

GM 與 ANFIS 機車跟車模式之比較¹

MOTORCYCLE-FOLLOWING MODELS OF GENERAL MOTORS (GM) AND ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

藍武王 Lawrence W. Lan²

張瓊文 Chiung-Wen Chang³

(91 年 12 月 2 日收稿，92 年 5 月 9 日第一次修改，92 年 8 月 12 日
第二次修改，92 年 9 月 23 日定稿)

摘 要

本文旨在探討具有跟車現象之機車行為特性，界定影響機車跟車行為之顯著因素，據以構建機車跟車模式。經實地錄影觀察發現，機車具有跟車現象的比率僅佔所有觀察機車樣本之 13.8%。由機車與旁車間互動所呈現之相關資料分析與檢定結果發現，相對速率差、與前車間距、前車加速率係影響後(機)車跟車加速率之顯著因素。依據實地觀察資料，本文首先構建通用汽車 (GM) 機車跟車模式，發現情況 1 (僅正前方有車) 之迴歸判定係數 (R^2) 僅為 0.20~0.29 間，均方誤差根 (RMSE) 值為 0.73~0.81；情況 2 (正前方及斜前方含左或右或左右同時有車) 之值亦僅為 0.06~0.14 間，RMSE 值更達 0.89~0.97，均顯示 GM 跟車模式配適度相當低，難以有效描述機車之跟車行為。因此本文另構建適應性類神經模糊推論系統 (ANFIS) 機車跟車模式，發現情況 1 及情況 2 之 RMSE 值分別僅為 0.16 及 0.34，其配適度比 GM 跟車模式優越甚多；進一

-
1. 本文係國家科學委員會專題計畫 (編號：NSC93-2211-E-009-033) 之部分研究成果。
 2. 國立交通大學交通運輸研究所教授 (聯絡地址：100 臺北市忠孝西路一段 114 號 4 樓交通大學交通運輸研究所；電話：02-23494958；E-mail：lawrencelan@mail.nctu.edu.tw)。
 3. 交通部運輸研究所研究員 (聯絡地址：105 臺北市敦化北路 240 號 8 樓交通部運輸研究所；電話：02-23496812；E-mail: changcwn@iot.gov.tw)。

步以 $Q-Q$ 相關係數檢定發現，情況 1 通過預測值與觀察值完全正相關之檢定，情況 2 雖未通過完全正相關檢定，惟其統計量相當接近臨界值，顯示情況 2 預測值與觀察值亦近乎完全正相關，說明 ANFIS 跟車模式確能描述實際之機車跟車行為。

關鍵詞：機車跟車行為；通用汽車 (GM) 跟車模式；適應性類神經模糊推論系統 (ANFIS) 跟車模式

ABSTRACT

The main purposes of this paper are to investigate the characteristics of motorcycle flow in a mixed traffic, to identify significant factors affecting the motorcycle-following behaviors, and to construct models that can properly describe the relationship between motorcycle acceleration rates and these factors. A field observation is conducted and outcomes shows that only 13.8% of the overall samples reveal a motorcycle-following phenomenon. Statistical tests show that the significant factors affecting motorcycle-following behaviors include relative speed, space headway between a motorcycle and its leading vehicle, and acceleration rate of leading vehicle. General Motors (GM) five-generation models are firstly attempted to explain the motorcycle's following behaviors in two cases: (1) only one leading vehicle in front; (2) two or more leading vehicles in front and neighboring-front (including either left-front, right-front, or both). The rather low values of the coefficient of multiple regression determination ($R^2=0.20\sim0.29$ and $0.06\sim0.14$ for both cases) and relative large root-mean-square-error values ($RMSE=0.73\sim0.81$ and $0.89\sim0.97$ for both cases) imply that all of the GM models have poorly described the motorcycle-following behaviors. Therefore, we further propose a motorcycle-following model by incorporating the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with those significant factors that affect the motorcycle-following behaviors. Compared with the GM models, the ANFIS model outperforms with much smaller RMSE values (0.16 and 0.34 for both cases). Moreover, the $Q-Q$ plot correlation coefficient tests also reveal that the predicted acceleration rates have a highly strong positive correlation with the observed acceleration rates in case (1) and a strong positive correlation in case (2). It suggests that our proposed ANFIS model can satisfactorily capture the nature of motorcycle-following behaviors in a mixed traffic.

Key Words: Motorcycle-following behaviors; General Motors (GM) model; Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model

一、緒 論

國內外絕大多數車流相關研究均以小客車及大型車為主，較少涉及機車。關於機車研究發表於國際學術期刊（如 SSCI, SCI, EI）者並不多見，與機車跟車行為有關者更是缺

乏，可能原因是先進國家之機車並不普遍，故較少受到學術界重視；另一可能原因係機車車體小、操作靈活，行進時較不受車道限制，其移動狀態比小客車及大型車複雜許多，難以模化其行進（跟車及橫向位移）行為。國內關於機車流之研究主要包含機車專用道^[1-5]、機車特性^[6-10]及混合車流模擬^[11-14]等三類。例如林大煜^[1]利用臺北市天津街機車專用道之調查資料，分析機車專用道上之飽和車流率及相關特性，提出 1.5 公尺機車專用道之飽和車流間距為 0.5 秒／輛。湯儒彥^[2-4]針對機車道之設置寬度與機車行駛速率進行分析，提出不同的機車行車速率應有不同的機車道寬度設計，若機車行車速率高於 16kph 時，則車道寬度宜在 1.5 公尺～2.5 公尺間；另亦就路口純機車流之疏解型態，確立飽和機車流疏解率自綠燈始亮後 12 秒趨於穩定，以 3 公尺機車專用道為例，飽和疏解率約為 4.22 輛／(2 秒·3 公尺)。林育瑞^[5]攝影調查機慢車道上之機車流資料，利用二維座標概念，同時考量機車縱向與橫向推進與周遭車輛之互動行為，較以往純機車流研究更為深入，且該研究引入類神經網路構建機車車流模式，發現縱向推進模式之績效較佳，但因機車之機動性過高，變換行為較無規則可循，致橫向推進模式績效較差，該研究顯示應用類神經網路建立相關機車車流模式應具有可行性。

邱宏華^[6]應用等候理論直接估算六類路口車流延滯值，並以機車角度衡量，定義機車延滯當量 (motorcycle delay equivalent) 估算路口延滯。許添本等^[7]分析影響機車行進軌跡與車流之主要干擾因素，並提出虛擬車道變化量，作為評估機車車流秩序的指標。許添本等^[8]亦提出機車行駛空間車道化之構想，並探討在機車道內相關車流特性。許添本、鄭雅文^[9]比較巷道汽、機車之行駛速度及臨近路口速度與接受間距等特性發現，機車無論在路口或路段，其平均行駛速度皆明顯高於汽車，機車在路口之接受間距明顯小於汽車。Powell^[10]以衝擊波理論為基礎，建立多元迴歸之號誌化路口機車行為模式。

陳世泉^[11]及許添本、蔣靜宜^[12]利用攝影獲得二維座標車流狀況，提出機車除跟車行為外，亦存在錯車行為的概念，並以決策門檻值構建機車在混合車流中之互動行為邏輯。周義華、許鉅秉^[13]採用二維平面座標系統，以動態車長、車寬之觀念，利用直進、路寬、前車及號誌等限制與選線邏輯模擬車輛之推進，其中機車行進特性係透過調查資料所構建之加速率、減速率、動態尺寸、最大偏向角、偏向距等與速率之關係式來決定。黃泰林、何志宏^[14]採用模糊理論來模仿駕駛人在複雜道路環境中的思考過程，針對國內混合車流的環境特性提出交錯格位模糊推進法，以不同格位基礎來表現不同車種（含機車）之尺寸，並以格位座標系統取代二維座標系統來描述混合車流的微觀現象。

從學理角度析之，跟車 (car-following) 指車輛於行駛過程中，藉由加減速調整其行車速率，俾與前車保持一定安全間距的動態行為 (May, 1990)^[15]，此一行為應非僅限於小客車，亦可能適用於其他車種如大貨車、大客車或機車。此外，跟車行為除發生於車流擁擠情況外，亦可能發生於非擁擠情況（例如於超車受限狀況下，當有慢車出現致零星車隊形成時），因此也有學者建議以臨界車頭距 (critical time headway) 來界定是否產生跟車行為（如 Dijkster 等人，1998）^[16]。依此定義，當有車隊形成且後車（即本研究之機車）囿於道路幾何條件或車流狀況而有較低之自由度變換橫向位移時，或機車駕駛人有習慣性跟隨前車

傾向時，則上述 car-following 之意義亦可定義 motorcycle-following。從實地資料角度析之，觀察國內外混合車流（含大、小型車與機車），不難發現有相當比率的機車會穿梭於車陣中，並不具跟車現象；但仍有若干比率的機車具明顯之跟車現象，其中一部分可能受限於周圍車輛之存在，致其自由度較低，另一部分除正前方有車輛外，左（右）前方並無其他車輛存在，說明有些機車駕駛人會習慣性跟隨前車。

當跟車行為發生時，後車與前車之間的互動關係，通常可藉由方程式來加以描述，此即跟車模式，其類型大致可歸納為刺激－反應模式 (stimulus-response model)^[17-21]、安全距離模式 (safety distance model)^[22-25]、行為門檻模式 (action point model)^[26-28] 及模糊邏輯模式 (fuzzy logic based model)^[29-32] 等四類。常見之模擬模式如 NETSIM、CARSIM、INTRAS、FRESIM 及 INTELSIM 等都是以安全距離模式為分析概念，其中除 INTELSIM 為一同步性 (simultaneous) 模式外，其餘均屬程序性 (sequential) 模式。NETSIM 與 CARSIM 係基於避免碰撞觀點，模式中以緊急煞車時之最大減速率為限制；INTRAS 與 FRESIM 除了考量前述緊急煞車最大減速率因素外，亦考量根據前後車速差維持一適當車間距 (space headway) 的因素，經 Aycin 和 Benekohal (1999)^[25] 比較前述各模擬模式發現 INTELSIM 之績效最佳。

常用之分析性模式首推刺激－反應模式，其中以通用汽車 (General Motors, GM) 研究群 (如 Chandel、Herman、Gazis、Montroll、Edie 等) 所發展之跟車模式最為著名。GM 跟車模式共計五代，其共通之方程式為：反應＝敏感度×刺激。其中反應項係以後車之加速度表之，其值可為正、零或負，分別代表加速、等速、減速，本文統一稱為加速度。刺激項均以前後車之相對速率 (即速率差) 表之。唯一不同者為敏感項，例如第一代模式僅以一常數代表後車駕駛人之敏感度，第五代模式之敏感度則由前後車間距及後車速率之指數次方所構成。迄今第五代 GM 跟車模式仍廣泛應用於車流特性 (如安全、容量、服務水準等) 之研究。

GM 跟車模式假設所有駕駛人均有相同的反應行為，亦即在同樣的刺激量及敏感度下，任何駕駛人均會有相同的反應。事實上，若考慮駕駛人母體中存有異質之冒險度，即使上述相同的刺激量及敏感度給定狀況下，每一駕駛人未必有相同的反應。為處理駕駛人之差異性，近年來已有若干文獻利用模糊推論 (fuzzy inference)^[29-32]、類神經網路 (neural network)^[33] 或結合二者發展之適應性類神經模糊推論系統 (adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)^[32] 來構建跟車模式，其實證研究發現更能描述駕駛人之實際跟車行為。無論是傳統之 GM 模式或近年發展之 ANFIS 模式，主要多針對小汽車之跟車行為進行研究，尚無探討機車之行進行為。GM 五代模式均屬確定參數 (crisp parameters) 模式，亦即在同樣的刺激量及敏感度下，後車駕駛人均會有相同的反應；而 ANFIS 模式屬於模糊參數 (fuzzy parameters) 模式，係利用模糊推論方法來模化機車的跟車行為，以反應影響後車駕駛人加速率之相關變數具有模糊特質，並結合類神經網路之學習能力來修正影響變數之隸屬函數，以更貼近後車駕駛人之行為。GM 模式與 ANFIS 模式，何者能有效解釋實地之機車跟車行為，尚不得知，此乃本研究所欲探討之重點。

本文之目的即在以實地觀察得之二維混合車流資料為基礎，比較兩種模式對機車跟車現象之解釋能力。首先，觀察具有跟車現象之機車行進軌跡，分析影響機車跟車行為之顯著性因素；其次，分別構建 GM 及 ANFIS 機車跟車模式，並利用觀察資料驗證該二類模式對機車跟車行為之預測能力；最後，利用較佳之模式進一步應用於機車專用道之車流模擬。

二、資料蒐集與分析

2.1 調查方法

本文以錄影方式進行機車流資料調查。觀測路段為不受上、下游路口影響，具快慢分隔路型，且無公車靠站或大型車輛裝卸臨停之慢車道路段，經選擇具有上述特性之臺北市敦化南路一段（位於八德路與市民大道間，南向）為資料調查地點。該路段之 10 公尺慢車道上繪有車道標線，內側車道 3.5 公尺，外側車道 6.5 公尺，路邊繪有紅色禁止臨時停車標線。錄影範圍分別距離上游路口（八德路）及下游路口（市民大道）各 240 及 120 公尺（如圖 1）。

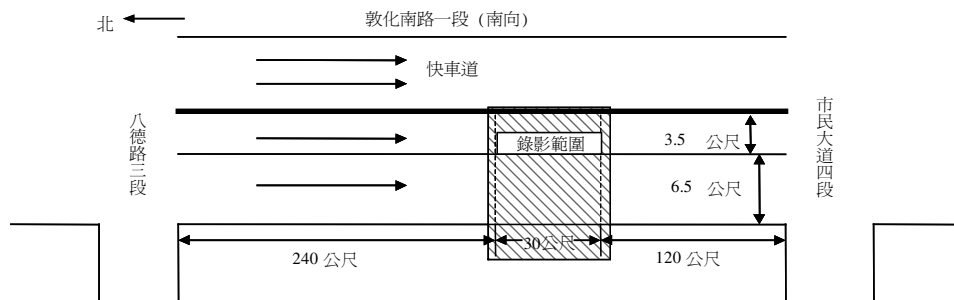


圖 1 錄影範圍相關位置示意圖

為了解機車之跟車特性，本文選取觀察樣本中具有跟車現象之機車樣本。參考 Dijkster 等人^[16]以車頭距 (time headway) 為 3.5 秒以內之小汽車即有跟車之原則，復考量機車之尺寸及靈活度，其在跟車時之車頭距較小汽車為小，故本文僅觀察車頭距 3.0 秒以下之機車樣本及錄影 30 公尺範圍內之所有車流，共觀察機車樣本數為 3,064 輛之混合車流資料。錄影時段為 90 年 2 月 22 日（星期四）下午 16:00~17:30 及 23 日（星期五）上午 8:00~9:30，平均交通量約每小時 2,100~2,900 輛（含小汽車及機車），涵蓋離峰及尖峰時段之機車特性。

考量機車反應時間約在 0.4~0.6 秒間^[34]，本文利用錄放影機停格功能，詳細記錄錄影帶中所有車輛每隔 0.5 秒之 X、Y 座標之時空位置，以螢幕上分隔島旁標線為基點，以

0.1 公分之刻度標示 X、Y 座標，如圖 2 所示，其中 X 軸代表機車行進方向，Y 軸代表橫向位置。現場錄影帶經利用時間轉錄器 (timer) 同步轉錄 (可轉錄 0.01 秒之時間)，由於一般錄影帶之速度大約是每秒 36 格 (frames)，故時間精確度約為 0.03 秒。錄影帶中座標資料之最大誤差為 ± 0.05 公分，相當於實際距離最大誤差為 ± 3.70 公分及實際速率最大誤差為 ± 0.532 公里/小時 (誤差主要來自人為判讀差誤)。依此方式蒐集 30 公尺範圍內每一輛機車本身及其前、左前與右前方旁車 (含小汽車及機車) 之 X、Y 座標，每 0.5 秒記錄乙次，再換算為每輛機車橫向位置、速率、與旁車之距離、與旁車之角度、旁車之速率等量測指標資料。

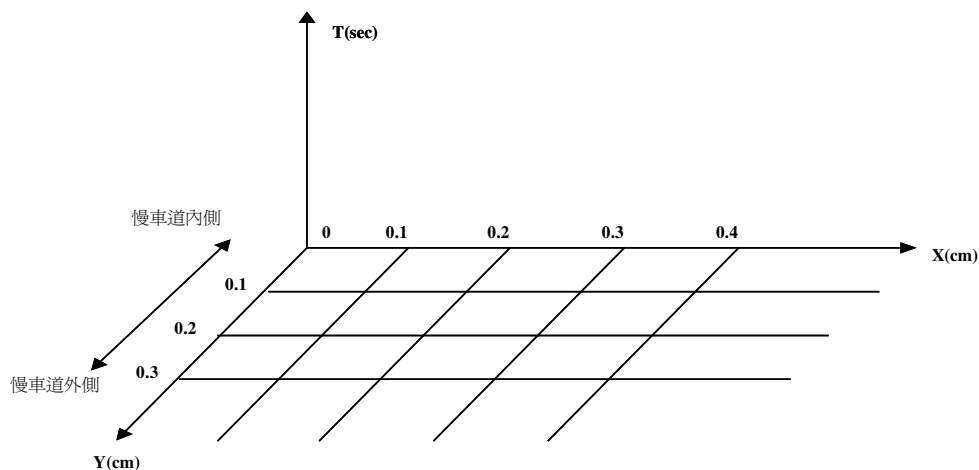


圖 2 錄影觀測資料時空位置示意圖

2.2 調查結果分析

於觀察時段內，機車與正前方同一車輛於 30 公尺範圍內保持跟車現象 (本文界定與前車保持橫向座標相對位置不超過 0.5 公尺者) 之樣本，共有 422 輛機車，僅占總觀察機車樣本 3,064 輛之 13.8%；其餘 86.2% 樣本並無明顯跟車現象 (指機車與前車之橫向座標相對位置大於 0.5 公尺者)。跟車樣本中又可分為兩種情況：一為「僅正前方有車」情況 (以下稱情況 1) 有 195 輛，二為「正前方及斜前方 (含左或右或左右同時) 有車」情況 (以下稱情況 2) 有 227 輛，上述兩種情況相關位置如圖 3 所示。經整理錄影範圍 30 公尺內每 0.5 秒之各項量測指標，計有 1,281 組資料。情況 1 屬於較低密度混合車流狀況，機車行進自由度較高；情況 2 屬於較高密度車流，機車之自由度較低。兩種情況下之機車行進特性整理如表 1 所示。

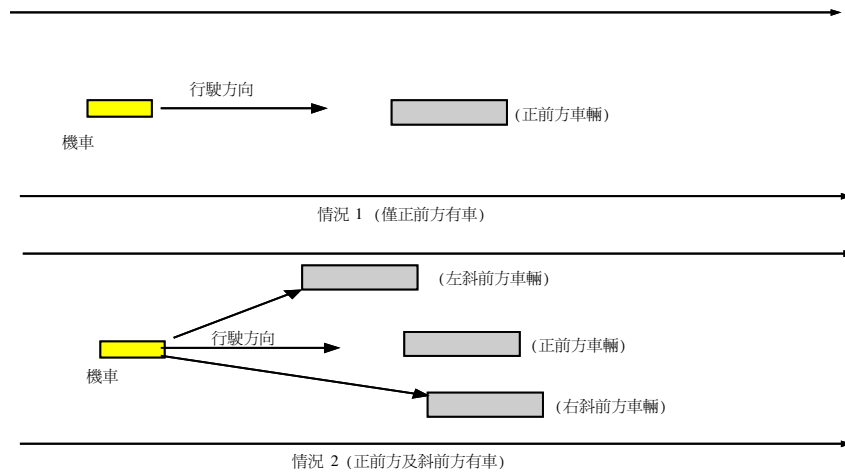


圖 3 機車跟車現象與其他車輛之相關位置示意圖

表 1 兩種情況下機車跟車行為觀測結果

情況	橫向位置	橫向位移	與前車間距	速率分布	加速率分布
1. 僅正前方有車 (共觀測 195 輛機車)	90% 以上機車出現於距慢車道內側 (見圖 2), 集中在 5.0 ~ 7.0 公尺間之位置。	92% 機車每 0.5 秒之瞬間橫向位移不超過 0.25 公尺。	前車為機車時平均間距為 8.51 公尺; 前車為汽車時平均間距為 10.99 公尺。	分布於 16 ~ 65 公里 / 小時範圍, 87% 集中在 25 ~ 55 公里 / 小時間; 愈靠外側速率愈低。	分布於 -4.15 ~ 2.93 公尺 / 秒 ² 範圍, 99% 集中在 2 公尺 / 秒 ² ~ -2 公尺 / 秒 ² 間。
2. 正前方及斜前方有車 (共觀測 227 輛機車)	85% 以上機車出現於距慢車道內側 (見圖 2), 集中在 3.5 ~ 7.0 公尺間之位置。	94% 機車每 0.5 秒之瞬間橫向位移不超過 0.25 公尺。	前車為機車時平均間距為 9.14 公尺; 前車為汽車時平均間距為 10.05 公尺。	分布於 18 ~ 69 公里 / 小時範圍, 90% 集中在 25 ~ 55 公里 / 小時間; 愈靠外側速率愈低。	分布於 -2.97 ~ 2.91 公尺 / 秒 ² 範圍, 99% 集中在 2 公尺 / 秒 ² ~ -2 公尺 / 秒 ² 間。

1. 與前車之車間距分布

兩種情況機車與正前車之車間距分布 (space headway distribution) 如圖 4 所示, 其中情況 1 前車為機車時平均車間距為 8.51 公尺, 前車為小汽車 (以下稱汽車) 時平均車間距為 10.99 公尺, 不分車種時之平均車間距為 9.94 公尺; 而情況 2 前車為機車時平均車間距為 9.14 公尺, 前車為汽車時平均車間距為 10.05 公尺, 不分車種時之平均車間距為 9.69 公尺。進一步統計檢定知, 兩種情況下機車跟汽車之間距顯著大於機車跟機車之間距 (虛無假設 H_0 : 前車為汽車時之車間距小於或等於前車為機車時之車間距, 右尾檢定, 檢定結果為情況 1 之 t 值 = 6.53, 情況 2 之 t 值 = 3.43 均大於臨界值 $t_{(0.95, \infty)}^* = 1.65$, 拒絕虛無假設); 若斜前方有車時 (機車自由度較低), 機車之平均跟車間距會較斜前方無車時 (機車自由度

較高) 為小。此外, 經 χ^2 適合度檢定兩種情況之機車與前車車間距是否呈相同分布 (虛無假設 H_0 : 二者有相同的車間距分布), 結果為 $\chi^2 = 57.01$ 大於臨界值 $\chi^2_{(0.95, 20)} = 31.41$ (拒絕虛無假設), 顯示兩種情況機車與前車之車間距分布存在顯著性差異。

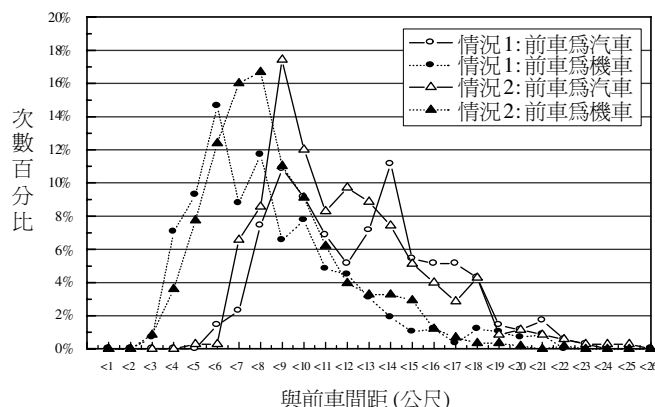


圖 4 跟車狀態下機車與前車之車間距分布圖

2. 速率分布

圖 5 顯示兩種情況機車速率皆有愈向外(右)側速率愈低的趨勢。圖 6 顯示情況 1 及情況 2 分別有 87% 及 90% 的機車行駛速率分布在 25 至 55 公里/小時間, 多數集中在 40 公里/小時左右。經 χ^2 適合度檢定兩種情況之速率是否呈相同分布, 結果為 $\chi^2 = 34.73$ 大於臨界值 $\chi^2_{(0.95, 19)} = 30.14$, 顯示兩種情況之速率分布存在顯著性差異。

3. 加速率分布

圖 7 顯示兩種情況機車加速率分布於 $-4.15 \sim 2.96$ 公尺/秒² 間, 99% 集中在 ± 2 公尺/秒²。經 χ^2 適合度檢定兩種情況之機車加速率是否呈相同分布, 其 $\chi^2 = 18.63$ 小於臨界值 $\chi^2_{(0.95, 15)} = 25.0$, 顯示兩種情況之加速率分布並無顯著性差異。

2.3 影響機車跟車加速率之因素分析

相關文獻^[15-32] 研究結果, 顯示加(減)速率大小可能受當時速率、前後車速差與車輛性能等之影響, 故其可能為各項因素綜合影響結果。因此, 本文進一步檢定前車車種、機車本身速率、與前車間距、前車速率、前車加速率、速率差、左前車速率、與左前車距離、與左前車夾角、右前車速率、與右前車距離、與右前車夾角等因素與機車本身加速率之關聯性, 以探析顯著影響後(機)車之加速率的可能因素。首先以 χ^2 獨立性檢定, 確認前車車種 (機車或汽車, 屬於類別變數) 是否顯著影響 $t \rightarrow t + \Delta t$ 時刻 (本文取 $\Delta t = 0.5$ 秒) 後(機)車之加速率, 虛無假設 H_0 : 後車加速率與前車車種無關, 結果為情況 1 之 $\chi^2 = 14.14$, 情

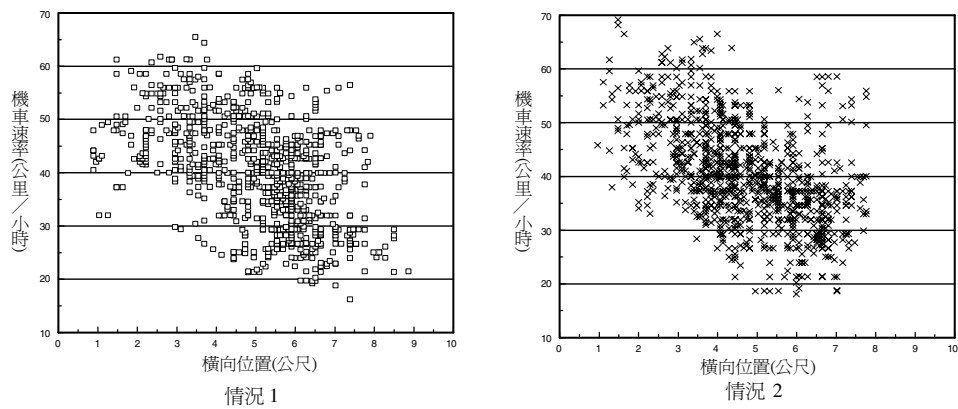


圖 5 兩種情況下機車速率散布圖

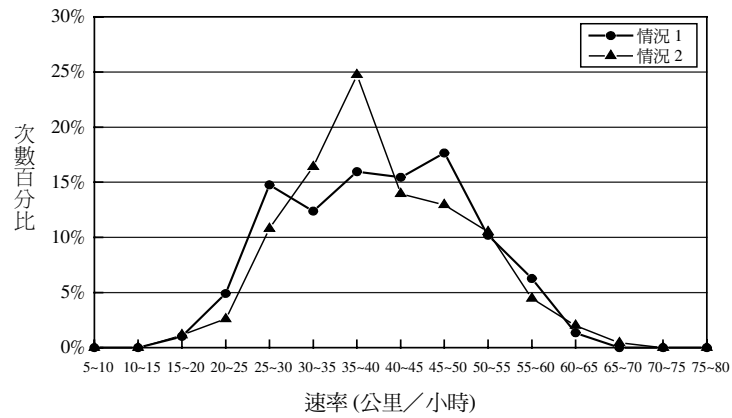


圖 6 跟車狀態下機車速率分布圖

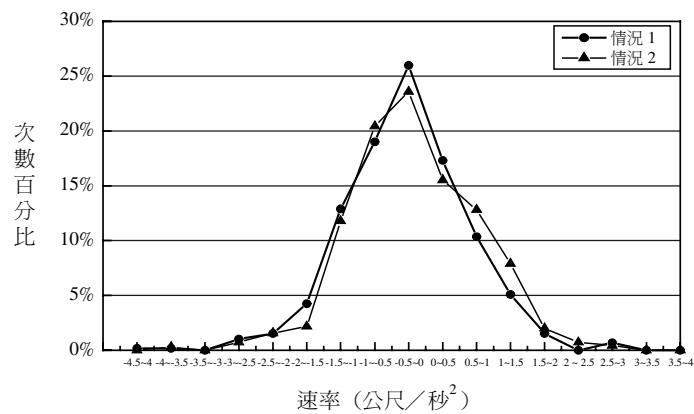


圖 7 跟車狀態下機車加速率分布圖

況 2 之 $\chi^2 = 14.02$ ，均小於臨界值 $\chi^2_{(0.95,15)} = 25.0$ ，無法拒絕虛無假設，表示就本文所觀察到具有跟車現象之機車樣本中，目前尚無足夠證據顯示機車跟車加速率與前車車種有關。

另利用 Pearson 相關係數進行機車加速率與其餘因素之相關性檢定，表 2 為 $t+\Delta$ t 時刻之機車加速率與 t 時刻之其他因素相關係數之檢定結果。由表 2 知 ($t+\Delta$ t) 時刻之機車加速率與 t 時刻之與前車間距 ΔS 、相對速率差 ΔV 及前車加速率 $a_n(t)$ 有顯著的關係，與其他因素則無顯著的關係。

表 2 機車加速率與其他因素相關性檢定結果

因 素	情況 1：機車加速率 $a_{n+1}(t+\Delta t)$, (公尺/秒 ²)			情況 2：機車加速率 $a_{n+1}(t+\Delta t)$, (公尺/秒 ²)		
	相關係數	P 值	樣本數	相關係數	P 值	樣本數
機車本身速率($V_{n+1}(t+\Delta t)$, 公里/小時)	.035	.397	589	-.007	.850	692
與前車間距 (ΔS , 公尺)	.150*	.000	589	.122*	.001	692
前車速率 ($V_n(t)$, 公里/小時)	.132*	.001	589	-.036	.338	692
前車加速率 ($a_n(t)$, 公尺/秒 ²)	.211*	.000	440	.286*	.000	516
速率差 (ΔV , 公里/小時)	.506*	.000	589	.287*	.000	692
左前車速率 (公里/小時)	—	—	—	.026	.622	366
與左前車距離 (公尺)	—	—	—	.130	.011	388
與左前車夾角 (度)	—	—	—	-.112	.028	388
右前車速率 (公里/小時)	—	—	—	-.151	.015	256
與右前車距離 (公尺)	—	—	—	.110	.072	268
與右前車夾角 (度)	—	—	—	-.096	.116	268

註 1： $H_0: \rho = 0, H_1: \rho \neq 0$ 。

註 2：*表示在顯著水準 $\alpha = 0.01$ (雙尾) 下相關係數顯著異於 0 (雙尾 P 值 < 0.005 者)。

註 3： $\Delta t = 0.5$ 秒。

2.4 小結

綜合前述，本調查於觀察時段與觀察 30 公尺範圍內發現有 422 輛機車具有跟車現象，僅占總觀察機車樣本 3,064 輛之 13.8%。經檢定發現此具跟車現象之機車在僅正前方有車 (情況 1) 及正前方及斜前方有車 (情況 2) 下，其與前車間距及速率分布情形皆有顯著性差異，顯示兩種情況下機車之行進特性有所不同，宜分別探討之。另由影響機車跟車加速率之因素分析發現，與前車間距、相對速率差及前車加速率係影響機車跟車加速率之顯著性因素，此三項因素與 Chakroborty 和 Kikuchi 之跟車模式^[29]相同，而與 GM 跟車模式略有不同 (GM 模式係採與前車間距、相對速率差及後車速率三項因素)。

三、GM 機車跟車模式

本文利用 GM 跟車模式嘗試解釋機車跟車行為，首先校估兩種情況下機車之 GM 跟車模式，其第五代模式之通式如下：

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = \frac{\alpha [V_{n+1}(t+\Delta t)]^m}{\Delta S^l} [V_n(t) - V_{n+1}(t)] \quad (1)$$

其中，

$a_{n+1}(t+\Delta t)$ ：機車 Δt ($= 0.5$) 秒後之加速率 (公尺/秒²)；

$V_{n+1}(t+\Delta t)$ ：機車 Δt 秒後之速率 (公里/小時)；

$[V_n(t) - V_{n+1}(t)]$ ：機車與前車之速率差 (公里/小時)；

ΔS ：前後車間距 (公尺)；

α, m, l ：待校估之參數。當 $m=1, l=1$ 時，即為第四代模式；當 $m=0, l=1$ 時，為第三代模式；當 $m=0, l=0$ 時，為第一、二代模式。

經利用 SPSS 套裝軟體，以反覆最小平方法校估得 α, m, l 等參數值，如表 3 (情況 1) 及表 4 (情況 2) 所示。由表知第五代模式兩種情況之機車本身速率參數 m 值均不顯著 (t 值均小於 $t_{(0.975, \infty)}^* = 1.96$)。本文亦嘗試以 GM 第四、三、二、一代跟車模式進行校估，結果並列如表 3 及表 4 所示。

表 3 情況 1 機車 GM 跟車模式之校估結果 (括弧內數字為 t 值)

參數	第五代	第四代	第三代	第二代 ^{註 1}		第一代
				$\Delta S \leq 10$ 公尺	$\Delta S > 10$ 公尺	
α	0.2367 (6.8821)	0.0093 (12.2835)	0.3820 (12.6241)	0.1314 (11.9944)	0.0726 (9.4824)	0.0937 (14.4577)
m	0.0102 (0.4538)	1	0	0	0	0
l	0.4852 (6.0746)	1	1	0	0	0
R^2	0.2950	0.2042	0.2132	0.2398	0.2637	0.2623
RMSE ^{註 2}	0.76	0.81	0.80	0.79	0.73	0.78

註 1：GM 第二代模式為二區段模式 (two-regime model)，本文以與前車間距 10 公尺為界，分別構建模式。

註 2： $RMSE = \sqrt{\frac{\sum (a_i - \hat{a}_i)^2}{n}}$ ，單位為公尺/秒²，其中 a_i 為觀察加速率， $\hat{a}_i$ 為模式加速率， n 為樣本數。

表 4 情況 2 機車 GM 跟車模式之校估結果 (括弧內數字為 t 值)

參數	第五代	第四代	第三代	第二代 ^{註 1}		第一代
				$\Delta S \leq 10$ 公尺	$\Delta S > 10$ 公尺	
α	0.1350 (2.2087)	0.0070 (7.4456)	0.3073 (7.6470)	0.0750 (7.6595)	0.0359 (3.4383)	0.0549 (7.7241)
m	0.0010 (0.2943)	1	0	0	0	0
l	0.3956 (1.9610)	1	1	0	0	0
R^2	0.1030	0.0943	0.0980	0.1386	0.0645	0.0995
RMSE ^{註 2}	0.92	0.93	0.93	0.89	0.97	0.93

註：同表 3。

由表知，情況 1 之 GM 各代模式校估結果迴歸判定係數(R^2)值均甚低 (不到 0.27)，均方誤差根 (root-mean-square-error, RMSE) 值普遍均高 (在 0.73~0.81 間)，而情況 2 校估結果 R^2 值更小於 0.15，RMSE 值在 0.89~0.97 間，情況 1 之各模式配適度 R^2 雖較情況 2 為佳，但均相當不理想。除第五代模式敏感項變數 (含前後車間距、後車速率) 為非線性數學式外，其餘各代模式均限制敏感項變數為常數或一次方，故第五代模式之配適度 R^2 會較其他代模式為佳。以情況 1 為例，各代模式中以第五代模式配適度達 0.29 最佳，第一、二代模式 R^2 值約在 0.23~0.26 間次之，第三、四代模式 R^2 值約 0.21 最差。就模式之參數意義而言， m 、 l 分別代表本身速率與前後車間距對加速率的敏感程度，由 2.3 節的分析中，本身速率項並非顯著的影響因素，故設定 m 為 1 之第四代模式最差。情況 2 各代模式間之配適度優劣順序與情況 1 大致相同。

由實地觀察資料知，機車駕駛行為複雜，自變數 (包括速差、車頭距或間距、本身速率) 與因變數 (即加速率) 間並非為一對一之確定性函數關係，機車群中具有相同之自變數值 (刺激量及敏感度)，但可能產生不同之因變數值 (反應)，當刺激量 (相對速率差) 為 0 時，GM 模式之後車加速率一定為零，惟現場觀察資料顯示，後(機)車仍可能有加(減)速之現象。此外，GM 模式之後車加速或減速完全取決於刺激量正或負，一旦敏感度設定後，則加速與減速大小會相等 (具對稱性)，惟現場觀察資料顯示未必如此。另影響機車跟車加速率之顯著因素為與前車間距、相對速率差及前車加速率，GM 模式採與前車間距、相對速率差及本身速率為影響變數，顯然 GM 模式遺漏了重要解釋變數前車加速率，而引入不具顯著性之解釋變數本身速率，致產生偏誤 (biased) 之係數校估結果。綜上述，兩種情況機車 GM 跟車模式之配適度均不佳， R^2 值僅約 0.1~0.3 間，模式之 RMSE 值高達 0.7 以上，說明 GM 各代模式以反應 = 刺激量 $\times$ 敏感度之確定性函數關係，未能有效描述實際之機車跟車行為。

四、ANFIS 機車跟車模式

根據 2.3 節檢定分析結果，本文選取與前車間距、相對速率差及前車加速率三項作為影響機車本身加速率之變數，以構建 ANFIS 機車跟車模式。以下說明本文設計之 ANFIS 模式架構、學習過程及學習結果。

4.1 模式架構

本文利用模糊推論方法來模化機車的跟車行為，以反映影響駕駛人加速率之相關變數具有模糊特質，並結合類神經網路之學習能力來修正影響變數之隸屬函數，以更貼近駕駛人之行為。Jang (1993) 曾提出 ANFIS 架構^[35]，包括二個輸入變數、三個等級隸屬函數，透過五層網路，利用倒傳遞梯度下降搜尋法 (backpropagation gradient descent method) 求解最佳隸屬函數之參數^[35-37]，並舉一非線性函數為例，說明其 ANFIS 模式可有效模擬該函數。本文參考 Jang (1993) 之概念並加以改良為三個輸入變數，五個隸屬函數，以適用於解釋機車跟車現象，分析工具為 MATLAB 軟體。本文採用之五層 ANFIS，為一 Sugeno-type 的模糊推論系統，學習訓練方式為最小平方法 (least squares method)，結合倒傳遞梯度下降搜尋法，以獲得最佳之隸屬函數參數，其系統架構如圖 8 所示，說明如下：

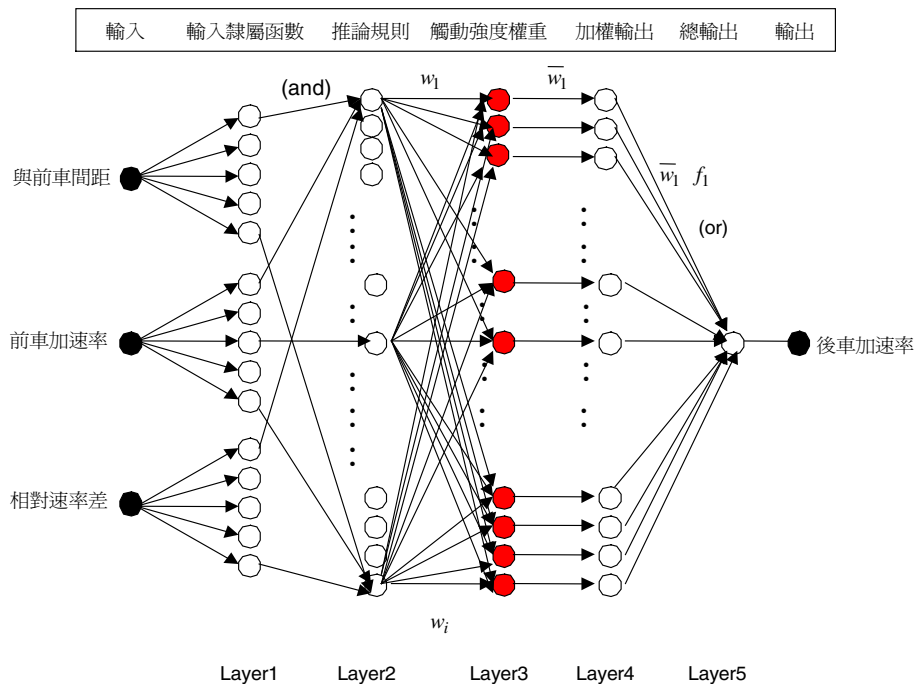


圖 8 本文之 ANFIS 機車跟車模式架構

1. 模糊推論規則

IF (ΔS is ΔS_{m_1}) and ($a_n(t)$ is $a_n(t)_{m_2}$) and (ΔV is ΔV_{m_3})

THEN $[a_{n+1}(t + \Delta t) = f_i(\Delta S, a_n(t), \Delta V)]$

$m_1 = 1 \sim l_1, m_2 = 1 \sim l_2, m_3 = 1 \sim l_3, i = 1 \sim l_1 \times l_2 \times l_3$

ΔS : 與前車間距 (以 10 公尺為單位) ;

$a_n(t)$: 前車加速率 (公尺/秒²) ;

ΔV : 機車與前車之速率差, $\Delta V = [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$ (以 10 公里/小時為單位) ;

$a_{n+1}(t + \Delta t)$: 機車 $\Delta t (= 0.5)$ 秒後之加速率 (公尺/秒²) ;

$\Delta S_{m_1}, a_n(t)_{m_2}, \Delta V_{m_3}$ 分別為 $\Delta S, a_n(t), \Delta V$ 之隸屬函數 ;

f_i : 第 i 個推論規則的輸出 ;

l_1, l_2, l_3 分別為 $\Delta S_{m_1}, a_n(t)_{m_2}, \Delta V_{m_3}$ 隸屬函數之等級數。

上述之規則表示如果 ΔS 屬於隸屬函數 ΔS_{m_1} 中 l_1 等級之程度, $a_n(t)$ 屬於隸屬函數 $a_n(t)_{m_2}$ 中 l_2 等級之程度, 且 ΔV 屬於隸屬函數 ΔV_{m_3} 中 l_3 等級之程度, 則 $a_{n+1}(t + \Delta t)$ 屬於第 $i (= l_1 \times l_2 \times l_3)$ 個推論規則之程度。值得說明者, 本文曾嘗試採「 $\Delta S = 1$ 公尺、 $\Delta V = 1$ 公里/小時」之資料單位, 發現 ANFIS 模式之 RMSE 與採「 $\Delta S = 10$ 公尺、 $\Delta V = 10$ 公里/小時」相當接近, 但電腦運算時間則急遽增加 2 小時以上, 較不實用。為減小資料規模, 縮短運算時間, 故採「 $\Delta S = 10$ 公尺、 $\Delta V = 10$ 公里/小時」之資料單位。

2. 各層變數說明

第一層：將輸入變數透過隸屬函數計算其隸屬度。本文採高斯 (Gaussian) 隸屬函數, 本層輸出公式如下：

$$O_{m_i}^1 = \mu_{m_i}(x) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_{m_i}}{b_{m_i}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$O_{m_i}^1$ 代表第一層第 m_i 個節點的輸出值 ;

$\mu_{m_i}(x)$ 代表輸入值 x 的隸屬函數值 ;

c_{m_i} 代表隸屬函數之中心值 ;

b_{m_i} 代表隸屬函數之寬度。

第二層：計算每一推論規則之觸動強度 (firing strength), 本層輸出公式如下：

$$\begin{aligned} O_i^2 = w_i &= \mu_{m_1}(\Delta S) \times \mu_{m_2}(a_n(t)) \times \mu_{m_3}(\Delta V) \\ &= \text{Min} \{ \mu_{m_1}(\Delta S), \mu_{m_2}(a_n(t)), \mu_{m_3}(\Delta V) \} \end{aligned} \quad (3)$$

O_i^2 代表第二層第 i 個節點的輸出值；

w_i 代表第 i 個推論規則的觸動強度；

Min 代表運算子 (operator)。

第三層：計算每一規則的觸動強度占全部觸動強度之權重，本層輸出公式如下：

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i} \quad (4)$$

O_i^3 代表第三層第 i 個節點的輸出值。

第四層：計算每一規則加權後之相對應輸出值，本層輸出公式如下：

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i \Delta S + q_i a_n(t) + r_i \Delta V + s_i) \quad (5)$$

O_i^4 代表第四層第 i 個節點的輸出值；

p_i, q_i, r_i, s_i 代表第 i 個推論規則隸屬函數參數，係透過網路學習過程求得，如後式(14)~式(18)所示。

第五層：將所有經加權之輸出值加總，即為輸出項（後車加速率），本層輸出公式如下：

$$O_1^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (6)$$

O_1^5 代表第五層單一節點的輸出值。

4.2 學習過程

為使讀者了解模式之演算過程，本文依機車跟車問題特質說明 ANFIS 模式之學習運算過程。學習演算以均方誤差 (mean square errors, MSE) 或稱能量函數 (energy function) 為績效指標函數 (performance function)，以 E 表之，如式 (7) 所示，透過最小平方方法與倒傳遞梯度下降搜尋法來修正網路參數。以一次一個訓練範例的方式進行，直到學習完所有訓練範例，為一個循環 (epoch)，經反覆學習數個循環，直至達到 E 收斂為止。

$$E = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [a_{n+1}(k) - O_1^5(k)]^2 \quad (7)$$

其中， a_{n+1} 、 O_1^5 分別代表加速率之實際觀測值與推論輸出值， k 代表參與訓練資料數， K 代表總訓練資料數。以 $\delta_{i,j}$ 代表第 i 層第 j 個單元的誤差修正量，各層之學習過程如下：

第五層：

$$\delta_{5,1} = \frac{\partial E}{\partial O_1^5} = -2[a_{n+1} - O_1^5] \quad (8)$$

第四層：

$$\delta_{4,i} = \frac{\partial E}{\partial O_i^4} = \frac{\partial E}{\partial O_1^5} \frac{\partial O_1^5}{\partial O_i^4} = \delta_{5,1} \frac{\partial O_1^5}{\partial O_i^4} \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial p_i} = \frac{\partial E}{\partial O_i^4} \frac{\partial O_i^4}{\partial p_i} = \delta_{4,i} \cdot \bar{w}_i \cdot \Delta S \quad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial q_i} = \frac{\partial E}{\partial O_i^4} \frac{\partial O_i^4}{\partial q_i} = \delta_{4,i} \cdot \bar{w}_i \cdot a_n(t) \quad (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial r_i} = \frac{\partial E}{\partial O_i^4} \frac{\partial O_i^4}{\partial r_i} = \delta_{4,i} \cdot \bar{w}_i \cdot \Delta V \quad (12)$$

$$\frac{\partial E}{\partial s_i} = \frac{\partial E}{\partial O_i^4} \frac{\partial O_i^4}{\partial s_i} = \delta_{4,i} \cdot \bar{w}_i \quad (13)$$

參數依下式更新：

$$p_i(t+1) = p_i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial p_i} \quad (14)$$

$$q_i(t+1) = q_i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial q_i} \quad (15)$$

$$r_i(t+1) = r_i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial r_i} \quad (16)$$

$$s_i(t+1) = s_i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial s_i} \quad (17)$$

η 代表學習率

第三層：

$$\delta_{3,i} = \frac{\partial E}{\partial O_i^3} = \frac{\partial E}{\partial O_i^4} \frac{\partial O_i^4}{\partial O_i^3} = \delta_{4,i} \frac{\partial O_i^4}{\partial O_i^3} \quad (18)$$

第二層：

$$\delta_{2,i} = \frac{\partial E}{\partial O_i^2} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial O_j^3} \frac{\partial O_j^3}{\partial O_i^2} = \sum_j \delta_{3,j} \frac{\partial O_j^3}{\partial O_i^2} \quad (19)$$

第一層：

$$\delta_{1,m_i} = \frac{\partial E}{\partial O_{m_i}^1} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial O_j^2} \frac{\partial O_j^2}{\partial O_{m_i}^1} = \sum_j \delta_{2,j} \frac{\partial O_j^2}{\partial O_{m_i}^1} \quad (20)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{m_i}} = \frac{\partial E}{\partial O_{m_i}^1} \frac{\partial O_{m_i}^1}{\partial b_{m_i}} = \delta_{1,m_i} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_{m_i}}{b_{m_i}} \right)^2 \right] \cdot \frac{(x - c_{m_i})^2}{b_{m_i}^3} \quad (21)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{m_i}} = \frac{\partial E}{\partial O_{m_i}^1} \frac{\partial O_{m_i}^1}{\partial c_{m_i}} = \delta_{1,m_i} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_{m_i}}{b_{m_i}} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{x - c_{m_i}}{b_{m_i}^2} \right) \quad (22)$$

參數依下式更新：

$$b_{m_i}(t+1) = b_{m_i}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial b_{m_i}} \quad (23)$$

$$c_{m_i}(t+1) = c_{m_i}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial c_{m_i}} \quad (24)$$

4.3 學習結果

1. 隸屬函數等級數與推論規則數說明

為選取較適當之隸屬函數等級數及推論規則數，本文先以調查資料之 90% (情況 1 與 2 分別有 396 組、464 組)，分別測試與前車間距、前車加速率及相對速率差等影響因素，及不同等級數之隸屬函數與相對應之推論規則 (本文比較 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 、 $5 \times 3 \times 3 = 45$ 、 $5 \times 5 \times 3 = 75$ 、 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 個推論規則)，均採用高斯隸屬函數，學習循環次數以 100 次為基準，若無法收斂則以每次增加 50 次為原則，直到收斂為止，結果如表 5 所示。由表知以 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 個推論規則時產生之誤差最小，故本文採用 125 個推論規則，將與前車間距 ΔS 之隸屬函數分為很近、稍近、中等、稍遠、很遠五個等級，將前車加速率 $a_n(t)$ 之隸屬函數分為減速、稍減速、等速、稍加速、加速五個等級，將相對速率差 ΔV 之隸屬函數分為很小、稍小、相等、稍大、很大五個等級。

2. 學習後隸屬函數

根據前述模式架構與隸屬函數等級，本文以前述 90% 資料 (情況 1 與 2 分別有 396 組、464 組) 作為訓練資料，來構建模式。經學習後情況 1 與情況 2 之隸屬函數參數值彙整如表 6 所示，其模式均方誤差根值分別為 0.16、0.34。

表 5 不同隸屬函數與推論規則之訓練結果彙整表

訓練情境 \ 隸屬函數		推論規則 ^{註 1}			
		$3 \times 3 \times 3 = 27$	$5 \times 3 \times 3 = 45$	$5 \times 5 \times 3 = 75$	$5 \times 5 \times 5 = 125$
情況 1	學習循環次數	100	100	100	100
	均方誤差根 (RMSE) ^{註 2}	0.39	0.32	0.21	0.16
情況 2	學習循環次數	100	100	100	100
	均方誤差根 (RMSE)	0.58	0.51	0.42	0.34

註 1：推論規則數 = $l_1 \times l_2 \times l_3$ ，其中 l_1, l_2, l_3 分別為 ΔS ， $a_n(t)$ 及 ΔV 之隸屬函數等級數。

註 2：為與 GM 比較，此處之 RMSE 即公式(7)能量函數開根號而得，單位同加速率，為公尺/秒²。

表 6 兩種情況經學習後隸屬函數之參數值

隸屬函數 \ 參數		情況 1		情況 2	
		c	b	c	b
與前車間距	很 近	0.2661	0.2191	0.2874	0.1937
	稍 近	0.8120	0.0540	0.8915	0.0578
	中 等	1.2421	0.0984	1.2069	0.0307
	稍 遠	1.7333	0.2179	1.6571	0.1870
	很 遠	2.2811	0.2047	2.0270	0.2114
前車加速率	減 速	-2.3070	0.5499	-2.9330	0.6703
	稍減速	-1.1990	0.4649	-1.5140	0.6332
	等 速	-0.1325	0.3376	-0.1358	0.5301
	稍加速	0.9384	0.4663	1.2420	0.5632
	加 速	2.0000	0.5650	2.6400	0.6311
相對速率差	很 小	-1.2410	0.3217	-1.6070	0.4056
	稍 小	-0.6246	0.2426	-0.8320	0.3216
	相 等	0.0128	0.0618	-0.0727	0.0855
	稍 大	0.5494	0.2758	0.7020	0.3472
	很 大	1.1470	0.3512	1.4970	0.4131
均方誤差根 (RMSE)		0.16		0.34	

註：採用之隸屬函數型態 $\mu(x) = \exp[-\frac{1}{2}(\frac{x-c}{b})^2]$ ，其中 c 為隸屬函數中心值， b 為寬度。

由下列特點可反應兩種情況之車流特性：

- (1) 就與前車間距而言，情況 1 各級隸屬函數中心值分布範圍大於情況 2，可說明情況 1 之機車跟車行為較情況 2 自由度為高之現象。

- (2) 就前車加速率及相對速率差而言，情況 1 各級隸屬函數中心值分布範圍較情況 2 為小，且隸屬函數寬度亦較窄，說明情況 2 機車行進中受周遭環境限制較大，致必須經常調整速率，以保持適當位置。
- (3) 就模式之學習結果而言，以情況 1 之均方誤差根較情況 2 小，說明情況 2 之車流較情況 1 複雜，致模式估計效果較差。

3. 預測效果驗證

本文以保留之 10% 觀察資料 (情況 1 與 2 分別有 44 組、52 組) 作為測試資料，以驗證 ANFIS 模式之預測效果。圖 9 為兩種情況之觀察值與預測值關係分布圖，由圖中可發現有 80% 以上的機車加速率分布在 ± 3 公尺/秒² 範圍內，經以 $Q-Q$ 相關係數檢定 ($Q-Q$ plot correlation coefficient test)^[38] 觀察值與預測值間關係是否呈 45° 線完全正相關 (即 $H_0: \rho = 1$, $H_1: \rho < 1$, 左尾檢定)，結果發現情況 1 相關係數 $r_Q = 0.9778 > r_{Q(44,0.01)}^* = 0.9625$ ，在 1% 之顯著水準下，無法拒絕二者為完全正相關之虛無假設，顯示情況 1 模式預測值可有效估計觀察值。情況 2 之相關係數 $r_Q = 0.9411 < r_{Q(52,0.01)}^* = 0.9681$ ，在 1% 之顯著水準下，拒絕二者為完全正相關之虛無假設，說明 ANFIS 跟車模式對情況 2 之預測能力較情況 1 稍差。綜上述，情況 1 可以通過預測值與觀察值完全正相關之檢定，情況 2 雖未能通過檢定，惟其統計量 (r_Q) 相當接近臨界值，顯示其預測值與觀察值亦頗為接近完全正相關。以上說明 ANFIS 模式能有效描述實際之機車跟車行為。

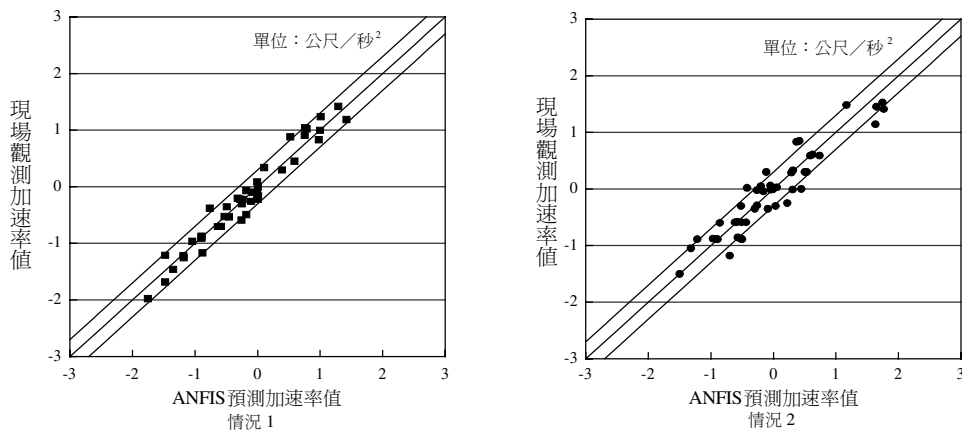


圖 9 ANFIS 跟車模式觀察值與預測值之 $Q-Q$ 分布圖

五、討 論

本節除深入比較 GM 與 ANFIS 模式各項特性外，更進一步應用解釋能力較佳之 ANFIS 模式模擬機車專用道之機車跟車情況。

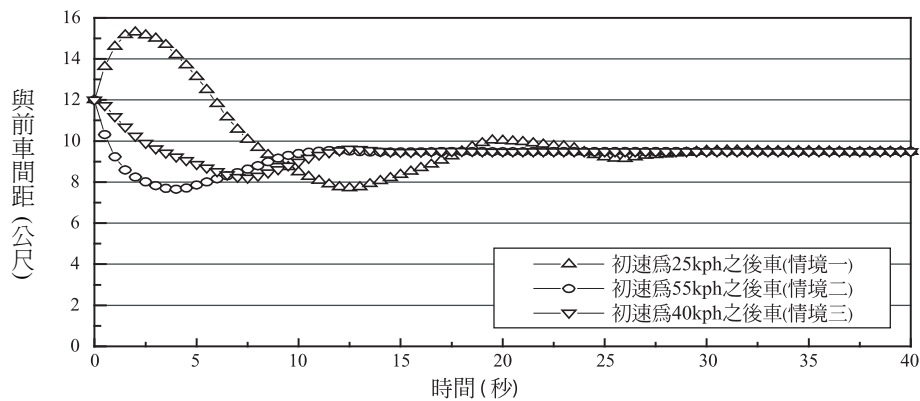
5.1 GM 與 ANFIS 模式比較

1. 在模式結構方面，GM 各代模式以反應=刺激量×敏感度之確定性函數關係，未必符合實際之機車跟車行為。依觀察資料檢定結果發現，影響機車跟車加減速率之顯著因素為與前車間距、相對速率差、前車加速率，GM 模式採與前車間距、相對速率差、本身速率為影響變數，顯然 GM 模式遺漏了重要解釋變數前車加速率，而引入不具顯著性之解釋變數本身速率（按：遺漏重要解釋變數之迴歸模式，理論上會產生偏誤 (biased) 之係數校估結果）。例如當刺激量（相對速率差）為 0 時，GM 模式之後車加速率一定為零，惟現場觀察資料顯示，後(機)車仍可能有加(減)速之現象。此外，GM 模式之後車加速或減速完全取決於刺激量正或負，一旦敏感度設定後，則加速與減速大小會相等（反應尺度一致，具對稱性），惟現場觀察資料顯示亦未必如此。ANFIS 模式中藉由模糊推論機制之處理，可以合理地反應相關資料的特性而改進上述缺點。
2. GM 跟車模式為確定性函數關係，同一組資料僅能獲得一種校估結果，而 ANFIS 跟車模式可經由不同等級數隸屬函數與推論規則之設計，獲得不同的結果。例如本文將 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 個推論規則增為 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 個推論規則時，情況 1 及情況 2 之 RMSE 分別降低 57% 及 38%，顯示 ANFIS 跟車模式可依據資料的特性選擇合適的推論機制，確實較 GM 跟車模式更具彈性。
3. 在模式配適度方面，依現場觀察資料所建立之兩種情況機車 GM 五代跟車模式，情況 1 之 R^2 約為 0.2042~0.2950 間，其 RMSE 為 0.73~0.81；情況 2 之 R^2 約為 0.0645~0.1386 間，其 RMSE 為 0.89~0.97，均顯示 GM 模式配適度相當低，難以描述機車之跟車行為。ANFIS 跟車模式於情況 1 及情況 2 之 RMSE 分別為 0.16 及 0.34，顯然 ANFIS 跟車模式之配適度遠較 GM 跟車模式為佳，復經以 $Q-Q$ 相關係數檢定驗證發現，機車加速率觀察值與 ANFIS 跟車模式預測值間呈完全或接近完全正相關，說明 ANFIS 模式確能有效描述機車之跟車行為。

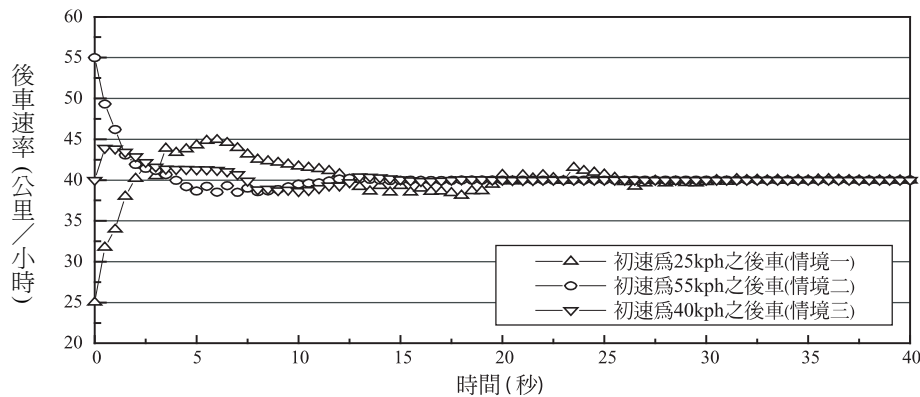
5.2 ANFIS 模式之應用

本文以預測效果較佳之 ANFIS 跟車模式（情況 1）模擬在 2 公尺寬機車專用道之機車跟車行為（選擇 2 公尺寬機車專用道之主因是機車無法併排行駛或超車，僅能跟車，故屬情況 1）。假設前車以 40 公里／小時之速率等速前進，後車在與前車間距 12 公尺處分別以 25、55、40 公里／小時初速前進。圖 10 為不同情境下之與前車間距及後車速率之模擬結果，由圖知，情境一（機車初速為 25 公里／小時）開始時機車會加速，約於 5 秒後加速至 45 公里／小時而後減速，之後微幅調整加速率，約在第 38 秒後趨於穩定。情境二（機車初速為 55 公里／小時）開始時會減速，約在 5 秒後開始微幅調整加速率，約在 22 秒後趨於穩定。而情境三（機車初速為 40 公里／小時）開始時機車仍會稍加速，之後則持續微幅調整加速率，約在 28 秒後趨於穩定。最後機車與前車間距均維持在 9.63 公尺左右。由模擬結果知：

1. 三種情境模擬結果最後都趨於收斂的情況，顯示本 ANFIS 模式具一定程度之穩定性 (robustness)。在跟車間距變化方面，前後車是以漸近方式趨於穩定，即初始時調整彼此間距的幅度較大，隨著距離的接近，調整幅度愈小，確實符合前後車間距愈小，跟車者行為愈趨保守之特性。在速率變化方面亦是由初始時調整幅度大，而隨著前後車速率的接近，調整幅度逐漸變小，直到趨於穩定。
2. 根據最後穩定的機車跟車間距 9.63 公尺，相當於 0.8667 秒的車頭距，換算得 2 公尺寬機車專用道，在 40 公里／小時速率下，其服務流率 (service volume) 約為每小時 4,150 輛機車，介於交通部運輸研究所「2001 年臺灣地區公路容量手冊」^[39] 2 公尺 I 型機車專用道 B~C 級服務水準之服務流率每小時 3,600~5,400 輛間。(註：本文之 40 公里／小時速率模擬情境相當於「2001 年臺灣地區公路容量手冊」2 公尺 I 型機車專用道 B~C 級服務水準，其所對應之速率為 35~45kph。)



(a) 車間距變化



(b) 後車速率變化

圖 10 ANFIS 模式模擬結果

進一步以 ANFIS 跟車模式 (情況 1) 模擬在不同前車加速率情況下, 後車加速率與前車間距、速率差之關係如圖 11。由圖可發現當前車加速率愈大、與前車間距愈長或前後車速率差愈大時, 則後(機)車加速率有愈大的趨勢。尤其是與前車間距在 9 公尺以內時, 當前車加速率小於或等於零, 速率差小於或等於零 (即後車明顯受制於前車時), 則上述情況更為明顯, 由此趨勢知, 本 ANFIS 跟車模式模擬結果應屬合理。圖 11 中各曲線跳動或交叉的原因可能係模糊推論系統各變數間並非一明確的函數關係所致。

六、結論與建議

6.1 結論

本文經於快慢分隔路型之慢車道路段, 觀察機車與正前方同一車輛於 30 公尺範圍內保持跟車現象 (本文界定與前車保持橫向座標相對位置不超過 0.5 公尺者) 之樣本, 並分析兩種情況 (情況 1 為僅正前方有車, 情況 2 為正前方及斜前方有車) 機車之跟車行為, 據以構建機車 GM 及 ANFIS 跟車模式, 主要發現臚列如后:

1. 根據實地錄影資料發現, 於觀察時段與範圍內, 出現機車跟車行為的比率僅占全部機車樣本之 13.8%, 其中多數機車行駛於慢車道外側, 且愈靠外側速率愈低。前車為機車時情況 1 及情況 2 之平均跟車間距分別為 8.51 及 9.14 公尺, 前車為小汽車時分別為 10.99 及 10.05 公尺; 統計檢定結果發現, 兩種情況下機車跟汽車之間距顯著大於機車跟機車之間距; 若斜前方有車時 (機車自由度較低), 機車之平均跟車間距會較斜前方無車時 (機車自由度較高) 為小。進一步比較兩種情況之速率及加速率分布發現, 情況 1 及情況 2 之速率、加速率分布分別為 16~65 公里/小時及 18~69 公里/小時, 以及 $-4.15 \sim 2.93$ 公尺/秒² 及 $-2.97 \sim 2.91$ 公尺/秒², 亦顯示情況 1 之機車自由度較情況 2 為高。
2. 依據檢定結果發現, 與前車間距 ΔS 、相對速率差 ΔV 及前車加速率 $a_n(t)$ 為三項影響機車跟車加速率 $a_{n+1}(t + \Delta t)$ 之顯著性因素, 機車本身速率 ($V_{n+1}(t + \Delta t)$) 並非影響機車跟車加速率之顯著性因素, 此結果與 Chakroborty 和 Kikuchi 跟車模式^[29]所採用之變數相同。
3. 依實地觀察資料所建立之兩種情況機車 GM 五代跟車模式, 情況 1 之 R^2 值約為 0.2042~0.2950 間, 其均方誤差根值 (RMSE) 為 0.73~0.81; 情況 2 之 R^2 值約為 0.0645~0.1386 間, 其 RMSE 為 0.89~0.97, 均顯示 GM 模式配適度相當低, 難以描述機車之跟車行為。可能原因為 GM 跟車模式遺漏了影響機車跟車行為的顯著性因素前車加速率 $a_n(t)$, 卻納入不具顯著性因素本身速率 $V_{n+1}(t + \Delta t)$, 致模式 RMSE 偏大、 R^2 甚低。
4. ANFIS 跟車模式於情況 1 及情況 2 之 RMSE 分別為 0.16 及 0.34, 顯然遠較 GM 跟車模式為佳; 復經以保留之 10% 觀察資料驗證 ANFIS 跟車模式之預測能力發現, 情況 1 可

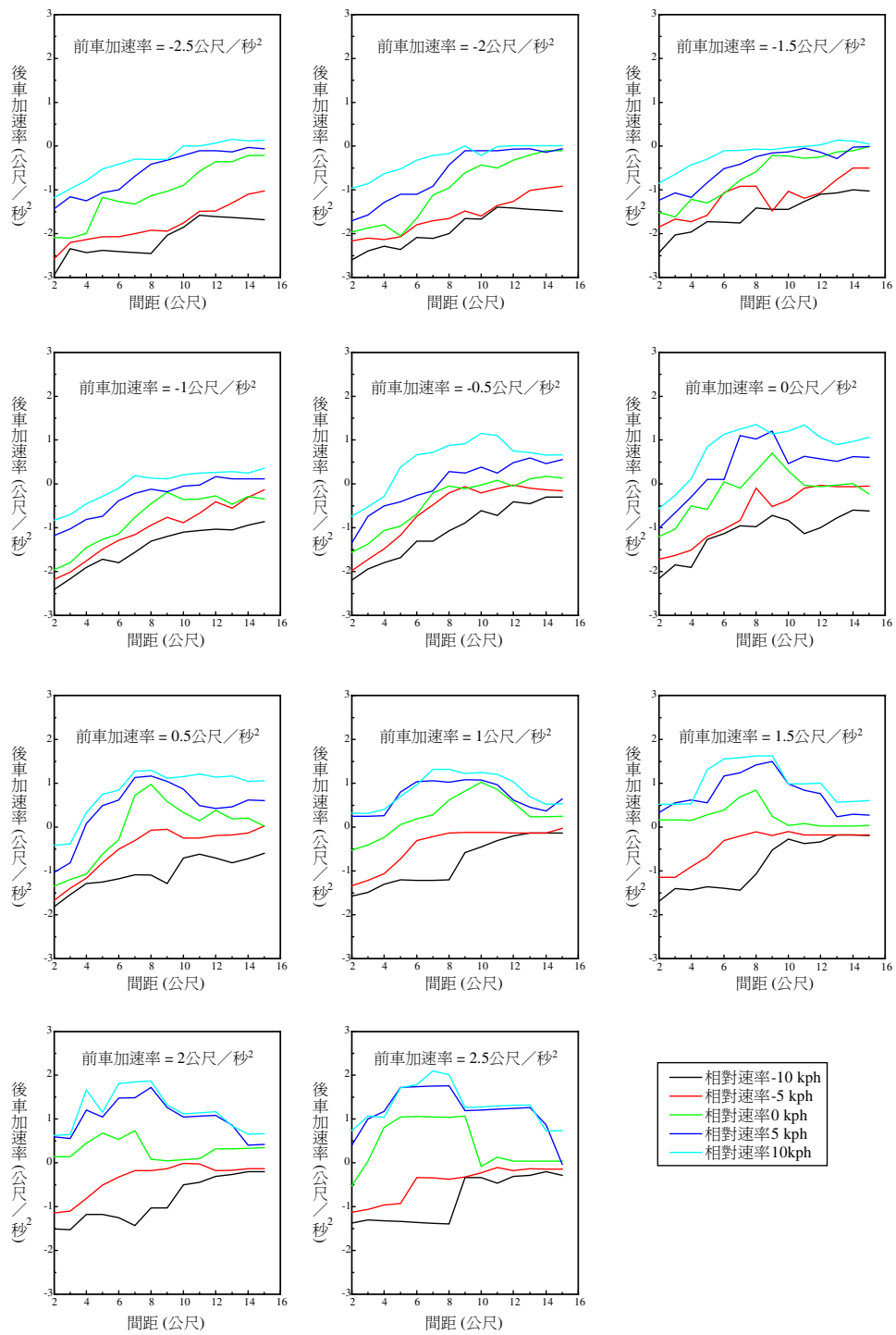


圖 11 不同前車加速率下後(機)車加速率與跟車間距、速率差之關係圖

以接受預測加速率值與觀察加速率值呈完全正相關之虛無假設，情況 2 雖未能通過檢定，惟其統計量 (r_Q) 相當接近臨界值，顯示其預測值與觀察值亦可視為近似完全正相關，說明 ANFIS 模式確能有效描述機車之跟車行為。

5. 以 ANFIS 跟車模式 (情況 1) 模擬 2 公尺寬機車專用道 (機車無法併排行駛或超車) 之車流，前車以 40 公里／小時等速前進，後車在與前車間距 12 公尺處分別以 25、55、40 公里／小時三種初速行進，結果發現後車最終會與前車保持一穩定的跟車間距約為 9.63 公尺，換算得該機車專用道之服務流率約為 4,150 輛機車／小時。

6.2 建議

1. 未來的研究重點可朝廣泛觀測機車行駛於不同混合車流中之特性，除可以更多之實地資料驗證本 ANFIS 機車跟車模式是否具一定程度之穩定性外，並可更深入分析機車加速率與前車車種及其他影響因素之交互關係，更有利於了解機車車流行為。
2. 為能有效判讀及量測所有觀測之車流資料，發展先進技術 (如影像自動定位) 以取代人工量測方式，亦值得進一步研發。
3. 機車行駛於特定車道之現象相對較小汽車或大型車不明顯 (本文於觀察時段與範圍內發現機車與前車有明顯橫向位移 (大於 0.5 公尺) 者占全部機車樣本之 86.2%)，故發展機車變換橫向位置之行為模式應為未來重要的研究課題。

參考文獻

1. 林大煜，「臺北市天津街機車專用道之交通量及特性分析」，**運輸計劃季刊**，第八卷，第二期，民國六十八年六月，頁 231-244。
2. 湯儒彥，「機車速率與車道寬度需求關係分析」，**中華民國第二屆機車交通安全研討會學術論文集**，民國八十七年十月，頁 95-103。
3. 交通部運輸研究所，**機車車道寬度與路口疏解型態之研究**，民國八十八年七月。
4. 湯儒彥，「純機車車流路口紓解型態之研究」，**中華民國第三屆機車交通安全研討會學術論文集**，民國九十年四月，頁 43-54。
5. 林育瑞，「利用類神經網路構建機車車流模式之研究」，成功大學交通管理學系碩士論文，民國九十年六月。
6. 邱宏華，「號誌化交叉路口機車延滯特性之研究」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十四年六月。
7. 許添本、許敦淵、王義川，「市區幹道混合車流之機車車流干擾分析」，**中華民國第三屆機車交通安全研討會學術論文集**，民國九十年四月，頁 69-78。
8. 許添本、游政霖、彭玉好，「機車行駛空間車道化構想與車流特性初步研究」，**運輸**，第二十八期，民國八十四年六月，頁 19-36。

9. 許添本、鄭雅文，「巷道汽機車車流特性比較研究」，**運輸學刊**，第十一卷，第四期，民國八十八年十二月，頁 1-18。
10. Powell, M., "A Model to Represent Motorcycle Behavior at Signalized Intersection Incorporating an Amended First Order Macroscopic Approach", *Transportation Research*, 34 A, 2000, pp. 497-514.
11. 陳世泉，「混合車流中機車駕駛行為之分析」，臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國八十二年六月。
12. 許添本、蔣靜宜，「機車跟車行為模擬之行為門檻特性分析」，**中華民國第十七屆學術論文研討會論文集**，民國九十一年十二月，頁 1093-1102。
13. 周義華、許鉅秉，「圓環交叉路口混合車流模擬模式之建立與驗證」，**運輸計劃季刊**，第二十一卷，第三期，民國八十一年九月，頁 301-334。
14. 黃泰林、何志宏，「新微觀混合車流模擬模式－交錯格位模糊推進法簡介」，**中華民國第九屆學術論文研討會論文集**，民國八十三年十二月，頁 475-482。
15. May, A. D., *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice-Hall, Inc., 1990.
16. Dijkster, T., Bovy, P. H. L., and Vermijs, R. G. M. M., "Car-Following under Congested Conditions Empirical Findings", *Transportation Research Record*, 1644, 1998, pp. 20-28.
17. Brackstone, M. and McDonald, M., "Car-Following: A Historical Review", *Transportation Research*, 2F, 1999, pp. 181-196.
18. Pipes, L. A., "Car Following Models and the Fundamental Diagram of Road Traffic", *Transportation Research Record*, 1, 1967, pp. 21-29.
19. Herman, R., Montroll, E. W., Potts, R. B., and Rothery, R. W., "Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following", *Operations Research*, 7(1), 1959, pp. 86-106.
20. Bierley, R. L., "Investigation of an Inter-Vehicle Spacing Display", *Highway Research Record*, 25, 1963, pp. 58-75.
21. Rockwell, T. H. and Treiterer, J., "Sensing and Communication between Vehicles", *NCHRP Report*, 51, HRB, Washington, D.C., 1968.
22. Pipes, L. A., "An Operational Analysis of Traffic Dynamics", *Application Physical*, 24(3), 1953, pp. 274-281.
23. Kometani, E. and Sasaki, T., "A Safety Index for Traffic with a Linear Spacing", *Operations Research*, 7(6), 1959, pp. 707-720.
24. Gipps, P. G., "A Behavioral Car Following Model for Computer Simulation", *Transportation Research*, 15B, 1981, pp. 105-111.
25. Aycin, M. F. and Benekohal, R. F., "Comparison of Car-Following Models for Simulation", *Transportation Research Record*, 1678, 1999, pp. 116-127.
26. Michaels, R. M. and Cozan, L. W., "Perceptual and Field Factors Causing Lateral Displacement", *Highway Research Record*, 25, 1963, pp. 1-13.
27. Evans, L. and Rothery, R., "Perceptual Thresholds in Car Following — A Recent Comparison",

- Transportation Science*, 11(1), 1977, pp. 60-72.
28. Evans, L. and Rothery, R., "Experimental Measurement of Perceptual Thresholds in Car Following", *Highway Research Record*, 64, 1973, pp. 13-29.
 29. Chakroborty, P. and Kikuchi, S., "Evaluation of the General Motors Based Car-Following Models and a Proposed Fuzzy Inference Model", *Transportation Research*, 7C, 1999, pp. 209-235.
 30. 藍武王、王日昌、江勁毅，「模糊跟車模式之探討」，**運輸**，第二十五期，民國八十三年九月，頁 43-55。
 31. 邱裕鈞、藍武王，「應用遺傳演算法建構適應性模糊邏輯控制系統－以跟車行為為例」，**中華民國運輸學會第十六屆學術論文研討會論文集**，民國九十年十一月，頁 515-525。
 32. 藍武王、葉信宏，「不同冒險度駕駛人之跟車行為：適應性類神經模糊推論系統」，**中國土木水利工程學刊**，第十三卷，第二期，民國九十年六月，頁 427-434。
 33. 魏健宏、林鄉鎮，「應用類神經網路與遺傳演算法建構小汽車跟車模式之研究」，**運輸計劃季刊**，第二十八卷，第三期，民國八十八年九月，頁 353-378。
 34. 朱建全，「機車駕駛者面臨交通衝突之行為反應研究」，交通大學運輸工程與管理學系碩士論文，民國八十八年六月。
 35. Jang, J. S. R., "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 1993, pp. 665-685.
 36. Jang, J. S. R., Sun, C. T., and Mizutani, E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, International Editions, 1997.
 37. Tsoukalas, L. H. and Uhrig, R. E., *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
 38. Johnson, R. A. and Wichern, D. W., *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Fourth Edition, Prentice-Hall, Inc., 1998.
 39. 交通部運輸研究所，**2001 年臺灣地區公路容量手冊**，民國九十年三月。