

自動公路系統發生事件下自動駕駛車輛 於鄰近混合車道跟車邏輯之研究

AUTOMATIC DRIVING VEHICLE FOLLOWING CONTROL LOGIC IN MIXED LANE ADJACENT TO AUTOMATED HIGHWAY SYSTEM IN CASE OF INCIDENCE

許鉅秉 JiuH-Biing Sheu¹

吳熙仁 Hsi-Jen Wu²

蔡孟釗 Meng-Chao Tsai³

(104 年 9 月 8 日收稿，105 年 2 月 24 日第 1 次修改，
105 年 4 月 19 日第 2 次修改，105 年 6 月 28 日定稿)

摘 要

自動駕駛車輛可透過電腦系統自動安全地控制車輛並行駛於道路上，未來我們將面臨如何適當地使該車輛通過事件路段中，可供自動駕駛車輛與手動駕駛車輛混合行駛之車道的挑戰。因此本研究假設在單一車道自動公路系統發生事件下，設計一套跟車邏輯，判斷其鄰近之混合車道上自動駕駛車輛針對前方車流之適當反應。該跟車邏輯以避免加減速影響後方車流的不穩定為目標，其中設計兩個指標，動態距離設定最大值及最小值，並考量搭乘者的舒適性，利用程式語言，模擬各種跟車情境，再與車流模擬軟體中之通用汽車跟車指標相比較，以判定自動駕駛車輛跟車穩定性。本研究歸納出 4 種跟車控制邏輯，可依前方兩輛車的相對距離以及速度，

-
1. 臺灣大學工商管理學系暨商學研究所教授 (聯絡地址：10617 臺北市羅斯福路 4 段 1 號 管理學院壹號館 6F 國立臺灣大學工商管理學系暨商學研究所；電話：02-33661069；E-mail：jbsheu@ntu.edu.tw)。
 2. 交通大學運輸與物流管理學系博士候選人暨交通部運輸研究所研究員。
 3. 交通大學交通運輸研究所碩士。

判斷各種加速或是減速的可能。此研究成果可作為非正常車流自動駕駛車輛跟車控制邏輯之依據。

關鍵詞：動態距離設定最大值；動態距離設定最小值；搭乘者舒適性；車流理論

ABSTRACT

While automatic driving vehicles can be controlled automatically by a safety vehicle computer system and driven on a road, we will face the challenge of how to properly make the automatic driving vehicle passing through the lane where automatic and manual driven vehicles mix near the event area and adjacent to automated highway system. The main subject of research topic is to design an automatic car-following logic by the judgment of the front vehicle behavior under the assumption of an incidence occurring on in single-automated-lane highway system. The purpose of automatic car-following logic is to avoid instability in the rear traffic. There are two indicators, maximum dynamic setting distance and minimum one designed in the logic. We also considered the rider comfort and used the programming languages to simulate various scenarios of car-following. Then we compared with the traffic simulation software in the General Motors car-index to determine the stability of automatic driven vehicles under car-following situations. The study concludes four kinds of automatic car-following logic, to judge the acceleration or deceleration of automatic driven vehicle possible by the relative distance and speed of the front two vehicles. The results of this research can support automatic driven vehicle control logic under abnormal traffic.

Key Words: Maximum dynamic setting distance; Minimum dynamic setting distance; Dynamic distance; Micro-traffic flow simulation

一、前言

自動駕駛車輛^[1] (automatic driving vehicle, ADV) 又稱為無人駕駛車輛，係透過電腦系統自動安全地控制車輛，協助駕駛者降低開車時精神及體力上的負擔，提昇交通安全與運輸效率。自動駕駛車輛發展有以下的過程^[2-4]：

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，已發展至可以在市區自動定速低速駕駛。
2. 研發自動駕駛車輛在車輛稀少之公路行駛，可依狀況調整加速、減速、或是停止。另可在正常車流下自動保持在車道內、自動變換車道與自動駛離車道等駕駛模式。
3. 自動駕駛車輛能夠相互串聯，以車隊為單位並應用在高速公路上，開創 1 條自動控制車道，將自動駕駛車輛和非自動駕駛車輛相互隔離，各自行駛各自的车道。

4. 使自動駕駛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駕駛車輛或是非自動駕駛車輛行駛之用。

想要達到自動和手動駕駛車輛 (manual driven vehicle) 完全混合行駛，仍有相當多的問題需要克服，例如發展過程第 3 點中高速公路單一自動駕駛車道，倘若自動駕駛車道發生事故或事件，自動駕駛車輛如何安全地變換車道之後，也能夠短暫的自動行駛至通過事件點之後再變換回自動駕駛車道，同時使車上人員感覺舒適。此種事件下的混合自動駕駛車輛以及手動駕駛車輛的相互關係為何？是否可構建其車流模式，是在發展自動高速公路系統過程中，極可能面臨的問題。

為構建發生事件下混合自動駕駛車輛以及手動駕駛車輛的車流模式，爰有必要先界定研究範圍，擬定改善目標、提出分析方法與研究目的，說明如下。

首先，針對研究範圍部分，本研究假設在高速公路上，最內側車道開闢為自動駕駛車輛專用車道的自動公路系統環境 (如圖 1)，唯有自動駕駛車輛能夠進出此專用車道，且進入此車道即為自動控制，若駛出此車道則轉為手動駕駛。倘若自動駕駛車道之下游發生事件，此車道上之自動駕駛車輛接收到訊號後，距離事件比較近的自動駕駛車輛必須緊急煞車，距離事件比較遠之自動駕駛車輛即可預先變換至鄰近之一般車道 (以下簡稱鄰近車道)，和一般手動駕駛車輛混合行駛，如果將鄰近車道上的車輛區分成自動駕駛車輛和手動駕駛車，這時候的跟車行為，除了一般傳統的人為跟車方式 (後車駕駛者是人，前車則可能是自動駕駛車輛或是手動駕駛車輛) 外，亦增加自動駕駛車輛的跟車方式 (自動駕駛車輛前方可能是自動駕駛車輛或是手動駕駛車輛)。

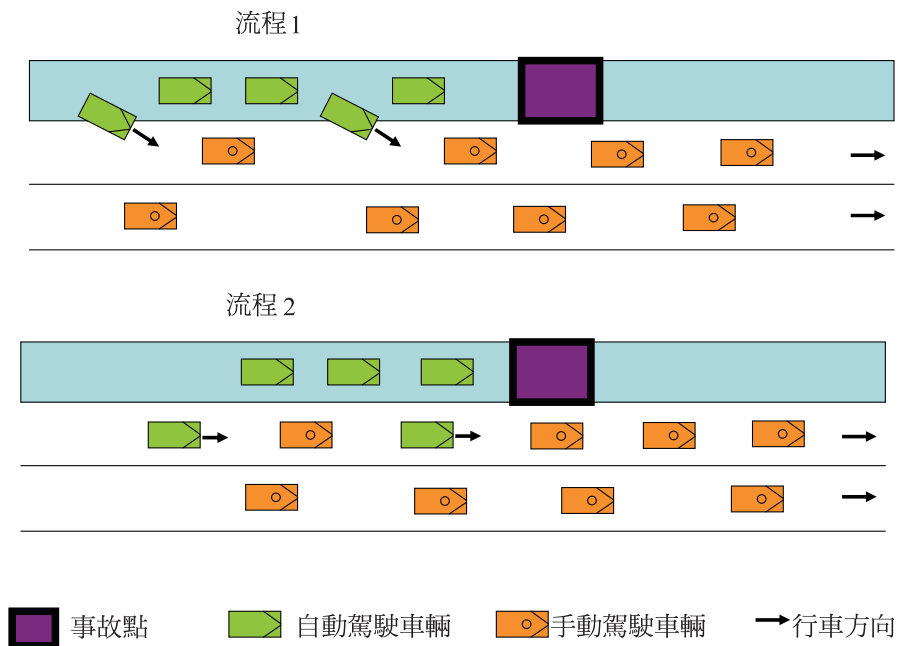


圖 1 事件下專用車道上自動駕駛車輛運行示意圖

其次，在改善目標部分，為了將事件衝擊減至最小，並推廣至全面的混合車流，本研究期望自動駕駛車輛在變換車道之後，在仍為自動控制的情況下，和鄰近車道上之手動駕駛車輛混合行駛。即自動駕駛車輛於混合車流中，能夠在最安全、舒適條件下，自動地加減速，使所有車道上的所有車輛，在事件發生時，能有效率且不至於發生第 2 次事件的情況下通過事件現場。

再者，有關分析方法部分，本研究針對鄰近車道自動和手動駕駛車流的跟車模式進行模擬與驗證，並探討自動駕駛車輛的跟車邏輯，利用程式語言 (C 語言)，模擬各種跟車情境模式，再與車流模擬軟體中之通用汽車 (GM) 跟車指標相比較，以判定自動駕駛車輛跟車穩定性。此部分不同於以往的傳統跟車行為，需要對前方車輛 (不論是自動或是手動駕駛車輛) 的行為做出適當反應。因此考量以下因素：

1. 最適跟車距離：根據最適加速度，駕駛跟車的距離不致過遠或是過近，儘可能以等速的方式跟車前進。
2. 最適跟車加速度：判斷前方車輛種類為自動或非自動，在不同的安全距離、速度下，且顧及乘客舒適度，求出自動駕駛車輛對應前方車輛所需要的最適加速度。
3. 乘客舒適度：控制加速度不可太急，將加速度或是減速度控制在一定範圍，以免影響乘客舒適度，加速度過大或過小也會影響最適跟車距離，在加速度、減速度與乘客舒適度等三者間計算出一個合適的大小。
4. 模擬混合車流情形：本研究考自動駕駛車輛特性及其相關參數後，藉由程式語言，判斷自動駕駛車輛之對應前方車輛應有之加速度，並模擬自動駕駛車輛各種行為。
5. 評估混合車流的績效，調整參數，以敏感度分析的方式評估最適化的跟車加速度。

最後，綜上所述，本研究主要目的：自動公路系統發生事件下，設計出一套跟車邏輯，判斷鄰近車道上自動駕駛車輛針對前方車流之適當反應。該跟車邏輯可以避免加減速影響後方車流的不穩定，並同時考量搭乘者的舒適性。其所歸納出之 4 種控制邏輯成果亦可做為非正常車流自動駕駛車輛控制邏輯之參考依據。

二、文獻回顧

2.1 跟車邏輯

跟車邏輯相關文獻多不勝數，其中與本研究性質相關之跟車邏輯，依據車道上車輛種類 (均為手動駕駛車輛、均為自動駕駛車輛、兩者混合) 與有無事件狀態等兩種分類條件可區分為 6 類：

1. 手動駕駛車輛且無事件狀態^[5-13]：即針對手動駕駛車輛所組成之車流，探討無事件狀態下之跟車行為與其邏輯。此類跟車邏輯亦被稱為跟車理論 (car-following theory)，例如 GM 模式之刺激－反應跟車邏輯^[5,9] 將前後車距離、加減速度、反應時間、敏感度係數、

車頭距係數 (l) 與速度係數 (m) 等視為重要變數或係數；另外尚有基於量子力學觀點並考量心理動量、心理動能、反應時間、前後車相對速度等重要變數，提出來描述駕駛者視野外界刺激與駕駛反應之跟車邏輯^[10-13]；

2. 手動駕駛車輛且有事件狀態^[14]：例如以事件發生前之後車加減速、位置、後車與前車之相對速度、反應時間等重要變數資料所構建之模擬模式，可提前預測事件之跟車邏輯；
3. 自動駕駛車輛且無事件狀態^[15]：例如以加速度、速度、相對速度、車前距離、風阻、道路坡度的重力、車重等重要變數，所構建之加（減）速度與煞車系統判斷等公式之跟車判斷邏輯；
4. 自動駕駛車輛且有事件狀態^[16-18]：例如考量加速度變化、偵測事件時間點、車輛車頭到事件發生點的距離、自動駕駛車隊解散距離、自動駕駛車輛跟車距離、自動駕駛車輛安全煞停距離等變數，採動態比重組合力式，構成自動車跟車加速度模式之跟車邏輯；
5. 自動駕駛車輛與手動駕駛車輛兩者混合（以下簡稱混合車輛）且無事件狀態^[19]：例如考量相對速度、相對距離、車間距、安全距離、反應時間等變數，藉由和前方車輛的相對速度和相對距離，利用決策樹找出判斷情境與判斷公式之跟車邏輯；
6. 混合車輛且有事件狀態^[16-20]：例如考量偵測事件時間點、車輛車頭到事件發生點的距離、車輛轉向角度、車速調整率、潛在變換車道之動態間距、完成變換車道時間、緩衝時間、瞬間速度等重要變數，探討微觀車輛避開事件點之跟車控制邏輯。

以上 6 類之邏輯與重要變數整理如表 1。

2.2 乘客舒適度

構建乘客舒適度指標時，主要根據張季倫^[21]與劉怡焜^[22]等國內文獻，將行車舒適視為因不當駕駛行為導致行車舒適度降低，其主要評估指標分 2 類，分別為前後俯仰指標及車速穩定指標。另參考國外文獻有關急衝度 ($\Delta a(t)/\Delta t$) 之定義^[23-25]、應用^[26-29]與數值大小^[23, 30]等內容，整合說明如下：

1. 前後俯仰指標：(1) 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) 內容：急衝度 ($\Delta a/\Delta t$)；(3) 功能：急衝度過大是造成乘車不舒適的主因，為衡量駕駛者加減速行為之程度，以急衝度 ($\Delta a/\Delta t$ ，加速度對時間微分) 為判定依據，除可偵測駕駛者是否踩油門或煞車外，亦可將該變化量與正常範圍之門檻值比較；(4) 原理：當駕駛者發生急加減速之駕駛行為發生時，車輛會因慣性作用而產生突向前傾或後頓之現象，車內乘客也會隨車體前後搖擺；(5) 參考數值如表 2。
2. 車速穩定指標：(1) 定義：車輛行駛速差過大；(2) 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) 原理：速率坡度指標 (velocity gradient) 係由加速度離異指標 (acceleration noise) 演變而來，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，表示駕駛者的速率越不穩定。

表 1 六類跟車邏輯

特性 跟車邏輯	作者	邏輯或規則	重要變數或係數
1. 手動駕駛車輛且無事件狀態	Chandler 等人 ^[9]	駕駛者的反應是敏感度係數與駕駛者所受刺激的函數。如第 1 代與第 5 代跟車模式。	前後車距離、加減速度、反應時間、敏感度係數、車頭距係數 (l)、速度係數 (m)。
	Pipes ^[6]	以安全距離的觀念來表示後車的車速與間離間的關係。每一位駕駛者與前行車輛維持的空間與已車的速度成比例且加上一段距離。	與前車之安全距離、後車的車速。
	Forbes 等人 ^[7]	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。	後車與前車間的速度、距離、時間間距、反應時間。
	Gazis 等人 ^[8]	以刺激 - 反應方程式 General Motors 模式為基礎，建立駕駛者加減速是車速、相對車速與相對車間距的函數，簡稱 GHR model。	後車加減速度、後車與前車間的相對速度 (relative speed) 與距離 (relative spacing)、反應時間、車頭距係數 (l)、速度係數 (m)。
	Sheu ^[10,12] 以及 Sheu 與 Wu ^[11,13]	基於量子力學觀點的心理動量 (quantum-based psychological momentum) 來描述駕駛者視野之外界刺激與駕駛反應。如駕駛者遇到刺激時直覺地來調整車速，其反應時間的不確定性與相對速度感知的不確定性具有權衡 (trade off) 的關係。	心理動量、心理動能、反應時間、前後車相對速度。
2. 手動駕駛車輛且有事件狀態	許添本、鄭雅文 ^[14]	以事件發生前之後車加減速等資料所構建的模擬模式提前預測事件。	事件發生前之後車加減速、位置、後車與前車之相對速度、反應時間。
3. 自動駕駛車輛且無事件狀態	Ohtsuka 與 Vlacic ^[15]	以加 (減) 速度與煞車系統判斷等公式構建出跟車反應系統。	加速度、速度、相對速度、車前距離、風阻、道路坡度的重力、車重。
4. 自動駕駛車輛且有事件狀態	Sheu ^[16]	考慮前車與前方車隊的瞬間加速度與動態比重構建出自動駕駛車輛跟車加 (減) 速度與煞車模式。	加速度變化、偵測事件時間點、車輛車頭到事件發生點的距離、自動駕駛車隊解散距離、自動駕駛車輛跟車距離、自動駕駛車輛安全煞停距離。
	許智詠 ^[17] 董晉曄 ^[18]	考慮車輛相對速度、車間距、車輛縱向與橫向碰撞，判斷自動駕駛車輛變換車道，以避開事件車道。	車輛相對速度、車間距、車隊初速、鄰近車道車流量、車隊間距。
5. 混合車輛且無事件狀態	Huang 等人 ^[19]	藉由和前方車輛的相對速度和相對距離，利用決策樹找出判斷情境與判斷公式。例如前方車輛距離尚遠，本車維持理想速度即可；前方有車且車間距太短時，需維持安全距離；前方有車且車速較本車快，本車可提高速度。	相對速度、相對距離、車間距、安全距離、反應時間
6. 混合車輛且有事件狀態	Sheu ^[16]	自動駕駛車輛安全變換至手動駕駛車輛車道，且在其自動駕駛車輛之車速調整率公式中，考慮前車與前方車隊的瞬間速度、動態比重、緩衝時間與相對位置等因素。	偵測事件時間點、車輛車頭到事件發生點的距離、車輛轉向角度、車速調整率、潛在變換車道之動態間距、完成變換車道時間、緩衝時間、瞬間速度。
	蔡孟釗 ^[20]	控制邏輯根據數種不同的相對數據，設計出不同跟車模式。例如設計車輛和前車的距離如果大於動態距離設定最大值之數據則加速。	動態距離設定最大值、動態距離設定最小值。

註：混合車輛係指混合行駛於同一車道之自動駕駛車輛與手動駕駛車輛。

表 2 急衝度異常門檻值表

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

2.3 文獻評析與小結

回顧國內外相關文獻後，本研究針對比一般傳統車流難預測的混合車流，例如混合車流車道之所有車輛，皆有可能受到正要從自動控制車道轉換車道之車輛的影響而難以掌握，提出更嚴謹的自動駕駛車輛跟車控制邏輯，除可使整體車流順暢並避手動駕駛之長鞭效應^[31,32]外，亦可避免緊急煞車而使自動駕駛車輛內乘客感到舒適。爰參考 6 類跟車邏輯中多考慮安全距離之規則，探討本研究對象之跟車距離、相對速度、跟車加速度與本土駕駛者反應時間等重要變數，特別是參考判斷公式以及前車與前方車隊的瞬間加速度與動態比重，構建出自動駕駛車輛跟車加（減）速度與煞車模式，再納入乘客舒適感受程度（例如前後俯仰指標：急衝度）於本研究之跟車控制邏輯中，並以 4 個象限模式之模型呈現本研究跟車控制邏輯。

三、自動駕駛車輛跟車邏輯之模型構建

3.1 模型假設

為精簡本研究之模型，有必要建立本研究模型假設條件，包括自動駕駛車輛之功能假設、系統假設與跟車條件等假設，說明如下：

3.1.1 自動駕駛車輛之功能假設

1. 自動駕駛車輛車頭裝設感應器，用以測量對前方車輛速度及兩車相對距離。其感應器連續偵測自動駕駛車輛和前車距離，另配合距離的遠近再決定是否偵測速度。
2. 偵測器有效感應範圍是 200 公尺。
3. 自動駕駛車輛控制變數：包括自動駕駛車輛與前車距離、自動駕駛車輛速度與加速度之控制。
4. 自動駕駛車輛可以藉由動態即時偵測到事件的地點^[16]與距離。

3.1.2 系統假設

1. 假設事件發生在最內側自動駕駛車輛行駛之車道，並未波及鄰近混合車道。

2. 假設事件地點位置可藉由衛星地理系統定位，使得自動駕駛車輛可以確定車輛和事件之距離^[16]。
3. 假設在自動駕駛車輛前 200 公尺直線上車輛，皆可測得前車速度以及前車和本車的距離。
4. 動態隨時偵測距離，另配合距離的遠近決定是否偵測車輛速度。

3.1.3 跟車條件假設

1. 有鑑於跟車並非僅限於跟隨前車，若可以獲悉前方車團（或車隊，或車陣）資料，則可由更前方的車流預先做駕駛行為預測，較單看前車更為精準。爰本模式是以 3 輛車為討論的基準，假設以自動駕駛車輛作為跟車的基準車輛 i_1 ，在其前方第 1 部車為 i_2 ，在其前方第 2 部車為 i_3 ， i_2 與 i_3 可為手動駕駛車輛或自動駕駛車輛，如圖 2 所示。
2. v_1 、 v_2 、 v_3 分別為 i_1 、 i_2 、 i_3 目前的瞬時速度。
3. a_1 、 a_2 、 a_3 分別為 i_1 、 i_2 、 i_3 目前的瞬時加速度。
4. D_{12} 為 i_1 和 i_2 瞬間測得的動態距離， D_{23} 為 i_2 和 i_3 瞬間測得的動態距離。若 i_2 與 i_3 均為手動駕駛車輛者，則存在人為的跟車安全距離 (D_{human})^[33-35]。

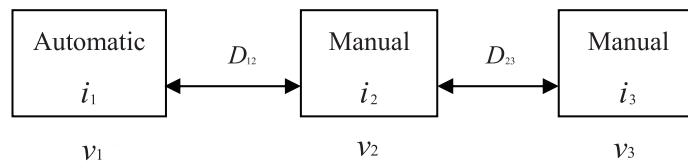


圖 2 自動駕駛車輛跟車示意圖

3.2 構建模型之公式

本研究所建構模型之公式包括自動駕駛車輛跟車最適當距離公式、乘客舒適度限制條件公式及偵測前車團求得末速等公式。

3.2.1 自動駕駛車輛跟車最適當距離公式

有別於過往的跟車文獻，只設定一個跟車最適距離最小值 (critical distance)，即小於其值則減速，本研究為同時顧及整體車流的順暢與自動駕駛車輛乘客舒適，擴充構建動態距離設定最小值 ($D_{12,min}$) 與動態距離設定最大值 ($D_{12,max}$) 等兩個指標。 $D_{12,min}$ 代表自動駕駛車輛跟車最小可接受距離，小於此值，則自動駕駛車輛要在顧及乘客舒適度下減速； $D_{12,max}$ 代表自動駕駛車輛跟車最大可接受距離，大於此距離，自動駕駛車輛就必須開始加速；如果自動駕駛車輛和前車的距離在 $D_{12,min}$ 與 $D_{12,max}$ 之間，則設計使自動駕駛車輛等速度行駛，綜整如表 3。

表 3 距離判定

$D_{12} < D_{12,\min}$	$D_{12,\min} \leq D_{12} \leq D_{12,\max}$	$D_{12} \geq D_{12,\max}$
自動駕駛車輛 i_1 減速	自動駕駛車輛 i_1 等速	自動駕駛車輛 i_1 加速

$D_{12,\min}$ 及 $D_{12,\max}$ 之一般式分別如式 (1) 及式 (2)。

1. 動態距離設定最小值公式

$$D_{12,\min} = m_0 \cdot v_1 + n_0 \cdot \Delta S - l_0 (D_{23})^{\eta_0} \quad (1)$$

2. 動態距離設定最大值公式

$$D_{12,\max} = m_1 \cdot v_1 + n_1 \cdot \Delta S - l_1 (D_{23})^{\eta_1} \quad (2)$$

其中，

v_1 ：自動駕駛車輛的瞬時速度 (m/s)

ΔS ：搭配拋物線變加速度下自動駕駛車輛煞車的位移 (m)

D_{23} ： i_2 、 i_3 的動態距離 (m)

m_0 ：跟車最小可接受距離之緩衝時間 (s)

m_1 ：跟車最大可接受距離之緩衝時間 (s)

n_0 ：跟車最小可接受距離之煞車距離影響參數

n_1 ：跟車最大可接受距離之煞車距離影響參數

l_0 ：跟車最小可接受距離時 D_{23} 影響參數

l_1 ：跟車最大可接受距離時 D_{23} 影響參數

η_0 ：跟車最小可接受距離 i_2 及 i_3 車種影響 D_{23} 之參數

η_1 ：跟車最大可接受距離 i_2 及 i_3 車種影響 D_{23} 之參數

3.2.2 乘客最舒適加速度的限制條件公式

本研究考量乘客的舒適程度，採取變加（減）速度的車輛加速度公式，即加（減）速度是拋物線的情況下，每一秒鐘的最適距離（和拋物線二次積分有關）都會不同，因此有別於傳統最適模型（以緊急煞車的減速度判斷最小或最適距離，即在固定減速度下，末速度已經決定，煞車的時間和距離相對可以求得之作法）。本研究將拋物線的一般式分為加速度（如式 (3)）以及減速度（如式 (4)）公式，如圖 3 所示。

3. 拋物線加速度公式

$$a = -\alpha t^2 + \alpha\beta t + \gamma = -\alpha t(\beta - t) + \gamma \quad (3)$$

4. 拋物線減速度公式

$$a = \alpha t(t - \beta) - \gamma = \alpha t^2 - \alpha\beta t - \gamma \quad (4)$$

其中，

a ：加（減）速度 (m/s^2)

α ：拋物線開口大小

β ：加速度需要執行的時間 (s)

γ ：截距，設定為 2.06

t ：加（減）速度作用時間 (s)

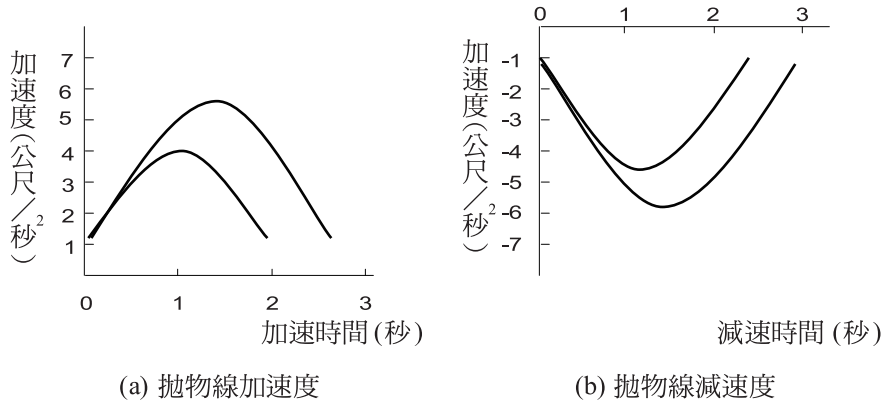


圖 3 拋物線加速度與減速度

依據式 (3) 加速度公式，以積分導出自動駕駛車輛速度如式 (5)；若將式 (5) 之速度公式再對時間積分求得自動駕駛車輛距離公式如式 (6)。

5. 自動駕駛車輛加速時之速度公式

$$v = -\frac{\alpha}{3}t^3 + \frac{\alpha\beta}{2}t^2 + \gamma t + v_0 \quad (5)$$

6. 自動駕駛車輛加速時之距離公式

$$S = -\frac{\alpha}{12}t^4 + \frac{\alpha\beta}{6}t^3 + \frac{\gamma}{2}t^2 + v_0 t + S_0 \quad (6)$$

其中，

v_0 ：自動駕駛車輛之初速 (m/s)

v ：自動駕駛車輛之末速 (m/s)

S_0 ：自動駕駛車輛之初始位置 (m)

S ：自動駕駛車輛之末位置 (m)

t ：加速度需要執行的時間 (s)

同理，將式 (4) 的減速度一般式積分反推，可以求得自動駕駛車輛減速時之速度與距離，分如式 (7) 及式 (8)。

7. 自動駕駛車輛加速時之速度公式

$$v = \frac{\alpha}{3}t^3 - \frac{\alpha\beta}{2}t^2 - \gamma t + v_0 \quad (7)$$

8. 自動駕駛車輛加速時之距離公式

$$S = \frac{\alpha}{12}t^4 - \frac{\alpha\beta}{6}t^3 - \frac{\gamma}{2}t^2 + v_0t + S_0 \quad (8)$$

前述式 (5) 至式 (8)，若已知自動駕駛車輛之初速、末速、初始位置與加 (減) 速度需要執行的時間者，則可求得位移 ($\Delta S = S - S_0$)。

除運用拋物線加速度或減速度外，亦考慮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時，則採用固定減速度 (7 m/s^2)，即緊急煞車來減速，並求出煞車的長度。

3.2.3 偵測前車團求得末速

自動駕駛車輛在通過事故點之前，勢必受此事故點影響，而前車的速度在自動駕駛車輛調整速度的過程中，可能隨時會有變化，造成加速過度或是減速不足的情況。本研究除參考以往的跟車理論以偵測到前車速度為末速之概念外，亦參考 Sheu^[16] 的加速度調整模式，修改該公式，將加速度部分調整為速度，以建立自動駕駛車輛的末速。即自動駕駛車輛速度的變化是將前車的速度和前方車團的速度做權重分配，如式 (9)、式 (10)、式 (11)，如圖 4。其理論基礎與合理性請參見附錄。

9. 自動駕駛車輛的末速度公式

$$v_1 = W_1v_2 + W_2\bar{v}_\sigma \quad (9)$$

10. 前車速度之分配權重公式

$$W_1 = \frac{e^{-|X_2|}}{e^{-|X_1|} + e^{-|X_2|}} \quad (10)$$

11. 前方車團之分配權重公式

$$W_2 = \frac{e^{-|X_1|}}{e^{-|X_1|} + e^{-|X_2|}} \quad (11)$$

其中，

v_1 ：自動駕駛車輛的瞬時速度 (m/s)

v_2 ：前車的瞬時速度 (m/s)

$\bar{v}_\sigma$ ：事故範圍之前，偵測器可偵測範圍內的所有車輛平均車速 (m/s)

X_1 ：自動駕駛車輛 (ADV) 車頭到事故發生點的距離 (m)

X_2 ：前車種車輛車頭到事故發生點的距離 (m)

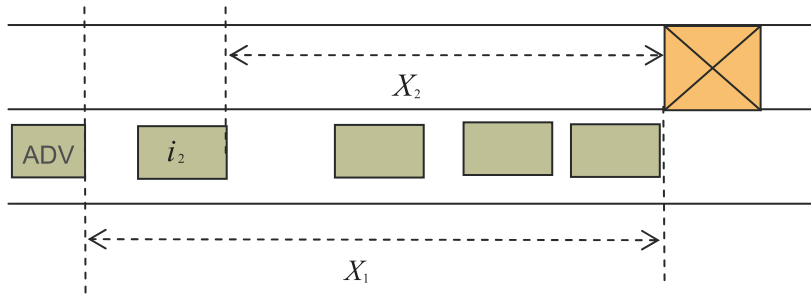


圖 4 相對距離示意圖

3.3 模型應用架構

以下進一步說明應用模型時之計算自動駕駛車輛加減速度、自動駕駛車輛最適跟車距離控制邏輯與判斷流程架構。

3.3.1 自動駕駛車輛加減速度的大小

自動駕駛車輛行駛時，期待控制在等速行駛，例如設定等速的範圍在 $D_{12,\min}$ 和 $D_{12,\max}$ 之間，而其它情況則加速或是減速，並且非經常加速或減速。因此，需要加減速有 3 個情況：(1) 當自動駕駛車輛和前車距離小於 $D_{12,\min}$ 時減速；(2) 當自動駕駛車輛和前車距離大於 $D_{12,\max}$ 時加速；(3) 被超車，各情況之處理步驟與相關公式，分別說明如表 4。

3.3.2 自動駕駛車輛最適跟車距離控制邏輯

除被超車情況需要利用兩車距離外，其餘兩個情況則需要確認以拋物線加（減）速時有足夠移動距離，以避免兩車過近。爰有必要針對自動駕駛車輛之 $D_{12,\min}$ 及 $D_{12,\max}$ ，建

立跟車距離控制邏輯。爰本研究以圖 2 所示之 3 輛車為基準，偵測出各車輛速度與相對距離，判斷不同的情境下，自動駕駛車輛適用的 $D_{12,\min}$ 及 $D_{12,\max}$ ，並假設 4 種情境，分別以 4 個象限 (I~IV) 說明，如 (圖 5)。

表 4 3 種情況之加減速

情況	步驟	利用公式
1. $D_{12} < D_{12,\min}$	1.求得自動駕駛車輛 i_1 的末速	式 (9) : $v_1 = W_1 v_2 + W_2 \bar{v}_\sigma$
	2.求出減速度作用時間 t	式 (7) : $v_1 = \frac{\alpha}{3} t^3 - \frac{\alpha\beta}{2} t^2 - \gamma t + v_0$
	3.求出減速度 a	式 (4) : $a = \alpha t^2 - \alpha\beta t - \gamma$
2. $D_{12} > D_{12,\max}$	1.求得自動駕駛車輛 i_1 的末速	式 (9) : $v_1 = W_1 v_2 + W_2 \bar{v}_\sigma$
	2.求出減速度作用時間 t	式 (5) : $v_1 = -\frac{\alpha}{3} t^3 + \frac{\alpha\beta}{2} t^2 + \gamma t + v_0$
	3.求出加速度 a	式 (3) : $a = \alpha t^2 - \alpha\beta t - \gamma$
3.被超車	1.求得自動駕駛車輛 i_1 的末速。	以偵測器偵測超車至前方的車輛車速為自動駕駛車輛 i_1 的末速。
	2.求出減速度 a	加速度公式 $v_1^2 = v_0^2 + 2aS$ (初速、末速、自動駕駛車輛與前車距離為已知)

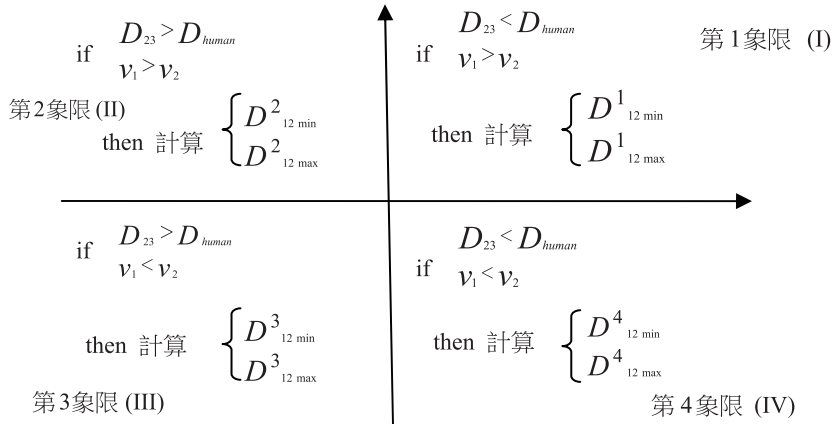


圖 5 4 種情境之 4 個象限圖

圖 5 內容包括兩個判斷準則：

1. 若前車(i_2) 和前前車 (i_3) 間保持人為的跟車安全距離 (D_{human})，則自動駕駛車輛在跟車的距離可以較接近前車，此情況落在圖形的第 2、3 象限。如果落在第 1、4 象限，則跟車距離必須拉長。

2. 判斷兩車的相對速度，當前車 (i_2) 快過本車 (i_1)，則可安心的保持現有距離或是加速；相反的，如果本車 (i_1) 速度大過於前車，則距離就要有所顧忌。

本研究分別以 4 個象限討論並整理如表 5。以第 1 象限為例，說明如下：

表 5 4 個象限 $D_{12,\min}^j$ 以及 $D_{12,\max}^j$, $j=1,2,3,4$ 之計算

象限	$D_{12,\min}^j, j=1,2,3,4$ 公式	$D_{12,\max}^j, j=1,2,3,4$ 公式
I	$D_{12,\min}^1 = m_0 v_1 + n_0 \cdot \Delta S + \left \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \times 7} \right - l_0 (D_{23})^{\eta_0} + \varepsilon$ (10)	$D_{12,\max}^1 = m_1 v_1 + n_0 \cdot \Delta S + \frac{v_2^2}{2 \times 4} + \varepsilon$ (11)
II	$D_{12,\min}^2 = m_0 v_1 + \left \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \times 7} \right - l_0 (D_{23})^{\eta_0} + \varepsilon$ (12)	$D_{12,\max}^2 = m_1 v_1 + n_1 \cdot \Delta S + \varepsilon$ (13)
III	$D_{12,\min}^3 = m_0 v_1 - l_0 (D_{23})^{\eta_0} + \varepsilon$ (14)	$D_{12,\max}^3 = m_1 v_1 + n_1 \cdot \Delta S - l_1 (D_{23})^{\eta_1} + \varepsilon$ (15)
IV	$D_{12,\min}^4 = m_0 v_1 + \Delta S - l_0 (D_{23})^{\eta_0} + \varepsilon$ (16)	$D_{12,\max}^4 = m_1 v_1 + n_1 \cdot \Delta S + \left \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \times 7} \right - l_1 (D_{23})^{\eta_1} + \varepsilon$ (17)

註：1. $l_0 (D_{23})^{\eta_0}$ ：前方車輛距離對跟車的影響，若手動駕駛時 $l_0 = 0.002$ ， $\eta_0 = 1$ 。

2. $l_1 (D_{23})^{\eta_1}$ ：前方車輛距離對跟車的影響，若自動駕駛時 $l_1 = 0.001$ ， $\eta_1 = 0.9$ 。

3. 若前車速度較快，則不放入 ΔS 變數，如第 2 與第 3 象限之 $D_{12,\min}$ 。

$$D_{12,\min}^1 = m_0 v_1 + n_0 \cdot \Delta S + \left| \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \times 7} \right| - l_0 (D_{23})^{\eta_0} + \varepsilon \quad (12)$$

$$D_{12,\max}^1 = m_1 v_1 + n_0 \cdot \Delta S + \frac{v_2^2}{2 \times 4} + \varepsilon \quad (13)$$

其中，

$m_0 v_1$ ：自動駕駛車輛在判斷時間 (m_0 秒)，以 v_1 的速度會行走的距離

ΔS ：依照拋物線加速度積分兩次之後所得到的位移；

$l_0 (D_{23})^{\eta_0}$ ：前方車輛距離對跟車的影響；

$\left| \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \times 7} \right|$ ：以 7 m/s^2 的減速度，減速到和前方車輛相同時，會行走的距離 (m)

$m_1 v_1$ ：自動駕駛車輛在判斷時間 (m_1 秒)，以 v_1 的速度會行走的距離 (m)

$\left| \frac{v_2^2}{2 \times 4} \right|$ ：前車以減速度 4 m/s^2 ，減速到靜止，所行走的距離 (m)

ε ：誤差項。

表 5 中以第 1 象限情況較危險，即前車可能煞車且自動駕駛車輛速度比前車快時，所需要最小安全距離較其他狀況大，故其考慮情況亦較複雜。在第 3 象限情況，前方車輛最不可能減速，需要的最小距離也最短。第 2 象限的情況雖然自動駕駛車輛速度大於前車，但判斷前車不會立即減速，所以 $D_{12,\min}^2$ 比第 4 象限的 $D_{12,\min}^4$ 小，可用較小的距離跟車。自動駕駛車輛判斷流程架構如圖 6。

四、模型確認

在安全舒適地跟車之前提下，為確保 4 個象限模式之模型合用性以及模式間轉換之可行性，本研究使用 Turbo C 程式語言，模擬並判斷 4 個象限在各種情況下之最適當距離，以及使用拋物線加 (減) 速度下，進行模型可行性之確認 (verification)。經由程式檢測假設之情境後，確認結果可行。

4.1 程式撰寫重點

程式撰寫重點在於藉由自動駕駛車輛前之手動駕駛車輛隨機變動速度，或是藉由給定的加速度，使自動駕駛車輛能夠經由程式，判斷跟車所要使用的模式，以及用給定的拋物線加 (減) 速度跟車，並動態地表現車輛之運行。重點說明如下：

1. 計算自動駕駛車輛的末速後，再決定加 (減) 速度 a ，並求出執行拋物線加速度或是拋物線減速度的時間，也就是模式加 (減) 速度係數 β 。求出 β 後就可以間接求出 α 。
2. 模式選擇部分，經由前方車輛的資訊，判斷距離、相對車速，選擇 4 個象限模式之一個模式，確定模式後，計算此模式 $D_{12,\min}$ 或 $D_{12,\max}$ 。
3. 再判斷自動駕駛車輛和前車距離，若大於 $D_{12,\max}$ 或是小於 $D_{12,\min}$ ，則使用拋物線加速度方式加速或減速；若介於 $D_{12,\max}$ 與 $D_{12,\min}$ 之間，則選擇等速度前進。
4. 記錄並分析每一秒鐘執行的兩車速度、兩車距離、位移、 $D_{12,\min}$ 或是 $D_{12,\max}$ 。

4.2 情境模擬與分析

分別針對 4 個象限設定一般個別情境與特殊情境模擬，以判斷每個象限的 $D_{12,\min}$ 或是 $D_{12,\max}$ 合理性，並使後車可以超越或是鄰近車道車輛超車。若距離過小，前車緊急煞車，可保有足夠 $D_{12,\min}$ 而不發生撞車。將初始值設定為各象限所假定發生的情況，各情境的模擬過程及數據分析說明如表 6。

列別	第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列	第 5 列	第 6 列	第 7 列	第 8 列
功能	判斷	判斷	判斷	計算	選擇	計算	判斷	行動
準則	$D_{23} \geq D_h$	$V_2 \geq V_3$	$V_1 \geq V_2$	$D_{12, \max}$, $D_{12, \min}$ (I, II, III, IV)	case1: $D_{12} > D_{\max}$ case2: $D_{\min} < D_{12} < D_{\max}$ case3: $D_{12} < D_{\min}$	$V_{\text{未}}$	$V_1 \geq V_{\text{未}}$	$a=0$ $a<0$ $a>0$

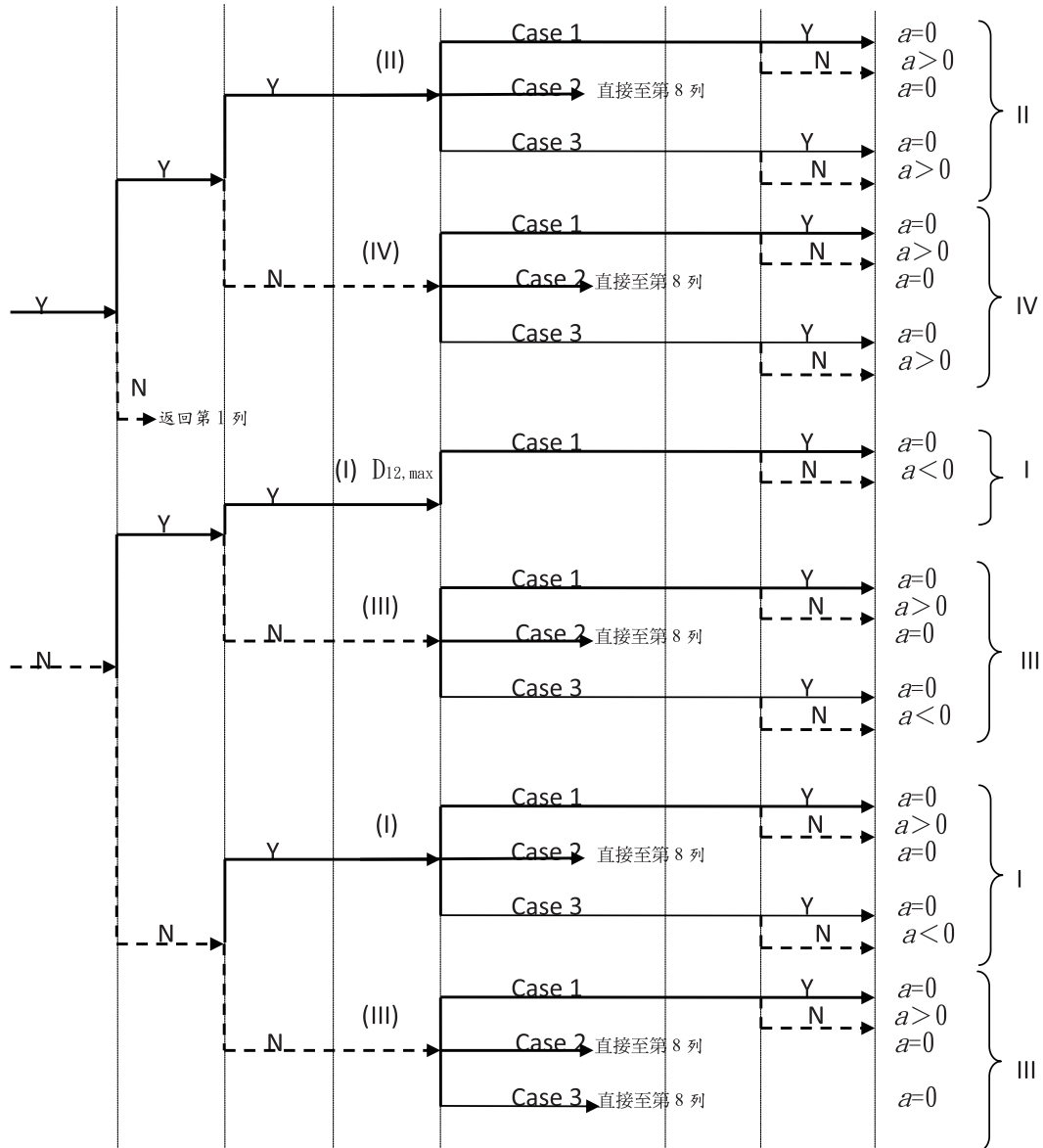


圖 6 自動駕駛車輛判斷流程架構

表 6 各種情境的模擬過程及數據分析

象限 \ 情境	模擬情境	起始位置 (m)	起始速度 (m/s)	結果
I ($D_{23} < D_{human}$ 且 $v_1 > v_2$)	將前車 i_2 的車速逐漸的等減速	$i_1=10$ 、 $i_2=100$ $i_3=125$	$v_1=20$ $v_2=18$ $v_3=18$	從第4秒開始使用拋物線減速度開始減速， β 為 $\sqrt{3 \times (20 - 16)} = 3.4$ 秒，4至6秒由於距離仍然在危險值 $D_{12,min}$ 內，所以仍在減速直到第7秒為止。
II ($D_{23} > D_{human}$ ， $v_1 > v_2$)	i_2 車速在 18 至 20 (m/s) 變動， D_{23} 值較其他情境大	$i_1=10$ 、 $i_2=30$ $i_3=95$	$v_1=20$ $v_2=18$ $v_3=18$	在第 1、4、7、13、15、17、19、20、22 秒啟動第 2 象限公式減速，兩車間的間距也都維持的很固定，約在 24~30 公尺之間。
III ($D_{23} > D_{human}$ ， $v_1 < v_2$)	i_2 車速增加且不減速	$i_1=10$ 、 $i_2=30$ $i_3=95$	$v_1=19$ $v_2=18$ $v_3=18$	由於 $D_{12,min}^3$ 相當的小，所以 d 幾乎都是大於 $D_{12,min}^3$ 又介於 $D_{12,max}^3$ 之間，所以車輛都是等速在前進，在第 7 秒速度減慢，隨後又因為 $v_2 > v_1$ 啟動第 3 象限公式。
IV ($D_{23} < D_{human}$ ， $v_1 < v_2$)	i_2 車速逐漸減速且不加速。當小於 $D_{12,min}$ 即使用拋物線減速度減速。	$i_1=10$ 、 $i_2=40$ $i_3=75$	$v_1=18$ $v_2=19$ $v_3=18$	多數時間可啟動第 4 象限公式。

其次，為進一步了解 4 個象限模式的適用性，設定幾個特殊的情境，模擬幾個前車可能產生的行為，檢測自動駕駛車輛邏輯具有可判斷所需要煞車時間、或最短煞車距離、或加速的最佳時間，或最佳距離…等等，如表 7。

五、模型驗證

為驗證 (validation) 本模擬程式所模擬之手動駕駛車輛車流特性符合一般的車流模擬軟體之車流特性，本研究提出跟車檢測標準，並利用車流模擬軟體調整自動駕駛車輛控制邏輯後，再據以檢定模擬自動駕駛車輛在可接受誤差範圍內。其次，參考本土駕駛者在不同車速與相對距離下反應時間之部分調查資料並微調本模擬程式之反應時間，以增加其模擬本土車流之可能性。最後，利用本研究微調後之手動駕駛車輛模擬程式，設定不同之首車加(減)速，搭配混合車道上不同的自動駕駛車輛比率，計算平均車間距，並比較穩定和不穩定車流平均車間距與跟車檢測標準，加強驗證自動駕駛車輛控制邏輯模式。

5.1 跟車檢測標準

本研究整理 4 個車流的指標 (如表 8) 作為判斷跟車模式適用性之依據，以及研判自

動駕駛車輛的多寡對車流狀態產生的衝擊。例如選用 GM 發展跟車模式時^[36]，訂立一個跟車穩定性指標 ($C=\alpha(\Delta t)$ ，反應時間乘上敏感度)，以避免後車面對前車減速時，使得更後面的車輛都要煞車。可接受的跟車模型至少應符合之跟車檢測標準如表 8。

表 7 特殊情境之模擬及其檢測結果

特性	緊急煞車		模式轉換	
	固定前車速度，變動兩車距離	固定兩車距離，變動速度	模式 1 轉變至模式 3	模式 4 轉變至模式 3
固定變數及運行條件	前車手動駕駛時速 60kph，以減速度 6m/s^2 煞車至停止	$D_{12}=60\text{m}$ ，前車以減速度 6m/s^2 煞車至停止	自動駕駛車輛車速維持 70kph，前方手動駕駛車輛速度為 60kph，前前車突然減速	前車和前前車的車距 (distance gap) 縮短
調控變數	$D_{12}=50、60、70、80、90\text{m}$	$v_1=50、60、70、80、90\text{kph}$	$D_{12}=50、55、60、70、71、73、75\text{m}$	$D_{12}=50、60、70、80、90\text{m}$
模擬結果與說明	需要維持 80 公尺的安全距離才能避免相撞，若用拋物線減速度減速需要 7 秒鐘的時間，若相距 90 公尺則需要 9 秒鐘的時間減速至停止。	速度在 50、60kph 時，其煞停時間分別為 9 與 5 秒。若在 70kph 以上時，會因減速的時間不足而碰撞。	$D_{12}=50$ 至 70m 時，減速需要 2~3 秒，其原因在於兩車間距在模式一中，小於跟車的最小值，所以立即採取減速。 若 $D_{12}=70$ 至 75m 時，則減速時間明顯增長至 3~8 秒，其原因在於轉變到模式 1 後，因距離夠長，並沒有立即減速，而是等速前進，導致自動駕駛車輛追進後，才開始減速。	減速需要 2~3 秒，由於模式 3 和模式 4 的判斷距離公式，都是在前車的速度快於後方的自動駕駛車輛的情況下發生的，所以兩個模式對於前車的減速，皆可以在相當短的時間內完成，即使是兩車距離變大，隨著模式改變，反應的時間並沒有太大的差別。

5.2 設定相同模擬初始狀態並檢定模擬手動駕駛車輛之車流特性

為使本模擬程式具有模擬手動駕駛車輛以及自動駕駛車輛之應用性，除需要判斷自動駕駛車輛跟車之適用性外，亦有必要檢定本模擬程式所模擬之手動駕駛車輛是否合於一般之人為判斷。爰設定初始流量及密度，比較本模擬程式與微觀車流模擬軟體 PARAMICS 之手動駕駛車輛車流做驗證，檢定本模擬程式邏輯符合 PARAMICS 釋放車輛後的車流行為。

5.2.1 初始流量及密度設定

本研究假設初始流量設定為 30 (veh/s)，速度只有一個，即為 15 (m/s)，倘若流量降低，

表 8 4 個研判自動駕駛車輛的多寡對車流狀態產生的衝擊之車流指標

項次	指標	準則	說明
1	兩 車 的 車 距 (distance gap)	大於零	後車不能撞上前車。
2	$C=\alpha * (\Delta t)$ α : 敏 感 性 (sensitivity) , 單 位: sec-1 Δt : 反應時間	兩部車跟車 $0 < C < 1/e=0.367$	時車流不會產生震盪, 屬於穩定車流
		兩部車跟車 $1/e < C < \pi/2=0.707$	車輛雖然會產生震盪, 但會漸漸調整至收斂而穩定
		兩部車跟車 $C > \pi/2=0.707$	Increased oscillatory
		多車輛行駛時 $C < 0.5$	於穩定車流, 但是一旦 C 值介於 $1/e \sim 0.5$, 則車流會產生震盪, 不過仍然能夠收斂至穩定
		多車輛行駛時 $C > 0.5$	雖然不穩定, 但是若 C 值能夠介於 $0.5 \sim \pi/2$ 之間, 則車流雖會震盪但仍收斂, 一旦 C 值超過 $\pi/2$, 就會導致撞車。
3	衝擊波的波速、 波形	比較衝擊波的波速、波 形	比較自動駕駛車輛對應前車速度突然減慢, 而產生煞車行為造成的衝擊波, 和原本全部車輛皆為手動駕駛, 兩者所產生的衝擊波的波速、波形。
4	車隊平均長度	比較手動駕駛跟車的距 離 (spacing or distance gap) 與 不同比率之自動駕駛車 輛 平 均 跟 車 距 離 (spacing)	在給定相同的流量、速度下, 當第 1 部車到達一定點時, 連續觀測其後面的車輛, 例如共 10 輛車, 計算在此時間點行駛在單一車道上的總長度, 將 10 輛車的長度除以 10, 再扣除車長後即為跟車的平均距離。

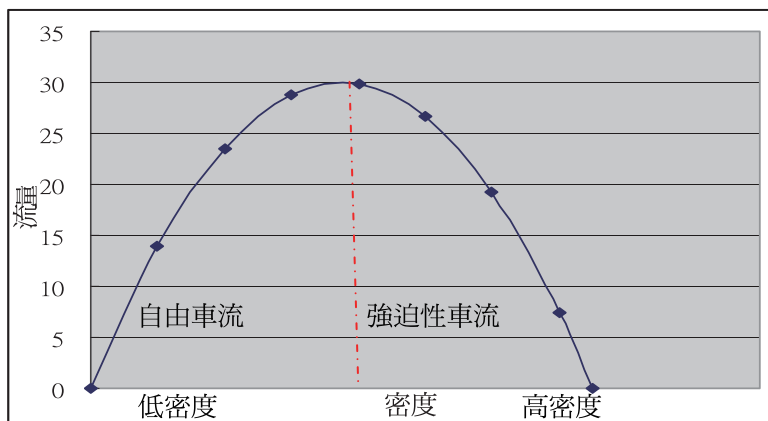
資料來源：蔡孟釗^[20] 及本研究整理。

圖 7 Greenshield 模式下流量對密度示意圖

依據 Greenshields 模型流量對速度以及密度的函數，流量對速度的公式為 $v = 15 \pm \sqrt{225 - 7.5 * q}$ 。若速度大於 15 (m/s) 時則為低密度；自由狀態車流下，小於 15 (m/s) 則為壅塞狀態車流 (如圖 7)。爰本模擬程式可輸入初始流量與速度，判別是否相撞，是否產生衝擊波，以及通過事件點的時間。

5.2.2 利用車流模擬軟體調整手動駕駛車輛控制邏輯

為求得精準的車流模式，本小節以本模擬程式所撰寫的手動駕駛車輛控制邏輯和微觀車流模擬軟體 PARAMICS 做比較，並採用 3 種方法來判別，結果整理如表 9。其結果顯示本模擬程式所設計人為跟車之車流分布與車流模擬軟體的車流分布是相當的。

再者，有鑑於一般的車流模擬軟體之反應時間係採用國外駕駛者之參數，本研究參考本土駕駛者在不同車速與相對距離下反應時間之部分調查資料^[13]並微調本模擬程式之反應時間，再進行第 3 種方法檢定每分鐘流量，其車流量尚符合理論之分配，可以提高其模擬本土車流之可能性。

表 9 判別本模擬程式手動駕駛車輛控制邏輯和微觀車流模擬軟體之方法

方法	1.定點觀測車輛通過時間之平均值	2.定時之車輛通過時間之平均值	3.每分鐘流量檢定
判別	比較本模式與 PARAMICS 之上述值	比較本模式與 PARAMICS 之上述值	利用 K-S 檢定本模式與 PARAMICS 每分鐘流量
結果	比較本模式第 1 輛車通過的時間約為第 26 秒，第 16 輛車通過的時間約為第 65 秒，即平均車間距 (time headway) 為 2.44 秒；PARAMICS 偵測數據第 1 車至第 16 輛車的時間間隔為 2.34 秒，兩者相差 0.1 秒。	由於首車車速皆固定為 60kph，選定時間點為第 64 秒，第 1 輛車正好行駛 1 公里，第 19 輛車則為 169 公尺，兩者相減除以車輛數 19，為 43.74，；平均每車的距離 (spacing) 為 43.74 公尺；利用 PARAMICS 兩車 headway 資料，乘上 gap，即為粗略的兩車間距 (因為加速度幾乎皆為 0，可視為等速計算)，計算兩輛車的平均間距，為 43.22 公尺，兩者相差只有 52 公分。	利用 K-S 檢定，觀測值使用本模擬程式之模擬車輛，檢定車流量符合理論之分配。

資料來源：蔡孟釗^[20]及本研究整理。

5.3 自動駕駛車輛控制邏輯模式驗證

此小節係利用表 8 中所提到的指標，先判斷自動駕駛車輛在各種車流狀態，使用模式是否皆可合宜的轉換，順暢的跟車，不會造成後方車輛的壅塞。爰設計 3 種不同之首車加 (減) 速之實驗，利用表 8 所述的 4 個指標，驗證本研究模擬程式加減速對後車的影響，以及混合車道整體車流順暢性。

5.3.1 調整首車加 (減) 速大小

本研究設定固定流量為 1,800 (vehicles/hr)，初速為 15 (m/s)，車流分配如同表 10 之設定。例如，設計讓首輛車在第 23 秒時用不同的減速值，分別實行不同的秒數後，在第 31 秒再將速度加回來，實行加速的秒數與實行減速的秒數相等。

表 10 3 種實驗設計之加 (減) 速度與模擬自動駕駛車輛合理性及穩定性

特性		首車加 (減) 速度:單位 (m/s ²)		
		實驗設計 1	實驗設計 2	實驗設計 3
秒	23	-2	-3	-4
	24	-2	-3	-4
	25	-2	-3	-4
	26	-2	0	0
數	31	2	3	4
	32	2	3	4
	33	2	0	0
	34	2	0	0
Max 敏感度 (α)		1.54	1.63	2.25
C-value 值		0.462	0.486	0.675
跟車穩定性		可接受的震盪	可接受的震盪	不穩定狀態，後車雖震盪加劇，但仍是在可接受的範圍
衝擊波的產生		斜率的絕對值最小	斜率的絕對值次之	斜率絕對值最大

利用表 8 指標 (如 C-value 值、衝擊波的產生) 說明檢測混合車流跟車邏輯模擬的合理性以及穩定性，其驗證結果顯示混合車流是安全的。

1. C-value 值：由表 8 可知，若 C 值大於 0.5，則後方車流可能會不穩定而導致撞車。由於自動駕駛車輛的反應時間皆相同，假設 Δt 為 0.3 秒，再乘上 α 時可得 C 值。以首車之後的第 1 輛自動駕駛車輛的 α 值，判斷其值是否會造成後方車流的不穩定，在減速度為 2 (m/s²) 時，取最大的 α 值，值為 1.54。分別將不同的加速度之 α 值乘上 0.3，其 C 值分別計算如表 10。將表 10 的結果對照表 8，可知當加 (減) 速度為 3 以及 2 (m/s²) 時，落在表 8 的 A1 以及 L2 象限，屬於會引起後方車流震盪，而非完全穩定的 L1 區，但由於值小於 0.5，也就是 A1 區，對於判斷整體穩定的 Asymptotic stability 是屬於可接受的震盪；而加速度為 4 (m/s²) 時，雖然以整條車道的觀點來說，是屬於不穩定狀態，但以 Local stability 而言，由於沒有跨越到 L3 區，因此不會發散乃至於撞車，所以後車雖震盪加劇，但仍是在可接受的範圍。
2. 衝擊波的產生：圖 8 是減速度為 2 (m/s²) 的情況下，衝擊波看來為不規則的曲線，為了

方便分析，取概略性的紅色直線線條表示，比較減速度從 $2 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 至 $4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 的線條，可以發現其波速由小而大， $2 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 最小，斜率的絕對值最小，減速度為 $4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 的斜率絕對值最大，如圖 9 所示。

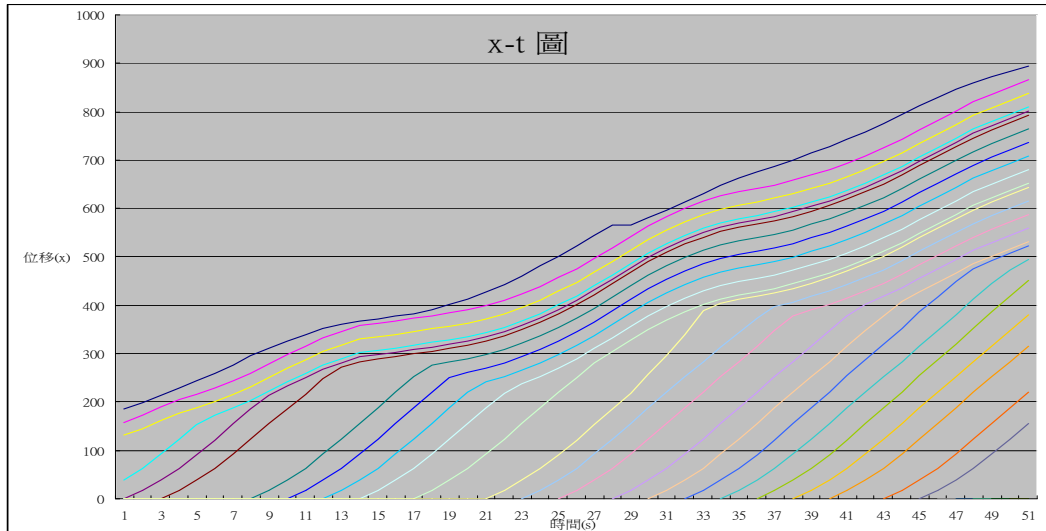


圖 8 時間對距離圖 ($a=-2$)

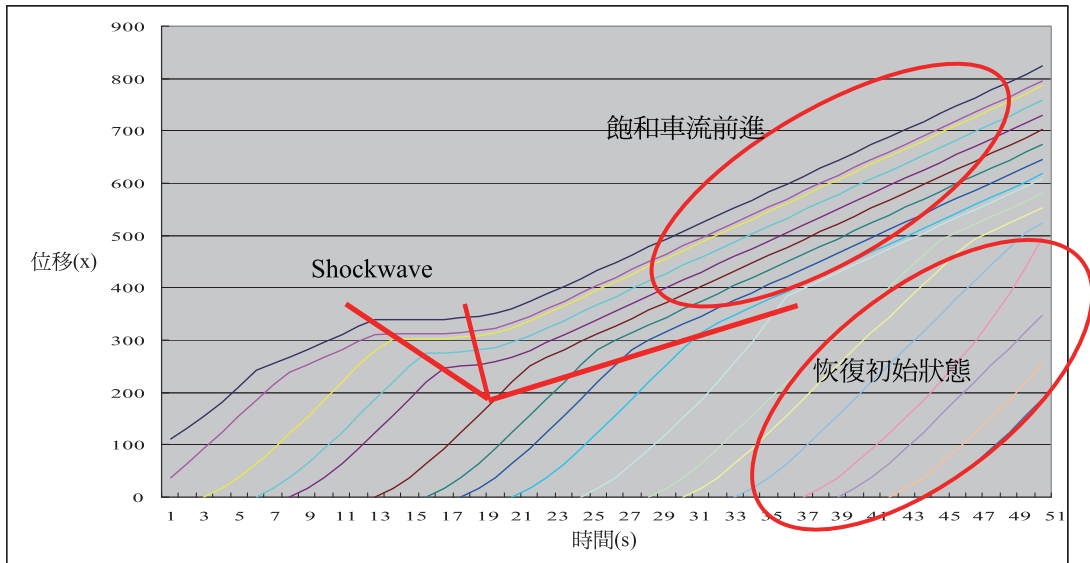


圖 9 時間對距離圖 ($a=-4$)

5.3.2 平均車間距計算

為求得在混合車道上不同比例下的自動駕駛車輛所產生的平均車距 (如表 8 之第 4 項, 即車隊平均長度) 及通過時間, 檢視其是否比車輛全為手動駕駛時更有效率, 本研究沿用 5.3.1 小節的實驗設計, 執行 5 分鐘, 先以穩定車流的方式前進, 再調整自動駕駛車輛在車道上的比例, 選出自動駕駛車輛跟車最為有效率的比例。其次, 再以加速度以 $-4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 先減速後再以 $4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 加速的情況, 模擬事件下減速時, 對後方車輛跟車的行為差異, 再調整自動駕駛車輛在車道上的比例, 求得兩車跟車間距 (spacing) 等資料。

實驗設計如表 11, 分別求出車流穩定狀態以及不穩定狀態的車間距 (spacing), 並且依照自動駕駛車輛占總車輛數的比例從 0% 逐漸增加到 100%, 實驗結果說明如下, 並綜整如表 11。

1. 由實驗 4 可知, 穩定車流下, 自動駕駛車輛比例越高, 車間距能夠保持的距離就越小, 因為在自動駕駛車輛與自動駕駛車輛的跟車邏輯之下, 前方自動駕駛車輛會傳回加減速訊息給後方自動駕駛車輛, 兩車幾乎為同步。因此若連續幾部車輛皆為自動駕駛車輛, 則車距便可以保持的相當短。
2. 由實驗 5 可知, 在自動駕駛車輛占 0% 下, 隨著流量減少以及車道密度的增加, 車間距有降低的狀況, 這樣結果的確符合現實情況。在表 11 中, 40% 和 20% 相比, 平均車間距並沒有顯著的縮小, 當自動駕駛車輛到達占比 60% 以上時, 車間距逐漸縮短。若與實驗 4 的 60% 以上相比較, 則似乎無太大差別, 原因在於自動駕駛車輛不論是在穩定車流或是不穩定車流下, 自動駕駛車輛只要在道路限速的範圍內, 皆會往前追進, 並以車隊的方式前進。因此自動駕駛車輛在穩定車流下, 就算車速再快, 也和不穩定時 (速度會較慢) 的車距相同。
3. 由實驗 6 可知, 將初始流量調成 20 (veh/min), 控制初速, 使得車流密度提高, 僅僅在第 30 秒加速 2 秒鐘, 34 秒後再減速兩秒鐘。在自動駕駛車輛占 0% 下, 相當符合一般車流正常情況下之收斂車流。然而, 若增加至 20% 或是 40%, 則勉強收斂, 且後車振幅相當大, 亦出現車間距相等的情況, 代表此輛車輛為自動駕駛車輛, 其前車也為自動駕駛車輛, 故其資訊回傳, 讓兩車間距可以維持較小且串聯, 比例越高, 跟車也越趨近於穩定。

綜合而言, 除了車流不穩定外, 在設計自動駕駛車輛邏輯時, 若加減速偏向以使用者舒適為標準時, 舒適度與加減速則成反比。另外, 解釋自動駕駛車輛為 20% 以及 40% 情況下, 跟車間距仍然劇烈搖擺, 其原因係一般手動駕駛車輛, 在跟前方的自動駕駛車輛時, 由於前方自動駕駛車輛會提前減速以因應減速對人為的感受, 更何況在減速度相當大的情況, 必須更早就減速, 因此造成後方的車輛無法依常理判斷適當的跟車距離或是加減速大小, 才會造成實而加速過多或是時而減速過少的情況。因此, 驗證前面實驗所求出的平均車距為何在自動駕駛車輛和手動駕駛車輛數量相當時, 或是少於手動駕駛車輛, 無法使車道達到更有效率。再者, 自動駕駛車輛占 80% 時, 相較 40%, 其效率改善許多, 其原因可

能是大部分車輛為自動，後方跟車駕駛者有鑒於前方自動駕駛車輛可能很穩定的行駛，對於駕駛者而言，可以依照更前方的自動駕駛車輛做加減速跟車的判斷。

表 11 實驗設計

			實驗 4	實驗 5	實驗 6
流量 (#/1min)			30	25	20
車道密度			小	中	大
初始加速度			$a=0$	$a=4$ 相隔每分鐘執行	$a=4$ 第 30 秒加速 2 秒後， 第 34 秒開始減速 2 秒
車流穩定性			穩定	不穩定	不穩定
平均 間距 (m)	自 動 駕 駛 車 輛 比 率	0%	22.7	19.1	23.4
		20%	19.8	17.0	19.6
		40%	13.8	16.1	20.8
		60%	12.1	13.5	14.4
		80%	8.5	9.7	13.4
		100%	4.0 (註 1)	4.6 (註 1)	7.5 (註 2)
穩定和不穩定車流平均 車間距之比較			在穩定車流下，自動 駕駛車輛比例越高， 車間距能夠保持的距 離就越小	40%和 20%相比，平均 車間距並沒有顯著的 縮小，當自動駕駛車 輛到達占總產生車輛 的 60%以上時，車間 距逐漸縮短	自動駕駛車輛為 20% 以及 40%情況下，跟 車間距仍然劇烈搖擺

註 1：每輛車第 3 分鐘對前車的相對距離，計算出平均每輛車的跟車距離 (m)。

註 2：擷取第 40 秒所有車輛的間距 (spacing)，算出車輛平均間距。

5.3.3 穩定和不穩定車流平均車間距之比較

經過 5.3.2 小節的實驗，發現自動駕駛車輛在低比例下對於後方車輛產生的震盪，相對於高比例自動駕駛車輛下或是完全手動駕駛下，車間距的震盪要來得大。本研究為進一步求得穩定和不穩定下車間距的差別，以 5.3.2 節的實驗 4 和實驗 5 分別做為穩定車流與不穩定車流狀態的代表。再以簡單迴歸分析（在一個時間點下，利用改變自動駕駛車輛的比例，找出不同比例對應相對距離的線性迴歸）與立體圖形分析（觀察不同時間點之下，不穩定車流下，不同比例的自動駕駛車輛對後方跟車間距的震盪大小）加以比較。迴歸分析結果顯示，穩定車流的斜率絕對值比較大，隨著比例增加，車間距降的比較大；立體圖形分析結果顯示，當自動駕駛車輛比例調整到 63%時，後方車輛的跟車間距，逐漸穩定且平均跟車距離比 0%的情況降低許多。說明如下：

1. 迴歸分析

在穩定車流實驗 4 中，自動駕駛車輛占比從 0% 開始調整至 100%，每一個間距為 5%，分別求出在實驗的第 3 分鐘下的平均車間距，利用簡單迴歸分析模型 $y = \lambda_0 + \lambda_1 x + \varepsilon$ ，求出 $\lambda_0 = 22.8$ ， $\lambda_1 = -0.185$ ，其直線方程式為 $y = 22.8 - 0.185x + \varepsilon$ 。在 λ_0 以及 λ_1 皆為顯著的情況下，樣本的 R^2 值為 97.77%。如圖 10 顯示比例的不同對跟車間距是主要變因。

同理，求得得不穩定車流實驗 5 適合的線性模型， $\lambda_0 = 21.06$ ， $\lambda_1 = -0.154$ ，其直線方程式為 $y = 21.06 - 0.154x + \varepsilon$ 。 λ_0 及 λ_1 皆顯著情況下，樣本的 R^2 值為 87.09%，如圖 11，雖然解釋能力略低於實驗 4，但尚在可接受範圍內。

若將 2 條線放在同一平面上比較，如圖 12，可以發現穩定車流在低比例下平均車間距比不穩定時大，穩定車流的斜率絕對值比較大，因而隨著比例增加，車間距會降低的比較快。

2. 立體圖形分析

調整自動駕駛車輛的百分比，例如自動駕駛車輛占 0%、20%、40%、63% 的情況，探討上游車輛震盪幅度在何種自動駕駛車輛比例時會縮小。發現不論是 20% 或是 40%，波形皆相當混亂，探究原因可能為自動駕駛車輛比例較少時，對於高密度的車流，可能在前車還未減速之前，自動駕駛車輛卻判斷可能會發生危險，在顧及使用者舒適下，已經先行減速，造成後方其他人為跟車車輛因為自動駕駛車輛減速的刺激，而相對減速，造成後方車流的不可預期性增加。當調整到 63% 時，如圖 13 (x 軸依序為第 2 輛車至第 n 輛車，y 軸代表時間，z 軸則為跟車間距) 中後方車輛的跟車間距，才逐漸穩定且平均跟車距離比 0% 的情況降低許多，因為自動駕駛車輛的增加，後方車輛是自動駕駛車輛較多的情況下，在訊息可以串連下，後方車流就可以穩定且有效率的前進。

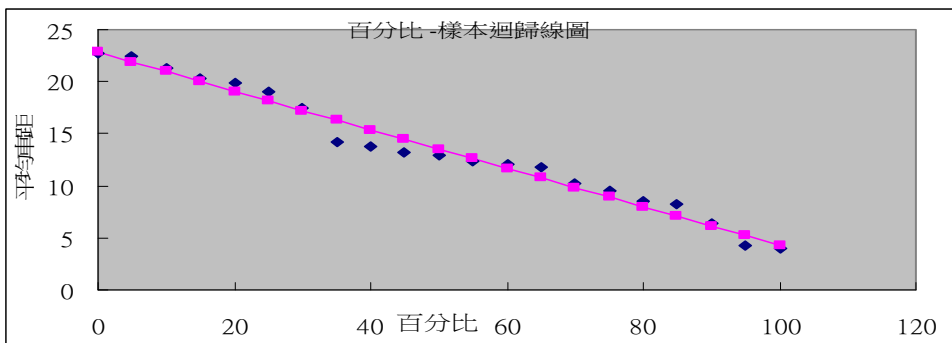


圖 10 穩定車流下迴歸分析圖

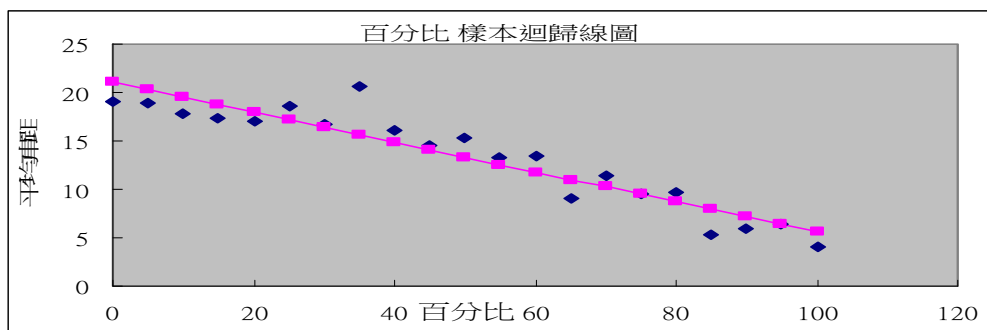


圖 11 不穩定車流下迴歸分析圖

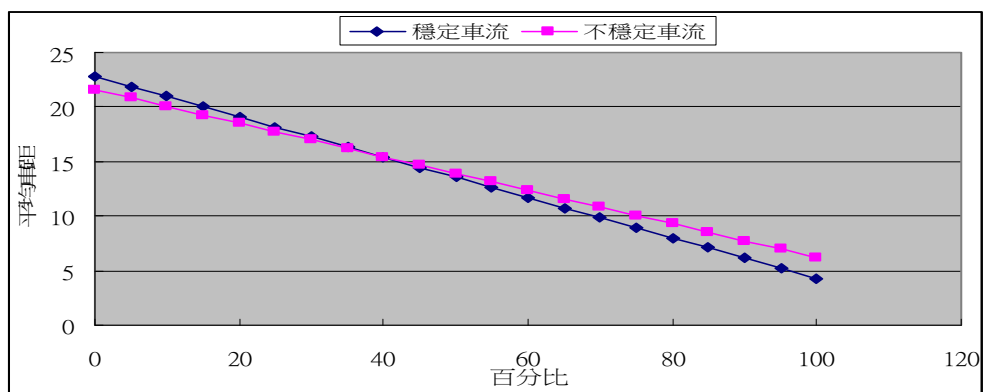


圖 12 迴歸分析比較圖

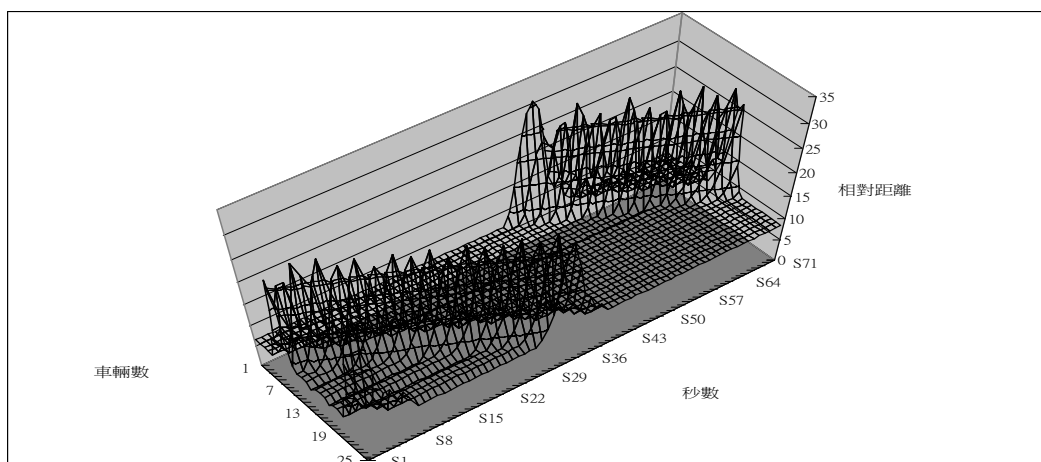


圖 13 立體跟車間距圖 (自動駕駛車輛占 63%)

六、結論與建議

6.1 結論

本研究旨在設計兩個指標，即動態距離設定最大值及最小值，其特別之處在於考量搭乘者的舒適性與混合車道穩定車流之目標，研究結果歸納出 4 種跟車控制邏輯，其邏輯經確認與驗證後具有可行性，自動駕駛車輛除可依前方兩輛車的相對距離以及速度，判斷各種加速或是減速外，亦於調整加減速與安全跟車距離等參數後，跟車時可保持安全的距離以避免與前車產生碰撞，甚至於前車緊急煞車時，可事先減速以因應。

其次，在情境分析部分發現在混合車道不穩定車流（流量小且密度高）下，自動駕駛車輛的比例必須達到 63%，方可使得後方車輛免於劇烈的震盪，恢復穩定的平均車間距。另外，自動跟車控制邏輯於處理前車以時速 60 公里緊急煞車之情況時，自動駕駛車輛需要 70 公尺以上的煞車距離方可安全煞停；若兩車相距 60 公尺且後方自動駕駛車輛若超過時速 60 公里時，就有可能追撞。

最後，本研究具體貢獻在於所提出混合車道之自動跟車控制邏輯，除具有可應用於穩定車流之價值外，對於前後車皆為自動駕駛車輛情況時，亦具有可與前車使用相同控制邏輯同加減速，維持穩定前進之應用價值。另外，納入本土手動駕駛車輛人為跟車模式中相對速度感知與反應時間等相關之參數，將駕駛者在行車時的主觀因素納入模式，改善過於著重工程的疑慮，並提高實務應用上的可行性。

6.2 建議

影響混合車道駕駛者在行車時的主、客觀因素眾多，惟本研究為基礎研究，參考文獻後選擇主要影響因素，例如車速，並將其他因素假設為固定條件，例如天候良好等。未來的研究方向可將假設為固定條件的原有其他因素納入模式，並加以調整，提高在應用的可行性。

其次，在可立即延伸的研究課題部分建議如下：

1. 在應用方面，本研究經過各種情境的測試得到目前控制邏輯的最佳狀態，但仍有提昇效能的可能性。例如，控制邏輯的穩定性仍需要相關硬體配合，且其硬體效能越好，或是偵測效率、反應速度越快，對判斷邏輯的正確性越佳，可有效提昇模型應用成效。
2. 於本研究的模擬過程中加入亂數種子程式，進行多次實驗的隨機性實驗，並將結果以平均值及變異數的方式來表示，除可使研究成果為通論，避免僅為控制實驗之下的結論外，亦可放寬研究限制，以擴大研究成果之適用範圍。
3. 應用此模式於無事故之混合車流分析，例如施工區混合車流分析。
4. 模擬不同環境（如上下匝道區、收費站等）及不同控制策略（如速限）下之混合車流特性，分析其時空交通特性及評估其績效。

最後，在理論模式的改良部分說明建議如下：

1. 再強化程式功能，例如加入變換車道的車輛，求出更精準的車道擁擠，延滯時間，或者轉換程式成連續輸出，便可以使得驗證模式時更加精準可行。
2. 參數調整，以提高模式應用範圍，例如調整跟車最小可接受距離緩衝時間之參數，提高模式適用範圍。另可將車速穩定指標納入後續乘客舒適度的模式考慮。
3. 增加模式之容錯能力，即程式中容許錯誤，例如設計將無法偵測到前車距離，暫時無法提供精確的定位資訊服務之不正常狀態所導致的不利後果降至最低。
4. 將小型車轉變為大客車並納入大客車相關參數，提高模式適用之模擬車種。

參考文獻

1. 維基百科，「自動駕駛汽車」，http://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_car，民國 103 年。
2. Shladover, S. E., Desoer, C. A., Hedrick, J. K., Tomizuka, M., Walrand, J., Zhang, W. B., and McKeown, N., "Automated Vehicle Control Developments in the PATH Program", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.40, No.1, 1991, pp. 114-130.
3. Raza, H. and Ioannou, P., "Vehicle Following Control Design for Automated Highway Systems", *Control Systems, IEEE*, Vol. 16, No. 6, 1991, pp. 43-60.
4. Horowitz, R. and Varaiya, P., "Control Design of an Automated Highway System", *Proceedings of the IEEE, IEEE*, Vol. 88, No. 7, 2000, pp. 913-925.
5. Brackstone, M. and McDonald, M., "Car-Following: A Historical Review", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 2, No. 4, 1999, pp. 181-196.
6. Pipes, L. A., "An Operational Analysis of Traffic Dynamics", *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, 1953, pp. 271-281.
7. Forbes, T. W., Zagorski, M. J., Holshouser, E. L., and Deterline, W. A., "Measurement of Driver Reaction to Tunnel Conditions", *Proceedings of the Highway Research Board*, Vol. XXXVII, 1959, pp. 345-357.
8. Gazis, D. C., Herman, R., and Rothery, R. W., "Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow", *Operations Research*, Vol. 9, 1961, pp. 545-567.
9. Chandler, R. E., Herman, R., and Montroll, E. W., "Traffic Dynamics: Studies in Car Following", *Operations Research*, Vol. 6, 1958, pp. 165-184.
10. Sheu, J. B., "A Quantum Mechanics-Based Approach to Model Incident-Induced Dynamic Driver Behavior", *Physica D*, Vol. 237, 2008, pp. 1800-1814.
11. Sheu, J. B. and Wu, H. J., "Uncertainties of Perceived Relative Speed and Reaction Time in Car Following: A Quantum Optical Flow Perspective", *The 16th International Conference of Hong Kong Society Transportation Studies (HKSTS)*, Hong Kong Society for Transportation Studies, 2011, pp. 11-18.
12. Sheu, J. B., "Characterization of Driver Behavior during Car Following Using Quantum

- Optical Flow Theory”, *Transportmetrica Part A*, Vol. 9, No. 3, 2013, pp. 269-298.
13. Sheu, J. B. and Wu, H. J., “Driver Perception Uncertainty in Perceived Relative Speed and Reaction Time in Car Following—A Quantum Optical Flow Perspective”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 80, 2015, pp. 257-274.
 14. 許添本、鄭雅文，「具備預測機制的追撞事件偵測新演算模式之研發」，*運輸計劃季刊*，第 30 卷，第 3 期，民國 90 年，頁 539-576。
 15. Ohtsuka, H. and Vlacic, L., “Stop & Go Vehicle Longitudinal Model”, *Proceeding of IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2002, pp. 206-209.
 16. Sheu, J. B., “Microscopic Modeling and Control Logic for Incident-Responsive Automatic Vehicle Movements in Single-Automated-Lane Highway Systems”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 182, No. 2, 2007, pp. 640-662.
 17. 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」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 93 年。
 18. 董晉曄，「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」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 95 年。
 19. Huang, S. N., Chan, S. C., and Ren, W., “Mixture of Automatically and Manually-Controlled Vehicles in Intelligent Transport Systems”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 24, No. 2, 1999, pp. 175-205.
 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」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 94 年。
 21. 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」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 91 年。
 22. 劉怡焜，「全身振動的測量評估及對職業危害之探討—以客運車為例」，中國醫藥學院環境醫學研究所碩士論文，民國 80 年。
 23. Luo, L. H., Liu, H., Li, P., and Wang, H., “Model Predictive Control for Adaptive Cruise Control with Multi-Objectives: Comfort, Fuel-Economy, Safety and Car-Following”, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol. 11, No. 3, 2010, pp. 191-201.
 24. Treiber, M. and Kesting, A., “An Open-Source Microscopic Traffic Simulator”, *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, Vol. 2, No. 3, 2010, pp. 6-13.
 25. Maurya, A. K. and Bokare, P. S., “Study of Deceleration Behaviour of Different Vehicle Types”, *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, Vol. 2, No. 3, 2012, pp. 253-270.
 26. Jalal, A. S. and Singh, V., “The State-of-the-Art in Visual Object Tracking”, *Informatica (Slovenia)*, Vol. 36, No. 3, 2012, pp. 227-248.
 27. Villagra, J., Milanés, V., Rastelli, J. P., and González, C., “Model-Free Control Techniques for Stop & Go Systems”, *Proceeding of International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Vol. XIII, 2010, pp. 1889-1904.
 28. Zgonnikov, A. and Lubashevsky, I., “Extended Phase Space Description of Human-Controlled Systems Dynamics”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*,

- 2014, pp. 1-12.
29. Xu, G., Liu, L., Song, Z., and Ou, Y., "Generating Lane-Change Trajectories Using the Dynamic Model of Driving Behavior", *Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation*, IEEE, 2011, pp. 464-469.
 30. Punzo, V., Borzacchiello, M. T., and Ciuffo, B., "On the Assessment of Vehicle Trajectory Data Accuracy and Application to the Next Generation Simulation (NGSIM) Program Data", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, No. 6, 2011, pp. 1243-1262.
 31. Shepherd, S. P., "A Review of System Dynamics Models Applied in Transportation", *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, Vol. 2, No. 2, 2014, pp. 83-105.
 32. Helbing, D., "Production, Supply, and Traffic Systems: A Unified Description", *Traffic and Granular Flow '03*, Springer, Heidelberg Berlin, 2005, pp. 173-188.
 33. Newell, G. F., "A Simplified Car-Following Theory: A Lower Order Model", *Research Part B: Methodological*, Vol. 36, No. 3, 2002, pp. 195-205.
 34. Newell, G. F., "Memoirs on Highway Traffic Flow Theory in the 1950s", *Operations Research*, Vol. 50, No. 1, 2002, pp. 173-178.
 35. Schwarzing, M., Zielke, T., Noll, D., Brauckmann, M., and Von Seelen, W., "Vision-Based Car-Following: Detection, Tracking, and Identification", *Intelligent Vehicles' 92 Symposium*, Proceedings of the IEEE, IEEE, 2011, pp. 24-29.
 36. May, A. D., *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

附 錄

偵測前車團求得末速之理論基礎與合理性說明如下：

1. 理論基礎係採用二元羅吉特模式，針將自動駕駛車輛跟隨前車與前前車的加速度變化的二項選擇，即自動駕駛車輛考慮前車距離事故遠近與前前車距離事故遠近之二項選擇機率視為自動駕駛車輛跟車加速度的動態比重，且其動態比重類似二元羅吉特模式二項選擇方案機率合計為 1。根據 Sheu^[16] 的自動車跟車加速度模式，簡述如下：

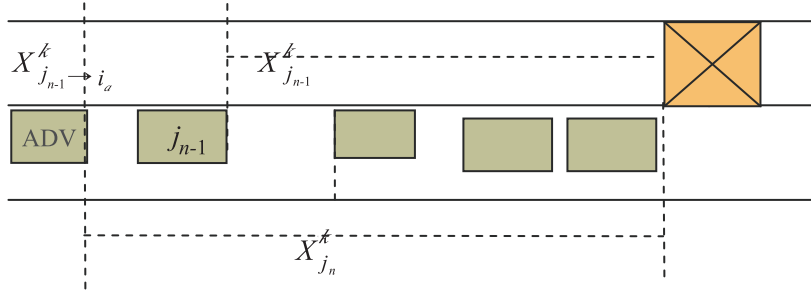
$$\alpha_{i_{\sigma}}^{\kappa} = W_1^{\kappa} \times \alpha_1 + W_2^{\kappa} \times \alpha_2 \quad (\text{A.1})$$

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

$$W_1^k = \frac{e^{-\left(|X_{j_n}^k|\right)}}{e^{-\left(|X_{j_n}^k|\right)} + e^{-\left(|X_{j_{n-1}}^k| + |X_{j_{n-1} \rightarrow i_\sigma}^k|\right)}} \quad (\text{A.2})$$

$$W_2^k = \frac{e^{-\left(|X_{j_{n-1}}^k| + |X_{j_{n-1} \rightarrow i_\sigma}^k|\right)}}{e^{-\left(|X_{j_n}^k|\right)} + e^{-\left(|X_{j_{n-1}}^k| + |X_{j_{n-1} \rightarrow i_\sigma}^k|\right)}} \quad (\text{A.3})$$

其中 $X_{i_\sigma}^k$: 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 $X_{j_n}^k$ 。 $X_{j_n \rightarrow i_\sigma}^k$: 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。以此類推 $X_{j_{n-1} \rightarrow i_\sigma}^k$ 。



附圖 A 距離示意圖

- 其合理性在於 W_1^k 、 W_2^k 表示自動駕駛車輛 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, 且 $W_1^k + W_2^k = 1$, 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。

