

國立陽明交通大學
運輸與物流管理學系
碩士論文

Department of Transportation and Logistics Management
National Yang Ming Chiao Tung University
Master Thesis

自駕及人駕混和車流之高速公路格位傳遞模式

Freeway Cell Transmission Model under
Automated and Human-driven Hybrid Traffic
Conditions

研 究 生：徐偉哲 (Hsu, Wei-Che)

指導教授：邱裕鈞 (Chiou, Yu-Chiun)

中華民國一一二年七月

July 2023

自駕及人駕混和車流之高速公路格位傳遞模式
Freeway Cell Transmission Model under Automated and
Human-driven Hybrid Traffic Conditions

研 究 生：徐偉哲

Student：Wei-Che Hsu

指導教授：邱裕鈞

Advisor：Yu-Chiun Chiou

國 立 陽 明 交 通 大 學
運輸與物流管理學系
碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management

College of Management

National Yang Ming Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Logistics Management

July 2023

Taiwan, Republic of China

中華民國一一二年七月

誌謝

首先，這份碩士論文能夠如期完成，衷心感謝我的指導教授邱裕鈞老師，在整個論文撰寫的過程之中，總是願意不斷與我討論，讓我能保有許多自我思考的空間，也會適時提供寶貴建議及方向。研究的路途雖顛簸難行並遇到種種阻礙，老師總會給予我耐心的指導和鼓勵，並且教學方法平易近人，卻又極具深度，這讓我不僅僅是增進了對於車流的相關知識，也提升對於問題的思考能力。

論文口試期間承蒙台灣大學 朱致遠教授與黃家耀教授的細心審閱，不吝指正，並提供寶貴意見，使本論文更臻完善，在此特表謝意。

感謝邱 Lab 的同學、學長姐與學弟妹們，感謝佑星學長在一起修課和車流研究方面提供了許多的幫助與建議，感謝子萱學姊，撥空在我對於 CTM 模式中所遇到困難時給予協助並提供意見，感謝家榮在計劃案數據處理上面的協助，感謝皓全每次的關心，以及特別感謝旻蓉幫助我解決許多疑問及進行小道消息交流。

接著是感謝新竹校區的同學們與學弟妹，參與每一次的活動都玩得非常開心，也謝謝這段日子裡，與室友廷曜一起通宵、一起互相訴說煩惱並互相打氣，為這短暫的研究所生涯增加了許多難忘的歡笑與回憶。另外，也特別感謝梓翔讓我擁有了一個專屬座位，並且在許多時候與我討論各種奇怪的想法以及聽著我說一堆廢話，成為了我研究路上相互砥礪的好夥伴。

另外，絕對非常感謝身旁從國小、國中、高中、大學各階段的好友們，尤其是傑夫、宣寧、侑群、維維、雅婷、Hana、奎興、蘇伯等，對於我一直以來的扶持，不但舒緩剛進入研究所時的惴惴不安，更是會隨時接我電話，聽我訴說和傾倒情緒，並且陪著消解我所有負面的心情與壓力。另外，特別感謝軒弘總是在我程式遇到困難時，伸出他的援手，我能順利畢業他功不可沒。

最後感謝父母從小到大提供我讀書的環境與機會，讓我可以不用為生活擔憂，還全力支持我完成這個碩士學位，感謝父母與阿寶的一路的支持及鼓勵，使我順利完成學業，在此表達我最真摯的感謝。也非常感謝表姊與擇擇學長在我研究所期間，常常與我分享研究所的趣味事情以及過來人經驗。

時光飛逝，歲月如梭，在交大的兩年碩班生活即將結束，回首學生生涯的漫長旅程之中，這段碩士生涯不能說是完美，但真的很美好，深深感受到了無數人的無私付出和慷慨支持，由衷地感謝那些曾在幫助過及支持我的人們。

徐偉哲 謹誌於

國立陽明交通大學 運輸與物流管理學系

中華民國一百一十二年八月

自駕及人駕混和車流之高速公路格位傳遞模式

學生：徐偉哲

指導教授：邱裕鈞 博士

國立陽明交通大學運輸與物流管理學系物流管理碩士班

摘要

隨著自動駕駛相關技術的進步，自駕車的普及率在不久的將來會迅速增長。因此，如何準確地重現在混和車流環境中，關於自駕及人駕之運行行為甚為重要。基此，本研究旨在開發和驗證一個混和車流之格位傳遞模，並進一步研究所提模式的應用性。

為了模擬自駕與人駕的混和車流狀態，本研究於模式中加入任意變換車道機制，係因為考慮到車輛於車道間的橫向變換情形，並針對自駕及人駕的運行行為而給予不同之變換車道設定。為了調整和驗證本研究所提之混和車流格位傳遞模式，蒐集國道五號的偵測器資料及道路幾何設計，並設定短(3km)、中(5km)及長(6.5km)三種路段長度及尖、離峰時段進行實際資料與模擬結果比較。

以人駕之環境對本研究混和車流格位傳遞模式進行驗證，MAPE 值（平均絕對百分比誤差）在不同長度的路段下皆比原始格位傳遞模式之結果更為優良，顯示本研究所提之模式能夠符合實際車流情況。為了進一步展現此模式應用性，本研究以自動駕駛普及率及尖、離峰時段之條件下，基於所提出之混和車流格位傳遞模式，以流量和安全性最大化的目標，使用基因演算法（GAs）求解各時段之最佳儀控率組合。與無匝道儀控的情景相比，最佳儀控率組合能夠有效地提高總通過流量，且隨著自動駕駛車輛的普及率增加，甚至增加到 51.49%。然而，隨著交通量接近道路容量，總通過流量的增加變得不那麼顯著。同時，隨著自動駕駛車輛的普及率增加，總碰撞風險並沒有顯著改善。

關鍵字：格位傳遞模式、混和車流、自駕車、人駕車、匝道儀控

Freeway Cell Transmission Model under Automated and Human-driven Hybrid Traffic Conditions

Student: Wei-Che Hsu

Advisor: Yu-Chiun Chiou

Department of Transportation and Logistics Management

National Yang Ming Chiao Tung University

ABSTRACT

With the advance of automatus technology, the penetration rate of autonomous vehicles will rapidly grow in near future. Therefore, how to accurately replicate the traffic behaviors under hybrid traffic conditions consisting of automated and human-driven vehicles is essential. Based on this, this study aims to develop and validate a hybrid traffic cell transmission model and investigate the applicability of the proposed model.

To simulate the traffic condition with hybrid automated and human-driven vehicles, this study incorporates a discretional lane-changing mechanism to account for lateral lane-changing behaviors. Different lane-changing settings will be designed for both autonomous and human-driven vehicles. To tune and validate the proposed CTM model, traffic data and geometric design of National Freeway No. 5 were collected. Real traffic and simulated traffic are compared at three downstream segments of short (3 km), medium (5 km), and long (6.5 km) and peak and off-peak periods., respectively.

The validation results of the proposed CTM model on pure human-driven traffic show that in terms of mean absolute percentage error (MAPE), the MAPE values are better than the original CTM model at three length of segments, respectively, suggesting the proposed model can satisfactorily replicate the traffic behaviors. To further demonstrate the applicability of the proposed model, the optimal ramp metering rates for various time periods are solved by genetic algorithms (GAs) so as to minimize total collision risk and maximize total traffic throughput based on the proposed CTM model under various penetration rates of autonomous vehicles and peak/off-peak traffic conditions. Comparing to the scenario without ramp metering control, the optimal ramp metering plan can effectively increase total traffic throughput, which is even increased to 51.49% as the penetration rate of autonomous vehicles grows. However, the increase in total throughput becomes less significant as traffic flow reaching capacity. Meanwhile, the total collision risk has not been significantly improved as the penetration rate of autonomous vehicles grows.

Keywords: Cell transmission model, Hybrid traffic, Autonomous vehicles, Human-driven vehicles, Ramp metering

目錄

誌謝.....	i
摘要.....	ii
ABSTRACT.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	v
表目錄.....	vi
第一章、緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範圍.....	2
1.4 研究流程.....	3
第二章、文獻回顧.....	6
2.1 混和車流模式.....	6
2.2 控制策略.....	14
2.3 小結.....	19
第三章、混和車流格位傳遞模式之建立.....	23
3.1 車流基本圖建構.....	23
3.2 混和車流模式建構.....	29
第四章、混和車流格位傳遞模式之驗證.....	34
4.1 參數設定.....	34
4.2 模式驗證.....	35
第五章、匝道儀控最佳化模式.....	46
5.1 模式績效之計算.....	46
5.2 最佳定時儀控模式.....	48
5.3 求解演算法.....	48
第六章、模式應用與分析.....	55
6.1 情境說明.....	55
6.2 控制績效評估分析.....	56
第七章、結論與建議.....	62
7.1. 結論.....	62
7.2. 建議.....	63

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	5
圖 2.1 細胞自動機模型示意圖.....	8
圖 2.2 格位傳遞模式流率及密度關係圖.....	11
圖 2.3 格位併入及分出示意圖.....	12
圖 3.1 不同自駕車普及率下之車流基本圖.....	28
圖 4.1 3KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式.....	38
圖 4.2 3KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式.....	38
圖 4.3 5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式.....	39
圖 4.4 5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式.....	39
圖 4.5 6.5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式.....	40
圖 4.6 6.5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式.....	40
圖 4.7 3KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式.....	42
圖 4.8 3KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式.....	42
圖 4.9 5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式.....	43
圖 4.10 5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式.....	43
圖 4.11 6.5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式.....	44
圖 4.12 6.5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式.....	44

表目錄

表 2.1 人駕車與自駕車之混流模型.....	20
表 2.2 混和車流基本圖構建.....	21
表 2.3 控制策略之相關文獻彙整.....	22
表 3.1 車流基本圖之參數表.....	27
表 3.2 車流基本圖之數值.....	27
表 4.1 基本模式參數表.....	34
表 4.2 各車種換算小客車當量值.....	35
表 4.3 MAPE 模式評估準則	35
表 4.4 驗證資料說明.....	36
表 4.5 驗證結果比較表.....	45
表 6.1 實例資料說明.....	55
表 6.2 無控制之績效表.....	56
表 6.3 尖峰控制之績效表為目標.....	57
表 6.4 尖峰之儀控率表-以 TP 為目標.....	58
表 6.5 尖峰之儀控率表-以 TCP 為目標.....	58
表 6.6 尖峰之儀控率表-以 TCP+TP 為目標	58
表 6.7 離峰控制之績效表為目標.....	60
表 6.8 離峰之儀控率表-以 TCP 為目標.....	61
表 6.9 離峰之儀控率表-以 TP 為目標.....	61
表 6.10 離峰之儀控率表-以 TCP+TP 為目標	61

第一章、緒論

1.1 研究背景與動機

隨著人們的生活水平越來越高，私人運具的普及程度逐漸增加，幾乎家家戶戶皆擁有汽車。其中高速公路提供快速、舒適及安全的服務，對於陸運之重要性不言而喻，然而，隨著經濟的進步，使用高速公路之交通量急遽增加，造成需求已超過當初興建時所設計之容量。現有的交通管理方法，包括增加道路容量、增加交通管制等等，儘管可以在一定程度上緩解交通壅塞的問題，但這些改善方法仍然無法滿足快速增長的交通需求，使得壅塞情況反覆的發生。除因道路容量問題外，亦有人為因素造成的干擾使壅塞發生，如車輛的不正常變換車道行為、緊急煞車行為、匝道匯入匯出交織等，這些因素正會使得前方之車輛進行不正常之加減速，進而使車流產生衝擊波回傳至後方車輛，進而影響後方車流運行狀態，導致交通壅塞和交通事故的發生。

隨著科技進步與通訊技術的快速發展下，自動駕駛技術被視為未來的交通趨勢，因為透過電腦精準的操控與判斷，以及藉助車輛間的通訊和協調功能，能以確定、最有效之路線行駛，並且一同運作、移動，除擁有較短之車輛間距，還可擺脫不必要之急煞情形及發生人為判斷錯誤，將進一步提升道路上之行車效率與安全性，以及提供更加有效和安全的匝道匯入和匯出控制，減少衝突和交織，提高交通流的順暢性。因此，自動駕駛技術是一個重要的解決方案能有效地策略來應對交通壅塞問題。

目前市面已有相關之自動駕駛輔助系統，如自動緊急煞車系統 (Automatic Emergency Braking, AEB)、自適應巡航控制系統 (Adaptive cruise control, ACC) 等，而未來也將逐步將完整的自動駕駛技術應用於車輛上。

不過，自動駕駛技術的普及還需較長之時間，因此在未來一段時間內，道路上將會出現人類駕駛車輛 (Human Driven Vehicles, 人駕車) 與自動駕駛車輛 (Autonomous Vehicles, 自駕車) 所組成的混和車流，除能減少人為上之操控錯誤，並可帶來更精確的操作控制，將會為當前僅有人駕車的交通狀態帶來相當程度的改變，包括車流穩定度及容量改變，因此需要探討在不同比例的自駕車環境對於車流變化，而此正為本研究之研究動機來源，同時，為確保模式的應用性，後續將進行匝道儀控控制策略的延伸探討，了解其控制對於道路績效的影響。

1.2 研究目的

依據前述的研究背景與動機，本研究欲探討在不同自動駕駛車輛比例下對於高速公路車流運作下的影響，以及匝道儀控策略對此環境下的車流運作績效。本研究將回顧人駕車與自駕車之混和車流模式及匝道儀控策略，並探討在不同自駕車普及率對於車流模式的相關參數設置，並透過此模式預估整體高速公路的車流運作情形，進而針對該模式的應用，提出於主線道下游之匝道儀控管制措施，避免主線道擁塞狀況發生，以維持高速公路之服務水準。基此，本研究的主要研究目的如下：

1. 透過文獻回顧，了解與探討人駕車與自駕車所組成之混和車流模式，以及了解高速公路匝道儀控之內容及效果，並選擇適用於研究範圍之相關模式。
2. 發展適用於我國高速公路情境之混和車流模式，並探討是否能合理地模擬實際的車流情形，再以此車流模型進行模擬。
3. 以所提的人駕車與自駕車所組成之混和車流模式為基礎，將其用以延伸建構高速公路匝道儀控策略，確保模式應用性。
4. 分別探討與比較以車流效率及車流安全目標下，進行尖、離峰情境，不同自駕車普及率之最佳控制運作績效。

1.3 研究範圍

車流模型是一種描述車輛如何在道路運行的數學模型，用來預測交通流量、壅塞情況、道路容量等，其結果則可用以優化交通設施運作或是制定相關交通政策等，而車流模型也會因組成的車輛種類或是擁有不同的交通行為而有不同的模型設定。

混合車流(Mixed traffic flow)指道路上包含多種類型的交通工具，例如汽車、機車、公車等。混合車流是最常見的道路交通狀況，其交通流量可以由道路容量、交通需求、交通設施等多種因素決定。異質車流(Heterogeneous traffic flow)指道路上包含不同駕駛風格的交通工具，例如保守駕駛人和激進駕駛人。異質車流對交通流量和交通安全都有影響，因為不同駕駛風格的交通工具在道路上互相影響。混和車流(Hybrid traffic flow)則是指道路上包含自駕車和人駕車的交通工具，而混和車流與傳統車流不同，因為自駕車擁有更高的自主性。

混合車流、異質車流和混和車流可以進一步區分和分析，對於混合車流，可以將其視為不同類型交通工具之間的競爭，而設有不同的自由流速度、最大加速度和減速度等。對於異質車流，可以將其視為不同駕駛風格之間的競爭，通過對不同的司機設定不同的參數來建模，如一些司機可能比其他司機更激進或更保守，這些差異可以在通過速度和加速度的差異來表示。對於混和車流，可以將其視為相同交通工具之間因為功能不同的協調和競爭，通過不同行為參數的設定來表示其差異。

本研究主要探討在高速公路上擁有自駕車及人駕車的混和車流(Hybrid traffic flow)運行情況，並針對其應用性提出最佳匝道儀控策略，評估其安全性指標和效率指標之績效。由於高速公路車流在匝道匯入交織處，必會因壅塞而產生向後之衝擊波，此衝擊波造成延滯產生，進而影響整體車流之旅行時間、流量。此外，在匝道上游車輛或匝道匯入處若無交通管制措施，上游車輛到達瓶頸路段時由於衝擊波之效應使原先高速行駛之車輛需在短時間內降低速度，此劇減速之行為勢必會產生安全性降低之問題。

本研究僅針對高速公路上的車流情況進行分析，而非一般道路上的汽車和機車混合車流。考慮到目前自動駕駛技術仍處於研發階段，還未能合法行駛上路，未有足夠相關真實數據，因此，本研究將以數學模型進行模擬，並進行相關假設，研究結果將提供有效的控制策略建議，以讓在未來擁有自駕車及人駕車二者的道路情況下，使得道路情況能夠更安全且有效率。

1.4 研究流程

本研究欲建立，並於本章將介紹研究流程與內容，詳細流程圖 1.1 如所示，本研究內容敘述如下：

1. 研究目的確認

根據研究背景與動機，確立研究目的，並界定合適的研究範疇。

2. 文獻回顧

針對巨觀、微觀模式在高速公路擁有人駕車與自駕車的混和車流應用進行深入地分析，以了解各車流特性下之車流表現，並從中學習並擬定本研究應用的車流模式及相關參數設定。另外，為確保模式之應用性，將加入控制模式進行延伸，因此將蒐集各種高速公路所使用之控制策略及其演算法，並針對其理論基礎、數學模式進行了解。

3. 人駕車與自駕車之混和車流模式建立與驗證

根據文獻回顧的結果，發展以 CTM 為基礎之混和車流模式，針對 Daganzo (1994) 及 Daganzo(1995)中格位傳遞模式問題定義與架構作整合介紹，同時，針對研究情境進行模式的調整及參數的修改。在資料蒐集部份，為增加實證研究的可靠性，以目前現有之高速公路偵測器資料進行驗證，確認其車流模式描述車流行為的能力。

4. 車流控制策略模式之建立

確保模式之應用性，結合控制策略模式與 CTM 混和車流模型，建構高速公路匝道儀控策略，目標為最大化之總通過流量及安全性，並使用基因演算法進行最佳化儀控率求解。

5. 模式績效評估

將前述所建立之模型應用於路段情境模擬，包括尖、離峰時段、不同自駕車普及率等，透過不同設計情境的模擬實驗和分析，以混和車流模型模擬出各情境下之各時段最佳化匝道儀控率之績效，並比較方案間控制策略的異同及結果判斷其變化。

6. 結論與建議

綜合以上各階段之內容進行成果與結論探討，並對於後續研究及本文所考慮不足的地方或未來研究建議方向亦於此階段陳述。

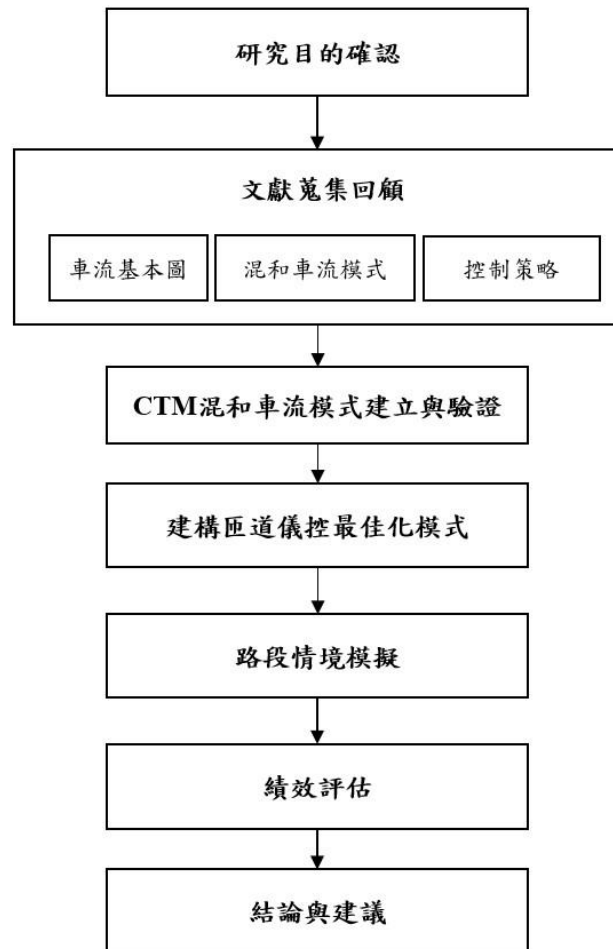


圖 1.1 研究流程圖

第二章、文獻回顧

本研究之目的為探討在不同自動駕駛車輛比例下對於高速公路車流運作下的影響以及後續之應用性，將針對不同情境下之車流情形提出相關最佳化控制策略，探討其道路績效提升之情況，因此文獻回顧的內容將以高速公路車流行為及匝道儀控之相關控制策略為主，學習過去研究與文獻之使用之分析方法，以作為本研究後續工作之參考基礎。

本章節主要分為兩個部分，第一部分回顧說明目前國內外人駕車與自駕車之混和車流模式相關的文獻進行回顧與整理，以及總體模式所需之車流基本圖推導之方法與模型進行整理，第二部分則為回顧匝道儀控策略，並整理所使用之控制演算法。

2.1 混和車流模式

自駕車在道路上帶來更小的安全間距及更快速的反應時間，因此目前在模擬人駕車與自駕車之混和車流行為方面，多使用微觀模式進行分析，因其微觀可針對個別車輛，利用間距、速率以及駕駛者反應時間等參數，模擬個別車輛對於附近車輛行為的反應與行駛軌跡。不過，隨著未來自駕車在道路上之比例逐漸提升，將影響道路上之整體車流穩定度及容量的改變，透過總體視角了解路段車流情形，則可做為該路段服務水準評估之用，因此著重總體車流特性描述其整體道路之運行狀態也是有其必要性，因此以下將依照微觀及總體之角度，對高速公路人駕車與自駕車之混流模式文獻進行整理。

2.1.1 微觀車流模式

微觀車流模擬是一種研究車輛在不同情境下採取不同行為的方法，情境包括跟車、變換車道、超車等行為，其中又以跟車行為最被廣為研究與使用。另外，對於人駕車與自駕車混流的研究中，因需考慮自駕車的特性和行為，模型必須考慮到不同車輛的加速、減速、變換車道等行為設定，並且需要考慮車輛之間的互動關係，因此經常以智慧駕駛模式和細胞自動機模型來擴展模擬。

1. 智慧駕駛模型(Intelligent Driver Model)

智慧駕駛模型為 Treiber et al. (2000) 為了使車距的跟隨與保持能夠與現實更為符合，針對 Gipps (1981) 所提出之安全距離模型進行改善，以煞車減速及最大可接受加速度、車輛相對速度等變數去計算出理想車距，並以此理想車距為基礎，計算其所相對應的加速度，下式(1) 為運動方程式，式(2) 則為動態期望距離。

$$a = \alpha[1 - (\frac{v}{v_f})^\delta - (\frac{s^*(v, \Delta v)}{s})^2] \quad (1)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{\alpha\beta}} \quad (2)$$

其中，

a ：加速度值

v ：實際速率

v_f ：自由流速率

Δv 與前車速度差

δ ：加速度指數

s^* ：期望動態間距

s ：實際車輛間距

s_0 ：車輛最小間距

T ：時間車距

α ：最大加速度值

β ：最大減速度值

式(1)之運動方程式前半部代表期望加速度，當車輛速率為零時，會以最大加速度前進，若速率越接近期望速率，加速度值則會變小，而式(2)則代表煞車延遲，將實際車輛之距離與動態期望距離進行相比，動態期望距離是為最小間距、反應時間移動距離與煞車緩衝距離相加之結果，此差異越小，則減速度值越大。

Sun *et al.* (2018) 探討分析不同自駕車普及率的穩定性，而研究結果發現路段的容量隨著自駕車佔比的增加而逐漸增加，這代表自駕車是可對現有道路的通行能力進行改善，並分析出期望的時間間距是反映自駕車行為的重要參數。

Xie *et al.* (2019) 發現人駕車與自駕車混和車流之穩定性與自駕車之佔比與空間分布情形有關，並依此結果制定穩定性函數，再依此改進智慧駕駛模型，而模擬結果表明認為自駕車將可以使車流穩定區域擴大，降低交通壅塞的情況發生，並且提高交通效率。

楊雅媛(2021) 建立適用於城市情況之車流混成模型，該研究以全速差模型表示人駕車之行為狀態，而自駕車之行為狀態則採用智慧駕駛模型表示，經由隊列穩定性、衝擊波、衝突量，分別探討在路口自駕車不同的決策行為將對車流造成的影響，研究結果顯示若自駕車的行駛策略過於保守，將使車隊列拉長且難以消散，而如果行駛過於積極，事故風險則會大幅提高，若各自駕車的決策邏輯相差甚遠，則會提升在車流交織點發生事故的可能性。該研究以一個真實路口進行案例模擬，發現保守策略之自駕車不適合行駛於高流量路段，而積極策略之自駕車則不適合行駛於高流量又會碰到許多路口的路段。

2.細胞自動機模型(Cellular Automaton Model)

細胞自動機(cellular automaton, CA) 最早是由 John von Neumann 在 1951 年所提出，該模型模擬生物細胞自我複製之情形，將其系統切割為多個細胞，並隨著時間的改變，細胞依據其自身與周遭細胞狀態產生下一個時刻的狀態，而其離散格位概念能可應用於多項領域，包括數學、生物學、化學、物理學。

1992 年，Nagel 和 Schreckenberg 將其細胞自動機概念，用於模擬車行為，以網格的狀態來劃分格位以模擬在高速公路車流中每一輛車的移動情形，並訂定了加速、減速、隨機減速、車輛移動等規則。圖 2.1 為其 CA 模型示意圖，模型為多個格位形成一系統，代表道路，而一輛車則佔據一個格位，代表其每個格位皆可為有車及無車之狀態，並經由追蹤車輛在格位上的變化，模擬出停止前進現象(stopandgo)以及自由流與壅塞流之間的遲滯現象(hysteresis)，而此模型又稱為 NS 模型，後續發展的交通細胞自動機模型幾乎都以 NS 模型為基礎進行延伸與改良。

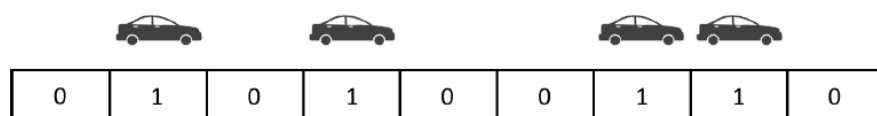


圖 2.1 細胞自動機模型示意圖

Liu *et al.* (2017) 認為自動駕駛技術之車輛將徹底改變道路運輸系統的運行，欲整理出人駕車與自駕車之混和車流特性，因此以自駕車佔比與變換車道相關參數為變數，建構一改良之細胞自動機模型，探索混和車流之時空交通特性，所得知結果發現自駕車的引入，可大幅度改善道路容量及自由流速率，並且隨著自駕車佔比越高而呈現正向成長。

Yang *et al.* (2021) 提出一考慮安全距離和與匝道協作之改良細胞自動機模型，並針對 NaSch 模型規則進行改進，並依此模擬不同的自駕車佔比下在空間中的分布與運行狀況，在交通效率方面，發現當流入之車流量較大時，自駕車佔比越高的情況下，流出之車流量也呈現正成長，但如果流入之車流量較小時，佔比則較不會影響流出之車流量大小，此也說明了自駕車能夠有效改善道路效率問題。另外，在交通安全方面，研究中透過碰撞時間(TTC)作為安全績效評估，結果表明自駕車能夠增加在壅塞情況下增加安全性，緩解了走走停停的交通情況，大幅降低其碰撞風險。

2.1.2 總體車流模式

總體車流模式旨在描述一群車的運行行為，利用總體車流模式中之速率—密度—流量彼此之間的關係(函數)，用函數圖形來描述車輛的時空運行的行為，可有效地分析交通環境變化對車流產生之影響。

1. 車流基礎構圖

車流基礎構圖是發展總體車流模式過程中重要的一部分，其係將密度、速率及流率三個車流參數兩兩分成一組，並呈現其彼此之間的關係。同時，CTM 的使用上，必須搭配車流基本圖以確認其格位最大容量及衝擊波速度等相關參數，而車流基本圖的建立主要使用兩種方法，第一為數據驅動方法，透過在現實世界運行自駕車所得之數據進行參數校估，但由於現實交通環境中更為複雜，因此大多研究多為選擇透過假設車流呈現為均勻狀態，以微觀模型進行車流基本圖的推導，以下將蒐集從不同模型對具有自駕車的車流基本圖建構方式的相關文獻回顧整理。(Zhou *et al.*, 2020)

Levin 和 Boyles (2016) 透過 Kometani & Sasaki (1959) 所建立的跟車模型，根據自駕車和人駕車不同的反應時間求出其最小車輛間距後，進而推導在其二車種不同比例下的流量密度關係。

Ye 和 Yamamoto (2018) 採用以 CA 模型為基礎建構的 Two-state safe-speed model (TSM) 以模擬道路的運行情況，為考慮人駕車與自駕車混和之車流，加入

以 ACC 模型所建立的自駕車的操作規則以及變換車道模型，以模擬在不同自駕車普及率下流量密度之關係，同時，為探討不同能力之自駕車車輛，設置三種反應時間作為能力上的差異，分別為 1.1s、0.8s 及 0.5s，而其結果表明在自駕車普及率達到 30%之前，道路容量的增加是漸進的，也代表其自駕車能力的差異對增長率的影響是微不足道的，不過在自駕車普及率超過 30%時，容量增長的幅度受到反應時間差異的影響明顯。

Qin *et al.* (2019)及 Pan *et al.* (2021)皆以 Jepsen (1998)所改進之 Kometani & Sasaki (1959)的跟車模型為基礎，其認為車輛間距受其反應時間所影響外，同時具有固定的最小緩衝距離，而其結果都為表明隨著自駕車的普及率越高，其車道容量同樣大幅上升。

Wu *et al.* (2022)為探討由人駕車、ACC 及自駕車車輛等不同類型車輛組成的車流情況以及分析自駕車在混和車流中的退化情況，人駕車採用 Newell(2002)的跟車模型、ACC 及自駕車則分別採用 PATH 實驗室所建構之 ACC 模型及 CACC 模型模擬其運行情況，再依照不同自駕車普及率的情況，推導混和車流基本圖，其結果同樣發現自駕車可以提高道路的容量，不過當普及率低於 60%時，因為人駕車車流中佔比較大，跟隨人駕車的自駕車將從自駕車車輛退化成 ACC 車輛，而 ACC 車輛之反應時間與人駕車車輛沒有明顯區別，因此容量增加緩慢。然而，當自駕車普及率超過 60%時，自駕車車輛在車流佔比變大，且自駕車間的間距較小，更能有效提高了道路容量。

2. 格位傳遞模式(Cell transmission model ,CTM)

格位傳遞模式是 Daganzo(1994;1995)所提出，用以建構其來模擬車流在空間與時間上流動之行為，而此模式是透過車流流體理論之概念引申而來，係將時間切分為數個時階，再以路段為基礎，並於空間上將其路段劃分為多個同質的格子，稱作為「格位」。模式假設一均質路段上僅有兩端的出入口，這些格位長度會依據車輛在自由流速率下，在單位時間內所行走的距離推算所得，且車輛在自由車流情況下，可以隨著時間的推移前進下一個格位內，同時，透過描述格位中的巨觀車流參數(流量及密度)，表現該路段在每一個時間步階的車流狀態，因此不需要考量車輛在格位裡的位置，其關係式如下式(3):

$$n_{i+1}(t+1) = n_i(t) \text{ for } t = 0,1,2 \dots, T \quad (3)$$

$n_i(t)$ ：時間 t 時，在格位 i 的車輛數

$n_{i+1}(t+1)$ ：時間 $t+1$ 時，在格位 $i+1$ 的車輛數

上式(3)是指非壅塞狀態時，車輛依舊能在自由流速率下行走，而當出現壅塞之情況，模式則新增兩個變數及，其關係式如下式(4):

$$y_i(t) = \min \{n_{i-1}(t); Q_i(t); N_i(t) - n_i(t)\} \quad (4)$$

$y_i(t)$ ：時間 t 時，進入格位 i 之車輛數

$n_{i-1}(t)$ ：時間 t 時，格位 $i-1$ 之車輛數

$Q_i(t)$ ：時間 t 時內，格位 i 能流入格位內之最大車輛數

$N_i(t) - n_i(t)$ ：時間 t 時，格位 i 剩餘空間中能容納車輛數

根據以上關係，在時間 $t+1$ 時，格位 i 的車輛數等於在格位 i 在時間 t 的車輛數加上淨流入車輛數，其關係式表為：

$$n_i(t+1) = n_i(t) + y_i(t) - y_{i+1}(t) \quad (5)$$

格位傳遞模式本身就是利用時間的更新去遞迴計算每一時間點上在各個格位內的車輛數，而格位內的車輛數即代表密度，因此，透過上述式 4 及式 5 可用以表達流量與密度的時空變化關係。

由於格位傳遞模式與 LWR 的流體模式之間有著相似的關係，此關係以一種等腰梯形表示如圖 2.2，而其假設流量與密度關係式如下式(6):

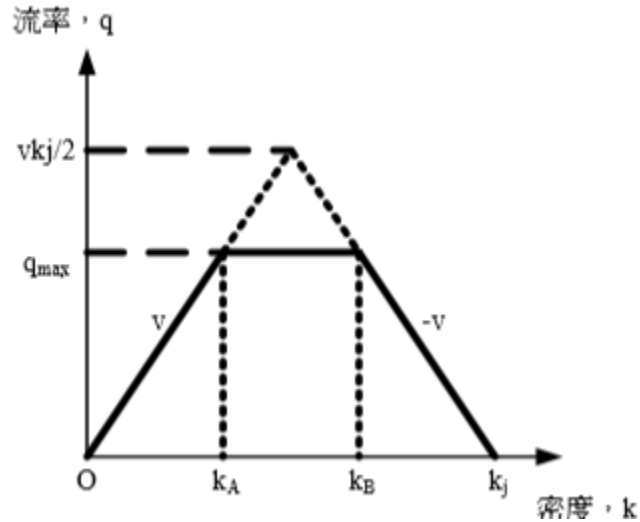


圖 2.2 格位傳遞模式流率及密度關係圖

$$y_i(t) = \min \{vk, q_{max}, w(k_j - k)\} \quad (6)$$

v : 自由車流速率

k_j : 飽和密度

$q_{max} \leq \frac{k_j v}{2}$: 最大流率

假設每單位時間間隔是為 1 單位，則格位長度為 $v * 1 = 1$ 。因此， $k = n_i(t)/v = n_{i-1}(t)/v$ (均質狀態下)、 $k_j - k = N_i(t)/v - n_i(t)/v$ 、 $Q_i(t) = q_m$ ，其關係式表示如下：

$$y_i(t) = \min \{n_{i-1}(t), Q_i(t); \frac{w}{v}[N_i(t) - n_i(t)]\} \quad (7)$$

Daganzo(1994;1995)針對格位傳遞模式進一步修正並擴展至路網模式之應用，考慮到車輛於道路中具有併入及分出之運行行為，將原模式加以修正，因此，除了一般的格位相接的情況(ordinary)外，並額外分類出分出(diverge)及併入(merge)兩種類型，如圖 2.3 所示，一般情況為無併入及分出，為一條進入節線及一條離開節線，而併入則為兩條節線進入格位，以一條離開格位，分出以一條線進入分出之格位，透過兩條節線離開格位，由以上概念，考慮分出併入之格位傳遞模式係將原模式加入分出併入參數，建構路網之格位傳遞模式。

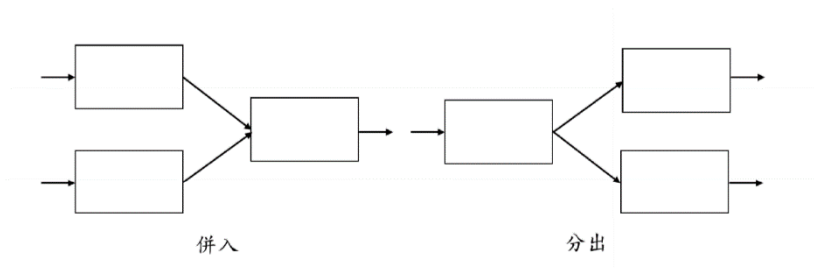


圖 2.3 格位併入及分出示意圖

以上是為格位傳遞模式的基本原理，而後續許多學者依照現實況之不同條件，調整其相關參數以讓模式更加符合現實情況，而此模式更被以其為基礎探討許多不同領域之議題，如號誌控制、汽機車混和車流以及高速公路之匝道儀控等等，近期則有多篇文獻將其模式進行調整，以用於模擬人駕車與自駕車之混和車流，以下將整理相關之文獻。

Qin *et al.* (2019) 認為使用宏觀之角度解決交通問題非常重要，因此擴展 CTM，首先，考慮不同的自駕車佔比下之基本車流構圖，如自由流速度、最大流量、擁擠密度和衝擊波速度等，再依此提出了針對不同自駕車普及率之混和車流 CTM，並透過數值模擬，評估在不同自駕車普及率下，車流狀態受到交通

事故的影響情形，同時使用跟車模型進行驗證，發現二者之數據結果之間具有一致性，表明 CTM 可用以模擬人駕車與自駕車之混和車流。

Pan *et al.* (2021) 建構多車道之人駕車與自駕車 CTM 混和車流模型，首先，量化關於自駕車在不同的普及率情況下在車流基本圖裡的變化，並且考慮車輛類別之間的交互作用，包括車道變換的動機及換道的最小可被接受間距，最後以 CTM 流量守恆定律，來考慮車輛變換車道情況後的車流情況與密度。

Jin *et al.* (2022) 提出一可調格位長度之 CTM，相關 CTM 所使用之參數則採用汽車跟隨模型進行推估，並於汽車跟隨模型中依據不同比例之自駕車設定進行數值推算，後續則通過智慧駕駛員模型 (IDM) 的微觀角度對該 CTM 模式進行比對，驗證了該模式的有效性。結果發現隨著自駕車的普及率增加，交通流量和壅塞時的消散能力將會同步增加，而在同質車流的狀態下，自駕車的車流量可高出人駕車的車流量約 1.41 倍，擁堵消散時間可減少 25%，而且還是隨著普及率越大，其改善的效果越明顯。

2.2 控制策略

高速公路提供良好之機動性給予用路人，在主線的車流運行上並不受到任何的交通號誌控制，可當車輛使用率提高，使得高速公路的需求增加，並且需求量大於高速公路的設計容量時，將會使得車流從非壅塞進入壅塞的情況，進而造成高速公路的績效下降，因此實施有效的交通控制策略變得極為重要，將可直接影響路網的運行效率，而目前常應用於高速公路上的車流管制措施，包含匝道儀控、高乘載管制、路肩開放行駛及透過可變資訊標誌提供駕駛人資訊導引。以下將針對匝道儀控之文獻進行整理，以了解藉由匝道儀控原理及相關研究文獻。

2.2.1 匝道儀控原理

以實務方面而言，目前國內、外之匝道儀控為最廣為使用之控制策略之一(陸勇奇,2002)，透過入口匝道處之號誌、標誌、標線及相關設備，控制進入高速公路主線之流量，避免過度湧入的車流造成主線擁擠，來使得高速公路主線的順暢及達一定之服務水準，並且儀控率可根據路段的主線流量情況變化調節。

匝道儀控之基本控制原理有二，第一為基於車流模式來計算各匝道之儀控率，使主線之流量能維持在一定水平，這意味著當主線流量增加時，匝道流量也會相應減少，以維持整體流量的穩定。其次，採用期望之最大佔有率，即通過流量最大時所對應佔有率值來計算各匝道之儀控率。(鄒政修,2012)

當高速公路上的車流量過高時，將使得車流由穩定狀態轉到不穩定狀態，儀控系統可以降低進入匝道的車輛流率，以防止過多的車輛同時進入高速公路而導致壅塞。相反，當道路上的車輛流量減少時，系統可以增加儀控率，以提供更多車輛進入高速公路，同時，匝道儀控能夠視主線可接受交通量的程度調整進入的車流，減少因為連續匯入主線的車隊所造成對原來車流的干擾衝擊。

在儀控率的部分，則利用匝道之號誌調節進入高速公路車輛的流率，並且可根據實施地點之交通需求、高速公路容量和匝道等候長度而定。匝道除了各匝道的進行獨立儀控作業外，也可以與主線路段上其他的匝道進行連鎖，進行各匝道不同儀控率的多種組合，進而提升整體高速公路績效。同時，匝道儀控減少擁擠與擁擠所帶來的負面效應例如意外事故、延滯、廢氣排放與燃油消耗等。而匝道儀控之方法則分為下列幾種分類(李怡穎,2013)

1. 定時式匝道儀控策略(Pre-Timed Ramp Metering)

時儀控所使用的號誌週期均按不同時日事先予以設定，主要透過歷史的偵測器資料，以達到紓解重現性擁塞所實行的預防性交通控制。而其優點是控制邏輯簡單，缺點則為無法及時反映主線及匝道需求的變化，無法避免非重現性的車流壅塞情形。

最佳化定時匝道儀控最早是 Wattleworth *et al.*(1965)首先利用線性規劃方法求解，該方法將匝道控制最佳化視為一資源分配問題，即高速公路容量為有限之資源，由各進口匝道流量分配之，此模式僅能處理穩定狀態之匝道儀控 (Steady-state Control)，其目標式為

$$\text{Max } J = \sum_{j=1}^N \int_0^T [l_i(t) + \rho_j(t) \cdot \Delta_j] dt \quad (8)$$

subject to

$$q_j = \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} \cdot r_i$$
$$q_j \leq Q_j$$

其中，

T ：儀控總時間

N ：高速公路路段總數

$l_i(t)$ ：第 i 進口匝道在第 t 時間之等候車數

$\rho_j(t)$ ：第 j 路段於 t 時的車流密度

Δ_j ：第 j 路段之長度

r_i ：第 i 進口匝道進入高速公路之流率（儀控率）

α_{ij} ：第 i 進口匝道進入高速公路之車輛通過 j 路段之比例

此模式為一假設車流處於穩定狀態，由第 i 進口匝道進入高速公路之車輛在各時段內通過 j 路段之比例固定，這表示此模式尚針對控制範圍內各路段間之速率與密度的動態變化進行考慮，因此模式內不容許出現不穩定車流，因此又稱之為平常日儀控 (Time-of-day Control)。

2. 反應式匝道儀控策略 (Reactive Ramp Metering Strategies)

反應式匝道儀控策略與前述之定時儀控的差別在於前者的儀控率並非事先設定，而是採即時之交通資料計算下一控制時段之儀控率，對交通狀況變數較大之狀況能即時因應，惟需要較多設備進行即時資料蒐集，控制邏輯亦較複雜。而如為考慮單一匝道的控制，而忽略匝道之間的互動，在這種控制策略中，則稱獨立反應式匝道儀控策略，其中包含需求—容量控制、佔有率控制和 ALINEA 策略等方式。

需求—容量控制策略是根據上游車流需求和下游匝道瓶頸容量之間的比較來決定控制策略。然而，僅依靠車流量資料不能準確判斷高速公路是否壅塞，因為低流量時可能發生交通壅塞或交通順暢兩種情形。因此，需要引入佔有率（即車輛通過偵測器的時間總和與總偵測時間的百分比）來判斷交通情況。根據過去交通資料分析，可以找尋一個臨界值作為指標，當主線的佔有率超過這個臨界值時，可以判斷為交通壅塞，如果佔有率低於臨界值，則儀控率可以由匝道上游流量與下游容量之差值來決定。

佔有率控制則是即時量測進入匝道上游路段的佔有率，並利用這個資料來決定下一個控制時段的儀控率，儀控率大小可以通過佔有率—流量和流量—佔有率兩者之間的關係圖獲得。

ALINEA 模式是一種回饋邏輯 (Feedback Philosophy) 模式，由 Papageorgiou 於 1991 年提出。依據自動控制理論，完整的控制架構應該包含控制處理、輸入單元和輸出單元。其中，可被控制的輸入稱為可控制輸入（例如進入匝道流量），而無法被控制的輸入稱為干擾（例如匝道上游的主線流量）。ALINEA 模式的基本原理是根據主線下游的佔有率來調整匝道的儀控率，以達到交通流的平滑和減少壅塞，當主線下游的佔有率低於臨界佔有率時，ALINEA 模式會增加匝道的儀控率，以增加匝道車流的通行能力，反之，當主線下游的佔有率大於臨界佔有率時，ALINEA 模式會縮小匝道的儀控率，以限制匝道車流，避免造成交通壅塞。

ALINEA 模式的優點是在應用時只需量測匝道下游主線的佔有率，然後利用前一時段的儀控率，即可即時地計算出下一時段的儀控率，達到快速反應和精確控制交通流的效果。

3. 接受間距式匯入管制(Gap-Acceptance Merge Control)

主要係利用高速公路在主線車流的間距，在不對主線車流造成太大干擾的前提下，使最多的車輛能由匝道安全地匯入主線車道。實施接受間距式匯入管制時，控制系統會根據主線上的交通狀況和匯入匝道上的車輛等待情況，決定每個車輛進入主線的時間間隔，這個時間間隔會根據交通流量和車輛速度等因素來動態調整，以確保匯入匝道上的車輛可以順利且安全地融入主線交通流中。

4. 非線性最佳化匝道儀控策略 (Non-linear Optimal Ramp Metering Strategies)

避免或降低高速公路上之壅塞，可大幅增進如通過量或總花費時間之效率，壅塞發生時，將影響通過的車流量外，下匝道及變換車道之行為也同樣會受到影響，雖然反應式策略能專注於此問題，但需要定義一績效值，而如為廣泛之動態最佳化問題則必須花費大量時間計算，此時則可用非線性交通動態問題來表示一適合之巨觀動態模式。

2.2.2 匝道儀控相關文獻

王雲慶 (2005) 使用基因模糊邏輯控制方法進行匝道儀控率的求解，其方法除了可避免針對隸屬函數及邏輯規則有因為研究者主觀之設定影響，同時還可具體提升控制績效。而該研究方法也已驗證其應用性，研究中將控制範圍分為整合型 GFLRC 與獨立型 GFLRC，透過歷史資料的交通量，再以控制時段內所有使用者的旅行時間當作其研究之績效評估指標。從簡例研究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，結果顯示在獨立型與整合型地匝道儀控方式能分別減少 6.93%與 7.80%的總旅行時間，一段式的最佳定時儀控則減少 4.81%，四段式的最佳定時儀控則為 7.22%，而 FLRC 模式則約為 0.45%，後續研究則以實際路網資料進行應用，發現亦可得到相似之結果。

鐘仁傑 (2008) 以模糊邏輯控制在考慮主線的車流狀態及匝道需求車輛數下，分別建構獨立型和整合型儀控策略。獨立型儀控策略是只僅考慮局部範圍之交通資料去進行儀控率推估；整合型儀控策略則是加入上游的匝道儀控率作為狀態變數之一。透過研究實例證明所研擬之獨立型和整合型儀控策略在不同幾何設計路段 和交通情境下進行績效評比。從簡例與實例模擬結果來看，以不實施匝道儀控下的總旅行時間為比較基礎，整合型儀控策略的改善程度為 2.16~6.66%；在實例中的最佳改善程度為 7.96%，其次為獨立型儀控策略，更進

一步觀察車輛的時空速率變化，可以發現在實施所研擬之儀控策略下車輛速率的波動較平緩，而且整體平均速率較高。

劉峰佑 (2009)利用格位傳遞模式 (Cell Transmission Model, CTM) 進行高速公路的車流模擬，並將其車流量之改變作為匝道儀控時制設置的基礎，期望能提升高速公路運作績效及減少高速公路旅行時間。此研究先以平均絕對誤差百分比 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 比較 CTM 所預估之流量與實際偵測器所測得的流量差異，結果顯示於上下匝道附近區段之數值誤差較大，可整體來說誤差均在能接受的範圍。此研究則透過格位傳遞模進行到達匝道入口處車輛數推估，將其結果用以計算各服務水準下的剩餘容量，並以此設定儀控率，所得之結果與現行所使用之時制一併輸入 TSIS 微觀車流軟體中進行分析比較。最後在以彰化北上入口匝道及台中的南屯北上南下的入口匝道進行實地測試，結果發現實際情況與模擬能夠符合，證明此方法是可用於實務之匝道儀控設定。

薛博元(2011)提出應用於國道五號北上壅塞路段之可變速限與匝道協控最佳化模式，該模式先透過 ALINEA 演算法計算各匝道儀控率，接著計算各控制位置之控制速率。而結論顯示透過 VISSIM 模擬路網評估，在進行可變速限與匝道儀控後，主線總通過量增加 4.2%、平均旅行時間減少 10.7%、平均延滯時間減少 18.5%、上匝道總通過量增加 8.31%等。

張鈞凱 (2014) 以離散型二階巨觀車流模式-METANET 為基礎，發展適用於國道五號北上路段之巨觀車流模式，並且建構一套匝道儀控及可變速限整合控制之最佳化模式，希望利用可變速限之特性控制車流以漸變方式進入雪山隧道，同時搭配上遊匝道連鎖控制，以減緩或避免雪山隧道的壅塞產生。使用基因演算法求解 METANET 模式最佳參數組，也為使最佳化模式能進行即時控制，利用類神經網路建構預測模式，以預測最佳化模式之輸入數值，後經 VISSIM 軟體模擬之結果，在控制後主線旅行時間與雪山隧道總通過量均有顯著的改善，顯示所研擬之控制模式能有效提升國道五號北上路段之使用效率。

2.3 小結

2.1 節為自駕車和人駕車之混和車流模型之探討，角度包含從微觀至總體車流模式，由文獻回顧之結果可知，隨著自動駕駛技術的興起，人們對於未來自動交通世界將如何影響道路、社會、經濟、環境皆持有許多推論，且多數抱持正面積極的預測，期待透過自動駕駛改善生活。不過，由於目前自駕車並未普及，難以進行大量實驗或是取得足夠多的資料進行分析探討，因此多數關於混和車流的研究僅依靠模擬進行，而透過微觀車流模式雖可詳細描述每一輛車的減速、加速以及跟車的行為狀態，或是其車輛在路段中因為時間變化的軌跡，針對單一車輛之行為進行分析，但其模擬計算時間過長，因此將採取總體車流模式進行，而根據回顧文獻之結果，發現格位傳遞模式是能夠用以描述壅塞時所產生的車隊回堵現象或衝擊波情形，在應用上具備彈性，除了可用在高速公路，也可對市區的道路進行模擬。將高速公路路段分為許多格位以模擬整體車流行為，藉此達到如微觀模式之概念，但又可使模擬結果的細緻程度與花費時間能夠達一平衡，並且其格位之描述架構非常適合用於多車道之情境，而目前多數文獻僅探討混和車流的縱向運行情形，並未加入變換車道機制，為使其更接近真實情況，因此本研究將會以格位傳遞模式為基礎，搭配變換車道機制，進行車道間的橫向流量計算，表 2.1 為針對人駕車與自駕車之混流模型之文獻彙整表。

表 2.1 人駕車與自駕車之混流模型

作者 (年份)	使用模型	研究內容	觀測 角度
Sun <i>et al.</i> (2018)	智慧駕駛 模型 (IDM)	以原始 IDM 為基礎，設定後方自駕車擁有不同反應時間下(0~1s)，該車輛在前方為自駕車或是人駕車下，加減速度變化情形。	微 觀 車 流 模 式
Xie <i>et al.</i> (2019)	智慧駕駛 模型 (IDM)	將跟車情形分為四種，分別是人駕車-人駕車、人駕車-自駕車、自駕車-人駕車及自駕車-自駕車，期前三種皆基於原始 IDM 進行模擬，而在皆為自駕車環境下，在 IDM 中加入穩定性函數，讓其擁有更小的速差，人駕車的反應時間設定為 0.4s，自駕車反應時間則設定為 0s。	
楊雅媛 (2021)	智慧駕駛 模型 (IDM)	同時考量人為駕駛與自動駕駛，以全速差模型表示一般人為操作車輛，用智慧駕駛模型表示自動駕駛車輛，以序針對隊列穩定性、時空圖以及衝突熱點做討論，看出不同策略的自駕車輛對於道路車流的改變情形為何。	
Liu <i>et al.</i> (2017)	細胞自動 機模型 (CA)	以多車道 CA 模型為基礎，引入針對自駕車的變換車道規則進行模型修改，認為鄰近皆為自駕車，後方車輛將會降速以利前方車輛進行變換車道，而在主動變換車道時與目標車道後方車輛的距離設定，自駕車的需求距離則小於人駕車。	
Yang <i>et al.</i> (2021)	細胞自動 機模型 (CA)	修改多車道 CA 模型，認為自駕車間須有協同合作，因此在要併入主線車道的車輛，如遇到主線車道後方為自駕車，將可與之進行協作，將使主線車道車輛減速並變換車道，以利其車輛更快速匯入。	
Qin <i>et al.</i> (2019)	格位傳遞 模式 (CTM)	以反應時間描述不同跟車模式所需的空間間距，人駕車: 1.5s、ACC: 1.1 s、自駕車: 0.6s，進而推估其不同自駕車普及率下，對模式中車流基本圖的改變情形。	總體 車流 模式
Pan <i>et al.</i> (2021)	格位傳遞 模式 (CTM)	以反應時間描述自駕車與人駕車所需的空間間距，人駕車: 1.85s、自駕車: 0.35s，進而改變模式中車流基本圖外，同時加入自駕車與人駕車的變換車道規則，為自駕車在任意或強制變換車道時，所能容忍與目標車道的後方車輛距離可較小。	
Jin <i>et al.</i> (2022)	格位傳遞 模式 (CTM)	以汽車跟隨模型進行不同自駕車普及率下之車流基本圖的建構，並以 CTM 為基礎，提出一可調格位長度之 VCTM，驗證結果發現此模式與 CTM 相比，更可以準確地反映混合單車道之交通流的延滯、排隊和消散情形，此外，模擬之結果也發現隨著自駕車的佔有率增加，交通流量和壅塞時的消散能力將會同步增加。	

針對自駕車及人駕車之運行行為差異及如何反應在車流模擬模式中，通過文獻整理，發現目前研究多以使用微觀模型描述自駕車和人駕車之運行情況，進而推導在自駕車不同比例下的流量密度關係，自駕車之模擬多採用跟車模型或 PATH 的 ACC 及 CACC 模型，而人駕車則採用跟車模型或細胞自動機模型。由於自駕車對車流情況的影響是來自於其能擁有較短之反應時間，進而縮短與前車車輛之間距，而此特性更因隨著自駕車的普及率提升，對於車流運行情況及道路容量的影響大幅提升，因此探討混和車流的基本圖構建極為重要，表 2.2 為自駕車和人駕車之混和車流基本圖構建文獻彙整。

表 2.2 混和車流基本圖構建

作者 (年份)	考慮車輛類型	模型	延遲反應時間
Levin&Boyles (2016)	人駕車、自駕車	皆採用跟車模型 (Kometani & Sasaki ,1959)	人駕車: 1s 自駕車: 0.5s
Ye&Yamamoto (2018)	人駕車、自駕車	人駕車: Two-state safe-speed model (TSM) 自駕車: ACC Model (PATH 實驗室)	人駕車: 1.8s 自駕車: 1.1s/0.8s/0.5s
Qin <i>et al.</i> (2019)	人駕車、 ACC、自駕車	皆採用跟車模型 (Jepsen,1998)	人駕車: 1.5s ACC: 1.1 s 自駕車: 0.6s
Pan <i>et al.</i> (2021)	人駕車、自駕車	皆採用跟車模型 (Jepsen,1998)	人駕車: 1.85s 自駕車: 0.35s
Wu <i>et al.</i> (2022)	人駕車、 ACC、自駕車	人駕車: 跟車模型(Newell,2002) ACC: ACC Model (PATH 實驗室) 自駕車: CACC Model (PATH 實驗室)	人駕車: 1.5s ACC: 1.1 s 自駕車: 0.6s

2.2 節則是針對現有之控制策略進行回顧，發現匝道儀控是最常被應用於管制高速公路需求量的手段，也確實發現到匝道儀控對於高速公路的績效是有所助益的，後續本研究將以最大效率與安全性的目標下，透過基因演算法一次求解各時段匝道的儀控率，文獻彙整結果如表 2.3。

表 2.3 控制策略之相關文獻彙整

作者(年份)	使用策略	目標式	演算法/軟體
王雲慶(2005)	匝道儀控	最小化總旅行時間	基因演算法
鐘仁傑(2008)	匝道儀控	最小化總旅行時間	基因演算法
劉峰佑(2009)	匝道儀控	最大化通過車輛數	以下游格位剩餘容量設定 匝道儀控時制
薛博元(2011)	可變速限/匝道 儀控	最大化控制範圍及週期內之區段 及匝道通過量	ALINEA 演算法
張鈞凱(2014)	可變速限/匝道 儀控	最大化通過總流量	基因演算法

第三章、混和車流格位傳遞模式之建立

本研究將以格位傳遞模式進行混和車流運行情況的模式建立，而自駕車為交通狀態帶來相當程度的改變，因此必須先針對混和車流基本圖進行建構，以獲得其兩種交通工具在道路上的交互作用下，模式所需之其格位最大容量及衝擊波速度等相關參數。

3.1 車流基本圖建構

根據文獻回顧可知，在代表人駕車的模擬模型的選擇多為使用跟車模型，而針對模型建構之便利性，本研究將採用 Newell(2002)的跟車模型，而自駕車車輛則採用大多數研究所使用之 PATH 實驗室的 CACC 模型，因其模型皆以實際數據所構建，更能符合車輛的行駛特性。

混和車流由人駕車和自駕車組成， P_{HDV} 及 P_{AV} 分別為人類駕駛及自動駕駛車輛之比例。

$$\begin{cases} P_{AV} = \mu \\ P_{HDV} = (1 - \mu) \end{cases} \quad (9)$$

3.1.1 人類駕駛車輛

Newell 於 2002 年提出一個跟車行為的車流模型，被稱為 Newell 跟車模型，模型考慮人駕車之前後車輛位移具有時間延遲，以更加現實地描述車輛之間的跟車行為，這個延遲表示了駕駛員做出操作（例如加速或減速）的時間。在現實情形中，當前方車輛改變速度時，後面的車輛則不會立即做出反應，而是會有一定的時間延遲，然後再做出相應的調整，關係如式(10):

$$x_n(t + t_H) = x_{n-1}(t) + L_H \quad (10)$$

$x_n(t + t_H)$ ：延遲時間 t_H 後，後車輛 n 的位置

$x_{n-1}(t)$ ：時間 t 時，前車輛 $n-1$ 的位置

L_H ：人駕車的位移量

3.1.2 自動駕駛車輛

由於自駕車在車輛的控制上具有優勢，能夠有效感知周圍環境資訊，獲得更全面及精確的判斷，進而實現更緊密的跟車，縮短車輛之間的間距，顯著提高道路的通行效率，而 PATH 實驗室的 CACC 模型，透過實車實驗進行，更能

反映目前自駕車相關控制技術及其跟車行為，且該模型之跟車特性不取決於駕駛行為差異，因此可適用於各地之車流研究，數學關係式如下：

$$\begin{cases} v = v_{prev} + k_p e + k_d \dot{e} \\ e = h - l - s_0 - t_c v \end{cases} \quad (11)$$

k_p, k_d ：模型控制參數， $k_p = 0.45, k_d = 0.25$

v_{prev} ：前一時間之速度

e ：實際車間距與期望車間距的誤差

$\dot{e}$ ：實際車間距與期望車間距的誤差的微分

h ：與前方車輛之間距

l ：車輛長度

s_0 ：最小安全間距

t_c ：自駕車之反應時間

3.1.3 單一車流基本圖

當目前道路上皆為人駕車，並假設其車輛是均勻的分佈在整條道路的車道內，採用 Newell(2002)的跟車模型模擬，均衡狀態下的空間間距和速度之間的關係如下：

$$\begin{cases} x_n(t) = x_{n-1}(t) - h_H^* \\ x_n(t + t_H) = x_n(t) + v^* t_H \end{cases} \quad (12)$$

h_H^* ：均衡狀態下人駕車的空間間距

v^* ：均衡狀態下人駕車的速度

將式(12)帶入式(10)，將可獲得人駕車在均衡狀態下的空間間距：

$$h_H^* = v^* t_H + L_H \quad (13)$$

根據均衡狀態的空間間距與密度關係，計算出僅由人駕車組成的同質車流密度如下：

$$k_H^* = \frac{1}{h_H^*} = \frac{1}{v^* t_H + L_H} \quad (14)$$

k_H^* ：均衡狀態人駕車的密度

從式(14)得到人駕車同質車流的流量-密度基本圖如下：

$$\begin{cases} k_H = \frac{1}{v^* t_H + L_H} \\ q_H = k_H v \end{cases} \quad (15)$$

q_H ：均衡狀態下人駕車的流量

同樣，如全部車輛由自駕車車輛組成之均勻車流，將可控制車輛之間的間距誤差及其微分項為 0，由式(11)可知自駕車在均衡狀態下的空間間距計算方法如下：

$$h_C^* = v^* t_C + l + s_0 \quad (16)$$

以 $L_C = l + s_0$ 對式(16)簡化，結果如下：

$$h_C^* = v^* t_C + L_C \quad (17)$$

根據密度與空間間距的關係，通過式(17)可推導自駕車在同質車流下所對應的流量-密度基本圖如下：

$$\begin{cases} k_C = \frac{1}{v^* t_C + L_C} \\ q_C = k_C v \end{cases} \quad (18)$$

3.1.4 混和車流基本圖

混和車流二種類型的車輛，分別為人駕車和自駕車，與單一車種的同質車流的區別在於，在均衡狀態下，同質車流的空間間距是相同的，但在混和車流中，不同類型的車輛之間的空間間距是不同的。因此透過式(13)及式(17)，將可得到均衡狀態下混和車流的平均間距，計算式如下：

$$h^* = \frac{n P_{HDV} h_H^* + n P_{AV} h_C^*}{n} \quad (19)$$

h^* ：均衡狀態下混和車流中車輛的平均空間間距

同樣，基於空間間距與密度之關係，均衡狀態下混和車流的密度推導方式如下：

$$k^* = \frac{1}{h^*} = \frac{1}{P_{HDV}(vt_H + L_H) + P_{AV}(vt_C + L_C)} \quad (20)$$

k^* ：均衡狀態下混和車流中車輛的密度

根據密度與空間間距的關係，通過式(20)可推導混和車流在均衡狀態的速度計算，如式(21)：

$$v^* = \frac{1}{k(P_{HDV}t_H + P_{AV}t_C)} - \frac{P_{HDV}L_H + P_{AV}L_C}{P_{HDV}t_H + P_{AV}t_C} \quad (21)$$

根據車流參數恆等式($q = ku$)之間的關係，可利用式(20)及式(21)之乘積，求得在均衡狀態下的流量與密度之關係。

$$q^* = \frac{1}{P_{HDV}t_H + P_{AV}t_C} - k^* \frac{P_{HDV}L_H + P_{AV}L_C}{P_{HDV}t_H + P_{AV}t_C} \quad (22)$$

q^* ：均衡狀態下混和車流流量

當式(20)之速率為自由流時，則可求得混和車流的臨界密度，計算式如下：

$$k_c = \frac{1}{P_{HDV}(v_f t_H + L_H) + P_{AV}(v_f t_C + L_C)} \quad (23)$$

同樣，當速度為 0，車流擁擠密度達到最大值，因此擁擠密度如下式：

$$k_{jam} = \frac{1}{P_{HDV}L_H + P_{AV}L_C} \quad (24)$$

在臨界密度下可觀察到最大流量，結合自由流速率 v_f 和式(23)，最大流量計算如下：

$$q_{max} = \frac{v_f}{[P_{HDV}(v_f t_H + L_H) + P_{AV}(v_f t_C + L_C)]} \quad (25)$$

根據式(22)所求得之流量-密度基本圖，衝擊波為其斜率，計算如下：

$$\omega = -\frac{P_{HDV}L_H + P_{AV}L_C}{P_{HDV}t_H + P_{AV}t_C} \quad (26)$$

表 3.1 為車流基本圖的相關參數設置，將其參數帶入式(23)、式(25)，將可求得不同自駕車普及率下之最大流量及臨界密度值。

表 3.1 車流基本圖之參數表

t_H	t_C	L_H	l	s_0	v_f
1.5s	0.6s	6m	4 m	2m	90km/h

表 3.2 為針對不同自駕車普及率下之車流基本圖數值，根據計算之結果發現在人駕車車流的臨界流量為 2022 vehs/hr，相應的臨界密度則為 22 vehs/km，而自駕車車流的臨界流量為 4090vehs/hr，相應的臨界密度則為 45 vehs/km，臨界流量增加了 102%。隨著自駕車在道路上的比例提升，在臨界流量上則有明顯的進步，當自駕車普及率為低於 50%時，流量增加的較為緩慢，因為人駕車佔混合車流的主要部分，但當自駕車普及率大於 50%時，自駕車的反應時間較小，使得車輛的空間間距較小，有效提高了整體流量狀況。不同自駕車普及率下之車流基本圖，如圖 3.1 所示。

表 3.2 車流基本圖之數值

自駕車普及率	臨界密度(vehs/km)	增加幅度	臨界流量(vehs/km)	增加幅度
0%	22	-	2022	-
10%	23	5%	2130	5%
20%	25	14%	2250	11%
30%	26	18%	2384	18%
40%	28	27%	2535	25%
50%	30	36%	2706	34%
60%	32	45%	2903	44%
70%	34	55%	3130	55%
80%	37	68%	3396	68%
90%	41	86%	3711	84%
100%	45	105%	4090	102%

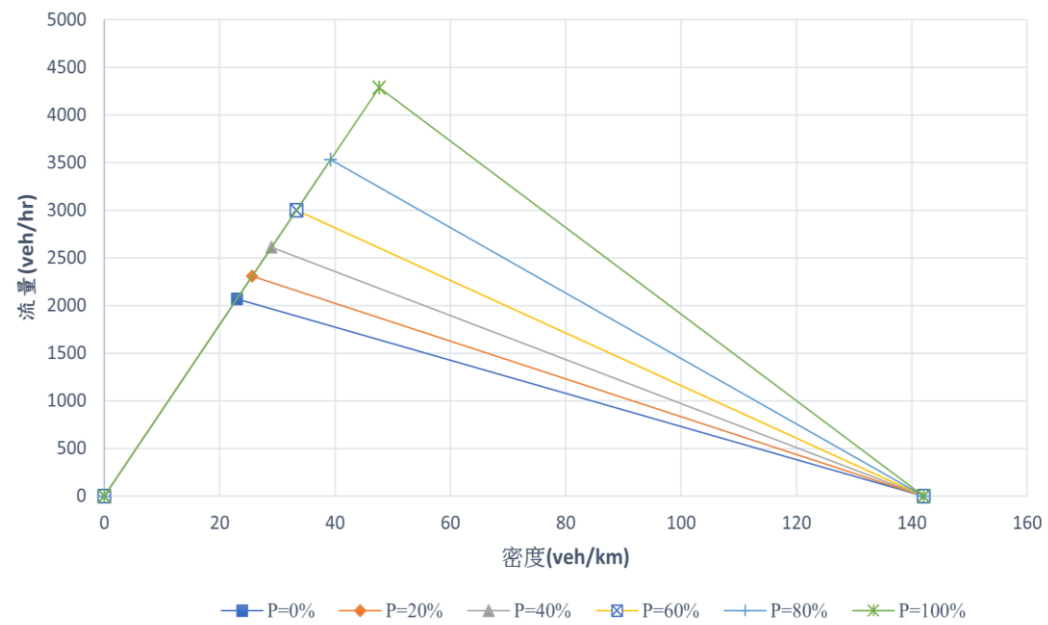


圖 3.1 不同自駕車普及率下之車流基本圖

3.2 混和車流模式建構

本研究欲建立人駕車及自駕車皆具有任意變換車道行為之混和車流模擬模式，將以目前廣泛之應用的格位傳遞模式，並且以車道為基礎，對模式加入任意變換車道機制，以確認車輛在車道間的橫向變換車道情形，並針對自駕車及人駕車的運行行為而給予不同之變換車道設定，使其更接近真實運行之情況。另外，自駕車隊列協控技術也同樣是自動駕駛技術的指標性項目，藉由車間通訊以串聯前導車輛與隊列車輛之訊息並結合車輛感測器以進行車輛速度與間距的控制，而此技術也將影響整體車流運行及匝道車輛匯入的情況，但是此技術無法有效地考慮與調整格位傳遞模式之相關參數，因此隊列協控技術對於車流的影響不在本研究之考慮範圍。

3.2.1 混和車流模式基本架構

本研究模式以格位傳遞模式為基礎，加入任意變換車道機制，以延伸至多車道架構，路段內包含主線路段及一上匝道路段。

格位傳遞模式是一種用於計算車流運作情形的方法，主要是基於格位之間的供給量和需求量，以下是有關格位傳遞模式的基本概念的說明。格位供給量是指格位內剩餘可容納車輛的容量，它表示格位能夠接納多少車輛進入其中，供給量的計算通常基於格位的容量和現有車流量之間的差異，而需求量的計算考慮了兩個方面，即任意性變換車道需求量和直行流量。對於任意性變換車道需求量的計算，係基於相鄰車道之間的密度差，從而推估變換車道的需求比例。對於直行流量，則考慮了上游格位中存在的車輛數量。當格位的需求量和供給量已經確定時，再加上格位間之可容許通過最大流量值，再將其三者之間選擇最小值，即為最後可通過的流量值。

本研究將使用 Python 進行混和車流格位傳遞模式的程式撰寫，其計算過程說明如圖 3.2 所示。首先，由於本研究採用密度差進行變換車道比例的計算，因此需先行計算各格位密度，後續在考量變換車道流量擁有較高的優先權下，先行計算變換車道需求量，接著計算格位供給量，以確定可成功變換車道之車輛數，接著是進行車流直行的計算，同樣先計算需求量及供給量，再以此二者之最小值，而最後再基於前面所計算之變換車道流量與直行流量，更新下一時階格位的車輛數。

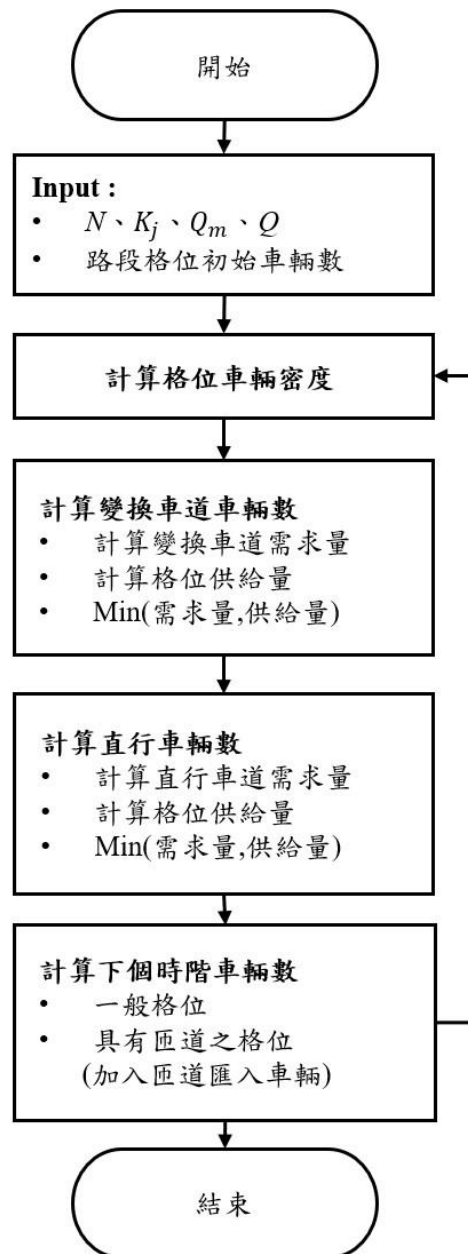


圖 3.2 模式建構流程圖

3.2.2 任意性變換車道

任意性變換車道是指在車流當中，駕駛因為希望獲取更佳駕駛條件，所產生之變換至相鄰車道的行為。目前在建立變換車道的模型時，除了考慮相鄰車道間的速度差，一些研究也採用相鄰車道間的密度差作為決定變換車道的依據。密度可以被視為車流中的一種變化量，而兩個相鄰車道之間的車輛分布情況不同，當一個車道的密度較大，而相鄰車道的密度較小時，駕駛員可能會選擇變換車道，因為低密度車道通常意味著更順暢的交通條件，將可能更符合駕駛員

的期望。鑑於本研究採用格位傳遞模型，將密度視為描述車流的重要參數，因此本研究將參考 Roncoli *et al.* (2015)採密度差關係來建立多車道任意性變換車道模式。

式(27)為計算變換車道之比例，即當車道 j 密度乘上一參數 $P_{i,j,j+1}$ 後，若大於車道 j 的密度，則會有一定比例車輛從車道 j 變換至車道 $j+1$ ，其比例的計算會跟兩車道間的密度差及參數 $P_{i,j,j+1}$ 、 μ 有關。其中 $P_{i,j,j+1}$ 為兩車道間的參數，在多數文獻中皆設定為 1， μ 則是為一介於 0 到 1 間之參數，其代表意義為駕駛進行變換車道的積極度因子。

在車道變換的積極度部分，依據文獻設定，人駕駛車道變換的積極度因子係以 $\mu=0.3$ 為設定，由於自駕車與人駕車的運行行為具有差異，而根據過往文獻提到(Du *et al.*, 2023 & Vranken *et al.*, 2022)，自駕車的旨在於提供更安全的行車環境，因此在於變換車道的控制上會更加保守，因此在本研究中將自駕車的變換車道積極度因子以 $\mu=0.1$ 進行設定，代表其較人駕車為更保守的控制。

$$A_{i,j,j+1} = \mu \cdot \max\left\{0, \frac{P_{i,j,j+1}\rho_{i,j} - \rho_{i,j+1}}{P_{i,j,j+1}\rho_{i,j} + \rho_{i,j+1}}\right\} \quad (27)$$

$A_{i,j,j+1}$ ：時間 t 格位 i 車道 j 變換至車道 $j+1$ 的比例

μ ：車道變換的積極度因子

$P_{i,j,j+1}$ ：兩車道間的參數

$\rho_{i,j}$ ：時間 t 格位 i 車道 j 的密度

計算任意性變換車道需求之方式，先計算變換車道需求與下游格位供給的剩餘容量，最後再決定變換車道流量。針對人駕車與自駕車之任意性變換車道需求(D^{dis})的表示式分別如下式(28)。

$$\begin{aligned} D_{i,j,j+1,HDV}^{dis}(t) &= A_{i,j,j+1,HDV}(t) \cdot \left(\frac{L_i}{T} \rho_{i,j}(t)\right) \cdot P_{HDV} \\ D_{i,j,j+1,AV}^{dis}(t) &= A_{i,j,j+1,AV}(t) \cdot \left(\frac{L_i}{T} \rho_{i,j}(t)\right) \cdot P_{AV} \end{aligned} \quad (28)$$

$D_{i,j,j+1}^{dis}(t)$ 為時間 t 格位 i 希望從車道 j 變換至車道 $j+1$ 的需求流量

L_i ：為格位 i 長度

T ：模擬的單位時間長度

而格位供給流量(S^{dis})計算式如下：

$$S_{i,j}^{dis}(t) = \frac{L_i}{T} (\rho_{i,j}^{jam} - \rho_{i,j}(t)) \quad (29)$$

根據供給量與需求量之大小，決定任意性變換車道流量(f^{dis})，如式(30)、式(31)所示，其中 $d = \{HDV, AV\}$ 。

$$\begin{array}{l} \text{車道 } j \\ \rightarrow \text{車道 } j+l \end{array} \quad \begin{array}{l} f_{i,j,j+1,d}^{dis}(t) = \\ \min\{1, \frac{S_{i,j}^{dis}(t)}{D_{i,j,j+1,d}^{dis}(t) + D_{i,j+1,j,d}^{dis}(t)}\} \cdot D_{i,j,j+1,d}^{dis}(t) \end{array} \quad (30)$$

$$\begin{array}{l} \text{車道 } j+l \\ \rightarrow \text{車道 } j \end{array} \quad \begin{array}{l} f_{i,j+1,j,d}^{dis}(t) = \\ \min\{1, \frac{S_{i,j}^{dis}(t)}{D_{i,j,j+1,d}^{dis}(t) + D_{i,j+1,j,d}^{dis}(t)}\} \cdot D_{i,j+1,j,d}^{dis}(t) \end{array} \quad (31)$$

3.2.3 直行車流

直行流量需求(Q^D)計算式如下：

$$Q_{i,j}^D(t) = \min\{v\rho_{i,j}(t), q_{i,j}^{max}, \frac{L_i}{T} \rho_{i,j}(t) + f_{i,j+1,j,d}^{dis}(t) - f_{i,j,j+1,d}^{dis}(t)\} \quad (32)$$

直行流量供給(Q^S)計算如下：

$$\begin{aligned} Q_{i+1,j}^S(t) = \min \{ & q_{i+1,j}^{max}, w \left(\rho_{i+1,j}^{jam}(t) - \rho_{i+1,j}(t) \right) \} \\ & + f_{i,j+1,j,d}^{dis}(t) - f_{i,j,j+1,d}^{dis}(t) \end{aligned} \quad (33)$$

即可決定直行流量(q)如下：

$$q_{i,j}(t) = \min\{Q_{i,j}^D(t), Q_{i+1,j}^S(t)\} \quad (34)$$

3.2.4 車輛數更新

基於前面所計算之變換車道及直行之流量，最後再透過車輛數更新方程式，更新下一時間點各格位的車輛數(F)如下：

1. 一般格位

$$F_{i,j}(t+1) = F_{i,j}(t) + (q_{i-1,j}(t) - q_{i,j}(t) + f_{i,j+1,j}^{dis}(t) - f_{i,j,j+1}^{dis}(t)) \quad (35)$$

2. 具有匝道連接之格位

對於上匝道進入主線之流量推估部分， $q_r(t)$ 為上匝道進入主線之車流量取決於匝道儀控率($r(t)$)或匝道需求量(d_r)較小者，計算方式如式(36)與式(37)。

$$q_r(t) = \min\{r(t), d_r(t)\} \quad (36)$$

$$F_{i,j}(t+1) = F_{i,j}(t) + (q_{i-1,j}(t) - q_{i,j}(t) + q_r(t) + f_{i,j+1,j}^{dis}(t) - f_{i,j,j+1}^{dis}(t)) \quad (37)$$

第四章、混和車流格位傳遞模式之驗證

第三章所建立之混和車流 CTM 模式為確保模式之可用性，仍需要以實際車流資料進行驗證，以確保其解釋力，因此將採用未具有自駕車佔比之情境設定，與國內高速公路實際之車流資料進行車流模擬驗證。首先，將驗證之路段長度換算成混和車流 CTM 模式所使用之格位數並設定模擬時間，再將模式之運算式寫入各格位中，最後代入車流資料，驗證之重點為觀察由上游偵測器資料所得之車流資料經由本研究所建立之混和車流 CTM 模式運算後，與實際下游偵測器資料所得之車流資料其誤差值，了解模擬資料與實際資料之誤差是否足以用做後續模擬之用，並且與原始 CTM 模式進行比較，章節將會介紹參數設定及模式驗證結果。

4.1 參數設定

本研究將以混和車流 CTM 模式與實際車流資料進行比較及驗證，目的是在找出相關基本參數的設定值，並透過參數設定進行車流行為模擬，再將實際資料與模擬資料進行比較，依照所測試之高速公路路段實際限速、車道數及模擬時階設定，轉換成混和車流 CTM 模式所使用之參數設定，模式所需之參數包括格位最大容納車輛數(N)、每一格位最大可通過車輛數(Q)、壅塞密度(K_j)，格位最大可以通過車輛數則係依據上一章節車流基本圖所得之最大流量進行計算，格位最大容納車輛數則參考過往文獻針對汽車之長度設定為每台車 7m 去推算格位所能容納之車輛數，設定為每格位的最大可容納車輛數為 14 輛汽車，而本次驗證範圍將採用國道五號路段之偵測器資料，並切分成短(3km)、中(5km)及長(6.5km)三種長度之路段之及尖、離峰兩種時段進行驗證，以確定模式對於不同路段長度的可行性，而每路段中皆有一匝道匯入，上面所述之參數整理如表 4.1。

表 4.1 基本模式參數表

英文	中文解釋	參數值	英文	中文解釋	參數值
U_f	自由流車速	90 km/h	L	路段長	依情境 設定
T	時間	4s	K_j	壅塞密度	
$Cell$	格位長度	100m	Q_m	最大流量	
N	每一格位可以容納之最大車輛數	14vehs	Q	每一格位可以通過之最大車輛數	

另外，藉由偵測器資料得知大致上分為三種型態的車種，分別是小客車、小貨車、大客車、大貨車及聯結車，本研究將以小客車為單位表示，各車種依小客車當量值 (PCE)，換算為小客車單位 (PCU)，各車種小客車當量如表 4.2 所示：

表 4.2 各車種換算小客車當量值

車種	小客車/小貨車	大客車/大貨車	聯結車
小客車當量值(PCE)	1	2	3

資料來源:交通部運輸研究所，「2011 年台灣地區公路容量手冊」

4.2 模式驗證

此節將以路段上游點之偵測器資料作為代入參數，流量可分為主線上游端流量與上匝道需求流量兩個部份，經由模式模擬後之資料與下游點之偵測器資料進行驗證，觀察其車流狀況。本研究採實際一小時車流資料共 900 個時階進行驗證，驗證目標將比較實際資料與模擬模式對於主線每分鐘通過之流量，計算模擬流量與實際通過流量的平均絕對誤差百分比(Mean absolute percentage error, MAPE)，採用平均絕對百分誤差(MAPE)是因 Lewis(1982)認為最有效之評估指標，可避免其他檢定指標過多的假設和限制條件，而 MAPE 值是每個絕對誤差的和除以實際值，能夠客觀的獲得估計值與實際值間之差異程度，進而驗證此車流模式模擬的準確度，MAPE 值計算方式如下式(38)：

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|\text{估計值}_t - \text{實際值}_t|}{\text{實際值}_t} * 100\% \quad (38)$$

MAPE 值若接近 0 表示其估計的效果越佳，也就是說其估計值與實際值越接近，故本研究採用 MAPE 評量其模式所得之資料與現有實際資料之績效衡量，另外，採用 Lewis(1982)所訂定之相關評估標準如表 4.3 所示。

表 4.3 MAPE 模式評估準則

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

資料來源:Lewis(1982)，MAPE 之評估指標

本研究之驗證範圍採用國道五號路段之偵測器資料，而為確認其模式在不同長度之可行性，本研究採用三種長度之路段進行驗證，分別為短(3km)、中(5km)及長(6.5km)，而由於偵測器之設置位置限制，因此選擇了符合設定條件的路段，其中短和中路段位於北上方向的 45.3 公里至 42.3 公里和 37.2 公里至 32.2 公里之間，而長路段則位於南下方向的 46.5 公里至 53 公里，而三路段皆為雙車道配置。

偵測器資料係透過 VD 資料擷取程式下載所選路段之 VD 資料，資料採用單一 VD 的動態偵測值，該資料提供每分鐘各車道不同車種的速率、流量及佔有率。

同時，為探討本模式在尖峰和離峰時段之表現情況，因此分別挑選此二時段之代表時間進行驗證，在離峰時段部分，北上採用 2023/1/10 早上十點，南下則以該天下午五點，而尖峰時段部分，則依國道五號是以觀光旅遊旅次為主之交通特性，週六多為南下車輛，周日則為北上車輛居多，因此北上路段採用 2022/11/20 下午一點，南下則以 2022/11/19 下午一點。

另外，為評估本研究所提出之混和車流 CTM 模式的成效，將加入使用原始格位傳遞模式之驗證結果進行比較，以探討其本研究所提之模式是否具有更優良之模擬成效。表 4.4 為本次所使用驗證資料之整理說明。

表 4.4 驗證資料說明

方向	路段長	時段	日期	時間
北上	3 KM (45.3K - 42.3K)	離峰	2023/1/10(二)	10:00~10:59
	5 KM (37.2K - 32.2K)	尖峰	2022/11/20(日)	13:00~13:59
南下	6.5 KM (46.5K - 53K)	離峰	2023/1/10(二)	17:00~17:59
		尖峰	2022/11/19(六)	13:00~13:59

4.2.1 尖峰時段

本研究以每分鐘為單位觀察實際資料與模擬資料變化趨勢，並將原始 CTM 與本研究所提之混和車流 CTM 在皆為人駕駛環境下進行比較。

在尖峰時段下，原始 CTM 在不同路段長之 MAPE 值介於 26%到 34%之間，而本研究所提之混和車流 CTM 在不同路段長之 MAPE 值介於 25%到 27%之間，兩模式之驗證結果 MAPE 值皆位於合理範圍，進一步探討各路段各模式之誤差，結果得出在三種路段下，本研究所建立的混合車流模式 CTM 之 MAPE（平均絕對百分比誤差）值皆優於原始格位傳遞模式，在短(3KM)路段長部分，本研究模式為 25%，原始 CTM 則為 26%，在中(5KM)路段長部分，本研究模式為 25%，原始 CTM 則為 32%，在長(6.5KM)路段長部分，本研究模式為 27%，原始 CTM 則為 34%。

整體而言，不管是原始 CTM 或是本研究之模式，在不同路段模擬之結果發現，模擬的車流資料皆與實際偵測器收集的資料變化趨勢大致符合，但本研究所建立的混合車流模式 CTM 在尖峰時段下擁有更佳之驗證結果，證明本研究所建立之混合車流模式 CTM 於尖峰時段下預測結果確實優於原始 CTM，因此本模式將可進行後續研究之用。圖 4.1 至圖 4.6 為尖峰時段各路段原始 CTM 與本研究所提之混和車流 CTM 之結果。

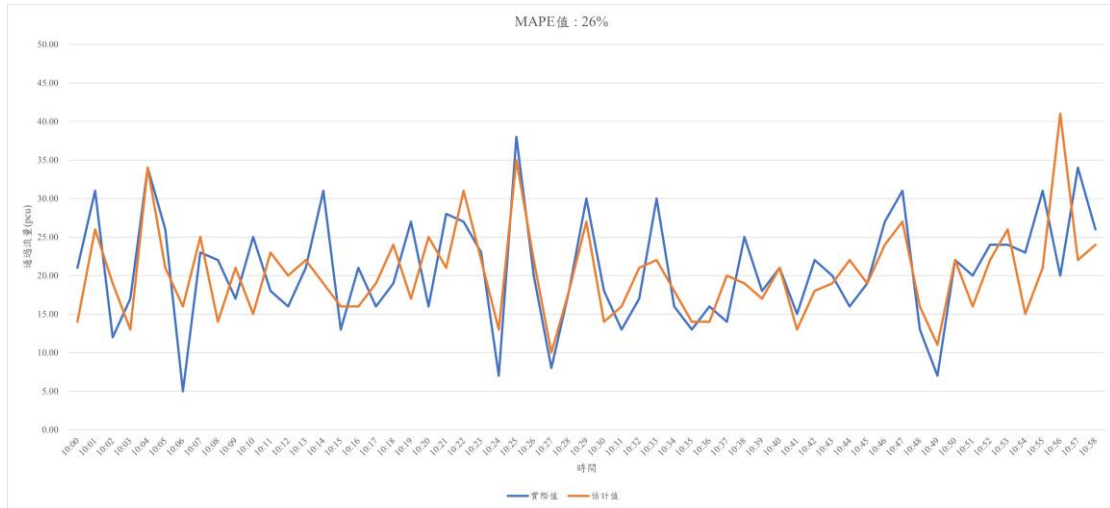


圖 4.1 3KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式

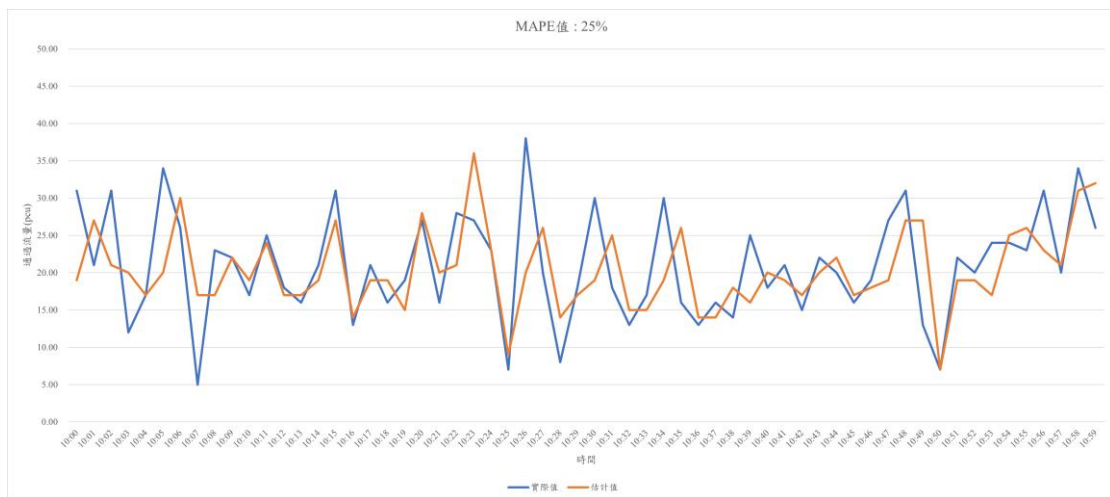


圖 4.2 3KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式

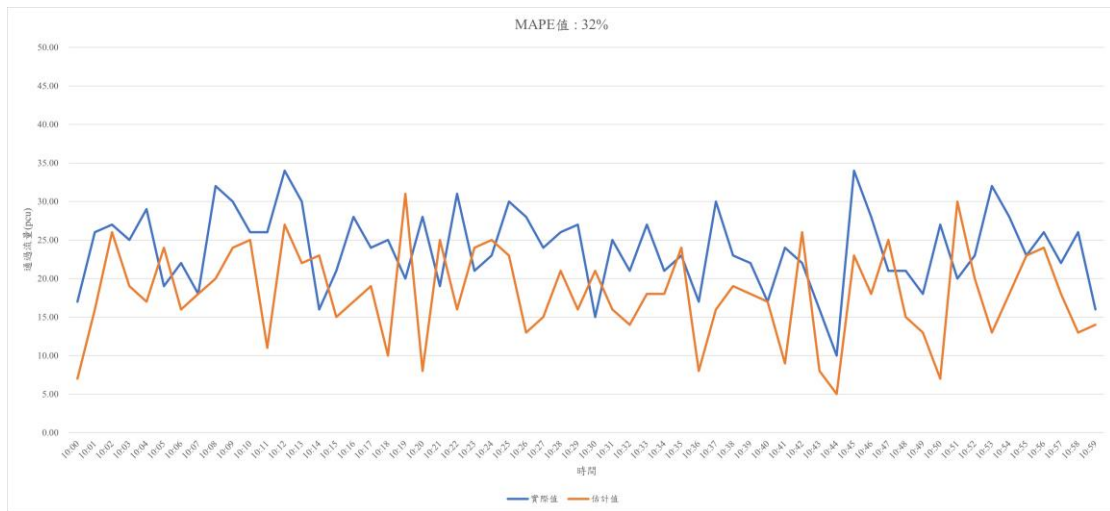


圖 4.3 5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式

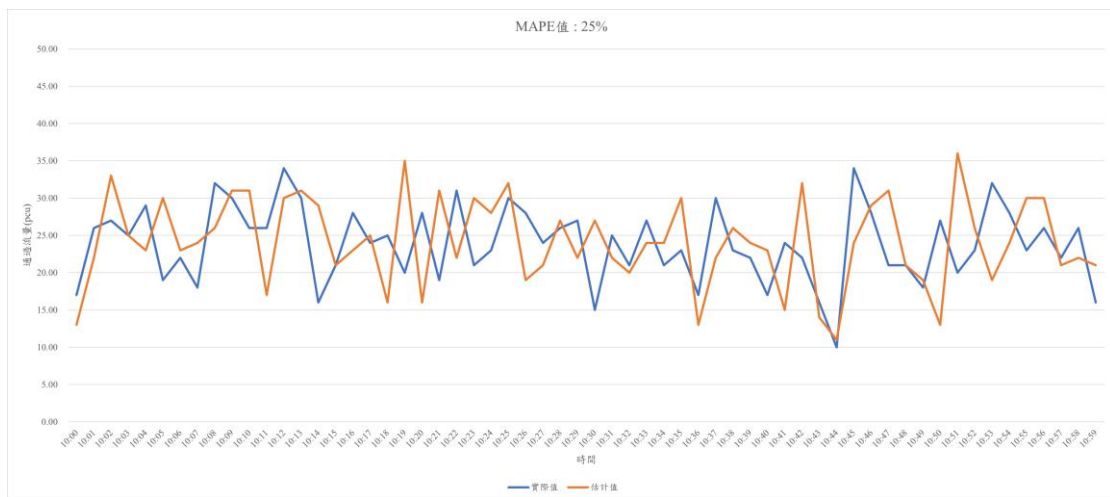


圖 4.4 5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式

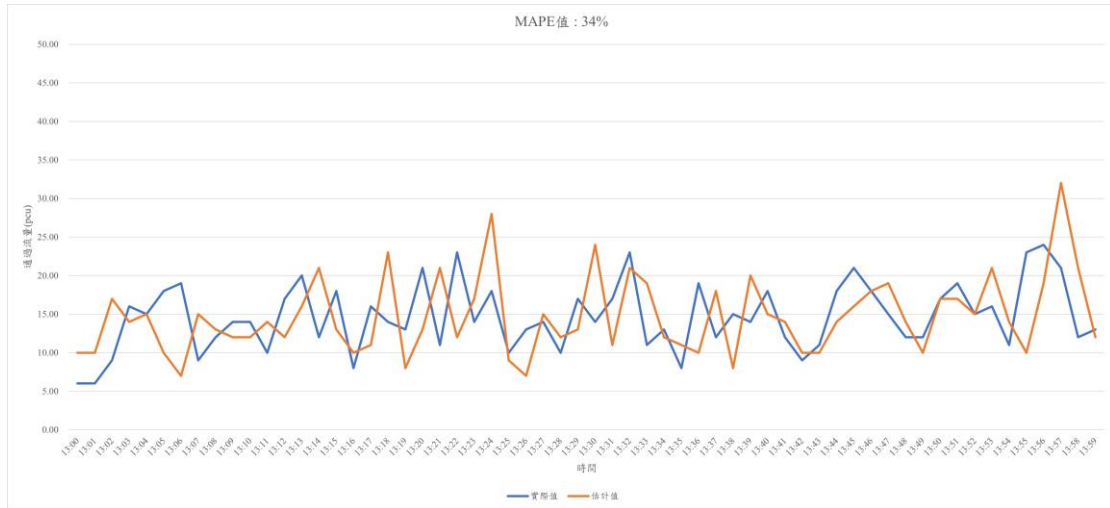


圖 4.5 6.5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式

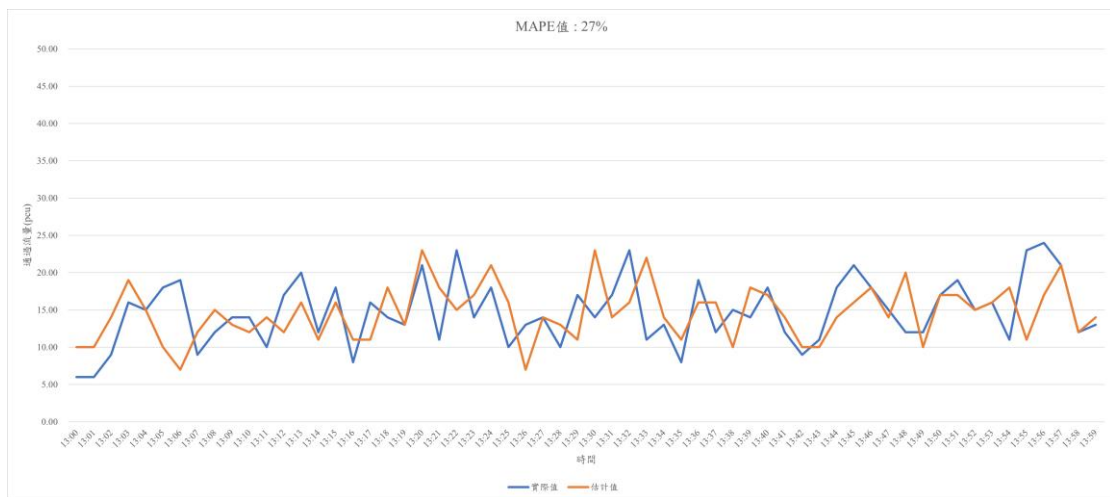


圖 4.6 6.5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式

4.2.2 離峰時段

在離峰時段下，原始 CTM 在不同路段長之 MAPE 值介於 31%到 41%之間，而本研究所提之混和車流 CTM 在不同路段長之 MAPE 值介於 27%到 36%之間，兩模式之驗證結果 MAPE 值皆位於合理範圍，進一步探討各路段各模式之誤差，結果得出在三種路段下，本研究所建立的混合車流模式 CTM 之 MAPE（平均絕對百分比誤差）值皆優於原始格位傳遞模式，在短(3KM)路段長部分，本研究模式為 34%，原始 CTM 則為 36%，在中(5KM)路段長部分，本研究模式為 27%，原始 CTM 則為 31%，在長(6.5KM)路段長部分，本研究模式為 29%，原始 CTM 則為 41%。

整體而言，雖然離峰時段的誤差較大，但其原始 CTM 或是本研究之模式的模擬的車流資料皆與實際偵測器收集的資料變化趨勢大致符合，而本研究所建立的混合車流模式 CTM 同樣在離峰時段擁有更佳之驗證結果，證明混合車流模式 CTM 於離峰時段下預測結果同樣優於原始 CTM。圖 4.7 至圖 4.12 為離峰時段各路段原始 CTM 與本研究所提之混和車流 CTM 之結果。

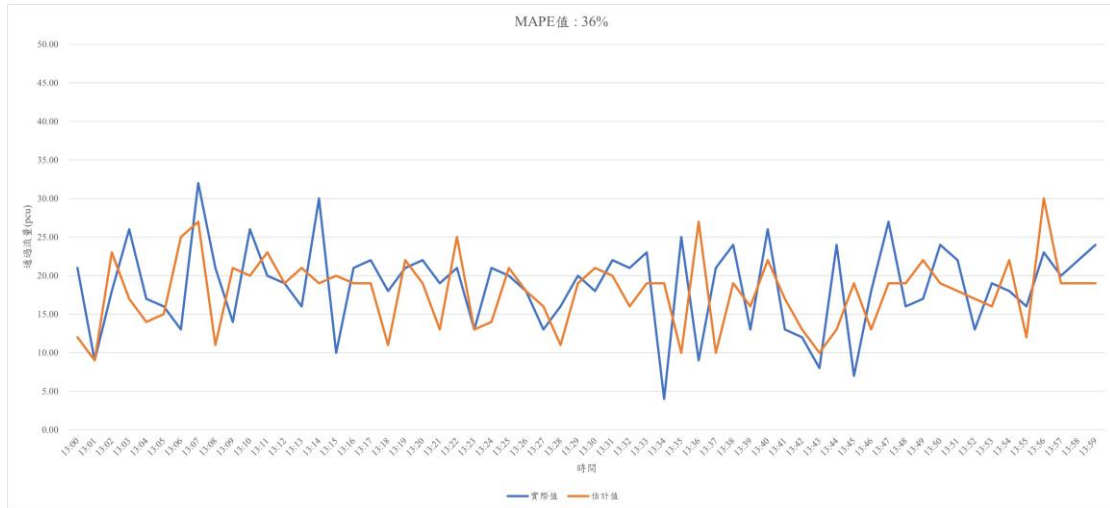


圖 4.7 3KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式

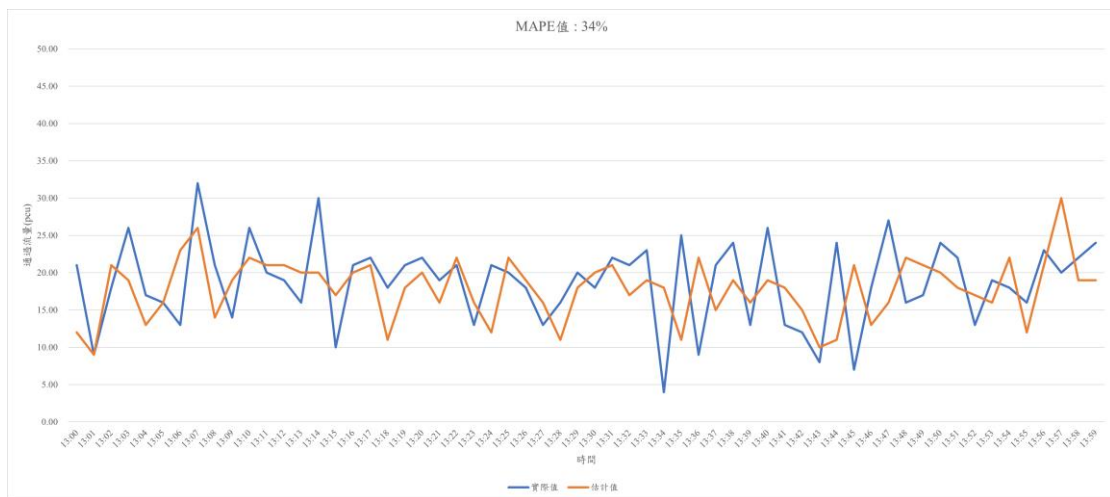


圖 4.8 3KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式

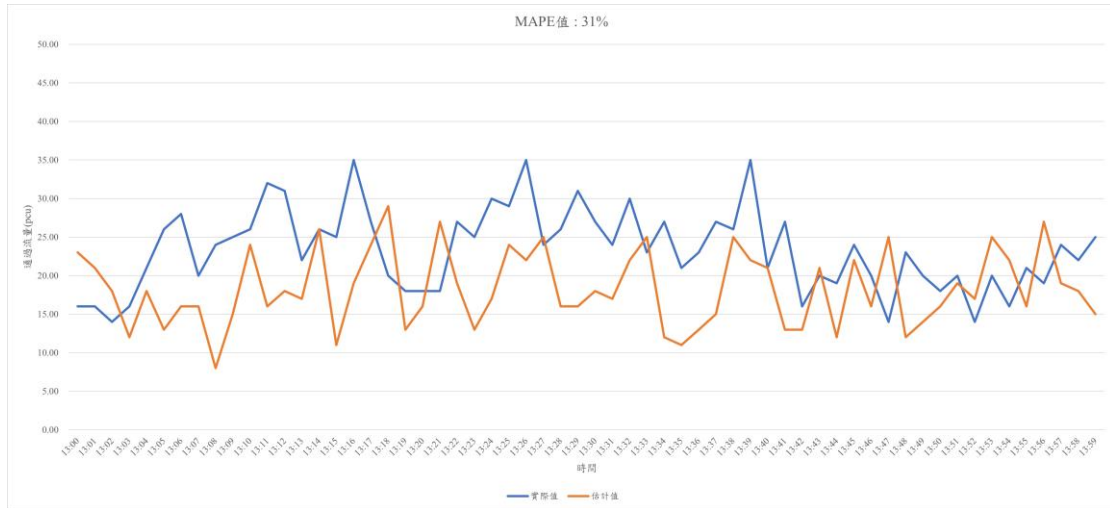


圖 4.9 5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式

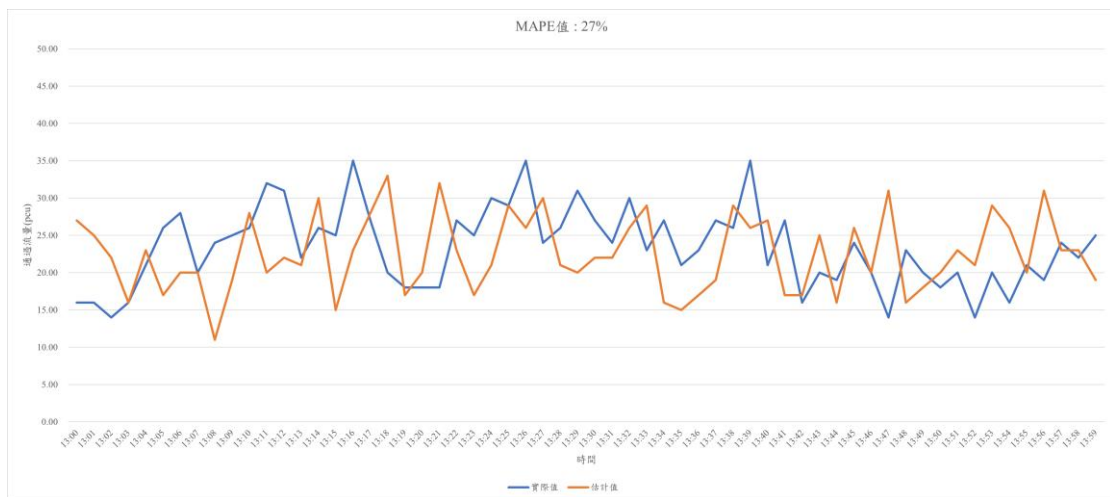


圖 4.10 5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式

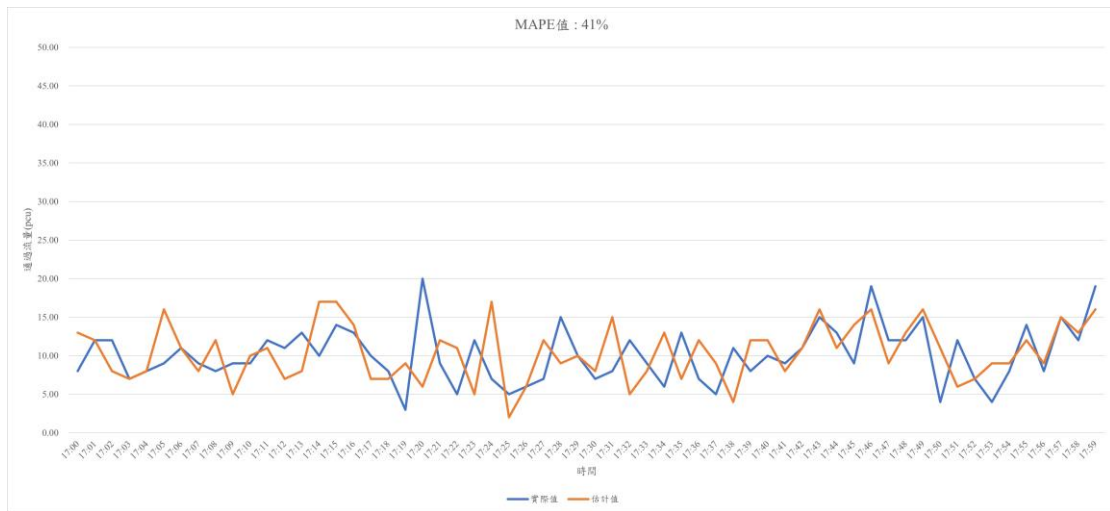


圖 4.11 6.5KM 路段驗證圖-原始格位傳遞模式

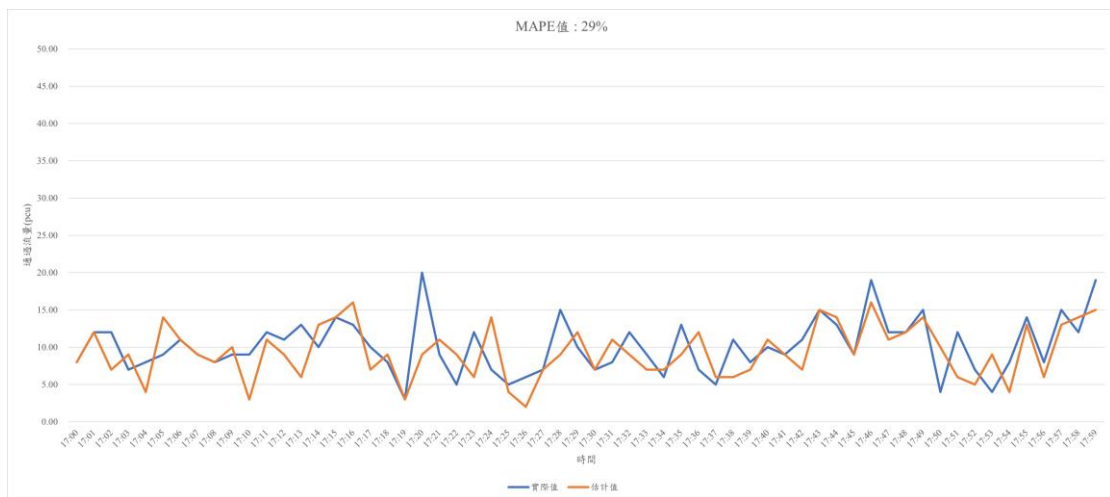


圖 4.12 6.5KM 路段驗證圖-本研究格位傳遞模式

4.2.3 小結

本研究模式驗證分別以不同時段及不同之路段長進行實際值與模擬值之驗證分析，驗證之結果可發現，在任何路段長下，尖峰時段之驗證結果皆為較佳，而離峰時段誤差則較大，可能原因為在離峰時段高速公路上車輛數較少，容易有車輛行駛速率超過本研究設定之最高速限，非以自由流速度行駛，導致車輛在時階內易發生跨越格位之情況，而本研究建立之模式，係假設車輛均在最高限速下行進，因而使得模式計算結果會有錯估之現象發生。

綜合以上的驗證與分析結果，本研究所提之混合車流模式 CTM 皆優於原始 CTM 之驗證結果，可以得出結論，本研究所建立之模式擁有較佳的模擬能力，且更能夠符合實際車流情況並模擬不同情況下的車流行為，因此可以進行進一步的研究。

由於中(5KM)路段長在不管尖峰或是離峰之時段，驗證結果皆為三種路段裡最佳，因此後續之情境模擬，將以此中(5KM)路段之資料進行後續應用。表 4.5 為原始 CTM 與本研究所提之混和車流 CTM 模式之驗證結果比較。

表 4.5 驗證結果比較表

時段	路段長	原始 CTM	本研究 CTM
尖峰	3km	26%	25%
	5km	32%	25%
	6.5km	34%	27%
離峰	3km	36%	34%
	5km	31%	27%
	6.5km	41%	29%

第五章、匝道儀控最佳化模式

本章分為兩節，旨在說明本研究中的控制績效評估準則以及應用基因演算法建立最佳定時匝道儀控模式的程序。在第一節中，將介紹本研究中用於評估控制績效的兩個準則，即最小化碰撞危險度和最大化通過流量。首先，將介紹碰撞危險度的概念及計算碰撞危險度的相關指標和方法。接下來最大化通過流量，則是希望能夠通過有效的控制策略增加高速公路流量。在第二節中，則介紹本研究所使用之儀控方法，並歸納基因演算法建立最佳定時匝道儀控模式的所需要設定之參數及流程。

5.1 模式績效之計算

在完成車流模式的建構後，欲建構高速公路匝道儀控策略，分別探討與比較流量和安全性最大化的目標下，匝道儀控在不同自駕車普及率下之最佳控制結果。本研究之績效評估指標主要為兩種，分別為：通過流量(Throughput ,TP)及總碰撞危險度(Total Crash Potential ,TCP)用以評估模式之績效。

1. 通過流量(Throughput ,TP)

流量之計算是則是採用通過最後一格位之流量計算，而其也就代表是在模擬時間內通過整個路段的車流量。

$$Max \{q_{i,j}(t) + q_{i,j+1}(t)\} \quad (39)$$

2. 總碰撞危險度(Total Crash Potential ,TCP)

本研究在碰撞危險度之計算上採用 Abdel-Aty *et al* (2006)所提出之碰撞危險度計算式，而其計算式係透過實際車禍發生時之數據進行迴歸分析求得，實際數據包括車道的速度、流量及佔有率，而研究發現在低速與高速環境下，其碰撞之嚴重程度與影響原因不盡相同，低速碰撞事故主要發生在持續擁堵的情況下，而高速之狀況則與此相反，高速碰撞事故發生前，事故地點的高速公路車流狀況通常呈現平穩，而該研究之結果也發現，其速度變化對碰撞事故的發生影響較小，而是一些從下游開始並向後蔓延的干擾條件可能會導致駕駛員判斷錯誤，進而增加碰撞的可能性。而本研究將其應用於高速公路，因此需選擇針對較高速度道路使用之算式，計算方法如式 40 所示，而總碰撞危險度之計算則是透過加總在模擬時間某一格位之碰撞危險度。

$$CP = -0.93423\log AOF2 + 1.14584\log AOH3 - 0.22878SVH2 - 0.10055AVG2 + 0.5932AVE3 \quad (40)$$

logAOF2:某一時間點某一格位前 5-10 分鐘的平均佔有率

logAOH3:某一時間點某一格位前 10-15 分鐘下游 1 英哩的平均佔有率

SVH2:某一時間點某一格位前 5-10 分鐘下游 1 英哩的流量標準差

AVG2:某一時間點某一格位前 5-10 分鐘下游 0.5 英哩的平均流量

AVE3:某一時間點某一格位前 10-15 分鐘上游 0.5 英哩的平均流量

3. 多目標設定

目標以同時使碰撞危險度最小及流量最大。因此，適合度在設定時，必須將兩個目標予以同向化，均改為愈大愈好，也能避免因其中一項數值過大造成之計算偏差，績效值之計算方式如下。

$$P = w\left(\frac{TCP - TCP_{min}}{TCP_{max} - TCP_{min}}\right) + (1 - W)(1/TP) \quad (41)$$

其中，

P：模式績效

TCP：總碰撞危險度

TP：流量

w：TCP 的權重值，初始設定為 0.5

(1 - W)：TP 的權重值

惟由於 GAs 的適合度值係以愈大愈佳為原則，故適合度值訂為 $f=1/P$ 。

5.2 最佳定時儀控模式

定時儀控 (pre-timed ramp metering) 是一種交通控制方法，它根據預先設定的號誌週期來管理交通流量，這種方法使用事前收集的歷史交通資料，根據不同日期和時間的交通狀況進行預設設置，定時儀控通常應用於高速公路的匝道，旨在預防交通擁塞並提供交通流的疏導，定時儀控可分為兩種主要類型：固定時間 (Fixed-time) 和時段/星期 (Time of Day/Day of week)，固定時間的定時儀控在運作上採用單一儀控率，不考慮不同時段的差異，而時段/星期的定時儀控則根據不同的時段和星期來指定不同的儀控率。

本研究採用的最佳定時儀控策略是多段式的，將每十分鐘作為一個設置時間長度，模擬時間一小時共設有六個儀控率，這種策略的目標是在最小化總碰撞危險度和最大化通過流量的條件下，找到每個時段匝道的最佳儀控率組合。為了尋求最佳儀控率組合，本研究將使用基因演算法 (GAs)，基因演算法是一種仿生學方法，模擬自然界的進化過程，通過適應度函數的優化來搜索最佳解，在這種情況下，適應度函數將考慮碰撞危險度和通過流量，以找到最佳的儀控率組合。

5.3 求解演算法

為了有效解決所設計的匝道儀控策略問題，使用啟發式演算法是一個不錯的選擇。啟發式演算法具有以下幾個優點：高效的搜索能力：啟發式演算法在大範圍的解空間中進行搜索，能夠在較短的時間內找到較好的解。相比於傳統的演算法，啟發式演算法能夠更有效地探索問題空間，快速找到解的可能候選。產生可行的解：啟發式演算法能夠生成可行的解，即使在問題的約束條件下也能找到有效的解決方案。這使得啟發式演算法在解決現實世界問題時更具實用性，因為往往存在複雜的約束條件和限制。多樣化的演算法：啟發式演算法家族包含多種不同的演算法，如禁忌搜索法、螞蟻演算法、模擬退火法、基因演算法等等。每種演算法都有自己的建構策略和理論基礎，能夠針對不同問題的特點進行調整和優化，這種多樣性使得我們可以根據具體問題的需求選擇最適合的演算法，提高求解效果。總而言之，使用啟發式演算法能夠提供高效的解決方案搜索、產生可行的解以及多樣化的演算法選擇。(周怡均,2017)

本研究將使用之啟發式演算法為基因演算法，因其過去常被用於交通領域之應用，包括網路設計問題(Fan & Machemehl, 2006 ; Fan & Gurmu, 2014)及微觀車流模式的參數校估問題(Yu & Fan, 2017 ; 張鈞凱, 2016)，後續將利用此演算法尋找本研究所擬定之整合控制模式在不同自駕車普及率的最佳控制結果。

5.3.1 基因演算法之運作

基因演算法是一種基於達爾文的演化理論的啟發式演算法，最初由 Holland 於 1975 年提出並在 1992 年進行了進一步的發展。該演算法具有以下特點：演化理論的基礎：基因演算法的設計靈感源於達爾文的演化理論中的「物競天擇，適者生存」。它模擬了生物進化的過程，通過基因的交叉、變異和選擇來搜索解空間並找到最佳解。這種基於演化理論的思想使得基因演算法在求解複雜問題時具有很大的潛力；收斂性和求解速度：基因演算法在計算精度上具有較好的收斂性，能夠在較短的時間內找到接近最佳解的解。它利用基因的交叉和變異操作，使得每一代的解都朝著更好的方向演化，逐漸逼近最佳解。這種特性使得基因演算法在求解大型和複雜問題時表現出色；全局搜索能力：基因演算法具有很好的全局搜索能力，能夠快速地從解空間中搜索出解，而不容易陷入局部最佳解的下降陷阱，這是由於基因演算法是一種群體搜索方法，它通過維護一個個體的集合，利用交叉和變異操作不斷生成新的解，從而更全面地探索解空間；潛在的並行性：基因演算法的搜索機制具有潛在的並行性，由於每個個體的評估和演算操作是獨立進行的，因此可以同時處理多個個體，並行地進行比較和演算。這種並行性使得基因演算法在高性能計算環境下能夠更高效地進行求解；迭代的隨機性：基因演算法的迭代過程是使用概率機制，具有一定的隨機性。通過交叉和變異操作的隨機性，可以在解空間中進行更全面的搜索，避免陷入局部最佳解。同時，這種隨機性也使得基因演算法具有一定的探索能力，能夠在解空間中發現新的可能解。主要的步驟敘述如下，其相對應流程圖如圖 2-4 所示。

1. 步驟一(做基因編碼)：

開始運算之前，根據問題的特性需要選擇適當的編碼方式。母體由數個染色體組成，而染色體又由數個基因構成，每個基因代表問題的一個特徵或變數，形成可能的解。同時，必須根據問題的條件來設定目標函數，以此設計適應函數來衡量族群內各個染色體的優劣程度，即它們在解決問題中的表現。基因演算法所常用的編碼種類有以下三種

(1). 二元編碼

二元編碼的基因值只能是 0 或 1。這種編碼方式適用於 0-1 整數規劃問題，如背包問題、區位選擇問題等。搜尋空間的大小為 2 的基因長度次方，

即 2^L (L 為染色體的長度)。例如，可以將基因使用二元編碼，其中 1 表示選擇該特徵，0 表示未選擇該特徵。

(2). 實數編碼

實數編碼表示基因的值可以是實數、整數、自然數或其他代碼。這種編碼方式適用於一般的數學規劃問題和整數規劃問題。搜尋空間的大小取決於問題的類型，如果基因是自然數（例如 1 到 9），則搜尋空間的大小為 9 的基因長度次方；如果基因是實數，則搜尋空間是無窮大的。

(3). 排列編碼

排列編碼表示基因的值代表一個順序或排列。這種編碼方式適用於旅行商問題 (TSP)、車輛路線問題 (VRP) 等順序問題。搜尋空間的大小為基因長度的階乘，即 $L!$ 。

2. 步驟二(產生初始母體)：

產生初始世代是基因演算法的第二步。我們需要建立一個初始族群，其中包含多個染色體。通常，可以使用隨機方式或使用啟發式演算法的設計來生成初始族群。

3. 步驟三(計算適應函數值)：

在生成初始母體後，需要計算每個染色體的適應函數值，適應函數用於衡量染色體的適應度，係根據問題的條件或目標函數進行設計。對於每個染色體，我們計算其適應函數值，並根據適應函數值的大小來評估其優劣程度，該當適應值越好，該染色體被選取為親代，參與產生子代的機率越大；反之，則表示被選取複製的機率越小。

4. 步驟四(選擇與複製過程)：

在當前世代的族群中，選擇並複製親代染色體，為下一代染色體的生成做準備，選擇過程根據染色體的適應函數值來決定其被選中並複製的機會，較好的適應函數值的染色體有較高的選中機會，並參與下一代的生成。常見的選擇方法包括輪盤法和競賽法。

(1). 輪盤法

複製方法中的轉盤法是一種常見且廣泛使用的選擇操作，它基於射飛鏢的觀念。這裡的轉盤即為一個圓盤，它代表了整個染色體群的適應函數值總

和，而圓盤上的每個刻度代表一個個體。刻度所佔的面積與個體的適合度成正比，也就是說適合度較高的個體所佔據的範圍越大

在選擇操作中，複製方法會根據個體的適合度，在轉盤上進行隨機的旋轉，而每個個體被選中的機會與它在轉盤上佔據的面積成比例，適合度較高的個體在轉盤上佔有較大的範圍，因此被選中的機會也較高，而適合度較低的個體則佔有較小的範圍，因此被選中的機會較低。然而，轉盤法也有其缺點，當染色體中存在適應函數值特別優秀的個體時，這些個體可能會在轉盤上佔有較大的範圍，使得它們在整個演化過程中被選中的機會較高，這可能導致演化算法陷入局部最佳化情況，因為這些優秀的個體支配了整個演化過程，使得其他潛在優秀的個體無法獲得充分的機會來參與選擇和進化。

(2). 競賽法

競賽法是一種常見的選擇操作，它的運作方式是從族群中隨機選擇兩個或多個染色體，然後比較它們的適應函數值，選擇適應函數值最好的染色體作為親代，用於下一代的生成。這種方法的優點在於，只需計算所需數量的染色體的適應函數值，而無需計算整個族群的適應函數值，因此能節省計算資源。

然而，競賽法也有一些缺點，在選擇的過程中，較好的染色體有可能被忽略，這是因為競賽法只是基於染色體間的局部比較，而不是全局比較，如果染色體間的適應函數值差異不大，那麼選擇較好的染色體的機會就會相對較低。

5. 步驟五(交配過程)：

交配是在選擇和複製親代完成後進行的一個重要步驟，交配程序首先會定義一個交配率定值，通常使用均勻分佈來隨機產生機率值，當染色體的這個隨機值小於交配率時，該染色體就會進行交配，否則跳過交配過程，保留其原本的基因組合。在進行交配時，首先需要建立一個交配池(Mating pool)，其中包含了已被選擇為親代的染色體，交配池中的染色體會被隨機地選取兩個，並進行基因的交換。這意味著，兩個親代染色體的基因序列會彼此交換，重新組合形成兩個新的子代染色體。

交配是一個重要的進化操作，它能夠促進基因的多樣性，將不同的基因組合結合在一起，增加解的潛在空間，通過不斷地進行選擇、複製和交配，能夠在解空間中進行搜索，逐漸尋找到更優秀的解。然而，交配率的選擇和交配池

的構建都是需要仔細考慮的參數，不同的應用場景可能需要不同的設定，以達到最優的求解效果。常見的交配方式包括單點交配、雙點交配和均勻交配。

(1). 單點交配

在單點交配中，隨機選擇一個交配點，將兩個被選中的染色體切割成兩部分，然後重新組合這些部分形成新的染色體。

(2). 雙點交配

在雙點交配中，我們隨機選擇兩個交配點，將兩個被選中的染色體切割成三部分，然後重新組合這些部分形成新的染色體。

(3). 均勻交配

均勻交配使用一個與染色體長度相同的二進制掩碼。在這個掩碼中，每個位元表示是否進行基因交換。根據掩碼中的位元值，我們進行基因交換或不交換，以生成新的染色體。與單點交配和雙點交配不同，均勻交配中的交配點位置不是固定的。

6. 步驟六(突變過程)：

交配完成後，接下來是進行突變。突變旨在降低基因演算法陷入局部最佳解的機率，過程是根據一定的機率選擇一個或多個染色體（參數組），並隨機選擇其中的一個基因進行突變，改變其數值。這樣的突變操作能夠使得染色體產生新的基因結構，引入新的變異，並將這些變異傳播到整個族群之中。突變是維持族群多樣性的重要機制，透過突變，能夠引入新的基因組合和特徵，導致解空間中的探索更加全面，突變的機率通常由一給定的突變機率(Mutation Rate)所控制，這個機率決定了染色體進行突變的機會。然而，在設計突變機率時需要謹慎考慮，如果突變機率過高，會導致演算法過度強調探索新解，可能使得演算法過於隨機而失去收斂能力，進而無法找到優化解。相反，突變機率過低可能導致演算法陷入區域最佳解，無法跳出局部最優解。

因此，在實際應用中，突變機率需要根據問題的特性和演算法的表現進行調整。通常，較小的突變機率能夠平衡探索和利用的能力，有助於保持族群的多樣性和進化的多樣性，一般設定在 0.05 到 0.1 之間，而常見的突變方式包括單點突變、全基因突變和字罩突變。

(1). 單點突變

在單點突變中，隨機選擇一個突變點，如果隨機生成的數值小於設定的突變率，則將該突變點的基因值進行翻轉。

(2). 全基因突變

在單點突變中，隨機選擇一個突變點，如果隨機生成的數值小於設定的突變率，則將該突變點的基因值進行翻轉。

(3). 字罩突變

字罩突變中，我們隨機生成一個與染色體長度相同的二進制掩碼。掩碼中的位元為 1 表示對應的基因進行突變。對於每個突變點，如果隨機生成的數值小於突變率，則將該基因的值進行翻轉。

7. 步驟七(是否滿足終止條件)：

在基因演算法中，需要設定終止條件，如果滿足終止條件，則視為演算法已找到問題的最佳解，終止條件的設定取決於計算時間和所需的最佳解的精確度，較寬鬆的終止條件可以減少計算時間，但最佳解的精確度可能降低，反之亦然。

5.3.2編解碼方式

在本研究討論最佳定時儀控，選擇採用了整數編碼方式來表示基因，因其整數編碼方式易於理解，且適用高精確度之數值問題，而本研究為納入自駕車之混和車流，自駕車更能受到精確的控制，為求得精確之績效值，本研究未採用高速公路之時制計畫，而是改以匝道容量進行儀控率的計算。

本研究範圍共有六個決策變數，每 3 個基因表示一個儀控率，使用 0 到 9 之間的整數建立，染色體的總長度為 18。以下是基因的編碼方式：以 3 個基因代表一個儀控率，第一個時段儀控率之 X_1 以染色體中 1~3 基因，第二個時段儀控率之 X_2 以 4~6 基因表之，第三個儀控率之 X_3 以 7~9 基因，第四個儀控率之 X_4 以 10~12 基因表之，第五個儀控率之 X_5 以 13~15 基因及第六個儀控率之 X_6 以 16~18 基因表之，例如染色體的表示方式為：578210281763221679，根據基因值進行匝道的容量求算，設匝道容量為每小時 1200 輛車 (pcu)，則以該染色體 X_1 基因值 578，該階段的儀控率設定為基因值 578 乘以 $(1200/999)$ 。

5.3.3基因演算法之參數設定

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=60、交配率=0.6、突變率=0.01 及終止條件則設為最佳適應函數值經過 100 次迭代無變化，即是滿足終止條件。在本研究中，需要求解一個控制期間內的 6 個匝道儀控率，因此每個變數（基因）有 3 個基因位元。這 6 個變數的組合被稱為染色體。交

配使用了最常見的交配型式-單點交配，隨機選擇一個交配點位置，將兩個被選中的染色體切割成兩部分，進行基因的交換。在染色體選擇方面，本研究使用蒙地卡羅轉盤（Roulette Wheel Selection）作為選擇方法，蒙地卡羅轉盤是一種根據染色體適應函數值的比例進行選擇的方法，每個染色體的適應函數值越好，其在輪盤上的面積也越大，從而被選中進入下一代的機會也相對較高，而在突變之方式則為將基因值轉變，若產生突變，則會在染色體中隨機挑選一位置之基因值進行變化，而變化採用隨機亂數選擇之方式，於 0~9 進行選擇。圖 5.1 為本研究求解最佳儀控率之流程圖。

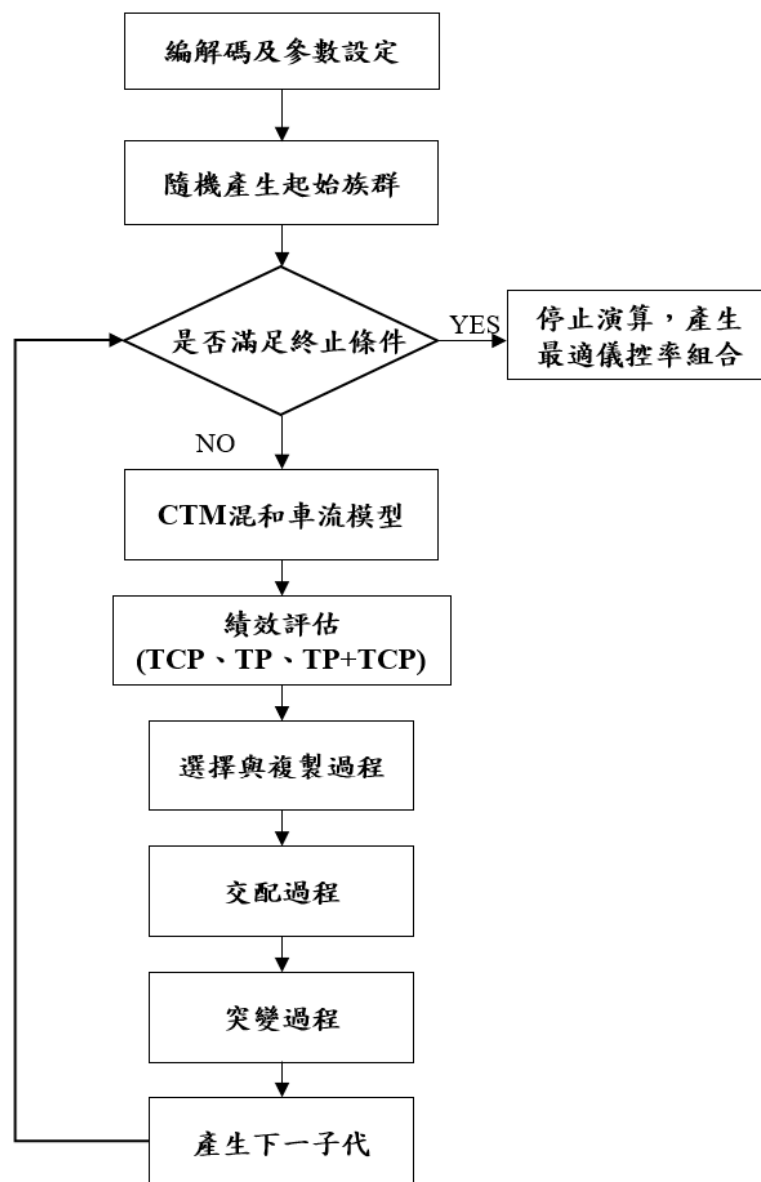


圖 5.1 求解最佳儀控率流程圖

第六章、模式應用與分析

根據前一章節對於本研究所提之混和車流 CTM 模式實際驗證結果可知，其相較於原始 CTM 擁有更佳的預測準確度，且不管是在尖峰或是離峰時段下預估效果皆為良好，因此將此模式進行後續研究，以證明模式之應用性，將使用國道五號北上路段資料作為實例應用，進行後續匝道儀控最佳化模型的發展與求解，並比較尖峰和離峰時段下，不同自動駕駛比例下的匝道儀控模式的績效，第一節為情境說明，第二節則是說明控制績效結果。

6.1 情境說明

本研究是使用國道五號北上路段 37.2K-32.2K，並包含一匝道於 35.7K 匯入，資料收集方面係以高速公路局所公布之偵測器資料為主，所需資料包括每分鐘主線各子路段及上匝道的車流量，從中挑取設定之時段資料，並依據格位傳遞模式之要求，將其資料轉換為符合模式之時皆紀錄表，方便代入混和車流 CTM 模式，不同流量(尖、離峰)對於匝道儀控的判斷會有不同，為了反映不同流量對於匝道儀控設定的影響，本研究設定兩時段進行，分別為星期二晚上九點及星期六早上十點開始一個小時之流量資料，以匝道不實施儀控作為績效評估基準，評估本研究之匝道儀控模式對於高速公路通過量的改善績效程度，表 6.1 為實例資料說明。

表 6.1 實例資料說明

時段	日期	時間	地點
離峰	2023/1/10(二)	21:00~21:59	國道五號北上路段 (37.2K-32.2K)
尖峰	2022/11/20(日)	10:00~10:59	匝道匯入 (35.7K)

6.2 控制績效評估分析

績效評估的部分是先將實際交通量資料代入本研究之混和車流 CTM 模式後，利用基因演算法依據不同的目標下求取各時段之最佳匝道儀控率，再將此結果應用在混和車流 CTM 模式中進行模擬得到績效值，因此 CTM 會依照不同情境找出最佳匝道儀控率而擁有不同之模擬結果，並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。

6.2.1 匝道不實施儀控

在尖峰時段下，隨著自駕車的增加，總通過流量則有明顯的增加，因為自駕車被認為能夠擁有更快速的反應時間，進而增加道路上的車輛密度，因此當在車輛較多之情況下，隨著自駕車比例增加，將有助於在最大流量上的提升。在離峰時段下，則由於車流量相對較低且較為順暢，自駕車所帶來的更短車輛間距效果可能不如尖峰時段明顯，且在較低的交通流量下，車輛之間的跟車距離通常比較大，因此自駕車所能帶來的車輛間距縮短效果有限，這種情況在績效表上也可以觀察到，當自駕車比例從 0% 增加到 100% 的過程，各比例之通過量的差距不會非常大。表 6.2 為不同自駕車普及率下，於尖、離峰時間無控制之績效表。

表 6.2 無控制之績效表

單位: pcu/hr				
自駕車普及率(%)	尖峰	增長幅度	離峰	增長幅度
0	1505	-	961	-
20	1512	0.5%	963	0.2%
40	1532	1.8%	963	0.2%
60	1547	2.8%	963	0.2%
80	1589	5.6%	973	1.2%
100	1601	6.4%	975	1.5%

6.2.2 尖峰控制之績效

尖峰時段下，根據表 6.3 之績效結果顯示，在流量及綜合流量及安全目標之績效結果發現，其提升績效之結果約在 20% 上下，且隨著自駕車普及率的提升，也無法擁有更明顯的提升，猜測其控制結果下，該路段的車流量已接近道路容量的上限，且剩餘空間有限，因此即使透過匝道儀控制或是提高自駕車的比例，皆已無法明顯繼續改善路段的績效狀況，而在以安全性之目標績效結果可發現，其改善績效皆維持在 2% 左右，代表其隨著自動駕駛車輛的普及率增加，總碰撞風險仍然沒有顯著改善，除非道路達到 100% 之自駕車情形。表 6.4 及表 6.5 則為尖峰時段，分別以流量和安全性最大化的目標下之最佳儀控率組合，表 6.6 則為綜合兩目標之最佳儀控率組合。

表 6.3 尖峰控制之績效表為目標

單位: pcu/hr

自駕車普及率(%)	評估指標	無控制	有匝道儀控	績效
0	TP	1505	1771	17.67%
	TCP		1538	2.19%
	TCP+ TP		1748	16.15%
20	TP	1512	1861	23.08%
	TCP		1554	2.78%
	TCP+ TP		1755	16.07%
40	TP	1532	1890	23.37%
	TCP		1605	4.77%
	TCP+ TP		1796	17.23%
60	TP	1547	1907	23.27%
	TCP		1588	2.65%
	TCP+ TP		1814	17.26%
80	TP	1589	1920	20.83%
	TCP		1621	2.01%
	TCP+ TP		1864	17.31%
100	TP	1601	1936	20.92%
	TCP		1697	6.00%
	TCP+ TP		1885	17.74%

表 6.4 尖峰之儀控率表-以 TP 為目標

單位: pcu/hr

自駕車 普及率 (%)	時段一	時段二	時段三	時段四	時段五	時段六
0	1072	1040	571	1189	1090	962
20	1131	1154	987	975	1091	885
40	1136	994	1148	1088	1186	942
60	1183	1157	1097	1112	1030	1076
80	1123	1125	1072	1192	1039	812
100	1060	1046	1172	1191	1173	1120

表 6.5 尖峰之儀控率表-以 TCP 為目標

單位: pcu/hr

自駕車 普及率 (%)	時段一	時段二	時段三	時段四	時段五	時段六
0	595	900	1087	513	364	1053
20	232	380	1160	1196	785	420
40	434	115	1198	1151	1030	404
60	451	224	1174	1187	502	1108
80	409	305	1169	1196	324	877
100	868	136	1115	1196	773	756

表 6.6 尖峰之儀控率表-以 TCP+TP 為目標

單位: pcu/hr

自駕車 普及率 (%)	時段一	時段二	時段三	時段四	時段五	時段六
0	989	1053	1093	1065	797	767
20	924	1066	894	1067	963	966
40	941	1041	1030	1047	758	908
60	833	957	1049	1050	993	1098
80	1000	1042	1069	1065	998	717
100	899	1067	884	1071	1097	1072

6.2.3 離峰控制之績效

離峰時段下，根據表 6.7 之績效結果顯示，在流量或安全性最大化的目標下，在每個自駕車的普及率下，皆產生正績效，控制後的改變幅度都非常顯著，離峰時段由於路段上行車數量較少，主線路段上的空位區間較多，即可容納更多匝道匯入之車輛，能夠有效增加道路的通行量，而且以效率為目標值的績效值則會隨著自駕車的普及率提升而有一定的增加幅度，可看到正績效值從 42% 提升至 51%，而以安全性為目標之績效值，則不隨著自駕車普及率而有所大幅度改變，則是一直維持 35% 上下，猜測因其以平穩且平順的去控制匝道進入的車輛數，避免匝道一時匯入太大量車流，進而影響主線的行車安全，甚至是反應不及增加其他危險性，此外也能降低衝擊波速度所造成的危險，綜合安全性及效率性所找出之儀控組合，可發現其績效值皆處於以 TP 及 TCP 目標之績效值中間。表 6.8 及表 6.9 則為尖峰時段，分別以流量和安全性最大化的目標下之最佳儀控率組合，表 6.10 則為綜合兩目標之最佳儀控率組合。

表 6.7 離峰控制之績效表為目標

單位: pcu/hr

自駕車普及率(%)	評估指標	無控制	有匝道儀控	績效
0	TP	961	1369	42%
	TCP		1286	33%
	TCP+ TP		1287	33%
20	TP	963	1371	42%
	TCP		1298	35%
	TCP+ TP		1300	35%
40	TP	963	1411	47%
	TCP		1280	33%
	TCP+ TP		1346	40%
60	TP	963	1426	48%
	TCP		1312	36%
	TCP+ TP		1334	39%
80	TP	973	1472	51%
	TCP		1321	36%
	TCP+ TP		1357	39%
100	TP	975	1477	51%
	TCP		1306	34%
	TCP+ TP		1366	40%

表 6.8 離峰之儀控率表-以 TCP 為目標

單位: pcu/hr

自駕車 普及率 (%)	時段一	時段二	時段三	時段四	時段五	時段六
0	1027	1127	1132	1193	755	1052
20	1069	1139	1015	705	792	1192
40	1053	1139	1191	1039	715	1118
60	957	1155	1178	1191	1065	778
80	1183	1177	1060	1066	1196	799
100	1197	1175	1018	1178	1190	725

表 6.9 離峰之儀控率表-以 TP 為目標

單位: pcu/hr

自駕車 普及率 (%)	時段一	時段二	時段三	時段四	時段五	時段六
0	1058	50	1067	1195	753	969
20	401	292	825	1197	244	1031
40	582	162	1190	1187	1109	628
60	849	250	1193	1192	743	863
80	686	483	1198	1185	442	1048
100	601	697	1184	1156	854	455

表 6.10 離峰之儀控率表-以 TCP+TP 為目標

單位: pcu/hr

自駕車 普及率 (%)	時段一	時段二	時段三	時段四	時段五	時段六
0	685	437	797	1078	1074	1179
20	483	744	752	1026	1115	1092
40	793	647	939	1198	593	1198
60	162	1109	1198	843	1053	1153
80	678	878	1050	1065	1054	548
100	700	901	1100	993	969	694

第七章、結論與建議

本研究透過格位傳遞模式進行混和車流模式建構，並針對自駕車及人駕車之運行行為差異進行相關參數的修改，同時為更符合真實道路情況，加入變換車道機制，以有效模擬在高速公路上擁有自駕車及人駕車的混和車流運行情況，再使用基因演算法求解模擬時間內各時段之最佳匝道儀控策略，其主要績效評估係以安全性指標與效率指標，依據本研究之研究成果得到以下幾點結論及建議。

7.1. 結論

1. 本研究的目的是探討自駕車在道路上的比例對整體車流所產生之改變情形，而根據本研究所使用 Newell(2002)的跟車模型及 PATH 實驗室的 CACC 模型進行混和車流環境下的臨界流量與臨界密度的推算，自駕車將可顯著提升道路流量，並且在佔有率大於 50%時，流量增長幅度則越大，100%自駕車普及率時，相較人駕車車流，臨界流量則增加了 102%。
2. 本研究將所建立之混和車流 CTM 模式以未具有自駕車之情境進行驗證，藉由蒐集實際高速公路資料比較實際值與模擬值，並設定尖、離峰及短(3km)、中(5km)及長(6.5km)之路段長進行驗證，並加入原始 CTM 進行比較，以絕對誤差百分比(MAPE)評估模式模擬之績效，本研究模式之績效 MAPE 值在各路段及各時段皆位於合理的預測之內，代表其模式具解釋力，同時，本研究之模式預測結果皆確實優於原始 CTM。
3. 在無任何最佳化控制情形下，在車輛較多的尖峰情況下，隨著自駕車的增加，總通過流量也隨之增加，因為自駕車被認為能夠擁有更快速的反應時間，進而增加道路上的車輛密度，將有助於在最大流量上的提升。
4. 尖峰時段下，在流量及綜合流量及安全目標之績效結果發現，即使自駕車普及率的增加，績效提升之結果皆位在 20%上下，猜測其控制後之路段車流量已接近道路容量的上限，而以安全性之目標績效結果可發現，其改善績效皆維持在 2%左右，代表即使自駕車普及率增加，但總碰撞風險仍然沒有顯著改善，除非道路達到 100%之自駕車情形。

5. 離峰時段下，實施控制後，確實能夠有效增加通過流量，且所增長之幅度都非常顯著，同時，隨著自駕車的普及率提升而有一定的增加幅度，如正績效值從 42% 提升至 51%，而以安全性為目標之績效值，則不隨著自駕車普及率而有所大幅度改變，則是一直維持 35% 上下，說明其可能以平穩且平順的去控制匝道進入的車輛數，以避免增加其他危險性。

7.2. 建議

1. 本研究之混和車流 CTM 模式僅考慮任意性變換車道行為，並且僅有匯入匝道，但高速公路多為匯入及匯出匝道為一組合，未來研究可考慮加入匯出匝道，並且增加因下匝道所產生目的性之強制變換車道行為。
2. 格位劃分係參考高速公路最高限速設置，但在實際資料蒐集中，發現在離峰時的車流狀態或較沒有車的時段，將會擁有超速的行為發生，進而使得在單位時間下有跨格位車輛的產生導致誤差，未來研究可尋求佈設有區間測速之路段，降低跨格位誤差產生。
3. 目前未有詳盡的自駕車與人駕車的混和車流實際數據，未來如有此公開資料，將可針對自駕車之相關參數設定及模式進行驗證，以確認此模式之解釋程度。
4. 本研究目前最佳化控制策略僅考慮匝道儀控，建議未來可加入可變速限控制，因為自駕車之最大優勢則是能有效進行速限控制，以漸變速率的方式接近壅塞地點，以減緩或避免產生之重現性壅塞，進而提升道路使用效率。

參考文獻

- Abdel-Aty, M., Dilmore, J., & Dhindsa, A. (2006). Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement. *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 335-345.
- Carlson, R. C., Papamichail, I. and Papageorgiou, M. (2011) . Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits. *Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No.4 , pp. 1261–1276.
- Daganzo, C. F. (1994). The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*.
- Du, R. J., Chen, S. K., Li, Y. J., Alinizzi, M., & Labi, S. (2022). A Framework for Lane-Change Maneuvers of Connected Autonomous Vehicles in a Mixed-Traffic Environment. *Electronics*, 11(9), Article 1350.
- Gipps, P. G. (1981) . A behavioural carfollowing model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 15, no. 2, pp. 105 – 111.
- Heygi, A., Schutter, B. De., Hellendoorn, H. (2005). Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed control. *Transportation Research Part C*, vol. 13, No. 3, pp. 185–209.
- Holland, J. H. (1975/1992). Adaptation in Natural and Artificial Systems. Cambridge, MA:MIT Press. Second edition (1992). (First edition, University of Michigan Press, 1975)
- Jepsen, M. (1998) . On the Speed-Flow Relationships in Road Traffic: A Model of Driver Behaviour. In *Proceedings of the Third International Symposium on Highway Capacity*, pp.561–585.
- Jin, Y., Yao, Z., Han, J., Hu L., Jiang Y (2022) . Variable Cell Transmission Model for Mixed Traffic Flow with Connected Automated Vehicles and Human-Driven Vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, Volume 2022
- Khondaker, B. and Kattan, L. (2015). Variable speed limit: A microscopic analysis in a connected vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 58, pp. 146-159.
- Kometani, E., Sasaki, T. (1959) . Dynamic behavior of traffic with a nonlinear spacing-speed relationship. In: Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow. *Research Laboratories, General Motors. Elsevier*, pp. 105–119.
- Levin, M. W. and Boyles, S. D. (2016) . A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol.62, pp.103–116
- Lewis, R. M., H.L. Michael (1963) . Simulation of Traffic Flow to Obtain Volume Warrants for Intersection Control. *HRR 15* , pp.1-43
- Liu, Y., Guo, J., Taplin, J. and Wang, Y. (2017) . Characteristic analysis of mixed traffic flow of regular and autonomous vehicles using cellular automata. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017.
- Mohammadian, S., Mazharul Haque, Md., Zheng, Z. and Bhaskara, A. (2021) . Integrating safety into the fundamental relations of freeway traffic flows: A conflict-based safety assessment framework. *Analytic Methods in Accident Research*, vol. 32.
- Newell, G. F. (2002) . A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 36, no. 3, pp. 195–205.
- Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992) . A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, vol. 2, no. 12, pp. 2221–2229.

- Pan, T., Lam, William. H. K., Sumalee, A. and Zhong, R. (2021) . Multiclass multilane model for freeway traffic mixed with connected automated vehicles and regular human-piloted vehicles. *Transportmetrica A: Transport Science*, vol. 17, pp. 5 – 33.
- Qin, Y. and Wang, H. (2019) . Cell Transmission Model for Mixed Traffic Flow with Connected and Autonomous Vehicles. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 145.
- Sun, J., Zheng, Z., and Sun, J. (2018) . Stability analysis methods and their applicability to carfollowing models in conventional and connected environments. *Transportation research part B: methodological*, vol. 109, pp. 212 – 237.
- Roncoli C., Papageorgiou M. and Papamichail I. (2015) . Traffic flow optimisation in presence of vehicle automation and communication systems - Part I: A first-order multi-lane model for motorway traffic .*Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 57, pp. 241-259
- Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D. (2000) . Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, vol. 62, no. 2, pp. 1805-1824.
- Von Neumann, J. (1951) . The general and logical theory of automata. *Cerebral mechanisms in behavior; the Hixon Symposium* , pp. 1 – 41.
- Vranken, T., & Schreckenberg, M. (2022). Modelling multi-lane heterogeneous traffic flow with human-driven, automated, and communicating automated vehicles. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 589, Article 126629.
- Wang, M., Daamen, W., Hoogendoorn, S. P. and Arem, B. V. (2016) . Connected variable speed limits control and car-following control with vehicle-infrastructure communication to resolve stop-and-go waves. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, pp. 559-572.
- Wu, Y., Lin, Y. Hu, R., Wang, Z., Zhao, B., Yao, Z. (2022) . Modeling and Simulation of Traffic Congestion for Mixed Traffic Flow with Connected Automated Vehicles: A Cell Transmission Model Approach. *J. Adv. Transp.*, vol. 2022
- Xie, D. F., Zhao, X. M. and Z. He (2018) . Heterogeneous traffic mixing regular and connected vehicles: Modeling and stabilization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 6, pp. 2060 – 2071.
- Yang, S., Du, M., and Chen, Q. (2021) . Impact of connected and autonomous vehicles on traffic efficiency and safety of an on-ramp. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 113.
- Ye, L. H., Yamamoto, T. (2018) . Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow. *Phys. A Stat. Mech. Appl.*, vol. 490, pp. 269–277.
- Zhou, J. and Zhu, F. (2020) . Modeling the fundamental diagram of mixed human-driven and connected automated vehicles. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 115.
- Zhou, M., Qu, X. and Jin, S. (2017) . On the Impact of Cooperative Autonomous Vehicles in Improving Freeway Merging: A Modified Intelligent Driver Model-Based Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 6, pp. 1422 – 1428.
- 楊子儉，(2001)，即時應變事故之匝道儀控系統雛型研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 陸勇奇，(2002)，高速公路車流速度模擬及匝道交通管理-以台中地區為例，東海大學資訊工程與科學系碩士論文。
- 王雲慶，(2005)，應用基因模糊邏輯建構適應性匝道儀控系統，逢甲大學交通工程與管理學系碩士論文。

- 蔡美蓉，(2008)，格位轉換模式(CTM)之實證-以中山高速公路為例，逢甲大學交通工程與管理所碩士論文。
- 鍾仁傑，(2008)，模糊邏輯匝道儀控模式-細胞自動機之模擬分析，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
- 林柏辰，(2009)，異常交通狀況下之高速公路基因模糊邏輯速限控制模式，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
- 盧彥聰，(2010)，高速公路主線速率漸變控制策略之研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 薛博元，(2011)，高速公路速率控制與匝道儀控最佳化協控模式之研究，國立臺灣土木工程學研究所碩士論文。
- 鄒政修，(2012)，發展巨觀混合推進模式於高速公路匝道儀控之研究，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 李怡穎，(2013)，高速公路整合控制之啟動時機研究，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文。
- 張鈞凱，(2016)，高速公路可變速限聯合匝道儀控最佳化模式，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 周怡均，(2017)，以基因演算法求解公車駕駛員排班問題之研究，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
- 楊雅媛，(2021)，建立微巨觀混成模型以了解自駕車決策對車流的影響，國立臺灣大學工學院機械工程研究所碩士論文。