

高齡者與年輕人之駕駛模擬器學習效果 與作業負荷之比較¹

COMPARING THE LEARNING EFFECT AND WORKLOAD BETWEEN OLD AND YOUNG DRIVERS DURING SIMULATING DRIVING

石裕川 Yuh-Chuan Shih²

鄭志展 Chih-Chan Cheng³

陳宜寧 Yi-Ning Chen⁴

洪憲忠 Shiann-Jorng Horng⁵

(104 年 5 月 26 日收稿，105 年 2 月 15 日第 1 次修改，
105 年 5 月 5 日第 2 次修改，105 年 6 月 25 日定稿)

摘 要

本研究目的為比較高齡者與年輕人操作駕駛模擬器之學習成效及負荷；實驗共招募具駕照之高齡及年輕受試者各 10 位，受試者模擬駕駛相同路線 10 回合，並記錄每回合完成時間及第 1、5、10 回合的 NASA-TLX 負荷。將受試者的完成時間以學習曲線模式進行迴歸分析，得其第 1 次完成時間 (T_1) 及學習率 (ϕ)，並接續進行變異數分析。結果顯示高齡者之 T_1 顯著較年輕人長，但學習率 (ϕ) 則無顯著差異；另高齡者與年輕人的整體負荷無

-
1. 本文係交通部運輸研究所研究計畫 (MOTC-IOT-103-SDA108：高齡者之駕駛模擬儀學習效果與作業負荷) 研究成果，謹此致謝。
 2. 國防大學運籌管理學系教授 (聯絡地址：112 臺北市北投區中央北路 2 段 70 號 國防大學運籌管理學系；電話：02-28966301#604992；E-mail：river.amy@msa.hinet.net)。
 3. 國防大學運籌管理學系講師 (聯絡地址：112 臺北市北投區中央北路 2 段 70 號 國防大學運籌管理學系；電話：02-28966301#604938；E-mail：dan700623@gmail.com)。
 4. 國防大學運籌管理學系碩士生。
 5. 交通部運輸研究所運輸安全組研究員。

顯著差異，然負荷隨練習次數增加而顯著降低，高齡者降幅更明顯，其中高齡女性負荷較高應值得注意。模擬器學習曲線之成果可提供駕駛訓練設計之參考，而高齡者除應給予足夠學習次數外，其至終仍無法達到年輕人表現水準，建議於高齡駕駛之管理或法規等議題可納入考量。

關鍵詞：學習曲線；NASA-TLX；駕駛模擬器；高齡駕駛

ABSTRACT

This study aimed to examine the elder drivers' learning effect and workload through a driving simulator. Twenty subjects, including 10 elder and 10 young adult drivers, participated in the study. They all had valid license of small vehicle. All participants drove on a simulator and the same driving route was repeated 10 times. Each finishing time was recorded and the workload assessed by NASA-TLX was evaluated after the first, fifth, and tenth practice. For each participant, these 10 data of finishing time were used to calculate the learning rate (ϕ) and theoretical first finishing time (T_1) by means of regression.

The ANOVA result showed that elders had significant longer T_1 , but learning rate (ϕ) and workload (NASA-TXL) between elder and young people were not significantly different. Interestingly, the workload decreased with numbers of practices. Especially, the decreasing amplitude of workload of elders was bigger than younger. And the workload of female elders was much higher than others. Understanding the learning effect could be helpful to trainers in determining how to allocate training resources and/or schedule practices so as to optimize the training effectiveness. Notably, that of elders having longer finishing time should be taken into account while legislating regulation, designing vehicle, and any actions for safety considerations.

Key Words: Learning curve; NASA-TLX; Driving simulator; Elder drivers

一、前言

臺灣自民國 82 年高齡者人口突破 7% 後，開始進入高齡化國家。根據內政部戶政司 103 年「人口年齡結構指標」統計資料顯示，臺灣 65 歲以上人口已達 280 萬人（約占 11.99%）^[1]，且按內政部 102 年「人口政策白皮書：少子女化，高齡化及移民」所示，預估在 107 年時，臺灣就會正式成為高齡國家（高齡者比例達 14%），至 114 年高齡人口比例將達到 20%，邁入超高齡社會（super aged society）^[2]。另從 97 年「高齡社會研究簡介暨高齡社會調查」結果初步分析，65 歲以上高齡人口僅 17.1% 會開車、37.2% 會騎機車，但 45 至未滿 65 歲則有 52.1% 會開車、76.4% 會騎機車^[3]；故隨著人口結構老化，40~50 歲開車族將成銀髮族，且對使用車輛的需求及依賴將快速增加，高齡者開車問題也將日益嚴重。

而依據內政部警政署「102 年道路交通事故高齡者特性分析」統計資料，全國 A1 類道路交通事故禍死亡的共有 1928 人，65 歲以上高齡者因交通事故死亡者有 555 人，占總死亡人數 28.8%；即因交通事故死亡者每 4 人就有 1 位是 65 歲以上的高齡者。且此類事故肇事當事者屬 65 歲以上高齡者占總件數高達 15.91%，若就各年齡層肇事率（肇事件數/年中人口數（每萬人））觀察，「60~65 歲」每萬人肇事件數為 1.02 件，而「65 歲以上」為每萬人 1.12 件，均高於「30~未滿 40 歲」、「40~未滿 50 歲」及「50~未滿 60 歲」等 3 個年齡組距（0.80、0.82 及 0.88 件）^[4]，因此進行高齡者駕駛管理，有其必要性。

過去有多篇研究運用駕駛模擬器探討高齡駕駛之議題，其中駕駛模擬器已被證實對高齡者駕駛能力具有訓練效果^[5]；但高齡者對於駕駛模擬器的操作學習能力及學習負荷等課題，則仍未有此方面之研究。故本研究將以學習曲線（learning curves）來比較高齡者與年輕人操作模擬駕訓之學習成效，並同時透過 NASA-TLX (task load index) 主觀負荷量表來衡量操作模擬器之作業負荷，企藉由高齡者駕駛模擬器學習成效的探究，作為未來高齡駕駛能力訓練之參考應用。

二、文獻探討

2.1 高齡駕駛能力

依據陳子儀與陳雅珍^[6]調查研究報告顯示，我國 65 歲以上高齡者習慣每日固定外出運動或工作者中，7.6%的人每天都會駕駛汽車外出運動，另有 19.7%的人每天須駕駛汽車外出工作，且這種現象將隨我國高齡人口比例成長而快速增加，就如交通部「領有駕駛執照人數」統計資料顯示，高齡者（60 歲以上）占領有汽車駕照人數比例由 96 年 9.08% 上升至 102 年 14.98%^[7]，由此可見，汽車對高齡者生活而言，仍將更顯重要。賴建丞等人^[8]分析臺灣 1986-2007 年事故傷害死亡趨勢發現，臺灣地區非蓄意性傷害死亡人數第 1 名為「運輸事故」，占 56.18%；另根據警政署統計資料顯示，民國 100 年至 102 年間，全臺死亡車禍事故分析結果，65 歲以上駕駛人死亡人數維持在 25.3% 到 28.8%，且比例逐年升高。由以上可見，高齡者之駕駛問題日趨普及與嚴重。

駕駛模擬器於高齡駕駛能力的運用研究方面，Lee 等人^[9]招募 129 名高齡者進行駕駛模擬器表現與道路實車駕駛能力的驗證實驗，結果顯示兩者間的迴歸模型具有正相關（ $R^2=0.66$ ），此說明駕駛模擬器能用以衡量實車駕駛能力，且相對道路實車駕駛而更安全方便與經濟實惠。而以模擬器探討高齡者駕駛表現的相關文獻中，交通部運輸研究所報告^[10]顯示 65 歲以上高齡者開車時的反應時間，比一般 30~49 歲的青壯年駕駛多 45%；邱士軒^[11]利用模擬器搭配問卷方式，探討不同性別及年齡在不同車流負荷下情境知覺反應，發現 55~65 歲之駕駛注意力明顯低於其他年齡層；陳冠倫^[12]利用模擬器搭配眼動儀，探討高齡駕駛面對不同路況之反應，結果顯示 65 歲以上高齡者凝視反應時間及動作反應時間均較年輕人慢，且有較高事故率。

吳欣潔等人^[13]曾運用駕駛模擬器及駕訓班實際比例之虛擬場景，依中華民國實際駕駛路考科目之曲線進退（S 型進退）等 8 項，以訓練前、後之 8 關卡完成時間比較其駕訓成效，結果顯示除「鐵路平交道」及「紅綠燈」等項目外，其餘項目的花費時間均有顯著減少，另劉伯祥等人^[14]曾探討大貨車駕訓場為期 4 週的駕訓學習成效，並以駕訓科目之完成時間來衡量駕駛能力之進步。故以駕駛訓練之目的及學習成效而言，駕駛完成時間可用以衡量駕駛能力表現及其進步程度。

隨年齡增長，身體老化、視/聽覺、資訊處理之認知功能，及運動反應能力自然退化，勢必影響開車時的靈敏度。與駕駛能力相關的生理功能主要包括感覺（sensory）、認知（cognition）與心理性運動（psychomotor）技巧。感覺功能如視力、聽力會隨老化而衰退；認知功能包括注意力、記憶力與學習能力，也會隨著老化過程而退化；運動功能如反應時間會隨老化變慢^[15]，所以高齡者普遍被認為駕駛反應能力較年輕人慢。此表示高齡者於操作駕駛模擬器時，因視力、警覺性、注意力與反應能力降低，故本研究推論高齡者操作駕駛模擬器時，在相同情境的駕駛任務中，其完成時間將較年輕人長。

2.2 學習曲線

學習效應（learning effect）又稱為經驗效應（experience effect）或學習現象（learning phenomenon），是指人類在進行重複性作業時，作業所需時間或成本會隨循環次數增加而逐漸減少的現象，後來被歸納成「學習曲線」理論（learning curves）。此理論最早於 1936 年由 Wright^[16]提出，Wright 觀察發現在飛機製造生產線上，每當產量增加 1 倍時，所需要的作業時間就相對減少 20%，而完成第 2 個產品所需要的作業時間是第 1 次的 80%，第 4 次所需要的工時是第 2 次的 80% 依此類推，此情形稱為有 80% 的學習率，或稱為有 20% 的進步率^[17]。故學習曲線是表示單位產品生產時間與所生產的產品總數量之間的一條關係曲線。

從早期 1936 年 Wright 發表第 1 篇學習曲線模式之後，數十年來不斷發展出很多不同的模式，這些後來所發展出來的模式考量更多學習因素，並且根據不同的環境狀況延伸出更適合的模式，Anzanello 與 Fogliatto^[18]整理出包含對數模型（log-linear model）、指數模型（Exponential models）、雙曲線模型（Hyperbolic models）等多種模型，而 Blancett^[19]則認為對數線性模式被視為最佳且應用最廣的學習曲線代表模式，亦最被常使用來預測重複作業之生產效率，且其他學者 Vits 與 Gelders^[20]及 Globerson 等人^[21]等認為對數模型用於探討人工作業型態為主的成本或時間而言，不但數學式簡單且準確度也可被接受。其公式如下：

$$T_n = T_1 n^b \quad (1)$$

其中

n ：重複次數；

T_n ：重複第 n 次作業所耗時間；

T_1 ：第 1 次作業所耗時間；

b ：估計參數 ($-1 < b < 0$)。

而 $\phi=2^b$ 則定義為學習率 (learning rate)，代表作業完成所需時間隨著練習而進步的速率。若將公式 (1) 取自然對數，則得線性公式 (2)，並可以線性迴歸 (linear regression) 計算得到上述參數值。

$$T'_n = \ln(T_n) = \ln(T_1) + b\ln(n) = T'_1 + bn' \quad (2)$$

學習曲線有時又稱練習曲線 (practice curves)，也被視為評估人員學習新工作績效的有效工具；因此被用來估計完成作業不同重複次數時所需時間或成本。而其應用範圍非常的廣泛，諸如工時標準設定、獎工制度的訂定、自製及外購選擇標準、損益平衡分析、人力資源規劃、行銷規劃、意外事件次數評估、售後服務、標準成本制訂、存貨設定、物料日程量規劃、品質管制、作業績效制訂等，而現在學習曲線發展重心已經逐漸轉移至廣義的應用層面。

值得注意的是，學習可以分為認知 (cognition) 和動作技能 (motor skill) 學習兩部分；大部分的作業或任務通常涉及認知和動作學習兩部分，很少僅為單純的認知學習或動作學習而已。Dar-el 等人 [22] 指出，就一純粹的認知學習任務而言，其學習率約 0.7 左右；若就純粹的動作學習來說，則在 0.9 左右，而學習率的值愈小，代表認知學習的成分愈高，且也學習愈快。一般任務的學習歷程通常包含認知和動作技能兩部分，初期為經歷探索至理解之過程，屬學習進展較快 (學習率值較小) 之認知學習階段；之後則為動作重複練習至熟練過程，屬學習進展平穩 (學習率值較大) 之動作技能學習階段，故一般任務的學習率通常會介於 0.7~0.9 間。例如，Konz 與 Johnson [23] 研究顯示，加工和裝配小型鑄件之學習率為 0.74、裝配電子管為 0.83 及操作沖床為 0.89；另 Reid 與 Mirka [24] 亦使用學習曲線評估患者使用搬運輔助裝置，結果顯示學習率為 0.83。

而關於學習曲線及學習率應用於駕駛模擬器的研究，如 Sahami 等人 [25,26] 曾以冪函數 (如公式(1)) 探討受試者於實驗前之練習階段，對於模擬器之踏板及方向盤的操作適應情形，後續 Sahami 與 Sayed [27] 探討正式實驗前的練習方式 (包含不同的時間、次數、路線等) 對實驗結果的影響，結果指出練習階段的熟練差異度很大，且對主實驗造成分心的影響；Ronen 與 Yair [28] 研究指出實驗前的練習階段，對於不同類型的道路則應給予不同的練習時間。從上述駕駛模擬器的操作學習等文獻，發現都只應用於正式實驗前之儀器練習階段，僅探討是否足夠熟悉操作以進行正式實驗，但對於駕駛模擬器獨自全程的操作學習歷程，如認知與動作技能之學習歷程轉換與全程的學習曲線及學習率等則仍未被討論。

隨著老化，大腦會逐漸喪失神經元神經膠質細胞、大腦血液流量減少、大腦逐漸萎縮、神經元間突觸減少和訊息傳遞速度變慢，使人體的感覺與運動神經功能退化，導致反應時間變長與動作變緩慢，這些改變都會影響動作與認知能力 [29]。故高齡者在學習或適應動

作技能上常被認為受到老化的影響，如學習新的動作技能過程中，高齡者的動作表現比年輕人差，甚至透過練習也無法達到年輕人的績效^[30,31]，但仍亦有學者提出高齡者可透過學習去適應新的動作技能^[32,33]，甚至能透過反覆訓練而達到優於年輕人之較高幅度的進步表現，如 Dorbath 等人^[34] 研究顯示，高齡者在訓練前的錯誤率遠高於年輕人，但在受過反覆訓練學習後，進步幅度反而比年輕人還大，然而關於高齡者與年輕人間駕駛模擬器之學習差異比較則仍付之闕如。

在駕駛模擬器已被證實具有訓練改善駕駛能力之同時，本研究將更進一步評估高齡者生理機能退化對於駕駛模擬器操作學習的影響。故本研究欲探究高齡者身體機能退化的同時，其駕駛模擬器之學習曲線、學習率 (ϕ) 及學習歷程的轉換情形，期能為高齡駕駛的學習訓練提供指引，以助於改善高齡駕駛問題。

2.3 作業負荷

人類處理信息 (如從顯示器，報警，記錄和通信)、記憶項目、決策和執行任務的能力都有其限制，過多的作業負荷 (workload) 可能會對人員績效造成影響，如較慢的工作績效和人為錯誤；而過低的作業負荷亦可能會對人員績效造成影響，如無聊，失去情境知覺能力或降低警覺性等。操作人員是一個人機系統的核心部分，操作人員作業負荷的評估對新的人機系統的設計有著至關重要的影響，我們可以透過作業負荷評估來了解系統的瓶頸和過載部分，以讓系統安全和有效的運作。

駕駛者的作業負荷不僅會影響反應靈敏度，亦會影響到駕駛績效，在作業負荷的測量上，主觀測量法 (subjective measures) 公認是最能被接受、最容易實施、也是被最廣泛使用的方法，比其他測量法更能擷取心智負荷的本質^[35]。Hart 與 Staveland^[36] 提出一套量測方法為 NASA-TLX (national aeronautics and space administration-task load index) 量表，主要將作業負荷量分成 6 個面向，分別為心智需求 (mental demand)、體力需求 (physical demand)、時間需求 (temporal demand)、難易程度 (effort)、挫折程度 (frustration)、績效與滿意度 (performance)，透過上述 6 個面向之負荷程度及相互兩兩成對比較之權重加乘計算而得出整體負荷程度，且此負荷量表已被證實為有效且高度靈敏之研究工具。而董基良等人^[37] 於駕駛心理的研究報告指出國外研究多以 NASA-TLX 量表來衡量心智負荷，另 Fátima Pereira da Silva^[38] 針對駕駛心智負荷的探討，說明 NASA-TLX 是一最廣泛被使用，且具有效度、敏感度及多面項的評估工具。

已有許多研究將 NASA-TLX 量表運用於車輛駕駛作業負荷評估；施善羸與吳志富^[39] 量測車用螢幕與座椅調整的配置模式對於不同的身高族群與性別在各項作業負荷種類以及疲勞度之間的差異；Jahn 等人^[40] 在探討汽車周圍偵測設備及車內資訊系統的影響，及 Kim 等人^[41] 評估車內資訊系統觸碰介面設計等議題，均以 NASA-TLX 作為衡量駕駛負荷之依據，近來劉伯祥等人^[14] 亦以 NASA-TLX 評估大貨車 5 項駕訓科目之作業負荷及訓練成效，上述文獻顯示 NASA-TLX 對駕駛主觀作業負荷評估之可行性與普遍性。

Sanders 與 McCormick^[42] 指出：學習及技巧增進的主要附加產物就是行為變得更加自動化，並且在較少意識控制的情況下，從而減少注意力的需求。Patten 等人^[43] 還指出，增加培訓和經驗可以降低執行任務所需注意力的資源，使得駕駛更有餘裕去處理新的或未預期的交通狀況，且研究亦發現，駕駛員的視覺專注力與其經驗有關^[44]。而 Leeuwen 等人^[45] 在討論駕駛模擬器的遠、近程視野的駕駛訓練效果對駕駛行為影響之研究中，顯示 NASA-TLX 在 3 次的訓練過程中顯著地降低，此代表著隨著練習次數增加，作業負荷愈低。故本研究將以 NASA-TLX 瞭解高齡者與年輕人在駕駛模擬器操作學習過程的負荷變化情形，而依據上述文獻推論，隨著練習次數增加，作業負荷 NASA-TLX 隨之降低，並進一步探討高齡者與年輕人之負荷差異，藉以應用於駕駛訓練設計。

2.4 文獻總結

綜合上述文獻可知，本國人口有加速老化之趨勢，且汽車對高齡者仍是生活所需，但高齡者因生理機能老化衰退而伴隨著駕駛安全管理問題。駕駛模擬器已廣泛應用於駕駛能力評估及學習訓練，但關於駕駛模擬器的學習歷程、學習負荷，及高齡者與年輕人的學習差異等仍未被探討。學習曲線可用於探討重複同一動作從第一次到最後一次進步的幅度，若能藉由學習曲線探討比較年輕人與高齡者操作駕駛模擬器的學習差異，了解隨著年紀的增長，高齡者在駕駛重複練習的學習成效變化，或許有助日後高齡者駕駛能力訓練改善之參考，惟該方面卻鮮少有相關研究提出。

隨著逐次駕駛學習的過程，高齡者與年輕人的認知 (cognition) 學習與動作技能 (motor skill) 學習之轉換歷程的比較，從初期學習較快的的認知學習 (學習率較小) 轉換為學習進步較緩的動作技能 (學習率值較高) 的過程。此年齡差異對於駕駛模擬器的學習成效與負荷之影響，即為本研究探討主要議題，包含從未經學習的駕駛表現、逐次學習的過程、整體學習率、學習曲線及學習負荷等。

依據前述文獻，本研究推論高齡者生理功能因老化而退化，即高齡者的第 1 次作業時間 (T1：未經過學習影響的操作時間) 將較年輕人長，而駕駛學習負荷 (NASA-TLX) 亦將隨著練習次數增加而降低，另本研究以學習曲線 (learning curves) 模型計算駕駛模擬器的學習率，並比較高齡者與年輕人操作模擬駕駛之學習差異，以作為未來駕駛模擬器訓練駕駛學習能力之參考，藉此以強化高齡駕駛管理。

三、研究方法

3.1 受試者

本研究主要探討高齡者與年輕人在駕駛模擬器方面之學習與負荷的差異，受試者須擁有自用小客車駕照且排除駕駛新手 (須具有 5 年以上駕駛經驗)，其中高齡受試者參考過去

駕照最大持有年限與法定退休年齡 65 歲等法令，故高齡招募條件為尚未退休且目前生活仍有例行駕駛行為者，另亦考量高齡受試者招募便利性，本研究高齡受試者年齡以 60 ± 3 歲為主要招募對象。

實驗招募受試者共 20 人，其中包括年輕（約 35 歲）與高齡（約 60 歲）各 10 人，視力經矯正後可達 0.8 以上且無色盲，無精神耗弱、癲癇、心臟病或其它足以影響汽車駕駛之疾病者，受試者基本資料統計表如表 1 所示。

表 1 受試者基本資料統計表

組別	年齡 (年)	駕駛年資 (年)
高齡-男 (5 人)	62.4 ± 2.7	29.6 ± 7.4
高齡-女 (5 人)	59.4 ± 2.3	23.4 ± 9.0
年輕-男 (5 人)	33.8 ± 3.6	10.4 ± 4.9
年輕-女 (5 人)	33.6 ± 3.3	12.0 ± 2.7

3.2 實驗場地及設備

本實驗場地為長 2.5 公尺，寬 2.5 公尺的方形實驗室，實驗時空調開啟設定溫度於攝氏 $26 \pm 2^\circ\text{C}$ ，使受試者能在舒適的環境下進行實驗，避免因環境因素而導致表現誤差。實驗室內主要放置支援駕駛模擬器之各項硬體設備，各項設備配置圖如圖 1 所示。

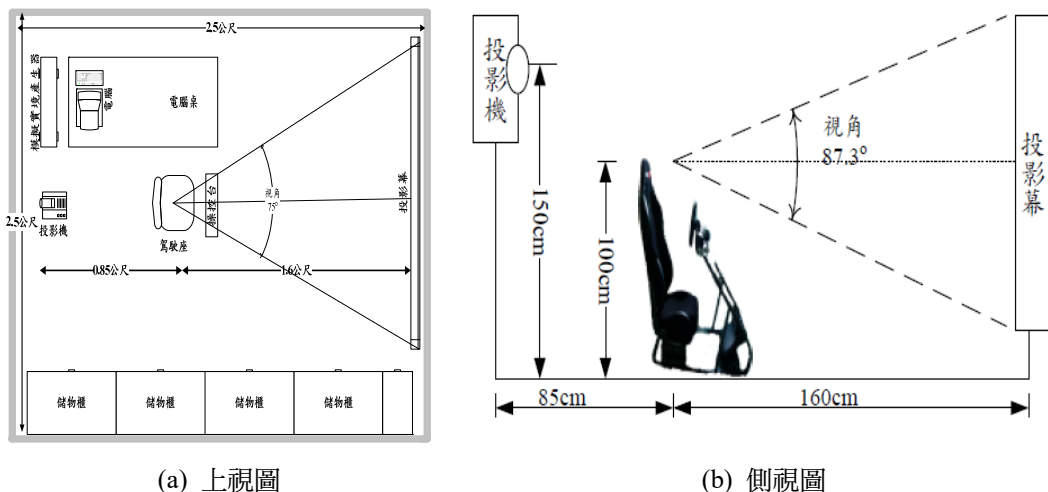


圖 1 實驗室位置配置圖

本實驗所使用的駕駛模擬器及虛擬實境組成主要分為三大部分：

(一)、電腦主機 (含銀幕) 乙台

主機型號為 Dell Precision T3400，作為模擬駕駛環境的系統控制台，其它配備有 Intel (R) Core (TM) Duo CPU E8400 3.00GHz，作業系統使用 WINDOWS XP SP3，顯示卡為 NVIDIA Quadro FX 570，記憶體 2.0 GB。

(二)、投影機乙台 (含投影幕乙幅)

型號為 HITACHI CP-X400，擁有 220W UHB 燈泡，並達到 3000ANSI 流明的高亮度；投影幕材質為薔白 (Matte) 之白塑布幕，尺寸 (不含黑邊) 為寬 162.6 公分×高 121.9 公分。

(三)、駕駛模擬座乙座 (如圖 2 所示)

1. 座椅背高 90 公分、椅背寬 52 公分，方向盤直徑為 24 公分。
2. 人員坐墊座高 25 公分、深 45 公分，其中座椅高度無法調整，但可前後調整 15 公分，模擬座踏板可前後調整 4 公分，所以受試者在進行實驗時可依本身體型調整座椅前緣至踏板頂部的距離，其最長距離為 65 公分，最短距離為 46 公分，使受試者能在舒適的情形下進行實驗。



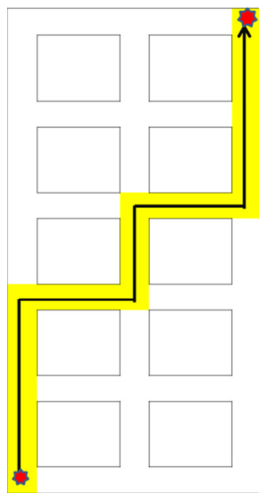
圖 2 駕駛模擬器

3.3 實驗場景及流程

本實驗路況場景為一般都市街道，駕駛路線共經過 5 個縱向街區及 2 個橫向街區，縱向街區總長為 840 公尺，路寬為雙向 6 線道；橫向街區總長為 540 公尺，路寬為雙向 4 線道，總實驗路線距離約 1380 公尺，起點為左下角街區，終點為右上角街區，道路行駛路線設計為 2 個右轉彎及 2 個左轉彎；另駕駛場景為避免影響駕駛干擾因素，將天候設定為晴 (白) 天，並關閉電腦模擬車流及道路突發狀況 (如街道施工及行人穿越)，以單純化駕駛路況，實驗駕駛路線及場景分如圖 3(a) 及 3(b) 所示。

本研究為觀察受試者操作駕駛模擬器，從生疏至熟練之學習過程及操作負荷，故並未讓受試者於實驗前進行儀器操作練習，實驗過程中由駕駛者自行控制速度，要求受試者學習適應模擬器之油門控制（加速及煞車）及轉彎順暢（不跨越車道線，均保持在內線車道內），在不違反交通規則（無速度限制，視個人能力增減速度），駕駛學習共連續進行 10 回合實驗，讓受試者逐步學習適應，觀察其每回合完成時間之學習進步情形及作業負荷的變化情形，實驗流程簡述如下：

1. 首先講解實驗目的與實驗流程，並簽署實驗同意書及填寫個人基本資料。
2. 由實驗人員對受試者進行相同內容的實機操作展示，說明實驗全程場景路線及規則，受試者於實驗前不得登機進行練習。
3. 正式實驗時，受試者依據模擬器場景進行駕駛，共連續重複 10 回合，並記錄每回合完成所費時間 ($t_i, i=1,2,3,\dots,10$)，每回合完成後閉眼休息 2 分鐘，以避免動暈症及眼睛疲勞。
4. 完成第 1 回合、第 5 回合與第 10 回合時，立即填寫 NASA-TLX 量表。



(a) 路線圖



(b) 場景圖

圖 3 駕駛路線與場景圖

3.4 實驗設計與資料處理

本研究首先將每位受試者之實驗完成時間 ($t_i, i=1,2,3,\dots,10$) 帶入學習曲線公式 (2)，並以簡單線性迴歸計算推估第一次完成理論時間 (T_1) 及學習率 ($\phi=2^b$)，再將 T_1 、 ϕ ，及 NASA-TLX 以統計軟體 STATISTICA 8.0 進行敘述性統計與變異數分析 (ANOVA)，包含常態檢定及同質性檢定。

實驗設計採用巢形因子設計 (nested-factorial design)，因主要探討年齡因子 (高齡、年輕) 對於駕駛學習及負荷的影響，故性別因子 (男性、女性) 則巢形 (nested) 於年齡因子

之下，即性別（男、女）分別在年齡（高齡、年輕）因子之下討論，另將受試者伏集於年齡及性別因子之變異源視為誤差項，實驗統計顯著水準 (α) 為 0.05，自變項與依變項說明如下：

1. 自變項：

- (1) 年齡：高齡者、年輕人共兩種水準 (levels)。
- (2) 性別：伏集於年齡之下；高齡者、年輕人男女各 10 員。
- (3) 回合數：區分第 1 回合、第 5 回合及第 10 回合，共 3 種水準 (levels)，只用於 NASA-TLX 作業負荷評量。
- (4) 受試者：伏集於性別及年齡之下。

2. 依變項：

- (1) 第 1 次完成理論時間 (T_1)：代表學習理論所推估之第 1 次任務完成時間。
- (2) 學習率 (ϕ)：代表作業完成所需時間隨著練習而進步的速率。
- (3) NASA-TLX 作業負荷評量：代表受試者逐次學習過程的負荷，僅施測第 1、5、10 回合，以了解逐次學習負荷的差異情形。

四、結果與討論

4.1 第一次理論完成時間 (T_1) 及學習率 (ϕ)

將各受試者 10 回合的完成時間套入學習曲線公式(2)計算，可得出各受試者學習理論所預測之學習曲線，包含第 1 次完成理論時間 (T_1) 及學習率 (ϕ)；再將上述學習曲線所推估 T_1 及 ϕ ，以巢狀 (nested design) 變異數分析進行分析。

第 1 次完成理論時間 (T_1) 之 ANOVA 結果顯示，年齡（高齡、年輕）對第 1 次完成理論時間 (T_1) 有顯著影響 ($F(1,16)=17.088$, $p=0.0001$)：高齡者(258.2 秒)顯著長於年輕人(182.9 秒)，此結果支持本研究推論。致此原因可能是高齡者因生理機能及認知功能退化而造成第 1 次完成理論時間 (T_1) 之延長；而性別方面，同年齡組內，男女間之 T_1 則無顯著差異 ($F(2,16)=0.097$, $p=0.9084$)。

至於學習率 (ϕ) 方面，發現年齡間（高齡、年輕）並無顯著差異 ($F(1,16)=3.470$, $p=0.0810$)，此代表高齡者雖然生理功能退化，但仍具有與年輕人一樣之學習潛力；性別方面，同年齡組內男女間之學習率 (ϕ) 亦無顯著差異 ($F(2,16)=0.596$, $p=0.5630$)。另對照 Dar-el 等人^[22]研究，一般任務學習過程包含認知學習和動作技能學習兩種成份，其學習率通常會介於 0.7~0.9，本研究結果除了年齡對於學習率沒有顯著影響，從全體受試者總平均學習率 0.87 了解本駕駛模擬實驗偏向動作技能之學習，其中年輕人 (0.91) 略高於高齡者 (0.85)，表示高齡者仍較年輕人具有認知學習成份，其進步幅度略大於年輕人，相關敘述性統計則如表 2 所示。

表 2 第 1 次完成理論時間 (T_1) 與學習率 (ϕ) 之敘述性統計表

因子	水準		T_1		ϕ	
			平均值	標準差	平均值	標準差
全體			220.6	54.0	0.87	0.05
年齡	年輕($n=10$)		182.9	29.5	0.91	0.04
	高齡($n=10$)		258.2	46.0	0.85	0.04
年齡* 性別	年輕	女性($n=5$)	177.5	27.8	0.92	0.04
		男性($n=5$)	188.2	33.4	0.90	0.05
	高齡	女性($n=5$)	256.4	60.1	0.86	0.05
		男性($n=5$)	260.0	34.0	0.85	0.03

根據上述變異數分析結果：年齡族群（高齡、年輕）對 T_1 有顯著影響，但對 ϕ 則無，且性別對 T_1 及 ϕ 都無顯著影響，故將學習曲線區分成高齡組與年輕組進行建立預測模型。本研究續將各組內受試者每回合實際完成時間進行平均後（資料如表 3 所示），再依據公式 (2) 進行迴歸分析，獲得高齡組與年輕組的學習曲線如下公式 (3) 及公式 (4) 所示。

$$\text{高齡組： } T_n = 258n^{-0.2176} \quad R^2=0.78 \quad \text{公式(3)}$$

$$\text{年輕組： } T_n = 183n^{-0.1681} \quad R^2=0.69 \quad \text{公式(4)}$$

表 3 兩組每回合實際完成時間的平均值、 T_1 及 ϕ

組別	回合 1-10 平均實際完成時間 (秒)										T_1	ϕ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
年輕組	187	155	150	140	141	142	133	133	130	133	183	0.91
高齡組	252	233	197	190	177	177	165	162	155	153	258	0.85
差距倍數	1.35	1.50	1.32	1.36	1.25	1.25	1.24	1.22	1.19	1.15		

上述學習曲線公式之判定係數 R^2 接近 0.7 與 0.8，顯示此模型適用於本研究之模擬駕駛練習，並可獲得學習曲線之第一次完成理論時間 (T_1)、估計參數 b 及學習率 ($\phi=2^b$)。高齡組之學習曲線公式 (3) 得知，其 $T_1=258$ 秒， $b=-0.2176$ ， $\phi=0.85$ ；年輕組之學習曲線公式 (4) 得知，其 $T_1=183$ 秒， $b=-0.1681$ ， $\phi=0.91$ ，本研究將此二學習曲線之數學模式繪製於圖 4，兩組各自每回合平均實際完成時間如圖中曲線各對應之圖點。

從圖 4 發現，前半段練習的 T_1 下降快速，而後半段之 T_1 則下降逐漸趨緩，此代表前半段學習之進步速度較後半段快，此主要原因乃學習初期，認知成份主宰學習的成效（稱認知主導階段，the cognitive-dominant phase），導致學習快速進展，之後則由動作學習主導

(稱動作主導階段, the motor-dominant phase), 其進展則趨於緩慢^[21], 其中年齡的學習差異亦可發現高齡者初期進步速率高於年輕人, 其間的差距逐漸縮小, 而到後期學習進步速率均趨於平穩, 兩者間表現差距逐漸保持平穩。

另從圖 4 與表 3 觀察得知, 初期高齡組之實際完成動作時間約是年輕組之 1.35~1.5 倍, 但經 10 次練習之後, 差距則縮小至 1.15 倍, 若依學習曲線公式 (3) 與 (4) 預測模式推估, 當高齡組練習約需近千次 (933 次) 時, 其完成時間將會與年輕組相當, 但這樣的結果於現實世界中似乎難以實現, 如兩條學習曲線尾端呈現趨於平行而不會交接, 即高齡者無法趕上年輕人的速度。此表示高齡者的訓練學習過程中, 高齡者相對年輕人在學習初期經歷程序、設備等探索理解之認知學習, 其進步幅度較年輕人大, 使初期與年輕人表現差距快速縮小; 而待高齡者認知理解適應後, 進入到重複練習至動作熟練的學習階段, 屬進步幅度較小且穩定的動作技能學習, 但其表現仍與年輕人保持一定落差, 故此代表高齡者於駕駛模擬器學習訓練時, 應給予高齡者足夠學習練習次數, 使達到學習表現得穩定階段, 且於學習要求上, 應訂定相對於年輕人較低, 但仍符合安全規範的標準, 並據此標準安排規劃訓練期程, 以提升高齡者學習成效。

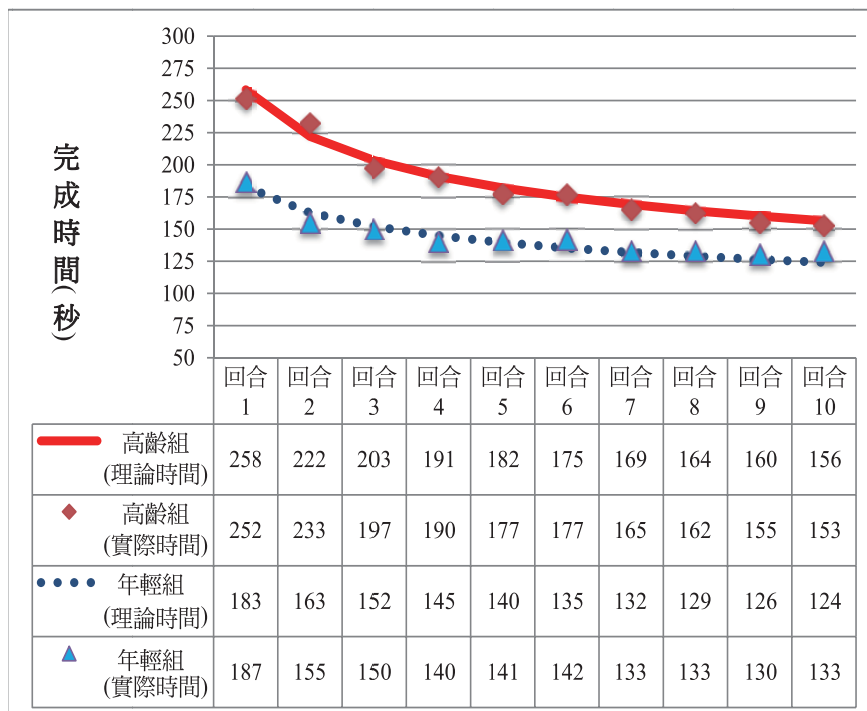


圖 4 高齡組與年輕組之學習曲線

4.2 作業負荷

NASA-TLX 相關敘述性統計資料如表 4 所示，本研究將 NASA-TLX 進行巢狀因子變異數分析後，發現雖然年齡（高齡組、年輕組）對作業負荷沒有顯著的影響 ($F(1,32)=0.35$, $p=0.5613$)，兩組各自的平均負荷差異不顯著（高齡組：55.38；年輕組：56.97），而不同回合數（第 1、5、10 回合）的 NASA-TLX 則有顯著差異 ($F(2,32)=3.90$, $p=0.0305$)，全體受測者的駕駛負荷從第 1 回合 61.17 下降至第 10 回合 52.08，但從年齡與回合數的交互作用發現對負荷呈現顯著影響 ($F(2,32)=3.33$, $p=0.0486$)，茲將此交互作用繪製於圖 5。

圖 5 顯示高齡者初期負荷高於年輕人，隨著模擬器的操作學習回合數增加，高齡組負荷降幅明顯高於年輕組，年輕組的負荷變化則呈現相對穩定，此表示練習次數對高齡組降低作業負荷的效果優於年輕組，從上述負荷變化情形，可能代表高齡者對駕駛模擬器此類科技設備操作相對較陌生，導致初期操作因摸索適應而相對較緊張及需投入更多注意力資源，造成較高負荷，但隨著練習適應理解後則能明顯降低負荷，此部分符合本研究推論，代表多次練習使駕駛操作熟悉，使減少注意力資源投入，進而降低駕駛負荷；而年輕組可能對駕駛模擬器操作方面較無科技設備的適應問題，導致年輕組負荷無明顯負荷變化，故於探討駕駛模擬器不同年齡的學習訓練成效時，可能要多注意高齡者對於模擬器的設備接受度問題，應於學習訓練過程中了解其負荷變化，給予對應足夠之操作學習次數，使其舒緩適應初期高負荷，避免模擬器的操作適應負荷影響其學習成效。

在性別方面，發現各年齡族群內男女的 NASA-TLX 有顯著差異 ($F(2,32)=3.30$, $p=0.0496$)，即各年齡族群裡的女性作業負荷均顯著高於男性之現象，尤其高齡組的男、女性差距更明顯（高齡男 50.6／高齡女 60.17；年輕男 55.91／年輕女 58.02），此代表女性在駕駛模擬器操作上須付出更多努力以完成駕駛任務，造成女性較男性感受更高的負荷，探究此因可能與兩性之駕駛經驗、駕駛頻率或科技設備操作接受度有關，故對於駕駛模擬器之女性操作學習成效，亦同樣須留意操作負荷問題，即使性別對前述的 T_1 與 ϕ 並無顯著影響。

五、結論與建議

本研究為探討高齡者與年輕人駕駛模擬器操作學習的學習曲線，了解學習曲線的第 1 次完成理論時間 (T_1) 與學習率 (ϕ) 之差異，及學習過程的作業負荷變化情形，以作為高齡駕駛學習訓練之參考。

實驗結果發現高齡者第一次完成理論時間 (T_1) 明顯較年輕人久，此時間之差距，代表高齡的反應變慢，處理訊息能力及適應力下降，所需操作時間變長，但高齡者與年輕人在學習率 (ϕ) 方面則無顯著差異。透過學習曲線圖的觀察，並以學習曲線公式 (3) 與 (4) 來推算高齡者與年輕人練習次數與所對應之個別完成時間，結果顯示高齡者之學習能力並未因生理退化而低於年輕人，而從兩者學習曲線發現高齡者初期之進步幅度優於年輕人，

表 4 NASA-TLX 敘述性統計表

因子	水準		平均值	標準差
全體			56.18	12.52
年齡	年輕		56.97	9.46
	高齡		55.38	15.10
回合數	1		61.17	14.27
	5		55.28	9.35
	10		52.08	12.28
年齡×性別	年輕	女性	58.02	9.04
		男性	55.91	10.07
	高齡	女性	60.17	17.01
		男性	50.60	11.56
年齡×回合數	年輕	1	58.03	13.44
		5	55.87	6.18
		10	57.00	8.19
	高齡	1	64.30	15.09
		5	54.70	12.07
		10	47.15	14.04

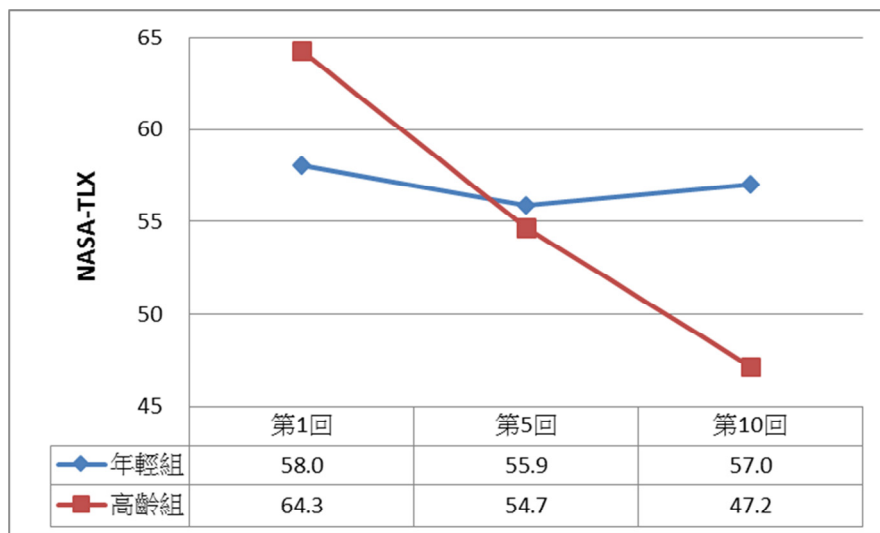


圖 5 回合數對 NASA-TLX 作業負荷的影響

兩者間有縮小表現差距之傾向，而至學習後期兩者間差距逐漸趨穩固定，代表高齡者於模擬器操作上終究難以達到年輕人相同績效水準，故未來對於高齡駕駛的安全規範或駕訓設

計方面有必要改變，如高齡駕駛能力檢測標準之設定，或駕駛訓練課程規劃是否足以達到穩定表現，或車輛安全輔助設備之加強以提升高齡駕駛能力。

在 NASA-TLX 作業負荷方面，全體駕駛負荷隨著學習過程有顯著的降低趨勢，尤其高齡者有相較年輕人有較明顯的降幅，代表高齡者初始摸索調適至後期動作熟練的學習過程，負荷感受明顯減少；而在性別方面，發現各年齡層女性作業負荷均顯著高於男性之現象，尤其高齡者男、女性差異更明顯，此代表駕駛模擬器的操作學習上，高齡與女性須付出更多努力調整適應，尤其高齡女性感受最深，故對於高齡與女性之駕駛模擬器操作學習方面，可能更須多留意避免操作負荷影響駕駛學習等問題。

本研究發現高齡者初期操作時間較長，即高齡駕駛所需反應時間或距離須增加；而在學習能力上高齡者與年輕人間並無差異，均可透過多次學習而進步，且高齡者初期學習表現有趕上年輕人之趨勢，特別的是高齡者的負荷隨著學習過程較年輕人明顯降低，代表駕駛模擬器用以訓練高齡駕駛能力方面，亦得到正向肯定的結果。

透過學習曲線了解高齡者對於模擬駕訓的學習成效，如不同水準表現所需相對的練習次數等，此結果對於高齡駕駛的管理或法規的設計均可納入考量，在高齡者駕駛管理方面，其應用價值包含了解駛模擬器訓練之實用成效，未來對於訓練內容之設計，如學習次數與學習成效之標準可提供參考，如高齡者需要相對較多練習次數以達到學習穩定；另對於高齡駕駛管理之法規面，除以往視力、辨色能力、聽力、活動能力等生理檢測外，亦可提供駕駛能力之模擬器檢測的參考方向，包含此檢測之練習表現的考核標準，如高齡者的駕駛表現或經過學習訓練後之駕駛表現是否達到符合安全的水準。本實驗對於未來高齡駕駛之訓練與考核管理提供一方向藍圖，但受限於設備及場景限制，後續可再進一步發展不同難度與類別（操作技能或風險認知等）的訓練課程，或此課程學習成效標準與相對應訓練資源投入之關係。

參考文獻

1. 內政部戶政司人口資料庫，「歷年全國人口統計資料－人口年齡結構指標」，<http://www.ris.gov.tw/346>，民國 104 年。
2. 內政部，人口政策白皮書：少子女化，高齡化及移民，民國 102 年。
3. 林萬億，「高齡社會研究簡介暨高齡社會調查結果初步分析」，高齡社會的來臨成果發表暨學術研討會論文集，行政院國家科學發展委員會高齡社會研究團隊，民國 97 年，頁 1-66。
4. 內政部，102 年道路交通事故高齡者特性分析，民國 102 年。
5. Roenker, D. L., Cissell, G. M., Ball, K. K., Wadley, V. G., and Edwards, J. D., "Speed-of-Processing and Driving Simulator Training Result in Improved Driving Performance", *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 45, No. 2, 2003, pp. 218-233.

6. 陳子儀、陳雅珍，「高齡者交通安全問題對策之研究」，交通部道路交通安全督導委員會研究報告，民國 82 年。
7. 交通部性別統計資料專區，「領有駕駛執照人數－按年齡」
<http://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=62&parentpath=0,6>，民國 104 年。
8. 賴建丞、白璐、蔡行瀚、簡戊鑑、張瑋庭、林佳欣、洪宇箴，「臺灣 1986-2007 年事故傷害死亡趨勢分析」，*北市醫學雜誌*，第 6 卷，第 3 期，民國 98 年，頁 174-184。
9. Lee, H. C., Cameron, D., and Lee, A. H., "Assessing the Driving Performance of Older Adult Drivers: On-Road Versus Simulated Driving", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 35, No. 5, 2003, pp.797-803.
10. 交通部運輸研究所，*汽車駕駛模擬系統軟硬體之擴充與測試駕駛行為實例應用之研究*，民國 94 年。
11. 邱士軒，「性別及年齡差異對汽車駕駛的情境知覺之影響」，國立清華大學工業工程與工程管理學系碩士論文，民國 96 年。
12. 陳冠倫，「銀髮族駕駛行為模式分析」，南開科技大學車輛與機電產業研究所碩士論文，民國 101 年。
13. 吳欣潔、林稚婷、邱敏綺，「虛擬駕駛訓練系統的效用評估」，中國工業工程學會 101 年度年會暨學術研討會，大葉大學，民國 101 年。
14. 劉伯祥、石裕川、孫益生，「大貨車 5 項駕訓科目之工作負荷及訓練成效評估研究」，*運輸計劃季刊*，第 39 卷，第 3 期，民國 99 年，頁 251-276。
15. Eby, D. W., Trombley, D., Molnar, L. J., and Shope, J. T., "The Assessment of Older Driver's Capabilities: A Review of the Literature", *Ann Arbor*, Vol. 1001, 1998, pp.48109.
16. Wright, T. P., "Factors Affecting the Cost of Airplanes", *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 3, No. 2, 1936, pp.122-128.
17. Yelle, L. E., "The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey", *Decision Sciences*, Vol. 10, No. 2, 1979, pp. 302-328.
18. Anzanello, M. J. and Fogliatto, F. S., "Learning Curve Models and Applications: Literature Review and Research Directions", *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 41, No. 5, 2011, pp. 573-583.
19. Blancett, R. S., "Learning from Productivity Learning Curves", *Research-Technology Management*, Vol. 45, No. 3, 2002, pp. 54-58.
20. Vits, J. and Gelders, L., "Performance Improvement Theory", *International Journal of Production Economics*, Vol. 77, No. 3, 2002, pp. 285-298.
21. Globerson, S., Levin, N., and Shtub, A., "The Impact of Breaks on Forgetting When Performing a Repetitive Task", *IIE Transactions*, Vol. 21, No. 4, 1989, pp. 376-381.
22. Dar-el, E. M., Ayas, K., and Gilad, I., "A Dual-Phase Model for the Individual Learning Process in Industrial Tasks", *IIE Transactions*, Vol. 27, No. 3, 1995, pp. 265-271.
23. Konz, S. A. and Johnson, S, *Work Design: Industrial Ergonomics*, Holcomb Hathaway, Scottsdale, AZ, 2000.
24. Reid, S. A. and Mirka, G. A., "Learning Curve Analysis of a Patient Lift-Assist Device", *Applied Ergonomics*, Vol. 38, No. 6, 2007, pp. 765-771.

25. Sahami, S., Jenkins, J. M., and Sayed, T., "Methodology to Analyze Adaptation in Driving Simulators", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2138, No. 1, 2009, pp. 94-101.
26. Sahami, S. and Sayed, T., "Insight into Steering Adaptation Patterns in a Driving Simulator", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2185, No. 1, 2010, pp. 33-39.
27. Sahami, S. and Sayed, T., "How Drivers Adapt to Drive in Driving Simulator, and What Is the Impact of Practice Scenario on the Research ?", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 16, 2013, pp. 41-52.
28. Ronen, A. and Yair, N., "The Adaptation Period to a Driving Simulator", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 18, 2013, pp. 94-106.
29. 黃富順、楊國德，**高齡學**，五南文化事業，臺北，民國 100 年。
30. Buch, E. R., Young, S., and Contreras-Vidal, J. L., "Visuomotor Adaptation in Normal Aging", *Learning & Memory*, Vol. 10, No. 1, 2003, pp. 55-63.
31. Harrington, D. L. and Haaland, K. Y., "Skill Learning in the Elderly: Diminished Implicit and Explicit Memory for a Motor Sequence", *Psychology and Aging*, Vol. 7, No. 3, 1992, pp. 425-434.
32. Seidler, R. D., "Multiple Motor Learning Experiences Enhance Motor Adaptability", *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 16, No. 1, 2004, pp. 65-73.
33. Seidler, R. D., "Older Adults Can Learn to Learn New Motor Skills", *Behavioural Brain Research*, Vol. 183, No. 1, 2007, pp. 118-122.
34. Dorbath, L., Hasselhorn, M., and Titz, C., "Aging and Executive Functioning: A Training Study on Focus-Switching", *Frontiers in Psychology*, Vol. 2, No. 257, 2011, pp. 1-12.
35. Sheridan, T., "Mental Workload-What Is It? Why Bother with It?", *Human Factors Society Bulletin*, Vol. 23, No. 2, 1980, pp. 1-2.
36. Hart, S. G. and Staveland, L. E., "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research", *Advances in Psychology*, Vol. 52, 1988, pp. 139-183.
37. 董基良、黃俊仁、馮君平、林志勇、黃維信、宋文旭，**駕駛人員生理功能、心理因素、行為特質與交通安全之關聯性研究（1/3）**，交通部運研所，臺北，民國 96 年。
38. Fátima Pereira da Silva, "Mental Workload, Task Demand and Driving Performance: What Relation?", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 162, 2014, pp. 310-319.
39. 施善羸、吳志富，「車用導航系統對於駕駛績效之影響研究」，大同大學工業設計研究所碩士論文，民國 94 年。
40. Jahn, G., Oehme, A., Krems, J. F., and Gelau, C., "Peripheral Detection as a Workload Measure in Driving: Effects of Traffic Complexity and Route Guidance System Use in a Driving Study", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 8, No. 3, 2005, pp. 255-275.
41. Kim, H., Kwon, S., Heo, J., Lee, H., and Chung, M. K., "The Effect of Touch-Key Size on the Usability of In-Vehicle Information Systems and Driving Safety During Simulated

- Driving”, *Applied Ergonomics*, Vol. 45, No. 3, 2014, pp. 379-388.
42. Sanders, M. S. and McCormick, E. J., *Human Factors in Engineering and Design*, McGraw-Hill, New York, 1993.
43. Patten, C. J. D., Kircher, A., Östlund, J., Nilsson, L., and Svenson, O., “Driver Experience and Cognitive Workload in Different Traffic Environments”, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 38, No. 5, 2006, pp. 887-894.
44. Konstantopoulos, P., Chapman, P., and Crundall, D., “Driver's Visual Attention as a Function of Driving Experience and Visibility-Using a Driving Simulator to Explore Drivers' Eye Movements in Day, Night and Rain Driving”, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 42, No. 3, 2010, pp. 827-834.
45. van Leeuwen, P. M., Happee, R., and de Winter, J. C. F., “Vertical Field of View Restriction in Driver Training: A Simulator-Based Evaluation”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 24, 2014, pp. 169-182.

粒子群最佳化巨集啟發式方法求解 多貨艙車輛路線問題之研究

A PARTICLE SWARM OPTIMIZATION SOLUTION APPROACH FOR THE MULTI-COMPARTMENT VEHICLE ROUTING PROBLEM

韓復華 Anthony F. Han¹

朱佑旌 Yu-Ching Chu²

林致瑄 Jhih-Syuan Lin³

(104 年 5 月 26 日收稿，105 年 1 月 12 日第 1 次修改，
105 年 5 月 25 日第 2 次修改，105 年 6 月 15 日定稿)

摘 要

多貨艙車輛路線問題 (Multi-Compartment Vehicle Routing Problem, MCVRP) 是傳統車輛路線問題 (Vehicle Routing Problem, VRP) 的衍生問題之一。在 MCVRP 中每位顧客可有多種物品需要配送，各車輛亦設有多個不同固定容量的隔艙，各自對應一種特定物品的裝載使用。MCVRP 依「不可分送」與「可分送」之條件分為兩種型態，前者要求每位顧客的多種物品必須由單一車輛服務；後者則允許同一顧客由多部車輛分批服務。本研究應用粒子群最佳化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 巨集啟發式方法求解 MCVRP。首先，依據「不可分送」與「可分送」的問題型態，分別設計兩種編解碼方法作為粒子解產生與演化學習的基礎。此外，各迭代則採用包括有兩種路線內與六種路線間交換法的變動鄰域下降 (Variable

-
1. 國立交通大學運輸科技與管理學系教授 (聯絡地址：30010 新竹市東區大學路 1001 號 交通大學運輸科技與管理學系；電話：03-5731680；E-mail: afhan@mail.nctu.edu.tw)。
 2. 國立交通大學運輸科技與管理學系博士候選人。
 3. 國立交通大學運輸科技與管理學系碩士。

Neighborhood Descent, VND) 改善模組以增強搜尋之深度，其中針對「可分送」的問題型態亦提出一個新的 $(1, 0)^*$ 鄰域搜尋法。本研究以兩組國際標準例題進行測試，發現 80 題例題中，本研究可求得 16 題現有文獻最佳解，並改善了 34 題文獻最佳解結果。

關鍵詞：多貨艙車輛路線問題；粒子群最佳化；變動鄰域下降；巨集啟發式方法

ABSTRACT

Multi-compartment vehicle routing problem (MCVRP) is a variant of the conventional vehicle routing problem (VRP). The MCVRP considers multiple products to be delivered, and each product must load on a specific compartment in the vehicle. The problem considers two cases for customer delivery, “no split” and “split”, depending on if the multiple products are allowed to be split among multiple routes. We applied the particle swarm optimization (PSO) metaheuristic approach to solve the MCVRP. Two new solution representation methods were designed to generate and evolve the particles for both the no-split and split cases respectively. A variable neighborhood descent (VND) module with an innovative $(1, 0)^$ node-interchange operator was built to improve the quantity of particles during its evolution process. Two sets of benchmark instances for MCVRP were adopted to test the proposed PSO metaheuristic method. Results showed that the PSO method is very competitive as compared to the best algorithms published in the MCVRP literature. Out of the 80 benchmark instances tested, the PSO found 16, and improved 34 best known solutions.*

Key Words: Multi-Compartment vehicle routing problem (MCVRP); Particle swarm optimization (PSO); Variable neighborhood descent (VND); Metaheuristic

一、前言

近年來，連鎖便利商店已成為民眾生活圈中不可或缺的角色。便利商店提供的物品與服務日趨多元，例如冷凍食品、飲料、民生用品以及服務性物品等等，目標是希望能夠滿足民眾大部分的日常所需。面對此種物品多元化的趨勢，物流配送的作業亦越來越複雜。物流作業進行時，除了將正確的物品依照要求的時間配送至門店以外，更要注意物品有其不同的配送條件以及限制，例如配送車艙的環境條件或是即時性等不同的限制。因此，近年來有許多研究將原本的车辆路線問題 (vehicle routing problem, VRP) 搭配實務上各種不同的配送條件進行調整衍伸出更能夠貼合目前物流作業的服務需求。

多貨艙車輛路線問題 (multi-compartment vehicle routing problem, MCVRP) 即是以 VRP 作為基礎的問題變形。MCVRP 假設各顧客同時具有多種不同特性的物品，因此貨車

上之貨艙分隔為多個固定容量的隔艙，並各自對應一種特定物品的裝載使用。MCVRP 是一個符合實務需求的車輛路線問題，舉凡在生鮮超商低溫配送以及石油產業廢油料回收等配送問題均可應用。圖 1 即為目前在歐洲使用的低溫配送貨車的內部隔艙圖，其中左邊車艙為冷藏貨艙，右邊車艙為冷凍貨艙。

MCVRP 可分為「不可分送」與「可分送」兩種配送條件的問題型態，前者要求每位顧客的多種物品必須由單一車輛服務；後者則允許單一顧客由多部車輛分批服務，兩種不同型態的 MCVRP 目標皆為總路線成本最小。由於 MCVRP 為 VRP 的衍伸問題，在求解的複雜度上同屬 NP-hard，目前相關的解法研究皆是設計以巨集啟發式解法進行求解，期望能在短時間內求得品質佳的近似解。



圖 1 低溫配送貨車內部隔艙圖

資料來源：<http://goo.gl/YUPQVP>

近 20 年來，巨集啟發式解法在 VRP 相關問題上的求解已有非常廣泛的應用，其中群體智慧 (swarm intelligence, SI) 的演算機制亦有相當顯著的績效。群體智慧演算法的特色是藉由大量的個體透過自身求解的經驗提供資訊，進一步幫助群體制定搜尋的策略，以達到最佳化的目標。群體智慧演算法相當繁多，例如基因演算法 (genetic algorithm, GA)、螞蟻最佳化演算法 (ant colony optimization, ACO)、粒子群最佳化演算法 (particle swarm optimization, PSO) 皆曾被有效應用在 VRP 相關問題的求解上。

MCVRP 在實務的應用上是十分具有價值的，由於問題較為新穎，相關的研究並未多見。有鑑於群體智慧在 VRP 相關問題的成功經驗，本研究首次應用粒子群最佳化演算法 (以下簡稱為粒子群演算法或 PSO) 的巨集架構，針對 MCVRP 提出一套新的啟發式解法。本文後續結構如下：第二節為相關文獻回顧；第三節敘述本文應用 PSO 求解 MCVRP 之架構，包括 PSO 粒子群編解碼的設計、變動鄰域下降 (variable neighborhood descent, VND) 改

善模組的建構與 PSO 的執程序序；第四節提出兩組標竿題庫測試的結果與其績效分析的報告；全文以第五節總結。

二、文獻回顧

2.1 粒子群演算法

粒子群演算法是由 Kennedy 與 Eberhart^[1] 仿效鳥群覓食的行為所提出。該方法是利用粒子群模擬鳥群在尋找食物的過程中，除了根據本身經驗來判斷最佳覓食地點外，亦藉由特別的訊息傳遞方式相互溝通進行覓食的行為，使粒子群能在解集合的空間內逐步向最佳解移動。

2.1.1 PSO 粒子群演算法

PSO 是一套在多維度連續空間中進行搜尋的演算法，PSO 需要產生 I 個粒子進行 T 個迭代搜尋。各粒子 i 皆代表一個解， $i = 1, 2, \dots, I$ 。粒子 i 的編碼 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD}\}$ ，其中 x_{id} 為粒子 i 在維度 d 的位置， $d = 1, 2, \dots, D$ 。 X_i 能夠在解碼後計算出其相對應的適應值 $\varphi(X_i)$ 。隨著迭代 t 的累進， $t = 1, 2, \dots, T$ ，各粒子在求解空間中移動其位置以搜尋更好的結果。各粒子位移的向量會受到以下 3 個因素所影響：(1) 該粒子本身的移動慣性，(2) 本身演算到目前為止所找到的最佳解，即個別最佳解 (personal best, pbest)，以及 (3) 全體粒子演算到目前為止所找到的群體最佳解 (global best, gbest)。利用以上 3 個因子，各個粒子可計算新的移動向量，並決定下一個迭代的位置。粒子移動公式如下，其中式 (1) 為移動速度公式，式 (2) 為粒子移動至新位置的計算公式。

$$v_{id}(t+1) = w \times v_{id}(t) + c_p u_1 \times (P_{id} - x_{id}(t)) + c_g u_2 \times (P_{gd} - x_{id}(t)) \quad (1)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (2)$$

上述兩式中 $v_{id}(t)$ 表示第 t 個迭代時粒子 i 在維度 d 的移動向量； P_{id} 表示粒子 i 的個別最佳解 (pbest) 在維度 d 的位置； P_{gd} 表示群體最佳解 (gbest) 在維度 d 的位置； c_p 與 c_g 分別為 pbest 與 gbest 的學習因子， w 為慣性權重， u_1 、 u_2 為介於 0 與 1 間的隨機亂數值， $x_{id}(t)$ 表示第 t 個迭代時粒子 i 在維度 d 的位置。

粒子 i 從第 t 個迭代的位置，即 $x_i(t)$ ，移動至下一迭代的位置，即 $x_i(t+1)$ ，的示意圖如圖 2 所示。

在 PSO 移動公式的參數部分，由於慣性權重值與學習因子會影響粒子在空間搜尋時的範圍以及方向，因此參數設計的好壞會進而影響求解的效果。

關於 PSO 的慣性係數 w ，Shi 與 Eberhart^[2] 指出當其值越大時，每次的位移幅度相對

較大，對應在求解上則是在全域探索 (global) 的能力會有較佳的表現，亦可避免粒子迅速收斂而陷入區域最佳解；反之，當 w 值較小時，則在區域搜尋 (local) 能力較佳，可提升搜尋在深度的效果。因此為使 PSO 在廣度搜尋以及局部搜尋取得平衡，該研究建議慣性係數 w 的設定可隨迭代數 (t) 線性遞減，慣性係數 w 的遞減公式如式 (3) 所示，其中 T 表迭代總次數：

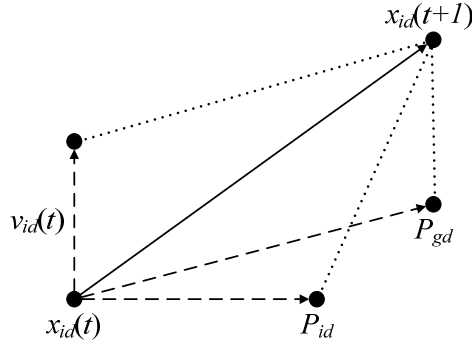


圖 2 粒子移動示意圖

$$w(t) = w(1) - \frac{w(1) - w(T)}{T - 1} \times (t - 1) \quad (3)$$

線性遞減型態的慣性係數 w 可使粒子群起先在大範圍進行搜尋，再逐漸由降低粒子的慣性速度，使各粒子進入一個較佳的區域深度搜尋，以獲得品質更好的求解結果。

於學習因子方面， c_p 、 c_g 分別代表粒子個體最佳解、群體最佳解影響的比重，當 c_p 值較高時，各個粒子能依自身的搜尋經驗有效地搜尋各個可行解區域，但收斂速度較慢；當 c_g 值較高時，能使粒子群體迅速移動朝向群體最佳解的區域搜尋，同時意謂粒子搜尋其他空間的可能性減少，易使求解落入局部最佳解。一般設定 c_p 、 c_g 為相同值皆為 2 或皆為 1.49445^[3,4]，意味著粒子在自我搜尋以及在社會模式的搜尋擁有相同的比重。

除了傳統 PSO 的 pbest 與 gbest 兩個學習因子外，Pongchairerks 與 Kachitvichyanukul^[4] 增加考慮局部最佳解 (local best, lbest) 與鄰近最佳解 (near neighborhood best, nbest) 兩個新的學習因子，提出 GLNPSO 學習架構。其中，lbest 為該粒子個別最佳解 pbest 周圍最靠近的 K 個其他粒子中適應值最小的粒子，nbest 則為該粒子周圍適應值與距離比值 FDR (fitness distance ratio) 最大的粒子，對粒子 i 而言，其與另一個粒子 j 在維度 d 上的 FDR_{jd} 值定義如下：

$$FDR_{jd} = \frac{\varphi(X_i) - \varphi(P_j)}{|x_{id} - p_{jd}|}, \quad i \neq j \quad (4)$$

式 (4) 中 $\varphi(X_i)$ 與 $\varphi(P_j)$ 分別為粒子 i 現行解與粒子 j 的 pbest 之適應值, x_{id} 與 P_{jd} 分別為粒子 i 在維度 d 的位置與粒子 j 的 pbest 在維度 d 的位置。換言之, 若粒子 $\alpha = \arg \max_{j \in N} \{FDR_{ijd} | i \neq j\}$, 則粒子 α 為粒子 i 在維度 d 的鄰近最佳解 nbest, 亦即 $P_{\alpha d}$ 為 x_{id} 的 nbest。GLNPSO 綜合移動慣性與 4 個學習因子 (pbest、gbest、lbest 以及 nbest), 將原先粒子速度更新的公式, 式 (1), 修改為下列之式 (5):

$$v_{id}(t+1) = w(t)v_{id}(t) + c_p u_1 (P_{id} - x_{id}(t)) + c_g u_2 (P_{gd} - x_{id}(t)) + c_l u_3 (P_{id}^L - x_{id}(t)) + c_n u_4 (P_{id}^N - x_{id}(t)) \quad (5)$$

上式中 P_{id}^L 與 P_{id}^N 分別表示粒子 i 的 lbest 與 nbest 在維度 d 的位置, c_l 與 c_n 分別為 lbest 與 nbest 的學習因子, u_1 、 u_2 、 u_3 以及 u_4 為介於 0 到 1 間的隨機亂數值。參數設定方面, c_g 、 c_p 、 c_l 與 c_n 在文獻中^[5-7] 建議以 0.5、0.5、1.5 與 1.5 的組合設定。

2.1.2 PSO 求解車輛路線問題

傳統 PSO 的位移公式皆是連續性的計算方式, 基本上可直接適用於連續解空間搜尋的問題^[1,8,9]。若要將 PSO 應用於離散的 VRP 上, 則需要特殊的解碼技巧將粒子的編碼轉換成二元整數型態的路線解。近年來, 在 PSO 應用於 VRP 相關問題的求解上已有大量的研究, 並且產生許多良好的成果。

PSO 最早應用於 VRP 的研究為 2006 年的 Chen 等人^[10], 作者將離散型的 PSO 編碼搭配模擬退火法 (simulated annealing) 求解傳統 CVRP (capacitated VRP), 測試 16 題 VRP 標竿例題, 結果與已知最佳解 (best known solution, BKS) 平均誤差為 0.97%。

Ai 與 Kachitvichyanukul^[5,11] 提出 SR-1 與 SR-2 兩種連續性編解碼模式搭配 GLNPSO 學習策略應用於求解 CVRP 以及同時收送貨的 VRPSPD (VRP with simultaneous pickup and delivery)。求解的結果與當時 BKS 的平均誤差在 Christofides 等人^[12] 提出的 14 題 CVRP 標竿例題部分為 0.88%, 另在 98 題 VRPSPD 標竿例題部分則為 -4.21%。

Marinakis 等人^[13] 年將 PSO 混合 3 種方法論求解 CVRP 問題, 包含多重鄰域搜尋—貪心隨機適應搜尋程序 (multiple phase neighborhood search—greedy randomized adaptive search procedure)、擴大鄰域搜尋 (expanding neighborhood search) 以及路徑重新連結 (path relinking)。該研究以 14 題 CVRP 標竿例題^[8] 進行測試, 結果與 BKS 誤差僅 0.08%。

Qi^[14] 嘗試以離散編碼 PSO 配合 ILS (iterated local search) 測試 CVRP, 該研究於 12 題 CVRP 標竿例題, 平均誤差為 0.57%。

Goksal 等人^[15] 提出一套 PSO 搭配變動鄰域尋優法 (variable neighborhood descent, VND) 求解 VRPSPD 與 VRPMPD (VRP with mixed pickup and delivery) 兩個 VRP 相關問題, 求解結果與當時 BKS 的平均誤差分別為 0.01% (VRPSPD) 以及 -1.58% (VRPMPD)。

韓復華與楊禮瑛^[6] 參考 SR-2 的編碼方式^[5] 以及 GLSPSO 的學習策略求解 OVRP。

該研究以 2-opt*、1-0、1-1、2-opt 以及 Or-opt 等 5 種鄰域改善法搭配求解。測試 OVRP 標竿題庫整體平均誤差僅為 0.57%。該研究亦嘗試求解 VRP，整體績效平均誤差率為 0.51%。

Belmecheri 等人^[16]嘗試將 PSO 應用於求解具時窗限制的多車種混合回程取貨車輛路線問題 HVRPMBTW (VRP with heterogeneous fleet, mixed backhauls, and time windows)，結果發現 PSO 的求解績效優於 ACO。

Norouzi 等人^[17]提出具競爭時窗週期性車輛路線問題 PVRPCTW (periodic vehicle routing problem with competitive time windows)，並利用粒子具重新產生機制的 IPSO 進行求解測試。在小型例題測試部分先與 Lingo 比較，發現 IPSO 在求解時間上限 1 小時的條件下，與最佳解的求解誤差為 0.01%，優於 Lingo 的 0.04%。在大型例題部分則以 IPSO 與傳統 PSO 進行測試比較，求解結果呈現 IPSO 在所有例題皆可求得優於 PSO 的答案，求解時間約為傳統 PSO 的 1.5 倍。

Kachitvichyanukul 等人^[7]提出一般化多場站多重取送需求車輛路線問題 GVRP-MDMPDR (generalized multi-depot vehicle routing problem with multiple pickup and delivery requests)，並以 GLNPSO 搭配 3 種不同的粒子編碼進行求解測試。

2.2 MCVRP 數學定義以及相關研究

2.2.1 MCVRP 數學模式

MCVRP 由 Fallahi 等人^[18]首次提出，並定義問題的網路為完全連接且無方向性，其中節點集合 $N' = \{0, 1, \dots, n\}$ (節點 0 表示場站) 以及 n 個顧客的顧客集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ，各節線 (i, j) 的距離成本 $c_{ij} = c_{ji}$ 。假設每個顧客有 p 種不同的分艙物品需要配送，令 $P = \{1, 2, \dots, p\}$ 代表物品集合。所有的需求由 v 輛相同規格的車輛進行服務 (單一車種型態)。每輛車輛具有 p 個貨艙，車隊的集合 $V = \{1, 2, \dots, v\}$ 。各車輛的第 p 個貨艙僅能裝載物品 p ，各貨艙的容量 Q_p 固定已知。顧客 i 對於物品 p 的需求 q_{ip} 大於等於 0，且小於等於 Q_p ，在不同物品間的需求量無特定規則。各車輛具有服務時間長度的限制 L 。MCVRP 的數學模式如下所述：

$$\text{Min} \quad \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in V} c_{ij} x_{ijk} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in N'} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall j \in N, \forall k \in V, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N'} x_{ijk} = \sum_{i \in N'} x_{jik}, \quad \forall j \in N, \forall k \in V \quad (8)$$

$$\sum_{i,j \in N'} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall k \in V, \forall S \subseteq V, |S| \geq 2, \quad (9)$$

$$y_{jkp} \leq \sum_{i \in N'} x_{ijk}, \quad \forall j \in N, \forall k \in V, \forall p \in P, \quad (10)$$

$$\sum_{k \in V} y_{jkp} = 1, \quad \forall j \in N, \forall p \in P, \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N} y_{jkp} q_{jp} \leq Q_p, \quad \forall k \in V, \forall p \in P, \quad (12)$$

$$\sum_{i, j \in N'} c_{ij} x_{ijk} \leq L, \quad \forall k \in V, \quad (13)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N', \forall j \in N', i \neq j, \forall k \in V, \quad (14)$$

$$y_{jkp} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in N, \forall k \in V, \forall p \in P, q_{jp} \neq 0, \quad (15)$$

上述數學模式中，式 (6) 為目標函數，表示車輛行駛距離總成本最小化；式 (7) 表示限制每一顧客點僅能由一輛車完成服務；式 (8) 表示流量守恆；式 (9) 避免子迴路產生；式 (10) 表示當車輛 k 配送商品 p 給顧客 j 時，設定變數 y_{jkp} 值為 1，否則為 0；式 (11) 表示顧客 j 對於商品 p 的需求由一輛車服務；式 (12) 與式 (13) 分別表示車容量限制與車輛時間限制；式 (14) 表示決策變數 x_{ijk} 為二元變數，當車輛 k 自節點 i 行駛至節點 j 即為 1，否則為 0；式 (15) 表示決策變數 y_{jkp} 為二元變數，當顧客 j 由車輛 k 服務產品 p 即為 1，否則為 0。

2.2.2 MCVRP 相關解法回顧

多艙等特性的車輛路線相關問題最早在 1979 年被 Christofides 等人^[12]提及，並認為是 VRP 的延伸問題。後續則開始有相關的研究產生，例如針對食品雜貨^[18,19]，石油配送^[20-22]或是資源回收^[23]的實務應用。雖然這些研究皆具有多艙等的特性，但所針對的個案情境不同，研究所設定的限制亦有差異。本研究所探討的 MCVRP 問題為 2008 年 Fallahi 等人^[18]所提出的研究問題。該研究針對 MCVRP 提出數學模式，明確定義 MCVRP 的問題目標與限制。研究中並提出測試的標竿題庫，以供後續研究參考。目前針對 MCVRP 提出解法並以標竿題庫進行測試的研究還未多見。以下分別進行回顧，並作為後續在本研究求解績效比較的對象。

Fallahi 等人^[18]設計以瀰母演算法 (memetic algorithm, MA) 以及禁制搜尋法 (tabu search, TS) 兩套巨集啟發式解法分別搭配 2-opt、Relocate 和 1-Interchange 求解 MCVRP。作者提出 2 套共 40 題例題的標竿題庫搭配進行測試，並以「不可分送」以及「可分送」兩種問題型態進行 MA 與 TS 兩種方法的績效比較。測試的結果發現，整體上 TS 的求解精確度優於 MA，求解效率則是 MA 優於 TS。「可分送」的平均求解績效平均優於「不可分送」。

Muyldermans 等人^[24]提出 guided local search (GLS) 求解 MCVRP。該研究使用節省法建構起始解並搭配 2-opt、Relocate、Exchange 以及 Cross 等 4 種鄰域搜尋法進行起始解改善，隨後進入 GLS 流程直到預設的停止條件達到為止。該研究以第一組標竿題庫中「無時間限制」之 9 題例題搭配「可分送」的問題型態進行績效測試，發現求得 5 題優於原先

Fallahi 等人^[18]的求解結果。

Mendoza 等人^[25]考慮隨機性需求下的 MCVRPD (MCVRP with stochastic demands) 進行求解。該研究以 MA 作為主要求解架構，並搭配 Relocate 以及 2-opt 鄰域搜尋法對染色體進行優化改善。該研究以不可分送的配送限制測試了 40 題標竿題庫，結果突破 13 題。

2.3 文獻回顧一小節

本研究回顧 PSO 相關演進以及應用於 VRP 相關之研究，發現該法在 VRP 問題上具有良好的求解效果。在 MCVRP 方面，發現多貨艙的車輛路線問題已在實務上非常具有應用的潛力，但直到 2008 年才由 Fallahi 等人^[18]提出問題之數學模式，因此目前相關研究尚未多見。

因此，本研究擬以 GLNPSO 學習策略應用於求解 MCVRP。參考 Ai 與 Kachitvichyanukul^[5, 11]提出的 SR-1 編解碼模組，設計適合 MCVRP 應用的粒子解產生模組。並針對標竿題庫不同艙「可分送」的特性，設計有效的鄰域交換法以增加搜尋深度。

三、應用 PSO 求解 MCVRP 之架構設計

在本研究所設計的 PSO 求解架構中是以 GLNPSO 作為學習策略，粒子群中的各粒子皆代表一個獨立的 MCVRP 的可行解，粒子數為粒子群的規模。各粒子可依其編碼的多維度變數值，對應到一個位置向量。本研究提出適當的解碼機制，將連續性的粒子編碼轉換成離散性的 MCVRP 粒子解。在解碼的機制中，我們將 MCVRP 的限制加入，使得解碼後的粒子解是為一個 MCVRP 的可行解。我們利用變動鄰域下降法改善每個粒子解，並計算改善後的解目標值作為該粒子的適應值。各粒子的適應值將決定出該迭代的學習對象，包含 GLNPSO 中的全域最佳解 gbest、個體最佳解 pbest、局部最佳解 lbest 以及鄰近最佳解 nbest。後續各粒子利用 GLNPSO 學習公式決定移動的速度並更新其編碼（位置向量）。本研究的求解架構即是反覆進行上述的解碼，改善以及學習更新等 3 個步驟，最後輸出過程中搜尋品質最佳的 MCVRP 路線結果。

本研究擬應用 GLNPSO 學習策略求解 MCVRP，分別設計 MCSR-1 以及 MCSR-2 兩套編解碼模組求解「不可分送」與「可分送」兩種類型的 MCVRP 問題。優化部分，除了傳統路線內與路線間的鄰域交換法以外，亦考慮多艙配送的問題特性，調整傳統 VRP 之鄰域搜尋法以強化求解功能，提出針對「可分送」問題特性的 (1, 0)*交換法以增加求解深度。本研究的整體求解架構主要包括 3 個部分：粒子群編解碼機制，鄰域搜尋模組以及 PSO 巨集求解程序，分別敘述於以下 3 個小節。

3.1 粒子群編解碼機制

Fallahi 等人^[18]將 MCVRP 分為「不可分送」與「可分送」兩種問題型態，「不可分送」限制顧客的所有物品僅能由單一車輛進行服務；「可分送」則允許物品依不同的特性可分開由不同的車輛進行服務。本研究針對這兩種不同的配送型態分別提出兩套新的 MCSR-1 與 MCSR-2 編解碼模組。

良好的編解碼方法是 PSO 在求解屬於非連續性的 VRP 相關問題的關鍵，因此我們參考 Ai 與 Kachitvichyanukul^[5,11]所提出的 SR-1 的編解碼概念，加入多艙等特性後，設計 MCSR-1 與 MCSR-2。SR-1 編解碼方式簡述如下：SR-1 的編碼是 1 個 $n+2m$ 維度的連續性編碼 (n 為顧客數； m 為車輛數)，其中 $2m$ 代表 m 部車輛於兩度空間座標 (x, y) 的虛擬位置。解碼時，先利用前 n 維度的位置由小而大排列產生顧客的清單，再以各顧客距各車輛虛擬點座標的遠近產生選用各車輛服務的優先次序，最後以最省插入法構建出對應的粒子解。然而，SR-1 編碼利用 (x, y) 座標建立車輛的虛擬點以構建車輛配送的種子路線的作法，是以兩點間直線距離的歐基里德兩度空間為前提假設。此種設計在車輛必須行駛在街道路網上的現實世界中是不切實際的。有鑑於此，本研究提出的 MCSR-1 與 MCSR-2 編解碼模組移除了原 SR-1 編碼的 (x, y) 座標位置設計，改以實際顧客點直接作為車輛種子點產生種子路線。使 MCSR-1 與 MCSR-2 在解碼時僅需要點與點間的距離矩陣即可應用，如此更能夠符合實務的需求。以下分別說明兩種編解碼模組的編碼方式以及解碼程序。

3.1.1 MCSR-1 編解碼模組

MCSR-1 是考慮「不可分送」的配送條件下所設計的編碼方式，其維度 (D) 等於顧客數 (n)。粒子群的初始化編碼是將各粒子的所有維度值以 0 到 1 間的隨機亂數產生完成。各粒子編碼後，便可進行後續解碼以及迭代學習的步驟。

MCSR-1 把一個 X_i 編碼轉換成一個 MCVRP 車輛路線解的「解碼」過程包括以下步驟：

步驟 1. (編碼排序)：將 X_i 編碼內的各個維度值 x_{id} 由小而大進行排序，因總維度 D 等於顧客數 n ，排序後的序列即定義為待服務顧客的集合 C 。

步驟 2. (選擇種子點並產生起始路線)：

2-1：以下列式 (16) 與式 (17) 分別計算預估車輛使用數 m ，以及車輛平均服務顧客數 g 。

$$m = \left\lceil \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P q_{ip} / \sum_{p=1}^P Q_p \right\rceil + 1 \quad (16)$$

$$g = \lceil D/m \rceil - 1 \quad (17)$$

2-2：設定各起始路線對應之種子點的候選集合 $L = C$ ，路線種子點集合 $S = \phi$ 。

2-3：選擇 L 中第 1 順位的顧客 f 為路線種子，構建一條起始路線 $\{0-f-0\}$ ，將 f 移出

集合 L 並加入集合 S ，即 $L = L \setminus \{f\}$ 且 $S = S \cup \{f\}$ 。

2-4：若 $|S| = m$ ，即已產生足夠之起始路線，則將所有的車輛種子點由 C 中移出，更新待服務顧客集合 $C = C \setminus S$ ，前往步驟 3，否則至步驟 2-5。

2-5：為避免種子路線彼此過於接近，自候選集合 L 中移出與 f 點距離成本最小的前 g 個顧客，返回步驟 2-3。

步驟 3. (插入路線的順位排序): 對 C 中的各顧客點，依其與各路線種子顧客的距離，由近而遠建立其插入路線的優先次序。

步驟 4. (將顧客依序插入或新創路線): 選擇 C 中第 1 順位的顧客為 c ，依照前一步驟產生的優先路線次序，嘗試在車輛裝載可行的前提下，以最省插入法將 c 插入路線成本增加最少的位置；若優先路線無法完全服務顧客 c 所有物品的需求量，則考慮插入次優先路線。此時有可能發生，所有現行路線均無可行的車容量可服務 c ，則新創一條路線 $\{0 - c - 0\}$ ，並將其設為其他尚未服務之顧客待插入路線的最後順位。待 c 點完成插入或新構路線後，則從 C 中移出，即 $C = C \setminus \{c\}$ 。

步驟 5. (停止條件): 若 $C = \phi$ ，則停止，並輸出粒子 i 的路線解 S_i ；否則回到步驟 4。

圖 3 為 MCSR-1 編解碼的示意簡例，假設顧客數 $n = 6$ ，粒子 i 的編碼 X_i 的維度 $D = n = 6$ ，首先以隨機亂數產生 6 個維度值，如圖 3a 示，即完成此粒子的編碼。解碼階段的步驟 1：依 x_{id} 由小而大產生待服務顧客集合 $C = \{6, 4, 1, 3, 5, 2\}$ ，如圖 3b 所示。步驟 2：計算預估車輛數量 m 以及車平均服務顧客數 g ，本例假設 $m = 2$ ，則 $g = \lceil 6/2 \rceil - 1 = 2$ 。設定車輛種子點的候選集合 $L = C = \{6, 4, 1, 3, 5, 2\}$ ，車輛種子點集合 $S = \phi$ 。選擇 L 中第 1 個顧客，即點 6，為第一條起始路線的種子點，建立第 1 條起始路線 $\{0 - 6 - 0\}$ ，並設定 $L = L \setminus \{6\}$ 且 $S = S \cup \{6\}$ 。此時 $|S| = 1 \neq m$ (2)，則自集合 L 移除點 6 以及距離點 6 最近的 2 個顧客 ($g = 2$)，茲假設點 4 與點 5 是 L 集中與點 6 距離成本最小的兩個顧客，則更新 $L = L \setminus \{5, 4\} = \{1, 3, 2\}$ 。再由 L 中選出第 2 條起始路線的種子點點 1，建立第 2 條起始路線 $\{0 - 1 - 0\}$ ，並更新 $L = L \setminus \{1\}$ 且 $S = S \cup \{1\}$ 。此時 $|S| = 2 = m$ ，設定 $C = C \setminus S = \{4, 3, 5, 2\}$ ，如圖 3c 所示。步驟 3：分別對 C 中的顧客，依照與起始路線種子點的距離，由近而遠產生插入路線優先順序，如圖 3d 所示。步驟 4：依序對 C 中的顧客以最省插入法插入優先次序最高且可行的種子路線中成本增加最少的位置。若所有的路線皆無可行的剩餘車容量以服務目標顧客，則新增路線服務之，假設圖 3e 在插入點 2 時已無可行路線，則新增第 3 條路線 $\{0 - 2 - 0\}$ 服務之。若還有尚未服務之顧客，則將路線 3 設為其他尚未服務之顧客點的最後插入路線。各需求點完成插入後，於 C 中移除，反覆執行至 $C = \phi$ 時停止解碼，如圖 3e 所示，並輸出最後的結果為 X_i 編碼對應的路線解 S_i ，如圖 3f 所示。

3.1.2 MCSR-2 編解碼模組

本研究另針對「可分送」的配送條件，將前述 MCSR-1 調整修正為 MCSR-2 以求解對

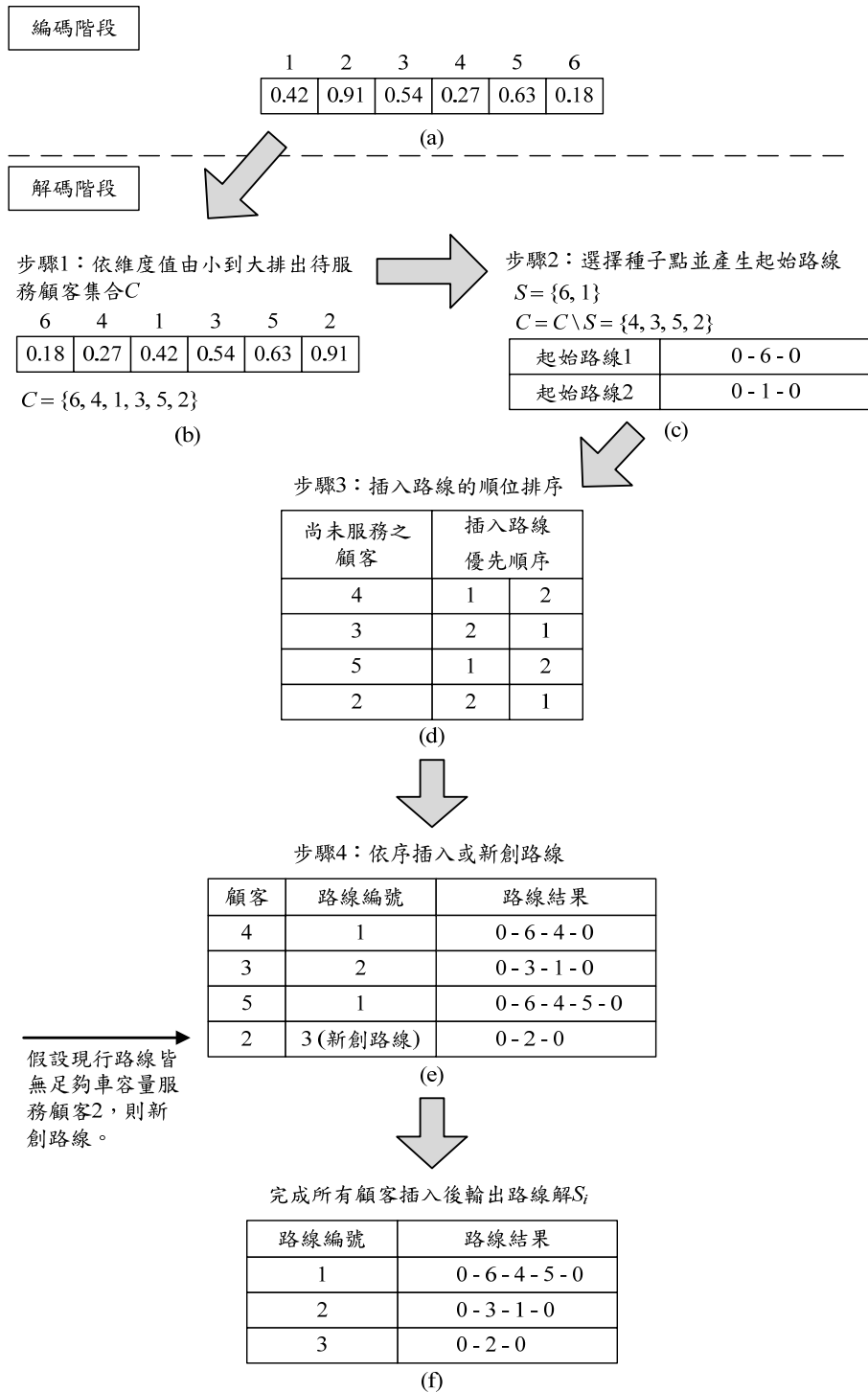


圖3 MCSR-1 粒子編解碼示意簡例

應的 MCVRP。由於在可分送的考慮下，單獨一個顧客可具有 p 個不同物品的需求，故將各顧客對應的每個物品拆解成一個獨立的需求點，以進行編碼。換言之， n 個顧客就考慮 $n \times p$ 個配送需求點。因此，MCSR-2 粒子群編碼的總維度 $D = np$ ，起始的編碼依然是對每個粒子各個維度值以隨機亂數 (0 至 1) 產生。

MCSR-2 編解碼的步驟程序，基本上與 MCSR-1 相同，為避免重複的敘述，茲以圖 4 的簡例來說明 MCSR-2 的步驟。該例有 6 個顧客 ($n = 6$)，兩種可分送的物品 ($p = 2$)，故其粒子編碼之維度 $D = 6 \times 2 = 12$ 。圖 4a 表示 1 個隨機產生的具有 12 個維度值的粒子編碼，其中第 $(2k-1)$ 與第 $2k$ 個的維度值分別代表第 k 個顧客 ($k = 1, 2, \dots, n$) 第 1 種 (a 類) 與第 2 種 (b 類) 物品的服務需求點。換言之，該編碼 X_i 的第 9 與第 10 位的編碼值，0.57 與 0.15 即分別對應第 5 個顧客對 a 與 b 兩類物品的需求點。

圖 4 解碼階段的步驟 1：依照 x_{id} 由小而大產生待服務顧客集合 $C = \{5b, 3b, 1b, 4b, 6b, 1a, 2b, 5a, 3a, 4a, 6a, 2a\}$ ，如圖 4b 所示。步驟 2：計算預估車輛數量 m 以及車平均服務顧客數 g ，本例暫假設 $m = 2$ 則 $g = \lceil 12/2 \rceil - 1 = 5$ 。設定起始路線各種子點的候選集合 $L = C = \{5b, 3b, 1b, 4b, 6b, 1a, 2b, 5a, 3a, 4a, 6a, 2a\}$ ，車輛種子點集合 $S = \phi$ 。選擇 L 中第 1 個顧客，即點 5b，為第 1 條起始路線的種子點，建立第 1 條起始路線 $\{0 - 5b - 0\}$ ，設定 $L = L \setminus \{5b\}$ 且 $S = S \cup \{5b\}$ 。此時 $|S| = 1 \neq m$ (2)，則自集合 L 移除點 5b 以及距離點 5b 最近的 5 個顧客 ($g = 5$)，茲假設點 4a、4b、5a、6a 與點 6b 是 L 集中與點 5b 距離成本最小的 5 個顧客，則將其由 L 中移出，並更新 L 為 $\{3b, 1b, 1a, 2b, 3a, 2a\}$ 。再由 L 中選出第 2 條起始路線的種子點顧客 3b，建立第 2 條起始路線 $\{0 - 3b - 0\}$ ，並更新 $L = L \setminus \{3b\}$ 且 $S = S \cup \{3b\} = \{3b, 5b\}$ 。此時 $|S| = 2 = m$ ，設定 $C = C \setminus S = \{1b, 4b, 6b, 1a, 2b, 5a, 3a, 4a, 6a, 2a\}$ ，如圖 4c 所示。步驟 3：分別對 C 中的顧客，依照與起始路線種子點的距離，由近而遠產生插入路線優先順序，如圖 4d 所示。步驟 4：依序對 C 中的顧客以最省插入法插入優先次序最高且可行的種子路線中。圖 4e 在插入點 2a 時，原最優先的路線為路線 2，假設路線 2 該時容量已不足，故插入次優先的路線 1。各需求點完成插入後，於 C 中移除，反覆執行至 $C = \phi$ 時停止解碼，如圖 4e 所示，並輸出最後的結果為 X_i 編碼對應的路線解 S_i ，如圖 4f 所示。

3.2 變動鄰域下降改善模組

所有的粒子編碼 X_i 解碼轉換為路線解 S_i 後，皆以變動鄰域下降 (variable neighborhood descent, VND) ^[26] 改善模組搜尋其局域最佳解 (local optimal) 進行改善。為提高求解的精確度，VND 改善模組執行時會利用 8 種交換法進行深度搜尋改善，包含兩種路線內以及 6 種路線間交換法。路線內交換法部分，包括 2-opt 節線交換法 ^[27] 及 Or-opt 節點交換法 ^[28]。圖 5 為兩種路線內交換法的示意圖，圖 5a 為交換改善前的路線，圖 5b 與 5c 分別是執行 2-opt 與 Or-opt 交換法後之示意圖。

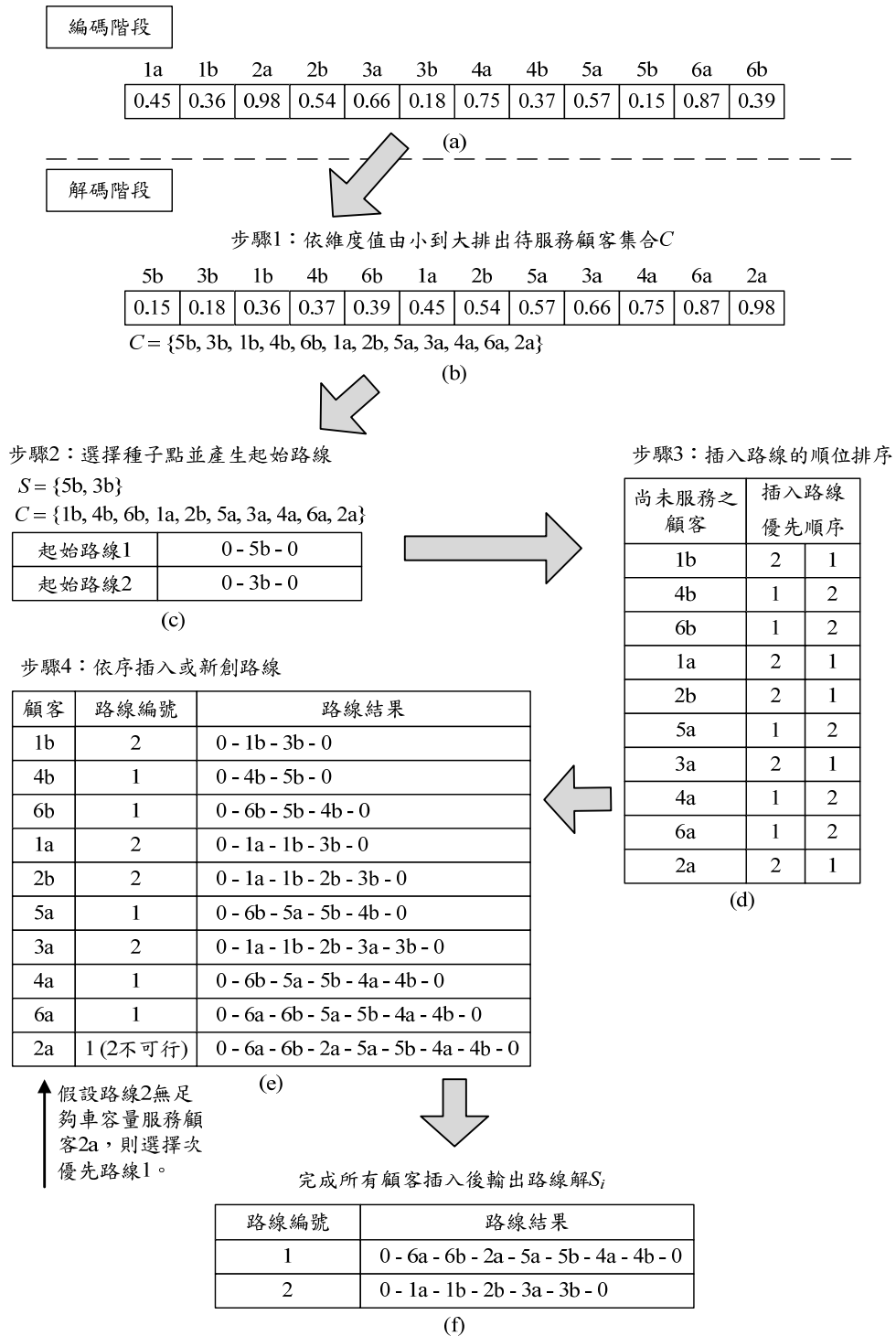


圖4 MCSR-2 粒子編解碼示意圖

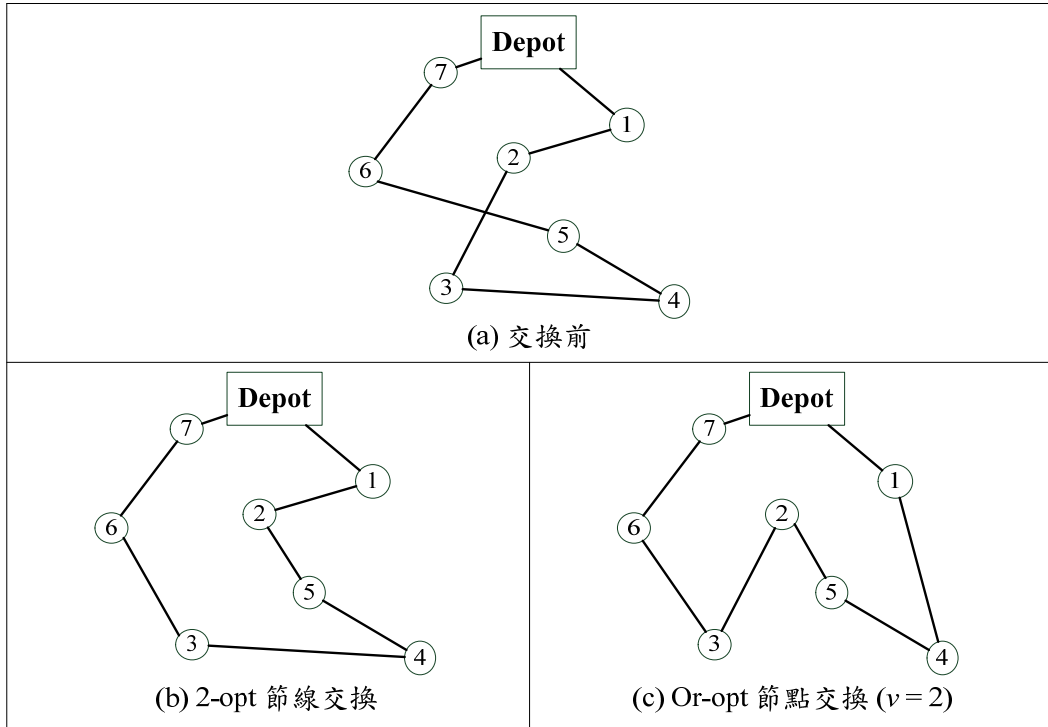


圖 5 路線內交換法示意圖

具體而言，圖 5b 表示將原圖 5a 路線的節線 (2, 3) 以及 (5, 6) 移除後，重新連結節線 (2, 5) 以及 (3, 6) 形成的改善路線。Or-opt 交換是將原路線連續 v 個節點 ($v=1, 2, 3$) 移動至路線內其他位置以尋求改善。圖 5c 是 $v=2$ 時 Or-opt 交換後的一個示意，其中原路線 (圖 5a) 的兩個節點 2、3 及節線 (2, 3) 被移動至節點 5 與 6 之間。

本研究另採用 6 種路線間交換法，包括 5 種 λ -節點交換法^[29] 以及 2-opt*節線交換法^[30]。 λ -節點交換法是在兩條路線 $R1$ 與 $R2$ 間，分別選取至多 λ 個節點互相移動至另一條路線上的各種交換改善組合。本研究採用 Cordeau 與 Laporte^[31] 之建議，將 λ 設為 2。在此設定下所使用的 λ -節點交換法在排除對稱重複的組合之後，包含 (1, 0)、(1, 1)、(2, 0)、(2, 1) 以及 (2, 2) 等 5 種不同的節點交換 (移動) 法。圖 6 為 6 種路線間交換法的示意圖，其中圖 6a 為交換前的路線示意圖，圖 6b 至 6f 分別為 5 種 λ -節點交換法搜尋後的路線示意圖，圖 6g 則為 2-opt*節線交換法搜尋後的路線示意圖。以圖 6e 為例，其代表圖 6a 兩條路線， $R1$ 與 $R2$ ，經過 (2, 1) 節點交換的示意。具體而言，圖 6e 是將原先 $R2$ 的兩個節點 (節點 10 與 11) 與 $R1$ 上的一個節點 (節點 1) 進行交換的結果。圖 6g 的 2-opt*節線交換，則是分別移除原 $R1$ 與 $R2$ 路線的 (1, 2) 與 (9, 10) 節線，再分別以 (1, 10) 與 (9, 2) 節線予以連接的結果。

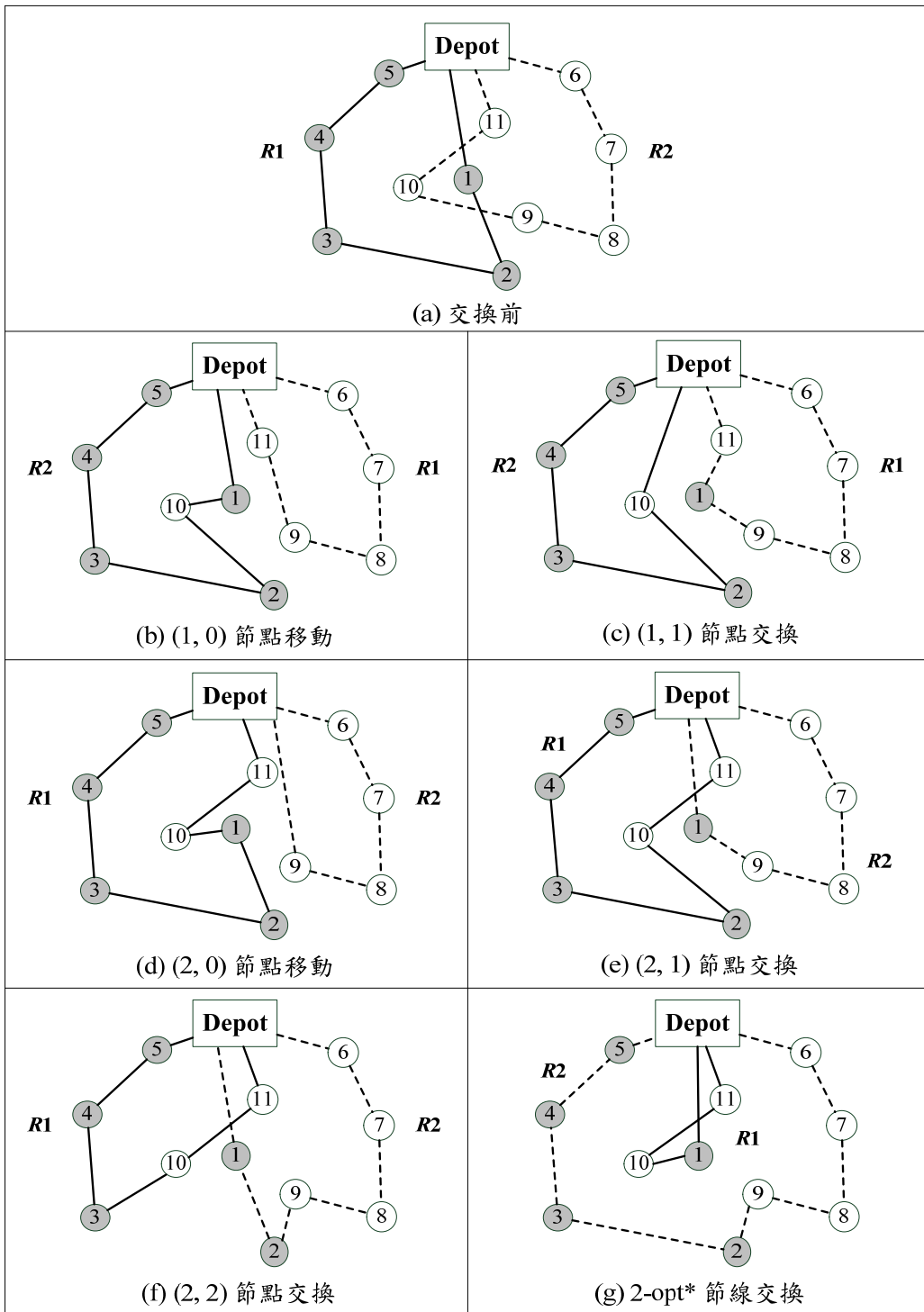


圖 6 路線間交換法示意圖

由於「可分送」配送型態在 MCSR-2 解碼時是將各物品需求視為獨立的需求點，本研究另提出一套針對「可分送」配送型態特性的路線間節點交換法，稱之為 $(1, 0)^*$ 節點移動法。 $(1, 0)^*$ 為 $(1, 0)$ 節點移動的延伸，是一個具適應性且搜尋廣度更強的交換方式。傳統的 $(1, 0)$ 節點移動，僅考慮將某路線上的一個節點移除再插入至另一條路線的交換改善法。但由於可分送型態的每個顧客都有 p 種不同的物品需求，本研究新設計的 $(1, 0)^*$ 交換法即考慮到當顧客 i 從某單一路線移除時，其原路線上的 p 種物品可以分別插入到其他 r ($r \leq p$) 條不同路線的各種可能性，並選取其中最優者為交換改善的結果。以圖 7 為例，假設 $p = 2$ ，顧客 i 的兩個物品 ia 與 ib 同時由路線 $R2$ 服務，如圖 7a 所示。 $(1, 0)^*$ 會同時考慮以下交換方式，並選擇改善較多者執行：(1) $r = 1$ 的情況，如圖 7b 所示，將需求 ia 與 ib 同時移動至路線 $R1$ ，此亦為傳統的 $(1, 0)$ 節點移動；(2) $r = 2 = p$ 的情況，如圖 7c 所示，將物品 ia 與物品 ib 分別移動到 $R1$ 與 $R3$ 兩條路線。

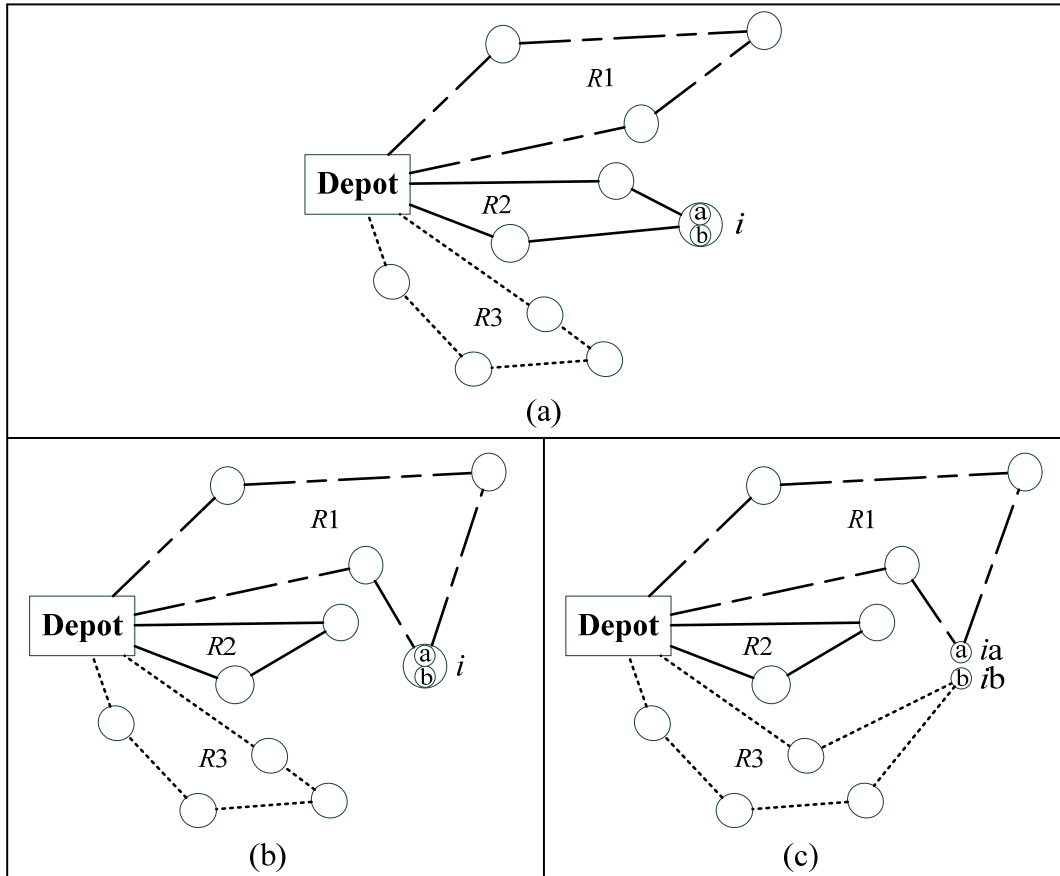


圖 7 $(1-0)^*$ 顧客物品分開運送示意圖

3.3 GLNPSO 求解程序

粒子 i 在第 t 個迭代時經過編解碼模組得到粒子初始解 $S_i(t)$ ，隨即透過鄰域改善模組優化為解 $S_i^*(t)$ ，並利用 MCVRP 的目標函數 (式 6) 計算解 $S_i^*(t)$ 的成本值作為粒子 i 在第 t 個迭代的適應值 $\varphi(X_i(t))$ 。當粒子群中的所有粒子皆完成計算適應值後，便開始對各個粒子進行 GLNPSO 學習，更新粒子的位置。求解的主要步驟敘述如下：

- 步驟 1. (初始化參數)：設定迭代數 $t = 1$ ，總迭代次數 T ，粒子群大小 I 。
- 步驟 2. (初始化粒子群)：產生 I 個粒子編碼 X_i 作為粒子群， $i = 1 \dots I$ ；分別設定各粒子 i 各維度 d 的起始速度 $v_{id}(1) = 0$ ，及其個別最佳解與群體最佳解的適應值分別為 $\varphi(P_i) = \infty$ 與 $\varphi(P_g) = \infty$ 。
- 步驟 3. (解碼產生路線)：對各粒子 i 的編碼 $X_i(t)$ ，進行解碼以產生其路線解 $S_i(t)$ 。
- 步驟 4. (VND 鄰域改善)：對各 $S_i(t)$ 以 VND 模組進行改善，得到其局域最佳解 $S_i^*(t)$ 並計算其路線成本作為該粒子的適應值 $\varphi(X_i(t))$ 。
- 步驟 5. (更新 pbest P_i)：若 $\varphi(X_i(t)) < \varphi(P_i)$ ，則更新粒子 i 個別最佳解，即 $P_i = X_i(t)$ 。
- 步驟 6. (更新 gbest P_g)：若 $\varphi(P_i) < \varphi(P_g)$ ，則更新所有粒子的群體最佳解，即 $P_g = P_i$ 。
- 步驟 7. (更新 lbest P_i^L)：對各粒子 i ，挑選 $\varphi(P_j)$ 最接近 $\varphi(X_i(t))$ 的 K 個粒子 j ， $j \neq i$ ，設定其中 $\varphi(P_j)$ 最小的 P_j 作為粒子 i 的 P_i^L 。
- 步驟 8. (更新 nbest P_{id}^N)：對各粒子 i 的各個維度 d ，計算其他粒子相對應的 FDR 值，如式 (3)，選取其最大值的粒子 α 為粒子 i 的鄰近最佳解 (nbest)，並更新 $P_{id}^N = P_{\alpha d}$ 。
- 步驟 9. (粒子位移更新)：利用式 (5) 計算各個粒子 i 的各維度 d 的位移速度 $v_{id}(t+1)$ ，再以式 (2) 更新其位置 $x_{id}(t+1)$ 。在式 (5) 中的 $w(t)$ 權重值部分本研究採用式 (3) 隨迭代數增加而遞減。
- 步驟 10. (停止條件)：若 $t = T$ ，則停止，輸出 $\varphi(P_g)$ ；否則， $t = t+1$ 並返回步驟 3。

四、MCVRP 標竿題庫測試結果比較分析

4.1 MCVRP 標竿題庫說明

目前文獻上有兩套 MCVRP 的標竿測試題庫，以下稱為題庫 1 (Set 1) 與題庫 2 (Set 2)，均由 Fallahi 等人^[18]提出。兩套題庫均考慮兩種物品 ($p = 2$)，各 20 題測試題，顧客點數範圍從 50 點至 483 點。這 20 題例題皆是依據 Christofides 等人^[12]的 14 題以及 Golden 等人^[32]的 6 題傳統 VRP 的測試例題修改而成。兩組題庫總共 40 個測試例題的相關資訊如表 3 所示，包含例題名稱 (instances)、顧客數 (n)、服務時間長度限制 (L) 以及兩種物品對應的貨艙容量資訊， Q_1 與 Q_2 ，的各項資訊。

題庫 1 與題庫 2 兩組題庫的各個例題，均保持原 VRP 測試例題的顧客數 (n)，各顧客的位置與總需求量 (q_i)，以及車輛總容量 (Q) 與車輛服務的時間限制 (L)。兩題庫的差異主要在於各顧客對兩種物品的需求， q_{i1} 與 q_{i2} ，以及各車輛乘載兩種物品的貨艙容量，即 Q_1 與 Q_2 的不同設計。具體而言，題庫 1 的設計是把 Q 與 q_i 平分給兩種物品，即 $Q_1 = Q_2 = Q/2$ ，且 $q_{i1} = q_{i2} = q_i/2$ 。題庫 2 則是以隨機方式把 q_i 分給 q_{i1} 與 q_{i2} ，即選取 $[3, 5]$ 區間內的隨機整數 k ，先設定 $q_{i1} = q_i/k$ 與 $q_{i2} = q_i - q_{i1}$ 。再根據所有顧客 q_{i1} 與 q_{i2} 的平均值，即 $\overline{Q_1}$ 與 $\overline{Q_2}$ 值，設定 $Q_1 = (Q \times \overline{Q_1}) / (\overline{Q_1} + \overline{Q_2})$ 與 $Q_2 = (Q \times \overline{Q_2}) / (\overline{Q_1} + \overline{Q_2})$ ，故 $q_{i1} \neq q_{i2}$ 且 $\overline{Q_1} \neq \overline{Q_2}$ 。簡而言之，Fallahi 等人^[18]以「均分」以及「非均分」兩種不同的情境分別產生題庫 1 與題庫 2。

表 3 MCVRP 標竿題庫資訊

Instances	n	L	Set 1		Set 2	
			Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
Vrpnc1	50	—	80	80	56.99	103.01
Vrpnc2	75	—	70	70	50.11	89.89
Vrpnc3	100	—	100	100	70.99	129.01
Vrpnc4	150	—	100	100	71.71	128.29
Vrpnc5	199	—	100	100	71.68	128.32
Vrpnc6	50	200	80	80	56.99	103.01
Vrpnc7	75	160	70	70	50.11	89.89
Vrpnc8	100	230	100	100	70.99	129.01
Vrpnc9	150	200	100	100	71.71	128.29
Vrpnc10	199	200	100	100	71.68	128.32
Vrpnc11	120	—	100	100	72.00	128.00
Vrpnc12	100	—	100	100	70.70	129.30
Vrpnc13	120	720	100	100	72.00	128.00
Vrpnc14	100	1040	100	100	70.70	129.30
E072-04f	71	—	15000	15000	9668.56	20331.40
E076-07u	75	—	110	110	78.74	141.26
E076-08s	75	—	90	90	64.43	115.57
E135-07f	134	—	1105	1105	689.89	1520.11
E241-22k	240	—	100	100	71.03	128.97
E484-19k	483	—	500	500	350.97	649.03

4.2 PSO 參數與 VND 執行次序之設定

PSO 演算法執行時牽涉到的參數，包括 GLNPSO 粒子學習機制相關的參數以及演化過程需要定義的迭代數以及粒子數。首先，GLNPSO 學習相關的參數包含初始慣性 $w(1)$ 、最終慣性 $w(T)$ 、鄰近粒子數 K 以及學習係數 c_p 、 c_g 、 c_l 與 c_n 。本研究依據 Ai 與 Kachitvichyanukul^[5, 11]、Kachitvichyanukul 等人^[7] 以及韓復華與楊禮瑛^[6] 等 4 篇文獻應用 GLNPSO 機制的成功經驗，分別設定 $w(1) = 0.9$ 、 $w(T) = 0.4$ 、 $K = 5$ 、 $c_p = 0.5$ 、 $c_g = 0.5$ 、 $c_l = 1.5$ 與 $c_n = 1.5$ ，並以這些參數設定進行有關演化需要的迭代數與粒子數參數測試，說明如下。

在 PSO 演算法中，迭代數與粒子數的設定對於求解的表現上有一定程度的影響。一般而言，迭代數與粒子數對應求解結果的精確度以及運算時間呈現正比關係，意即當迭代數與粒子數設定值越高時，結果的精確度越佳但求解的時間也越長。在 Ai 與 Kachitvichyanukul^[5, 11] 的兩篇研究中建議迭代數為 1,000，粒子數為 50。韓復華與楊禮瑛^[6] 則建議迭代數為 1,000，粒子數為 20。故本研究綜合參考其建議，對迭代數 (T) 與粒子數 (I) 兩個參數，分別在 $T = 500$ 、 750 與 $1,000$ 以及 $I = 10$ 、 20 、 30 與 50 的範圍進行測試，在同時考慮求解績效與運算時間的表現後，以迭代數 $T = 750$ 以及粒子數 $I = 30$ 作為執行 PSO 演算法使用之參數設定。本研究 PSO 演算法所有相關參數的設定值彙整如表 4 所示。

表 4 PSO 演算法相關參數設定

參數	設定值
粒子數	$I=30$
迭代數	$T=750$
鄰近粒子數	$K=5$
初始慣性值	$w(1)=0.9$
最終慣性值	$w(T)=0.4$
pbest 學習係數	$c_p=0.5$
gbest 學習係數	$C_g=0.5$
lbest 學習係數	$C_l=1.5$
nbest 學習係數	$C_n=1.5$

除了 PSO 演算法相關的參數，VND 改善模組內的各種交換法執行次序也必須予以設定。如 3.2 節所述，本研究採用的 VND 共有兩種路線內與 6 種路線間的交換改善法，其中 5 種路線間的交換法，即 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(2, 0)$ 、 $(2, 1)$ 與 $(2, 2)$ 交換法，可撰寫成 1 個 $\lambda = 2$ 的 λ -interchanges 次模組。如此，VND 模組可簡化為 2-opt、Or-opt、2-opt* 與 λ -interchanges 4 個次模組，執行上共有 $4! = 24$ 種不同的組合。本研究對這 24 種組合進行測試，結果發現 (Or-opt、2-opt*、 λ -interchanges、2-opt) 的執行組合平均績效最好，故將其設定為 PSO

執行時採用的 VND 次序。有關 PSO 演算法與 VND 執行次序測試的細節，可參閱林致瑄的碩士論文^[33]。

4.3 測試結果與績效分析

本研究 PSO 演算法的電腦程式以 C# 語言撰寫，在 Win 7 作業系統下，使用 i7-3770 (3.40GHz) CPU 的個人電腦執行各標準題庫之測試。PSO 測試執行的樣本數為 30 次，以其最佳結果代表 PSO 之績效。所有 PSO 對各題庫不同條件下的測試結果彙整於表 5 至表 8。各表共同的結構如下：前 3 欄分別是各測試題 (instance) 的名稱，顧客點數 (n) 與其目前文獻最佳解 (best known solution, BKS) 的成本。最後 3 欄代表本研究 PSO 演算法對各題的測試結果，包括其成本 (Cost)、與 BKS 之間的百分比誤差 (Gap) 以及電腦運算之 CPU 時間 (Time)。各表中的粗黑字體代表各測試題更新包含 PSO 結果後的現行最佳解 (current best known solution, CBKS) 對應之成本。其餘中間的欄位則是與 PSO 進行績效比較的其他 MCVRP 求解演算法的求解績效 (Cost、Gap 與 Time)。由於各演算法在程式撰寫以及測試時，所採用的硬體設備皆有不同，因此在其他演算法的 Time 欄位所提供的數值是直接引用於對應之文獻數據，並以附註說明各演算法進行實驗時所使用的 CPU 規格，以提供參考。

4.3.1 題庫 1 測試結果與分析

題庫 1 在「不可分送」與「可分送」兩種條件下的測試結果，分別如表 5 與表 6 所示。如 4.1 節所述，題庫 1 各測試題是由若干傳統 VRP 測試題，將其顧客需求 (q_i) 與車容量 (Q) 平分為兩種物品設計而成。在此相等平分狀態下，任一物品的 VRP 路線也完全適用於另一種物品的配送。因此，對於題庫 1 的每個測試題而言，無論是「不可分送」或「可分送」的條件下，其對應的 VRP 解亦是該題 MCVRP 的可行解。同理，題庫 1 各題 MCVRP 文獻最佳解的來源必須考慮到其對應的 VRP 之 BKS 最佳解。事實上，如表 5 與表 6 所示，無論是「不可分送」或「可分送」的條件，VRP 目前的 BKS 也是 MCVRP 題庫 1 各測試題的 BKS 及 CBKS。

題庫 1 在「不可分送」配送條件下的測試結果如表 5 所示。現有文獻中可提供作為績效比較的對象不多，僅有 Fallahi 等人^[18]的 MA 演算法與 TS 演算法以及 Mendoza 等人^[25]求解隨機需求的 MCVRP 所提出的 MA_sd 演算法。在此 20 例題的求解的績效上，結果顯示本研究之 PSO 方法在精確度方面明顯優於其他方法。具體而言，在 20 個測試題中，PSO 可求得 7 題目前文獻最佳解，平均誤差僅為 1.10%。其餘方法中以 TS 的求解結果最佳，可求得 2 題文獻最佳解，平均求解誤差為 2.94%。在平均求解時間上，以 MA_sd (1.42 分鐘) 最佳，MA (2.53 分鐘) 次佳，本研究 PSO (16.83 分鐘) 相對耗時較長。

表 5 題庫 1_「不可分送」求解結果與績效比較

Instance	n	BKS cost	MA ^a			TS ^a			MA_sd ^b			PSO		
			Cost	Gap	Time ^c (min.)	Cost	Gap	Time ^c (min.)	Cost	Gap	Time ^d (min.)	Cost	Gap	Time ^e (min.)
Vrpnc1	50	524.6^f	524.6	0.00	0.29	524.6	0.00	0.33	524.6	0.00	0.16	524.6	0.00	0.72
Vrpnc2	75	835.3^f	855.8	2.45	0.42	850	1.76	0.94	857.3	2.63	0.27	836.4	0.13	2.10
Vrpnc3	100	826.1^f	876.8	6.14	0.36	831.3	0.63	0.85	841.6	1.88	0.39	826.1	0.00	4.04
Vrpnc4	150	1028.4^f	1089.6	5.95	1.57	1061.1	3.18	4.76	1045.9	1.70	0.78	1043.8	1.50	11.13
Vrpnc5	199	1291.4^f	1389.6	7.60	1.93	1348.3	4.41	6.73	1381.9	7.01	1.43	1329.1	2.92	21.38
Vrpnc6	50	555.4^f	571.4	2.88	1.02	575.9	3.69	0.21	556.7	0.23	0.14	555.4	0.00	0.82
Vrpnc7	75	909.7^f	933.0	2.56	0.65	970.8	6.72	0.36	924.3	1.60	0.27	915.0	0.58	2.60
Vrpnc8	100	865.9^f	969.2	11.93	0.31	888.6	2.62	1.01	877.6	1.35	0.40	865.9	0.00	4.46
Vrpnc9	150	1162.5^f	1230.9	5.88	1.65	1232.1	5.99	1.64	1223.1	5.21	0.79	1177.3	1.27	13.07
Vrpnc10	199	1395.8^f	1520.1	8.91	2.34	1538.6	10.23	0.59	1497.5	7.29	1.12	1436.5	2.92	24.31
Vrpnc11	120	1042.1^f	1046.1	0.38	0.80	1043.3	0.12	2.38	1046.9	0.46	0.64	1042.1	0.00	2.17
Vrpnc12	100	819.6^f	820.6	0.12	0.30	819.6	0.00	1.05	821.0	0.17	0.41	819.6	0.00	3.69
Vrpnc13	120	1541.1^f	1547.4	0.41	1.27	1582.2	2.67	0.74	1586.9	2.97	0.74	1547.7	0.43	7.45
Vrpnc14	100	866.4^f	866.9	0.06	0.39	868.6	0.25	0.73	868.1	0.20	0.40	866.4	0.00	3.64
E072-04f	71	237.0^f	241.9	2.07	0.20	244.5	3.16	0.45	242.0	2.11	0.32	241.9	2.07	1.68
E076-07u	75	682.5^f	703.5	3.08	0.25	692.2	1.42	0.42	698.8	2.39	0.26	687.5	0.73	2.11
E076-08s	75	735.0^f	761.9	3.66	0.26	748.5	1.84	0.41	757.1	3.01	0.27	740.6	0.76	2.17
E135-07f	134	1162.9^f	1193.2	2.61	0.79	1174.4	0.99	1.60	1195.3	2.79	0.98	1163.3	0.03	8.98
E241-22k	240	707.7^g	748.6	5.78	8.41	741.4	4.76	6.45	763.5	7.88	1.83	723.4	2.22	33.58
E484-19k	483	1101.5^g	1250.1	13.49	27.39	1149.5	4.36	59.86	1250.9	13.56	16.84	1171.3	6.34	186.69
Average		914.5	957.1	4.30	2.53	944.3	2.94	4.57	948.1	3.22	1.42	925.7	1.10	16.83
CBKS count		20	1			2			1			7		

^a Fallahi 等人^[18]；^b Mendoza 等人^[25]；^c P4, 2.4 GHz；^d 2.4 GHz；^e i7-3770, 3.4 GHz；^f VRP Web；^g Jianyong 等人^[34]。

表 6 呈現的是題庫 1 在「可分送」條件下的測試結果。在此可作為績效比較的對象除了前述的 MA 與 TS 演算法以外，亦包括 Muyldermans 等人^[24] 的 GLS 演算法。以完整 20 題的測試結果而言，PSO 在求解精確度方面表現最佳，可求得 7 題文獻最佳解，平均誤差僅為 1.10%。TS 與 MA 則在伯仲之間，TS 的平均誤差 (2.02%) 優於 MA (2.32%)，但 MA (2 題) 較 TS (1 題) 多求得 1 題 BKS。由於 GLS 未考慮路線時間長度的限制條件，且只能處理整數需求的測試題，故其僅在此題庫中測試了 9 個題目。以 GLS 求解之 9 題例題進行比較，PSO 之平均誤差為 1.41%，稍微劣於 GLS 演算法的 1.38%。求解時間方面，以 20 題平均而言，MA (3.78 分鐘) 最佳，TS (8.43 分鐘) 次之，PSO 時間最長 (38.88 分鐘)。

對各題庫 1 的測試題而言，因其是由 VRP 對稱平分設計產生，每個 MCVRP 實際上都是由兩個相同而獨立的 VRP 子問題合併而成。在此情況下，任一物品 VRP 子問題的最佳解其實也是另一物品 VRP 子問題的最佳解。此時，MCVRP 在「不可分送」與「可分送」兩種配送條件下的最佳結果並無差異。換言之，兩種配送條件下的最佳解結果都是合併而不分送的路線型態，因兩個物品 VRP 的最佳路線是完全相同，如此就不會產生把同一顧客的兩種物品分送到兩條路線上的「分送」結果。本研究以 PSO 求解題庫 1 在「可分送」

條件下的測試結果 (見表 6) 的路線圖經過檢視，亦發現其 20 題的結果都合理地具有「不可分送」的路線型態。

表 6 題庫 1_「可分送」求解結果與績效比較

Instance	n	BKS cost	MA ^a			TS ^a			GLS ^b			PSO		
			Cost	Gap	Time ^c (min.)	Cost	Gap	Time ^c (min.)	Cost	Gap	Time ^d (min.)	Cost	Gap	Time ^e (min.)
Vrpnc1	50	524.6 ^f	524.6	0.00	0.40	524.6	0.00	0.26	524.6	0.00	8.97	524.6	0.00	1.50
Vrpnc2	75	835.3 ^f	842.7	0.89	0.92	851.8	1.98	0.36	837.4	0.25	8.61	836.4	0.13	4.31
Vrpnc3	100	826.1 ^f	853.2	3.28	1.04	835.2	1.10	1.59	829.8	0.45	9.41	826.1	0.00	7.85
Vrpnc4	150	1028.4 ^f	1070.9	4.13	3.45	1055.1	2.60	6.85	1040.2	1.15	10.11	1040.4	1.17	21.83
Vrpnc5	199	1291.4 ^f	1330.3	3.01	6.84	1348.8	4.44	13.49	1314.0	1.75	10.2	1326.4	2.71	47.53
Vrpnc6	50	555.4 ^f	559.3	0.70	0.32	560.0	0.83	0.24				555.4	0.00	1.77
Vrpnc7	75	909.7 ^f	928.1	2.02	0.77	937.1	3.01	0.90				912.9	0.35	5.16
Vrpnc8	100	865.9 ^f	892.2	3.04	0.95	894.5	3.30	1.75				865.9	0.00	8.70
Vrpnc9	150	1162.5 ^f	1199.9	3.22	2.62	1184.2	1.87	6.59				1180.3	1.53	25.92
Vrpnc10	199	1395.8 ^f	1461.2	4.69	8.35	1467.6	5.14	6.59				1443.5	3.42	50.29
Vrpnc11	120	1042.1 ^f	1044.7	0.25	2.11	1043.8	0.16	1.08	1048.7	0.63	8.33	1042.1	0.00	10.99
Vrpnc12	100	819.6 ^f	819.6	0.00	1.28	822.0	0.29	0.58	819.6	0.00	9.31	819.6	0.00	6.10
Vrpnc13	120	1541.1 ^f	1541.2	0.01	2.33	1542.9	0.12	2.80				1548.7	0.49	13.97
Vrpnc14	100	866.4 ^f	866.8	0.05	0.93	867.1	0.08	0.70				866.4	0.00	6.91
E072-04f	71	237.0 ^f	244.8	3.29	0.19	241.9	2.07	0.47				241.9	2.07	2.99
E076-07u	75	682.5 ^f	690.8	1.22	0.47	690.2	1.13	0.49				687.6	0.75	3.92
E076-08s	75	735.0 ^f	749.5	1.97	0.54	747.9	1.76	0.38				740.7	0.78	4.09
E135-07f	134	1162.9 ^f	1165.6	0.23	2.67	1179.2	1.40	2.35				1163.3	0.03	17.06
E241-22k	240	707.7 ^g	743.8	5.10	5.11	741.2	4.73	13.43	719.7	1.70	10.97	723.2	2.19	72.76
E484-19k	483	1101.5 ^g	1204.1	9.31	34.27	1148.9	4.30	107.66	1173.4	6.53	18.13	1171.9	6.39	463.86
Average		914.5	936.7	2.32	3.78	934.2	2.02	8.43				925.9	1.10	38.88
Average_9 ^h		908.5	937.1	2.89	6.16	930.2	2.18	16.14	923.0	1.38	10.45	934.4	1.40	70.75
CBKS count		20	2			1			2			7		

^a Fallahi 等人^[18]；^b Muyldermans 等人^[24]；^c P4, 2.4 GHz；^d Pentium M740, 1.73 GHz；^e i7-3770, 3.40 GHz；

^f VRP Web；^g Jianyong 等人^[34]；^h the average of the 9 instances tested by GLS。

4.3.2 題庫 2 測試結果與分析

題庫 2 是以隨機分配設計產生兩種物品需求的測試題。由於不具備對稱性，其「不可分送」與「可分送」兩種條件下的 (最佳) 結果，除非是特例，否則應有不同。首先說明本研究 PSO 測試 MCVRP 題庫 2 在「不可分送」條件下的相關結果。該情境下，與 PSO 做績效比較的對象包括前小節所述的 MA，TS 與 MA_sd 等 3 種方法；各測試題的 BKS 即為 3 種方法結果的最佳者。如表 7 所示，在 20 個測試題中，目前文獻的 BKS 有 3 題，10 題與 7 題，分別由 MA，TS 與 MA_sd 所締造的。然而，經過與本研究 PSO 的結果比較後，發現 20 題中有 17 題的 BKS 被 PSO 突破，加上與現有 BKS 平手的 1 題，PSO 共擁有 18 題最新的 CBKS 紀錄。PSO 測試精確度方面的優越亦表現在平均誤差上，其與文獻 BKS 最佳成本的平均誤差為 -1.09%。其他 3 個演算法的精確度均不如 PSO，其中 MA_sd 的表

現尚佳，平均誤差為 1.75%，MA 與 TS 兩者的平均誤差則均為 2.19%。就求解時間而言，MA_sd 執行時間最短，平均每題 1.25 分鐘。MA 與 TS 次之，平均每題分別是 2.52 與 2.60 分鐘。PSO 時間最長，每題平均要 17 分鐘。

表 7 題庫 2_「不可分送」求解結果與績效比較

Instance	n	BKS cost	MA ^a			TS ^a			MA_sd ^b			PSO		
			Cost	Gap	Time ^c (min.)	Cost	Gap	Time ^c (min.)	Cost	Gap	Time ^d (min.)	Cost	Gap	Time ^e (min.)
Vrpnc1	50	550.2	558.8	1.56	0.29	556.1	1.07	0.26	550.2	0.00	0.16	549.5	-0.13	0.78
Vrpnc2	75	863.6	888.6	2.89	0.43	863.6	0.00	0.23	884.3	2.40	0.29	863.0	-0.07	2.17
Vrpnc3	100	837.6	878.4	4.87	0.36	837.6	0.00	0.66	852.7	1.80	0.42	830.2	-0.89	4.06
Vrpnc4	150	1070.7	1089.1	1.72	1.57	1070.7	0.00	1.83	1080.0	0.87	0.84	1058.4	-1.15	11.16
Vrpnc5	199	1361.4	1408.5	3.46	1.93	1361.4	0.00	3.47	1403.5	3.09	1.52	1359.0	-0.18	21.31
Vrpnc6	50	562.7	569.4	1.19	0.28	563.4	0.12	0.17	562.7	0.00	0.14	557.5	-0.92	0.87
Vrpnc7	75	946.3	955.1	0.93	0.65	949.0	0.29	0.37	946.3	0.00	0.27	931.2	-1.60	2.49
Vrpnc8	100	874.7	958.9	9.63	0.31	916.2	4.74	0.31	874.7	0.00	0.40	866.9	-0.89	4.34
Vrpnc9	150	1240.5	1262.7	1.79	1.65	1290.8	4.05	0.14	1240.5	0.00	0.86	1181.1	-4.79	12.51
Vrpnc10	199	1490.2	1509.1	1.27	2.34	1490.2	0.00	3.17	1515.6	1.70	1.30	1451.1	-2.62	23.63
Vrpnc11	120	1122.9	1122.9	0.00	0.80	1201.6	7.01	0.47	1162.4	3.52	0.80	1118.5	-0.39	5.62
Vrpnc12	100	916.6	926.5	1.08	0.30	934.1	1.91	0.26	916.6	0.00	0.39	896.9	-2.15	3.66
Vrpnc13	120	1542.4	1542.4	0.00	1.27	1582.3	2.59	0.37	1607.4	4.21	0.62	1549.5	0.46	7.42
Vrpnc14	100	937.6	966.5	3.08	0.39	1141.6	21.76	0.60	937.6	0.00	0.39	931.0	-0.70	3.68
E072-04f	71	262.3	263.6	0.50	0.20	262.3	0.00	0.09	262.5	0.08	0.37	262.3	0.00	2.21
E076-07u	75	697.8	702.2	0.63	0.25	697.8	0.00	0.28	704.1	0.90	0.26	693.3	-0.64	2.10
E076-08s	75	772.2	793.5	2.76	0.26	772.2	0.00	0.23	778.2	0.78	0.25	748.4	-3.08	2.12
E135-07f	134	1233.2	1233.2	0.00	1.24	1235.2	0.16	0.87	1293.8	4.91	0.81	1219.8	-1.09	9.24
E241-22k	240	787.8	796.7	1.13	8.41	787.8	0.00	3.38	810.7	2.91	1.94	772.4	-1.95	34.07
E484-19k	483	1177.3	1240.9	5.40	27.39	1177.3	0.00	35.38	1269.0	7.79	13.04	1189.8	1.06	187.41
Average		964.2	983.4	2.19	2.52	984.6	2.19	2.60	982.6	1.75	1.25	951.5	-1.09	17.00
BKS count		20	3			10			7			1		
CBKS count												18		

^a Fallahi 等人^[18]；^b Mendoza 等人^[25]；^c P4, 2.4 GHz；^d 2.4 GHz；^e i7-3770, 3.40 GHz。

題庫 2 在「可分送」條件下的測試結果如表 8，其中與 PSO 做績效比較的對象僅有 MA 與 TS 兩者。20 個測試題對目前文獻的 BKS 分別有 8 題與 12 題，由 MA 與 TS 兩個方法所締造。與「不可分送」條件下的優異求解表現相同，PSO 在 20 題中，突破了 17 題現有的 BKS，加上與現有 BKS 平手的 1 題，PSO 在「可分送」配送條件下，亦擁有 18 題最新的 CBKS 紀錄。PSO 與現有 BKS 成本的平均誤差為 -0.78%，對其他方法而言，TS 與 MA 的平均誤差分別為 0.38%與 0.78%。在求解時間方面，則是 MA 居首 (3.46 分鐘)，TS 次之 (6.13 分鐘)，PSO 墊後 (38.96 分鐘)。

表 8 題庫 2_「可分送」求解結果與績效比較

Instances	<i>n</i>	BKS	MA ^a			TS ^a			PSO		
			Cost	Gap	Time ^b (min.)	Cost	Gap	Time ^b (min.)	Cost	Gap	Time ^c (min.)
Vrpnc1	50	548.4	548.4	0.00	0.38	550.5	0.38	0.21	545.8	-0.47	1.50
Vrpnc2	75	873.6	874.5	0.10	0.75	873.6	0.00	0.93	857.7	-1.82	4.45
Vrpnc3	100	832.9	843.4	1.26	1.53	832.9	0.00	2.65	830.2	-0.32	7.91
Vrpnc4	150	1076.0	1078.1	0.20	2.65	1076.0	0.00	5.78	1057.4	-1.73	21.72
Vrpnc5	199	1362.8	1368.8	0.44	8.12	1362.8	0.00	6.51	1354.9	-0.58	46.83
Vrpnc6	50	558.6	558.7	0.02	0.45	558.6	0.00	0.50	557.5	-0.20	1.75
Vrpnc7	75	952.6	959.9	0.77	0.30	952.6	0.00	0.56	926.4	-2.75	5.16
Vrpnc8	100	890.1	890.1	0.00	1.69	897.4	0.82	1.89	866.9	-2.61	8.70
Vrpnc9	150	1186.2	1224.9	3.26	2.57	1186.2	0.00	5.18	1180.8	-0.46	25.72
Vrpnc10	199	1475.8	1475.8	0.00	6.88	1500.3	1.66	6.14	1472.6	-0.89	49.63
Vrpnc11	120	1113.4	1113.4	0.00	1.58	1155.2	3.75	1.32	1095.1	-1.64	11.24
Vrpnc12	100	906.9	906.9	0.00	0.56	907.3	0.04	1.52	896.9	-1.10	7.00
Vrpnc13	120	1541.2	1541.2	0.00	2.36	1543.0	0.12	2.74	1549.5	0.54	14.15
Vrpnc14	100	934.7	934.7	0.00	1.03	941.4	0.72	0.89	930.4	-0.46	7.73
E072-04f	71	262.5	262.5	0.00	0.21	262.7	0.08	0.23	262.3	-0.08	3.73
E076-07u	75	699.2	705.8	0.94	0.85	699.2	0.00	0.36	693.3	-0.84	4.01
E076-08s	75	748.4	756.7	1.11	0.71	748.4	0.00	0.87	748.4	0.00	4.11
E135-07f	134	1248.3	1256.8	0.68	1.19	1248.3	0.00	4.34	1219.2	-2.33	18.87
E241-22k	240	771.2	792.7	2.79	9.81	771.2	0.00	15.32	769.4	-0.23	76.52
E484-19k	483	1175.5	1224.0	4.13	25.77	1175.5	0.00	64.64	1194.7	1.63	458.54
Average		957.9	965.9	0.78	3.46	962.1	0.38	6.13	950.0	-0.78	38.96
BKS count		20	8			12			1		
CBKS count									18		

^a Fallahi 等人^[18]；^b P4, 2.4 GHz；^c i7-3770, 3.40 GHz。

4.3.3 綜合分析與討論

綜觀 MCVRP 兩個題庫與兩種配送條件下的測試結果 (表 5 至表 8)，本研究提出的 PSO 演算法在 4 種情境 80 個測試題的平均誤差為 0.08%，優於 Fallahi 等人^[18] 提出的 MA (2.40%) 與 TS (1.88%) 方法。同時，在這 80 個測試題中，PSO 求得 16 題文獻 BKS，並改善了 34 題；同時也在 80 題更新的 CBKS 中留下 50 題的紀錄。本研究將改善 BKS 幅度最大的兩題，題庫 2 Vrpnc9_不可分送 (150 點) 與題庫 2 Vrpnc7_可分送 (75 點) 的最佳結

果與路線圖呈現於附錄，完整的 50 題 MCVRP 最新的 CBKS 結果則放置於 <http://db.tt/FBxD94Gc>，供學術參考。

比較兩個題庫，PSO 在題庫 2 的績效明顯優於其在題庫 1 的表現；突破 BKS 的 34 題全部都是在題庫 2。這是由於題庫 1 的特殊設計，使得各測試題文獻最佳解皆是 VRP 的 BKS。而這些 VRP 的 BKS 是經過多年來諸多方法透過眾多參數校估後累積的結果，確實難以超越。本研究在題庫 1 的平均誤差為 1.01%，應該也可以算是不錯的績效表現。另一方面，VRP 畢竟是 MCVRP 的特例，目前 VRP BKS 的演算法無論再好，仍無法用來求解一般的 MCVRP。相對而言，題庫 2 還是測試 MCVRP 演算法比較客觀的一個標竿題庫。

MCVRP 具有「不可分送」與「可分送」的兩種問題型態，理論上而言，後者的限制條件較寬鬆，故其正確解 (exact solution) 的結果，一定是優於 (或等於) 前者。但由於本文探討與比較的方法，PSO、MA、TS、MA_sd 與 GLS 都是啟發式解法，其求算的只是近似解 (approximate solution)，因此無法保證其具有「可分送」結果優於 (等於) 「不可分送」結果的性質。事實上，在兩題庫的測試皆有「不可分割」反而優於「可分割」結果的情況，如題庫 1：MA 的 E072-04f 題、TS 的 Vrpnc12 題以及 PSO 的 Vrpnc8 題 (見表 5 表 6)；題庫 2：MA 的 Vrpnc7 題、TS 的 Vrpnc2 題與 PSO 的 Vrpnc10 題 (見表 7 表 8)。雖然有此少數例外，各個演算法對大多數測試題還是能夠求得「可分送」比「不可分送」條件下較優 (或等於) 的結果。

我們進一步對「不可分送」與「可分送」的兩種問題型態進行數據分析。由於題庫 2 為測試 MCVRP 較為客觀的標竿題庫，因此我們於題庫 2 中挑選可分送優於不可分送最多的 Vrpnc11 以及可分送劣於不可分送最多的 Vrpnc10 兩個例題結果進行比較分析。發現 Vrpnc11 在可分送下 (平均) 乘載率可達 98.3%，確實較其不可分送時 (86.0%) 可以提高 12.3% 的乘載率；此外，Vrpnc11 可分送比不可分送的結果亦多節省一條路線。反之，對 Vrpnc10 的求解，可分送比不可分送的結果在乘載率與路線數兩方面均無改善。由此可觀察：乘載率是求解可分送條件 MCVRP 時的一個重要因素；亦因如此，本研究 PSO 演算法產生可分送結果劣於不可分送結果的原因，很可能是未將「乘載率」納入交換改善的考慮因素。

五、結論與建議

多貨艙車輛路線問題自 2008 年被提出後，因其實務應用價值，目前已逐漸受到重視。本研究首次採用 PSO 巨集啟發式方法求解該問題，並針對其「不可分送」與「可分送」兩種條件分別構建 MCSR-1 與 MCSR-2 兩套新的編解碼程序，並在 VND 改善模組中新設計一個 (1, 0)*節點交換法以增加「可分送」求解時的深度搜尋，再以 GLNPSO 粒子學習策略執行演化做廣度之搜尋。以兩套國際標竿題庫測試的結果發現，本研究提出的 PSO 演算法極具競爭力。

本研究利用 GLNPSO 求解 MCVRP 的精確度績效甚佳，但其運算時間較長，尤其是在求解「可分送」問題時要花費近兩倍於求解「不可分送」問題的時間。這可能是 MCSR-2 的編碼總維度是 MCSR-1 的兩倍之故。此外，為了獲得良好的求解精確度以及穩定性，我們對每次迭代中的所有粒子解皆採用完整的 8 種交換法進行變動鄰域搜尋進行改善，此亦相對耗時。

本研究在各階段的演算法設計上，目前皆是以成本的節省作為基礎。經過觀察題庫 2 的 Vrpnc11 與 Vrpnc10 兩例題後，發現乘載率是求解可分送條件 MCVRP 時的一個重要因素。因此建議後續研究除了成本節省以外，亦應將乘載率納入可分送演算法考量。

綜觀上述，如何在保留求解的精確度之下，設計出更有效率且更適合問題特性的執行方式，即是為一個後續研究的方向。我們也期待未來有更多相關的研究，投入 MCVRP 這個重要的課題。

參考文獻

1. Kennedy, J. and Eberhart, R. C., "Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. IV, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995, pp. 1942-1948.
2. Shi, Y. and Eberhart, R. C., "A Modified Particle Swarm Optimizer", Evolutionary Computation Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1998, pp. 69-73.
3. Eberhart, R. C. and Shi, Y., "Comparison between Genetic Algorithms And Particle Swarm Optimization", Proceedings of the 7th International Conference on Evolutionary Programming VII, INSTICC, 1998, pp. 611-616.
4. Pongchairerks, P. and Kachitvichyanukul, V., "A Non-homogenous Particle Swarm Optimization with Multiple Social Structures", Proceedings of International Conference on Simulation and Modeling, INSTICC, 2005, pp. A5-02.
5. Ai, T. J. and Kachitvichyanukul, V., "Particle Swarm Optimization and Two Solution Representations for Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56, No. 1, 2009, pp. 380-387.
6. 韓復華、楊禮瑛，「應用粒子群演算法求解 OVRP 問題之研究」，*運輸學刊*，第 25 卷，第 2 期，民國 102 年，頁 199-220。
7. Kachitvichyanukul, V., Sombuntham, P., and Kunnappadeelert, S., "Two Solution Representations for Solving Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Multiple Pickup and Delivery Requests via PSO", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 89, 2015, pp. 125-136.
8. Clerc, M., "The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization", Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vol. 3, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999, pp. 1951-1957.

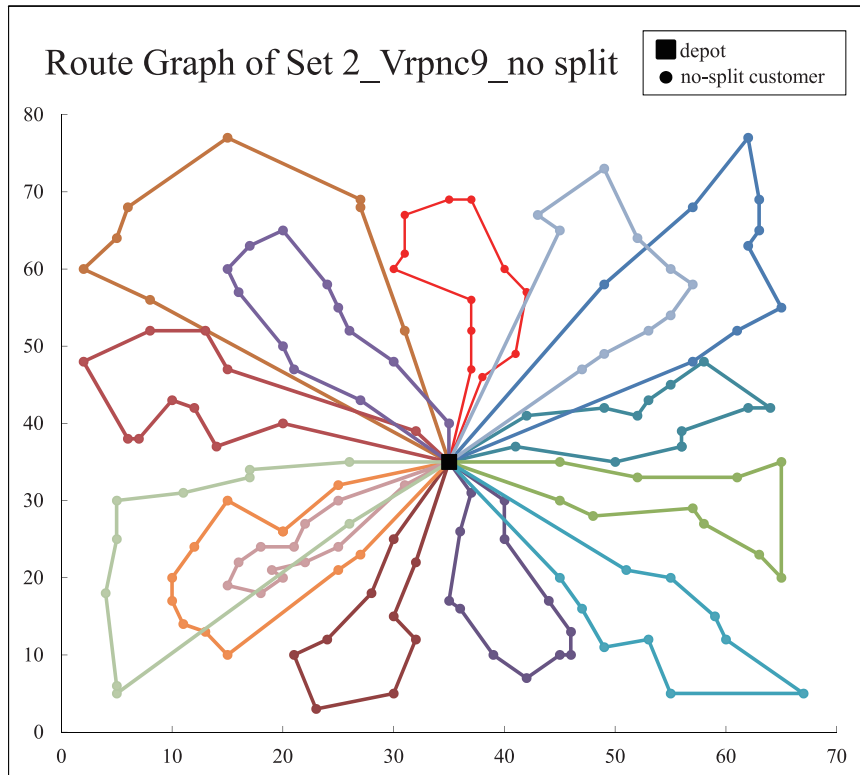
9. Clerc, M. and Kennedy, J., "The Particle Swarm—Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 1, 2002, pp. 58-73.
10. Chen, A. L., Yang, G. K., and Wu, Z. M., "Hybrid Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm for Capacitated Vehicle Routing Problem", *Journal of Zhejiang University-Science A*, Vol. 7, No. 4, 2006, pp. 607-614.
11. Ai, T. J. and Kachitvichyanukul, V., "A Particle Swarm Optimization for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery", *Computers & Operations Research*, Vol. 36, No. 5, 2009, pp. 1693-1702.
12. Christofides, N., Mingozzi, A., and Toth, P., "The Vehicle Routing Problem", In: Christofides, N. et al. (Eds.), *Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester, UK, 1979, pp. 315-38.
13. Marinakis, Y., Marinaki M., and Dounias, G., "A Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 23, No. 4, 2010, pp. 463-472.
14. Qi, C., "Application of Improved Discrete Particle Swarm Optimization in Logistics Distribution Routing Problem", *Procedia Engineering*, Vol. 15, 2011, pp. 3673-3677.
15. Goksal, F. P., Karaoglan, I., and Altiparmak, F., "A Hybrid Discrete Particle Swarm Optimization for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 65, No. 1, 2013, pp. 39-53.
16. Belmecheri, F., Prins, C., Yalaoui, F., and Amodeo, L., "Particle Swarm Optimization Algorithm for a Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Mixed Backhauls, and Time Windows", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 24, No. 4, 2013, pp. 775-789.
17. Norouzi, N., Sadegh-Amalnick, M., Yalaoui, F., and Alinaghiyan, M., "Evaluating of the Particle Swarm Optimization in a Periodic Vehicle Routing Problem", *Measurement*, Vol. 62, 2015, pp. 162-169.
18. Fallahi, A. E., Prins, C., and Wolfler Calvo, R., "A Memetic Algorithm and a Tabu Search for the Multi-Compartment Vehicle Routing Problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 35, No. 5, 2008, pp. 1725-1741.
19. Chajakis, E. D. and Guignard, M., "Scheduling Deliveries in Vehicles with Multiple Compartments", *Journal of Global Optimization*, Vol. 26, No. 1, 2003, pp. 43-78.
20. Brown, G. G., Prins, C., and Wolfler Calvo, R., "Real-Time, Wide Area Dispatch of Mobil Tank Trucks", *Interfaces*, Vol. 17, No. 1, 1987, pp. 107-120.
21. Van der Bruggen, L., Gruson, R., and Salomon, M., "Reconsidering the Distribution Structure of Gasoline Products for a Large Oil Company", *European Journal of Operational Research*, Vol. 81, No. 3, 1995, pp. 460-473.
22. Avella, P., Boccia, M., and Sforza, A., "Solving a Fuel Delivery Problem by Heuristic and Exact Approaches", *European Journal of Operational Research*, Vol. 152, No. 1, 2004, pp. 170-179.
23. Reed, M., Yiannakou, A., and Evering, R., "An Ant Colony Algorithm for the Multi-Compartment Vehicle Routing Problem", *Applied Soft Computing*, Vol. 15, 2014, pp.

169-176.

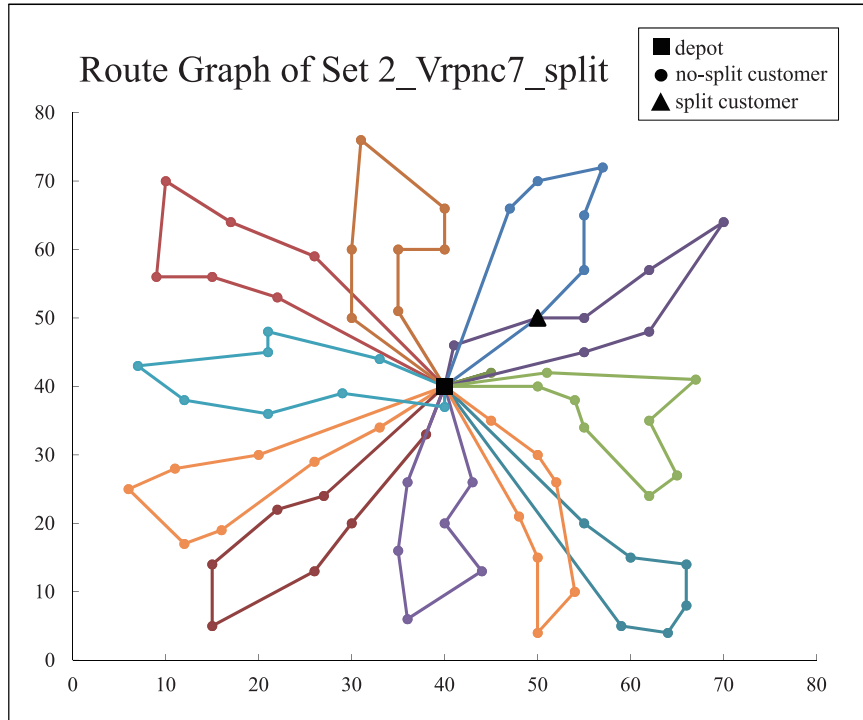
24. Muyldermans, L., Ellis, C. J., Graves, G. W., and Ronen, D., “On the Benefits of Co-Collection: Experiments with a Multi-Compartment Vehicle Routing Algorithm”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 206, No. 1, 2010, pp. 93-103.
25. Mendoza, J. E., Castanier, B., Guéret, C., Medaglia, A. L., and Velasco, N., “A Memetic Algorithm for the Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands”, *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 11, 2010, pp. 1886-1898.
26. Mladenović, N. and Hansen, P., “Variable Neighborhood Search”, *Computers & Operations Research*, Vol. 24, No. 11, 1997, pp. 1097-1100.
27. Lin, S. and Kernighan, B. W., “An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem”, *Operational Research*, Vol. 21, No. 2, 1973, pp. 498-516.
28. Or, I., “Traveling Salesman-Type Combinatorial Problems and Their Relation to the Logistics of Regional Blood Banking”, PhD. Dissertation, Northwestern University, 1976.
29. Osman, I. H., “Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem”, *Annals of Operations Research*, Vol. 41, No. 4, 1993, pp. 421-451.
30. Potvin, J. Y. and Rousseau, J. M., “A Parallel Route Building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 66, No. 3, 1993, pp. 331-340.
31. Cordeau, J. F. and Laporte, G., “Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem”, In Sharda, R. et al. (Eds.), *Metaheuristic Optimization via Memory and Evolution*, Springer, US, Vol. 30, 2005, pp. 145-163.
32. Golden, B. L., Wasil, E. A., Kelly, J. P., and Chao, I. M., “Metaheuristics in Vehicle Routing”, In Crainic, T. G. and Laporte, G. (Eds.), *Fleet Management and Logistics*, Kluwer, Boston, MA, 1998, pp. 35-36.
33. 林致瑄, 「應用 PSO 求解多艙種車輛路線問題」, 國立交通大學運輸與物流管理學系碩士論文, 民國 104 年。
34. Jianyong, J., Crainic, T. G., and Løkketangen, A., “A Cooperative Parallel Metaheuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem”, *Computers & Operations Research*, Vol. 44, 2014, pp. 33-41.

附錄：兩題 MCVRP 最新文獻最佳解之結果

Problem instance: Set 2_Vrpnc9_no split		Best known solution cost: 1240.5		Our result cost: 1181.1 (-4.79%)	
No. of customers: 150	Capacity (a/b): 71.71/128.29	Route Duration Constraint: 200		Customer service time: 10	
Route #	Route sequence			Loading (a/b)	Cost
1	0 - 132 - 1 - 122 - 30 - 131 - 32 - 90 - 108 - 10 - 70 - 101 - 69 - 0			48.10/97.08	79.74
2	0 - 137 - 144 - 57 - 15 - 43 - 142 - 42 - 87 - 13 - 0			41.00/73.24	75.35
3	0 - 105 - 40 - 73 - 74 - 133 - 22 - 41 - 145 - 115 - 2 - 58 - 53 - 0			66.10/86.08	64.72
4	0 - 28 - 12 - 150 - 80 - 68 - 121 - 29 - 129 - 3 - 77 - 116 - 76 - 111 - 0			57.70/126.50	69.82
5	0 - 47 - 36 - 143 - 49 - 64 - 63 - 126 - 31 - 0			43.80/82.33	112.65
6	0 - 51 - 71 - 65 - 136 - 35 - 135 - 34 - 78 - 79 - 0			48.00/68.08	109.08
7	0 - 18 - 83 - 114 - 8 - 125 - 45 - 46 - 124 - 48 - 82 - 146 - 0			57.60/107.50	89.13
8	0 - 26 - 149 - 54 - 130 - 55 - 25 - 24 - 134 - 109 - 138 - 0			45.30/89.83	81.84
9	0 - 52 - 106 - 7 - 123 - 19 - 107 - 11 - 62 - 148 - 88 - 127 - 27 - 0			64.20/105.00	74.60
10	0 - 110 - 4 - 139 - 39 - 67 - 23 - 56 - 75 - 72 - 21 - 0			65.40/117.59	96.14
11	0 - 147 - 104 - 99 - 5 - 61 - 16 - 141 - 44 - 119 - 14 - 97 - 117 - 0			69.20/120.84	79.96
12	0 - 50 - 102 - 33 - 81 - 120 - 9 - 103 - 66 - 128 - 20 - 0			69.70/118.26	92.35
13	0 - 112 - 95 - 92 - 98 - 37 - 100 - 91 - 85 - 93 - 59 - 96 - 6 - 0			65.10/127.00	56.75
14	0 - 94 - 38 - 140 - 86 - 113 - 17 - 84 - 118 - 60 - 89 - 0			60.70/115.42	99.03



Problem instance: Set 2_Vrpnc7_split		Best known solution cost: 952.6		Our result cost: 926.4 (-2.75%)	
No. of customers: 75		Capacity (a/b): 50.11/89.89		Route Duration Constraint: 160	
				Customer service time: 10	
Route #		Route sequence		Loading (a/b) Cost	
1		0 - 6 - 33 - 43 - 41 - 56 - 23 - 63 - 0		34.40/87.75 83.85	
2		0 - 73 - 1 - 42 - 64 - 22 - 62 - 68 - 0		38.50/64.50 89.84	
3		0 - 67 - 0		10.00/20.00 10.77	
4		0 - 8 - 19 - 59 - 14 - 35 - 7(b) - 26 - 0		50.00/71.50 82.78	
5		0 - 5 - 37 - 20 - 70 - 60 - 71 - 0		28.60/55.50 93.55	
6		0 - 7(a) - 53 - 11 - 66 - 65 - 38 - 0		48.90/87.59 77.23	
7		0 - 32 - 50 - 18 - 55 - 25 - 9 - 0		42.50/70.58 92.97	
8		0 - 34 - 52 - 27 - 15 - 57 - 13 - 54 - 46 - 0		47.80/84.33 78.61	
9		0 - 2 - 28 - 61 - 21 - 74 - 30 - 0		43.30/86.75 74.38	
10		0 - 17 - 44 - 3 - 24 - 49 - 16 - 51 - 75 - 0		48.20/82.99 76.87	
11		0 - 4 - 45 - 29 - 36 - 69 - 47 - 48 - 0		46.70/76.41 79.89	
12		0 - 12 - 72 - 58 - 10 - 31 - 39 - 40 - 0		49.60/88.42 85.71	



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)。

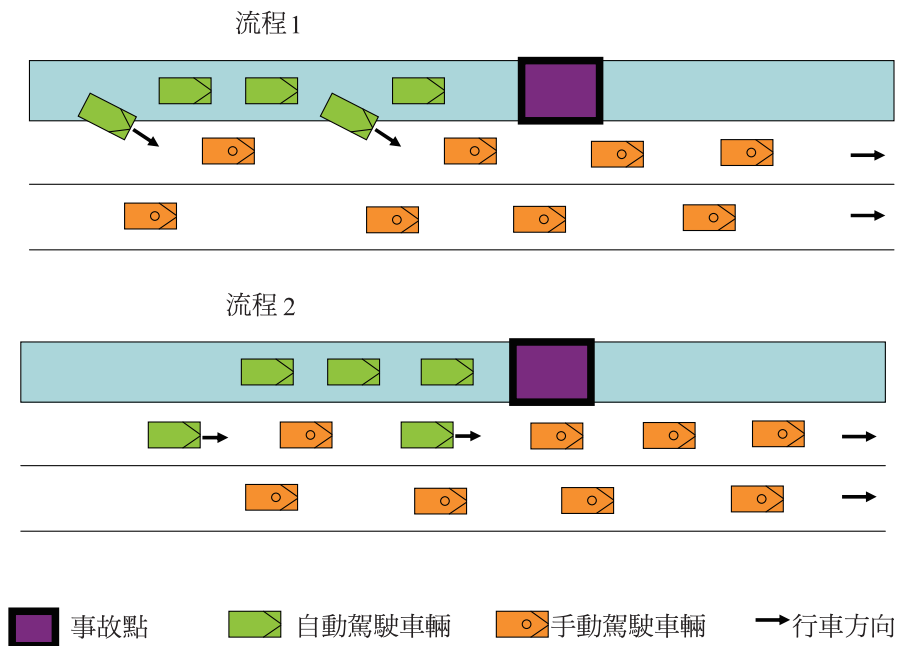


圖 1 事件下專用車道上自動駕駛車輛運行示意圖

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]。

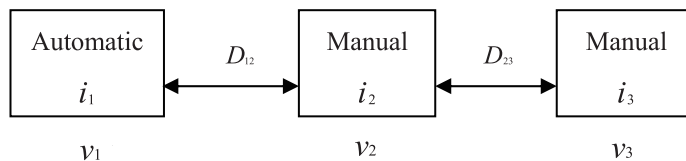


圖 2 自動駕駛車輛跟車示意圖

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)

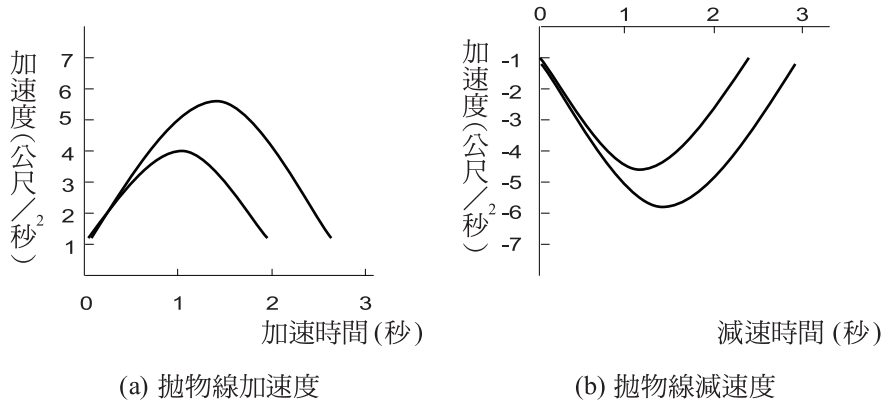


圖 3 拋物線加速度與減速度

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

$$S = \frac{\alpha}{12}t^4 - \frac{\alpha\beta}{6}t^3 - \frac{\gamma}{2}t^2 + v_0 t + S_0 \quad (8)$$

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

$$v_1 = W_1 v_2 + W_2 \bar{v}_\sigma \quad (9)$$

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}_σ ：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)

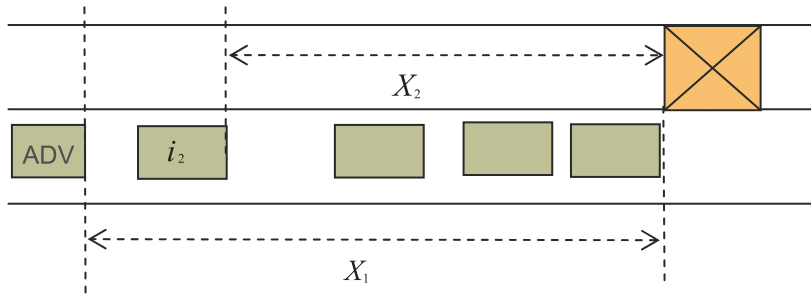


圖 4 相對距離示意圖

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)

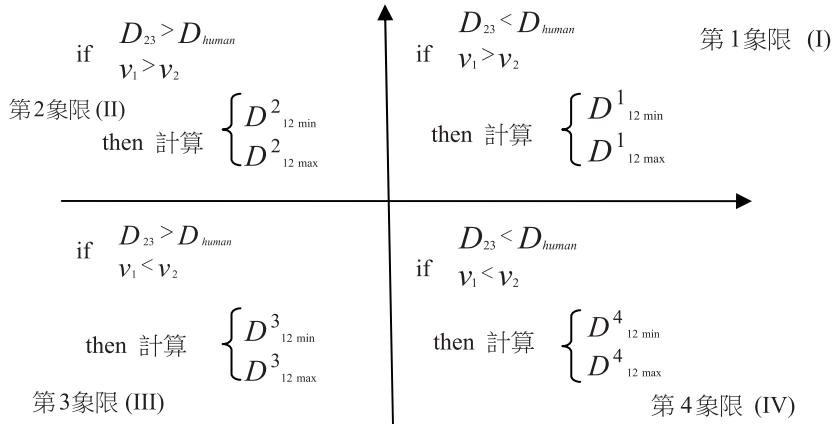


圖 5 4 種情境之 4 個象限圖

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: $D_{12} < D_{\min}$	$V_{\text{未}}$	$V_1 \geq V_{\text{未}}$	$a=0$ $a<0$ $a>0$

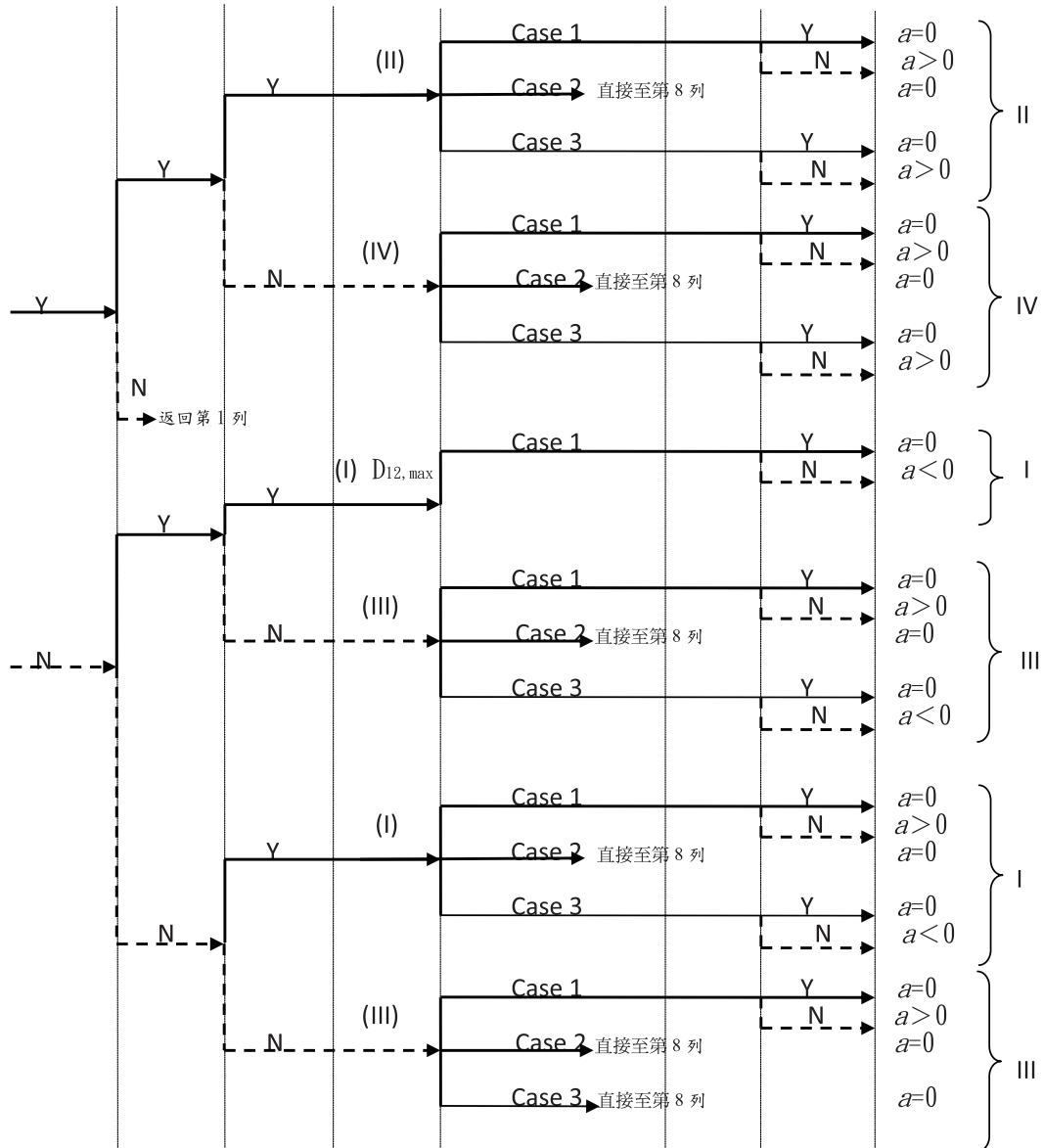


圖 6 自動駕駛車輛判斷流程架構

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。

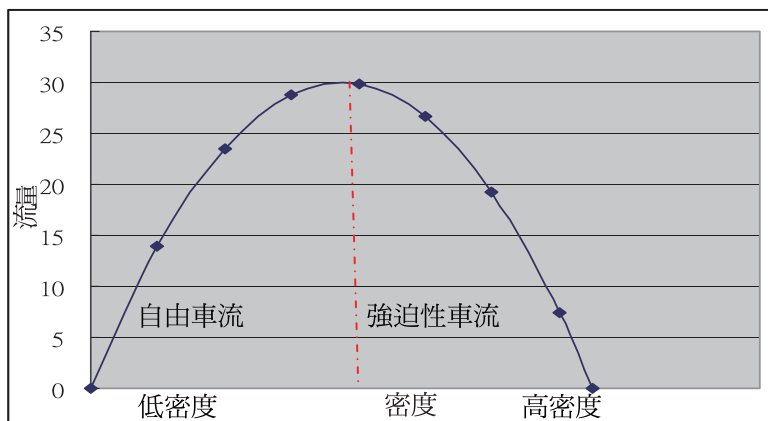
資料來源：蔡孟釗^[20] 及本研究整理。

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。

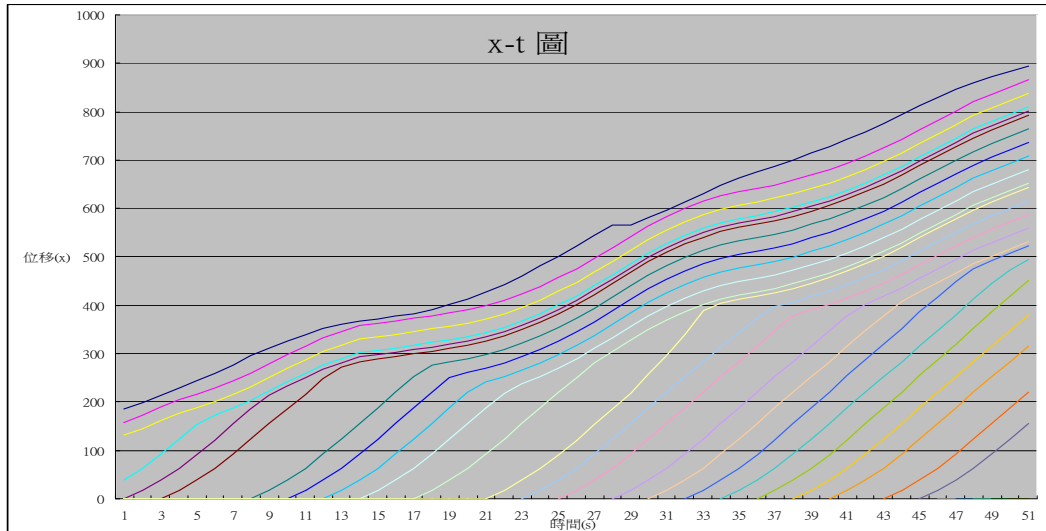


圖 8 時間對距離圖 ($a=-2$)

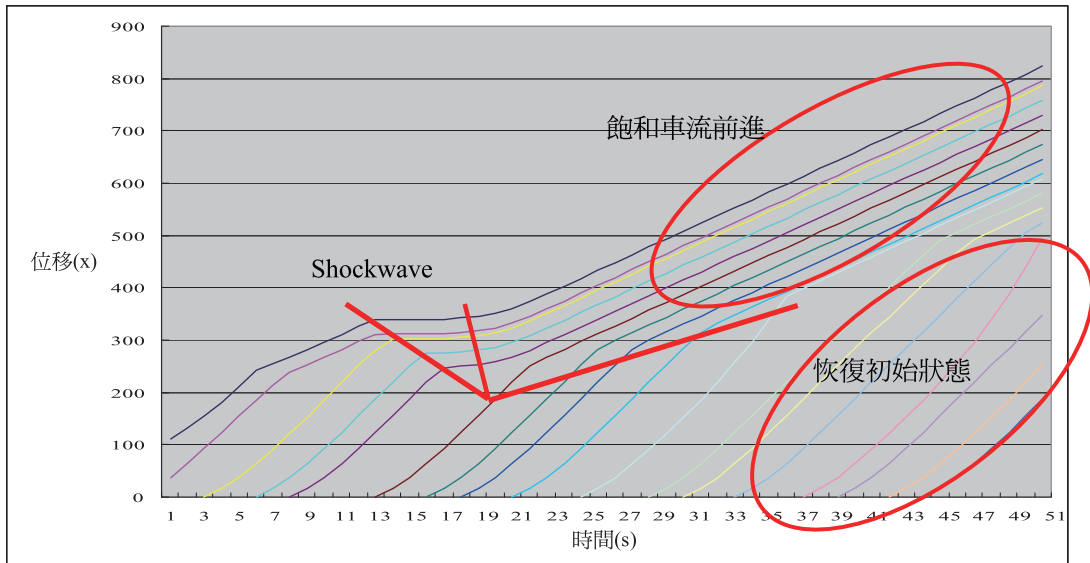


圖 9 時間對距離圖 ($a=-4$)

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率。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。

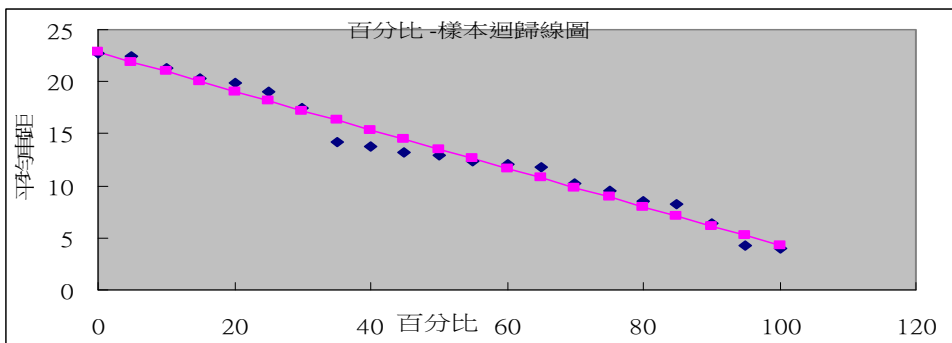


圖 10 穩定車流下迴歸分析圖

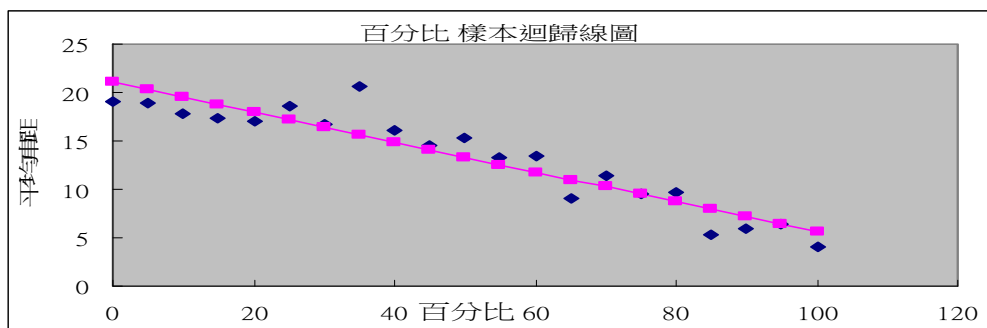


圖 11 不穩定車流下迴歸分析圖

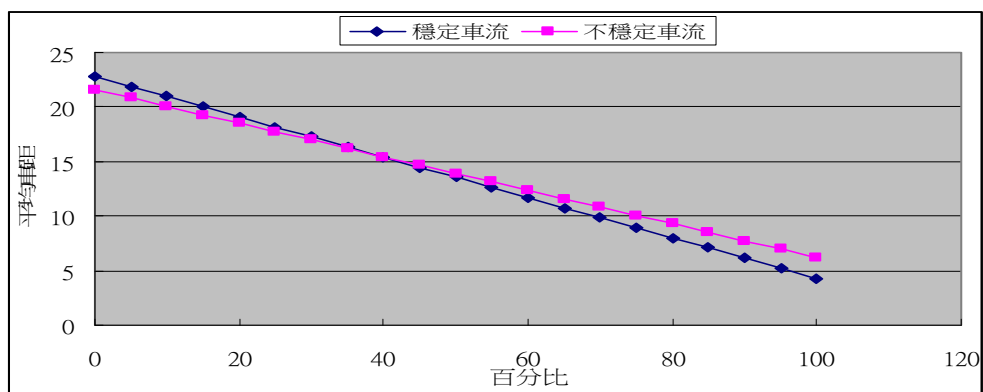


圖 12 迴歸分析比較圖

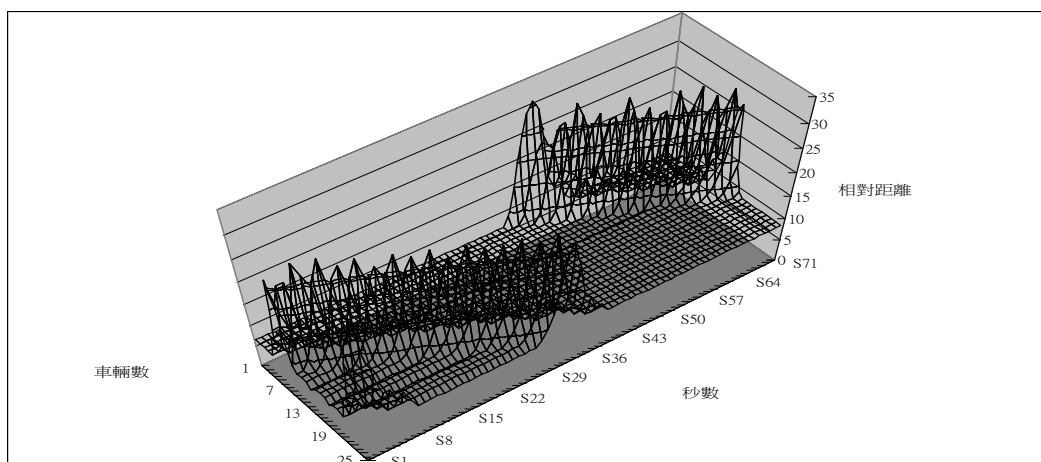


圖 13 立體跟車間距圖 (自動駕駛車輛占 63%)

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：

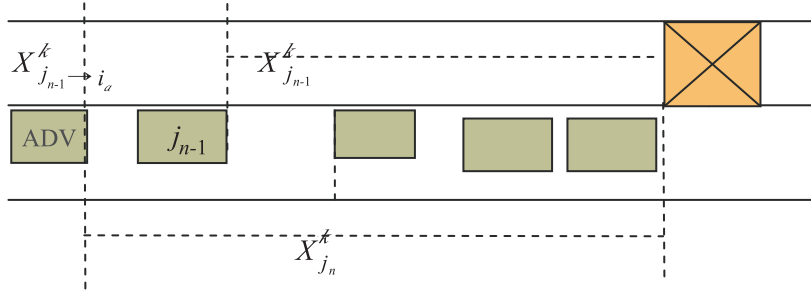
$$\alpha_{i_{\sigma}}^{\kappa} = W_1^{\kappa} \times \alpha_1 + W_2^{\kappa} \times \alpha_2 \quad (\text{A.1})$$

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。

運輸計劃季刊稿約

- 一、本刊歡迎國內外有關運輸之工程、經濟、規劃、管理、資訊等未經刊登於其他刊物之中、英文研究論著；已刊登者，雖使用語文不同、題目更改、或內文經改寫，均不接受投稿。已於國內外會議發表之論文，不論有無收錄於其會議資料中，除經大幅修改者外，均請作者提附該會議主辦者之同意書，並於論文中加註說明。論文如屬接受公私機關團體委託研究出版之報告書之全文或一部分或經重新編稿者，作者應提附該委託單位之同意書，並於論文中加註說明。交通部運輸研究所同仁擬投稿件如屬所內已結案或未結案之計畫者，應依照本所出版品管理作業要點第十一條之規定辦理。凡由本刊主動邀稿者，不受上述各項限制。
- 二、為便於一次刊出，來稿以 25,000 字為限，其中應包括 300 字以內之摘要 1 篇及 3 至 8 個關鍵詞，並請註明姓名、身分證字號、戶籍地址、服務單位、職稱、聯絡地址及電話。
- 三、中文稿之題目、作者姓名、摘要及關鍵詞均請附英文。文稿中需註釋處，請標明上標無括號序碼，並請從題目、作者介紹開始，往下連續編號，再於引註當頁下方加橫線排印註釋。文稿中之數學式，函數請排正體字，變數請排斜體字。圖及表中之中文字請排細明體，英文字請排 Times New Roman 體，圖原則上不加框，表之框線均採細線。
- 四、參考文獻請按出現序排列，文稿中提及時請標明上標加括號序碼，參考文獻必須是文稿所引用者始得列入，且參考文獻內容必須依本刊規定格式完整無缺列入。參考文獻中，英文之逗點、句點均採英國式排於引號外。本刊參考文獻編排規定格式及範例如下：
 1. 期刊論文：作者姓名（姓在前名在後），論文篇名，期刊名稱，卷期，出版日期，起迄頁碼。
中文例：林楨家、李家儂，「用於都市地區活動分布之灰色 TOD 規劃模式」，**運輸計劃季刊**，第 34 卷，第 1 期，民國 94 年，頁 63-91。
英文例：Cervero, R. and Kockelman, K., "Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design", *Transportation Research A*, Vol. 2, No. 3, 1997, pp.199-219.
 2. 圖書單行本：作者姓名，書名，版次（無則免列），出版社，出版地，出版日期。
中文例：黃芳銘，**結構方程模式：理論與應用**，第 5 版，五南圖書出版股份有限公司，臺北，民國 96 年。
英文例：Nunnally, J. C., *Psychometric Theory*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1978.
 3. 研討會論文：作者姓名，論文篇名，研討會/論文集名稱，冊別（無則免列），舉辦單位，出版日期，起迄頁碼。
中文例：溫傑華、藍武王、趙國婷，「國道客運車輛下層設置座位或臥鋪接受之研究」，中華民國運輸學會第 16 屆學術論文研討會論文集，第 1 冊，中華民國運輸學會，民國 90 年，頁 221-230。
英文例：Eberhart, R. C. and Kennedy, J., "Particle Swarm Optimization", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. IV, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995, pp.1942-1948.
 4. 博、碩士論文：作者姓名，論文名稱，學校系所，出版日期。
範 例：陳勝智，「以大眾運輸導向發展理念進行車站地區都市再發展之探討」，成功大學都市計劃研究所碩士論文，民國 90 年。
 5. 政府出版圖書/規範：政府機關名，圖書/規範名，出版日期。
範 例：交通部統計處，**中華民國交通統計年鑑**，民國 94 年。
 6. 網頁資料：作者姓名/網頁機關名，文章篇名/連結主題名，網址，網頁下載日期。
範 例：交通部運輸研究所，「全國路況資訊中心」，<http://e-traffic.iot.gov.tw/>，民國 97 年。
 7. 與以上所列文獻格式不同者，請改以註解方式列出。
- 五、來稿請備一式三份，打印清楚；照片、圖片請附寄原本，凡無法清晰辨認及製版者，恕不接受；並請提供 Microsoft Word 97（含以上）版本可讀檔案格式之電子檔。
- 六、運輸計劃季刊編輯室對來稿在不變更其論點之原則下有刪改權；來稿一經發表，當酌致稿酬；其他刊物如需轉載，應同時徵得作者及本所同意，並註明出處。
- 七、來稿請附本刊保證及授權書寄：10548 臺北市敦化北路 240 號 6 樓交通部運輸研究所運輸計劃季刊編輯室。

Transportation Planning Journal Quarterly

GUIDELINES FOR THE SUBMISSION OF PAPERS

1. The Journal welcomes the submission of previously unpublished research papers from all countries, which are related to engineering, economics, planning, management, and information processing of transportation systems. Previously published papers, even if published in a different language, with a different title, or modified contents, will not be accepted. Unless drastically revised since conference presentation, papers which have been previously presented in domestic or international conferences, regardless of whether they had been included in the conference proceedings or not, must be submitted with a letter of consent from the conference organizer, and such a presentation must be duly noted in the paper itself. Papers which duplicate or contain portions of study reports of research projects, edited versions thereof, or funded by government agencies or private organizations, should be submitted with a letter of consent from the funding agency, and this must be duly noted in the paper itself. Papers submitted by the staff of the IOT should comply with its "Guidelines for Publications". The above terms do not apply to invited papers and articles.
2. The length of submitted papers should not exceed 25,000 characters/words, and should include an abstract of no more than 300 characters/words, as well as 3 to 8 key words, and the author's name and position, institution, contact address, and telephone number.
3. Papers written in Chinese should also carry an English version of the abstract, including the title of the paper, the name of the author, and key words of the paper. Notes should be numbered consecutively in the order in which they first appear in the text and should be started with the title and the introduction of the author(s). References listed should be limited to all those mentioned and quoted in the text, and should be numbered consecutively in the order in which they have been mentioned in the text. The Times New Roman font should be used for the English version. Print all the mathematical equations and functions. And variables should be typed in italics.
4. The guidelines of reference formats are as follows:
 - (1) Journal: authors (beginning with the last name), article title, journal title, volume number, publish date, and page numbers.
 - (2) Book: authors, book title, edition number, publisher, place of publication, publish date.
 - (3) Conference paper: authors, paper title, conference title, sponsor, publish date, and page numbers.
 - (4) Doctoral dissertation or master thesis: author, title of the dissertation/thesis, department, college, and publish date.
 - (5) Government publication: government authority, name of the publication, and publish date.
 - (6) Web page: author or authority, article title or related link, URL, date of downloading.
5. Papers should be submitted with three copies of manuscript typed in a clearly legible form and an electronic file accessible by the Microsoft Word 97 (and above). All graphs and photographs should be submitted in originals. No illegible submissions will be accepted.
6. The Editor's Office of the Transportation Planning Journal Quarterly (TPJ Quarterly) reserves the right to edit and make any changes to the submitted papers, provided that such editing changes do not alter the paper's original content. Upon the acceptance of a paper for publication, the TPJ Quarterly shall remunerate the author for the contribution of the paper. The TPJ Quarterly reserves the copyright on all of its published papers, and all reproductions of such papers must receive a prior permission of the author and this journal, and meanwhile indicate the sources.
7. All submissions should be sent to the following address:

The Editor's Office
Transportation Planning Journal Quarterly
Institute of Transportation
6F., No. 240, Dunhua N. Rd.,
Taipei City 10548, Taiwan (R.O.C.)

保證及授權書

茲保證本人著作「」
符合運輸計劃季刊稿約之規定，刊登後並授權中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）得以重製、公開傳輸、散佈方式利用本著作，且得授權第三人為相同之利用，並同意得提供予其他資料庫進行刊載及相同之利用，本人並承諾對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）或其再授權利用之人不行使著作權。本人保證本著作無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情事負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此筆致之損害負賠償責任。本人承諾本著作經貴刊刊登後，不再以同一稿件，或將題目更改，或將內容改編，轉投其他國內、外刊物登載，如有違反，同意貴所得公布本人姓名並永不再接受本人投稿。此致
中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）
立保證及授權書人（所有作者均請簽章，姓名後註明身分證字號）：

中 華 民 國 年 月 日

LETTER OF GUARANTEE

This letter serves to guarantee that my paper entitled ' _____', conforms to the "Guidelines for the Submission of Papers" of the Transportation Planning Journal Quarterly, and that I hereby authorize the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) and any third party to reproduce、public transmission、distribution my paper. I also agree my paper could be exchanged to the other database and to abandon the author's copyright to the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) and users from the database. I guarantee that I did not infringe upon the copyright of the paper of any other person. If I violated this rule, I should take on the responsibility for compensation to the author and to the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) accordingly. I guarantee that once this paper is published in the TPJ Journal, I will not make redundant or duplicate publication (i.e., submission of the same article, or with a different title, or modified content) to other journals or periodicals in the Republic of China or any other countries. I agree that in the event of any violation of the stated terms on my part, the IOT may announce my name in public and shall reject all my papers afterwards.

This guarantee is provided to the Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications.

Signature (both author's and co-authors'):

Date: _____

