結果顯示系統經調整後，雖反應速度稍慢，但並無超越、穩定狀態之誤差及震盪(oscillation)行為產生。

Homaifar et al. (1995) 應用基因演算法同步校估隸屬函數及邏輯規則兩部分，除與單純使用模糊邏輯控制作比較外，亦考量單一校估邏輯規則而隸屬函數不予校估時之控制績效。初以車輛控制 (Cart Controllers) 為例，狀態變數為速度與位置，等級為五，產生 1600 種組合初始狀況，每條染色體以 35 個基因表之，採 1~5 實數編碼，將結果與惟校估邏輯規則作比較，顯示同步校估隸屬函數及邏輯規則之控制績效較佳且所需時間亦較少。另以車輛逆行 (Truck-backing) 為例，狀態變數為位置與角度，等級為五與七，產生 32400 種組合初始狀況，每條染色體以 54 個基因表之，比較類神經網路控制顯示時間可節省約 6.34%。

邱裕鈞與藍武王 (2001) 發展一套反覆演化之基因演算法，以整體性隸屬函數為基礎，進一步改良 Karr[1991]及 Kinzel et al.[1994]在處理邏輯規則選擇與隸屬函數校估等兩層次問題時，缺乏反覆回饋求解機制之缺點，以使適應性模糊控制系統能達到自動學習之目標。此外，針對 GAs 在校估語意變數之實數編碼與限制條件甚多之問題，進而研提一套編解碼及運算方法加以克服。為驗證其應用性與精確性，以 GM 跟車模型所產生之跟車資料為例，結果顯示所建立之 GFLC 模式能夠精確地預測跟車行為。

茲就上述有關基因模糊邏輯推論之相關文獻彙整如表 2.3 所示。綜觀上述文獻，可知基因演算法之運用已能客觀地構建模糊邏輯控制之兩大核心部分，且顯示經調校後之控制績效良好。參數方面可單獨針對隸屬函數或邏輯規則進行校估，亦可同步校估上述兩部分參數，根據相關文獻可知同步校估方式顯示的控制績效較佳。同時，藉由文獻之回顧亦能了解到 GAs 進行參數校估時之編解碼與運算元運作方式，以作為本研究模式構建之參考與學習。

表 2.3 基因模糊邏輯推論之文獻彙整

年份	作者	調整結果
1998	Chin et al.	以鐘擺系統為例，假設三種初始條件(不同角度)，結果顯示初始的 56 條規則經挑選為 43 條規則後，其控制績效較佳。
2002	Yang et al.	校估 ALINEA 策略之最佳參數值，顯示應用 GAs 能有效縮減初始界定參數之範圍。
1999	Gurocak	以鐘擺系統為例，顯示系統經調整後，雖反應速度稍慢，但並無超越、穩定狀態之誤差及震盪(oscillation)行為產生。
1995	Homaifar et al.	以車輛控制 (Cart Controllers) 為例，顯示同步校估隸屬函數及邏輯規則之控制績效較佳且所需時間亦較少。
2001	邱裕鈞與藍武王	以 GM 跟車模型所產生之跟車資料為例，結果顯示所建立之 GFLC 模式能夠精確地預測跟車行為。

鑑於基因演算法具求解組合與參數最佳化之能力，近十年來漸有以基因演算法建構模糊邏輯控制之相關研究發表。於上述基因模糊邏輯推論相關文獻之回顧，在「應用遺傳演算法建構適應性模糊邏輯控制系統—以跟車行為為例」一文當中，作者提出了應用基因演算法於適應性控制系統之建構，建立一反覆演化之 GFLC 模式，同時針對進行隸屬函數校估時，因模式所須納入之限制條件過多，嚴重影響演化尋優之績效，而提出一套隸屬函數參數之編解碼方式，最後以 GM 跟車模式為例，預測前車與後車間之駕駛行為，結果顯示構建之模式確能有效且精確地預測跟車行為。故本研究即以此篇文獻所提出之基因模糊邏輯推論方法，將其應用於高速公路之匝道儀控系統，構建適應性基因模糊邏輯匝道儀控模式(GFLRC)。在此針對此篇文獻中所提出之演算法敘述如下，包括邏輯規則與隸屬函數之編解碼方式、基因演

化運算法則之運作及反覆演化之準則。

1. 邏輯規則與隸屬函數之編解碼

於邏輯規則編解碼部分，FLC 之語意變數以 2 個狀態變數及 1 個控制變數而各具五等級語意值為例，其染色體長度為 $5 \times 5 = 25$ 個，每個基因值以整數 0~5 表示，0 代表該規則未入選，其它值則除代表該規則已獲選外，更代表其控制變數之語意等級，其編解碼方式如圖 2.1 所示。

假設當邏輯規則編碼呈現形式為 00010000020400005000000005 之染色體，代表共有 5 條邏輯規則入選，亦即 FLC 之規則庫係由此五條規則所組成，分別為：

規則 1：IF $x_1 = \text{NL}$ AND $x_2 = \text{PS}$ THEN $y = \text{NL}$

規則 2：IF $x_1 = \text{NS}$ AND $x_2 = \text{PL}$ THEN $y = \text{NS}$

規則 3：IF $x_1 = \text{ZE}$ AND $x_2 = \text{NS}$ THEN $y = \text{PS}$

規則 4：IF $x_1 = \text{PS}$ AND $x_2 = \text{NS}$ THEN $y = \text{PL}$

規則 5：IF $x_1 = \text{PL}$ AND $x_2 = \text{NL}$ THEN $y = \text{PL}$

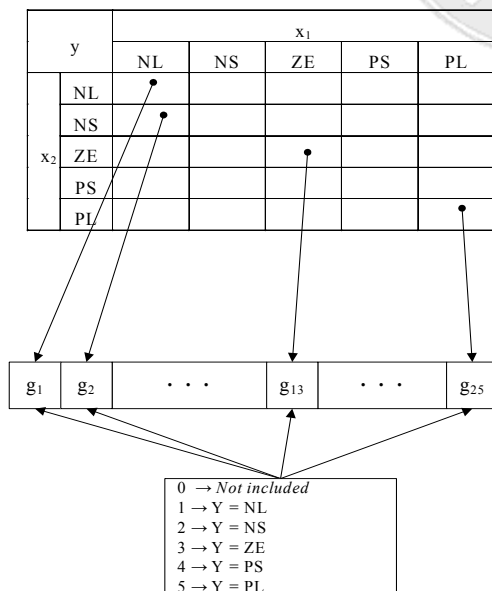


圖 2.1 邏輯規則編解碼方式示意圖

資料來源：邱裕鈞、藍武王，民 90

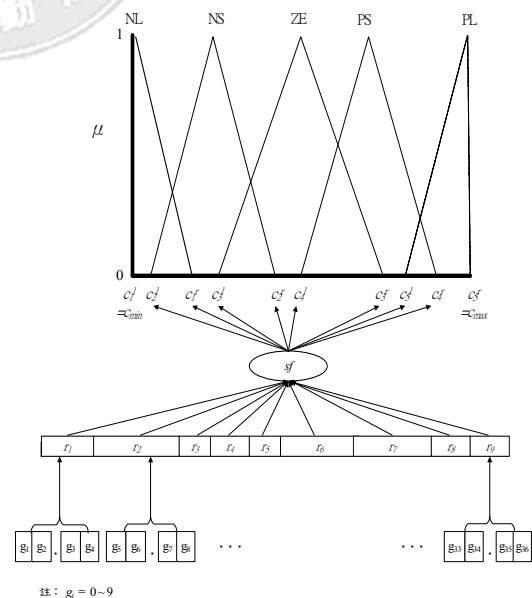


圖 2.2 隸屬函數編解碼方式示意圖

於隸數函數編解碼部分，如圖 2.2 所示，語意變數為等級五之三角模糊數，假設第 1 及 5 等級模糊數均分別為左傾及右傾之直角三角形，即 $c_1^l = c_1^c = c_{min}$ 及 $c_5^c = c_5^r = c_{max}$ ，其中 c_1^l 及 c_1^c 為第 1 等級三角模糊數之左底角及頂點座標值，而 c_5^c 及 c_5^r 代表第 5 等級三角模糊數之頂點及右底角座標值， c_{min} 及 c_{max} 則分別為該變數之最小值及最大值。第 2~4 等級模糊數均呈等腰三角形，即 $c_k^c = (c_k^r + c_k^l)/2$, $k=2, 3, 4$ 。因此，對於一個語意變數為等級五之三角模糊數所需校估之參數，包括第 1 及 5 等級模糊數之右底角及左底角、第 2~4 等級模糊數之左右底角共 8 個，其相對大小關係如式(2.1)所示。

$$c_{max} \geq c_4^r \geq \frac{c_5^l}{c_3^r} \geq \frac{c_4^l}{c_2^r} \geq \frac{c_3^l}{c_1^r} \geq c_2^l \geq c_{min} \quad (2.1)$$

其中， c_5^l 與 c_3^r 、 c_4^l 與 c_2^r 及 c_3^l 與 c_1^r 之相對大小未定。

針對此 8 個參數值進行校估，以 $r_1 \sim r_9$ 等 9 個位置變數代表其相對大小位置，而此 8 個參數值之估算方式如式(2.2)~(2.9)所示。

$$c_2^l = c_{min} + r_1 \times sf \quad (2.2)$$

$$c_1^r = c_2^l + r_2 \times sf \quad (2.3)$$

$$c_3^l = c_2^l + r_3 \times sf \quad (2.4)$$

$$c_2^r = \max\{c_1^r, c_3^l\} + r_4 \times sf \quad (2.5)$$

$$c_4^l = \max\{c_1^r, c_3^l\} + r_5 \times sf \quad (2.6)$$

$$c_3^r = \max\{c_2^r, c_4^l\} + r_6 \times sf \quad (2.7)$$

$$c_5^l = \max\{c_2^r, c_4^l\} + r_7 \times sf \quad (2.8)$$

$$c_4^r = \max\{c_3^r, c_5^l\} + r_8 \times sf \quad (2.9)$$

其中， $sf = \frac{(c_{max} - c_{min})}{\sum_{i=1}^9 r_i}$ 。

每個位置變數 r_i 係以 4 個實數基因代表之，以使求解參數之精確度達小數點後兩位，其最大值為 99.99，最小為 0。因此，以 2 個狀態變數及 1 個控制變數，且各具五等級語意值為例，其染色體長度共計 $3 \times 9 \times 4 = 108$ 個基因。各位置變數經校估後，再依式(2.2)~(2.9)以及

等腰三角形特性，分別計算各語意變數之隸屬函數參數值。

2. 基因演化運算法則之運作

(1) Max-min-arithmetical 交配方式

Max-min-arithmetical 交配方式係由 Herrera et al.[1995]所提出，旨在使實數編碼之 GAs(RCGA)，經由交配法則之運算，可發揮更高品質之尋優結果。其交配演化方式如式(2.10)~(2.13)所示。

$$G_1^{t+1} = aG_w^t + (1-a)G_v^t \quad (2.10)$$

$$G_2^{t+1} = aG_v^t + (1-a)G_w^t \quad (2.11)$$

$$G_3^{t+1} \text{ with } g_{3k}^{t+1} = \min\{g_{wk}^t, g_{vk}^t\} \quad (2.12)$$

$$G_4^{t+1} \text{ with } g_{4k}^{t+1} = \max\{g_{wk}^t, g_{vk}^t\} \quad (2.13)$$

其中， G_i^{t+1} ($i=1\sim4$) 代表產生之子代染色體， g_{ik}^t 代表該染色體之第 k 個基因。

G_w^t 及 G_v^t 為獲選之母代染色體， g_{wk}^t 及 g_{vk}^t 代表染色體之第 k 個基因。

a 為一設定之參數。

t 代表演化之世代數(Number of generations)。

(2) Non-uniform 突變方式

Non-uniform 突變方式係由 Michalewicz[1992]所提出，主要目的有二，其一是適用於 RCGA，可使基因值在其合理範圍內作變動，不同於 SGA 之基因突變方式僅作 0 或 1 之變動；其二納入模擬退火(simulated annealing)觀念，在尋優初期使突變機率較大，以便作大幅度之跳動，避免落入局部解中。在尋優後期則使突變機率縮小，以便尋優結果之收斂。其突變演化方式如式(2.14)所示。

$$g_k' = \begin{cases} g_k + \Delta(t, g_k^u - g_k) & \text{if } b=0 \\ g_k - \Delta(t, g_k - g_k^l) & \text{if } b=1 \end{cases} \quad (2.14)$$

其中， g_k 為產生子代染色體之第 k 個基因。 g_k^u 及 g_k^l 分別為該基因之上、下限值。

b 為一隨機數值(random number)，其值為 $\{0,1\}$ 。

$\Delta(t,y)$ 為機率函數，給定其參數後，將輸出一數值，位於 $[0,y]$ 。

機率函數型式為： $\Delta(t,y) = y(1 - r^{(1-t/T)^h})$

其中， r 為一隨機數值，其值位於 $[0,1]$ 。 T 為最大演化世代數，

h 為一設定之參數。

3. GFLC 反覆演化準則

運用反覆演化方式進行邏輯規則之選擇與隸屬函數之校估時，其基本觀念類似二階層數學規劃，上層係在下層求解所得之隸屬函數下，求解邏輯規則之最佳組成；下層則是在上層求解所得之邏輯規則下，求解隸屬函數之最佳參數。整個反覆演化之流程敘述如下：

Step 0：任意設定隸屬函數之起始參數值。

Step 1：邏輯規則之選擇

step 1-1：隨機產生 n 個染色體之起始族群。

step 1-2：以現有隸屬函數參數為基礎，計算各染色體之適合度。

step 1-3：選擇。

step 1-4：交配。

step 1-5：突變。

step 1-6：令族群中各染色體最大適合度 $= f_s^*$ ， s 表演化世代數。

step 1-7：測試停止條件(在此設定為成熟率達到 80%)是否成立。

若是則至 Step 2；若否則再回到 step 1-3。

Step 2：隸屬函數之校估

step 2-1：隨機產生 n 個染色體之起始族群。

step 2-2：以現有邏輯規則組成為基礎，計算各染色體之適合度。

step 2-3：選擇。

step 2-4：交配。

step 2-5：突變。

step 2-6：令族群中各染色體之最大適合度 $=f_s^{d*}$ 。令 $f_s = f_s^{d*}$ 。

step 2-7：測試停止條件(成熟率達到 80%)是否成立。若是則至

Step 3；若否則再回到 step 2-3。

Step 3：測試反覆演化之停止條件(設定為目標函數值之改善程度變動不大，即 $(f_{s+1}-f_s) \leq \varepsilon$ ， ε 為設定之極小數值)是否成立。若是則停止演化，表示已尋得最佳之邏輯規則與隸屬函數；若否則再回到 Step 1。

藉上述相關文獻之回顧，由國外實證經驗可知 FLC 於匝道儀控系統之應用確實可行且具有效性，控制結果之評估大多以主線旅行時間及匝道等候延滯時間之加總作為績效衡量指標，至於績效比較分析之對象諸如匝道未實施儀控、定時儀控、線性規劃控制等儀控策略或現存控制系統，適應性匝道儀控系統(FLRC)除可節省用路人之旅行時間外，亦可有效提升主線行車速度、節省燃料耗費量等，同時紓解高速公路主線交通壅塞。FLRC 為一種模仿管理者控制行為之策略，有助於減少管理者每次做決策時之負擔，達到更具效率之管理程序。許多研究依據控制目標，選定控制變數再確立狀態變數，並採主觀方式挑選幾條邏輯規則同時設定語意變數進行控制，確實亦能達到決策者所設定控制之目標，而為了進一步提升整體控制之績效，陸續有相關之研究透過資料訓練之方式，挑選最佳之邏輯規則及校估隸屬函數建構 FLRC，此種方式除了可反映出一些人為較為困難或無法判斷之結果，同時可具體提昇其控制績效。

第三章 模式建構

本章分四個小節做說明，首先介紹本研究控制績效之評估準則，即高速公路用路人之總旅行時間，而總旅行時間之估算包括行駛於主線之旅行時間及匝道等候車輛延滯時間。第二節介紹適應性匝道儀控模式(FLRC)。第三節為本研究之核心部分，說明基因模糊邏輯匝道儀控模式(GFLRC)整體架構及其建構流程。第四節介紹應用基因演算法建置最佳定時匝道儀控模式(Optimal single ramp metering)之程序，並與本模式作控制績效比較與分析。

3.1 模式績效之計算

於車流模擬部份，各時段高速公路主線及各上下匝道之交通量為已知資訊，本研究於巨觀車流基本概念下，自行設計流量－速度轉換式，依據主線已知流量透過轉換式迅速得知主線之行車速度，作為模糊控制系統之輸入變數以推估匝道各時段之儀控率，同時計算各匝道路子路段車輛之旅行時間及匝道等候車輛延滯時間。

模式績效計算方面，主要包括高速公路主線旅行時間之計算及匝道等候車輛之延滯時間，兩者時間之加總作為本模式之績效評估指標，即總旅行時間。而當用路人所花費之旅行時間越少時，代表著匝道儀控系統之控制績效越佳，此為一求解最小化之問題，故本研究係以總旅行時間之倒數作為基因演化之適合度，以總旅行時間最小化為目標，進行模糊控制系統參數之校估。以下茲先介紹巨觀車流模式基本概念，如圖 3.1 所示，之後針對主線旅行時間及匝道等候延滯時間之計算方式做說明。

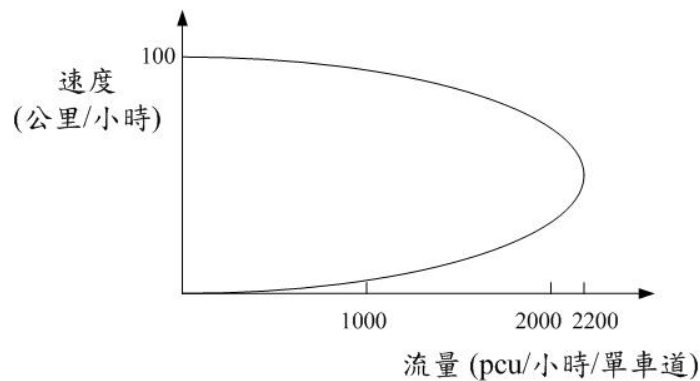


圖 3.1 流量－速度巨觀車流型態

當需求流率小於容量時，可稱車流為一穩定狀況，亦即駕駛者可於路段速限規範下行駛而保持主線車流順暢，當車流量逐漸增加時，主線之平均行駛速率亦隨之降低；若需求流率很接近或等於容量時，主線車流則呈現為一半穩定狀態，隨後而來之主線交通量將嚴重影響行車速度，造成行車速度明顯急劇降低；一旦需求流率大於容量時，則主線車流係處於不穩定或壅塞情況。而在 2001 年台灣地區公路容量手冊針對了高速公路單車道容量及自由行車速率做些探討與分析，而有以下兩點建議：

1. 建議容量

內側車道 = 2300 pcu/ph/pl

外側車道 = 2000 pcu/ph/pl

2. 速限 100 公里/小時之路段

內車道自由速率 = 104 公里/小時

外車道自由速率 = 94 公里/小時

本研究假設主線單車道容量為 2200 pcu/小時，而自由行車速率為 100 公里/小時，運用拋物線公式 $y = ax^2 + bx + c$ 求解二次聯立方程式，建立流量－速度關係式，透過轉換程序後之函數式如式(3.1)所示。

$$V = \frac{44 + \sqrt{44^2 - 4 \times 0.22 \times Q}}{2 \times 0.22} - 100 \quad (3.1)$$

其中， V 為主線車輛平均行駛速率(公里/小時)

Q 為主線流量(pcu/小時/單車道)

故本研究之流量－速度對應表如表 3.1 所示，此表係經由函數式所得之流量－速度轉換表，依據當時主線之流量，可推估出其行車速度，在此僅呈現部份流量所對應之速度值，實際上在推估速度時，即可透過所建立之函數式進行轉換。

表 3.1 流量－速度對應表

流量 (pcu/時/單車道)	平均速度 (公里/時)	流量 (pcu/時/單車道)	平均速度 (公里/時)
0	100.0	1200	67.42
100	97.70	1300	63.96
200	95.35	1400	60.30
300	92.93	1500	56.41
400	90.45	1600	52.22
500	87.90	1700	47.67
600	85.28	1800	42.64
700	82.57	1900	36.93
800	79.77	2000	30.15
900	76.87	2100	20.00
1000	73.85	2200	20.00
1100	70.71	—	—

主線旅行時間之計算，模擬各時段進入匝道與匝道間子路段之車輛數，根據行車速度計算車輛於子路段之平均旅行時間，依車輛數計算各時段子路段之旅行時間，加總各子路段之旅行時間為高速公路主線旅行時間，最後依據總模擬時間估算主線部份之總旅行時間，而各子路段旅行時間之估算方式如式(3.2)所示。

$$T_i = L_i / V_i \times (R_i \times t_s) \quad (3.2)$$

其中， T_i 為旅行時間

L_i 為 i 路段長度

V_i 為 i 路段平均行駛速率

R_i 為模擬時段進入 i 路段之車流率

t_s 為模擬時段

在匝道等候車輛延滯部份，當匝道需求交通量超過匝道儀控率時，即產生上匝道等候現象。本研究之匝道等候車輛延滯時間係於每分鐘計算之，故圖 3.2 中之 T 為模擬時間 1 分鐘，到達率為每分鐘到達之車輛數，儀控率為每分鐘允許上高速公路之車輛數，當到達率大於儀控率即產生 BC 段，此為一分鐘之累積車輛數，而 $\triangle ABC$ 所圍之面積即為延滯時間。

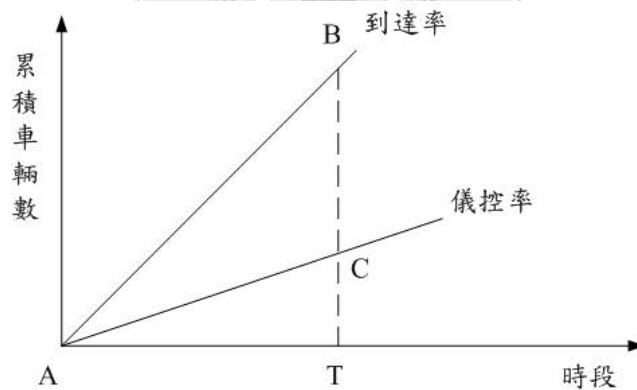


圖 3.2 匝道等候延滯示意圖

Adolf. D May 運用確定性等候理論 (Deterministic Queuing Theory) 建立了上匝道等候模式，此模式不考慮實際等候線長度，只是將等候之車輛加以累積，如圖 3.3 所示，用以估算上匝道等候累積車輛數與等候延滯時間。

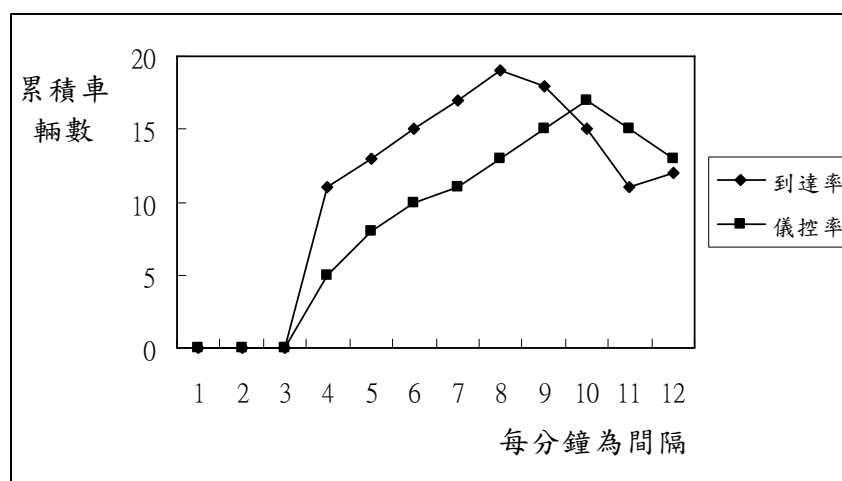


圖 3.3 多時段匝道等候延滯示意圖

本研究即以圖 3.3 說明經一段時間之模擬後匝道等候延滯時間估算方式，由圖中可知第 3 分鐘至第 4 分鐘時顯示到達率大於儀控率，此時在上匝道處即開始產生等候車輛，持續這種情況造成等候車輛數逐漸累加，延滯時間亦增多，最後在第 9 分鐘至第 10 分鐘剛好疏散匝道之等候車輛，此後再由第 10 分鐘開始比較到達率與儀控率，檢視是否有等候車輛之產生，以作為估算延滯時間之依據。

3.2 適應性匝道儀控模式(FLRC)

以往匝道控制系統於儀控率之設定，係依據歷史資料建置一套固定時制之儀控率，視時日挑選一組合適儀控率進行匝道控管，檢討控制結果以作為日後調整之依據，雖能達到維持主線交通順暢之目的，但是當主線有突發狀況發生或臨時之道路施工時，卻無法即時反應而造成負面影響。基此，本研究嘗試應用模糊邏輯控制(FLC)建構適應性匝道儀控系統，其優點在於能夠依據主線及匝道交通狀況，即時做出適當之反應，有效控制匝道駛入車輛並維持主線行車順暢。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，其基本架構如圖 3.4 所示，下面就其基本核心敘述如下：

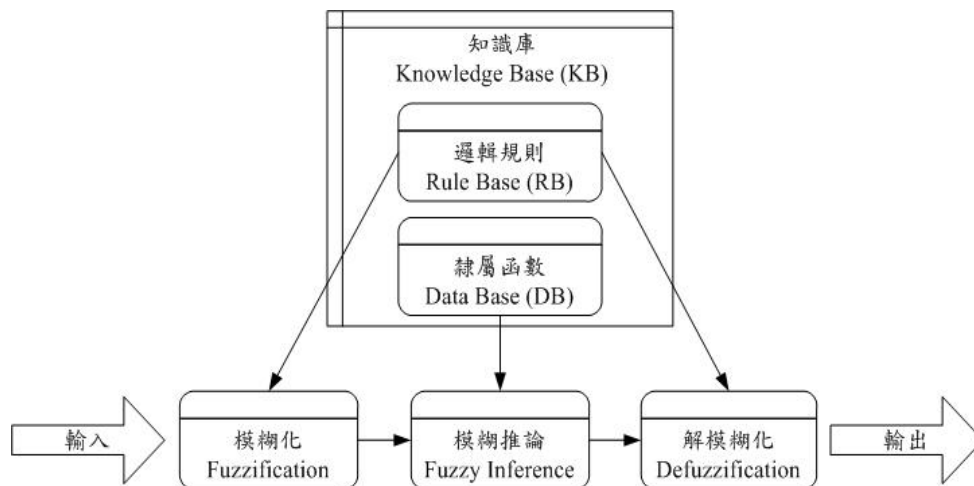


圖 3.4 FLC 之基本架構圖

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，可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，至於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「很慢」、「慢」、「普通」、「快」、「很快」等五個等級來表示行車速度之快慢。

2. 邏輯規則 (Logic rule)

邏輯規則與上述隸屬函數為模糊邏輯控制系統組成之核心部分，一條邏輯規則通常包括以 If 為前提之前件部及以 then 為結論之後件部兩部份，每個模糊邏輯控制系統均由有限數量之 If-then 規則所構成，各規則組合結果即形成其推論機制。比如，當邏輯規則：If $X=x_2$ and $Y=y_3$ then $Z=z_1$ ，即代表當語意變數 X 觸動第二語意等級，而 Y 觸動第三語意等級時，將推論出 Z 為第一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。一般而言，邏輯規則之組成可經由下列幾種方式產生：

- (1) 依據被控系統之特性來訂定規則
- (2) 依據控制人員之控制行為與習慣來訂定規則
- (3) 經由對該領域之專家進行訪談後，所獲得之知識及經驗法則
- (4) 藉由現有狀態輸入與輸出決策之實際資料建構而得
- (5) 結合第三、四種方式，初以實際資料建構，再經由專家進行增減
- (6) 藉著案例學習之方式來訂定規則

3. 模糊化 (Fuzzification)

當輸入變數為一明確之數值時，為了解其觸動哪幾條規則，而且觸動多大之程度，因此必須透過隸屬函數計算其隸屬度，此即為模糊化之過程。

4. 模糊推論 (Fuzzy inference)

邏輯規則一般以交集 (AND)、聯集 (OR) 或補集作為各狀態變數間之連結運算元，而模糊推論即用來決定各邏輯規則運算之方式。其中，取決隸屬度最小值為主的即為 AND 之運算方式，而 OR 之運算方式係採用隸屬度最大者。

5. 解模糊化 (Defuzzification)

由於同一筆輸入資料可能同時觸動數條規則，解模糊化之程序即是將各邏輯規則之推論結果予以綜整並將輸出之模糊數轉換為明確數值，亦即藉著解模糊函數轉換成適當之非模糊數，再經由比例應對輸出，方能據以控制系統。而一般常用之解模糊化方法有最大隸屬度法 (maximum-membership method)、加權平均法 (weighted average method)、面積法 (area method)、重心法 (center of gravity method) 等。

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段之儀控率，以構建具即時反應特性之適應性匝道儀控系統 (FLRC)。本研究採取主線平均速度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 (Logic rules) 與隸屬函數 (Membership function)，而解模糊化之方法採用面積法 (Area method)，以下茲就 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

本研究係依據主線速度「很快」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 25 條規則，如表 2 所示。

表 3.2 FLRC 之規則庫

儀控率 (pcu/小時)		主線平均速度 (公里/小時)				
		很慢	慢	普通	快	很快
匝道等候 車輛數 (pcu)	很少	很低	很低	低	低	普通
	少	很低	低	低	普通	高
	普通	低	低	普通	高	高
	多	低	普通	高	高	很高
	很多	普通	高	高	很高	很高

2. 隸屬函數

本研究採取二個狀態變數及一個控制變數，分別為主線平均速度、匝道等候車輛數以及匝道儀控率，上述三項語意變數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 3.5，圖 3.6，圖 3.7 所示。

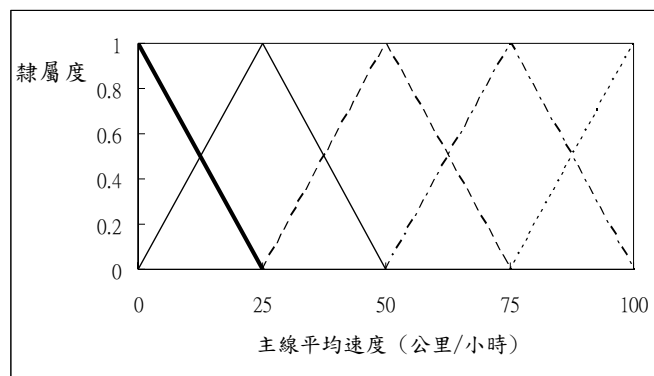


圖 3.5 主線平均速度之隸屬函數型態

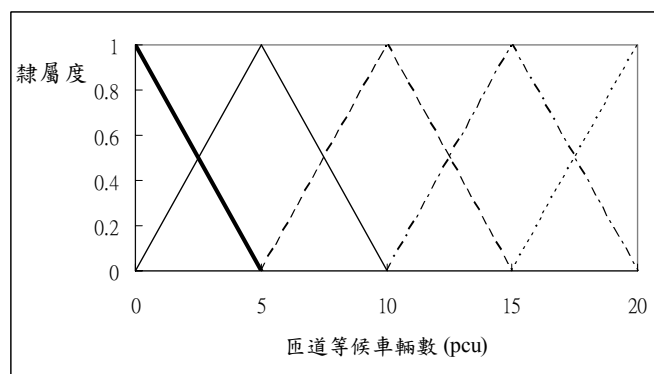


圖 3.6 匝道等候車輛數之隸屬函數型態

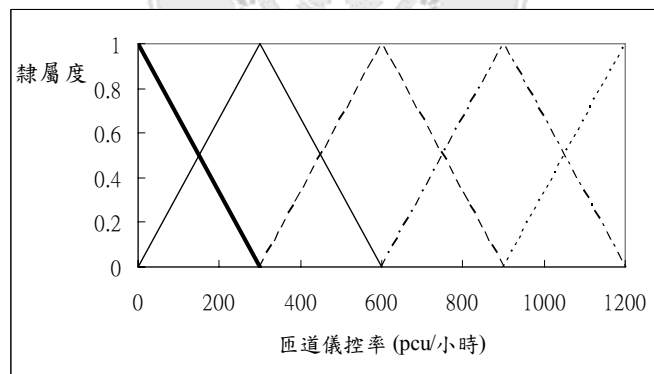


圖 3.7 匝道儀控率之隸屬函數型態

3. 解模糊化

本研究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較小值，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 3.8 所示。

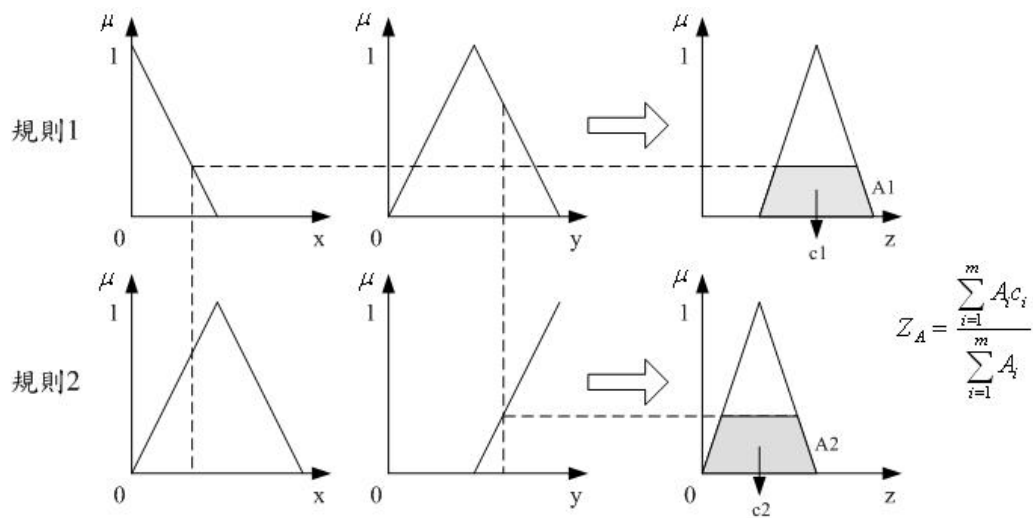


圖 3.8 面積法解模糊化之示意圖

其中， Z_A 為 FLC 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。

3.3 基因模糊邏輯匝道儀控模式(GFLRC)

本模式主要可分為兩種形式，一為獨立型匝道儀控模式，其二為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，與其它匝道並無互動性，而本研究即以主線平均行駛速率及匝道等候車輛數推估各時間匝道之儀控率，最終目標在於該控制路段所有駕駛者之總旅行時間達最小；而整合型模式即在獨立型模式基礎下，另增加一項交通控制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，而係同時兼顧上下游之匝道來推估儀控率，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接，故以整體之觀點做考慮，有助於提升整體路網之服務效益。

應用模糊邏輯控制(FLC)推估各時段匝道儀控率以控制匝道進入主線之車流量，並模擬該路段內之車流變化，包括主線車輛及上匝道等候車輛狀況，估算各路段車輛之旅行時間，加總作為績效目標函數。鑑於基因演算法(GAs)具求解最佳化問題之功能，故本模式係以績效目標函數作為基因演化之適合度，求解最小化問題，搜尋 FLC 最佳之規則組成及隸屬函數。

確立基因演化之適合度後，針對 FLRC 於邏輯規則及隸屬函數兩部份進行編碼動作，於基因三個運算元運作後作適合度之評估，持續世代演化直至達到設定之停止條件，再透過反覆演化運算機制，以達到客觀建構 FLRC 之知識庫，提升控制績效。以下茲就本模式之編解碼方式、基因演化運作及反覆演化準則敘述如下：

3.3.1 邏輯規則與隸屬函數之編解碼

本模式係採主線平均速度與匝道等候車輛數這兩個狀態變數作為控制系統輸入，而以匝道儀控率此控制變數為系統產出，皆為五等級語意值，其染色體之長度為 $5 \times 5 = 25$ 個，採整數編碼方式，每個基因值係由 0~5 表之，基因值為 0 代表該條規則不予以挑選而直接刪除，其它值除被挑選作為控制的規則之外，亦代表其控制變數之語意等級。因模式中之語意變數包括了 2 個狀態變數及 1 個控制變數，故問題之潛在規則為 125 條，若採二元編解碼方式，基因值為 1 表示該條規則獲入選，0 表該條規則遭淘汰，則染色體長度達 125 個，故此種邏輯規則編解碼方式將能有效精簡染色體之長度，其編解碼方式如圖 3.9 所示。

舉例來說，假設一條染色體為 00010000020400005000000005，表示模式之規則庫係由 6 條規則所組成，此 6 條規則分別為：

規則 1：If 主線速度＝很慢 and 匝道車輛數＝多 Then 儀控率＝很低

規則 2：If 主線速度＝慢 and 匝道車輛數＝很多 Then 儀控率＝低

規則 3：If 主線速度＝普通 and 匝道車輛數＝少 Then 儀控率＝高

規則 4：If 主線速度＝快 and 匝道車輛數＝少 Then 儀控率＝很高

規則 5：If 主線速度＝很快 and 匝道車輛數＝很多 Then 儀控率＝很高

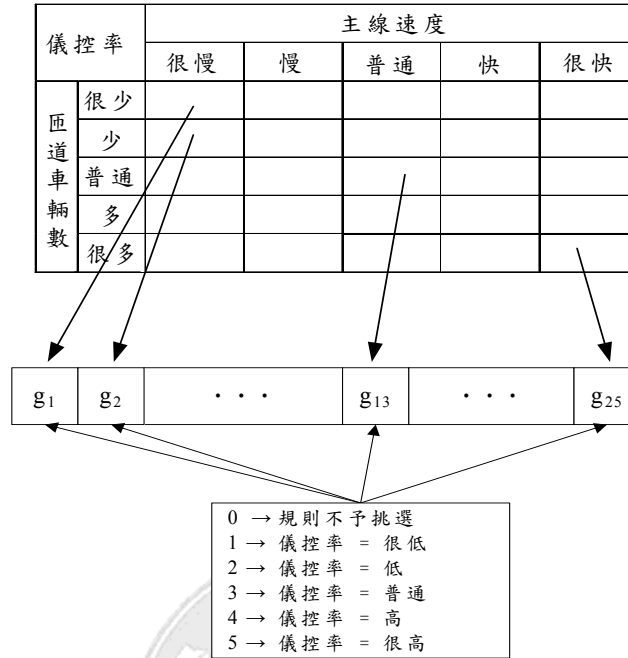


圖 3.9 GFLRC 之邏輯規則編解碼示意圖

模式於隸屬函數之建立及編解碼部分，皆以語意等級為五之三角型態設定之，以三角模糊數為例，其參數為 c_k^r 、 c_k^c 及 c_k^l ，分別代表著 k 語意等級之右底角座標、頂點座標及左底角座標，若一個狀態（或控制）變數語意等級為五時，則此變數所須校估之參數為 15 個。由於各等級模糊數之參數間尚有一些相對大小之關係須先加以釐清，如將這些限制條件皆納入模式中的話，對於模式尋優之績效勢必有一定程度的影響，故本研究運用邱裕鈞與藍武王[2001]所提出一套隸屬函數參數校估之方式，對於 FLRC 模式中兩個狀態變數及一個狀態變數，針對語意等級二至四等三個模糊數之左右底角、等級一之右底角以及等級五之左底角等 8 個參數進行校估，利用 9 個位置變數（ $r_1 \sim r_9$ ）代表其相對大小位置關係，而目標函數為總旅行時間最小化，上述 8 個代估之參數估算方式如式(3.3)~(3.10)所示。

$$c_2^l = c_{\min} + r_1 \times sf \quad (3.3)$$

$$c_1^r = c_2^l + r_2 \times sf \quad (3.4)$$

$$c_3^l = c_2^l + r_3 \times sf \quad (3.5)$$

$$c_2^r = \max\{c_1^r, c_3^l\} + r_4 \times sf \quad (3.6)$$

$$c_4^l = \max\{c_1^r, c_3^l\} + r_5 \times sf \quad (3.7)$$

$$c_3^r = \max\{c_2^r, c_4^l\} + r_6 \times sf \quad (3.8)$$

$$c_5^l = \max\{c_2^r, c_4^l\} + r_7 \times sf \quad (3.9)$$

$$c_4^r = \max\{c_3^r, c_5^l\} + r_8 \times sf \quad (3.10)$$

其中，
$$sf = \frac{(c_{\max} - c_{\min})}{\sum_{i=1}^9 r_i}$$

上述 9 個位置變數皆以 4 個整數基因代表之，以主線平均速度此狀態變數為例可由圖 3.10 示之，使求解之參數值其精確度可達到小數點後兩位，即各位置變數最大值為 99.99，而最小值則為 0。而本研究採用兩個狀態變數及一個控制變數，其皆為語意等級五之三角模糊數，故染色體長度為 $3 \times 9 \times 4 = 108$ 個，當各位置參數依據染色體做調整後，再依據上述(3.1)~(3.10)式及等腰三角形之特性(各模糊數之頂點座標為左底角與右底角加總除以 2)，分別計算出各模糊數之參數值。

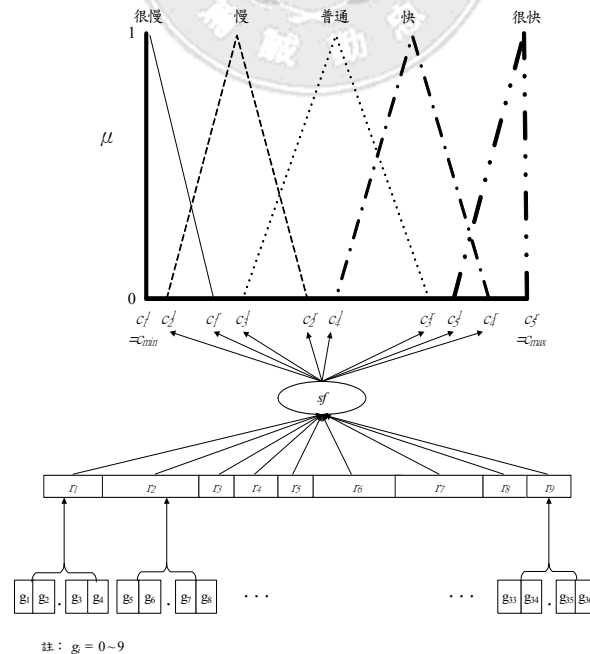


圖 3.10 主線平均速度隸屬函數編解碼示意圖

以一條染色體 482778171510129280840165237082654624 長度 36 之主線平均速度此狀態變數為例，速度之參數極小值為 0，極大值為 100，其 9 個位置變數值分別為 48.27、78.17、15.10、12.92、80.84、1.65、23.70、82.65、46.24，故式(9)中 $sf=0.26$ ，即可依(3.3)~(3.10)式及等腰三角形特性推估各模糊數之參數值。

3.3.2 遺傳運算法則之運作

1. 複製 (Selection)

基因演算法中的選擇機制主要是模仿自然界適者生存之現象，透過選擇機制進行染色體複製的動作，複製過程中將保留原染色體之一切特性，完全複製一個相同之個體，而本研究係引用蒙地卡羅轉盤作為染色體選擇之方法，如圖 3.11 所示。所謂蒙地卡羅轉盤係以族群中各染色體之適合度作為判斷依據，根據每條染色體之適合度佔總適合度的比例作分配，適合度較高者佔據之面積百分比愈大，獲選留下來繁殖下一代之機率亦較大。

自現有族群中以選後放回方式，隨機且可重複挑選染色體，直到複製完所需染色體數為止。以本研究所求解問題而言，係以控制績效評估指標之倒數作為基因演化之適合度值，總旅行時間越大，相對的適合度值越小，則此條染色體繁衍下一代之機率越低，經過世代代演算後，尋獲最小之目標函數值，以滿足問題所求總旅行時間最小化下之 FLC 知識庫組成。

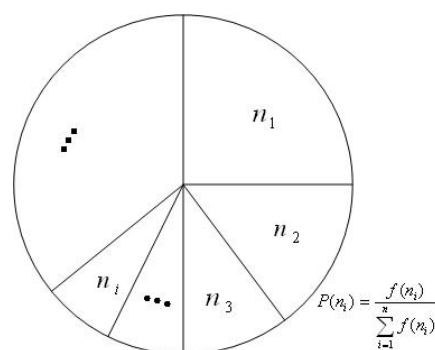


圖 3.11 蒙地卡羅轉盤示意圖

其中， n_i 代表第 i 個染色體， $f(n_i)$ 表第 i 個染色體之適合度， $P(n_i)$ 表第 i 個染色體被選中之機率，而 n 為族群數。

2. 交配 (Crossover)

交配係自成對之母代染色體中隨機產生交配點，交換彼此位元資訊，以組成兩條新的子代染色體，藉由基因交換之動作，使得新產生之子代染色體可同時擁有母代雙方之優良基因，進而組成更具適應能力之染色體，調整使得子代染色體之適合度較母代為優。

經過複製程序篩選出之成對染色體，以隨機方式產生 0~1 之亂數值，若低於交配率則進行交配，以新的子代取代母代，反之則不進行交配，直接將成對母代置回新的族群內。針對基因交配方式，本研究除了採用雙點交配法，同時納入 Max-min-arithmetical 交配方式，點交配方式如圖 3.12 所示，第一個交配點左半部基因與第二個交配點右半部之基因不做變動，僅是染色體中間段做基因交換動作。而 Max-min-arithmetical 交配之運作方式如式(3.11)~(3.14)所示。

$$G_1^{t+1} = aG_w^t + (1-a)G_v^t \quad (3.11)$$

$$G_2^{t+1} = aG_v^t + (1-a)G_w^t \quad (3.12)$$

$$G_3^{t+1} \text{ with } g_{3k}^{t+1} = \min\{g_{wk}^t, g_{vk}^t\} \quad (3.13)$$

$$G_4^{t+1} \text{ with } g_{4k}^{t+1} = \max\{g_{wk}^t, g_{vk}^t\} \quad (3.14)$$

其中， $G_i^{t+1} (i=1\sim4)$ 代表產生之子代染色體， g_{ik}^t 代表該染色體之第 k 個基因。

G_w^t 及 G_v^t 為獲選之母代染色體， g_{wk}^t 及 g_{vk}^t 代表染色體之第 k 個基因。

a 為一設定之參數，在此設定為 0.35。

t 代表演化之世代數。

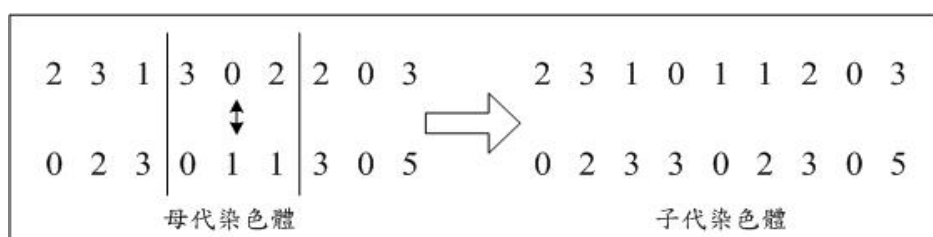


圖 3.12 雙點交配示意圖

藉由上述兩種交配運算機制，每次交配運作時將由 2 個母代染色體產生 8 個子代染色體，再依據染色體適合度值挑選出最佳的 2 個，置回族群中。

3. 突變 (Mutation)

突變過程係以隨機產生的突變點改變原染色體內之位元資訊，透過基因突變的發生來增加不同之搜尋方向，擴大問題之搜尋空間。以隨機方式產生 0~1 之亂數值，若低於突變率則進行突變，而本研究係採用 Non-uniform 突變方式，此種方式於尋優初期使突變率較大，以避免落入局部最佳解，隨著世代演化則突變率逐變縮小，以便尋優結果之收斂，其突變運作方式如式(3.15)所示。

$$g_k' = \begin{cases} g_k + \Delta(t, g_k^u - g_k) & \text{if } b = 0 \\ g_k - \Delta(t, g_k - g_k^l) & \text{if } b = 1 \end{cases} \quad (3.15)$$

其中， g_k 為產生子代染色體之第 k 個基因。 g_k^u 及 g_k^l 分別為該基因之上、下限值。

b 為一隨機數值，其值為 $\{0,1\}$ 。

$\Delta(t,y)$ 為機率函數，給定其參數後，將輸出一數值，位於 $[0,y]$ 。

機率函數型式為： $\Delta(t,y) = y(1 - r^{(1-t/T)^h})$

其中， r 為一隨機數值，其值位於 $[0,1]$ 。 T 為最大演化世代數，

h 為一設定之參數。

3.3.3 GFLC 反覆演化準則

GFLC 反覆演化運算基本觀念類似二階層數學規劃，上層係在下層求解所得之隸屬函數下，求解最佳邏輯規則組成；下層則是在上層求解所得之邏輯規則下，求解最佳隸屬函數參數。本研究即是在此種概念下，起始演化時自行主觀設定各語意變數之隸屬函數參數，經由基因演化運算後得到第一次演化之最佳規則(本研究係以 RB-1 稱之)，作為第一次搜尋最佳隸屬函數參數(本研究係以 DB-1 稱之)時之規則組成，以上述 RB-1 與 DB-1 作為第二次演化運算之基礎，檢驗第二次演化是否達到反覆演化尋優之停止條件(設定為目標值之改善變動幅度為一極小值)，如第二次演化相對於第一次演化目標值之改善幅度低於該極小值則停止演化，得到最佳之規則組合及隸屬函數參數，如尚未達到停止條件則再進行第三次演化，如此反覆運算，直達反覆演化之停止條件為止。其演化流程如圖 3.13 所示。



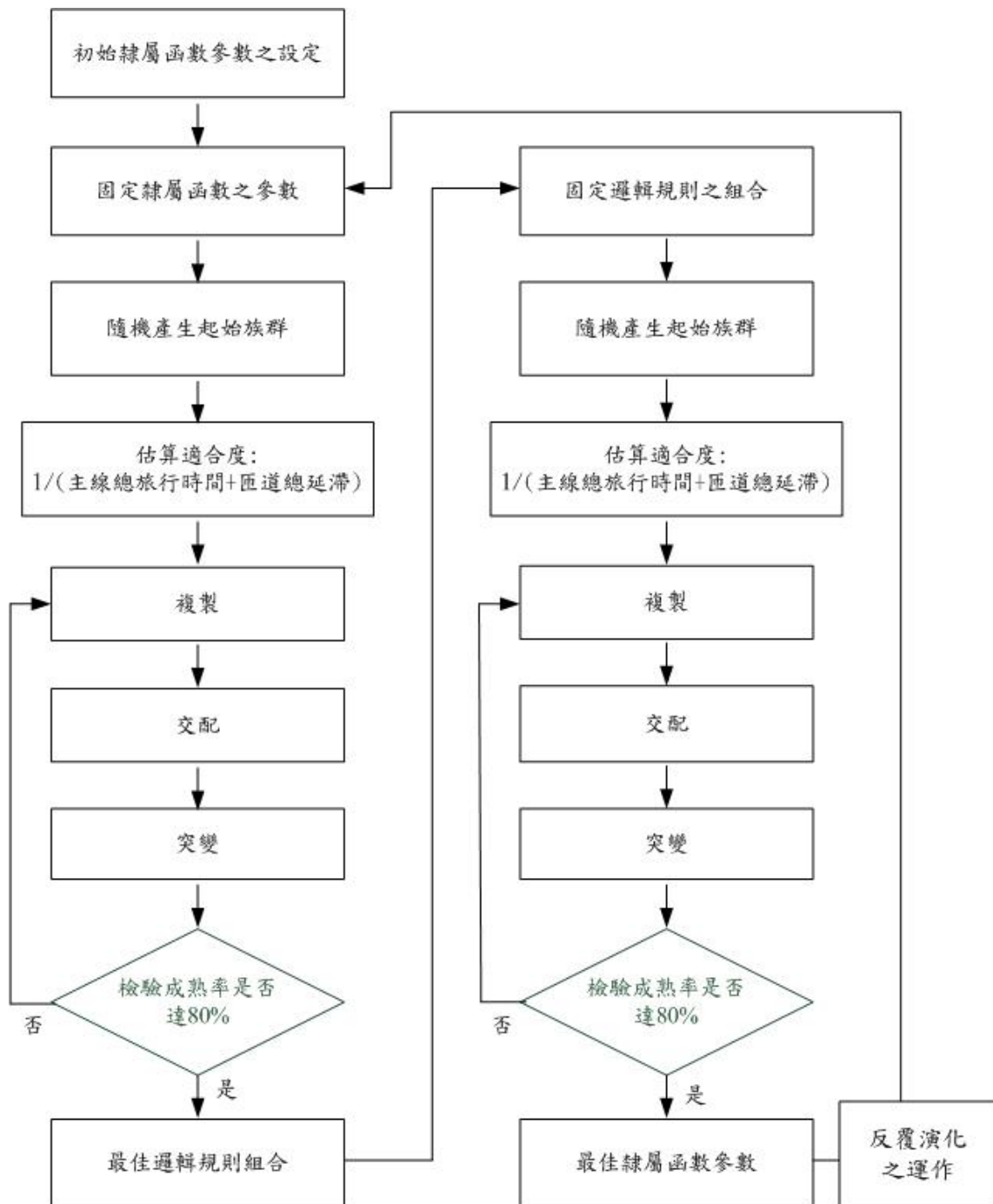


圖 3.13 GFLC 之反覆演化運作示意圖

3.4 最佳定時儀控模式

定時儀控 (pre-timed ramp metering) 所使用之號誌週期係按不同時日事先予以設定，為疏解重現形壅塞所實施之預防性交通控制。定時儀控可分為 Fixed-time 及 Time of Day/Day of week 兩種，其中 Fixed-time 運作上係採單一儀控率；而 Time of Day/Day of week 係當匝道實施儀控時針對不同時段來指定不同之儀控率，故本研究於上述儀控率設定概念下，設計最佳定時儀控 (Optimal single ramp metering)。

為比較本模式與其它控制模式於兩個小時控制後之績效，本研究於傳統定時儀控策略觀念下，擬應用基因演算法 (GAs) 尋求在總旅行時間最小化，各匝道其最佳儀控率組合，此即為本研究所採取之最佳定時儀控策略，又可分為 1 段式及多段式。本研究所謂之一段式係指在滿足兩小時控制之下，上匝道各自以一套固定儀控率進行控制；而多段式係依據控制時段給予不同之儀控率來進行控制，以 2 段式且第一個匝道為例，即該匝道於第一個小時內每分鐘之儀控率皆相同，第二個控制小時則以另一儀控率來做控制，於此小節則以採取 2 段式之最佳定時儀控策略進行說明，主要包括其編解碼方式及遺傳運算法則之運作。

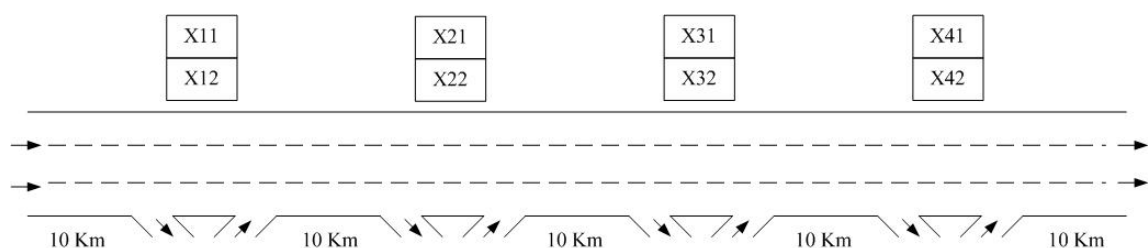


圖 3.14 最佳定時儀控(2 段式)之編解碼示意圖

3.4.1 編解碼方式

在基因編解碼方面，本研究係採取整數編碼方式，以 0~9 建立一條長度為 24 之染色體，以 3 個基因代表一個儀控率，第一個上匝道

之 X11、X12 以染色體中 1~3 基因與 4~6 基因表之，第二個上匝道 X21、X22 以 7~9 基因與 10~12 基因表之，第三個上匝道 X31、X32 以 13~15 基因與 16~18 基因表之，第四個上匝道 X41、X42 以 19~21 與 22~24 代表，染色體呈現方式為 367210281763221679321156，如 X11 基因值為 367，因匝道容量為 1200pcu/小時，故經調整後該階段之儀控率設定為 $367 \times (1200/999)$ pcu/小時，其編解碼方式如圖 3.14 所示。

3.4.2 遺傳運算法則之運作

基因演算法之選擇方式係採較為常見之蒙地卡羅盤進行染色體之挑選，即適合度較高之染色體被選用來產生下一代之機率越高；除了採用雙點交配方式外，並納入 max-min-arithmetical 交配方式，其概念係藉由 2 個母代染色體產生 6 個新的子代染色體，加上原本 2 個母代染色體共 8 個染色體，再挑選出最佳的 2 個置回族群，其它 6 個則予以刪除；突變方面則採用 Non-uniform 之突變方式，整個演化流程如圖 3.15 所示。

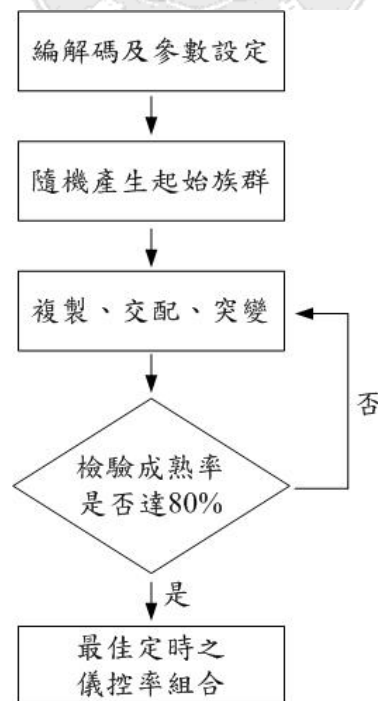


圖 3.15 最佳定時模式建構流程圖

第四章 簡例驗證

為了說明本研究之匝道儀控模式於高速公路上匝道之應用成效，針對流量高低來設計幾種不同之情境，比較在不同情境下模式控制績效，進行 3 小時之模擬，以五分鐘為一時段共包括 36 個時段，第 1 個小時不做任何控制，而第 2 個小時開始則實施匝道控管，最後進行匝道不實施儀控、FLRC 模式、最佳定時儀控(1 段式與 4 段式)、獨立型與整合型 GFLRC 等六種儀控策略之績效比較，以總旅行時間（主線旅行時間加上匝道延滯時間）為績效評估指標，評估本研究之模式對於高速公路上用路人總花費時間之改善程度。

4.1 簡例說明

本研究針對簡例驗證部份設計一含括 4 個上下匝道口之高速公路路段，如圖 4.1 所示，計包括 5 個子路段而長度皆為 10 公里，圖中編號 1 為高速公路上游，編號 6 為下游，主線為三線道，單車道容量為 2200pcu/小時，而各上下匝道皆為單車道，其容量為 1200pcu/小時。

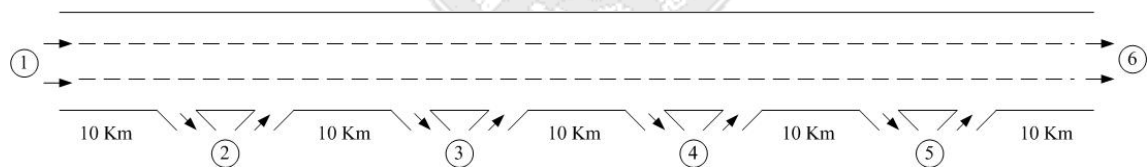


圖 4.1 高速公路幾何狀況

針對高速公路流量進行設計，以作為本模式所需車流資料之依據，流量假設可分為主線上游端流量與上匝道需求流量兩個部份，依據此兩部份流量之推估方式，得到模擬三小時內每五分鐘一筆之流量資料，依比例分配取得 36 個 O-D 表，而本研究即依據已知交通量進行儀控率推估及匝道管制，並模擬各路段各時間點之車流狀況。所假設之主線上游端路段流量其型態如圖 4.2 所示，上匝道之流量型態則如圖 4.3 所示。

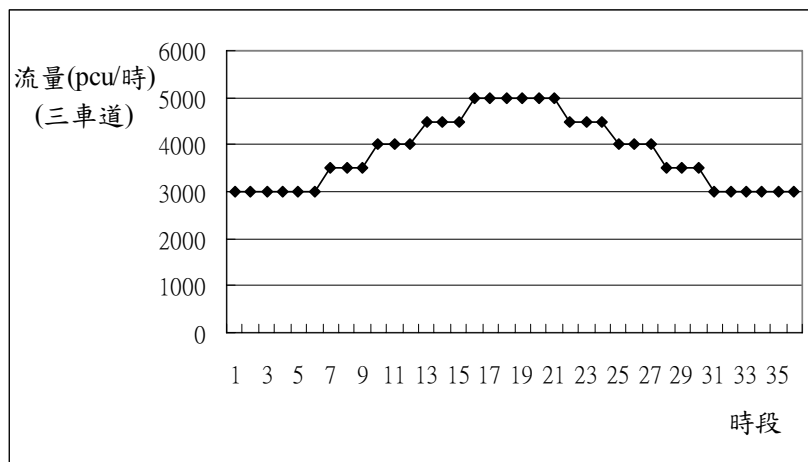


圖 4.2 主線上游端之流量型態

各時段主線上游端流量之推估係利用流量變動範圍乘以（隨機值－0.5）再加上圖 4.2 中各時段流量平均值，在此假設流量變動範圍為 1000，而所產生之隨機值則介於 0~1 之間。

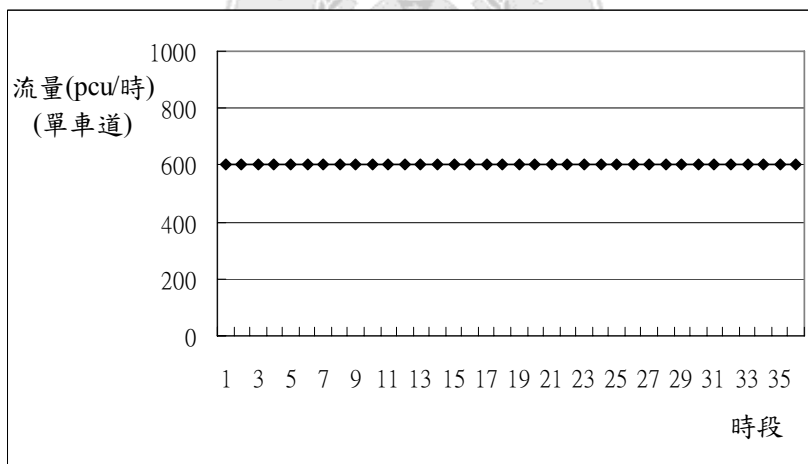


圖 4.3 上匝道之流量型態

各時段上匝道流量推估係利用流量變動範圍乘以（隨機值－0.5）再加上圖 4.3 中各時段流量平均值，在此假設流量變動範圍為 800，而所產生之隨機值則介於 0~1 之間。

藉由上述主線上游端及上匝道流量推估方式產生 36 個時段之車流量，各時段以五分鐘為單位，而該時段內每分鐘流量固定相同，再

依比例分配建立 36 個 O-D 表，取得各時段各下匝道之流量，以作為車流狀況模擬之依據，本研究之高速公路 O-D 資料如表 4.1 所示，在此所呈現係為時段二之 O-D 表。

表 4.1 簡例中時段二之 O-D 表

	1	2	3	4	5	6	下匝道
1	—	29	36	15	7	10	97
2		—	12	15	4	8	39
3			—	13	25	10	48
4				—	18	26	44
5					—	59	59
6						—	0
上匝道	0	29	48	43	54	113	287

由上述 36 個 O-D 表設計流量資料情境二，依據情境二之流量加減 10% 產生情境一及情境三，如表 4.2 所示，故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。

表 4.2 情境設計表

	流量變動範圍
情境一	— 10%
情境二	—
情境三	+ 10%

4.2 模式參數分析及設定

基因演算法整個演化過程中，於參數設定上主要包括族群數、交配率、突變率及成熟率，隨著參數值之變化，其達到收斂之世代數、時間或尋優之結果等亦有所不同，故此小節即以情境一為例，調整族

群數、交配率及突變率等參數值，如表 4.3 及表 4.4 所示，以了解、說明模式參數對整體尋優結果之影響。

表 4.3 交配率、突變率參數分析

交配率	突變率	總旅行時間(小時)
0.7	0.01	4811.10
	0.02	4825.29
	0.03	4817.96
	0.04	4822.91
	0.05	4812.28
0.8	0.01	4815.25
	0.02	4825.62
	0.03	4822.97
	0.04	4824.35
	0.05	4822.11
0.9	0.01	4817.75
	0.02	4813.61
	0.03	4823.74
	0.04	4823.18
	0.05	4830.06

表 4.4 族群數參數分析

族群數	總旅行時間(小時)
50	4827.66
60	4814.88
70	4820.09
80	4811.10
90	4824.24
100	4820.28

根據表 4.3 所示，於交配率與突變率間作 15 種組合估算總旅行時間，結果顯示當交配率=0.7 而突變率=0.01 時，所求得之總旅行時間=4811.10 小時為最小；以上述參數為基礎，分別估算族群數由 50 至 100 作調整時之總旅行時間，依據表 4.4 結果顯示當演化族群數為 80 時所求得之總旅行時間為最小。故本研究於最佳定時儀控模式、獨立型與整合型 GFLRC 模式建構時，皆以族群數=80、交配率=0.7、突變率=0.01 作為基因演算法之參數設定值。

4.3 結果分析

此小節用以說明簡例路段各匝道於兩個小時控制後，以情境一為例，比較匝道不實施儀控、FLRC 模式、最佳定時儀控(1 段式與 4 段式)、獨立型與整合型 GFLRC 之控制績效，針對模式於基因演化尋優結果加以說明。

1. 匝道不實施儀控

當匝道未進行任何管制時，即高速公路鄰接之平面道路車輛可任意由上匝道來進入高速公路，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 4938.43 小時。

2. 適應性匝道儀控模式(FLRC)

此種儀控策略係採主觀方式設定模糊控制系統之參數，依據主線行車速度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 4963.83 小時。

3. 最佳定時儀控模式

本研究應用基因演算法所構建之最佳定時儀控模式，於族群數=80、交配率=0.7、突變率=0.01、成熟率=80%等參數值設定下，以最佳定時儀控(1 段式)設計概念，依據控制時段建置最佳定時儀控(多段式)模式，以情境一為例，比較分時段控制之儀控績效，茲列舉如

表 4.5 所示。

表 4.5 最佳定時儀控(多時段)之控制績效

	總旅行時間(小時)
1 段式	4894.31
2 段式	4790.24
4 段式	4777.08
6 段式	4782.15
8 段式	4777.73
10 段式	4786.73
12 段式	4791.02
20 段式	4798.33
24 段式	4820.48
30 段式	4819.39

由表 4.5 可知以最佳定時儀控(4 段式)之控制績效為最佳，即總旅行時間為最小，依據時段控制之績效呈現一開口向上之凹曲線，如圖 4.4 所示。

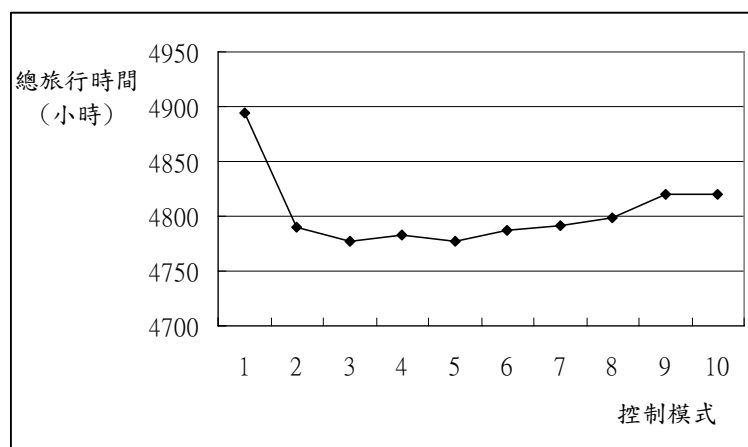


圖 4.4 最佳定時儀控(多時段)之控制績效

圖 4.4 顯示上匝道於兩個小時內僅採用單一儀控率時之控制績效

最差，當匝道採取 2 段式時之控制績效則明顯變佳，而採取 4 段式之控制結果最佳，隨著採取多段式其績效皆顯示比 4 段式差，說明了採取多段式之最佳定時儀控雖能有效減少總旅行時間，然因染色體之長度隨著段式之遞增而增加，故造成基因演化尋優結果不佳。藉由上述之績效比較以 4 段式為最優，故本研究於後續模式績效比較將以單一儀控率及最佳定時儀控(4 段式)與其它儀控模式進行比較分析，以下茲就最佳定時儀控於情境一之控制結果作說明。

(1) 最佳定時儀控(1 段式)

當匝道採取單一套儀控率時，其染色體長度為 12，於兩個小時之模擬，達到收斂之世代數為 15，總旅行時間為 4894.31 小時，染色體各基因值分別為 334282365524，所代表之儀控率組合如表 4.6 所示。

表 4.6 最佳定時儀控(1 段式)之儀控率組合

儀控率 (pcu/小時)	上匝道 1	上匝道 2	上匝道 3	上匝道 4
階段一	401	339	438	629

(2) 最佳定時儀控(4 段式)

高速公路匝道採取最佳定時儀控(4 段式)時，其染色體長度為 48，於兩個小時之模擬，達到收斂之世代數為 46，總旅行時間為 4777.08 小時，最佳儀控率組合如表 4.7 所示。

表 4.7 最佳定時儀控(4 段式)之儀控率組合

儀控率 (pcu/小時)	上匝道 1	上匝道 2	上匝道 3	上匝道 4
階段一	626	376	448	747
階段二	519	293	549	627
階段三	133	518	414	627
階段四	37	37	256	508

4. 獨立型 GFLRC 模式

於族群數 = 80、交配率 = 0.7、突變率 = 0.01、成熟率 = 80%等參數值設定下，本模式共經二次反覆運算，經 101 世代尋優最佳之邏輯規則及隸屬函數，於兩個小時之模擬，總旅行時間為 4811.10 小時，於總旅行時間為最小情況下所求得之最佳規則組成、隸屬函數參數及演化尋優過程茲分述如下：

- (1) 最佳邏輯規則其染色體為 3533433323441232353351011，共有 24 條規則入選，此規則組成係獨立型 GFLRC 模式於情境一狀況下，經由基因演算法尋優求得總旅行時間為最小時所挑選之規則，茲列舉如表 4.8 所示。

表 4.8 獨立型 GFLRC 模式之最佳邏輯規則組成

儀控率 (pcu/小時)		主線平均速度 (公里/小時)				
		很慢	慢	普通	快	很快
匝道等候 車輛數 (pcu)	很少	普通	普通	高	低	很高
	少	很高	普通	高	普通	很低
	普通	普通	普通	很低	很高	—
	多	普通	低	低	普通	很低
	很多	高	普通	普通	普通	很低

上表為本研究簡例驗證情境一之最佳邏輯規則組成，一般而言，當主線速度很快且匝道等候車輛數很多時，儀控率應該越高，以有效紓解匝道之等候車輛，反之則儀控率越低，亦即表 4.8 中，由右上角至左下角對角線右半部之匝道車輛紓解率應較高，而左半部之匝道車輛紓解率則較低。然表中所列之邏輯規則卻並非完全呈現此種趨勢，原因其一在於模式於基因演化尋優過程當中，係因某個匝道設定之儀

控率普遍較低，而其它匝道之儀控率較高情況下，所求得之總旅行時間為最小，故上述即為各匝道儀控率綜整推估下之結果，不同一般主線速度越快且匝道等候車輛數越多時，而儀控率越高之趨勢；其二，並不能僅就上述之規則直接推估匝道儀控率，以最右下角之規則而言，當主線速度越快且匝道等候車輛越多時所推估之儀控率很低基本上並不適用，原因在於本研究係應用基因模糊邏輯建構匝道儀控系統，納入模糊之概念，不同於一般邏輯控制系統僅就單一條規則直接推估儀控率，本模式儀控率之推估係透過好幾條規則綜整所得之結果，故最佳規則組成如表 4.8 所示。

(2) 各語意變數之最佳隸屬函數如圖 4.5、圖 4.6、圖 4.7 所示。

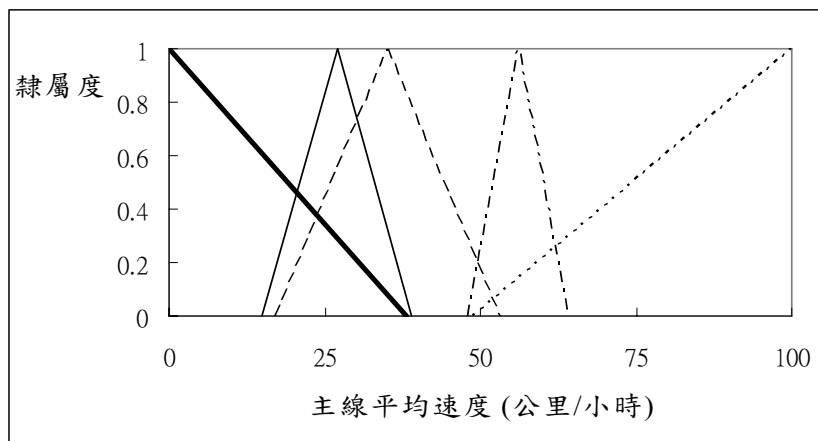


圖 4.5 獨立型模式之主線平均速度最佳隸屬函數示意圖

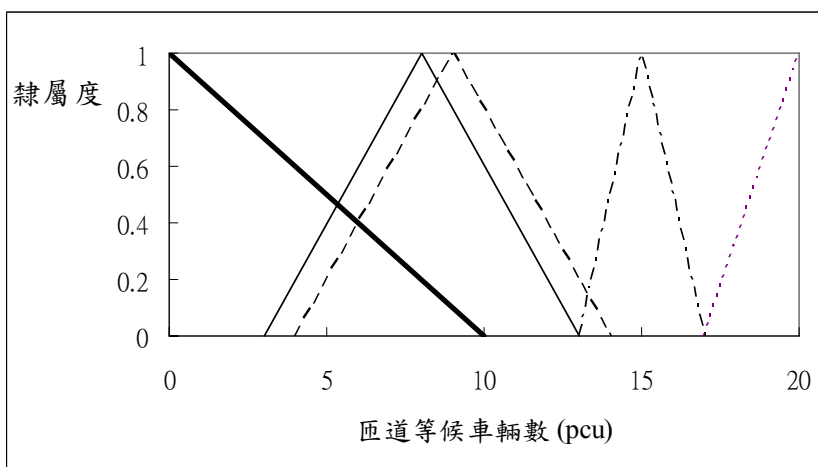


圖 4.6 獨立型模式之匝道等候車輛數最佳隸屬函數示意圖

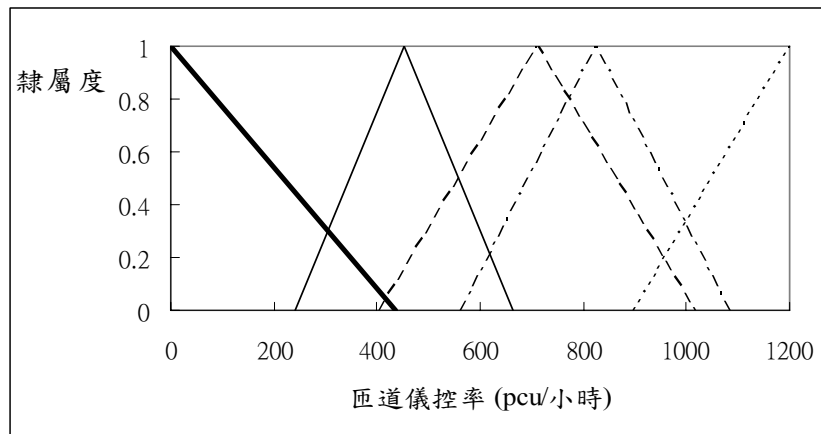


圖 4.7 獨立型模式之匝道儀控率最佳隸屬函數示意圖

(3) 基因演算法演化尋優過程如圖 4.8 所示。

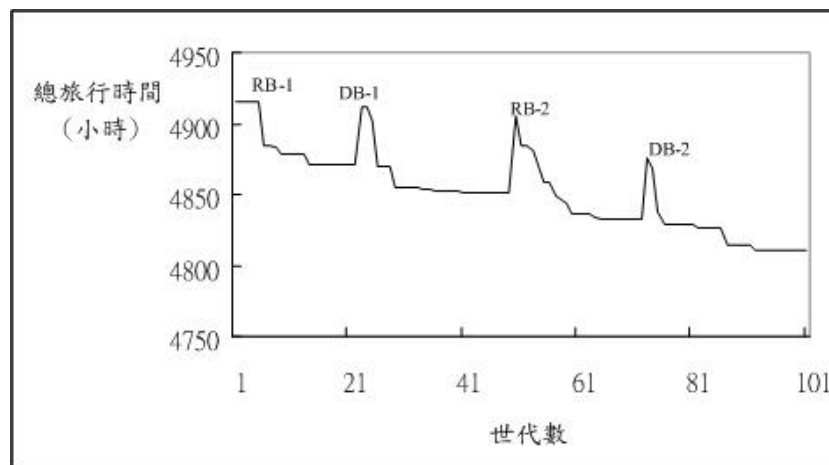


圖 4.8 獨立型 GFLRC 模式之演化尋優過程

圖註：RB-N 代表邏輯規則挑選第 N 次之尋優過程；DB-N 代表隸屬函數校估第 N 次之尋優過程。

結果顯示模式經兩次反覆運算得到最佳解(一次完整演化運算過程係 RB 加上 DB)，共 101 個世代，其中第 1~22 世代為 RB-1(最高值為 4916.18，收斂值為 4871.49)，第 23~49 世代為 DB-1(最高值為 4912.55，收斂值為 4851.85)，第 50~72 為 RB-2(最高值為 4906.86，收斂值為 4833.11)，第 73~101 世代為 DB-2(最高值為 4899.60，收斂值為 4811.10)。

由圖 4.8 演化尋優過程當中可發現，第二次演化運算之最高值比第一次演化小，且收斂值亦是如此，係因 DB-1 係在 RB-1 基礎下所求得之近似最佳解，而 RB-2 又在 DB-1 基礎下求得近似最佳解，故整體尋優之過程如圖 4.8 中所示，收斂過程會呈現向右傾斜之趨勢，最後達到收斂。

5. 整合型 GFLRC 模式

於族群數=80、交配率=0.7、突變率=0.01、成熟率=80%等參數值設定下，本模式共經二次反覆運算，經 91 世代尋優最佳之邏輯規則與隸屬函數，而總旅行時間為 4770.53 小時，所挑選之規則數為 100 條，各變數之最佳隸屬函數如圖 4.9、4.10、4.11、4.12 所示。

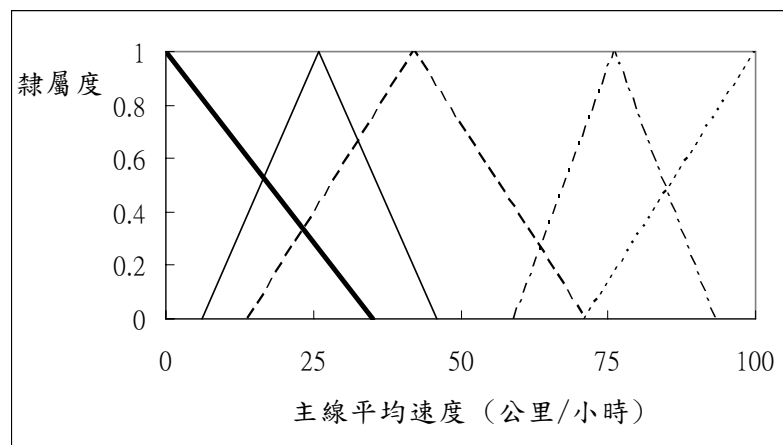


圖 4.9 整合型模式之主線平均速度最佳隸屬函數示意圖

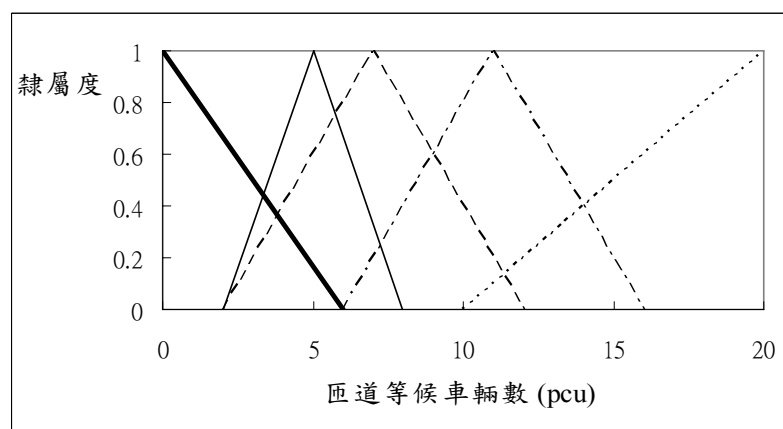


圖 4.10 整合型模式之匝道等候車輛數最佳隸屬函數示意圖

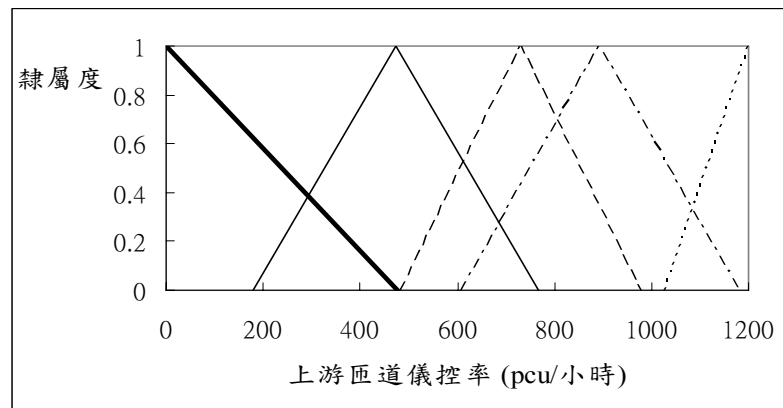


圖 4.11 整合型模式之上游匝道儀控率最佳隸屬函數示意圖

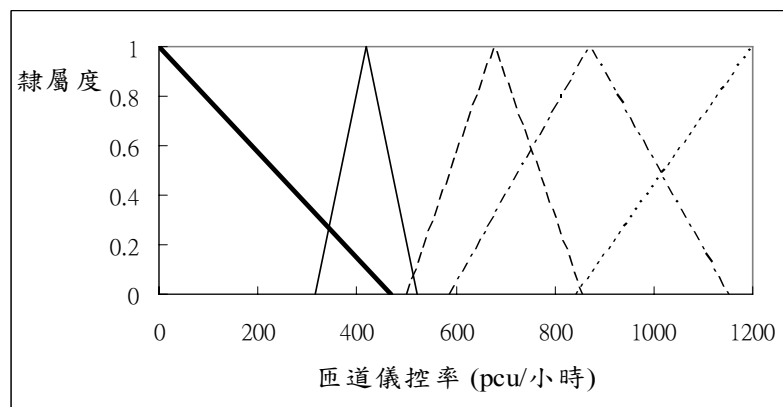


圖 4.12 整合型模式之匝道儀控率最佳隸屬函數示意圖

4.4 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，並針對匝道實施儀控管制後，評估各匝道儀控模式對於上匝道用路人之公平性。

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 4938.43 小時。
- (2) FLRC 模式於兩個小時模擬後，總旅行時間為 4963.83 小時，較匝道不實施儀控時，用路人所花費之時間為多。
- (3) 匝道採最佳定時儀控(1 段式)時，其染色體長度為 12，達到收斂

之世代數為 15，最佳染色體為 334282365524，模擬兩小時之總旅行時間為 4894.31 小時。

- (4) 匝道採最佳定時儀控(4 段式)時，其染色體長度為 48，達到收斂之世代數為 46，模擬兩小時之總旅行時間為 4777.08 小時。
- (5) 獨立型 GFLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 4811.10 小時，所挑選之規則為 3533433323441232353351011 共 24 條，經 101 世代達到收斂，反覆演化次數為二次。
- (6) 整合型 GFLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 4770.53 小時，挑選之規則數為 100 條，經 91 世代達到收斂，反覆演化次數為二次。

表 4.9 情境一模式績效比較表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	4938.43	—
FLRC 模式	4963.83	- 0.51
最佳定時(1 段式)	4894.31	0.89
最佳定時(4 段式)	4777.08	3.27
獨立型 GFLRC	4811.10	2.58
整合型 GFLRC	4770.53	3.40

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 6182.17 小時。
- (2) FLRC 模式於兩個小時模擬後，總旅行時間為 6154.25 小時。
- (3) 匝道採最佳定時儀控(1 段式)時，其染色體長度為 12，達到收斂之世代數為 17，最佳染色體為 042310420622，模擬兩小時之總旅行時間為 5884.78 小時。
- (4) 匝道採最佳定時儀控(4 段式)時，其染色體長度為 48，達到收斂之世代數為 35，模擬兩小時之總旅行時間為 5736.10 小時。
- (5) 獨立型 GFLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 5753.69 小時，

所挑選之規則為 1112121100000005511133101 共 17 條，經 150 世代達到收斂，反覆演化次數為三次。

- (6) 整合型 GFLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 5699.85 小時，挑選之規則數為 70 條，經 227 世代達到收斂，反覆演化次數為三次。

表 4.10 情境二模式績效比較表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	6182.17	—
FLRC 模式	6154.25	0.45
最佳定時(1 段式)	5884.78	4.81
最佳定時(4 段式)	5736.10	7.22
獨立型 GFLRC	5753.69	6.93
整合型 GFLRC	5699.85	7.80

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 8143.33 小時。
- (2) FLRC 模式於兩個小時模擬後，總旅行時間為 7886.18 小時。
- (3) 匝道採最佳定時儀控(1 段式)時，其染色體長度為 12，達到收斂之世代數為 19，最佳染色體為 010323430723，模擬兩小時之總旅行時間為 6934.16 小時。
- (4) 匝道採最佳定時儀控(4 段式)時，其染色體長度為 48，達到收斂之世代數為 38，模擬兩小時之總旅行時間為 6844.12 小時。
- (5) 獨立型 GFLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 6795.38 小時，所挑選之規則為 0010110101411000101140100 共 13 條，經 138 世代達到收斂，反覆演化次數為三次。
- (6) 整合型 GFLRC 於模擬兩個小時後，總旅行時間為 6751.21 小時，挑選之規則數為 75 條，經 187 世代達到收斂，反覆演化次數為三次。

表 4.11 情境三模式績效比較表

儀控策略	總旅行時間(小時)	改善程度(%)
不實施儀控	8143.33	—
FLRC 模式	7886.18	3.16
最佳定時(1 段式)	6934.16	14.85
最佳定時(4 段式)	6844.12	15.95
獨立型 GFLRC	6795.38	16.55
整合型 GFLRC	6751.21	17.10

以下茲就上述模式控制結果彙整如表 4.12 所示。

表 4.12 模式績效之彙整表

情境	主線流量	儀控策略	總旅行時間	改善程度(%)
一	低	不實施儀控	4938.43	—
		FLRC 模式	4963.83	- 0.51
		最佳定時(1 段式)	4894.31	0.89
		最佳定時(4 段式)	4777.08	3.27
		獨立型 GFLRC	4811.10	2.58
		整合型 GFLRC	4770.53	3.40
二	中	不實施儀控	6182.17	—
		FLRC 模式	6154.25	0.45
		最佳定時(1 段式)	5884.78	4.81
		最佳定時(4 段式)	5736.10	7.22
		獨立型 GFLRC	5753.69	6.93
		整合型 GFLRC	5699.85	7.80

表 4.12 模式績效之彙整表(續)

情境	主線流量	儀控策略	總旅行時間	改善程度(%)
三	高	不實施儀控	8143.33	—
		FLRC 模式	7886.18	3.16
		最佳定時(1 段式)	6934.16	14.85
		最佳定時(4 段式)	6844.12	15.95
		獨立型 GFLRC	6795.38	16.55
		整合型 GFLRC	6751.21	17.10

根據簡例各種情境下之控制績效分析，可得到以下幾點結果：

1. 於基因演化過程中，獨立型 GFLRC 之編碼方式係以 25 及 108 個基因分別代表邏輯規則及隸屬函數參數，而整合型 GFLRC 係分別以 125 及 144 表之，基於染色體長度關係，故整合型 GFLRC 尋優收斂時間較久。
2. 分析結果顯示匝道實施 FLRC 模式對於總旅行時間之改善程度並不明顯，其中模式於情境一狀況下之控制結果反而比匝道不實施儀控時，用路人所花費時間較多，顯示主觀設定模糊邏輯控制系統之參數進行儀控率推估之控制績效仍有待改善，基此，本研究運用基因演算法校估模糊邏輯控制系統之參數，以進一步提升控制績效。
3. 由表 4.12 可知，以匝道不實施儀控作為各模式績效之評估基準，模式之控制績效以整合型 GFLRC 為最佳，其中，獨立型 GFLRC 與最佳定時儀控(4 段式)之績效比較則端視交通量之高低、其次為最佳定時儀控(1 段式)、FLRC 模式。由情境一顯示，FLRC 模式之改善程度為 -0.51%、最佳定時儀控(1 段式)為 0.89%、最佳定時儀控(4 段式)為 3.27%、獨立型 GFLRC 為 2.58%、整合型 GFLRC 為 3.40%。

4. 主線流量較低時，本模式(獨立型 GFLRC)對於總旅行時間之改善程度為 2.58%，主線為中等流量時為 6.93%，而主線為高流量時之改善程度 16.55%，由此可知，當高速公路主線流量越大時，本模式之控制績效顯示越佳。

依據上述各模式於各情境之績效分析顯示，確實能夠有效改善用路人之總旅行時間，且當主線交通量越大時，其控制效果顯示越佳。然匝道實施匝道儀控時，若某個匝道之車輛到達率持續大於儀控率時，使得匝道無法獲得紓解之車輛將繼續累積而停留於上匝道處，此種現象對於該匝道等候車輛極不公平；相對的，當匝道儀控率持續大於匝道之車輛到達率時，該匝道之車輛雖可獲得完全紓解，但因主線流量增加，對於下游匝道之儀控率勢必造成影響，造成不公平。故最佳之情況係於儀控率與到達率間取得一平衡點，盡可能維持匝道之儀控率恰好可紓解到達之車輛數，在此即針對 FLRC 模式、最佳定時儀控、獨立型 GFLRC 及整合型 GFLRC 等模式，分析其控制之公平性，其公平性指標計算如式(5.1)所示。

$$F = \sum_{i=1}^n (MR_i - RD_i)^2 \quad (5.1)$$

其中， MR_i 為匝道之儀控率(輛/分鐘)

RD_i 為匝道之車輛到達率(輛/分鐘)

以下茲就各模式於各種情境下之控制結果彙整如表 4.13 所示。

表 4.13 匝道公平性

	情境一	情境二	情境三	平均
FLRC 模式	2681.92	3810.66	5827.09	4106.56
最佳定時(1 段式)	8651.69	24848.65	34534.43	22678.26
最佳定時(4 段式)	19168.70	26755.71	29880.98	25268.46
獨立型 GFLRC	26941.04	46764.91	48350.73	40685.56
整合型 GFLRC	24209.68	25526.60	32566.78	27434.35

由表 4.13 中各模式之公平性指標取平均後顯示，FLRC 之公平性指標值為 4106.56、最佳定時儀控(1 段式)為 22678.26、最佳定時儀控(4 段式)為 25268.46、獨立型 GFLRC 為 40685.56、整合型 GFLRC 為 27434.35。說明了當匝道採取 FLRC 模式時對於用路人而言較為公平，但其控制績效為各模式中較差之儀控策略，而獨立型 GFLRC 控制結果對於用路人最為不公平。



第五章 實例應用

本研究為了進一步探討匝道儀控模式於高速公路實際道路之應用性，實例應用部份係以國道一號北區路段為例，如圖 5.1 所示。該路段總共包括 8 個交流道，其中湖口至南崁等 6 個上、下匝道為本研究欲控制之匝道，分別為湖口、楊梅、中壢、內壢、機場系統及桃園南崁，其中內壢至南崁交流道間 3 個子路段之車道數為單方向 4 車道，而其它子路段則為 3 車道。由南往北單方向行車，起點竹北至迄點林口交流道，其中包括 8 個子路段，由南至北各子路段長度分別為 7.2、14.6、6.8、5.4、4.5、3.4、7.6 公里，控制路段總長度為 49.5 公里。

資料收集方面係以北區交通控制中心所彙集車流資料為主，資料當中包括每五分鐘主線各子路段及各上下匝道進出車流量，而本研究係以星期五下午 5 點至 7 點兩個小時之流量資料，進行匝道儀控並估算其控制後之總旅行時間，評估本模式之改善績效。



圖 5.1 實例高速公路示意圖

5.1 控制績效分析

本模式在真實高速公路路網之控制部份，於兩個小時之模擬後，其結果茲列舉如下：

1. 匝道不實施儀控時，總旅行時間為 7258.51 小時。
2. FLRC 模式於兩個小時模擬後，總旅行時間為 7432.84 小時。
3. 匝道儀控採取最佳定時儀控(1 段式)時，其染色體長度為 18，於族群數=80、交配率=0.9 而突變率=0.01 等參數設定值下，經過 18 個世代演化後，總旅行時間為 7030.96 小時，最佳之染色體為

056424414931820564，其最佳儀控率組合列舉如表 5.1 所示。

表 5.1 實例應用最佳定時儀控(1 段式)之儀控率組合

儀控率 (pcu/小時)	湖口	楊梅	中壢	內壢	機場 系統	南崁
階段 1	67	509	497	1118	985	677

4. 匝道儀控採取最佳定時儀控(4 段式)時，其染色體長度為 72，於族群數=80、交配率=0.9 而突變率=0.01 等參數設定值下，經過 24 個世代演化後，總旅行時間為 6996.57 小時，其最佳儀控率組合列舉如表 5.2 所示。

表 5.2 實例應用最佳定時儀控(4 段式)之儀控率組合

儀控率 (pcu/小時)	湖口	楊梅	中壢	內壢	機場 系統	南崁
階段 1	921	889	414	788	789	689
階段 2	1174	783	424	680	1052	790
階段 3	139	500	616	537	957	993
階段 4	37	511	930	915	947	555

5. 匝道採獨立型 GFLRC 模式時，於族群數=80、交配率=0.9 而突變率=0.01 等參數設定值下，總旅行時間為 7018.57 小時，所挑選之規則為 54443232000401155555555555 共 21 條，經 139 世代達收斂，反覆演化次數為三次。
6. 匝道採整合型 GFLRC 模式時，於族群數=80、交配率=0.9 而突變率=0.01 等參數設定值下，總旅行時間為 6937.31 小時，挑選之規則數為 76 條，經 165 世代達收斂，反覆演化次數為三次。

表 5.3 模式績效比較表

儀控策略	總旅行時間 (小時)	改善程度 (%)
不實施儀控	7258.51	—
FLRC	7432.84	- 2.40
最佳定時(1 段式)	7030.96	3.14
最佳定時(4 段式)	6996.57	3.61
獨立型 GFLRC	7018.57	3.31
整合型 GFLRC	6937.31	4.43

由上述之控制結果顯示最佳定時儀控(1 段式)、最佳定時儀控(4 段式)、獨立型 GFLRC 及整合型 GFLRC 等儀控模式確能夠減少用路人花費之旅行時間，然實施 FLRC 模式之效果不佳。

5.2 敏感度分析

為了探討 FLC 參數極大值設定，亦即上匝道道路容量對於控制績效之影響，本研究試著調整匝道之容量，以原先足以涵蓋實際上匝道之車流量所設定的 1200pcu/小時，逐次加減 100pcu/小時，以匝道不實施儀控為評估基準，比較匝道容量為 1000 至 1500 之控制績效，如表 5.4 所示。

表 5.4 匝道容量之敏感度分析

匝道容量	控制模式	總旅行時間 (小時)	改善差異百分比(%)	總改善程度 (%)
—	不實施儀控	7258.51	—	—
1000	獨立型 GFLRC	7096.50	-1.08	2.23
	整合型 GFLRC	7073.99	-1.89	2.54
1100	獨立型 GFLRC	7093.54	-1.04	2.27
	整合型 GFLRC	7012.51	-1.04	3.39

表 5.4 匝道容量之敏感度分析(續)

匝道容量	控制模式	總旅行時間 (小時)	改善差異百分比(%)	總改善程度 (%)
1200	獨立型 GFLRC	7018.57	—	3.31
	整合型 GFLRC	6937.31	—	4.43
1300	獨立型 GFLRC	6965.98	+0.72	4.03
	整合型 GFLRC	6931.61	+0.07	4.50
1400	獨立型 GFLRC	6951.68	+0.92	4.23
	整合型 GFLRC	6929.51	+0.10	4.53
1500	獨立型 GFLRC	6929.10	+1.23	4.54
	整合型 GFLRC	6920.82	+0.22	4.65

依據每五分鐘為一筆之車流量資料，採取所構建之匝道儀控模式，經兩個小時之控制，可得到以下幾點結果：

1. 根據表 5.3 結果顯示，FLRC 模式、最佳定時儀控(1 段式)、最佳定時儀控(4 段式)、獨立型 GFLRC、整合型 GFLRC 之改善程度分別為 - 2.40%、3.14%、3.61%、3.31%、4.43%，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 GFLRC 之控制績效為最佳。
2. 根據表 5.4 結果顯示，針對上匝道容量進行敏感度分析後，匝道容量由 1000pcu/小時至 1500pcu/小時，本模式對於總旅行時間之平均改善程度分別約 2.83%、3.87%、4.27%、4.38%、4.60%，由此可見，當控制變數(儀控率)參數極大值提升時，模式之控制績效顯得越佳，反之則越差。

第六章 結論與建議

本研究旨在應用基因演算法建構適應性匝道儀控系統(FLRC)之知識庫，依據已知交通流量，以主線平均速度及匝道等候車輛數兩個狀態變數，推估匝道每分鐘之儀控率，模擬各子路段每分鐘之車流狀況，估算主線旅行時間及匝道等候延滯時間。以總旅行時間為績效指標，應用基因演算法採用反覆演化運算之技巧，搜尋最佳之邏輯規則及最佳之隸屬函數參數，採客觀方式建構 FLRC 知識庫，以期控制結果達最佳。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. 本研究中獨立型 GFLRC 模式之編碼係以 25 及 108 個基因分別代表邏輯規則及隸屬函數參數，而整合型 GFLRC 模式係分別以 125 及 144 表之，基於染色體長度，故整合型 GFLRC 模式於演化過程之尋優收斂世代稍多。於反覆演化尋優技巧方面，下層係在上層尋優結果下求得一近似最佳解，收斂過程會呈現向右傾斜之趨勢，最後達到收斂。而在最佳定時儀控模式部份，4 段式因分時段進行儀控，其控制績效較佳且染色體長度較 1 段式為長，故尋優世代較多。
2. 經由簡例及實例分析結果顯示匝道實施 FLRC 模式對於總旅行時間之改善程度並不顯著，顯示主觀設定模糊邏輯控制系統之參數推估匝道儀控率其績效仍具改善空間，故本研究應用基因演算法校估此控制系統之參數，有助於提升其控制績效。
3. 本研究依流量高低設計三種不同情境，於情境一之分析顯示，FLRC 模式之改善程度為 -0.51%、最佳定時儀控(1 段式)為 0.89%、最佳定時儀控(4 段式)為 3.27%、獨立型 GFLRC 為 2.58%、整合型 GFLRC 為 3.40%，整體而言，顯示本模式的確能夠改善用路人之總旅行時間，且整合型模式優於獨立型模式。此外，主線交通量較高，總旅行時間之改善程度亦較佳。對於匝道公平性之評估，顯示以 FLRC 模式對於用路人而言較為公平，而獨立型 GFLRC 之

控制結果於各模式比較中，顯示對於用路人最為不公平。

4. 於實例應用部份，結果顯示 FLRC 模式之改善程度為- 2.40%、最佳定時儀控(1 段式)為 3.14%、最佳定時儀控(4 段式)為 3.61%、獨立型 GFLRC 為 3.31%、整合型 GFLRC 為 4.43%，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。本研究另針對模式中匝道容量進行敏感度分析，結果顯示當控制變數(儀控率)參數極大值提高至 1500pcu/小時，獨立型與整合型模式對於總旅行時間之平均改善程度約為 4.60%。

6.2 建議

1. 本研究所構建之整合型 GFLRC 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，建議後續研究可針對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。
2. 於研究模式中，對於狀態變數與控制變數之隸屬函數參數極大值設定問題，本研究係以主觀方式設定之，而無一套設計準則，此部分仍有待日後研究進行探討。
3. 本研究於樣本訓練時係採離線方式進行，其中整合型 GFLRC 模式採取三個狀態變數及一個控制變數，所需尋優時間稍長，建議後續研究可進一步研擬更有效率之編解碼方式或尋優技巧，以克服此一問題。
4. 本研究係以巨觀車流之角度進行車流模擬，依據車流狀況推估每分鐘之儀控率，並透過 GAs 校估模糊邏輯控制系統參數，以使控制結果達最佳，後續研究可進一步以微觀車流角度，藉由微觀車流模擬軟體模擬各時段車流之狀況，以進行儀控率推估，比較並分析採取微觀與巨觀方式進行模擬時，GFLRC 模式之控制績效及其知識庫組成。

參考文獻

1. 中文部分

- 【1】 朱榮祥，民 80 年，「運用模擬模式決定匝道儀控率之研究」，中華民國運輸學會第 6 屆論文研討會，頁 755-767。
- 【2】 邱裕鈞、藍武王，民 90 年，「應用遺傳演算法建構適應性模糊邏輯控制系統—以跟車行為為例」，中華民國運輸學會第 16 屆論文研討會。
- 【3】 吳心琪，民 91 年，「震災後公路網搶修工程排程之研究」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
- 【4】 張堂賢、莊國欽，民 93 年，「非線性系統於高快速道路整合匝道儀控之研究」，運輸計劃季刊，第三十三卷 第四期，頁 673-698。
- 【5】 張立偉，民 90 年，「災後工程緊急搶修作業排程之研究」，淡江大學運輸管理學系運輸科學碩士班碩士論文。
- 【6】 陳菟蕙，民 79 年，「FREQ8PE 應用於高速公路匝道控制之研究—以五股至內湖段為例」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 【7】 陸勇奇，民 91 年，「高速公路車流速度模擬及匝道交通管理—以台中地區為例」，私立東海大學資訊工程與科學系碩士在職專班論文。
- 【8】 許添本、簡正銓，民 90 年，「匝道儀控密度穩定法之研發」，運輸計劃季刊。
- 【9】 馮正民、邱裕鈞，民 93 年，「研究分析方法」，建都文化事業股份有限公司。
- 【10】 彭浚忠，民 91 年，「模糊多目標震災疏散指派問題之研究」，大葉大學工業工程學系碩士班碩士論文。
- 【11】 賴建華，民 91 年，「適應性基因模糊邏輯號誌控制系統」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
- 【12】 鍾志成、呂文玉，民 88 年，「整合性交通感應式匝道儀控模式及其應用」，中華民國運輸學會第 14 屆論文研討會。

- 【13】 魏健宏、吳耿毓，民 86 年，「智慧型自動化匝道儀控系統之研究」，國家科學委員會研究彙刊:人文及社會科學，第七卷 三期，頁 371-389。
- 【14】 蘇志強、蘇梓見，民 85 年，「高速公路入口匝道控制策略之回顧與比較」，警學叢刊，26 卷 5 期。
- 【15】 蘇志強、蘇梓見，民 86 年，「應用模擬實驗構建高速公路入口匝道儀控模式」，警學叢刊，27 卷 5 期，頁 79-91。
- 【16】 蘇志強、莊弼昌、蘇梓見，民 91 年，「構建高速公路入口匝道儀控專家系統之研究」，交通學報，第二卷 一期，頁 103-128。
- 【17】 蘇恆磊，民 91 年，「遺傳演算法於零工式生產排程系統之應用」，國立海洋大學系統工程暨造船學系碩士班碩士論文。
- 【18】 彭國倫，民 90 年，「Fortran 95 程式設計」，基峰資訊股份有限公司。
- 【19】 「2001 年台灣地區公路容量手冊」，交通部運輸研究所。

2. 英文部分

- 【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】 Bellemans, T.,Schutter, B. and Moor, B., 2004,“Anticipative Ramp Metering Control for Freeway Traffic Networks,”Proceedings of the 16th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems.
- 【4】 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.
- 【5】 Chin, T.C. and Qi, X.M., 1998,“Genetic algorithms for learning the rule base of fuzzy logic controller,”Fuzzy Sets and Systems , Vol.97,pp.1-7.

- 【6】 Gurocak, H.B., 1999,“A genetic-algorithm-based method for tuning fuzzy logic controllers,”Fuzzy Sets and Systems , Vol.108,pp.39-47.
- 【7】 Homaifar, A. and McCormick, E., 1995,“Simultaneous Design of Membership Functions and Rule Sets for Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms,”IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.3,No.2,pp.129-139.
- 【8】 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.
- 【9】 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.
- 【10】 Papageorgiou, M.and Kotsialos, A., 2002,“Freeway Ramp Metering:An Overview,”IEEE Transactions on intelligent transportation systems, Vol.3,No.4,pp.271-281.
- 【11】 Sasaki, T. and Akiyama, T., 1988,“Traffic control process of expressway by fuzzy logic,”Fuzzy Sets and Systems,Vol.26, pp.165-178.
- 【12】 Taylor, C.,Melrdre, D. and Jacobson, L., 1998,“Fuzzy Ramp metering Design Overview and Simulation Results,”Transportation Research Record 1634,pp.10-18.
- 【13】 Yang, X.,Chu, L. and Recker, W., 2002,“GA-based Parameter Optimization for t he ALINEA Ramp Metering Control,”The IEEE 5th International Conference on Intellgent Transportation Systems , pp.627-632.