

國立交通大學

交通運輸研究所

碩士論文

單一車道自動公路系統
發生意外事故下自動車輛行為模擬

Incident-Responsive Automatic Vehicle Behaviors

Simulation in Single-Automated-Lane Highway Systems

研究生：董晉曄

指導老師：許鉅秉 教授

中華民國九十六年六月

單一車道自動公路系統發生意外事故下自動車輛行為模擬

學生：董晉暉

指導教授：許鉅秉

國立交通大學交通運輸研究所碩士班

摘 要

世界各國為了解決交通擁擠及其伴隨而至之交通事故、能源消耗、環境污染與運輸安全等問題，皆致力於發展智慧型運輸系統。而在智慧型運輸系統的七個子系統中又以自動公路系統為最高科技的一個子系統，也是發展智慧型運輸系統之終極目標。以高速且小車間距前進的自動控制車隊，若遇到路段下游有事故的產生，必定對系統運作產生衝擊。雖然現在的科技還在測試的階段，不過快速的反應事故所帶來的車道阻塞也是先進自動公路系統的關鍵性議題，但目前仍鮮少有自動公路系統發生事故時的相關研究。

本研究是探討在單一自動控制車道之自動公路系統對事故發生時作因應事故之反應，目的在於建立一個自動車輛控制邏輯，使得自動控制車輛能夠安全且順暢的通過事故點，而這些嵌入的交通控制邏輯都是基於基本的安全需求。首先建立事故上游之三個動態區域來規範自動控制車輛在事故上游的車隊拆解、事故引起之跟車及變換車道、以及強制煞車，以車輛相對速率觀點及車間距切入，藉由防止車輛縱向及橫向碰撞來做判斷變換車道之邏輯，並以同樣的觀點建立混合車流跟車之準則。再以程式語言 BCB 撰寫控制邏輯，做情境敏感度分析，找出車隊規模、車隊初速、鄰近車道車流量、車隊間距對整體車流之影響。

關鍵字：自動公路系統、事故、智慧型運輸系統

**Incident-Responsive Automatic Vehicle Behaviors Simulation in
Single-Automated-Lane Highway Systems**

Student : Chin-Yeh Tung

Advisors : Dr. Jiuh-Biing Sheu

**Institute of Traffic & Transportation
National Chiao Tung University**

ABSTRACT

Many countries around the world devote to develop Intelligent Transportation Systems (ITS) to solve congestion problems, which coupled with some issues of incidents, consumption of energy resource, environmental pollution, and transportation safety. Automated Highway System (AHS) is not only the most hi-technical subsystem in the 7 subsystems of ITS, but also the ultimate goal of development of ITS. An automated-control platoon approaching with high speed and small vehicular spacing will face to critical impacts when incident occurs on downstream highway. Prompt response to lane-blocking incidents is a critical issue in development of advanced AHS although all the limited existing AHS technologies are on trial. But there are few researches to discuss these issues.

This paper focuses on the response to incidents for single-automated-lane highway system to design a control logic which permits automated vehicles (AC) change to adjacent lane. The embedded traffic control logic is based on the safety requirement. First we present three dynamic spatial zones, which are platoon decomposing, incident-induced car-following and lane-changing, and mandatory braking. This paper is focus on embedding control logic with the views of relative velocity and vehicular spacing to make decision of automaic-control vehicles via avoiding longitudinal and lateral collisions. Then, we compose BCB programming language to do sensitivity analyses of many scenarios, and find the relationships between platoon size, platoon speed, variable traffic condition, platoon headway speed and traffic flow.

Keyword : Automated Highway System, Incident, ITS

誌謝

我原本不會寫程式，我原本不會做研究，整篇論文從無到有，對我來說根本是不可能的任務。由衷感謝許鉅秉教授的悉心指導，對於論文內容的嚴謹要求，以及對於研究觀念的啟發，均令我受惠良多。論文口試期間，承蒙張美香教授與胡守任博士耐心指正並惠賜卓見，使本論文更臻完善，特此致謝。

感謝交通大學交研所老師們的教導，賜予我學術知識的啟蒙。感謝小 V 和阿 Ben 兩位程式達人，在程式的寫作上給予我的指導，沒有你們我可能早就回家種田了。

感謝女友小美，一路上的陪伴與體貼，也很抱歉常為了論文而忽略了妳，我會更加珍惜我們相處的時光，趁還沒當兵前再來一趟甜蜜蜜的旅行。

感謝同 Lab 的師兄姊們，書婷、阿秋、大頭、紅豆，雖然這學期因為家裡的事常常缺席每個禮拜一次的 Meeting，不過每次 Meeting 的血和淚可是深深烙印在心中。尤其是師兄阿秋會長，讓我的研究所生活變得多彩多姿，還有大頭，一直幫我、教我弄東弄西，沒有你我還真的不知道怎麼辦。

感謝學號 9436501~9436530 的同班同學們，從大學就是罵吉的金將、萬事通 Mud、搞怪搞笑二人組入中和小明、5566 地上最強的好厝邊薰論、論文最後戰役的戰友大玥、毒舌派但人很好的博彥、很愛嚇我的 SM 女王小慧、專業級按摩的 Kilik、出去玩鐵咖柯以媽和同鄉金門妹菁怡，還有宇函、阿凱、江蕙老師、靈芝、忍者龜...等，兩年來的風風雨雨，感謝有你們在身旁！

感謝不同研究所但一起為論文打拼的好兄弟們，竹交的蕭阿炮、台大的李冠毛、盧一哥，大家相互打氣才是論文前進的原動力；也感謝所有曾經鼓勵我的好朋友們！

謹獻給所有幫助過我的家人、老師及同學們！此階段的任務已完成，真的要離開了，前往人生另一段旅程，研究所兩年來的歷練讓我有信心面對未來的挑戰，要不斷前進、不斷成長，也願你們身體健康、事事順心！

董晉暉 謹誌于交通大學交研所

民國 96 年 7 月

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目 錄.....	IV
圖 目 錄.....	VII
表 目 錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究範圍與限制.....	3
1.4 研究方法.....	4
1.5 研究流程.....	5
第二章 文獻回顧.....	6
2.1 自動公路系統.....	6
2.1.1 發展概況.....	6
2.1.2 AHS 的主要功能與分類.....	8
2.1.3 先進安全車輛.....	9
2.2 變換車道.....	13
2.2.1 一般變換車道.....	13
2.2.2 AHS 變換車道.....	14
2.3 跟車行為.....	19
2.3.1 人為跟車理論.....	19
2.3.2 自動車輛偵測系統.....	20
2.3.3 混合車流決策樹.....	22

2.3.4	自動車輛跟車行為模式.....	23
2.3.5	乘車舒適度指標.....	24
2.4	文獻評析.....	25
第三章	自動車輛行為模式構建.....	26
3.1	系統定義.....	27
3.1.1	事故影響區.....	27
3.1.2	基本假設.....	28
3.2	門檻值之界定.....	29
3.2.1	強制煞車區之計算.....	30
3.2.2	跟車緩衝區之計算.....	32
3.2.3	車隊拆解區之計算.....	33
3.3	變換車道模式構建.....	34
3.3.1	變換車道因素.....	35
3.3.2	變換車道模式.....	35
3.4	混合車流跟車模式.....	41
3.5	變換回自動車道模式.....	43
3.6	車隊重組模式.....	43
3.7	最舒適加速度.....	44
3.8	小結.....	46
第四章	程式模擬系統之發展.....	47
4.1	程式撰寫.....	47
4.2	實驗設計.....	57
4.3	檔案輸出.....	61
第五章	模式應用與情境分析.....	64
5.1	情境分析.....	64
5.1.1	情境建立.....	64

5.1.2 評估準則建立.....	74
5.1.3 情境分析結果.....	74
5.1.4 道路容量近飽和之分析.....	85
5.2 敏感度分析.....	87
5.3 車流時空圖.....	89
第六章 結論與建議.....	103
6.1 結論.....	103
6.2 建議.....	104
參考文獻.....	105



圖目錄

圖 1-1	研究流程圖	5
圖 2-1	先進安全車輛裝置示意圖	10
圖 2-2	美國 ASV 全方位防撞系統示意圖	12
圖 2-3	跟車反應系統	21
圖 2-4	判斷決策樹	22
圖 2-5	相對距離示意圖	23
圖 3-1	模擬流程概念圖	26
圖 3-2	事故上下游之影響區示意圖	28
圖 3-3	自動控制車隊前進之三個動態門檻	30
圖 3-4	AC 車輛強制煞車之動態安全距離	31
圖 3-5	AC 車輛強制煞車之動態安全距離	34
圖 3-6	變換車道之時間—距離概念圖	36
圖 3-7	相對距離示意圖	42
圖 3-8	速度對時間	45
圖 3-9	拋物線加速度與減速度	45
圖 4-1	主程式 main() 流程圖	48
圖 4-2	A_move() 函式流程圖	53
圖 4-3	trans_check() 函式流程圖	55
圖 4-4	trans_ctrl() 函式流程圖	56
圖 4-5	模擬高速公路路段幾何特性示意圖	57
圖 4-6	平坦路段速率與流量關係及服務水準劃分之等級	59
圖 4-7	Greenshield's model 下之流量與密度對應圖	61
圖 5-1	基準情境 8-23 之三維車流時空圖	89
圖 5-2	基準情境 8-23 之二維車流時空圖	90

圖 5-3	情境 2-23 之三維車流時空圖	91
圖 5-4	情境 2-23 之二維車流時空圖	91
圖 5-5	情境 10-23 之三維車流時空圖	92
圖 5-6	情境 10-23 之二維車流時空圖	93
圖 5-7	情境 8-22 之三維車流時空圖	94
圖 5-8	情境 8-22 之二維車流時空圖	94
圖 5-9	情境 8-24 之三維車流時空圖	95
圖 5-10	情境 8-24 之二維車流時空圖	96
圖 5-11	情境 8-20 之三維車流時空圖	97
圖 5-12	情境 8-20 之二維車流時空圖	97
圖 5-13	情境 8-26 之三維車流時空圖	98
圖 5-14	情境 8-26 之二維車流時空圖	99
圖 5-15	基準情境 8-23 人為操縱車輛之二維車流時空圖	100
圖 5-16	情境 8-20 人為操縱車輛之二維車流時空圖	101
圖 5-17	情境 8-26 人為操縱車輛之二維車流時空圖	102

表 目 錄

表 2-1	跟車間距相關研究	20
表 2-2	衝度異常門檻值表	24
表 4-1	程式變數說明	49
表 4-2	程式函式說明	50
表 4-3	車輛尺寸資料表(單位：m)	58
表 4-4	車輛行駛速率與一般加減速度之資料表(單位：m/s ²).....	58
表 4-5	乾路面、輪胎狀態好下最大加速度及最大減速度資料表(單位：m/s ²)	58
表 4-6	單位時間內的檔案輸出狀態之一	62
表 4-7	單位時間內的檔案輸出狀態之二	63
表 5-1	自動控制車隊規模 2 之模擬情境	65
表 5-2	自動控制車隊規模 3 之模擬情境	66
表 5-3	自動控制車隊規模 4 之模擬情境	67
表 5-4	自動控制車隊規模 5 之模擬情境	68
表 5-5	自動控制車隊規模 6 之模擬情境	69
表 5-6	自動控制車隊規模 7 之模擬情境	70
表 5-7	自動控制車隊規模 8 之模擬情境	71
表 5-8	自動控制車隊規模 9 之模擬情境	72
表 5-9	自動控制車隊規模 10 之模擬情境	73
表 5-10	自動控制車隊規模 2 模擬情境之 Output	75
表 5-11	自動控制車隊規模 3 模擬情境之 Output	76
表 5-12	自動控制車隊規模 4 模擬情境之 Output	77
表 5-13	自動控制車隊規模 5 模擬情境之 Output	78
表 5-14	自動控制車隊規模 6 模擬情境之 Output	79

表 5-15	自動控制車隊規模 7 模擬情境之 Output	80
表 5-16	自動控制車隊規模 8 模擬情境之 Output	81
表 5-17	自動控制車隊規模 9 模擬情境之 Output	82
表 5-18	自動控制車隊規模 10 模擬情境之 Output	83
表 5-19	變換車道成功率	86
表 5-20	敏感度分析之目標參數	87
表 5-21	敏感度分析結果	88



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

為了解決交通擁擠及其伴隨發生的交通事故、能源消耗、環境污染與運輸安全等課題，也為了增進旅客與貨物之流暢與經濟生產力，智慧型運輸系統（Intelligent Transportation System, ITS）的發展是必然的趨勢。在美國 ITS 系統中，包含了先進交通管理系統（ATMS）、先進旅行者資訊系統（ATIS）、先進公共運輸系統（APTS）、先進車輛控制安全系統（AVCSS）、商用車輛營運系統（CVO）、緊急事故支援系統（EMS）、電子收付費系統（EPS&ETC）、資訊管理系統（IMS）及弱勢使用者保護服務（VIPS）等九大子系統。

本研究的研究對象為自動公路系統（Automated Highway System, AHS），自動公路系統是以車輛完全自我控制，或利用道路週邊設施的輔助，來協助車輛自動駕駛。然而，突發性的事故發生將對自動公路系統帶來系統性的衝擊，此衝擊來自於自動控制車輛是以高速、小車間距的車隊形式前進，事故一旦發生，自動車隊將因應事故發生以煞車停等或是變換車道來躲避事故發生之車道阻塞，故自動公路系統對於事故引起車道阻塞之自動化的反應，便是自動公路系統的關鍵性課題。

此議題的重要性有三：

1. 事故引起的車道內交通的現象，包括下令變換車道及停等車輛溢流等，依舊是含糊不清的。和車流理論、事故管理、交通控制等交通領域相關。
2. 自動控制（Automated-Control, AC）車輛與非自動控制車輛的特性不同，主要取決於人為因素。事故發生後所造成的混合車流將比一般自動車道上的車流行為複雜許多。
3. 事故特性的變化（如：事故持續的時間及發生地點）通常伴隨著事故衝擊（延滯、停等長度），這些時間上及空間上的不確定性，將使得所使用的

交通控制及管理策略無效。

隨著自動公路系統發展及實際測試，在自動公路系統發展成熟、車輛完全自動駕駛之前，將會有人為駕駛及自動駕駛的兩種駕駛型態並存的過渡期，因為科技的成熟度與人對科技的信賴程度有相當一段差距，所以過渡時期將持續一段時間。故未來進入測試階段的自動公路系統，將先撥用高速公路最內側的單一車道作為自動控制車道，自動控制車道僅允許自動控制車輛行駛，一般人為駕駛車輛不得駛入。若行駛於高速公路上的所有車輛若皆為自動駕駛，所有車輛行駛行為皆由電腦判斷及控制，車流狀況當然簡單許多；但在發展自動公路系統的過渡時期，面對自動控制車道上發生突發事故或障礙物，快速地反應事故所帶來的衝擊，其中自動控制車輛欲順利通過事故地點，自動車輛變換車道必須考慮鄰近車道人為駕駛之人為因素，變換車道後之自動手動駕駛的混合車流必然相當複雜。

而在現行的跟車過程，駕駛人無形耗費了許多的時間和精力在注意與前車的相對速度以保持適當、安全的距離，故自動駕駛系統，是未來智慧型運輸系統（Intelligent Transportation System, ITS）發展的方向，自動控制車輛的發展有幾個過程：

1. 自動定速車輛（Automatic Cruise Control Vehicle），能夠在高速公路上定速高速行駛，目前發展至可以在市區自動定速低速行駛。
2. 研發自動車輛在車輛稀少之公路行駛，可依狀況調整加速、減速、或停止。
3. 自動車輛能夠相互串連，以車隊為單位並應用在高速公路上，開創一條自動控制車道，將自動車輛和非自動車輛相互隔離，各自行駛各自的車道。
4. 讓自動控制車輛和一般車輛能夠混合行駛，而不去限制車道是否為自動車輛或是非自動車輛行駛之用。

關於自動控制車輛之文獻，已經有為數不少並且深入的探討，從單一車輛行駛乃至於車隊串聯，直到自動變換車道；不過，想要達到完全混合自動和手動車輛行駛仍有相當多的問題需要克服；但對於上述第三點高速公路單一自動控制車道，倘若自動控制車道發生事故，期望自動車輛在變換至一般車道後，也能夠短

暫的自動行駛並在通過事故點之後變換回自動控制車道。此種事故發生時，所造成的混合自動控制車輛以及人為操縱車輛的混合車流，在自動高速公路系統開發之後，必然會對系統產生衝擊，因此選定此主題做研究。

1.2 研究目的

由研究背景與動機可得知，最內側自動控制車道下游發生事故，行駛在此道之自動車輛在轉換至一般車道之後，必須和一般人為操縱車輛混合行駛，如果將車道上的車輛區分為自動車和手動車這兩種，這時候的跟車行為，除了一般傳統的人為跟車模式(後車駕駛者是人，前車則可能是自動車輛或是人為操作車輛)，增加了自動車輛的跟車模式(自動車輛前方可能是自動車輛或是人為操縱車輛)。

故本研究最主要的研究目的為以下三項：

1. 建立應變事故反應模式控制邏輯，進行模擬與驗證，讓自動控制車道上之 AC 車輛能有效且安全地行駛通過事故點再回到自動控制車道上。
2. 利用程式語言，撰寫模擬器模擬分析事故發生後之自動車輛行為，並利用情境分析，來評估系統績效。變動直接影響模式的主要參數(包括：車隊規模、車隊初速、鄰近車道車流量、預設車間距等)，檢驗評估準則(平均旅行時間、平均延滯時間)的變化，計算出在不同的環境下，怎樣的變數搭配可以得到系統較佳解。
3. 利用敏感度分析檢驗其他變數對整體系統績效之影響。

1.3 研究範圍與限制

本研究之範圍主要界定在，當高速公路上的內側車道為單一自動控制車輛專用車道，而其餘車道則為一般手動人為駕駛車道，當內側自動車輛車道下游發生意外事故，從自動控制車輛開始變換車道，通過事故點，再回到最內側的自動控制車道，在這段過程中討論：

1. 找出自動控制車輛在混合車流中，對於不同情境，處理混合車流中可能發生的狀況。以一輛自動車輛為基礎，考慮其變換車道行為，以及鄰近車道車輛如果變換車道對自動車輛判斷的影響。
2. 變換車道所需的參數（行駛速率、加速度、可接受之安全間距、轉向角等）。
3. 判斷前方車輛種類，為自動或為非自動，在不同的安全距離、速度下，求出自動車輛對應前方車輛所需要的最適跟車行為。
4. 每一個車道皆可能存在自動車輛與手動車輛混合行駛。
5. 模擬自動車輛在事故發生後之行為模式。
6. 變動參數，以敏感度分析求出最適化行為模式。

鑒於自動公路系統仍處於研究發展階段，各種車輛控制單元的發展也都尚未成熟，現有的一些自動公路系統尚在測試階段，所以各種相關技術仍在發展，抑或不明朗，便為本研究之研究限制。而這些限制仍待科技持續研發來支持自動公路系統的長遠發展。故本研究在基於假設所有實體車輛單元、控制技術、通信技術等技術都發展成熟的條件下，所提出之微觀車輛控制邏輯。

1.4 研究方法

綜合上述各點，本研究之研究方法如下：

1. 了解與確認問題及所需使用之研究工具，並進行問題確認及研究範圍、研究對象、研究限制等界定，以進一步確定研究方向。
2. 進行國內外自動公路系統之相關文獻回顧和相關發展課題，包括自動公路系統的發展概述、自動公路系統變換車道行為、自動公路系統的車流理論。
3. 依據 J.B. Sheu (2005) 所提出針對單一自動車道的自動公路系統提出應變事故微觀 (microscopic) 控制邏輯，以此為理論基礎，構建反應事故之微觀角度切入探討即時反應事故之自動車輛行為模式。
4. 自動車輛推進可區分為跟車行為與變換行為。本研究中，本車跟車行為所對應的加減速反應，將以前方車隊行駛速率為依據；而變換車道行為則將考量本車

- 與本車道前車、相鄰車道前車、相鄰車道後車之動態關係，判定可否變換車道。
5. 將所構建之車輛行為模式，界定出其決策變數，針對所構建之模式以及欲模擬的情境，撰寫模擬程式。
 6. 進行模式與程式設計及分析。程式則以程式語言 C++ 撰寫控制邏輯，進行模式模擬，並且進行情境之敏感度分析，探討全面性的混合車流。

1.5 研究流程

本研究之研究流程如圖 1-1 所示：

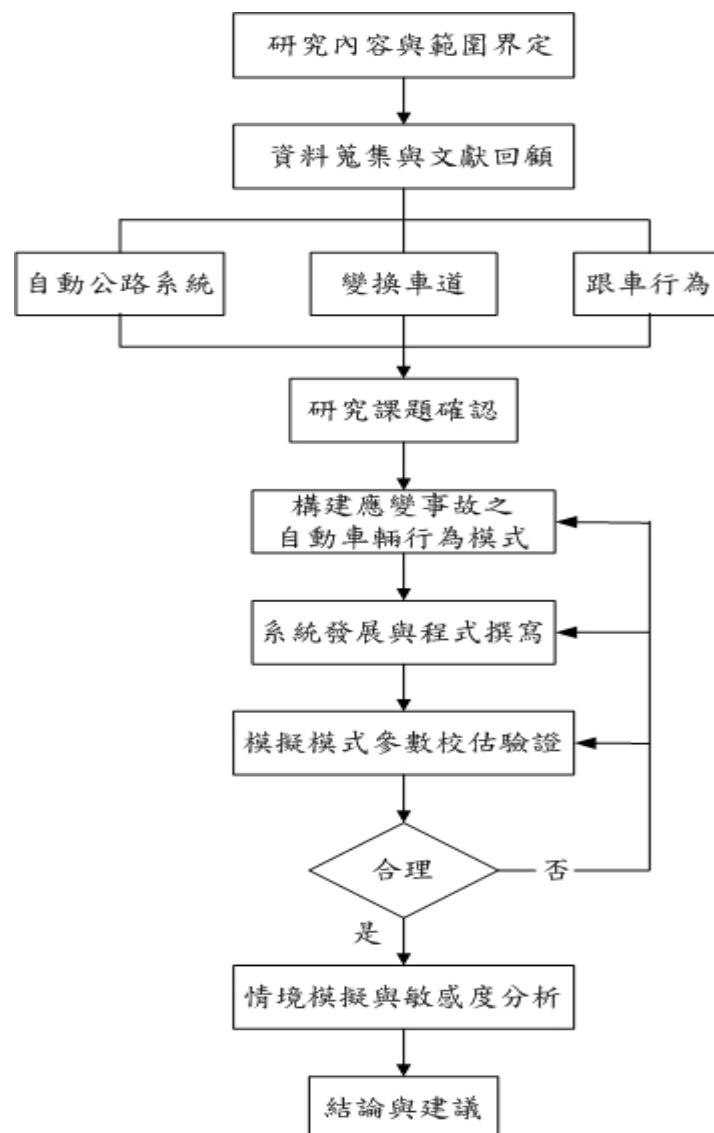


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章將針對本研究相關之自動公路系統及現今科技發展概況、自動公路系統變換車道、自動公路系統車流理論，以及過去國內外學者所做自動公路系統之相關文獻，做統整與回顧，期望可以對於本研究有所啟發。

2.1 自動公路系統

2.1.1 發展概況

「自動公路系統」是指以車輛完全自我控制，或利用道路週邊設施的輔助，使車輛得以自動行駛。其目的在藉由先進的通訊以及自動控制等技術之應用，協助駕駛人駕駛車輛，以降低駕駛人開車時精神及體力上的負擔，並提升交通安全與運輸效率。依據交通部運輸研究所 87 年日本考察報告：自動公路系統在美國稱為 AHS (Automated Highway System)，在日本則以其實際發展的階段與內容，而修正為先進式導航公路系統 ACHS (Advanced Cruise-assist Highway System)。AHS 的基本概念，簡單來說就是運用公路上與車輛上的電子通訊系統，導引車輛安全行駛乃至發展到無人駕駛的理想境界。

關於自動公路系統的發展過程，在此作一個簡單的介紹。1989 年，日本建設部成立一研究計畫，研究及發展日本的道路設施系統，提供駕駛人自動化的操控系統。該計畫在車輛完全自主概念上有三個主要的特點：

1. 在車身前方和旁邊的雷射測距感應器能偵測到駕駛人前方和旁邊的物體，並能測出該物體和車輛的間距。
2. 由安裝在車內後視鏡上的 CCD 攝影機偵測路旁的記號，若車子偏離了道路，車輛便會自動向駕駛人發出警告。
3. 安裝在車身兩旁後視鏡上的 CCD 攝影機偵測由後而至的車流，並在必要時發出聲音警告。

1996 年成立 AHS 研究組織 (AHSRA)，確立研究之概念與架構，同年在尚未開放使用的上信越道進行自動車輛運轉試驗，試驗的內容包括有：(1) 與前方車輛衝突之防止，(2) 與側向車輛間衝突之防止，(3) 道路前方發生事故時的警告機制，以及 (4) 自動運轉機能之試驗。

美國自動公路系統協會 NAHSC (National Automated Highway System Consortium) 於 1997 年進行自動公路系統試驗展示 (Demo'97)，證明自動化公路 (AHS) 的技術可行性。主要的試驗在聖地牙哥到洛杉磯之間的州際公路上進行，試驗車輛上都裝有磁鐵感測器和高敏感度的雷達裝置。磁鐵感測器用來檢測車輛在公路上的位置，高敏感度的雷達裝置用來檢測車速和安全距離並避開障礙物，車輛在公路上的行駛就不需要由駕駛者控制，駕駛者可悠閒地坐在車上休息或做其他的事情。

1998 年歐洲公開展示其自動公路系統研究成果 (Demo'98)。試驗地點為建設中的高速公路 (N11)，內容包括有都市駕駛控制 (Urban Drive Control)、智慧型速度調整 (Intelligent Speed Adaptation)、駕駛者行為檢查與車輛運轉支援等項目。同年在韓國舉行之 ITS 世界會議中，亦有自動化公路系統之試驗展示，之後在 1999、2000 年，美國及日本兩國也都有相關試驗展示。

然而自動公路系統的發展最重要的還是其運作的功能：適應性巡行系統 (Adaptive Cruise Control) 的發展是考慮了安全及使用者的接受度，而未來發展先進的巡行控制則必須在現有的基礎建設中加入障礙物危險警告 (Obstacle Warning)、車間距危險警告 (Headway Warning)，以及自動車輛辨識 (Automatic Vehicle Identification) 等功能。路邊設施—車輛之聯繫、車輛—車輛之聯繫也是對未來 AHS 發展相當重要。自動煞車系統藉由在前方的車輛或路邊設施傳遞減速要求，車輛必須非常確定即將發生的危險，而後方跟隨車輛對即將發生危險的認知及其本身的車速也是重要的考慮因素 (Cem Ünsal,1997)。這些技術都隨時要求對於車輛位置的極大準確度，如果系統是以路邊設施為基礎的系統，則路邊設施必須對於非自動車輛的位置有相當的了解，而資訊的更新率則必須在每秒超

過 100 次並且安全的需求必須小於 10 公分 (James,1994)。

AHS 發展的最後一步就是完全的自動控制，在駕駛者方面將不需要對車輛做任何控制，所有的路線決定都交由使用自動車輛位置定位系統 (Automatic Vehicle Location, AVL) 與先進旅行者資訊系統 (ATIS)，駕駛者可以增加路徑選擇判斷準則，一旦路徑選擇確定後，系統將引導車輛前進，並且最新的繞徑選擇及資訊也將藉由先進交通管理系統 (ATMS) 來處理。

2.1.2 AHS 的主要功能與分類

一、AHS 的主要功能

我們了解自動公路系統主要能夠提供駕駛人更舒服及安全的駕駛環境，而 AHS 對於汽車駕駛人所提供的服務，可概略分為以下四種：

- 1.提供行車與道路狀況資訊：藉由車上與路旁的偵測設備，蒐集並提供駕駛人即時路況與車輛週遭環境的資訊，例如前方有故障車輛或起霧之資訊，增加駕駛人對行車環境的了解，以提高行車安全。
- 2.危險警告：經由系統迅速整合即時的車輛位置、行車速率與前方障礙物的距離、或車輛偏離車道等資訊，對駕駛人發出危險警告，以輔助駕駛人做必要的反應決策。
- 3.行車運轉輔助：為防止車輛碰撞或撞擊障礙物，甚至偏離車道，系統在上述危險警告後即增加車輛自動控制的功能，對車輛進行車速控制及方向控制，才能在緊急狀況發生時，避免可能的事故發生。
- 4.行車自動運轉：構建完全自動操控輔助功能，對於車輛的方向盤、加速器、煞車系統，乃至與前車保持一定距離等，均交由系統自動操控。

二、以自動化程度作為 AHS 的分類：

M.Broucke & P. Varaiya (1996) 提出 AHS 的理論包含了兩種特性：一是控制法則，用來管理私人運具的移動；另一特性為交通流量管理法則，用來導引整個車流的方法。這兩種特性與法則可用來促進高速公路相關的績效，並且可用來

減少塞車、意外的可能性。AHS 的概念可分為車輛完全自主（車輛完全智慧化）、道路設施控制（大部分由道路上相關設施來控制），以及介於兩者之間的系統。根據美國國家自動公路系統聯盟（NAHSC）的定義，AHS 的發展架構一車輛與道路基礎設施自動控制權的程度，可分為五個研究範疇：

- (1) 車輛完全自主模式（autonomous）：車輛完全自我控制；
- (2) 道路設施與車輛合作模式（cooperative）：除了車輛自我控制外，增加車輛間通訊的功能；
- (3) 道路設施支援模式（infrastructure-supported）：提供道路基礎設施與車輛間通訊的功能；
- (4) 道路設施支援模式（infrastructure-managed）：道路基礎設施管理每一輛車的運作，車輛仍可維持部分自我控制；
- (5) 道路設施控制模式（infrastructure-controlled）：道路基礎設施完全控制車輛的運作。



2.1.3 先進安全車輛

自動公路系統最大的疑慮，就是現今科技發展乃至 AHS 相關技術之發展是否可以支持自動公路系統之發展。然而交通不外乎分為人、車、路三部分，自動公路系統著重的是車輛的部分，於是我們回顧現今對於車輛安全及通訊的發展便可以回應本研究對於自動公路系統相關之假設，在可預見的未來，這些技術發展漸漸成熟，本研究便不至於淪於空談，而是未來交通發展可能會面臨的實際問題。

先進安全車輛（Advanced Safety Vehicle, ASV）的發展主要是由日本率先進行，最主要的目的是如何積極開發以高科技電子產品輔助駕駛者降低車輛事故發生率及人員死傷率，以提升車輛行駛時的安全性能。

先進安全車輛主要的裝置如圖 2-1 所示，以下針對主要裝置之功能與應用技術做簡要介紹：

1、前方防撞警告系統：

此系統可計算車輛與前方車輛距離與其本身車速關係，當車速與車距小於所設定之關係式時，系統變化利用警示標識或是警告音量的動作，警告駕駛者其駕駛行為可能會導致車輛事故，以確保車輛成員生命之安全。應用技術：利用毫微米波雷達或是雷射雷達進行車輛距離的偵測，並經由邏輯判斷式的撰寫，以期達到警告的作用。

其中，毫微米波雷達為頻率範圍落在 26.5~300GHz 的一種雷達，由於頻譜介於微波與光之間，故兼具有兩者之優點。毫微米波雷達的優點是角度分辨率高、頻寬帶大，缺點是大氣吸收較大，需要大作用距離時所需的功率較一般為高。一般以微波雷達或者都卜勒雷達皆可偵測得到前後車之速率，毫微米波雷達由於角度分辨率高，未來使用於偵測鄰近車道前後車之速率應為可行之道。

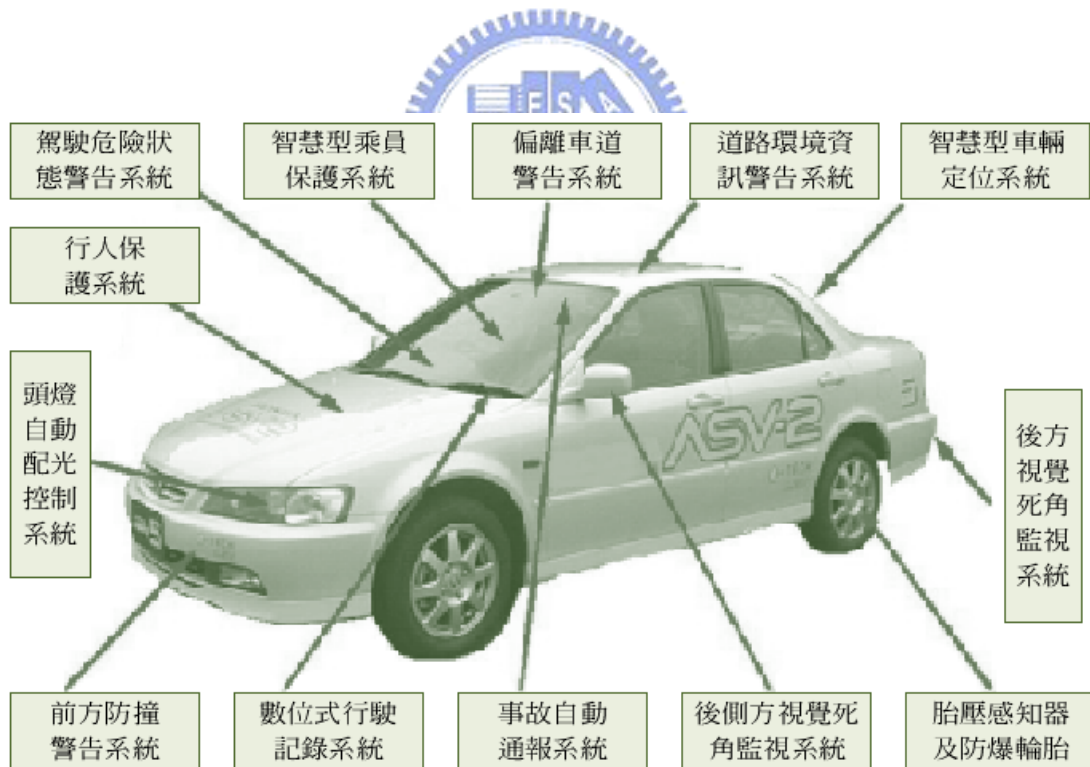


圖 2-1 先進安全車輛裝置示意圖

資料來源：財團法人車輛研究測試中心

2、事故自動通報系統

當車輛發生事故同時，可以藉由此系統發出訊息至緊急救援中心或是救護中心告知發生事故，請相關人員進行救護工作。應用技術：利用事故感知器進行車輛事故發生之判定，進而利用 GPS 進行位置確認與訊號之傳遞。

3、智慧型車輛定位系統

車輛為一可移動之工具，但是如何將移動中車輛的位置與相關資訊做一最好之利用，則為交通管理的最基本的資料庫，因此可以利用這套系統，精準的定義車輛的位置，與道路上車輛的資訊。應用技術：利用 GPS (Global Positioning System) 與豐富完整的 GIS (Geographical Information System) 資料庫將車輛的位置精準的定義，並從車輛之行車電腦進行車輛資料的擷取，進而可以實施進一步之交通管理工作，如經由交控指揮中心進行動態指派車輛之行徑路線等等工作。



4、道路環境警告資訊系統

道路上的突發事故，常為造成交通事故的主要因素之一。因為在快速的行駛過程中，駕駛者對於事故即將發生所做反應動作的時間會比車輛撞擊發生的時間要慢許多，因此若可以將道路上的突發事故提早告知道路使用者，便可以儘早採取應變措施，避免事故的發生。應用技術：利用路邊之資訊設施，提供可資利用之判斷前方道路相關資訊，以利駕駛者可以進行車輛行為的穩定控制，避免因前方之緊急事故造成另一次的交通事故。

5、偏離車道警示系統

車輛若能維持在該行駛的道路上行駛，應可降低許多交通事故發生的機會。此系統即可在車輛發生車道偏離，且駕駛者卻不採取任何的應變措施時，適時的發出警告，以降低事故發生的機率。

另外美國在 1997 年由國家高速公路交通安全局所主導的智慧型車輛開發 (Intelligent Vehicle Initiatives, IVI) 計畫，推動先進安全車輛的研發工作。IVI

計畫內容為發展 360 度全方位碰撞警示系統，如圖 2-2 所示，其中包含三項主要的技術與設備：

- (1) 基本碰撞預防警示技術：適應性巡航控制 (Adaptive Cruise Control)，以防止車輛後方追撞，偵測車輛前方障礙物與行人。
- (2) 先進碰撞預防警示技術：車道變換／匯入的碰撞預防、交叉路口碰撞預防、車輛診斷、障礙物及行人偵測…等。
- (3) 基本旅行者資訊設備：導航／路線指引、即時交通與旅行者資訊、自動的撞擊通知…等。

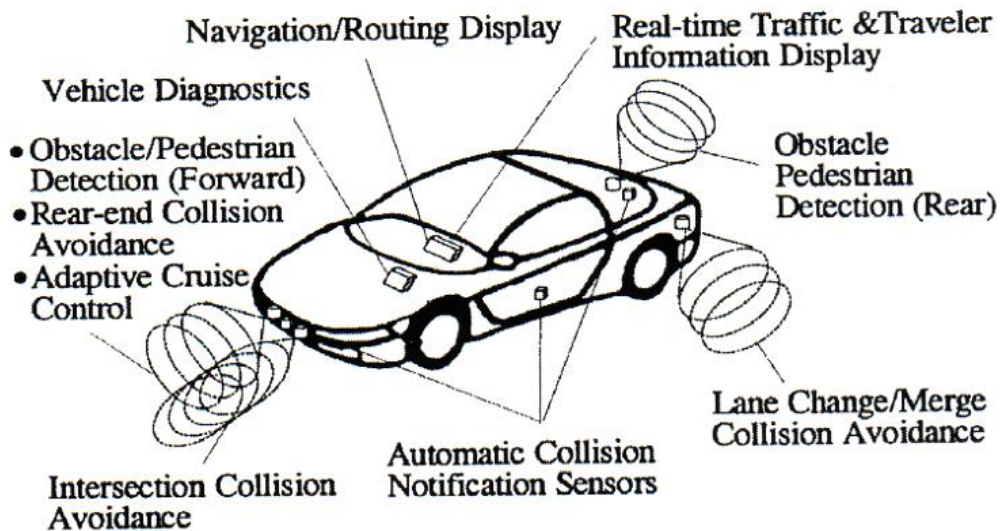


圖 2-2 美國 ASV 全方位防撞系統示意圖

(資料來源：財團法人車輛研究測試中心)

由現今之科技發展，我們可以得知現在車輛的一些功能與科技上都朝著完全自動駕駛的方向邁進，不管是雷達偵測速度與距離，以及側向的偵測，技術上都漸漸地可以做得到，而技術的成熟度也會隨著慢慢增加，有了這些技術的支持，更多改善交通安全的研究發展也會持續往 AHS 來邁進，AHS 也可以說是 ITS 發展的最終極目標。

2.2 變換車道

關於變換車道的文獻回顧方面，以下分為人為變換車道行為以及自動車輛變換車道兩部分來做介紹。

2.2.1 一般變換車道

過去學界針對變換車道所提出的車流模擬模式相當多，國內曾有研究針對國內外變換車道，做整體性的文獻回顧及歸納。

張鈞華(2001)指出變換車道行為，主要可分為選擇性變換車道與強制性變換車道兩種。選擇性變換車道係指當車輛行駛速率小於期望速率，或駕駛者為了減少行車延滯所採行的變換車道行為。而強制性變換車道則是車輛因欲轉向而自其車道變換至指定轉向專用車道之行為。該研究回顧國內外之變換車道之處理方法作了以下的分類：

1. 可接受車間距決定法則

若行駛車輛發現鄰近車道的平均車速維持於定值，且其車間距大於該車駕駛可接受之跟車車間距，則可依需要而變換車道若該車輛進而發現行使車道兩鄰近車道間之車速存在有落差，該車可於變換車道後，將車速調整至鄰近車道的平均車速，調整所需時間亦應納入其車間距決定法則中加以考量。

2. 二元型態模式

將道路車道分割成一格格的單位，每單位中若有車輛存在，定義其值為1，反之則為0；藉由每段時間車輛之推進情形，可研究車輛變換模式。此方法中單元大小將影響描述交通型態的精確度，故單元越小越能表達車輛推進情形。

3. 虛擬車法

考量車輛是否在可變換車道內，比較兩車道車速與車輛數，以決定是否需要變換車道。其次考量使否有足夠之間距供變換車道之用。當A車想要變換車道，即在一秒後將車輛推進至鄰近車道，而原車道則保留一個與原車相同特性之虛擬

車 A'。因此在車道變換過程中，兩相鄰車道之跟隨車接受 A 及 A' 的影響。直到變換車道行為完成後再將虛擬車刪除。

4. 實體車變換車道法

變換車道的決策準則與虛擬車法相同，其次判斷變換車道是否會成功。先找出欲變換之車輛 A 的同車道與鄰近車道之前車 B、B'，計算 A 與 B、B' 於 X 軸推進最遠的車輛偏向角 θ_1 、 θ_2 ，而 θ_1 、 θ_2 之值均需小於 A 車最大偏向角。若 A 車在位於選擇變換車道區內，則該車為了使其推進距離最遠，故選擇 θ_1 、 θ_2 中較大者為該車之變換車道偏向角；若 A 車位於強制變換車道區內，則該車為能盡快進入期望車道，故選擇該車最大偏向角為其變換車道偏向角。

2.2.2 AHS 變換車道

Cem Hatipoglu, Ümit Özgüne, Keith A. Redmill (2003) 研究的主要重點是自動控制變換車道的背景控制理論。對於系統性控制器的發展提供分析方法，將使得在自動公路系統中行駛的自動車輛完成更合適的變換車道。

該研究的目的是在變換車道過渡時期，藉著自動偵測系統獲得間續可利用的有效預期的資料。藉由虛擬偏移參考的產生與並利用健全的變換控制器產生操縱命令，自動車輛追蹤參考，完成變換車道。以此種方式，敞開迴路變換車道被轉換成虛擬參考軌道追蹤問題。這個方法考量在過去時間裡操作的縱向速度的最適性。雖然分析是假設道路為直線，然而對任一道路分段演算的歸納是相當正確的。該篇研究將焦點放在側向控制的議題上，特別是自動變換車道策略。作者提出自動車同時需要表現在兩方面的作業上，一為調整車輛速率保持前後安全距離，一為駕駛如操控車輛側向運動。

實驗在加州聖地牙哥北方 I-15 高承載專用車道 (HOV) 做試驗。第一組試驗數據對應在 20m/s 左側車道變換。跟車系統使用雷達感應器之外，也使用視覺感應器作為備用。第二組試驗在 25m/s 右側車道變換，對應車輛從一端到另一端完成兩個車道變換工作，這些計畫指出在跟車、變換車道、平順變換完成期間是

有效的。

Wonshik Chee, Masayoshi Tomizuka (1994) 提出變換車道方法是屬於自動公路中側向控制的一部分，假設無法直接測量出由本車道變換至另一車道時，則車輛僅能利用車上的虛擬期望軌跡 (Virtual Desired Trajectory, VDT) 的感應器做出變換車道的決策，LQ、FSLQ 與滑行模式 (Sliding mode) 控制演算法目前已被設計出，透過模擬上述的模式可知，結果是令人滿意的。

最佳的變換車道軌跡，可由駕駛人的駕駛舒適度、變換車道時間及移動的軌跡中來考慮，而過去學者提出有關變換車道的理論綜合整理如下：

- (1) Godthelp (1983) 提出藉由調查駕駛的形式，發現駕駛員在變換車道時的角速度是呈現正弦函數。
- (2) Modjtahezadeh (1989) 提出一個新的有關駕駛人變換車道的控制模式。
- (3) Kanayama、Hartman (1989) 提出曲率軌跡模式。
- (4) Nelson (1989) 提出五階多項式軌跡模式。

而在此研究中是利用一個梯形加速度為輪廓，進而提出梯形加速度軌跡模式，作者將此稱為虛擬期望軌跡 (VDT)，之後將此模式利用在 LQ、FSLQ 與 Sliding mode 上進行模擬，得到的結果為，在每小時 70 公里時速下，駕駛舒適度 (ride comfort) 限制在 3 秒鐘，在以 VDT 為基準下，所測得的變換車道時間為 5.92 秒，且上述三種模式所得的結果極為相似。

Lingxi Li & Fei-Yue Wang (2002) 是以交通密度分佈、以安全控制為考量之方法及以人類變換車道的思考模式基準來作為變換車道的依據，並僅考慮與前鄰近車道的距離為基本假設，最後並應用此法套用在模擬軟體來驗證北京的車公莊路上，該模式得到的應證是可以獲得較高的交通流量與減少總旅行時間。

此研究首先對自動公路系統中變換車道的模式做些許假設，例如：所有車輛的大小與長度皆相同、車道前方無任何車時可以加速到本車所期望速率、駕駛對於現行之行車速率滿意時則不會進行變換車道之動作、變換車道之車輛是以左邊車道進行超車、慢速車儘可能的在右邊車道行駛…等。

該篇提出自動變換車道模式的步驟如下：首先，由感應環型天線或其他測量設備得到每一車道的交通密度，比較每一車道的密度值及計算所有車道在時間區間 t 的平均密度，然後選擇密度最大的車道，接下來計算所有車輛變換至密度最大的車道的機率值

$$P = T_d \times (\rho_c - \rho_a), T_d \text{ 代表駕駛者之駕駛行為 } (0 \leq T_d \leq 1)$$

ρ_c 代表目前車道之密度

ρ_a 代表鄰近車道之密度

比較所有車輛的機率值，有最大機率值的車輛最先變換車道，之後，次大機率值的車輛接著變換車道，直到該車輛之機率值接近平均密度或該車道僅剩下非常小心謹慎的駕駛者。最後直到所有的車道在時間區間 t 中估算的密度皆相同。

Datta N. Godbole, Raja Sengupta, Veit Hagenmeyer (1998) 以分散式混合控制設計自動公路系統變換車道模式，以達到能符合安全及效率之要求。在安全性之設計，使用賽局理論-零和賽局之數學模式決策方式，使自動公路系統之車隊在前車及鄰側車輛間，決定安全變換車道之時機與狀況。在效率上之設計，分為一般情形及緊急狀況，一般情形為設計舒適的安全變換車道條件，緊急狀況則以最短距離為設計重點。該方法以混合控制器處理連續行為之模式轉換。

Junji Kaneko, Akihide Shimamura (1998) 將變換車道的設計為配置策略，分為縱向運行模式與橫向運行模式，以保障與同車道的前車保持安全距離且能有足夠的空間轉進欲轉入的鄰車道，最後並以該策略模式在雙車道中進行模擬且得到不錯效果。

Alexander Kanaris (2001) 考慮不同的自動公路系統操作觀念，分析安全的變換與併入車道問題，說明每一個操作概念的車輛減速曲線並且計算對應的變換車道最小安全間距 (Minimum safety spacing for lane changing, MSSLC)。依 AHS 的系統形式討論以下的變換 (併入) 車道問題：

1. 手動駕駛車輛變換車道：變換車道車輛能以偵測器偵測其他車輛，並由車外系統設施提供行車與道路狀況資訊。變換至目標車道後，該車道前車緊急煞車，

對後車的影響，並探討變換車道最小安全間距(MSSLC)。

2. 自動控制車輛變換車道：自動控制車輛除了能偵測其他車輛外，並能接收來自其他車輛及道路設施的資訊及訊號，或能由車外設施控制車輛。討論自動車輛變換車道之目標車道前車緊急煞車，對後車的影響，並探討變換車道最小安全間距。
3. 自動串聯車隊：藉由自動控制系統控制自動車輛串聯行駛，並分車隊有無自動控制連鎖煞車，討論當鄰近車道自動車輛併入車隊時，車隊前車緊急煞車對後車之影響及分析變換車道最小安全間距。

J.B. Sheu (2005) 提出「Microscopic Control Logic for Incident-Responsive Automatic Vehicle Control in Single-Automated-Lane Highway Systems」，針對自動公路系統在發現自動控制車道下游發生事故時，從事故上游的車隊串聯、拆解、變換車道、自動控制車輛與人為操縱車輛之混合跟車模式，乃至於事故下游的車隊再重組前進，提出全面性的控制邏輯。其中，變換車道所考慮的因素可分為「變換車道前的決策 (Pre-action decision-making)」及「變換車道中的運作 (In-action lane-changing operation)」兩個階段。

在「變換車道前的決策」階段，主要針對自動控制車輛與目標鄰近車道的車流狀況來決定是否進入變換車道的階段，潛在的動態車間距的變化是主要影響變換車道的決策因素，主要需滿足三種條件：

1. 變換後的車間距 > 變換前的車間距

自動控制車輛與鄰近車道之後車的距離

$$\begin{aligned} x_{jn, i\sigma}^{t+T_{mc}} &= X_{jn}^{t+T_{mc}} - X_{i\sigma}^{t+T_{mc}} \\ &= \left[X_{jn}^t - v_{jn}^t \times T_{mc} - \frac{1}{2} \times d_{jn}^t \times T_{mc}^2 \right] - \left\{ X_{i\sigma}^t - \left[u_{i\sigma}^t \times T_{mc} + \frac{1}{2} \times A_{i\sigma}^{mc} \times T_{mc}^2 \right] \times \cos \Theta_{mc} \right\} \end{aligned}$$

自動控制車輛與鄰近車道之前車的距離

$$\begin{aligned}
 x_{i\sigma, j_{n-1}}^{t+T_{mc}} &= X_{i\sigma}^{t+T_{mc}} - X_{j_{n-1}}^{t+T_{mc}} \\
 &= \left\{ X_{i\sigma}^t - \left[u_{i\sigma}^t \times T_{mc} + \frac{1}{2} \times A_{i\sigma}^{mc} \times T_{mc}^2 \right] \times \cos \Theta_{mc} \right\} - \left\{ X_{j_{n-1}}^t - \left[v_{j_{n-1}}^t \times T_{mc} + \frac{1}{2} \times D_{j_{n-1}}^t \times T_{mc}^2 \right] \right\}
 \end{aligned}$$

2. 變換後 AC 車輛與鄰近車道前車的距離必須大於 AC 車輛移動的距離

$$\left\{ X_{i\sigma}^t - \left[u_{i\sigma}^t \times T_{mc} + \frac{1}{2} \times A_{i\sigma}^t \times T_{mc}^2 \right] \times \cos \Theta_{mc} \right\} - \left[X_{j_{n-1}}^t - v_{j_{n-1}}^t \times T_{mc} - \frac{1}{2} \times D_{j_{n-1}}^t \times T_{mc}^2 \right] > (1+\varphi)\bar{L} + \mu_{i\sigma}^{t+T_{mc}} \times \tau$$

3. 變換後 AC 車輛與鄰近車道後車的距離必須大於後車所觀察的距離

$$\left[X_{j_n}^t - v_{j_n}^t \times (T_{mc} + \tau) - d_{j_n}^t \times T_{mc} \times \left(\frac{1}{2} \times T_{mc} + \tau \right) \right] - \left\{ X_{i\sigma}^t - \left[u_{i\sigma}^t \times T_{mc} + \frac{1}{2} \times A_{i\sigma}^{mc} \times T_{mc}^2 \right] \times \cos \Theta_{mc} \right\} - (1+\varphi)\bar{L} > 0$$

在「變換車道中的運作」階段，主要決定的是下令變換車道後，和 AC 車輛相關的控制變數。和先前決策階段不同的，無論下令變換車道的決策是否被同意，這個階段的控制變數可以幫助 AC 車輛在鄰近車道不同的交通狀況下，能夠安全且圓滑地匯入鄰近車道車流。所以作者提出兩個控制變數：(1) 隨時間變化的變換車道之轉向角；(2) 速度調整率。

1. 轉向角

$$\tilde{\theta}_{i\sigma}^t = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{W} + X_s^w}{X_{i\sigma}^t - X_{i\sigma-1}^t - \bar{L}} \right)$$

2. 速度調整率

$$\alpha_{i\sigma}^t = \begin{cases} \min \left[\frac{v_{j_{n-1}}^t - \mu_{i\sigma}^t \times \cos \theta_{i\sigma}^t}{T_{mc} \times \cos \theta_{i\sigma}^t}, A_{i\sigma}^t \right], & \text{if } v_{j_{n-1}}^t \geq \mu_{i\sigma}^t \times \cos \theta_{i\sigma}^t \\ \max \left[\frac{v_{j_{n-1}}^t - \mu_{i\sigma}^t \times \cos \theta_{i\sigma}^t}{T_{mc} \times \cos \theta_{i\sigma}^t}, D_{i\sigma}^t \right], & \text{otherwise} \end{cases}$$

由於本研究係以該篇研究作為理論基礎做更深入的探討自動車輛行為，故以上模式的詳細內容及模式發展，將於第三章做更詳盡的說明。

2.3 跟車行為

本節接著介紹一些國內外有關跟車理論的文獻，依序為歷年來跟車理論、自動車輛相關文獻及乘客舒適度指標做回顧。

2.3.1 人為跟車理論

跟車(car-following)是指後車在非自由的車流狀態下，必須經常調整其行車速度以便與前車保持一安全距離，其間的加減速度行為。跟車理論的主要內容是藉跟車行為發生時，後車與前車間的速度、距離等的互動關係，藉以找出駕駛者在跟車時具有的共同反應，並將這些變數以方程式來加以描述。接下來將以時間順序列出重要跟車模式，並且將可參考之模式詳細列出。

Pipes(1953)首先以安全距離的觀念來表示後車的車速與間離間的關係，假設每一位駕駛者與前行車輛維持的空間與己車的速度成比例且加上一段距離。Pipes 理論的缺點為在低速與高速情況下會出現低估的現象，這與實際不符。

Forbes 在跟車模式行為中加入反應時間(Reaction Time)，使後車用以判斷是否該減速煞車，其認為前車之後緣與後車之前緣間的時間間隙(Time Gap)至少應大於或等於反應時間，所以，最小的時間間距(Time Headway)的數學關係式等於反應時間加上前車車長距離之行駛時間。

在 1950 年末期至 1960 年初期之間，美國通用汽車研究群(GM group)之中的 Chandler, Herman and Montroll (1958)三人，在通用汽車位於底特律的實驗室，使用現場照相調查並統計的方式，加入(m, l)矩陣建立刺激-反應方程式。隨後又有經過許多人的修改，如 Herman, Potts (1959)、Helly (1959)、Gazis et al.(1961)、May and Keller (1967)，他們在變數幾乎仍都維持原本不變之下，不斷的校估模式的參數，以求最佳化。這個模式又有人稱之為 GHR 模式。

和 GM 模式發展的時間上同為五零年代末期，CA 模式之創始人為日本人，Kometani and Sasaki(1959)，輸出的值則是和 Pipes 及 Forbes 理論相同為跟車的安

全距離，不同的是，CA 模式多考慮了前車的速度變化，速度變數也為非線性為二次方之變數。

國內針對跟車間距相關之文獻如表 2-1。

表 2-1 跟車間距相關研究

作者	跟車間距模式
張家祝	$MFG=0.75438 \times Vt+6.4$ <p>MFG：最小跟車間距(公尺) Vt：後車速度(公尺/秒)</p>
藍武王、王日昌、江勁毅	$DISTbest=1.36 \times speedn+1+20/3$ <p>DISTbest：最佳距離(公尺) speedn+1：後車速度(公尺/秒)</p> <p>[註]以模糊控制求得之最佳跟車距離</p>

2.3.2 自動車輛偵測系統

Hirofumi Ohtsuka & Ljubo Vlacic (2002) 對現行的自動駕駛系統提出加以改善的研究，如圖 2-3 所示，目的在於讓在市區行駛的汽車，也能在很短距離內判斷是否應該加速或是減速，抑或是煞車，因而發展的自動駕駛系統，而這套系統在內文中是適用在市區多車輛的情形之下；和本研究想了解的發生意外事故時車輛混合跟車，有相當大的關係，原因在於，在未通過事故前，車流速度也是相對緩慢，可以比照市區情況做參考。在圖 2-3 中，「加速度／速度／距離控制器」的判斷公式如下：

1. 加（減）速度判斷公式：

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{1}{\beta} [T_a(t) - T_b(t) - M_{rr} - hF_a(t) - F_g(t)]$$

其中， $F_a(t)$ 為受到的風阻

$F_g(t)$ 為道路坡度的重力

M 為車重

2.煞車系統判斷公式：

$$\frac{d}{dt}P(t) = -aP(t) + K_{bub}(t - L_b)$$

$$T_b(t) = \mu RAP(t)$$

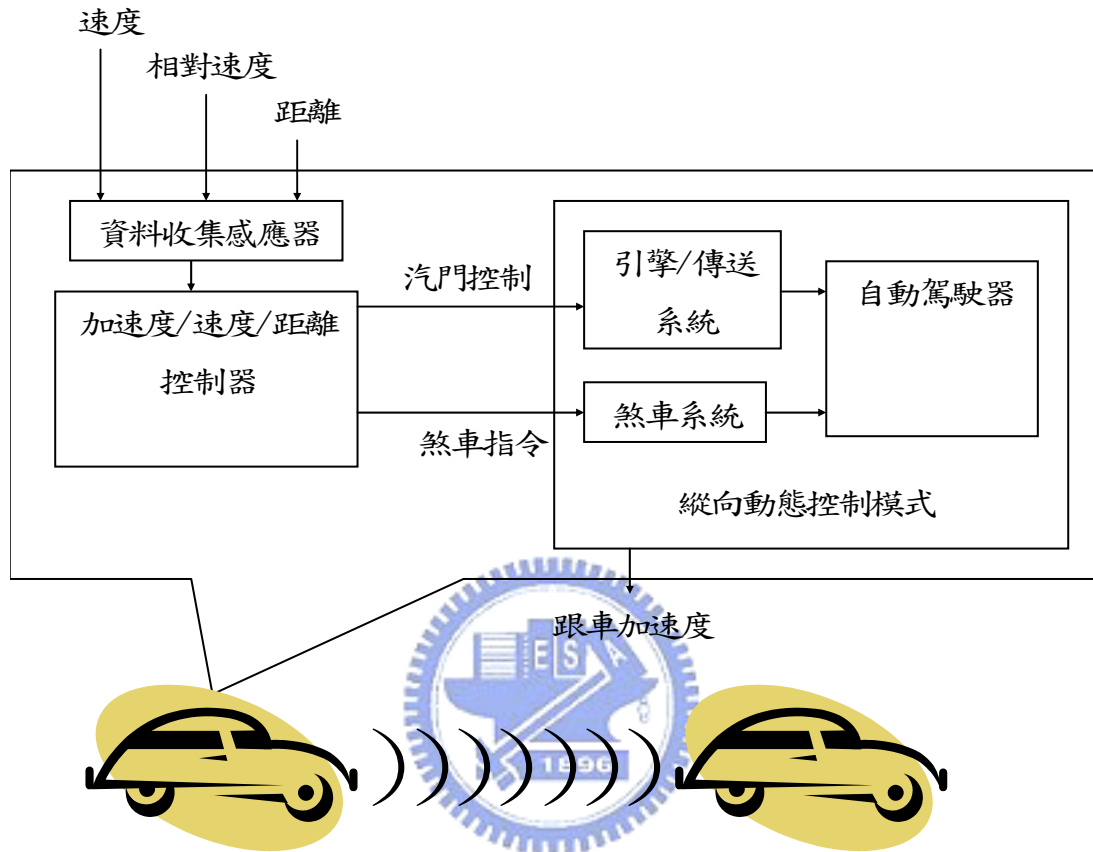


圖 2-3 跟車反應系統

此文獻的優點在於：

- (1) 明確表示車輛上控制車輛加速、減速的裝置、設備。
- (2) 適用於經常性加速／減速皆可使用。

缺點在於：

- (1) 並無明確表示偵測前方資料的範圍上限。
- (2) 雖有判斷法則，但沒將前方車輛種類（自動、人為）列入考慮。
- (3) 只適用於縱向判斷，對於變換車道並無考慮。

2.3.3 混合車流決策樹

Su-Nan Huang, Steven C.Chan, Wei Ren(1998)藉由和前方車輛的相對速度和相對距離，利用決策樹（圖 2-4）找出十種判斷情境，十種判斷情境適用於三種判斷公式。公式如下：

Law1：前方車輛距離尚遠，本車維持理想速率即可

$$a(k) = \lambda_2 \Delta v_{opt}(k - \tau, \alpha)$$

Law2：前方有車且車間距太短，需維持安全距離。

$$a(k) = \frac{\lambda_1}{s(k - \tau)} \Delta v(k - \tau) + K \Delta s_{opt}(k - \tau, \alpha)$$

Law3：前方有車且車速較本車快，可提高速度。

$$a(k) = \frac{\lambda_1}{s(k - \tau)} \Delta v(k - \tau)$$

利用決策樹來表示，在何種情況下，要使用哪種模式。模式主要根據 GM 線性模式修改而成，加入反應時間的考量。

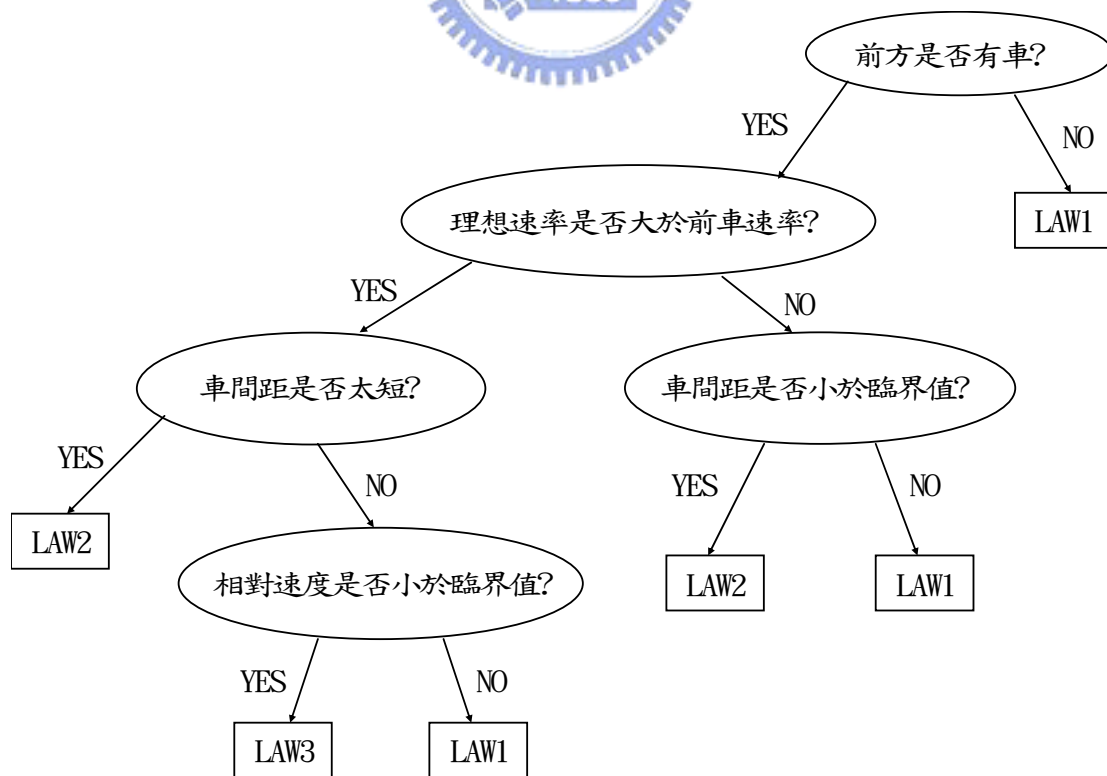


圖 2-4 判斷決策樹

2.3.4 自動車輛跟車行為模式

根據 J.B. Sheu(2005)的自動車跟車加速度模式，簡述如下：

$$\alpha_{i\sigma}^k = W_1^k \times \alpha_1 + W_2^k \times \alpha_2$$

其中 α_1 為前車的瞬間加速度， α_2 是前方車隊的瞬間加速度， W_1 、 W_2 是動態比重，分配各應該給多少值，分別如下：

$$W_1^k = \frac{e^{-\left(X_{j_n}^k\right)}}{e^{-\left(X_{j_n}^k\right)} + e^{-\left(X_{j_{n-1}}^k + X_{j_{n-1} \rightarrow i\sigma}^k\right)}}$$

$$W_2^k = \frac{e^{-\left(X_{j_{n-1}}^k + X_{j_{n-1} \rightarrow i\sigma}^k\right)}}{e^{-\left(X_{j_n}^k\right)} + e^{-\left(X_{j_{n-1}}^k + X_{j_{n-1} \rightarrow i\sigma}^k\right)}}$$

其中 $X_{i\sigma}^k$ 代表在第 k 個偵測時間點， i_σ 車輛車頭到事故發生點的距離；同理， $X_{j_{n-1}}^k$ 代表 j_{n-1} 車輛車頭到事故發生點的距離。以此類推 $X_{j_n}^k$ 。 $X_{j_{n-1} \rightarrow i\sigma}^k$ 代表在第 k 個偵測時間點， j_n 車輛車頭到 i_σ 車輛車頭的距離。(圖 2-5)

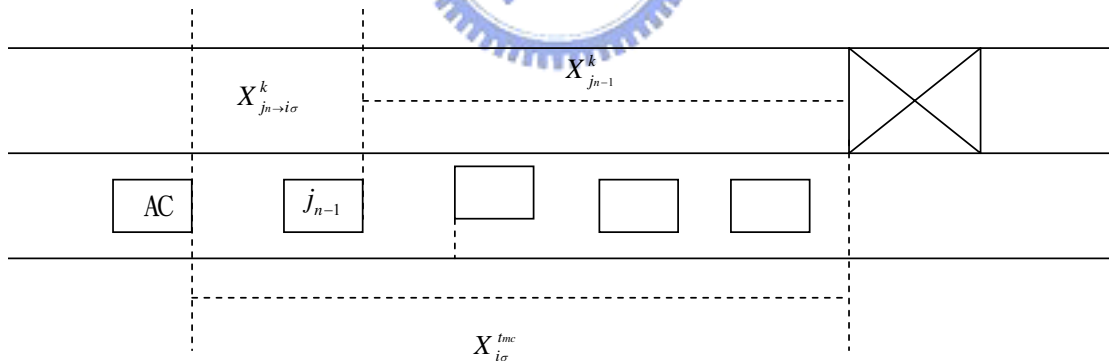


圖 2-5 相對距離示意圖

W_1^k 、 W_2^k 表示自動控制車輛 i_σ 跟隨 j_n 、 j_{n-1} 兩車的加速度變化，會依照 j_n 、 j_{n-1} 距離事故的遠近改變 i_σ 車輛跟車加速度的動態比重，採用羅吉特模式，又 $W_1^k + W_2^k = 1$ ，亦即當 j_n 距離 i_σ 比較近， W_1^k 比較大， W_2^k 相對比較小。又因為前車離本車 i_σ 距離 $X_{j_n \rightarrow i\sigma}^k$ 必小於前前車和本車距離，因此 W_2^k 必小於 W_1^k ，代表前車對本車的加速度調整影響較大。

2.3.5 乘車舒適度指標

乘客舒適度指標根據張季倫(2002)，行車舒適乃指因不當駕駛行為導致行車舒適度降低，主要評估指標分兩大類，分別為前後俯仰指標及車速穩定指標：

前後俯仰指標：(1) 指標定義：因急加速或急煞車導致乘客因慣性作用而產生之俯仰程度。(2) 指標內容： $da(t)/dt$ (衝度)。(3) 指標功能：前後俯仰指標是造成乘車不舒適的主因，因此偵測車輛行駛時加速度之程度大小，為指標的主要功能，為了衡量駕駛加減速行為之程度，以加速度對時間的微分量做為判定依據，除了可以偵測駕駛是否有踩油門或煞車之行為外，將該變化量與正常範圍之門檻值比較，則可判定駕駛是否有急加速或急減速之行為產生。(4) 指標原理：通常造成乘客前後俯仰的原因是駕駛發生急加減速行為時，當此種駕駛行為發生時，車輛會因慣性作用而產生突向前傾或後頓之現象，在車內的人也會隨車體前後搖擺。因此以加速度對時間的微分量做為指標，觀察單位時間內加速度之變化量，可有效偵測駕駛是否有急踩油門或煞車之行為導致車體突向前傾或後頓，造成乘客前後俯仰而感到不適或受傷。(5) 調查結果：如表 2-2。

表 2-2 衝度異常門檻值表

衝度感受	小	中	大
衝度範圍(m/s ³)	+-(1.16~1.62)	+-(1.62~2.06)	>+-2.06

車速穩定指標：(1) 指標定義：車輛行駛速差過大。(2) 指標內容：某時間區間內，加速率標準差與平均速率之比值(速率坡度)。(3) 指標原理：速率坡度指標(velocity gradient)是由於加速度離異指標(acceleration noise) 演變而來的，加速率離異指標的定義是某特定時間內，加速度的標準差大小，標準差越大，表示駕駛人的速率越不穩定。

2.4 文獻評析

關於自動公路系統、AHS 變換車道、AHS 跟車行為的相關研究，已經有許多成果展現，透過這些文獻之回顧，對於各方面之知識皆能吸收到清楚的概念。而文獻回顧中以 J.B. Sheu(2005)所提出「Microscopic Control Logic for Incident-Responsive Automatic Vehicle Control in Single-Automated-Lane Highway Systems」及張季倫(2002)所提出乘客舒適度之概念對本研究影響較為深遠。將以 J.B. Sheu(2005)所構建之模式為基礎，引入乘客舒適度之觀念建構出新模式。並期望在自動控制和人為操縱兩種車輛同時存在時，藉由這些文獻的回顧、模式的構建以及程式的撰寫，發展出一套模擬器，來模擬事故發生後，較全面性的自動控制車輛與人為操縱車輛構成之混合車流情境，並做進一步的分析與探討。



第三章 自動車輛行為模式構建

本章將會詳細介紹先前由 J.B.Sheu(2005)所提之理論。首先對整個系統範圍界定並提出基本假設；其次說明由事故產生地點所界定出來之事故影響區，定義出三個距離事故點的縱向動態門檻值—強制煞車區、跟車緩衝區、車隊拆解區，然後敘述自動控制車輛在這三個臨界值所定義出來的區域內的駕駛行為，並建立起在區域內的車流行為及變換車道的判斷機制，再探討變換車道後的自動車輛在混合車流中的跟車行為及其模式構建。模擬流程概念圖如圖 3-1。

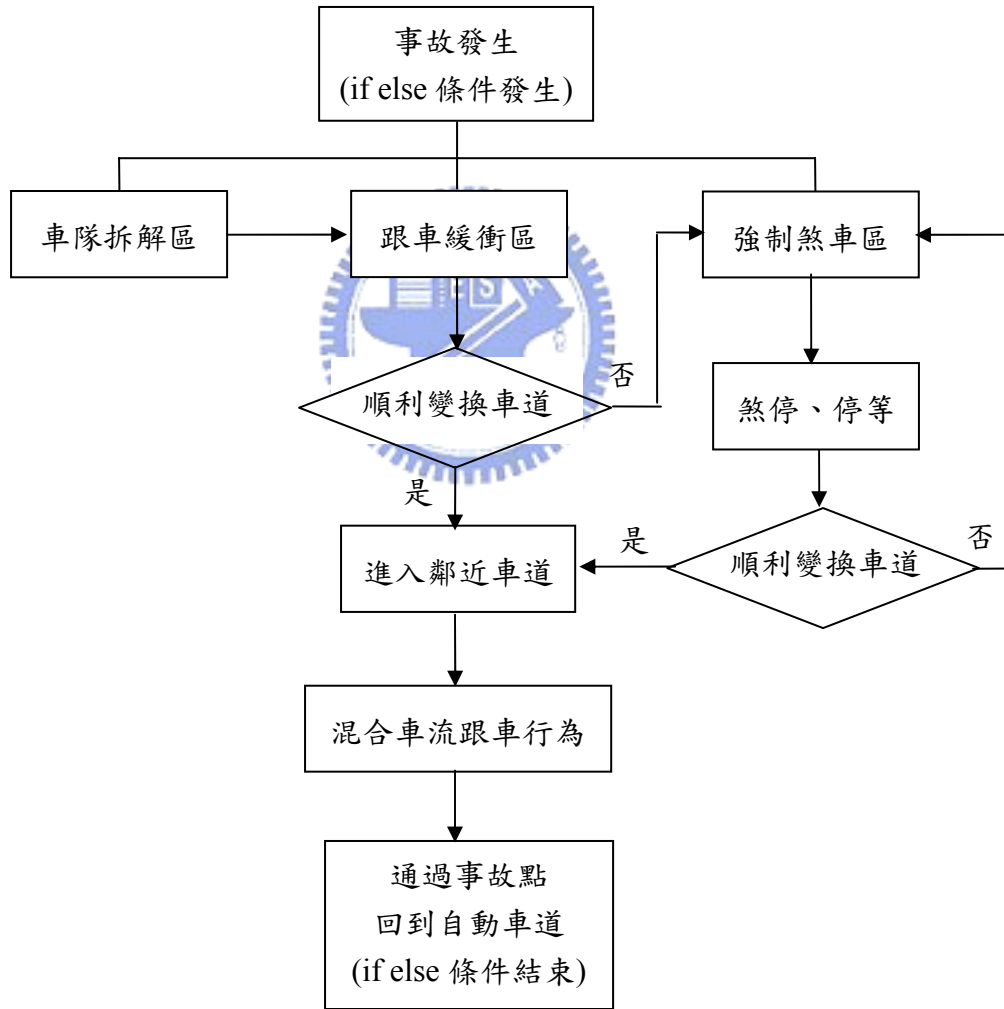


圖 3-1 模擬流程概念圖

3.1 系統定義

3.1.1 事故影響區

為了界定事故引起之車道阻塞，我們選定高速公路主線的一段路段，路段上設定一個事故地點，來觀察自動控制車輛在車道內及車道間的交通情形。

當事故產生後的影響，分為「車道內交通行為」與「車道間交通行為」兩部分，對於特定的自動控制車隊(Automated-control platoon)進入事故影響區後，將面臨三種情境：(1)車隊的前進與拆解(Platoon-approaching)；(2)變換車道(Lane-changing)；(3)車隊重組(Platoon-reforming)；如圖 3-1 所示，第一個情境是車隊會調整前進的速率來回應可能會有的事故衝擊，並且在其間分解成獨立的自動控制車輛。第二個情境則是啟動自動變換車道機制以通過事故地點，若鄰近車道車流狀況不允許變換車道，則可煞車停在事故上游的自動控制車道內。第三個情境則是通過事故地點後，在事故下游重新變換回自動控制車道，並且重組車隊，並繼續在高速公路上的前進。

圖 3-1 中，內側車道為自動控制車道，在自動控制車道內行駛的為自動控制車輛(黃色)，鄰近車道中行駛的為人為駕駛車輛(白色)。AC 車道內灰色圖塊為事故地點，箭頭方向為車輛前進方向。

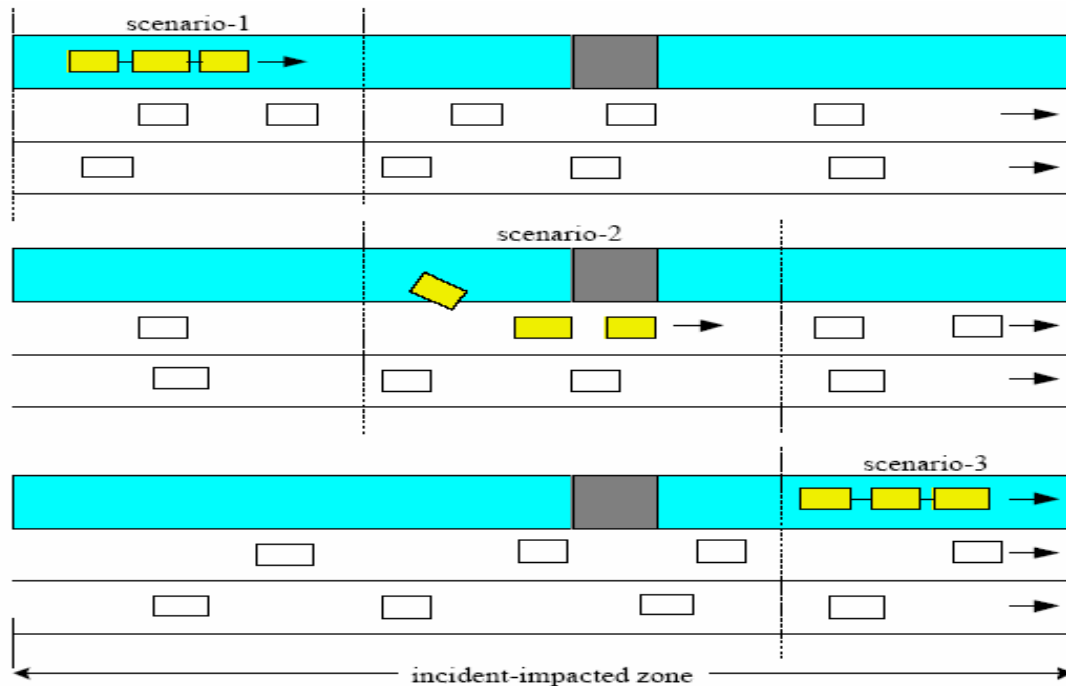


圖 3-2 事故上下游之影響區示意圖

資料來源：Sheu(2005)

3.1.2 基本假設

為了使本研究得以合理、清晰明瞭、簡單化，因此必須對於系統設定一些基本假設，並且將研究的系統作更清楚之說明。基本假設如下：

1. 假設自動公路系統所需要的通訊、控制的技術水準皆足以能因應系統所需求，並達技術成熟的階段。
2. 自動控制車道安排置於高速公路之最內側車道；以小客車自動車輛為主要研究對象。
3. 自動控制車道僅有自動控制車輛行駛，一般車輛不得進入及行駛於自動控制車道。若事故並非出現於自動控制車道上，則對於自動公路系統而言判斷並無事故產生。
4. 假設發生之事故僅在自動控制車道上，而不會遍及鄰近車道，或橫跨自動控制車道及其鄰近車道。
5. 系統對於自動車道發生事故所需之偵測時間不予考慮。

- 6.與自動控制車輛相關之參數，均不考慮人為因素(如：擔心害怕)。
- 7.不考慮天氣因素，因此雷達偵測干擾不予考慮、路面乾濕度採用良好之狀況；
輪胎之胎面狀況也採用良好之狀況。

3.2 門檻值之界定

自動控制車輛在事故未發生前，每輛車輛皆以高車速、小車間距的方式串聯，組成車隊形式來前進。為了控制自動控制車隊接近事故地點，定義出三個動態區域，當 AC 車輛行駛在這三個區域中，便分別決定了其車流行為：(1)車隊拆解區(Platoon decomposing zone)；(2)事故造成之 AC 車輛跟車行為(incident-induced AC car-following zone)；(3)強制煞車(mandatory braking zone)。而這三個動態區域由三個門檻值所界定出來，分別為 X_b^σ 、 X_f^σ 、 X_d^σ ，表示由事故地點起算到路段上游之實際縱向距離(如圖 3-2 所示)，其中 σ 代表給定的目標 AC 車隊 σ ；下標 b 表示強制煞車(mandatory braking)；下標 f 表示跟車行為(car following)；下標 d 表示為車隊拆解(platoon decomposing)。

門檻值 X_b^σ 是對於所有 AC 車輛如果無法在跟車區中尋求變換車道成功時，能夠從目標車隊 σ 中拆解出來，並安全地停止在事故地點上游之最小的安全距離要求，其中最小安全距離是車輛以最大減速度來減速所需之行駛距離。若 AC 車輛尚未進入此區域，則保持定速行駛，等待變換車道機會；若進入此區域則必須強制煞車。

門檻值 X_f^σ 是讓拆解後的 AC 車輛在阻塞車道中調整車與車間的距離調整所需的距離，因此由 X_b^σ 與 X_f^σ 所構成的區域，稱為緩衝區(Buffer zone)，也是事故造成之跟車區。當 AC 車輛進入緩衝區後，可能會執行兩種情境：(1)調整車速及安全距離，尋求成功變換車道；(2)若無法變換車道，便在事故阻塞車道中進行跟車行為。

門檻值 X_d^σ 是當高速的目標車隊 σ 以高速接近事故地點，然而進入此門檻距離之後車隊開始拆解成單一的 AC 車輛，並且採取減速來獲得車與車之間距可以擴大，在車隊拆解之後，AC 控制策略由集中化(centralization)轉變成非集中化(decentralization)，藉由個別 AC 車輛採取不同的交通策略來接近事故地點。

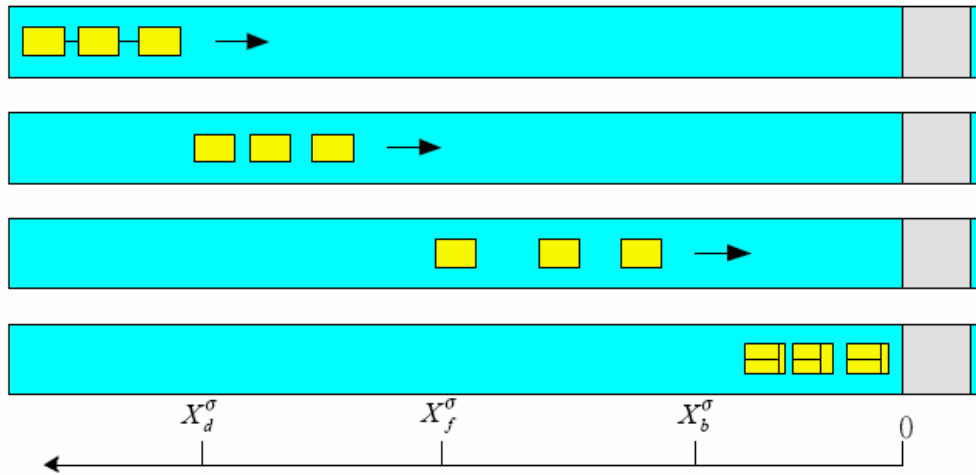


圖 3-3 自動控制車隊前進之三個動態門檻

資料來源：Sheu(2005)

3.2.1 強制煞車區之計算

X_b^σ 是對於所有 AC 車輛如果無法在跟車區中尋求變換車道成功時，能夠從目標車隊 σ 中拆解，並安全的停止在事故地點上游之最小的安全距離要求。在計算 X_b^σ 時首先考慮車隊 σ 在時間 t_b 時進入強制煞車區之車輛皆以速率 $\mu_\sigma^{t_b}$ 前進，車輛數 $n_\sigma^{t_b}$ 。然而我們也要考慮目標車隊 σ 前面的車隊 $\sigma-1$ 所累積的停等車輛數 $n_{\sigma-1}^{t_b}$ (如圖 3-3 所示)，故我們可以計算出所需要的最小安全距離 X_b^σ 為

$$X_b^\sigma = \sum_{i_\sigma=2}^{n_\sigma^{t_b}} \left[X_s - \frac{(v_\sigma^{t_b})^2}{2d_{i_\sigma}^{t_b}} + \frac{(v_\sigma^{t_b})^2}{2d_{i_\sigma-1}^{t_b}} \right] + \left[X_s - \frac{(v_\sigma^{t_b})^2}{2d_1^{t_b}} \right] + [n_{\sigma-1}^{t_b} \times X_s] \quad (1)$$

將(1)式整理之後得到如下：

$$X_b^\sigma = \sum_{i_\sigma=1}^{n_\sigma^b} \left[X_s - \frac{(v_\sigma^{t_b})^2}{2d_{i_\sigma}^{t_b}} \right] + \left[\sum_{i_\sigma=2}^{n_\sigma^b} \frac{(v_\sigma^{t_b})^2}{2d_{i_\sigma-1}^{t_b}} \right] + [n_{\sigma-1}^{t_b} \times X_s] \quad (2)$$

式中，

X_s ：預設的任何兩輛 AC 車輛車頭到車頭之最小車間距(m)

$d_{i_\sigma}^{t_b}$ 和 $d_{i_\sigma-1}^{t_b}$ ：分別表示目標 AC 車輛與其前面車輛之減速度(m/s²)

$\mu_\sigma^{t_b}$ ：目標車隊中 AC 車輛的前進速率(m/s)

$n_\sigma^{t_b}$ 與 $n_{\sigma-1}^{t_b}$ ：車隊 σ 的車輛數及車隊 $\sigma-1$ 所停等之車輛數

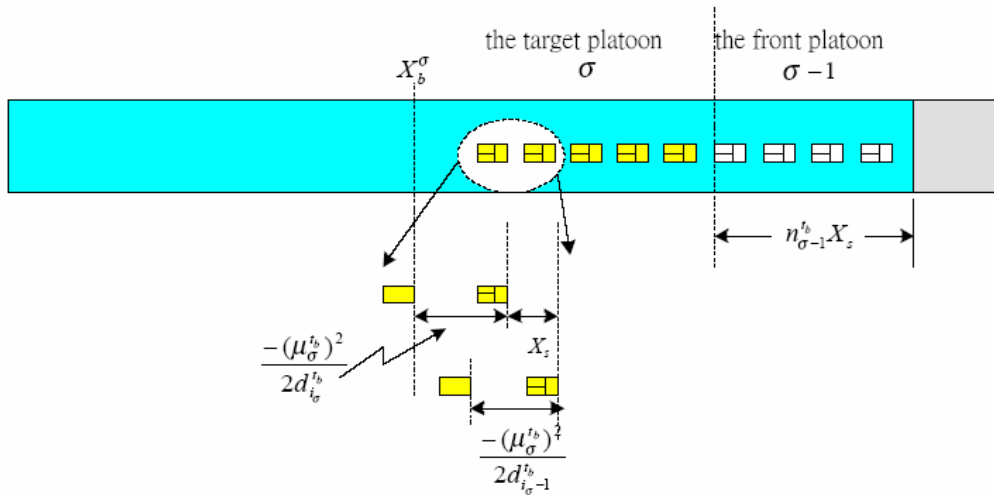


圖 3-4 AC 車輛強制煞車之動態安全距離

資料來源：Sheu(2005)

(1)式的第一個部分是將車隊 σ 裡第二輛車到第 $n_\sigma^{t_b}$ 車在煞車後與前車的車間距總和；第二個部分是車隊 σ 裡第一輛車煞車所行走之距離；第三個部分是前方車隊所停等的車隊長度，有 $n_{\sigma-1}^{t_b}$ 個靜態預設車間距。

值得一提的是(2)式也可以用在車輛間の間距調整，也就是說相等車間距及不等車間距的情形。在不等車間距的情形下，AC 車輛應該會以不同的減速度接近強制煞車區，以維持兩兩 AC 車輛在完全煞停之後的靜態安全車間距，因此(2)

式可以直接描述 X_b^σ ；在相等車間距的情形下，所有 AC 車輛會以同樣的減速度 $d_{i_\sigma}^{t_b}$ 接近，因此，(2)式可以改寫成比較簡單的形式：

$$X_b^\sigma = n_\sigma^{t_b} X_s - \frac{(\mu_\sigma^{t_b})^2}{2 d_\sigma^{t_b}} + n_{\sigma-1}^{t_b} X_s \quad (3)$$

3.2.2 跟車緩衝區之計算

X_f^σ 是讓拆解後的 AC 車輛在阻塞車道中調整車間距調整所需的行駛距離之緩衝區，並且調整車速及安全距離，尋求成功變換車道得在阻塞車道中進行跟車行為。拆解後的 AC 車輛在時間 t_f 時，以初始的目標車隊速率 $\mu_\sigma^{t_b}$ 、定值的初始車間距 $x_\sigma^{t_f}$ 進入緩衝區，進入緩衝區之後會有兩種情境發生：一、在跟車的過程中，任何兩兩 AC 車輛之車間距將因安全考慮而逐漸拉大，會由後面的車開始減速，逐漸擴大到所有 AC 車輛可以保持一致的速率及擴大車間距；二、為了成功的通過事故地點，在鄰近車道的交通狀況允許之下，有些在阻塞車道上行駛的 AC 車輛會執行變換車道策略。在這個同時變換車道的車輛為了讓目標 AC 車輛與鄰近車道車輛的車速一致，有可能執行加速或者減速。基於上述的情形，初始的車間距 $x_\sigma^{t_f}$ 可能會調整為

$$x_{i_\sigma}^{t_f} = \begin{cases} \left[\frac{A_{i_\sigma}^{mc} \times T_{mc}^2}{2} \right] \times \cos \theta_{i_\sigma}^{mc} & , \text{ if } \bar{v}_j^{t_f} \geq \mu_{i_\sigma}^{t_0} \\ \frac{(\bar{v}_j^{t_f} - \mu_{i_\sigma}^{t_0})^2}{2 \times D_{i_\sigma}^{mc}} & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中，

$\bar{v}_j^{t_f}$ ：表示在時間 t_f 時鄰近車道 j 觀察到之平均車速(m/s)

$A_{i_\sigma}^{mc}$ ：目標 AC 車輛預設之最大加速度(m/s²)

$D_{i_\sigma}^{mc}$ ：目標 AC 車輛預設之最大減速度(m/s²)

T_{mc} : 變換車道平均所需時間(sec)

$\theta_{i_{\sigma}}^{mc}$: 預設之轉向角度(rad)

值得注意的是之前的車間距控制邏輯，AC 車輛調整速率讓速率與鄰近車道 j 的平均車速相等，並且在跟車的過程尋求變換車道的可能性，這樣兩階段的控制機制可以達到路段之車流的新均衡狀態。因此，我們可以算出門檻值 X_f^{σ} 為

$$X_f^{\sigma} = X_b^{\sigma} + n_{\sigma}^{t_f} \times x_{\sigma}^{t_f} \quad (5)$$

同樣值得一提的是，如果在緩衝區有 AC 車輛完成變換車道，自動控制車道上 AC 的車間距將變得更大，可以形成更安全的情形，所以 X_f^{σ} 是符合最小的安全要求。除此之外，我們也建議在阻塞車道上的 AC 車輛能夠維持同樣的速率 $\mu_{\sigma}^{t_b}$ 和鄰近車道 j 之車輛平均速率相等，直到到達強制煞車區為止。

3.2.3 車隊拆解區之計算



X_d^{σ} 是當目標車隊以高速從事故遠端接近事故地點，一旦 AC 車輛進入由 X_d^{σ} 及 X_f^{σ} 所形成之區域，便拆解成單一 AC 車輛。在這裡考慮目標車隊有 $n_{\sigma}^{t_b}$ 輛車，並且以速率 $\mu_{\sigma}^{t_b}$ 、靜態車間距 $x_{\sigma}^{t_0}$ 來移動。若 AC 車輛還沒進入車隊拆解區，則拆解的動作將不會進行，也就是整個目標車隊 σ 的所有 AC 車輛在進入車隊拆解區後進行拆解，並於其中穩定的移動時間 T_d 秒，因此可得知

$$X_d^{\sigma} - X_f^{\sigma} = \bar{L} + \left[(n_{\sigma}^{t_d} - 1) \times (\bar{L} + x_{\sigma}^{t_0}) \right] + \mu_{\sigma}^{t_0} \times T_d \quad (6)$$

$$\Rightarrow X_d^{\sigma} = X_f^{\sigma} + \left\{ \bar{L} + \left[(n_{\sigma}^{t_d} - 1) \times (\bar{L} + x_{\sigma}^{t_0}) + \mu_{\sigma}^{t_0} \times T_d \right] \right\} \quad (7)$$

式中， \bar{L} : 系統中車輛之平均車長(m)

T_d : 在拆解區所行駛之時間(sec)

3.3 變換車道模式構建

變換車道的控制邏輯主要目的是規範每一輛 AC 車輛在車隊拆解後，於跟車緩衝區或強制煞車區內的移動，從過去的研究來看，最大的挑戰性議題仍舊是如何作適當的決定來允許 AC 車輛匯入人為駕駛的鄰近車道車流。根據 Sheu(2004) 提出變換車道控制邏輯處理變換車道行為分為兩個步驟：「變換車道前的決策 (Pre-action decision-making)」及「變換車道中的運作(In-action lane-changing operations)」兩個階段，在兩者都符合的情況下才能安全地變換車道。「變換車道前的決策」主要是以目標 AC 車輛與鄰近車道前後車的關係來做決策參數；「變換車道中的運作」主要是探討目標 AC 車輛與其前車所形成之轉向角，以及加速度的調整。圖 3-5 所示為變換車道的示意圖

其中， i_{σ} : 欲作變換車道之自動控制車輛， $i_{\sigma}-1$ 為其前車

j_n : 目標 AC 車輛之鄰近車道後車

j_{n-1} : 目標 AC 車輛之鄰近車道前車

$\theta_{i_{\sigma}}^t$: 隨時間變化之轉向角

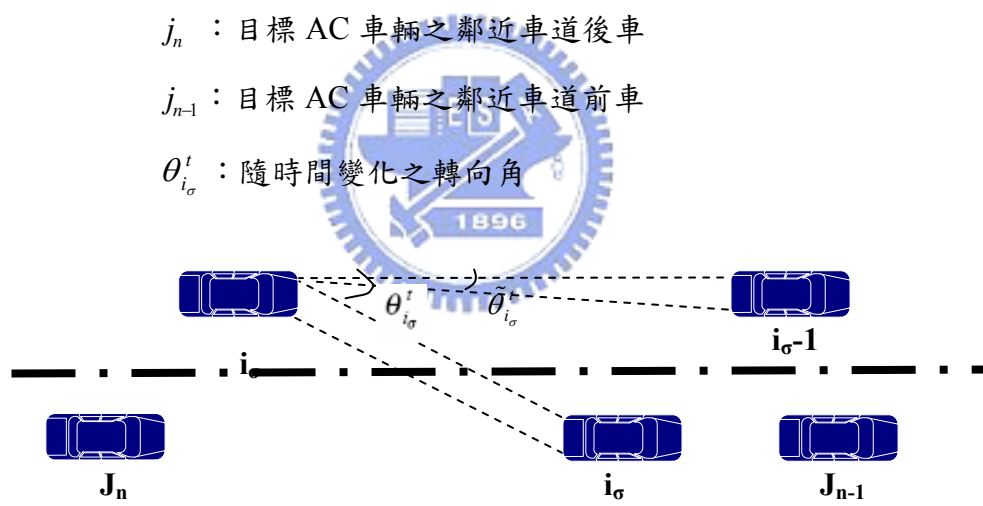


圖 3-5 AC 車輛強制煞車之動態安全距離

資料來源：許智詠(2005)

3.3.1 變換車道因素

一般而言，變換車道的因素可以分為轉向因素、事故因素、前方車隊變換車道影響與前方車隊速率影響等四種。然而本研究所探討之變換車道行為，主要是事故因素，AC 車輛進入事故影響區，勢必變換車道才能使整個系統繼續運作而不至於因為停等(queue)於事故上游，使得系統接近癱瘓。然而鄰近車道的車流狀況，也就是可接受變換車道的 Gap 才是影響變換車道成功的重大因素。

然而一般人為駕駛下，若一直無法變換車道的話，其可接受的 Gap 容忍度會漸漸變小，但是在自動駕駛下無須考慮人為心理因素，只要鄰近車道提供出可接受變換車道的 Gap，便會判斷並執行變換車道的動作。

3.3.2 變換車道模式

一、縱向控制(longitudinal control logic)

由於鄰近車道的車流狀況是影響變換車道成功的重大因素，所以本研究考量以目標 AC 車輛之縱向速率與其鄰近車道前後車之相對速率，來描述鄰近車道車流狀況。首先，我們以時間—距離圖(圖 3-6)來說明變換車道的概念：左方為實際在高速公路上 AC 車輛與其鄰近車道前後車之相對位置，箭頭方向為行駛方向；右方對應的三條斜直線分別為 j_{n-1} 、 i_σ 、 j_n 的車速 $v_{j_{n-1}}^t$ 、 $\mu_\sigma^{t_b}$ 、 $v_{j_n}^t$ 。若 AC 車輛以某個加速度變換車道，使得其速度之水平分量可以等於 $\mu_\sigma^{t_b}$ ，則變換車道時便可以保持與鄰近車道前後車同樣的車間距 $x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0}$ 、 $x_{j_n, i_\sigma}^{t_0}$ ，在這裡的 \bar{L} 為平均車長。

鄰近車道前後車的實際車流狀況可能不是維持某一定速，若鄰近車道前後車有加速的動作，則 $v_{j_{n-1}}^t$ 、 $v_{j_n}^t$ 為斜率漸增的向上虛線；反之，若前後車有減速的動作，則 $v_{j_{n-1}}^t$ 、 $v_{j_n}^t$ 為斜率漸減的向下虛線。隨著個別不同的行駛狀況，而有不同的速率，兩兩車輛之間的车間距 $x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0}$ 、 $x_{j_n, i_\sigma}^{t_0}$ 也隨之變化。故在變換車道時候，考慮

車間距是否在系統預設可接受之安全間距，來做為變換車道的依據，所以我們便以此來發展自動控制車輛變換車道之模式。

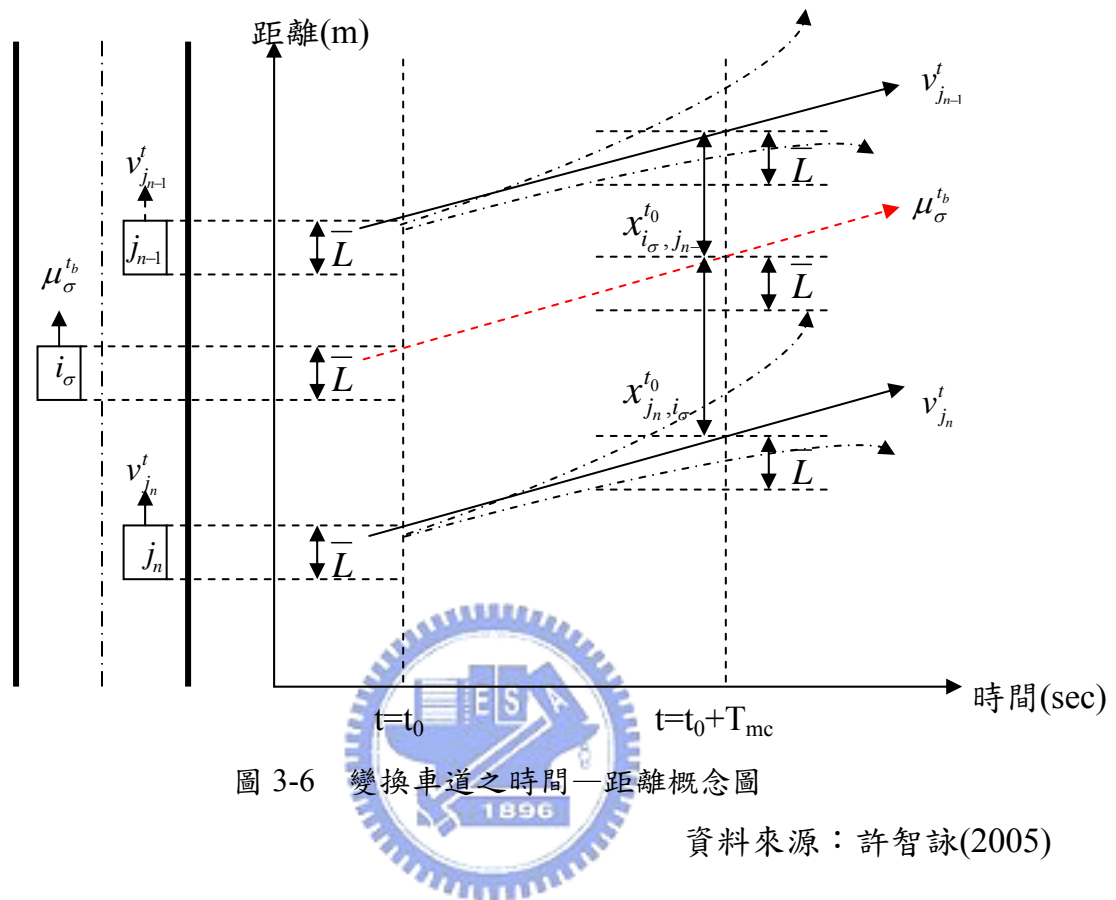


圖 3-6 變換車道之時間—距離概念圖

資料來源：許智詠(2005)

在這裡一提的是圖 3-6 為說明變換車道之概念。若 AC 車輛鄰近車道無車輛，我們可視為其前後車之車間距相當大，在此情形之下，若自動控制車道上有連續多輛 AC 車輛判斷可變換車道，則多輛 AC 車輛同時變換車道時，行進間保持彼此車間距之關係及車輛機械控制等的問題不在本研究之範圍內，但我們可視為多輛 AC 車輛同時成功地變換車道。

首先我們定義兩個相對速率，分別為 $v'_{j-1,i}$ 及 $v'_{i,j}$ ，其定義如(8)、(9)式：

$$v'_{j-1,i} = v'_{j-1} - \mu'_{i_{\sigma}} : \text{自動控制車輛與鄰近車道前車之縱向相對速率} \quad (8)$$

$$v'_{i,j} = \mu'_{i_{\sigma}} - v'_{j} : \text{自動控制車輛與鄰近車道後車之縱向相對速率} \quad (9)$$

當 AC 車輛欲以一個與行駛速度方向夾角 θ 之加速度 a 來變換車道，加速度

的水平分量(與行駛方向平行),使得縱向產生一個 $a \times \cos \theta_{i_\sigma}^{mc}$ 之加速度,故我們可以得知變換車道後 AC 車輛與鄰近車道前車之車間距通式,以(10)式表示。其中等號右式第一個部分為時間 t_0 時的車間距;第二部分為考慮系統所需運算時間內兩車所增減之距離;第三部分為鄰近車道前車行走所增加的車間距;第四部分為 AC 車輛行走所減少之車間距。將(10)式整理之後,以相對速率重新表示車間距,可以獲得(11)式。

$$x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0+T_{mc}} = x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0} + (v_{j_{n-1}}^{t_0} - v_{i_\sigma}^{t_0}) \times T_c + \left(v_{j_{n-1}}^{t_0} \cdot T_{mc} + \frac{1}{2} a_{j_{n-1}} T_{mc}^2 \right) - \left(v_{i_\sigma}^{t_0} \cdot T_{mc} + \frac{1}{2} a_{i_\sigma} T_{mc}^2 \right) \cdot \cos \theta_{i_\sigma}^{mc} \quad (10)$$

$$x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0+T_{mc}} = x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0} + v_{j_{n-1}, i_\sigma}^{t_0} \times T_c + v_{j_{n-1}, i_\sigma}^{t_0} \times T_{mc} + \frac{1}{2} (a_{j_{n-1}} - a_{i_\sigma} \times \cos \theta_{i_\sigma}^{mc}) T_{mc}^2 \quad (11)$$

同樣地,我們也可以得到 AC 車輛與鄰近車道後車之車間距如(12)式,並且將之整理成(13)式。

$$x_{j_n, i_\sigma}^{t_0+T_{mc}} = x_{j_n, i_\sigma}^{t_0} + (\mu_{i_\sigma}^{t_0} - v_{j_n}^{t_0}) \times T_c + \left(\mu_{i_\sigma}^{t_0} \cdot T_{mc} + \frac{1}{2} a_{i_\sigma} T_{mc}^2 \right) \cdot \cos \theta_{i_\sigma}^{mc} - \left(v_{j_n}^{t_0} \cdot T_{mc} + \frac{1}{2} a_{j_{n-1}} T_{mc}^2 \right) \quad (12)$$

$$x_{j_n, i_\sigma}^{t_0+T_{mc}} = x_{j_n, i_\sigma}^{t_0} + v_{i_\sigma, j_n}^{t_0} \times T_c + v_{i_\sigma, j_n}^{t_0} \times T_{mc} + \frac{1}{2} (a_{i_\sigma} \times \cos \theta_{i_\sigma}^{mc} - a_{j_{n-1}}) T_{mc}^2 \quad (13)$$

其中, $x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0}$ 定義為上游離事故較遠車輛之距離,減去離事故較近車輛之距離,即 $x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0} = X_{i_\sigma}^{t_0} - X_{j_{n-1}}^{t_0}$, 此種表示法之好處為 $x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0}$ 永遠為正數。

考慮鄰近車道之前車以最大減速度煞車,鄰近車道之後車以最大加速度加速,在此嚴峻地壓縮車輛間的 Gap 下,下一秒的車間距皆可以在可接受的係數以內,下一秒便執行變換車道。但事實上鄰近車道為一般人為駕駛,所使用之跟車行為並不會在 AC 車輛欲變換車道時來作最大加減速的動作,所以 MC 車輛的車間距若能提供出如此嚴峻情形下之可接受變換車道車間距,那 AC 車輛便能進行變換車道。

然而以下一秒的車間距作為判斷決策還不夠,若變換之後兩車的相對速度過大,則可能雖然可以變換過去,但是過若干秒之後會相撞,相撞的原因是變換車道後的 AC 車輛可能來不及加速而被後車撞倒,或者來不及減速而追撞前車,故

我們在模式內加入考慮兩車之相對速度差所造成之車間距壓縮。

變換車道的決策在於加速度 a_{i_σ} 值，若 a_{i_σ} 在無限制之下，(11)式~(13)式皆有可能在加速度 a_{i_σ} 值之絕對值極大下滿足所有之判斷式，但實際車輛設計下皆有車輛加減速之最大值，若判斷變換車道所需之加速度 a_{i_σ} 值大於車輛實體加速度上限 $A_{i_\sigma}^{mc}$ ，或者減速度之上限 $D_{i_\sigma}^{mc}$ ，則判斷無法變換車道成功。

若相對速度絕對值越大，則表示兩車正快速地接近(或遠離)，當相對速度造成兩車之間的车間距遭到壓縮，則變換車道所需的安全距離便不足夠；反之，若相對速度越接近 0，兩車之相對車間距便保持不變。以下為鄰近車道前後車皆無加減速($a_{j_{n-1}}$ 、 a_{j_n} 皆為 0)之情形下，兩個相對速度的正負值，可以將之分為四種情境，並且一一討論之。

$$1. v_{j_{n-1}, i_\sigma}^{t_f} \geq 0, v_{i_\sigma, j_n}^{t_f} \geq 0$$

此種情境下，我們可以得知三車車速的關係為 $v_{j_{n-1}}^{t_f} \geq \mu_{i_\sigma}^{t_f} \geq v_{j_n}^{t_f}$ ，我們得知鄰近車道前車的速率最快，目標 AC 車輛次之，鄰近車道後車速率最慢，由於變換過程中三車之間的车間距會單調遞增，屬於最簡單的情境，所以只需考慮到 AC 車輛加速匯入鄰近車道是否會追撞前車，故我們可以得到以下不等式：

$$x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0} - \left(\mu_{i_\sigma}^{t_0} \times T_{mc} + \frac{1}{2} a_{i_\sigma}^{mc} \cos \theta_{i_\sigma}^{mc} T_{mc}^2 \right) \geq (1 + \varphi) \bar{L} \quad (14)$$

式中， $a_{i_\sigma}^{mc}$ ：縱向正常加速度 ($a_{i_\sigma}^{mc} > 0$) (m/s^2)

T_{mc} ：變換車道所需時間(sec)

φ ：預設的安全係數

$\theta_{i_\sigma}^{mc}$ ：變換車道之轉向角(rad)

\bar{L} ：平均車長(m)

$x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0} = X_{i_\sigma}^{t_0} - X_{j_{n-1}}^{t_0}$ ：目標 AC 車輛與鄰近車道前車車間距

左式中第一個部分為原本與鄰近車道前車車間距；第二部分為變換過程中與鄰近車道前車增加之車間距；右式為安全車間距。

$$2. v_{j_{n-1}, i_{\sigma}}^{t_f} \geq 0, v_{i_{\sigma}, j_n}^{t_f} < 0$$

此種情境下，我們可得知三車車速的大小關係為 $v_{j_{n-1}}^{t_f} \geq v_{j_n}^{t_f} > \mu_{i_{\sigma}}^{t_f}$ 或 $v_{j_n}^{t_f} \geq v_{j_{n-1}}^{t_f} > \mu_{i_{\sigma}}^{t_f}$ ，即 AC 車輛的速率為最慢，但鄰近車道前後車的大小關係並無法得知，此時變換車道需考慮鄰近車道後車是否會追撞，並且加速過程中也需考量與鄰近車道前車的安全距離，故我們可以得到下列不等式：

$$x_{j_n, i_{\sigma}}^{t_0} + v_{j_{n-1}, i_{\sigma}}^{t_0} \times T_c - \frac{(v_{j_{n-1}, i_{\sigma}}^{t_0})^2}{2 a_{i_{\sigma}}^{m c} \cos \theta_{i_{\sigma}}^{m c}} \geq (1 + \varphi) \bar{L} \quad (15)$$

and $x_{i_{\sigma}, j_{n-1}}^{t_0} + v_{i_{\sigma}, j_{n-1}}^{t_0} \times T_c - v_{j_{n-1}, i_{\sigma}}^{t_0} T_{m c} \geq (1 + \varphi) \bar{L}$

第一個式子之左式第一部份為原本與鄰近車道後車之車間距；第二部分為當目標 AC 車輛加速到與前車一樣時，鄰近車道後車所增加的距離；右式為安全間距。

$$3. v_{j_{n-1}, i_{\sigma}}^{t_f} < 0, v_{i_{\sigma}, j_n}^{t_f} \geq 0$$

此種情境下，我們可得知三車車速的大小關係為 $\mu_{i_{\sigma}}^{t_f} \geq v_{j_n}^{t_f} > v_{j_{n-1}}^{t_f}$ 或 $\mu_{i_{\sigma}}^{t_f} \geq v_{j_{n-1}}^{t_f} > v_{j_n}^{t_f}$ ，目標 AC 車輛最快，而鄰近車道前後車之大小關係無法得知，此時變換車道在減速過程不能追撞鄰近車道前車，亦不得讓鄰近車道後車追撞，故我們可以得知下列的不等式：

$$x_{i_{\sigma}, j_{n-1}}^{t_0} + v_{j_{n-1}, i_{\sigma}}^{t_0} \times T_c - \frac{(v_{j_{n-1}, i_{\sigma}}^{t_0})^2}{2 d_{i_{\sigma}}^{m c} \cos \theta_{i_{\sigma}}^{m c}} \geq (1 + \varphi) \bar{L} \quad (16)$$

and $x_{j_n, i_{\sigma}}^{t_0} + v_{i_{\sigma}, j_{n-1}}^{t_0} \times T_c - \frac{(v_{j_n}^{t_0})^2 - (\mu_{i_{\sigma}}^{t_0})^2}{2 d_{i_{\sigma}}^{m c} \cos \theta_{i_{\sigma}}^{m c}} \geq (1 + \varphi) \bar{L}$

式中， $d_{i_{\sigma}}^{m c}$ ：縱向正常減速度($d_{i_{\sigma}}^{m c} > 0$) (m/s^2)

第一個式子之左式第一部份為與鄰近車道前車之車間距；第二部分為減速變

換過程中與鄰近車道前車所減少的車間距。

$$4. v_{j_{n-1}, i_\sigma}^{t_f} < 0, v_{i_\sigma, j_n}^{t_f} < 0$$

此種情境下，我們可得知三車車速的大小關係為 $v_{j_n}^{t_f} > \mu_{i_\sigma}^{t_f} > v_{j_{n-1}}^{t_f}$ ，AC 車輛速率比鄰近車道前車快，比鄰近車道後車慢，所以安全的車間距在變換車道過程中被急速壓縮，為最嚴峻之情境，所以減速匯入鄰近車道時須避免追撞鄰近車道前車，亦須避免鄰近車道後車的追撞，故我們可以得到下列不等式：

$$x_{i_\sigma, j_{n-1}}^{t_0} + v_{j_{n-1}, i_\sigma}^{t_0} \times T_c - \frac{(v_{j_{n-1}, i_\sigma}^{t_0})^2}{2 d_{i_\sigma}^{mc} \cos \theta_{i_\sigma}^{mc}} \geq (1 + \varphi) \bar{L} \quad (17)$$

$$\text{and } x_{j_n, i_\sigma}^{t_0} + v_{i_\sigma, j_n}^{t_0} \times T_c - \frac{(v_{j_n}^{t_0})^2 - (\mu_{i_\sigma}^{t_0})^2}{2 d_{i_\sigma}^{mc} \cos \theta_{i_\sigma}^{mc}} \geq (1 + \varphi) \bar{L}$$

第一個式子之左式第一部分為與鄰近車道前車之車間距；第二部分為減速變換車道過程中與鄰近車道前車所減少之車間距；右式為安全間距。

二、橫向控制(lateral control logic)

自動控制車輛之橫向控制，主要來自於變換車道時作用於 AC 車輛之加速度垂直分量(與行進方向垂直)，原本行駛於自動車道之 AC 車輛，其橫向速率為零，即保持於車道中心線上行駛，施予變換車道加速度 a ，其垂直分量為 $a \times \sin \theta_{i_\sigma}^t$ ，故橫向之車輛位移距離可以以下列(18)式來表示之：

$$Y = \frac{1}{2} (a_{i_\sigma}^{mc} \times \sin \theta_{i_\sigma}^{mc}) \cdot T_{mc}^2 \quad (18)$$

上述為目標 AC 車輛與鄰近車道前後車之關係，另外在橫向位移的方面，AC 車輛 i_σ 從自動控制車道位移到鄰近車道，總共位移一個車道寬的距離，如圖 3-5 中， $\tilde{\theta}_{i_\sigma}^t$ 為動態的最小轉向角，若 AC 車輛轉向角小於 $\tilde{\theta}_{i_\sigma}^t$ ，則變換過程中會與前車碰撞，故我們可以知道：

$$\theta_{i_\sigma}^t > \tilde{\theta}_{i_\sigma}^t$$

$$\tilde{\theta}_{i_\sigma}^t = \tan^{-1} \left\{ \frac{(1 + \varepsilon) \bar{W}}{x_{i_\sigma, i_\sigma - 1}^t - \bar{L}} \right\} \quad (19)$$

其中， \bar{W} ：平均車寬(m)

\bar{L} ：平均車長(m)

ε ：預設之靜態側向安全係數

$x_{i_\sigma, i_\sigma - 1}^t$ ：目標 AC 車輛與其自動車道前車之距離(m)

經由上述之變換車道模式之構建，我們可以發現 AC 車輛的加速度或減速度可以無限大時，則變換車道便能夠百分之百成功，但真實世界中，實體車輛的加減速度必然有一個上限，我們定義加速度上限為 $A_{i_\sigma}^{mc}$ (m/s²)，減速度上限為 $D_{i_\sigma}^{mc}$ (m/s²)，我們以一般的運動公式可得知

$$v_{j_{n-1}}^t = \left(\mu_{i_\sigma}^t + \alpha_{i_\sigma}^t \times T_{mc} \right) \cos \theta_{i_\sigma}^t$$

所以，加速度調整必須以兩者較小者為加速度的調整，若變換車道所需的加(減)速度大於 $A_{i_\sigma}^{mc}$ ($D_{i_\sigma}^{mc}$)，則無法變換車道。加速度調整的式子如下：

$$\alpha_{i_\sigma}^t = \begin{cases} \min \left[\frac{v_{j_{n-1}}^t - \mu_{i_\sigma}^t \times \cos \theta_{i_\sigma}^t}{T_{mc} \times \cos \theta_{i_\sigma}^t}, A_{i_\sigma}^t \right], & \text{if } v_{j_{n-1}}^t \geq \mu_{i_\sigma}^t \times \cos \theta_{i_\sigma}^t \\ \max \left[\frac{v_{j_{n-1}}^t - \mu_{i_\sigma}^t \times \cos \theta_{i_\sigma}^t}{T_{mc} \times \cos \theta_{i_\sigma}^t}, D_{i_\sigma}^t \right], & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

3.4 混合車流跟車模式

自動車在通過事故之前，事故點勢必對自動車造成一定的影響，以往的跟車理論對跟車的末速判斷都是以偵測到前車的速度為末速，然而，前車的速度在自動車輛調整速度的過程中，可能隨時會有變化，這樣會造成加速過度或是減速不足的情況。所以，有兩個解決方法克服這各問題，其一為距離自動偵測，另一個

則是，判斷末速是以到事故距離前的車輛速度作考慮。本研究的自動車的末速將是參考 J.B.Sheu 的加速度調整模式，文中對加速度的調整公式在 2.3.4 節中，對此公式稍做修改，將加速度的部份改為速度調整，也就是說，原本加速度的變化是將前車的加速度和前方車團的加速度做比重分配，J.B.Sheu 的方法如下(21)，在 2.3.4 節已有敘述：

$$\alpha_i = W_1\alpha_1 + W_2\alpha_2 \quad (21)$$

現今要以速度來取代這邊的加速度，所以以 V_2 (前車的速度)取代 α_1 (前車的加速度)， \bar{V}_σ (在事故範圍之前，偵測器可偵測範圍內的所有車輛平均車速)取代 α_2 (前方車團的平均加速度) 則公式改為

$$v_i = W_1v_2 + W_2\bar{v}_\sigma \quad (22)$$

而 W_1 以及 W_2 則維持不變，分別為

$$W_1 = \frac{e^{-|X_2|}}{e^{-|X_1|} + e^{-|X_2|}}$$

$$W_2 = \frac{e^{-|X_1|}}{e^{-|X_1|} + e^{-|X_2|}} \quad (23)$$

其中 X_1 為 i_1 車輛車頭到事故發生點的距離， X_2 代表 i_2 車輛車頭到事故發生點的距離，而 α_i 則被取代為 v_i ，如圖 2-5 及圖 3-7：

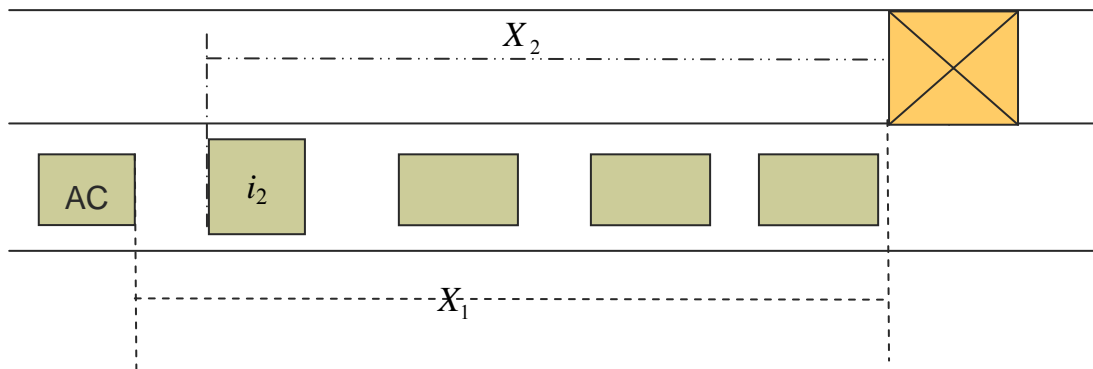


圖 3-7 相對距離示意圖

3.5 變換回自動車道模式

此階段的變換車道模式和之前的變換車道模式相比之下較為簡單。參考 J.B.Sheu(2005)所提出的瞬時加速度模式，讓 AC 車輛在變換回自動車道的過程中，將車速調整回預設的車隊車速 $u_{\sigma}^{t_0}$ ，回到自動車道的 AC 車輛將以 $u_{\sigma}^{t_0}$ 的車速行駛一段時間，而且此時每輛 AC 車輛的車間距可能會不同，為了將這些零散的 AC 車輛再度串聯以 AC 車隊的型態前進，我們必須進行下一個步驟，車隊重組。

$$\alpha_{i_{\sigma}}^{t_{rc}} = \frac{u_{\sigma}^{t_0} - u_{i_{\sigma}}^{t_{rc}} \times \cos(\Theta_{rc})}{T_{rc} \times \cos(\Theta_{rc})} \quad (24)$$

3.6 車隊重組模式

$$X_{i_{\sigma-1}}^{t_{pr}} - X_{i_{\sigma}}^{t_{pr}} - x_{\sigma}^{t_0} = \frac{\alpha_{i_{\sigma}}^{t_{pr}} \times (T_{pr})^2}{2} \Rightarrow \alpha_{i_{\sigma}}^{t_{pr}} = \frac{2(X_{i_{\sigma-1}}^{t_{pr}} - X_{i_{\sigma}}^{t_{pr}} - x_{\sigma}^{t_0})}{(T_{pr})^2} \quad (25)$$

利用兩車瞬時的車間距扣掉預設車間距 $= \frac{1}{2}at^2$ 求出後車加速度以跟上前車，依照這樣的控制邏輯，將可以在 $T_{pr} \times (n_{\sigma}^{t_{pr}} - 1)$ 的時間內完成車隊重組。

3.7 最舒適加速度

文獻以及車流理論，以衝度(jerk)當做舒適度的指標(見 2.3.5)，jerk 是加速度對時間的微分，依照國道客運的標準，乘客能接受的標準界於正負 2.06(m/s³)之間，也就是說，加速度或是減速度的幅度不可超過這個標準，否則會造成乘客的不適。舉例來說，在一般行車時候，需要加速會緩緩的踩油門，讓乘客不會一下子有突兀的加速度感，當繼續踩油門，加速度則會漸增(圖 3-8)，有了速度的模型概念，可推知加速度應是類似拋物線模型；例如乘坐捷運時，雖然加速度固定，但加速時仍讓人有突兀的感覺；如果可以先微微加速再加速到需要的速度則可讓乘客感到舒適；乘坐電梯，一開始也是緩緩上升，到了中段速度才漸漸再加快。因此，為了將自動車人性化或是乘車舒適，研究將加速度設定為拋物線加速度(圖 3-9)，而非死板的線性定加速度，因此，加速度設定為拋物線曲線；但整條曲線的斜率又不能大於衝度指標 2.06。以加速度來說，拋物線加速度的斜率最大的地方，是在一開始加速的時候，之後就隨之遞減，也就是說，jerk 最大的地方是在一開始的時候，依照文獻必須將最大設定在正負 2.06，之後隨著煞車時間或是加油門的時間加長，jerk 會逐漸降低，加速度的斜率會逐漸變小(圖 3-9)，如此一來，拋物線加速度可以達到如圖(3-8)的效果，這邊將拋物線的一般式分為加速度以及減速度：

$$a(t) = -\alpha t^2 + \alpha\beta t + \gamma = \alpha t(\beta - t) + \gamma \quad (24)$$

$$a(t) = \alpha t(t - \beta) - \gamma = \alpha t^2 - \alpha\beta t - \gamma \quad (25)$$

其中 α 是拋物線開口大小。 β 是加速度需要加執行的時間。 γ 是截距，設定為 2.06。

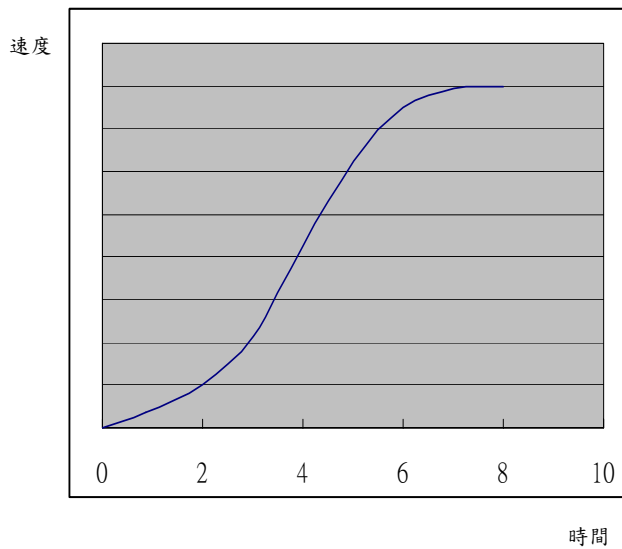


圖 3-8 速度對時間

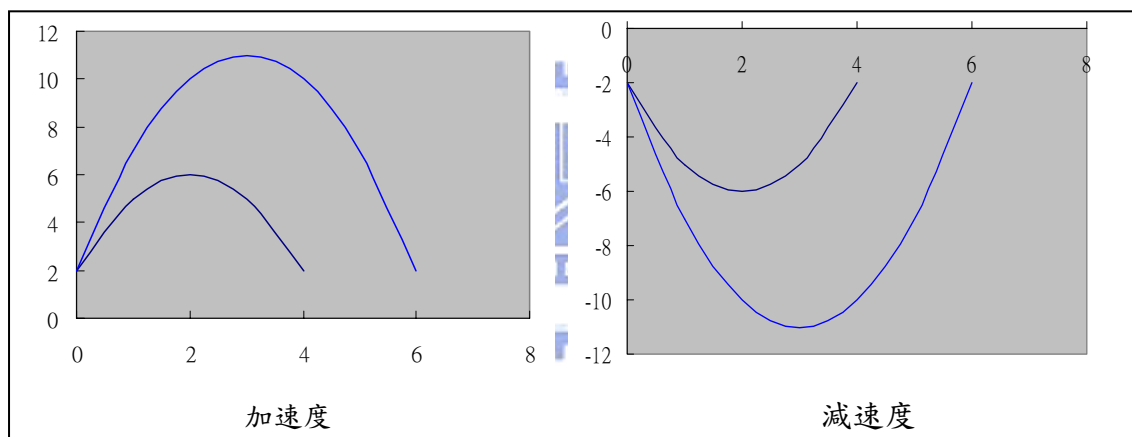


圖 3-9 拋物線加速度與減速度

有了加速度的模型，便可以積分反推出速度，速度再對時間積分求得位移的模型，由(25)的加速度一般式反推可以求得如下：

$$\begin{aligned}
 a(t) &= -\alpha t^2 + \alpha\beta t + \gamma \\
 v(t) &= -\frac{\alpha}{3}t^3 + \frac{\alpha\beta}{2}t^2 + \gamma t + v_0 \\
 S(t) &= -\frac{\alpha}{12}t^4 + \frac{\alpha\beta}{6}t^3 + \frac{\gamma}{2}t^2 + v_0 t + S_0
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

由(25)的減速度一般式積分則如下：

$$\begin{aligned}
a(t) &= \alpha t^2 - \alpha\beta t - \gamma \\
v(t) &= \frac{\alpha}{3}t^3 - \frac{\alpha\beta}{2}t^2 - \gamma t + v_0 \\
S(t) &= \frac{\alpha}{12}t^4 - \frac{\alpha\beta}{6}t^3 - \frac{\gamma}{2}t^2 + v_0 t + S_0
\end{aligned} \tag{27}$$

除了用拋物線加速度或是減速度之外，考慮如果有後方車輛插入本車和前車之間，使得本車和插入的車之間的相對距離瞬間縮短，這時會採用定加減速度(7m/s²)減速，也就是一般討論的緊急煞車來減速，用這個減速度求出煞車的長度。而加減速的大小，以及煞車距離的判斷都和方程式(26)及(27)有關。

3.8 小結

本研究之模式架構仍以 J.B.Sheu(2005)所提出之自動車輛微觀模型為主，再引用最舒適加速度模型加以修正，將原有的加速度變數 a 修正為隨時間變動的加速度函數 a(t)，使整體模型設計更為合理且人性化。



第四章 程式模擬系統之發展

本章將使用程式語言 Borland C++ Builder 來撰寫第三章所構建之自動車輛之控制邏輯，其不僅具有最完整的 C/C++ 語言規格支援，並具備類似 Delphi/VB 的開發環境。所使用之版本為 BCB 5.0。

4.1 程式撰寫

在程式方面，將建立一段高速公路三車道之路段，其中內線之兩車道分別用來當作自動控制車道及其鄰近車道。主要係以主程式 main() 控制模式整體的運作流程，在使用者輸入資料完成後，進行產生路段車輛副程式，分為產生 AC 車輛 A_gene() 跟產生 MC 車輛 M_gene() 兩種，而兩個車輛產生的方式做不同的產生控制，以下將有較詳細的說明。

系統模擬時間採用時階(time step)的方式，由於時間為連續的，若以一秒為單位容易造成誤差，故以此方式將系統時間改成時階的方式，至於每一時階的長度已經變數化，本模擬程式訂為 0.1 秒，若需要變更只需在程式最前面之 TIMESLICE 的值進行變動即可。

在模擬時間內進行多個副程式：DrawRoad() 副函式為繪製高速公路車道以及事故位置；DrawVeh() 為繪製在自動控制車道上移動的 AC 車輛及在一般車道上移動的車輛，以及從自動車道變換成功之 AC 車輛都會繪製；A_move() 為設定在自動控制車道上的車輛下一秒的移動，其間還會進行變換車道及搜尋 trans_ctrl()、trans_check() 等等之副函式；M_move() 為設定在一般車道上車輛下一秒的移動，並且會依據安全車間距副函式 safe_head() 做跟車行為；

在模擬時間結束後，藉由資料輸出副函式 output() 來輸出模擬資料。主程式模擬流程圖如圖 4-1 所示。

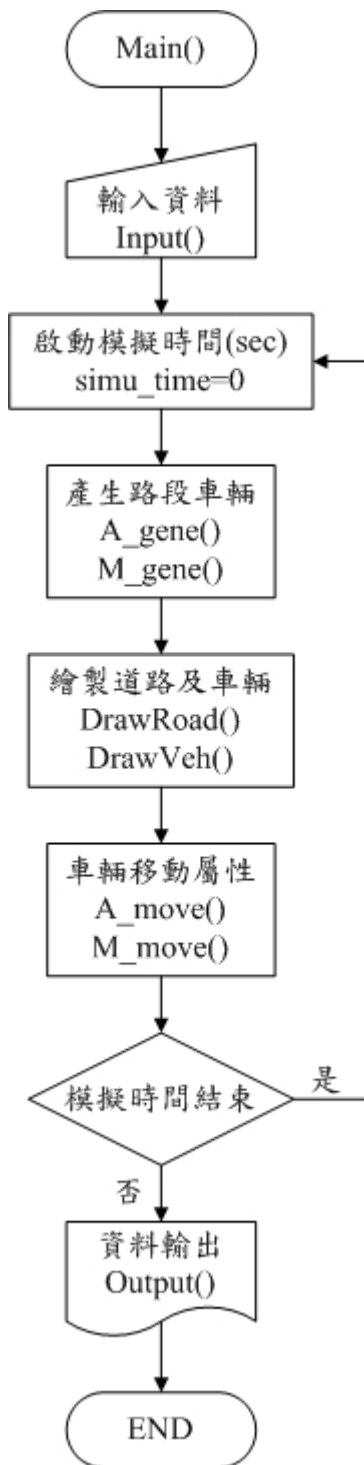


圖 4-1 主程式 main() 流程圖

程式中以建立資料結構 struct 分別代表所有的車輛資料，struct 分別包含了時間、車輛種類、X 軸距離、Y 軸距離、速率、加速度、與前車車間距、與後車車間距、三個門檻值，另外還建立有兩個指標變數(pointer)，以鏈串列(link-list)的方式來實作，分別針對兩個車道內之車輛進行串聯的動作，其優點為每輛車隨時以指標變數指向其前車及後車，若要進行變換車道，則原本的車輛只要切斷其前後指標，切換到鄰近車道之後，再建立起指標，車輛便可以重新排列。上述之 X 軸距離為車輛前進行駛的距離，亦可稱為縱向距離；Y 軸距離表示車輛所位於之車道，亦可稱為橫向距離。資料型態說明如表 4-1、4-2：

表 4-1 程式變數說明

TOTALTIME	系統總時間(sec)
TIMESLICE	時階單位時間(sec)
TOTALSTEPS	系統總步驟
INCIDENT_X	事故地點(m)
INCIDENT	事故範圍(m)
ROADLEN	道路長度(m)
CAR_TYPE_1 "A"	車輛種類(自動車)
CAR_TYPE_2 "M"	車輛種類(手動車)
MAX_ACC	車輛最大加速度(m/s^2)
MAX_DEACC	車輛最大減速度(m/s^2)
MAX_SPEED	車輛最大速率(m)
PLATOON_TOTAL_TIME	車隊產生間距時間(sec)
D_MAX	最大車間距(m)
D_MIN	最小車間距(m)
D_EXT	車間距極值(m)
DEC_DX	自動車產生所保持之車時間距(sec)
TRANS_ANGLE	變換車道之轉向角(deg)
TRANS_TIME	變換車道所需時間(sec)
BUFFER_TIME	緩衝時間(sec)
SAFE	縱向安全係數
RETURN_TIME	變換回自動車道所需時間(sec)
RETURN_ANGLE	變換回自動車道之轉向角(deg)

REFORM_TIME	車隊重組所需時間(sec)
struct node	車輛資料結構
x	車輛 x 座標(m)
y	車輛 y 座標(m)
car_type	車輛種類
car_id	車輛個別獨有之 ID
v	速度(m/s)
a	加速度(m/s ²)
d	車隊拆解區門檻值(m)
f	跟車緩衝區門檻值(m)
b	強制煞車區門檻值(m)
transflag	變換車道顯示
translock	變換車道鎖定
STEPS	系統步驟
platoon_size	自動車隊規模大小
v0	自動車隊初始速率(m/s)
flow	鄰近車道車流量(veh/plph)
headway	產生下一台車輛間隔時間(sec)

表 4-2 程式函式說明

Main()	主函式
A_gene()	自動車輛產生函式
M_gene()	手動車輛產生函式
A_move()	自動車輛運行函式
M_move()	手動車輛運行函式
v_acc()	呼叫車速函式
x_acc()	呼叫位置函式
watchtime()	觀看系統時間函式
brakelength()	計算最大煞車距離函式
hittime()	呼叫與對照系統時間函式
trans_ctrl()	變換車道控制函式
trans_check()	允許變換車道函式
trans_acc()	變換車道所需加速度函式
trans_return()	變換回自動車道函式
platoon_reform()	車隊重組函式

safe_head()	保持安全車間距函式
collision()	系統碰撞偵測函式
normal()	常態分配函式
drawroad()	繪製道路函式
drawlane()	繪製車輛函式
output()	輸出結果資料函式

下列將說明各個主要函式之詳細內容：

1. Input()

主要負責資料輸入，其設定主要是放入主程式 main() 中，參數修改部分包括車隊大小設定、車隊初始速率設定、以及鄰近車道車流量。參數修改部分主要是為了整合模擬使用者與程式可讀性之間的關係，將常用的 kph 單位轉換成 mps 單位，以及將每小時每車道之車流量轉換成程式可讀之每分鐘車流。

本研究設定三個重要參數：車隊大小設定為欲瞭解車隊的大小對變換車道的影響，模擬的大小範圍在每個車隊 2 至 10 輛之間；車隊初始速率設定為欲瞭解車輛在不同的車速下對變換車道決策的影響，尤其事故影響下車行速率可能不高，以及車輛在高速行駛下遇到事故的影響，故模擬初始速率的大小範圍在時速 130 km/hr 至 160 km/hr；鄰近車道車流量為欲瞭解鄰近車道車流狀況對變換車道決策的影響，模擬範圍為每小時每車道 800 輛至每小時每車道 1800 輛。

2. A_gene()

AC 車輛的產生以鏈串列(link list)來實作，鏈串列中有數個 node (車輛)，每一台車輛之間以指標連接，如果車輛需要改變車道，只要將指標指到的地方稍作修改就可以達到變換車道的目的，而且每兩輛 MC 車輛之間可以插入多輛的 AC 台車。在 A_gene() 有個 headway 變數，其功能猶如車時間距(headway)，我們藉由 AC 車輛需要保持的初始車隊車間距，除以初始設定的車隊初速，來計算 AC 車輛產生的車時間距，其目的就是要顯示出自動公路系統乃是以車隊的形式接近事故地點。程式中我們以車輛要保持 20 公尺的車間距(不含車長，若計算車長，

則車頭與車尾之車間距約為 16 公尺)，故設定 headway 變數為 AC 車輛產生的 headway。

另外，會有個 hittime() 的副程式，其功能為搜尋系統時間跟 headway 一樣的話，就會產生一輛 AC 車輛，而 AC 車輛的初始設定都完全一樣。接著會對每台車作出初始設定：如初速、車輛種類、速率、加速度，並計算這台車的三個門檻值(d, f, b)。

3. M_gene()

MC 車輛的產生方式與 A_gene() 的方式雷同，唯車輛產生的方式不是為一秒產生一台 MC 車輛，而是 headway 令它為 normal() 函式所回傳之值，normal() 函式為常態分配，以鄰近車道車流產生率以每分鐘平均產生多少車，轉換成產生車輛所需之秒數平均值，再經由常態分配來作為車時間距(headway)。假設車輛初始流量符合卜瓦松分配 (若 λ 夠大，一般是以 $\lambda \geq 5$ ，則分配可以用 normal 分配來近似)，平均每分鐘釋放 λ 台車，因此將 $60/\lambda$ 作為 normal 分配的平均值(mean)，變異數為 1，即以 Normal($60/\lambda, 1$) 來釋放車輛。

4. DrawRoad()、DrawVeh()：

此二函式為繪圖函式，並建立副函式 DrawRoad() 繪製出三車道之直線，以斜線當作已知之事故地點，而繪製車輛的部分則由 DrawVeh() 副程式來執行。由於螢幕只能容納 640×480 個像數，以一個像數代表一公尺，故若要能夠在現有之電腦設備下觀看到整個模擬的效果，則模擬之路段只能有 640 公尺。但若想要表達更長的车道長度，只要經過程式碼將比例縮放(rescale)，將現有長度 640 個像數來表示，縮放比例之後，車輛所行進的距離等都不會變，只有在螢幕顯示成圖檔的時候會有視覺上的大小不同而已。

車輛的部分，為了區別自動車輛與手動車輛，故以顏色來區分，亮藍色為 AC 車輛，黃色則為 MC 車輛。特別一提的是，如果程式中判斷 AC 車輛可以變換車道，則會顯示成紅色，並且執行加速或減速，在 TRANS_TIME 時間到之後就會變換至鄰近車道，但還是會顯示原來 AC 車輛之亮藍色。

5. A_move()

此函式最主要為控制及計算在自動車道上行駛的車輛，自動車道上僅有 AC 車輛，故 AC 車輛在產生後便依照自己的三個門檻值(d,f,b)分別做其區域內該有之行為，在車輛未進入車隊拆解區，則保持等速；進入車隊拆解區後，進行 safe_head() 函式保持車距；進入跟車緩衝區之後，進行減速到與鄰近車道平均車速接近，並且進行變換車道評估 trans_check() 函式；最後，若進入了強制煞車區，車輛以最大減速度煞車至停止。A_move() 函式流程圖如圖 4-2 所示。

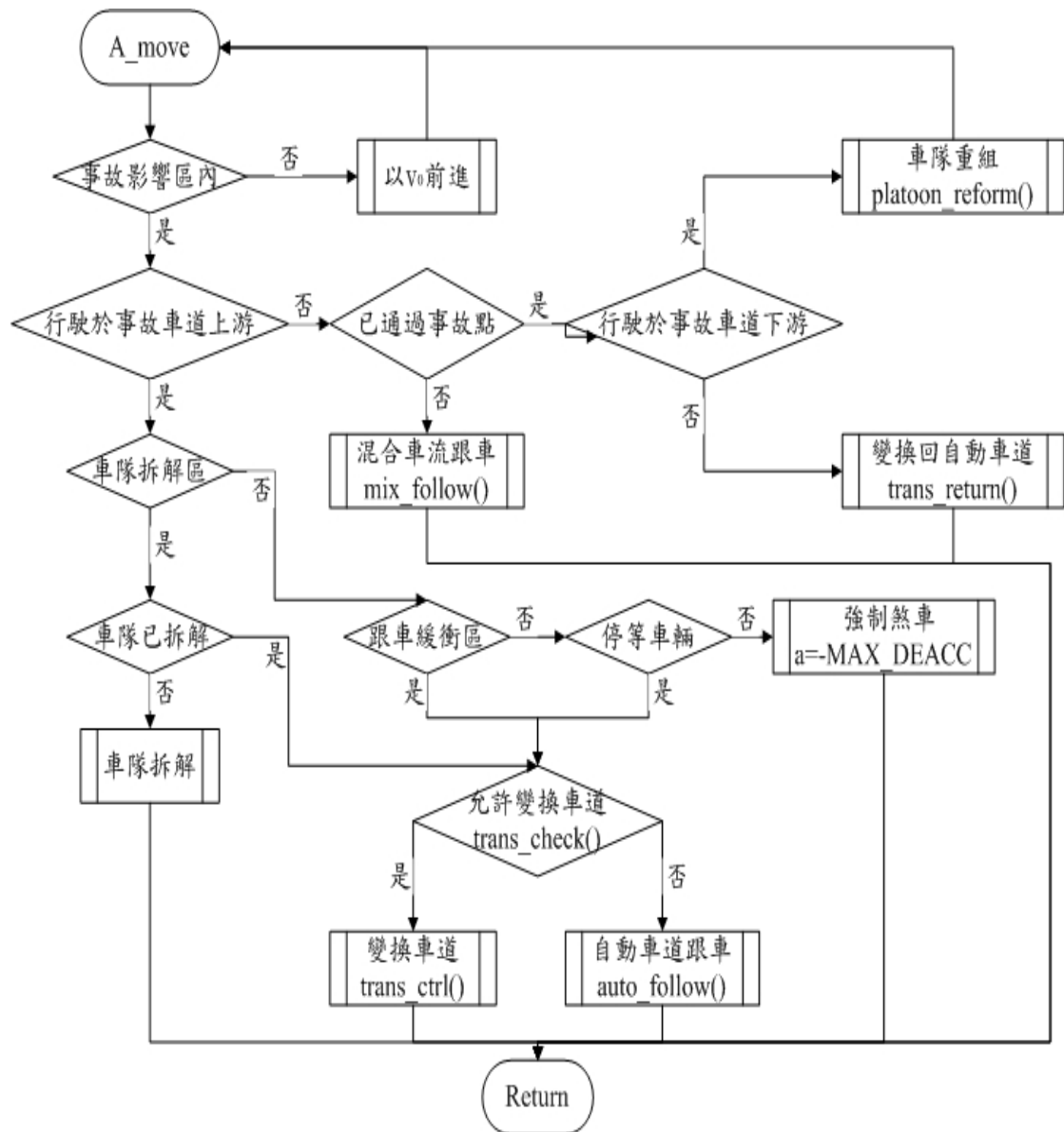


圖 4-2 A_move() 函式流程圖

6. M_move()

此函式最主要為控制及計算在一般車道上行駛的車輛，包括了原本行駛在一般車道的 MC 車輛，以及變換車道成功的 AC 車輛。函式中主要是計算車輛在一般車道的跟車行為，進行 safe_head() 函式，另外車輛位置與速度則由 x_car() 及 v_car() 兩個副函式計算及設定。為了確保跟車行為及變換車道後的安全。

7. trans_check()

此函式為控制欲變換車道之 AC 車輛或 MC 車輛之變換車道前的決策。函式中先考慮本車是否為靜止車輛，來決定本車速率；接著再計算本車最大轉向角，若最大轉向角 \geq 兩車夾角，則計算本車變換車道後位置與速率，以及期望車道後車下一秒位置與速率；若期望車道後車位置 \leq 衝突位置且兩車間距 \geq 動態安全間距，則本車允許變換車道。tran_check() 函式流程圖如 4-3 所示。



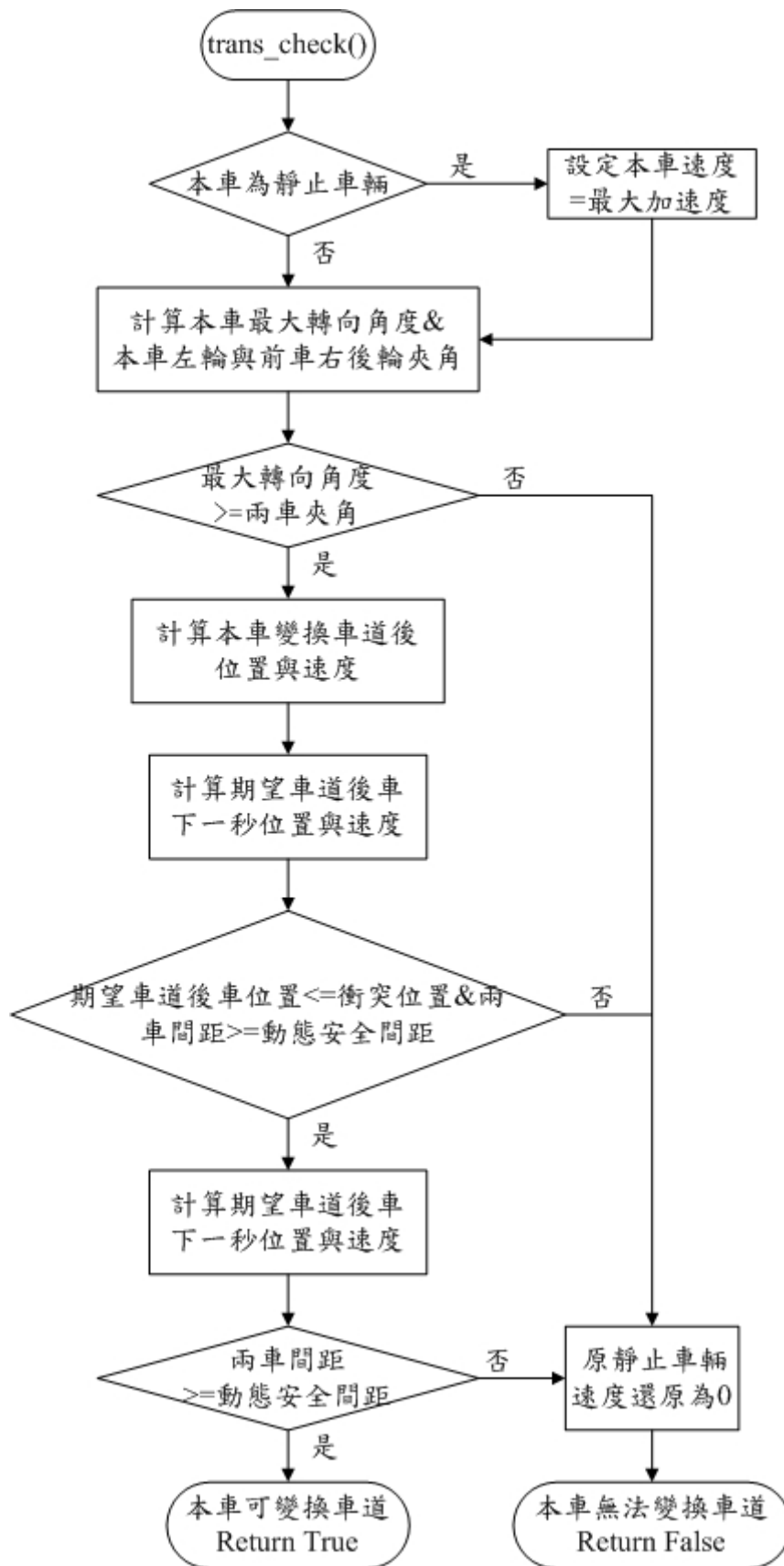


圖 4-3 trans_check()函式流程圖

8. trans_ctrl()

此函式為控制欲變換車道之 AC 車輛或 MC 車輛之變換車道中的運作。控制變換車道之車輛轉向角 \geq 動態最小轉向角，且調整本車加速度至合理的加減速範圍，以利車輛順利變換車道。trans_ctrl()函式流程圖如 4-4 所示。

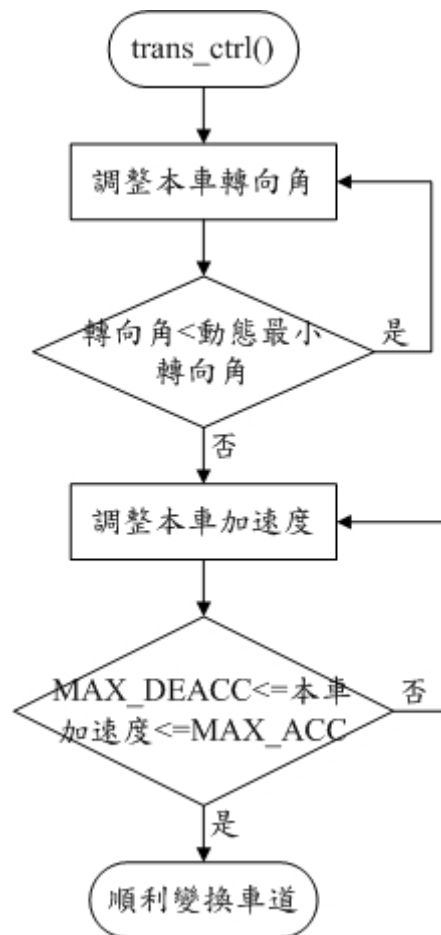


圖 4-4 trans_ctrl()函式流程圖

9. trans_return()

此函式控制通過事故點之 AC 車輛欲變換回自動車道時之加速度，使之在變換回自動車道的過程中，能將車速調整為預設之車隊初速。

10. platoon_reform()

此函式控制已回到自動車道之 AC 車輛之加速度，使之與前車保持預設之安全間距，進而完成車隊重組之步驟。

11. Output()

以 `fprintf()` 將所想要之輸出資料鍵入，並於執行程式時將模擬結果輸出，輸出方式為建立一個 excel 檔，檔案設定為唯寫方式。建立為 excel 檔主要是輸出結果整理方便，亦可由 Microsoft Office Excel 內建之繪圖功能，繪製所需之結果關係圖。

詳細的資料型態請參照附錄 A。

4.2 實驗設計

實驗設計部分分為幾何特性設計、車輛特性設計、以及模擬特性設計。模擬路段示意如圖 4-5 所示。

1. 幾何特性設計

路段屬性設定：模擬範圍內之所有路段皆為相同設定。

- (1) 為三車道之高速公路基本路段
- (2) 無坡度、無曲度之直線型車道
- (3) 無收費站、無匝道、無交織路段
- (4) 車道寬度為 3.75 m
- (5) 車道長度 5000 m
- (6) 外側路肩 3 m，內側路肩 1 m

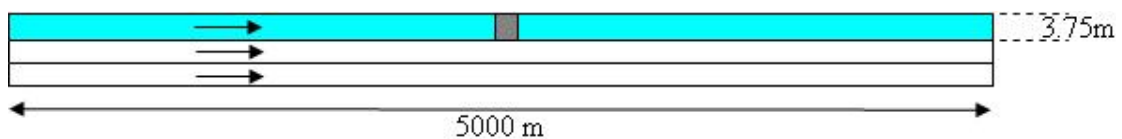


圖 4-5 模擬高速公路路段幾何特性示意圖

2. 車輛特性設計

(1) 車輛實體尺寸

本研究以小型車為研究對象，故不考慮大型車之車輛特性。故本模擬模式所考慮之車輛實體尺寸如表 4-1 所示。

表 4-3 車輛尺寸資料表(單位：m)

車型	實體車長	實體車寬
小型車	4.0	2.0

(2) 加速度及減速度

本研究直接參照文獻所整理之車輛行駛速率與一般加減速度之關係如表 4-2 所示，及車速、路面輪胎狀況與最大減速度關係如表 4-3 所示。

表 4-4 車輛行駛速率與一般加減速度之資料表(單位：m/s²)

速率(m/s)	0-6.67	6.67-13.33	13.33-17.78	17.78-22.22
條件				
加速度	3.56	2.22	2.09	1.69
減速度	2.36	2.04	1.47	1.47

表 4-5 乾路面、輪胎狀態好下最大加速度及最大減速度資料表(單位：m/s²)

速率(m/s)	8.89	13.33	17.78	22.22
條件				
最大加速度	3.55	3.60	3.60	---
最大減速度	7.20	7.29	7.30	---

(3) 鄰近車道流量

本研究參考 2001 年台灣區公路容量手冊之高速公路車流量的水準做為參考依據(如圖 4-2)，高速公路服務水準在 B 級時之前的最大流量為每車道每小時 1800 輛，依照此一值，設定為鄰近車道流量之最大值，當作敏感度分析時，以每小時每車道 200 輛車為單位來增減。

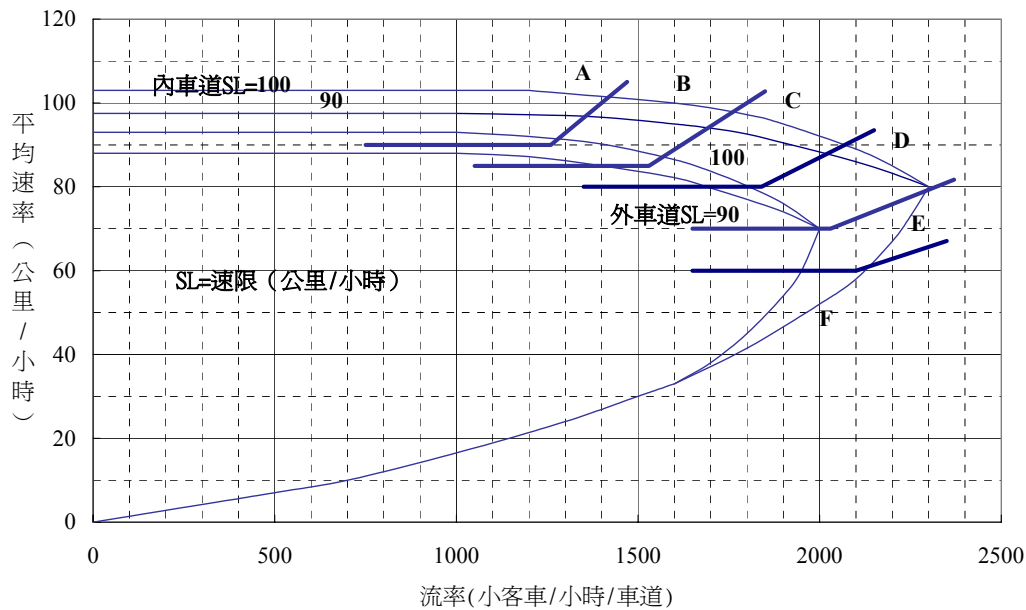


圖 4-6 平坦路段速率與流量關係及服務水準劃分之等級

資料來源：2001 年台灣區公路容量手冊 P4-17

(4) 轉向角

根據文獻所整理之車輛轉向角之範圍，約略在 10 度~45 度(0.174~0.783 徑度)之間。



3. 模擬特性設計

(1) 自動控制車隊規模

自動控制車隊規模之大小，國外曾有過相關研究。根據 Cem Ünsal (1997)的論文提出自動控制車隊規模大小大約限制在 15 輛車以內，而 R. Rajamani and S.E. Shladover(2001)曾實驗性的比較幾個自動控制的績效，包括自動控制系統 (autonomous control systems)、以及使用在車與車之間聯繫的合作式縱向控制系統 (co-operative longitudinal control systems)，提出自動車隊串聯以 8 輛車輛及 6.5 公尺的車間距前進，可以達到最佳的車隊前進規模；然而如果車隊規模拓展到 10 輛的話，則可以在高速公路車流量每小時 6400 輛(vehicles/hour)的車流狀況下達到理論值中的最大車流量。故我們在模擬的時候便考慮以 2~10 輛的車隊規模來進行模擬。

(2) 模擬時間

模擬時間設定為 200 秒，若欲變更模擬時間，可以隨意變更設定。

(3) 鄰近車道車輛之初始速率設定

由於從流量無法直接判斷車流狀態，高流量不一定高密度，低流量不一定低密度，因此對照 Greenshield's model，假定高速公路每小時每車道最大流量 1800 輛，換算每分鐘 30 部，最大可行駛速率為每小時 110 公里，相當於每秒 30.56 公尺，如此可以求得 Greenshield's model 流量對速率以及流量對密度的函數。假設初始流量設定每分鐘 30 輛，速率為 15m/s；若流量有所改變，則流量對速率的公式

為 $v = 15 \pm \sqrt{|225 - 7.5 \times q|}$ ，流量大於每分鐘 30 輛的話速率為 $v = 15 - \sqrt{|225 - 7.5 \times q|}$ ，流量小於每分鐘 30 輛的話速率則為 $v = 15 + \sqrt{|225 - 7.5 \times q|}$ ，其中 q 為車流量。

圖 4-7 分為左右兩部分，左邊為一般狀態，最高速限下的自由車流右邊則為車流擁擠下的車流狀況，我們假定為事故發生時的車流，相同流量下，對應高低兩種密度車速也會有高低兩種，分別為低密度自由車流及高密度擁擠車流。

然而在撰寫程式的時候，由於鄰近車道在流量設定之後，MC 車輛的速率便固定了，無法展現其隨機性，所以本研究在撰寫程式部分，改以常態分配來取代 MC 車輛的初始速率，速度服從 normal(15,1) 隨機分配，在常態分配下，99.7% 的機率會落在 ± 3 個標準差內，所以鄰近車道 MC 車輛的速率分佈大致落於每秒 12~18 公尺之間。

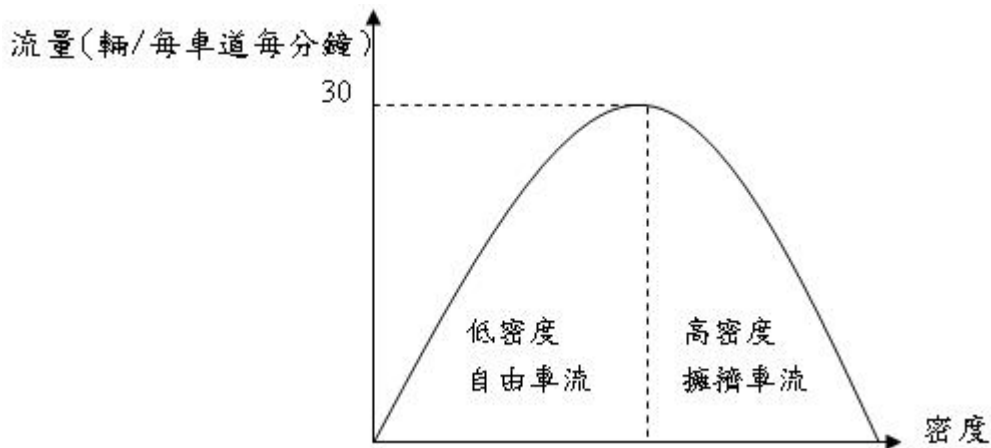


圖 4-7 Greenshield's model 下之流量與密度對應圖

(4) 煞停後的變換車道

在第三章我們有提到強制煞車後的變換車道需要面臨的問題就是 AC 車輛速度為 0、與鄰近車道相對速度大、轉向角大、變換車道所需時間長等問題。由於模擬時鄰近車道的平均車速約在 15m/s，且車輛的最大加速度為 3.6m/s²，所以煞停後變換車道所需的時間設定在 4 秒鐘，便可以到達鄰近車道的平均車速，所以在煞停後的判斷，是以 4 秒後的車間距可以大於可接受 Gap 下，從這一秒開始執行加速，加速度的大小為車輛的最大加速度。煞停後除非進行變換車道，即使前一台停等的 AC 車輛已經變換車道，但也不會前進行駛去替補其空位。

另外，煞停後兩車輛的車間距乃採用保留一個車長的距離，其好處在於轉向角足夠大於最小轉向角，且又比最大轉向角來得小。

4.3 檔案輸出

檔案輸出格式如表 4-4 及表 4-5 所示。由表 4-4 右上角顯示系統時間為 0 秒時，產生第一台自動車輛 A001 及第一台手動車輛 M001，並計算出事故影響區之門檻值($d=241.300$ ， $f=523.078$ ， $b=542.416$)。接著呈現出 A-lane 跟 M-lane 裡面每台車的各种狀態，包括 x、y 位置、速度、以及加速度。

表 4-6 單位時間內的檔案輸出狀態之一

A001 is born	d=241.300	f=523.078	b=542.416			
M:001 is born						
						0
A-lane:						
CAR	x	y	v	a	trans	
A001	2.778	30	27.778	0		
M-lane:						
CAR	x	y	v	a	trans	
M001	1.5	54	15	0		

						0.1

另外，可變換車道之自動車輛會在 trans 格中顯示*號，且在星號後格顯示變換車道之時間。如表 4-5 所示，在系統時間 22.7 秒時，A001 已經在系統時間 21.9 秒時成功變換車道至 M-lane，而 A002 將會在系統時間 24.9 秒進行變換車道。

經由此顯示格式可以瞭解系統內所有車輛的狀態，每一個 TIMESLICE 裡的資料都記載於內，並且可以依據所得到之輸出檔案，歸納統計出每一輛 AC 車輛從車輛產生到完成車隊串聯這段過程中之所有數據，以進行分析。

而依據輸入變數：車隊規模(2~10)、車隊初速(60~150)、鄰近車道車流量(800~2000)、車隊間距(2~20)的數值設定，所輸出之 Datafile 也會依據輸入變數之值而命名。例如：車隊規模 8、車隊初速 120、鄰近車道車流量 1500、車隊間距 5，所輸出之 Datafile 檔名即為 8-120-1500-5，以方便檔案管理。

表 4-7 單位時間內的檔案輸出狀態之二

A-lane:						
CAR	x	y	v	a	trans	
A002	571.425	30	18.312	0*		24.9
A003	532.91	30	20.304	-7.2		
A004	488.213	30	21.63	-2.06		
A005	443.717	30	21.646	0		
A006	399.081	30	21.298	0		
A007	354.637	30	21.298	0		
A008	310.192	30	21.298	0		
M-lane:						
CAR	x	y	v	a	trans	
A001	630.554	30	27.778	0*		21.9
M001	340.5	54	15	0		
M002	288	54	15	0		
M003	228.972	54	14.844	0		
M004	166.324	54	14.988	0		
M005	102.487	54	15.132	0		
M006	22.095	54	15.788	-7.2		

						22.7

第五章 模式應用與情境分析

本章將以第四章所撰寫出之模擬程式，設計多個不同的情境，主要以自動車隊之車隊規模大小($n_{\sigma}^{t_d}$)、自動車隊之初始速率($\mu_{i_{\sigma}}^{t_0}$)、鄰近車道車流量大小、以及自動車隊之預設車間距(X_s)所組合而成之情境，探討其之間的關係，並且加以分析其結果。

5.1 情境分析

5.1.1 情境建立

本節中，我們將依據前一章所撰寫之程式，模擬更多不同的情境，以求更瞭解模式中參數本身及與其他參數之間的關係。建立情境作敏感度分析之目的在於瞭解主要之重要參數對於系統之影響，其他基本輸入資料都是已決定的，包括車輛實體大小、最大加減速、最大轉向角、車輛行為模式等，而以自動控制車隊規模大小、車隊初速、鄰近車道車流量及預設車隊車間距為重要參數，自動控制車隊規模大小由 2 輛逐量增加至 10 輛共九種；自動控制車隊初速分為 100kph、130kph、160kph 三種；鄰近車道車流量有低流量(800vph)、中流量(1300vph)、高流量(1800vph)三種；預設車間距有 2 公尺、5 公尺、8 公尺三種，總共有 243 種情境。所有情境如表 5-1 至表 5-9 所示。

表 5-1 自動控制車隊規模 2 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	2	100	800	2
情境 2	2	130	800	2
情境 3	2	160	800	2
情境 4	2	100	1300	2
情境 5	2	130	1300	2
情境 6	2	160	1300	2
情境 7	2	100	1800	2
情境 8	2	130	1800	2
情境 9	2	160	1800	2
情境 10	2	100	800	5
情境 11	2	130	800	5
情境 12	2	160	800	5
情境 13	2	100	1300	5
情境 14	2	130	1300	5
情境 15	2	160	1300	5
情境 16	2	100	1800	5
情境 17	2	130	1800	5
情境 18	2	160	1800	5
情境 19	2	100	800	8
情境 20	2	130	800	8
情境 21	2	160	800	8
情境 22	2	100	1300	8
情境 23	2	130	1300	8
情境 24	2	160	1300	8
情境 25	2	100	1800	8
情境 26	2	130	1800	8
情境 27	2	160	1800	8

表 5-2 自動控制車隊規模 3 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	3	100	800	2
情境 2	3	130	800	2
情境 3	3	160	800	2
情境 4	3	100	1300	2
情境 5	3	130	1300	2
情境 6	3	160	1300	2
情境 7	3	100	1800	2
情境 8	3	130	1800	2
情境 9	3	160	1800	2
情境 10	3	100	800	5
情境 11	3	130	800	5
情境 12	3	160	800	5
情境 13	3	100	1300	5
情境 14	3	130	1300	5
情境 15	3	160	1300	5
情境 16	3	100	1800	5
情境 17	3	130	1800	5
情境 18	3	160	1800	5
情境 19	3	100	800	8
情境 20	3	130	800	8
情境 21	3	160	800	8
情境 22	3	100	1300	8
情境 23	3	130	1300	8
情境 24	3	160	1300	8
情境 25	3	100	1800	8
情境 26	3	130	1800	8
情境 27	3	160	1800	8

表 5-3 自動控制車隊規模 4 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	4	100	800	2
情境 2	4	130	800	2
情境 3	4	160	800	2
情境 4	4	100	1300	2
情境 5	4	130	1300	2
情境 6	4	160	1300	2
情境 7	4	100	1800	2
情境 8	4	130	1800	2
情境 9	4	160	1800	2
情境 10	4	100	800	5
情境 11	4	130	800	5
情境 12	4	160	800	5
情境 13	4	100	1300	5
情境 14	4	130	1300	5
情境 15	4	160	1300	5
情境 16	4	100	1800	5
情境 17	4	130	1800	5
情境 18	4	160	1800	5
情境 19	4	100	800	8
情境 20	4	130	800	8
情境 21	4	160	800	8
情境 22	4	100	1300	8
情境 23	4	130	1300	8
情境 24	4	160	1300	8
情境 25	4	100	1800	8
情境 26	4	130	1800	8
情境 27	4	160	1800	8

表 5-4 自動控制車隊規模 5 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	5	100	800	2
情境 2	5	130	800	2
情境 3	5	160	800	2
情境 4	5	100	1300	2
情境 5	5	130	1300	2
情境 6	5	160	1300	2
情境 7	5	100	1800	2
情境 8	5	130	1800	2
情境 9	5	160	1800	2
情境 10	5	100	800	5
情境 11	5	130	800	5
情境 12	5	160	800	5
情境 13	5	100	1300	5
情境 14	5	130	1300	5
情境 15	5	160	1300	5
情境 16	5	100	1800	5
情境 17	5	130	1800	5
情境 18	5	160	1800	5
情境 19	5	100	800	8
情境 20	5	130	800	8
情境 21	5	160	800	8
情境 22	5	100	1300	8
情境 23	5	130	1300	8
情境 24	5	160	1300	8
情境 25	5	100	1800	8
情境 26	5	130	1800	8
情境 27	5	160	1800	8

表 5-5 自動控制車隊規模 6 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	6	100	800	2
情境 2	6	130	800	2
情境 3	6	160	800	2
情境 4	6	100	1300	2
情境 5	6	130	1300	2
情境 6	6	160	1300	2
情境 7	6	100	1800	2
情境 8	6	130	1800	2
情境 9	6	160	1800	2
情境 10	6	100	800	5
情境 11	6	130	800	5
情境 12	6	160	800	5
情境 13	6	100	1300	5
情境 14	6	130	1300	5
情境 15	6	160	1300	5
情境 16	6	100	1800	5
情境 17	6	130	1800	5
情境 18	6	160	1800	5
情境 19	6	100	800	8
情境 20	6	130	800	8
情境 21	6	160	800	8
情境 22	6	100	1300	8
情境 23	6	130	1300	8
情境 24	6	160	1300	8
情境 25	6	100	1800	8
情境 26	6	130	1800	8
情境 27	6	160	1800	8

表 5-6 自動控制車隊規模 7 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	7	100	800	2
情境 2	7	130	800	2
情境 3	7	160	800	2
情境 4	7	100	1300	2
情境 5	7	130	1300	2
情境 6	7	160	1300	2
情境 7	7	100	1800	2
情境 8	7	130	1800	2
情境 9	7	160	1800	2
情境 10	7	100	800	5
情境 11	7	130	800	5
情境 12	7	160	800	5
情境 13	7	100	1300	5
情境 14	7	130	1300	5
情境 15	7	160	1300	5
情境 16	7	100	1800	5
情境 17	7	130	1800	5
情境 18	7	160	1800	5
情境 19	7	100	800	8
情境 20	7	130	800	8
情境 21	7	160	800	8
情境 22	7	100	1300	8
情境 23	7	130	1300	8
情境 24	7	160	1300	8
情境 25	7	100	1800	8
情境 26	7	130	1800	8
情境 27	7	160	1800	8

表 5-7 自動控制車隊規模 8 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	8	100	800	2
情境 2	8	130	800	2
情境 3	8	160	800	2
情境 4	8	100	1300	2
情境 5	8	130	1300	2
情境 6	8	160	1300	2
情境 7	8	100	1800	2
情境 8	8	130	1800	2
情境 9	8	160	1800	2
情境 10	8	100	800	5
情境 11	8	130	800	5
情境 12	8	160	800	5
情境 13	8	100	1300	5
情境 14	8	130	1300	5
情境 15	8	160	1300	5
情境 16	8	100	1800	5
情境 17	8	130	1800	5
情境 18	8	160	1800	5
情境 19	8	100	800	8
情境 20	8	130	800	8
情境 21	8	160	800	8
情境 22	8	100	1300	8
情境 23	8	130	1300	8
情境 24	8	160	1300	8
情境 25	8	100	1800	8
情境 26	8	130	1800	8
情境 27	8	160	1800	8

表 5-8 自動控制車隊規模 9 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	9	100	800	2
情境 2	9	130	800	2
情境 3	9	160	800	2
情境 4	9	100	1300	2
情境 5	9	130	1300	2
情境 6	9	160	1300	2
情境 7	9	100	1800	2
情境 8	9	130	1800	2
情境 9	9	160	1800	2
情境 10	9	100	800	5
情境 11	9	130	800	5
情境 12	9	160	800	5
情境 13	9	100	1300	5
情境 14	9	130	1300	5
情境 15	9	160	1300	5
情境 16	9	100	1800	5
情境 17	9	130	1800	5
情境 18	9	160	1800	5
情境 19	9	100	800	8
情境 20	9	130	800	8
情境 21	9	160	800	8
情境 22	9	100	1300	8
情境 23	9	130	1300	8
情境 24	9	160	1300	8
情境 25	9	100	1800	8
情境 26	9	130	1800	8
情境 27	9	160	1800	8

表 5-9 自動控制車隊規模 10 之模擬情境

模擬情境	車隊規模(輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流 量(vph)	預設車間距 (m)
情境 1	10	100	800	2
情境 2	10	130	800	2
情境 3	10	160	800	2
情境 4	10	100	1300	2
情境 5	10	130	1300	2
情境 6	10	160	1300	2
情境 7	10	100	1800	2
情境 8	10	130	1800	2
情境 9	10	160	1800	2
情境 10	10	100	800	5
情境 11	10	130	800	5
情境 12	10	160	800	5
情境 13	10	100	1300	5
情境 14	10	130	1300	5
情境 15	10	160	1300	5
情境 16	10	100	1800	5
情境 17	10	130	1800	5
情境 18	10	160	1800	5
情境 19	10	100	800	8
情境 20	10	130	800	8
情境 21	10	160	800	8
情境 22	10	100	1300	8
情境 23	10	130	1300	8
情境 24	10	160	1300	8
情境 25	10	100	1800	8
情境 26	10	130	1800	8
情境 27	10	160	1800	8

5.1.2 評估準則建立

自動公路系統現在尚屬於系統發展階段，故我們無法得到實際的車流資料；另外，事故下的一般車流狀況至今也無法有個定論，自動控制車輛與一般手動駕駛車輛不同，手動駕駛由於為人為駕駛，故才有所謂的「行為」，也就是考慮人為因素，但自動控制車輛沒有人為因素，所以我們也無法以現有的一般車流行為來評估自動控制車輛，亦無法來評估本研究所提出之模式。

因此，在此建立一些評估準則來衡量自動控制車輛行駛於自動控制車道下，反應事故所作之行為，：

- 1.AC 車輛平均旅行時間(sec/AC-veh)
- 2.AC 車輛平均延滯時間(sec/AC-veh)
- 3.路段平均旅行時間(sec/veh)
- 4.路段平均延滯時間(sec/veh)

藉由模擬所產生之 Datafile 中的資料，統計出所有車輛之平均車速，進一步推算其平均旅行時間(AT)及平均延滯時間(AD)，且區分為 AC 車輛和路段兩部分的數據做比對，以評估模式的有效性及車流狀況。

5.1.3 情境分析結果

由於 R. Rajamani and S.E. Shladover(2001)曾實驗性的比較幾個自動控制的績效，包括自動控制系統(autonomous control systems)、以及使用在車與車之間聯繫的合作式縱向控制系統(co-operative longitudinal control systems)，提出自動車隊串聯以 8 輛車輛及 6.5 公尺的車間距前進，可以達到最佳的車隊前進規模；故依據此結論，選定情境 8-23：車隊規模 8 輛、車隊初速 130kph、鄰近車道車流量 1300vph、預設車間距 8 公尺為基準情境，來跟其他模擬情境比對。模擬結果如表 5-10 至表 5-18 所示。

表 5-10 自動控制車隊規模 2 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 2-1	175.9	15.9	184.5	7.6
情境 2-2	159.3	20.8	184.4	7.5
情境 2-3	138.0	25.5	185.1	8.2
情境 2-4	183.4	23.4	223.7	9.1
情境 2-5	166.1	27.6	224.0	9.4
情境 2-6	145.4	32.9	224.5	9.9
情境 2-7	191.6	31.6	279.6	10.2
情境 2-8	175.8	37.3	279.7	10.3
情境 2-9	154.9	42.4	280.4	11.0
情境 2-10	174.0	14.0	184.4	7.5
情境 2-11	157.8	19.3	184.3	7.4
情境 2-12	136.9	24.4	185.1	8.2
情境 2-13	181.5	21.5	223.6	9.0
情境 2-14	164.6	26.1	224.0	9.4
情境 2-15	144.3	31.8	224.4	9.8
情境 2-16	189.7	29.7	279.5	10.1
情境 2-17	174.3	35.8	279.7	10.3
情境 2-18	153.8	41.3	280.3	10.9
情境 2-19	172.1	12.1	184.4	7.5
情境 2-20	156.3	17.8	184.2	7.3
情境 2-21	135.8	23.3	185.1	8.2
情境 2-22	179.6	19.6	223.5	8.9
情境 2-23	163.1	24.6	224.0	9.4
情境 2-24	143.2	30.7	224.3	9.7
情境 2-25	187.8	27.8	279.5	10.1
情境 2-26	172.7	34.3	279.7	10.3
情境 2-27	152.8	40.2	280.4	11.0

表 5-11 自動控制車隊規模 3 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 3-1	179.8	19.8	187.6	9.1
情境 3-2	162.6	24.1	187.7	9.2
情境 3-3	141.2	28.7	188.0	9.5
情境 3-4	188.5	28.5	227.0	10.3
情境 3-5	171.1	32.6	227.4	10.7
情境 3-6	148.8	36.3	227.5	10.8
情境 3-7	195.9	35.9	282.6	11.0
情境 3-8	178.4	39.9	283.1	11.5
情境 3-9	156.3	43.8	283.3	11.7
情境 3-10	177.9	17.9	187.8	9.3
情境 3-11	161.1	22.6	187.9	9.4
情境 3-12	140.1	27.6	188.0	9.5
情境 3-13	187.6	27.6	226.9	10.2
情境 3-14	169.6	31.1	227.2	10.5
情境 3-15	147.7	35.2	227.4	10.7
情境 3-16	194.0	34.0	282.7	11.1
情境 3-17	176.9	38.4	283.0	11.4
情境 3-18	155.2	42.7	283.4	11.8
情境 3-19	176.4	16.4	187.8	9.3
情境 3-20	159.6	21.1	188.0	9.5
情境 3-21	139.0	26.5	188.1	9.6
情境 3-22	185.7	25.7	227.0	10.3
情境 3-23	168.1	29.6	227.2	10.5
情境 3-24	146.6	34.1	227.5	10.8
情境 3-25	192.1	32.1	282.8	11.2
情境 3-26	175.4	36.9	283.0	11.4
情境 3-27	154.1	41.6	283.5	11.9

表 5-12 自動控制車隊規模 4 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 4-1	182.4	22.4	190.7	10.4
情境 4-2	165.6	27.1	190.8	10.5
情境 4-3	143.4	30.9	191.3	11.0
情境 4-4	190.1	30.1	229.5	11.1
情境 4-5	172.8	34.3	229.7	11.3
情境 4-6	152.2	39.7	230.3	11.9
情境 4-7	199.6	39.6	285.8	12.3
情境 4-8	182.6	44.1	285.9	12.4
情境 4-9	161.7	49.2	286.4	12.9
情境 4-10	180.5	20.5	190.8	10.5
情境 4-11	164.1	25.6	190.8	10.5
情境 4-12	142.3	29.8	191.2	10.9
情境 4-13	188.2	28.2	229.6	11.2
情境 4-14	171.3	32.8	229.8	11.4
情境 4-15	151.1	38.6	230.2	11.8
情境 4-16	197.7	37.7	285.8	12.3
情境 4-17	181.1	42.6	286.0	12.5
情境 4-18	160.6	48.1	286.4	12.9
情境 4-19	178.6	18.6	190.9	10.6
情境 4-20	162.6	24.1	190.8	10.5
情境 4-21	141.2	28.7	191.3	11.0
情境 4-22	186.3	26.3	229.7	11.3
情境 4-23	169.8	31.3	229.9	11.5
情境 4-24	150.0	37.5	230.3	11.9
情境 4-25	195.8	35.8	285.9	12.4
情境 4-26	179.6	41.1	286.0	12.5
情境 4-27	159.5	47.0	286.4	12.9

表 5-13 自動控制車隊規模 5 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 5-1	186.1	26.1	194.5	12.2
情境 5-2	170.1	31.6	195.4	13.1
情境 5-3	147.7	35.2	196.0	13.7
情境 5-4	196.1	36.1	237.5	16.8
情境 5-5	180.2	41.7	238.5	17.8
情境 5-6	157.6	45.1	238.6	17.9
情境 5-7	204.1	44.1	293.9	18.8
情境 5-8	187.8	49.3	295.0	19.9
情境 5-9	165.2	53.4	294.9	19.8
情境 5-10	184.2	24.2	194.4	12.1
情境 5-11	168.6	30.1	195.4	13.1
情境 5-12	146.6	34.1	195.9	13.6
情境 5-13	194.2	34.2	237.4	16.7
情境 5-14	178.7	40.2	238.4	17.7
情境 5-15	156.5	44.0	238.5	17.8
情境 5-16	202.2	42.2	293.9	18.8
情境 5-17	186.3	47.8	294.9	19.8
情境 5-18	164.8	52.3	294.9	19.8
情境 5-19	182.3	22.3	194.4	12.1
情境 5-20	167.1	28.6	195.3	13.0
情境 5-21	145.5	33.0	195.8	13.5
情境 5-22	192.3	32.3	237.4	16.7
情境 5-23	177.2	38.7	238.3	17.6
情境 5-24	155.4	42.9	238.5	17.8
情境 5-25	200.3	40.3	293.9	18.8
情境 5-26	184.8	46.3	294.8	19.7
情境 5-27	163.7	51.2	294.9	19.8

表 5-14 自動控制車隊規模 6 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 6-1	187.9	27.9	196.5	12.6
情境 6-2	170.7	32.2	197.4	13.5
情境 6-3	149.9	37.4	198.1	14.2
情境 6-4	197.9	37.9	239.8	17.3
情境 6-5	181.3	42.8	240.8	18.3
情境 6-6	159.8	47.3	241.2	18.7
情境 6-7	208.1	48.1	295.8	19.7
情境 6-8	190.9	52.4	296.9	20.8
情境 6-9	168.6	56.1	297.8	21.7
情境 6-10	186.0	26.0	196.6	12.7
情境 6-11	169.2	30.7	197.4	13.5
情境 6-12	148.8	36.3	198.2	14.3
情境 6-13	196.0	36.0	239.8	17.3
情境 6-14	179.8	41.3	240.7	18.2
情境 6-15	158.7	46.2	241.3	18.8
情境 6-16	207.2	47.2	295.9	19.8
情境 6-17	189.0	50.5	297.0	20.9
情境 6-18	167.5	55.0	298.0	21.9
情境 6-19	184.1	24.1	196.7	12.8
情境 6-20	167.7	29.2	197.6	13.7
情境 6-21	147.7	35.2	198.3	14.4
情境 6-22	194.1	34.1	240.0	17.5
情境 6-23	178.3	39.8	241.0	18.5
情境 6-24	157.6	45.1	241.5	19.0
情境 6-25	205.3	45.3	296.0	19.9
情境 6-26	187.5	49.0	297.1	21.0
情境 6-27	166.4	53.9	298.0	21.9

表 5-15 自動控制車隊規模 7 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 7-1	189.3	29.3	198.5	13.1
情境 7-2	172.2	33.7	199.3	13.9
情境 7-3	150.8	38.3	200.0	14.6
情境 7-4	198.5	38.5	242.3	17.7
情境 7-5	181.9	43.4	243.4	18.8
情境 7-6	160.7	48.2	244.2	19.6
情境 7-7	208.5	48.5	299.0	20.6
情境 7-8	192.1	53.6	300.3	21.9
情境 7-9	171.4	58.9	301.6	23.2
情境 7-10	187.4	27.4	198.5	13.1
情境 7-11	170.7	32.2	199.4	14.0
情境 7-12	149.7	37.2	200.2	14.8
情境 7-13	196.6	36.6	242.5	17.9
情境 7-14	180.0	41.5	243.4	18.8
情境 7-15	159.6	47.1	244.3	19.7
情境 7-16	206.6	46.6	299.1	20.7
情境 7-17	190.6	52.1	300.3	21.9
情境 7-18	170.3	57.8	301.5	23.1
情境 7-19	185.5	25.5	198.6	13.2
情境 7-20	169.2	30.7	199.5	14.1
情境 7-21	148.6	36.1	200.4	15.0
情境 7-22	194.7	34.7	242.7	18.1
情境 7-23	178.5	40.0	243.5	18.9
情境 7-24	158.5	46.0	244.4	19.8
情境 7-25	204.7	44.7	299.3	20.9
情境 7-26	189.1	50.6	300.4	22.0
情境 7-27	169.2	56.7	301.6	23.2

表 5-16 自動控制車隊規模 8 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 8-1	191.4	31.4	200.6	13.5
情境 8-2	174.2	35.7	201.4	14.3
情境 8-3	152.8	40.3	202.2	15.1
情境 8-4	205.6	45.6	244.9	18.2
情境 8-5	188.3	49.8	246.1	19.4
情境 8-6	166.6	54.1	247.2	20.5
情境 8-7	214.3	54.3	301.9	21.6
情境 8-8	197.0	58.5	303.3	23.0
情境 8-9	176.2	63.7	305.4	25.1
情境 8-10	189.5	29.5	200.7	13.6
情境 8-11	172.7	34.2	201.5	14.4
情境 8-12	151.7	39.2	202.2	15.1
情境 8-13	203.7	43.7	245.0	18.3
情境 8-14	186.8	48.3	246.1	19.4
情境 8-15	165.5	53.0	247.4	20.7
情境 8-16	212.4	52.4	302.1	21.8
情境 8-17	195.5	57.0	303.6	23.3
情境 8-18	175.1	62.6	305.5	25.2
情境 8-19	187.6	27.6	200.8	13.7
情境 8-20	171.2	32.7	201.6	14.5
情境 8-21	150.6	38.1	202.1	15.0
情境 8-22	201.8	41.8	245.0	18.3
情境 8-23	185.3	46.8	246.0	19.3
情境 8-24	164.4	51.9	247.2	20.5
情境 8-25	210.5	50.5	302.3	22.0
情境 8-26	194.0	55.5	303.8	23.5
情境 8-27	174.0	61.5	305.7	25.4

表 5-17 自動控制車隊規模 9 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 9-1	193.0	33.0	202.8	13.9
情境 9-2	176.9	38.4	203.6	14.7
情境 9-3	155.4	42.9	204.6	15.7
情境 9-4	203.1	43.1	247.6	18.8
情境 9-5	186.8	48.3	248.8	20.0
情境 9-6	166.7	54.2	250.2	21.4
情境 9-7	214.6	54.6	305.2	22.5
情境 9-8	199.4	60.9	306.8	24.1
情境 9-9	180.3	67.8	309.1	26.4
情境 9-10	191.1	31.1	202.9	14.0
情境 9-11	175.4	36.9	203.8	14.9
情境 9-12	154.3	41.8	204.7	15.8
情境 9-13	201.2	41.2	247.7	18.9
情境 9-14	185.3	46.8	249.1	20.3
情境 9-15	165.6	53.1	250.3	21.5
情境 9-16	212.7	52.7	305.3	22.6
情境 9-17	197.9	59.4	307.0	24.3
情境 9-18	179.2	66.7	309.4	26.7
情境 9-19	189.2	29.2	203.0	14.1
情境 9-20	173.9	35.4	204.0	15.1
情境 9-21	153.2	40.7	204.9	16.0
情境 9-22	199.2	39.3	247.8	19.0
情境 9-23	183.8	45.3	249.3	20.5
情境 9-24	164.5	52.0	250.5	21.7
情境 9-25	210.8	50.8	305.6	22.9
情境 9-26	196.4	57.9	307.3	24.6
情境 9-27	178.1	65.6	309.6	26.9

表 5-18 自動控制車隊規模 10 模擬情境之 Output

模擬情境	AT_{AC}	AD_{AC}	\overline{AT}	\overline{AD}
情境 10-1	193.9	34.0	205.0	14.5
情境 10-2	178.0	39.5	205.7	15.2
情境 10-3	158.1	45.6	206.9	16.4
情境 10-4	205.9	45.9	250.2	19.5
情境 10-5	190.8	52.3	251.3	20.6
情境 10-6	171.9	59.4	253.0	22.3
情境 10-7	219.3	59.3	308.3	23.4
情境 10-8	204.1	65.6	310.1	25.2
情境 10-9	185.3	72.8	313.3	28.4
情境 10-10	192.1	32.1	204.8	14.3
情境 10-11	176.5	38.0	205.6	15.1
情境 10-12	157.0	44.5	206.8	16.3
情境 10-13	203.9	44.0	250.2	19.5
情境 10-14	189.3	50.8	251.2	20.5
情境 10-15	170.8	58.3	252.9	22.2
情境 10-16	217.3	57.4	308.2	23.3
情境 10-17	202.6	64.1	310.0	25.1
情境 10-18	184.2	71.7	313.2	28.3
情境 10-19	190.2	30.2	204.7	14.2
情境 10-20	175.0	36.5	205.6	15.1
情境 10-21	155.9	43.4	206.7	16.2
情境 10-22	202.1	42.1	250.1	19.4
情境 10-23	187.8	49.3	251.2	20.5
情境 10-24	169.7	57.2	252.8	22.1
情境 10-25	215.5	55.5	308.2	23.3
情境 10-26	201.2	62.6	310.0	25.1
情境 10-27	183.1	70.6	313.1	28.2

綜合以上數據做出以下幾點分析：

1. AT_{AC} 恆小於 \overline{AT} 。
2. 同樣的車隊初速、同樣的鄰近車道車流量、同樣的預設車間距，車隊規模的擴大會造成 AT_{AC} 的增加。
3. 同樣的車隊規模、同樣的鄰近車道車流量、同樣的預設車間距，車隊初速的變化對於 \overline{AT} 、 \overline{AD} 影響不大。
4. 同樣的車隊規模、同樣的鄰近車道車流量、同樣的預設車間距，車隊初速的增加會使得 AT_{AC} 減少， AD_{AC} 增加。原因在於車隊初速提升自然會導致 AC 車道的平均旅行時間減少，但也不利於在發生事故的自動車道上游的自動車輛順利變換至鄰近車道以順利通過事故點，才會造成 AC 車輛的平均延滯時間增加。
5. 同樣的鄰近車道車流量、同樣的預設車間距，車隊規模的擴大對 \overline{AT} 、 \overline{AD} 的影響，比車隊初速提升的影響來得大。
6. 同樣的車隊規模、同樣的車隊初速、同樣的預設車間距，鄰近車道車流量的增加對於 AT_{AC} 、 AD_{AC} 、 \overline{AT} 、 \overline{AD} 均有顯著影響。
7. 同樣的車隊規模、同樣的車隊初速、同樣的鄰近車道車流量，預設車間距的拉長對於 \overline{AT} 、 \overline{AD} 無顯著影響。
8. 在鄰近車道流量為低流量的情況下，採用較大車隊規模、較高車隊初速、較小車間距可達到最佳行進效率。
9. 在鄰近車道流量為高流量的情況下，採用較小車隊規模、較小車隊初速、較大車間距可達到最佳行進效率。

5.1.4 道路容量近飽和之分析

一般而言，路段在未達到壅塞之情況下，車流量大小與密度成正向關係，鄰近車道車流在較高流量情況下造成路段密度較大，而相對的車間距就變得較小，故自動控制車輛變換車道可接受之安全車間距範圍將受到壓迫，變換成功機會便比較少，故鄰近車道車流狀況應是影響自動控制車輛變換車道最重要之因素，也需進一步探討之。

由於一般情境分析中，並無考慮當道路容量達到理論值最大的 2300vph 時之情境，而在初步試驗中，當鄰近車道車流量達到理論值最大的 2300vph 時，將會造成整個系統旅行時間大幅度之延長，故不以平均旅行時間及平均延滯時間作為評估準則；本節採用另一評估準則：變換車道成功率，來探討當鄰近車道車流量達到理論值最大的 2300vph 時，整個模式運作的可行性及效率。

變換車道成功率為即以模擬時間內成功變換車道之 AC 車輛數除以模擬時間內所有產生於自動車道且之 AC 車輛，即：

$$I = \frac{\text{\# of conduct lane-changing vehicles}}{\text{\# of all AC vehicles}}$$

I 會介於 0 到 1 之間， I 值越接近 1，表示位於事故阻塞之 AC 車輛大多能夠成功的變換到鄰近車道；反之，越接近 0 為大多數的 AC 車輛皆無法變換到鄰近車道，而停等在自動車道上。

表 5-19 變換車道成功率

車隊規模 (輛)	車隊初速 (kph)	鄰近車道車流量(vph)			
		800	1300	1800	2300
2	100	100%	81%	49%	11%
	130	86%	65%	23%	12%
	160	77%	47%	15%	5%
5	100	91%	71%	34%	8%
	130	78%	59%	19%	10%
	160	60%	37%	11%	6%
10	100	79%	58%	22%	8%
	130	65%	45%	9%	6%
	160	48%	23%	9%	3%
平均變換車道成功率		76%	54%	21%	7%

而從表 5-19 中，我們得到的結果，當道路容量幾近飽和時，變換車道成功率降至 7% 左右，即 100 輛的 AC 車輛僅 7 輛能成功變換車道至鄰近車道，其餘 93 量 AC 車輛將停等在事故上游，形成系統之癱瘓；且車隊規模、車隊初速對於變換成功率的影響無顯著差異，所以當未來的單一自動車道開始測試時，在道路容量達飽和的情況下，一旦事故發生，可能須配合相關的交通管制，以避免系統癱瘓之情形。

5.2 敏感度分析

本節變動程式中參數之預設值，以觀察參數變動在此系統中，對於 AC 車輛平均旅行時間的影響。目標參數、預設值、變動值如表 5-20 所示：

表 5-20 敏感度分析之目標參數

目標參數	目標參數預設值之增量(%)				
	-40	-20	0	+20	+40
MAX_ACC(m/s ²)	2.16	2.88	3.6	4.32	5.04
MAX_DEACC(m/s ²)	4.32	5.76	7.2	8.64	10.08
TRANS_ANGLE(deg)	27	36	45	54	63
TRANS_TIME(sec)	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2
BUFFER_TIME(sec)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
SAFE	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14
RETURN_TIME(sec)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
RETURN_ANGLE(deg)	27	36	45	54	63
REFORM_TIME(sec)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
INCIDENT(m)	6	8	10	12	14
INCIDENT_X(m)	1500	2000	2500	3000	3500

其中對於事故位置之敏感度分析，將事故發生位置分為自動車道上游事故、自動車道中游事故、自動車道下游事故，來探討事故位置對於整體系統績效之影響程度。

敏感度分析結果如表 5-21 所示，由表中可看出 TRANS_TIME(變換車道所需時間)和 SAFE(縱向安全係數)對於 AC 車輛平均旅行時間之影響較為顯著，而此兩個變數皆直接影響車輛之變換車道行為，也就是說，車輛在變換車道時的延

滯對於 AC 車輛平均旅行時間的影響最為直接。

而事故位置之變動顯示出，自動車道上游事故對於整個系統的衝擊較大，明顯拉長了 AC 車輛平均旅行時間。此現象可以解釋為，當事故發生在自動車道上游時，大部分車輛散布在事故影響區之強制煞車區內，故停等之 AC 車輛較一般情況為多，較難變換至鄰近車道繼續前進，故造成 AC 車輛平均旅行時間之增加。而當事故發生在自動車道下游時，車輛之反應時間以及跟車緩衝時間均增加，有利於變換車道，故能減少 AC 車輛之延滯，進而減少 AC 車輛平均旅行時間。

表 5-21 敏感度分析結果

目標參數	目標參數預設值之增量(%)				
	-40	-20	0	+20	+40
	AC 車輛平均旅行時間(sec/AC-veh)				
MAX_ACC(m/s ²)	188.4	186.7	185.3	183.7	182.0
MAX_DEACC(m/s ²)	193.7	190.2	185.3	180.4	179.9
TRANS_ANGLE(deg)	185.9	186.5	185.3	189.0	186.1
TRANS_TIME(sec)	163.8	174.5	185.3	193.8	200.9
BUFFER_TIME(sec)	185.5	184.9	185.3	188.3	188.9
SAFE	160.9	175.8	185.3	193.6	202.8
RETURN_TIME(sec)	172.6	176.7	185.3	189.9	198.5
RETURN_ANGLE(deg)	182.0	186.1	185.3	183.4	187.6
REFORM_TIME(sec)	177.9	182.1	185.3	187.1	196.9
INCIDENT(m)	184.6	185.0	185.3	185.9	186.3
INCIDENT_X(m)	198.8	190.5	185.3	179.1	171.6

5.3 車流時空圖

由輸出之資料檔案，可以歸納得出每一個 TIMESLICE 裡的車輛資料，為了能更清楚描繪車輛行為，將路段調整為 800 公尺，事故位置設於 450 公尺處，模擬時間調整為 60 秒；圖 5-1 為基準情境 8-23(車隊規模 8 輛、車隊初速 130kph、鄰近車道車流量 1300vph、預設車間距 8 公尺)之三維車流時空圖，顯示前十輛 AC 車輛之 X 座標、Y 座標與時間 Time 之關係；圖 5-2 為二維車流時空圖，顯示前十輛 AC 車輛之 X 座標與時間 Time 之關係。

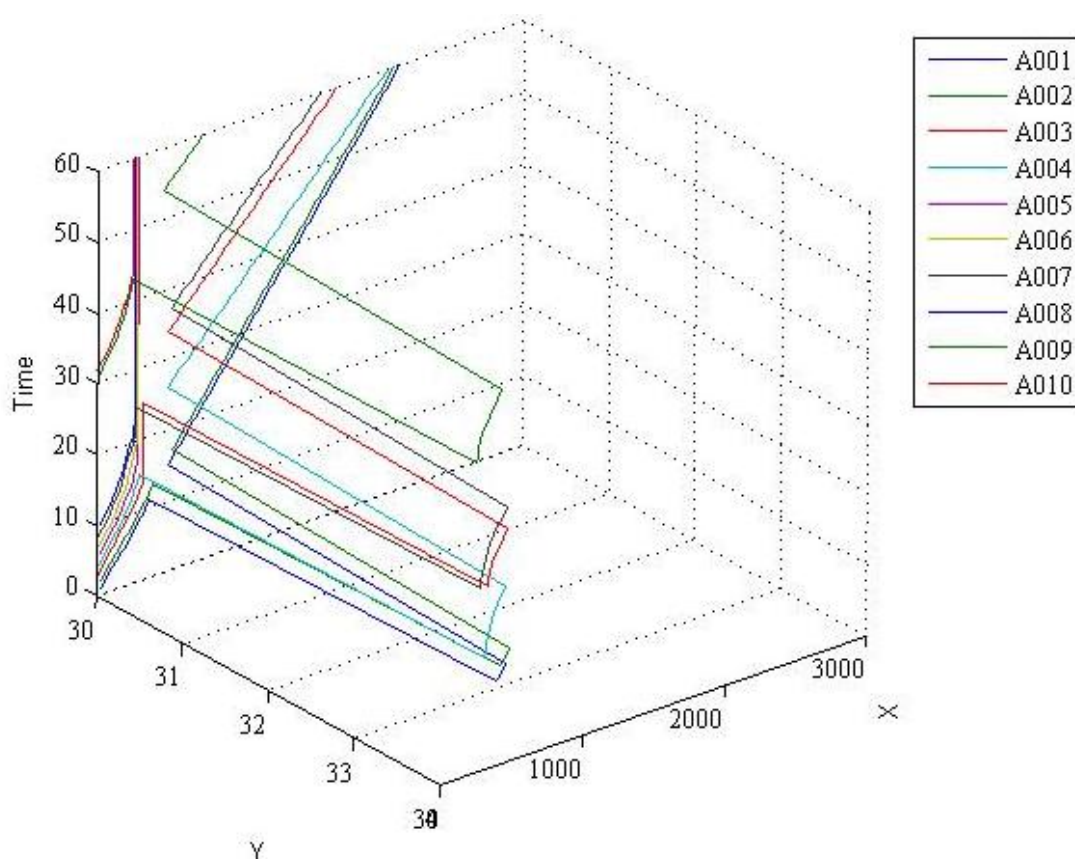


圖 5-1 基準情境 8-23 之三維車流時空圖

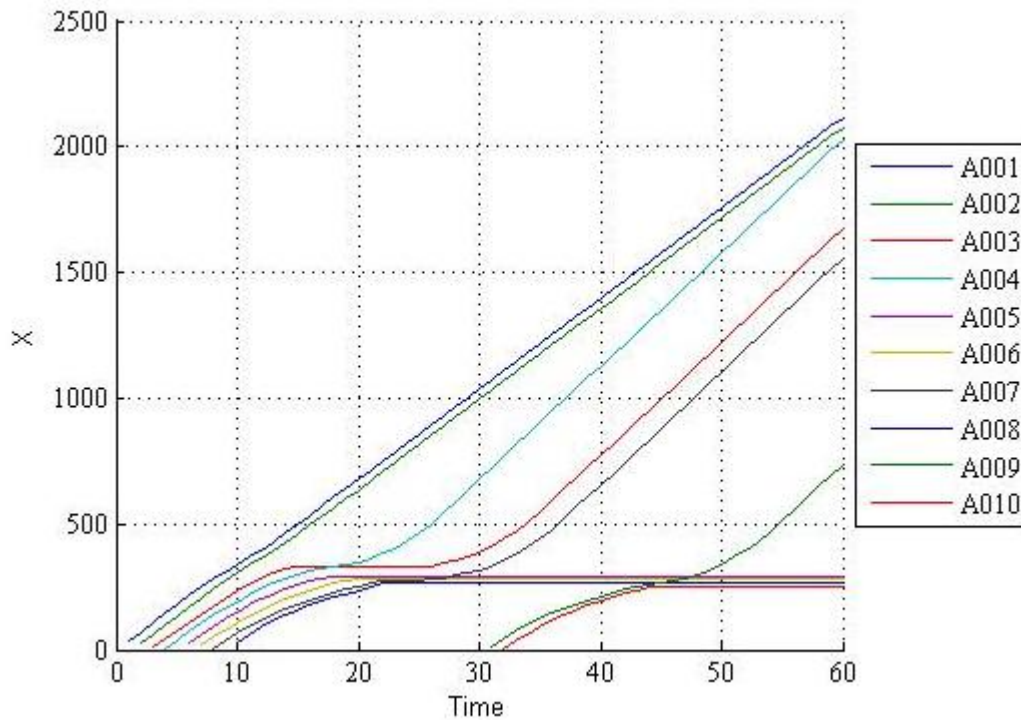


圖 5-2 基準情境 8-23 之二維車流時空圖

從圖中可看出，進入事故區後，AC 車輛開始進行煞車行為，速度降低且車與車間距逐漸拉開，因而出現反曲之線型；切線方向即為瞬時速度，速度之變化乃因事故影響區之門檻值的不同而受到的控制。

在基準情境 8-23 中，A001、A002、A004 三輛車依序繞過事故點回到自動車道，A003、A007 在事故車道上游停等一段時間後，尋找到變換車道的時機才進行變換車道的動作再繞過事故點回到自動車道，A005、A006、A008、A010 則停等在事故點前；第二車隊出現在模擬時間 30 秒時，第二車隊的第一輛 AC 車輛 A009 在其跟車緩衝區內直接進行變換車道的動作以順利通過事故點。

圖 5-2 中，A004 在模擬時間 28 秒時回到自動車道，為了進行車隊重組的行為，故加速前進以追上前車 A002，約在路段 2000 公尺處逼近前車 A002；由圖形中可看出線條 A004 在模擬時間 28 秒後的斜率變大，便是因為 A004 加速的關係。

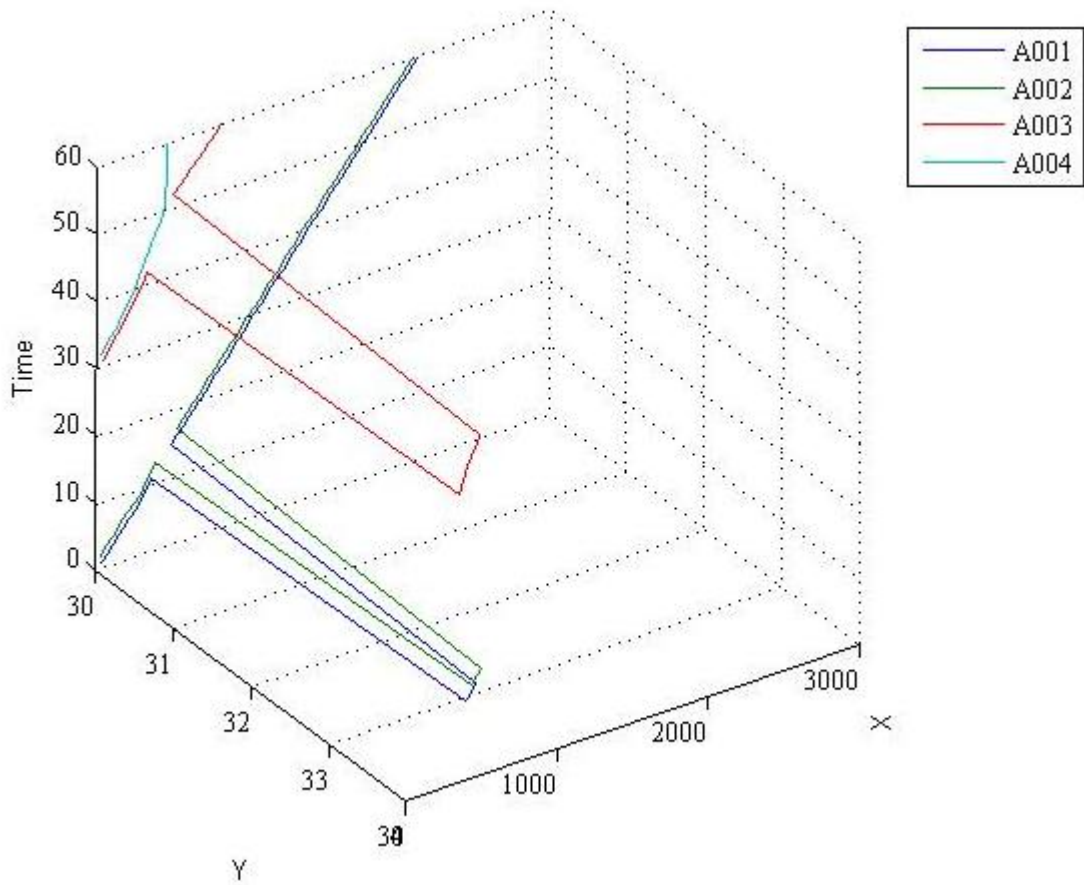


圖 5-3 情境 2-23 之三維車流時空圖

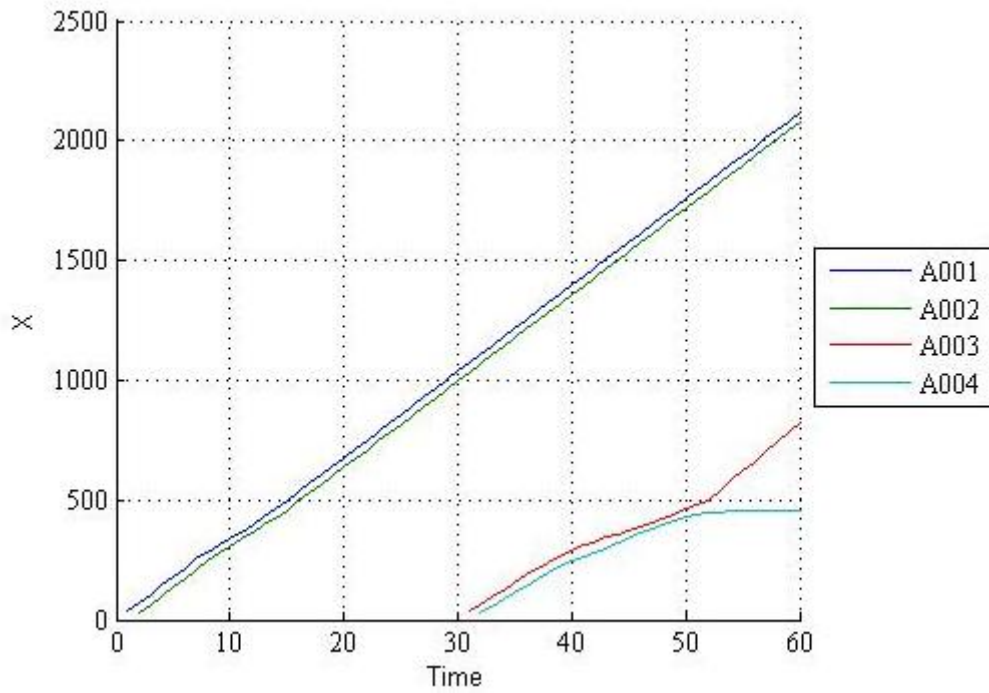


圖 5-4 情境 2-23 之二維車流時空圖

5-3、5-4 分別為情境 2-23(車隊規模 2 輛、車隊初速 130kph、鄰近車道車流量 1300vph、預設車間距 8 公尺)之三維及二維的車流時空圖，以利觀察車隊規模縮小為 2 輛時之車流行為。在車隊規模縮小為 2 輛的情況下，模擬時間 60 秒內只出現兩個車隊，由於車隊規模的縮小有利於 AC 車輛進行變換車道的行為，因此 A001、A002、A003 不需停等便直接變換車道通過事故點，但在中流量 1300vph 的條件下，A004 無法取得變換車道的機會，故仍停等在事故點前。從圖形也可看出 A003 在 AC 車輛與一般車輛混合的車道進行跟車行為時，其車速減緩許多。

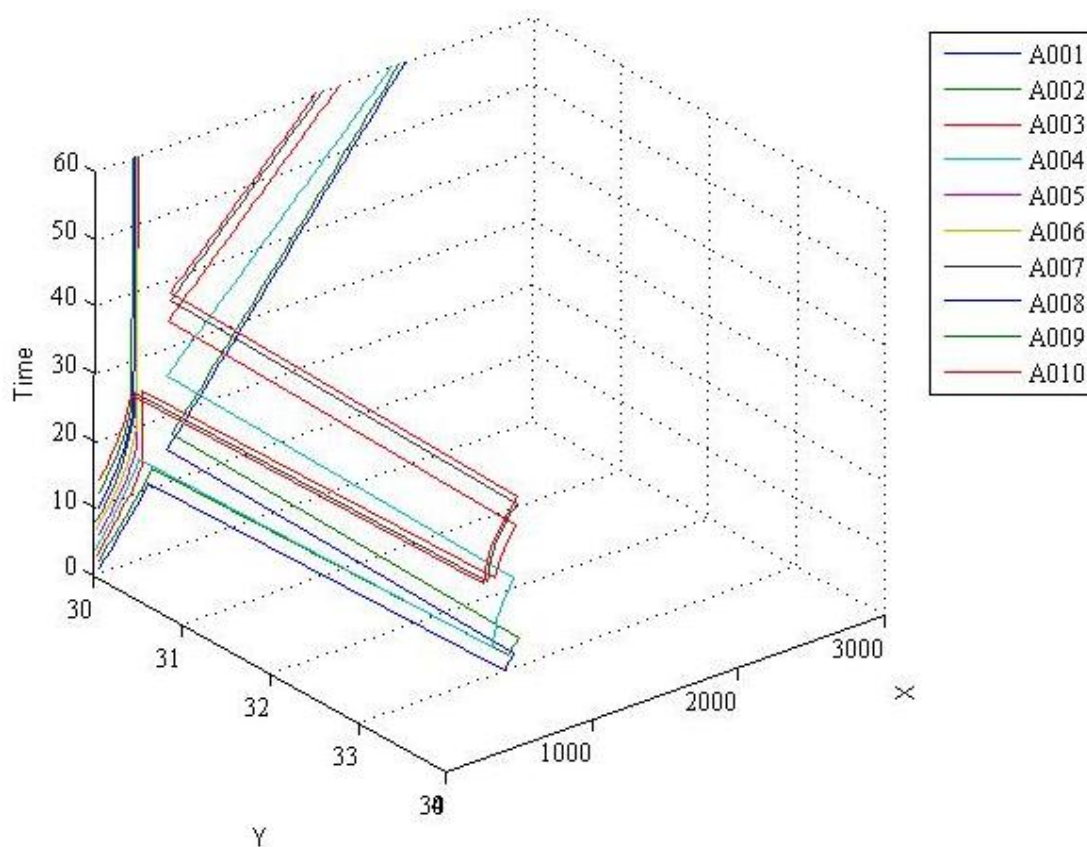


圖 5-5 情境 10-23 之三維車流時空圖

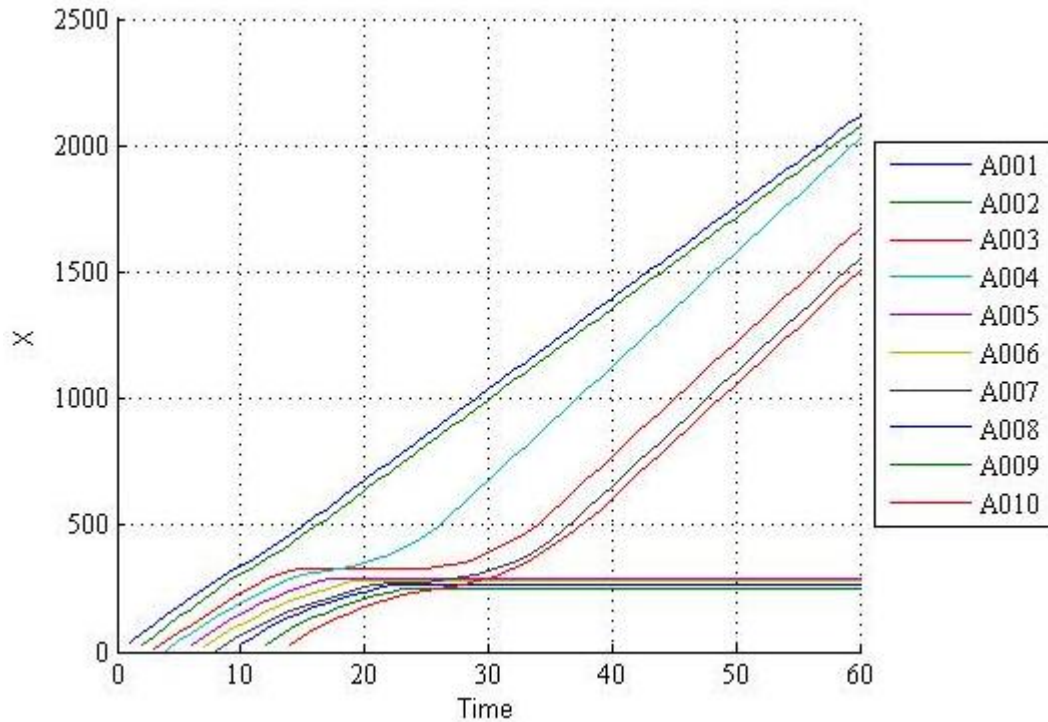


圖 5-6 情境 10-23 之二維車流時空圖

圖 5-5、5-6 分別為情境 10-23(車隊規模 10 輛、車隊初速 130kph、鄰近車道車流量 1300vph、預設車間距 8 公尺)之三維及二維的車流時空圖，以利觀察車隊規模擴大為 10 輛時之車流行為。在車隊規模擴大為 10 輛的情況下，A001、A002、A004 在跟車緩衝時便直接進行變換車道的動作切換至鄰近車道以通過事故點，A003、A007 則在停等後找尋到變換車道的機會才進行變換車道的動作，A005、A006、A008、A009 則停等在事故點前；第二車隊的第二輛 AC 車輛 A010 也是在進行跟車緩衝時便尋找到變換車道的機會直接切換至鄰近車道。而通過事故點後回到自動車道的 AC 車輛們，也都加速以追上前車進行車隊重組的工作。

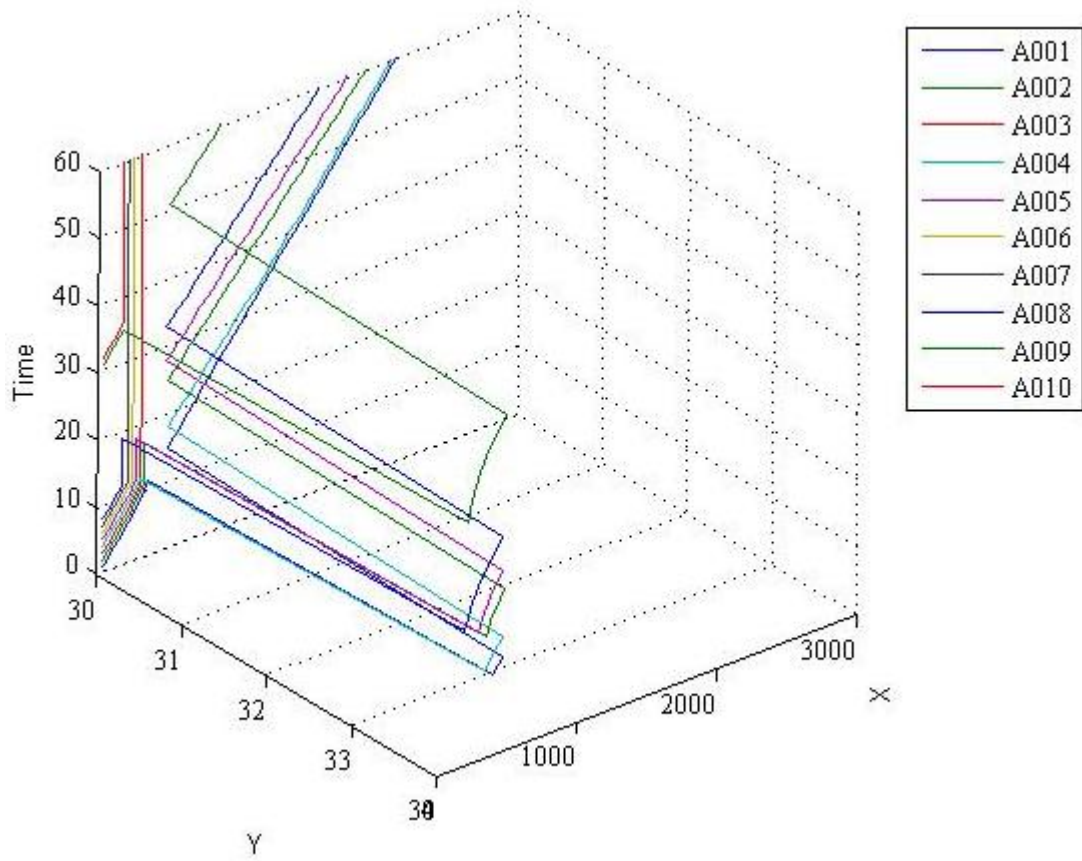


圖 5-7 情境 8-22 之三維車流時空圖

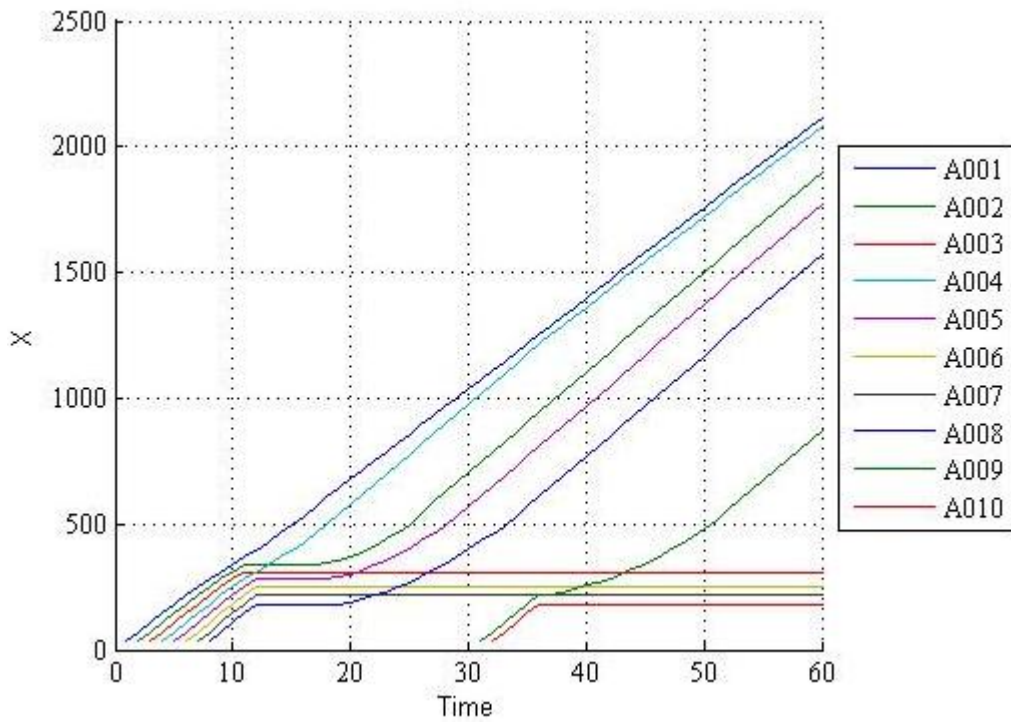


圖 5-8 情境 8-22 之二維車流時空圖

圖 5-7、5-8 為情境 8-22 (車隊規模 8 輛、車隊初速 100kph、鄰近車道車流量 1300vph、預設車間距 8 公尺)之三維及二維的車流時空圖，以利觀察車隊初速減緩至 100kph 時之車流行為。在車隊初速減緩至 100kph 的情況下，A001、A004、A009 在跟車緩衝時便直接進行變換車道的動作切換至鄰近車道以通過事故點，A002、A005、A008 則在停等後找尋到變換車道的機會才進行變換車道的動作，A003、A006、A007、A010 則停等在事故點前。

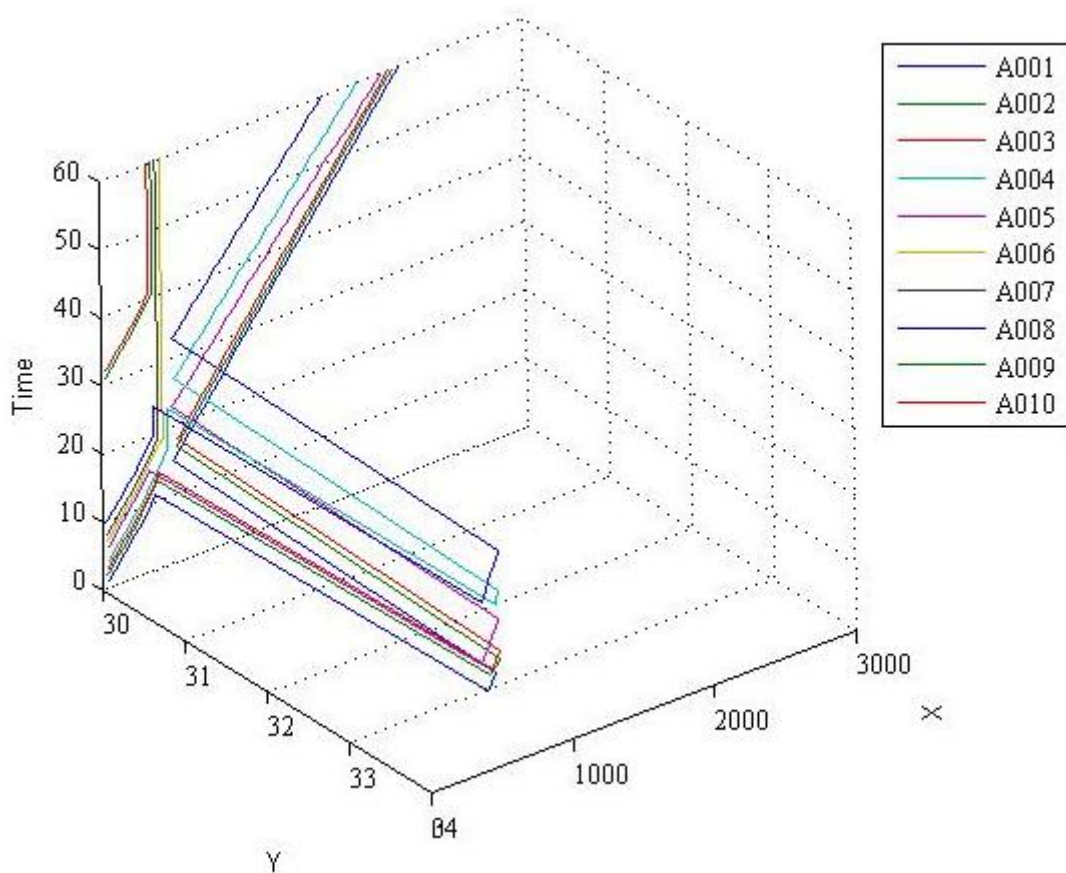


圖 5-9 情境 8-24 之三維車流時空圖

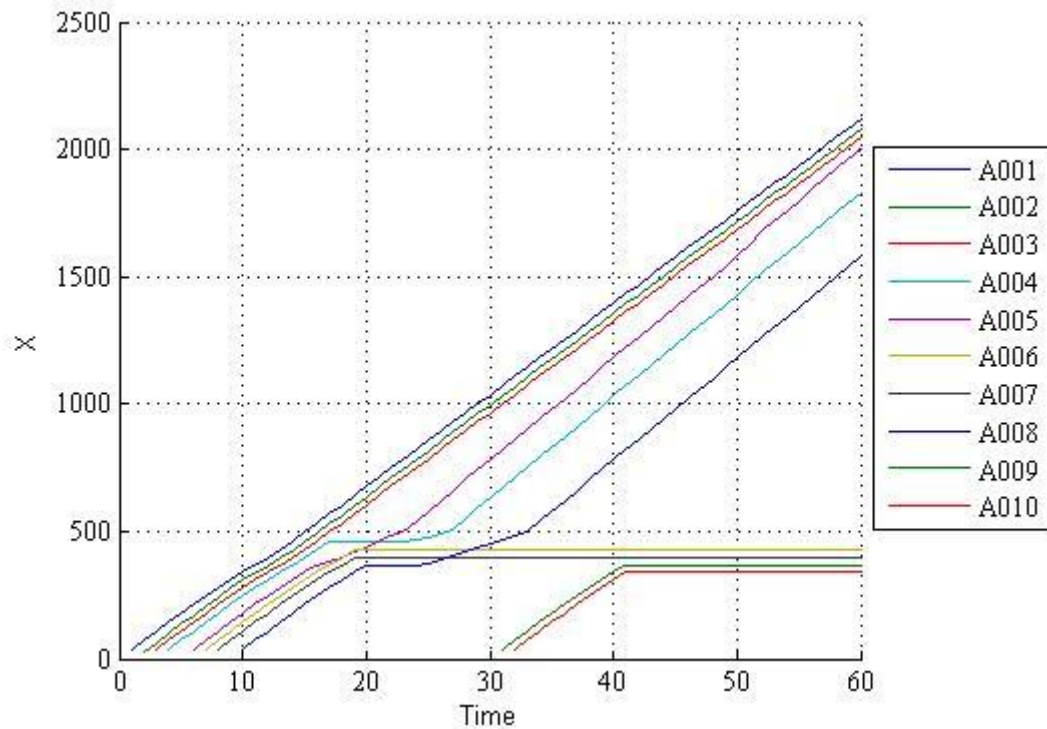


圖 5-10 情境 8-24 之二維車流時空圖

圖 5-9、5-10 為情境 8-24(車隊規模 8 輛、車隊初速 160kph、鄰近車道車流量 1300vph、預設車間距 8 公尺)之三維及二維的車流時空圖，以利觀察車隊初速提升至 160kph 時之車流行為。在車隊初速提升至 160kph 的情況下，A001、A002、A003、A005 較快擺脫鄰近車道後方一般車輛的壓迫，順利進行變換車道的動作，A004、A008 則在停等後找尋到變換車道的機會才進行變換車道的動作，A006、A007、A009、A010 則停等在事故點前。

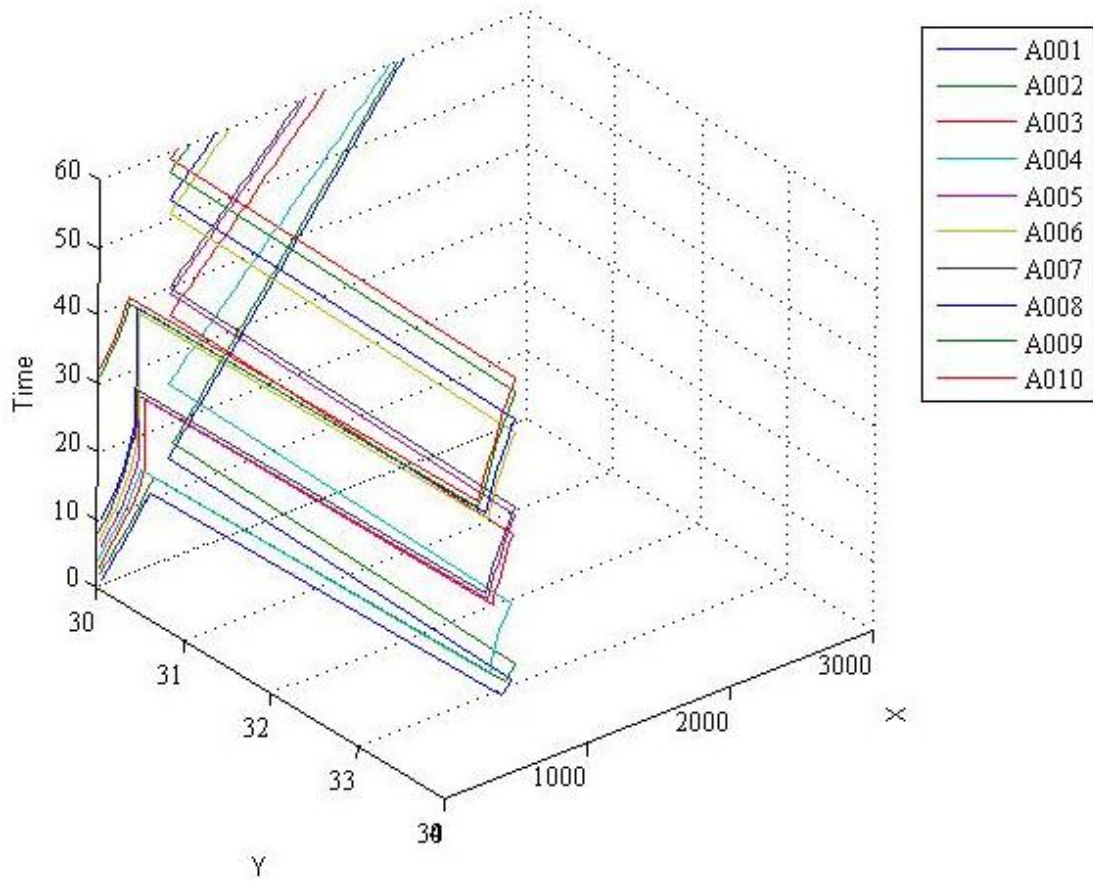


圖 5-11 情境 8-20 之三維車流時空圖

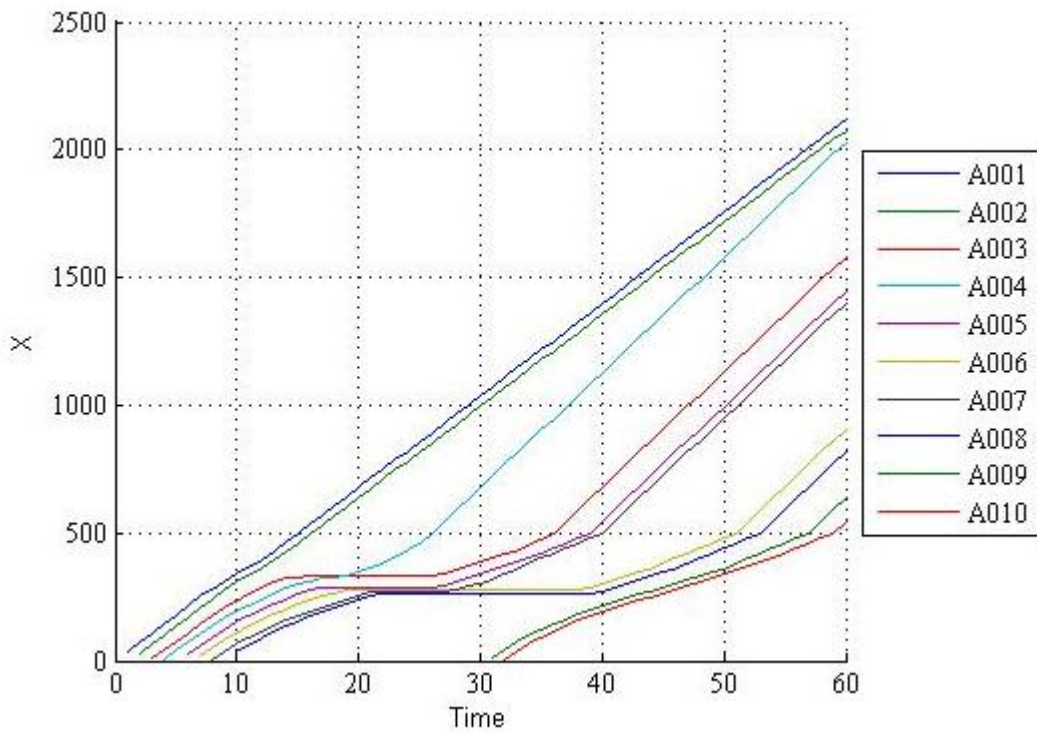


圖 5-12 情境 8-20 之二維車流時空圖

圖 5-11、5-12 為情境 8-20(車隊規模 8 輛、車隊初速 130kph、鄰近車道車流量 800vph、預設車間距 8 公尺)之三維及二維的車流時空圖，以利觀察鄰近車道車流量減少至 800vph 時之車流行為。在鄰近車道車流量減少至 800vph 的情況下，所有的車輛都在跟車緩衝或是短暫的停等後即可變換車道，這也顯現出象徵道路密度的鄰近車道車流量之變化，對於整體車流行為的表現影響最為顯著，此點也與我們的預期相符。

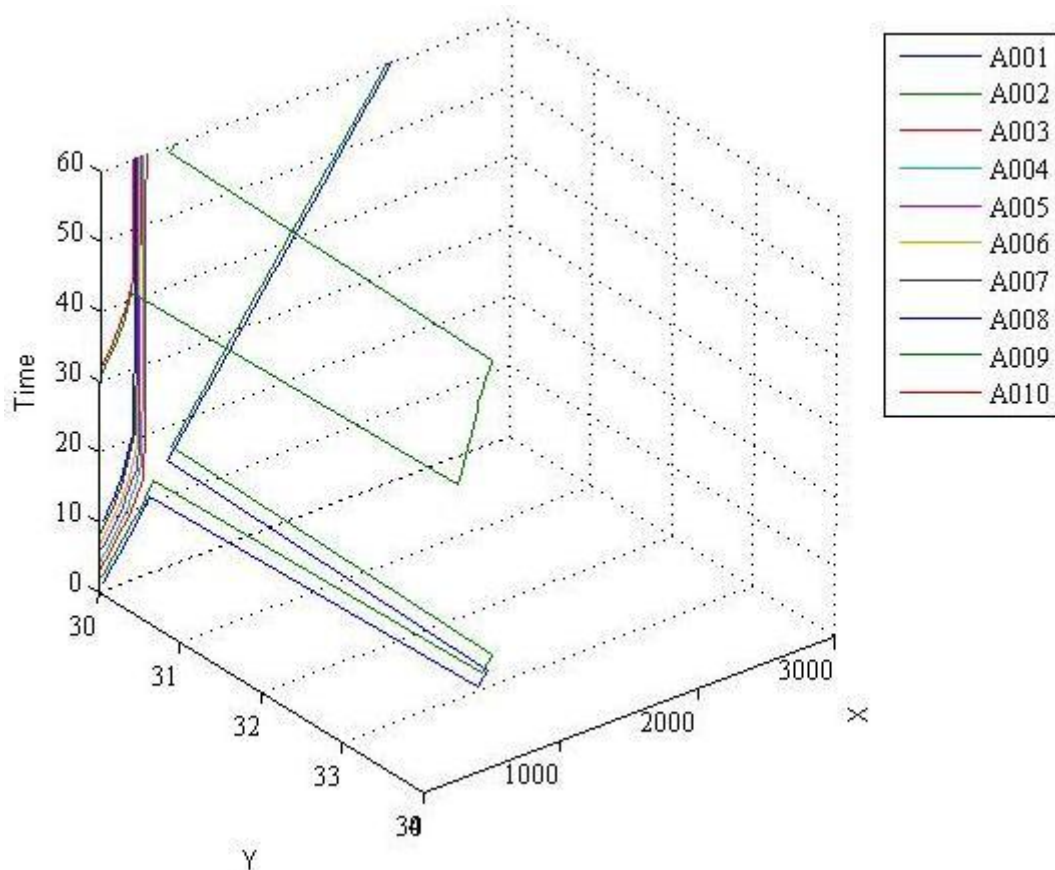


圖 5-13 情境 8-26 之三維車流時空圖

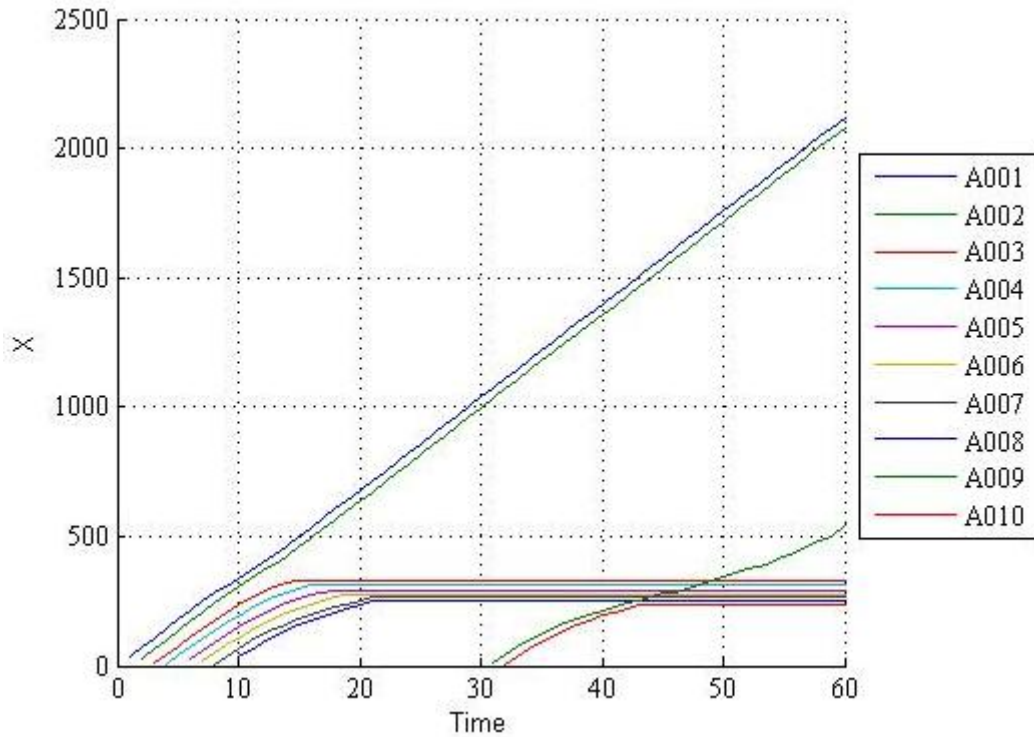


圖 5-14 情境 8-26 之二維車流時空圖

圖 5-13、5-14 為情境 8-26(車隊模 8 輛、車隊初速 130kph、鄰近車道車流量 1800vph、預設車間距 8 公尺)之三維及二維的車流時空圖，以利觀察鄰近車道車流量增加至 1800vph 時之車流行為。在鄰近車道車流量增加至 1800vph 的情況下，AC 車輛僅有 A001、A002 及第二車隊之 A009 可尋隙變換車道通過事故點，由於受到鄰近車道高車流量的壓迫影響，大部分的 AC 車輛在事故發生後，皆停等在事故點前以尋求變換車道的機會。

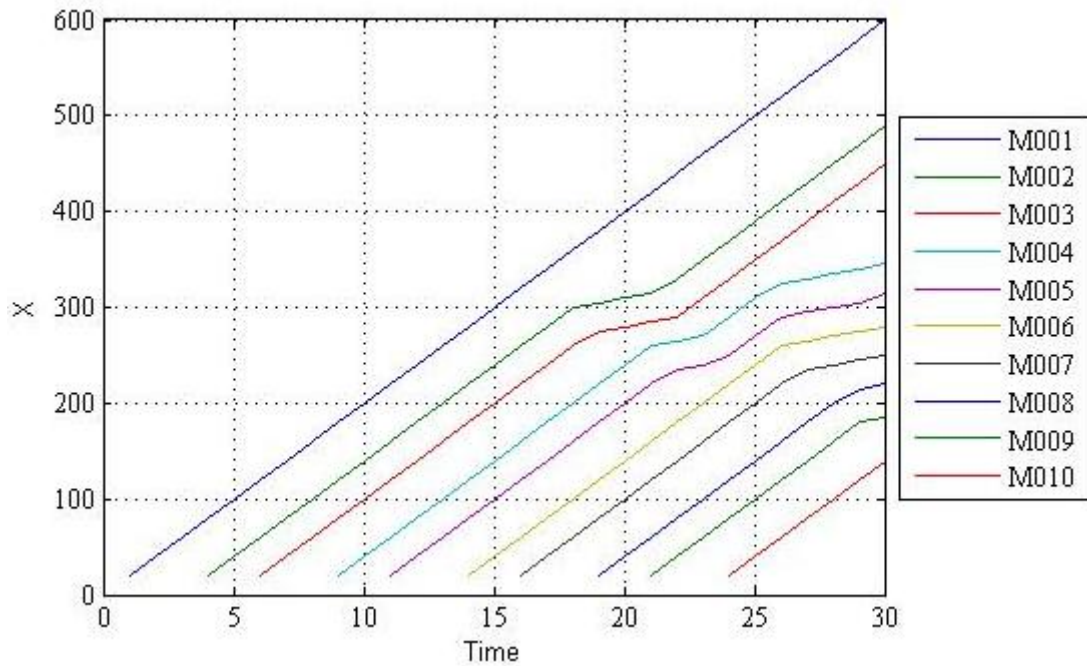


圖 5-15 基準情境 8-23 人為操縱車輛之二維車流時空圖

圖 5-15 為基準情境 8-23 前 10 輛人為操縱車輛在模擬時間 30 秒內之 X-t 圖，由圖中可看出一般車輛 M001 到 M010 的速度變化。由圖形可看出，MC 車輛的速度變化，主要決定於跟車行為的控制邏輯，跟車行為之控制來自於車間距的縮放，來作加減速，車間距也會受到由自動車道變換過來之 AC 車輛而改變。垂直切面所截出之間距則為瞬時的車間距。

圖 5-15 中，由於 AC 車輛與 MC 車輛的速度差異拉開了與 M001 的距離，故 A001、A002 變換車道後對於 M001 並無顯著影響，但 M002、M004、M006 則除了受到前方 MC 車輛的影響外，也分別受到變換車道的 A004、A003、A007 之影響而產生減速的行為。

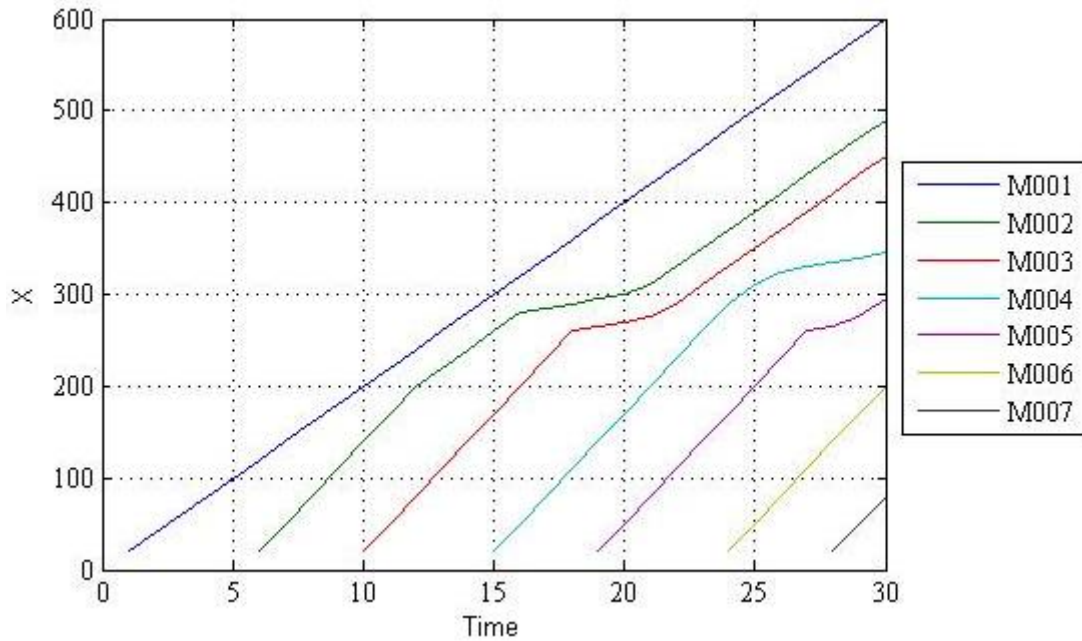


圖 5-16 情境 8-20 人為操縱車輛之二維車流時空圖

圖 5-16 為基準情境 8-20 前 10 輛人為操縱車輛在模擬時間 30 秒內之 X-t 圖，與情境 8-23 相比為較低流量(800vph)的情境，因此每台 MC 車輛產生之間隔較大。由於 MC 車輛之間距較大，在模擬時間 15 秒內，AC 車輛變換至鄰近車道後，其前後車間距的變化較不容易影響後方 MC 車輛速度之變化；但低流量之情境利於 AC 車輛變換至一般車道，故在模擬時間 15 秒後，後方 MC 車輛較易受到前方變換車道過來之 AC 車輛的壓迫而減速行駛。

圖 5-16 中，M002 產生後，由於與前車 M001 間距過大，故以大於 M001 車速之速度前進，之後又受到 A004 變換至一般車道之影響而減速。同理，M004、M005 一開始由於與前車間距過大而加速前進，但卻又受到變換車道過來之 A003、A005 影響而減速行駛。

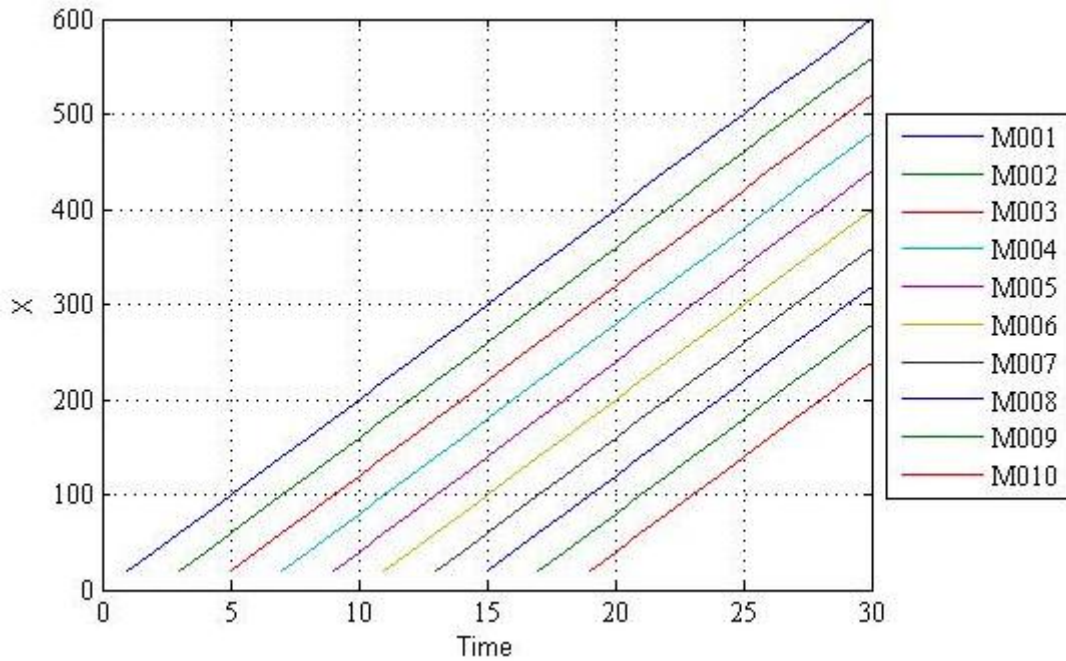


圖 5-17 情境 8-26 人為操縱車輛之二維車流時空圖

圖 5-17 為基準情境 8-26 前 10 輛人為操縱車輛在模擬時間 30 秒內之 X-t 圖，與情境 8-23 相比為較高流量(1800vph)的情境，因此每台 MC 車輛產生之間隔較小，不利於 AC 車輛變換車道，因此 MC 車輛之前後車間距較不容易變動，在系統模擬的控制邏輯下較不容易改變其跟車行為，故與前兩種情境相比，反倒是以較穩定之車流狀態運作。

第六章 結論與建議

本研究主要設計一套針對事故發生時，能夠運用在事故車流下的自動車輛控制邏輯，第三章為控制邏輯的基礎架構，第四章則為將概念寫進程式的過程，大半的時間不斷調整模式、修正程式，才能得到第五章情境分析之結果，進而得到最後的結論。

6.1 結論

1. 國內對於事故模擬模式之研究仍屬缺乏；而國外發展之車流模擬器亦尚無功能可以提供自動公路系統做模擬之功能，更無法於事故下做車流模式之模擬。故本論文將研究目的設定於對自動公路系統做初步之試探研究。
2. 本研究以微觀之觀點以及單位時間掃描之方式，處理單一車道之自動公路系統在事故發生下之模擬，以小客車為研究主體，探討其在事故發生後，車隊拆解、變換車道、混合車流跟車、變換回自動車道以及車隊重組等控制策略行為。
3. 要使此模式能真正應用於自動車控制邏輯之上，先不論舒適度與否，必須要在確保安全的情況下，才有實施的可能。因此，跟車檢測標準中，最基本的跟車要求必須後車不可撞上前方行駛之車輛，此一邏輯確定之後，即可消除自動車上乘客安全的疑慮，有此前提之後，再顧及後方車輛的穩定性，不會因為前方車輛的減速而導致後方車輛安全上的問題。
4. 由於模擬車輛受限於模擬時間非連續，造成檢定車間距(headway)時，無法符合和模擬軟體一樣的車間距；但如果轉為檢定非連續的車流量分佈，則能夠符合車流軟體的特性。對於 AHS 這類未來性的系統，蘊含無限可能，故本文模擬計算出 243 種模擬情境，以平均旅行時間及平均延滯時間作為評估準則，以供未來測試之參考。

5. 車隊規模、車隊初速、鄰近車道車流量、預設車間距為影響單一自動車道 AHS 績效的重要因素。面對不同的環境，適當地調整這些主要變數，將可達到系統績效之較佳值。

6.2 建議

1. 此控制邏輯仍需要相關硬體配合，且硬體之效能越好或是偵測效率、反應速度越快，對判斷邏輯的正確性也越佳，模式也有很大的改善空間，雖然經過各種情境的測試才得到目前的結果，但這方面仍有需再加強。
2. 對於影響車流行為之重要因素-密度，本文僅以車流量之大小象徵之，並無實際計算其密度值，為本文所不足之處。
3. 自動控制邏輯在穩定車流下，就算流量再大也可以維持穩定的跟車，但是遇到不穩定車流，自動車輛如果沒有占車道上車輛的大部份，則跟車效能就沒有一般人為操作來得好，可見如果在事故發生下，跟車邏輯判斷對事故的反應仍有很大的改善空間，這是本文沒有達到的。
4. 本文將車輛以動態模擬方式類似車流模擬軟體，將車輛動概呈現出來。若可轉換程式成連續輸出，求出更精準的車道擁擠、延滯時間、車間距(headway)，便可以使得驗證模式時更加精準可行。
5. 未來如果可以取得自動公路系統測試之相關資料，可以針對未發生事故前之車隊前進做模式之實例驗證。

參考文獻

1. Cem Hatipoglu, Ümit Özgüne, Keith A. Redmill, “Automated Lane Change Controller Design”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, Vol. 4, No.1, March 2003.
2. Datta N. Godbole, Raja Sengupta, Veit Hagenmeyer, “Distributed Hybrid Controls for Automated Vehicle Lane Changes”, Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control Tampa, Florida USA, December 1998.
3. Hirofumi Ohtsuka, Ljubo Vlacic, ”Stop & Go Vehicle Longitudinal Model”, IEEE 5th on ITS, September 2002.
4. ITS-America, <http://www.itsa.org/>
5. J.B.Sheu, Stephen G. Ritchie, ”A new methodology for incident detection and characterization on surface streets”, Transportation Research Part C, June 1998.
6. J.B. Sheu, “Microscopic Control Logic for Incident-Responsive Automatic Vehicle Control in Single-Automated-Lane Highway Systems”, Paper submitted to Transportation Science, 2005.
7. Junji Kaneko, Akihida Shimamura, “A design of Lane change Maneuver for Automated Vehicles”, The IEEE 37th Conference on Decision & Control Tampa, 1998.
8. Lingxi Li, Fei-Yue Wang, “The Automated Lane-Changing Model of Intelligent Vehicle Highway Systems”, The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2002.
9. Mark Brackstone, Mike McDonald, ”Car-following: a historical review”, January 2000.
10. M.Broucke, P.Varaiya, “A Theory of Traffic Flow in Automated Highway Systems”, Transportation Research Part C. Vol. 4, pp. 181-210, 1996.
11. R.Rajamani , S.E.Shladover , ”An experimental comparative study of autonomous

- and co-operative vehicle-follower control systems” , Transportation Research Part C , p.15-31 , 200.
12. Su-Nan Huang, Steven C.Chan, Wei Ren, ”Mixture of automatically-and Manually-controlled Vehicles in Intelligent Transport Systems”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, January 1998.
 13. Yoji Seto, Hideaki Inoue, “Development of platoon driving in AHS”, JSAE Review, Vol.20, 1999.
 14. 交通部運輸研究所，台灣地區智慧型運輸系統發展綱要計畫。
 15. 交通部運輸研究所，2001 年台灣地區公路容量手冊，2001。
 16. 王敏聰，「自動跟車模式之研究及其在車流上的位階」，淡江大學運輸科學研究所，碩士論文，1999。
 17. 胡守任、陳一昌，「智慧型運輸系統(ITS)發展演進與相關技術之探討」，中華民國運輸學會八十七年年會暨第十三屆學術研討會論文集，1998。
 18. 張季倫，「公路客運行車監控系統之研訂及駕駛與車輛資料庫管理系統之研發—數位式行車紀錄器之應用」，國立交通大學，碩士論文，2002。
 19. 許智詠，「因應事故發生自動控制車隊變換車道邏輯之構建—以單一自動車道為例」，國立交通大學交通運輸研究所，碩士論文，2004。
 20. 蔡孟釗，「單一車道自動公路系統發生意外事故下自動車輛跟車邏輯」，國立交通大學交通運輸研究所，碩士論文，2004。
 21. 張鈞華，「模擬一般市區道路事故發生之微觀車流行為」，國立台灣大學土木工程系研究所，碩士論文，2001。