

應用多場站運輸撥召模型與ALNS演算法 優化復康巴士營運效率之研究

APPLYING MULTI-DEPOT DIAL-A-RIDE MODEL AND ALNS ALGORITHM TO OPTIMIZE THE OPERATION EFFICIENCY OF REHABUS

張學孔 S. K. Jason Chang¹

傅宣維 Hsuan-Wei Fu²

陳雅雯 Ya-Wen Chen³

(110 年 4 月 14 日收稿，110 年 12 月 31 日第一次修正，111 年 2 月 7 日接受)

摘 要

高齡化與身心障礙者福利是已開發國家面對之重要課題，根據國家發展委員會預測，我國將於 2025 年進入超高齡社會。截至 2021 年 11 月，衛生福利部統計我國身心障礙人口已達 1,200,743 人，占總人口數比例 5.12%，直轄六都中以臺南市 5.32% 與高雄市並列第一。因應現有復康巴士人工排班效率不彰，且難以動態調整，本研究欲建立復康巴士自動排班數學模型並應用 ALNS 演算法求解多場站運輸撥召問題，根據業者數與排班分區方式將營運情境劃分成單一業者與多元業者對應至分區排班與全區排班共 4 種情境，並以臺南復康巴士為案例，藉由小型測試驗證 ALNS 演算法與精確解之誤差控制於 5% 以內。同時藉由營運資料分析歸納出復康巴士每週之營運具高度重現性，結果顯示以 ALNS 演算法進行自動化排班多能於 10 分鐘內收斂，總成本相較現有臺南復康巴士人工排班節省 12.28%。此外，若將多元業者整併為單一業者全區排班之情境，則可節省 16.93%。本研究建立

1. 臺灣大學土木工程學系教授。

2. 臺灣大學土木工程學系碩士。

3. 臺灣大學先進公共運輸研究中心執行長（聯絡地址：10617 臺北市羅斯福路 4 段 1 號臺灣大學土木系，電話：(02)33663366 #55487，E-mail：yychen@aptrc.tw）。

自動化排班數學模型優化復康巴士撥召服務，實證研究顯示自動化排班與資源共享能帶來具體之效益。研究成果亦能夠應用在其他復康巴士系統，以大幅改善目前復康巴士業者人工排班之困境，具體提升營運效率與服務品質。

關鍵詞：高齡化、身心障礙者、多場站運輸撥召、ALNS 演算法

ABSTRACT

Aging society and disability welfare are both crucial issues for developed and developing countries in recent years. According to the National Development Council and Ministry of Health and Welfare, the population of the disability is more than 1.18 million in 2018, while Tainan has the highest disability rate among all municipalities. The ageing population is expected to be more than 20% in 2025, which means that Taiwan will become a super-aged society within 4 years. Currently, the government provides Rehabus, long-term care bus, and universal taxi service to guarantee daily mobility for the disabilities. However, due to manual handling on fleet management, each scheduling task takes about 1 to 3 days. This research mainly focuses on the operation of Rehabuses. Analyses and comparisons are conducted for four kinds of operation ways in terms of operator numbers and partitioning methods on scheduling. An automatic scheduling method based on mathematic model with ALNS algorithm is developed and applied for optimizing the operation. Two cases with a small scale have been used to prove the accuracy of solutions obtained by ALNS algorithm and exact method. It is shown that the difference between solution solved by ALNS algorithm and the exact solution is lower than 5%. An empirical case of the Tainan Rehabus has been conducted with its operational pattern of high repeatability. The average compile time of ALNS algorithm is less than 10 minutes, and the solution can improve up to 12.8% of total cost compared with the solution of manual scheduling. In addition, total amount of 16.93% cost can be improved if all the companies are integrated with automatic scheduling and operation. It is also shown that about 70% of the benefits come from releasing the top 20% demands. The results of this study show that automatic scheduling methods can effectively improve the current manual operation situation. The optimization model developed can also be applied to other similar systems for improving accessible mobility.

Key Words : Ageing society, Handicapped, Multi-depot Dial-a-Ride, ALNS

一、前言

根據聯合國世界衛生組織定義，當一國 65 歲以上人口占總人口之 7% 以上時，稱作「高齡化社會」(Ageing Society)；超過 14% 為「高齡社會」(Aged Society)；超過 20% 則為超高齡社會(Super-aged Society)。2018 年 3 月我國內政部統計處指出臺灣高齡化比例已達 14.1%，正式進入高齡社會，而國家發展委員會^[1]則預測高齡化比例將於 2025 年突破 20%，屆時我國將屬於超高齡社會。此外，根據衛生福利部 2011 年至 2018 年統計資料^[2]，臺灣身心障礙人口數年平均每成長率為 0.92%，而截至 2023 年 01 月底，臺灣身心障礙人口已達 1,195,180 人，占總人口數比例 5.12%，其中以新北市 175,151 人最高，而六都中的臺南市有 98,505 人。

基於上述背景，倡導與提升無障礙運輸環境已成為我國近年來政府之重要施政方針。此外，行政院於 2016 年 9 月 29 日通過「長期照顧十年計畫 2.0」^[3]，並於 2017 年 1 月 1 日開始實施。其中針對 65 歲以上長者、55 歲以上原住民、身心障礙者及 50 歲以上失智症者提供照顧服務、居家護理、交通接送等共 17 項服務，其中交通接送服務便是以「長照巴士」協助民眾往返住家與醫療院所。我國復康巴士服務始於 1989 年，其服務對象僅限領有身心障礙手冊之民眾。目前國內共有 2,175 輛復康巴士^[3]，平均每輛需負擔 552 位身心障礙者，其中更有高達 76.12% 之車輛集中於六都，供需失衡情況相當嚴重。2012 年起交通部開始推動「通用計程車」，旨在提供民眾更多元之無障礙運具選擇，並給予司機每車最高 40 萬元之購車補助。然而通用計程車之費率主要按一般計程車費率計價，身心障礙民眾仍傾向搭乘成本較低之復康巴士，因而影響其既定的推展成效。根據交通部運輸研究所進行「預約式無障礙小客車運輸服務之整合研究」^{[5][6]}，結合政府、民間與學術單位檢視國內無障礙運輸環境，並建立一預約叫車系統將復康巴士與通用計程車整合派遣，嘗試以通用計程車改善復康巴士供不應求之情形，其成果已於台南市、嘉義市成功試辦。

基於透過地方業者與主管機關訪談，可以發現各縣市復康巴士營運模式可以分成「單一業者全區排班」、「單一業者分區排班」、「多元業者全區排班」以及「多元業者分區排班」等四種型態，且每種型態仍以人工進行排班。在人工排班情況下，高雄市單一業者全區排班，其每張班表需耗費 20 個排班人員 3 個工作天。臺北市屬於多元業者全區排班，由公共運輸處提供民眾一網路平台進行預約，再將需求按民眾偏好分派至各家業者，然而當業者接受訂單後仍需由人工進行長時間排班作業。臺南市、新北市、桃園市屬於單一業者分區排班，其原本目的之一係期望能透過分區經營減輕人工排班之複雜度，然而業者表示每張班表仍需至少 6 至 8 小時才能完成。臺中市屬於多元業者分區排班，包含 5 個分區以及 4 間業者各自營運，以第五區為例，每天約有 700 至 800 趟預約需求，即便由排班人員與資深復康巴士司機一同排班，每張班表仍需 2 個工作天。

因此，國內復康巴士營運在人工排班的情況下，無法提升其營運績效，亦無空間推動

更客製化的彈性營運，其結果顯示民眾需等待數日才得知是否預約成功，使得其心理不安；另一方面，營運業者往往無法處理臨時產生之需求，也無法有效提升其共乘率與週轉率。此外，部分縣市因人力限制而採用分區排班，使得各分區之車輛資源缺乏共用，尤其跨區服務之旅次容易造成空車往返，進而導致業者成本上升。因此，發展出一套合理之自動化排班方法用以提升目前復康巴士營運效率，實屬相當重要之課題。

因此，本研究旨在建立復康巴士自動化排班之數學模型並應用適應性大鄰域搜索(Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS) 演算法求解此多場站運輸撥召問題，研究中以臺南復康巴士為案例，探討自動化排班與資源共享帶來之效益，期能改善業者目前人工排班之困境，具體提升營運效率與服務品質。本文之內容架構如下，除本節說明研究背景與目的；第二節進行文獻回顧；第三節說明研究方法之架構；第四節以臺南市復康巴士進行實證分析；最後歸納本研究之內容與成果提出具體結論與建議。

二、文獻回顧

2.1 無障礙運輸服務

無障礙運輸環境逐年受到各國重視，旨在讓身心障礙者搭乘公共運輸時擁有更友善的乘車體驗。然而受限於旅次起迄點位置影響，途中的轉乘、步行是身障者在運具選擇時的一大考量，對於重度身障者或視覺障礙的民眾甚至需要專業陪同者陪伴搭乘。因此，身心障礙者更需要的是及門運輸服務，本小節針對國內外的無障礙需求反應式接送服務進行回顧。

2.1.1 我國無障礙運輸服務發展

我國身心障礙福利基礎奠定於 1980 年公布的《殘障福利法》。從「醫療模式」觀點將身心障礙定義為身體或心智的損傷對個人身心功能所造成的限制。1983 年出現第一輛無障礙專車「長江一號」，1989 年第一輛「復康巴士」便開始提供載客服務。復康巴士針對領有身心障礙手冊者提供其就醫、就學、就業、休閒等接送服務，由各縣市社會局、交通局所管轄，其收費大多以計程車跳表之 1/3 費用計價。一般小型復康巴士可容納 7 名乘客，每增加一名輪椅乘客便減少二名一般乘客，最多承載二台輪椅，民眾能透過電話、網路等方式進行預約。

行政院於 2017 年 1 月 1 日開始實施「長期照顧十年計畫 2.0」^[3]（簡稱長照 2.0），並自 2018 年起實施長期照顧服務給付及支付新制，為提升服務、強化效率，增加長照服務供給能量，因應我國逐漸擴大的長期照顧需求。衛福部發展「長照巴士」則是針對 65 歲以上長者、55 歲以上原住民、身心障礙者及 50 歲以上失智症者等提供住家至醫療院所之接送服務，由衛服部所管轄，而每趟收費依各縣市等級補助 190 至 300 元不等，餘額再按自付比率收費。長照巴士的車型配置與一般復康巴士相同，民眾能透過電話、網路方式進

行預約。

交通部發展「通用計程車」則是將一般廂型、休旅計程車加裝輪椅輔助設備，使其能安全地提供輪椅使用者交通接送服務。此係於 2012 年 12 月 6 日發布「交通部公路公共運輸提昇計畫補助通用計程車作業要點」，旨在推廣通用計程車成為一個新的無障礙運輸服務選項，同時服務復康巴士無法乘載的需求量。此外，為加速通用計程車之普及，政府提供司機每車最高 40 萬元補助。目前通用計程車主要由各縣市交通局管轄，其服務對象不限於高齡者及身心障礙者，一般民眾亦可搭乘，故其費率原則上與各縣市計程車規範一致。僅部分縣市針對特定使用者提供補助優惠，如臺北市、高雄市的敬老愛心卡補助。整體而言，復康巴士、長照巴士、通用計程車等為我國目前主要無障礙運輸服務，表 1 統整三者的服務對象與內容。

表 1 無障礙運輸服務對象與內容對照表

	復康巴士	長照巴士	通用計程車
服務對象	領有身心障礙手冊之身心障礙者，部分縣市只開放領有重度身障手冊者可申請。	設籍在申請者戶籍縣市且 65 歲以上長者、55 歲以上原住民、身心障礙者及 50 歲以上失智症者，經照顧管理專員評估有交通接送需求。	一般民眾皆可搭乘
服務項目	便利於身心障礙者就醫、就學、就業...等。	僅給付長照需要第 4 級(含)以上，並限定使用於照顧計畫中之就醫或復健。	以裝有輪椅輔助設備之計程車，提供高齡、身障者、一般乘客一個新的運具選擇。

2.1.2 國際無障礙運輸服務發展

為更清楚掌握無障礙運輸之特性，本小節回顧國際具代表性的無障礙運輸服務發展現況，其中復康巴士服務彙整香港、加拿大、英國之發展；通用計程車則回顧瑞典、美國、澳洲之發展，以之作為後續模式構建之參考。

香港復康巴士^[7]由香港復康會所建立，此會是香港政府認可的慈善機構，1978 年建立復康巴士服務，並於 1980 年成功獲得政府資助，由香港特別行政區政府勞工及福利局提供資金來源，運輸署監管日常營運。香港復康會主要提供三種復康巴士接送服務，「電召服務」是為事先預約租車的行動不便人士提供 24 小時點到點的交通接載服務，其收費依是否為香港居民而有差異；「聯載服務」提供行動不便之人士每星期固定的用車服務，使用者的時間及上下車地點必須固定，且能配合現有的路線和時間，收費採月費 160 元港幣為主；「穿梭巴士」提供身心障礙者、長者及其陪同者交通服務，其服務方式以循環形式行走，乘客可於巴士沿途的任何地點上下車，每趟車資為港幣 4 元。

加拿大城市交通協會 (2013) 制定無障礙小客車運輸服務實施指南^[8], TransLink 是溫哥華地區的運輸服務機構, 負責管理協調大溫哥華地區內各樣公共運輸、主要道路以及橋梁。TransLink 設有 The Access Transit 部門, 負責確保身障者、高齡人口以及新移民在運輸搭乘上能夠感到舒適^[9]。其服務項目主要包含送客到府 HandyDART 服務、計程車與大眾交通使用減免以及各大眾交通工具的身障設施, 民眾須提前預約但可預約固定行程。但 HandyDART 司機並不會協助身障者上下樓梯或是幫忙提重物, 故可免費攜帶照護者協助上下車^[10]。

英國倫敦交通局 (1982) 首度提供復康巴士服務稱為 Dial-a-Ride^[11], 民眾必須在搭車前一天進行預約, 同時也接受定期旅次之預約, 但不包含交通尖峰期以及就業、就學、醫療等服務。Dial-a-Ride 依據身心障礙人士需求派出適合車型, 同時採取共乘制度, 此點與加拿大、瑞典相同。身心障礙者透過申請, 經過評估確認乃成為會員, 惟盲人、85 歲且領有身心障礙人士無需申請。其費率在 8 公里內的送客到府服務為免費服務。

瑞典政府 (1975) 開始規劃身障人士的特殊交通服務 (Special Transport Service, 簡稱 STS)^[12], 哥德堡 STS 必須事先預約, 預約時必須告知目的地地址、是否有人陪同、是否隨身攜帶行李等。一輛車最多可載四人, 故在安排行程時會考慮鄰近的使用者共乘。瑞典透過與私人計程車業者合作, 成功將計程車與大眾交通工具整合在一起, 提供身障者載客服務。其宗旨為永遠歡迎顧客, 並讓身障者有主動且獨立生活的能力。STS 提供身障者私人生活所需, 舉凡採買、工作、理髮、拜訪友人, 都可預約。但不提供醫療載乘服務, 此服務由醫療照護機構負責。

美國身心障礙者法案 (1990) 奠定了美國的無障礙運輸基礎, 同時強調身心障礙者就業權利不應受到歧視^[13]。紐約的 Accessible Dispatch 是當地的通用計程車隊之一, 提供全年無休之叫車服務, 可利用電話、簡訊、網路等方式預約, 且不需提前預約。乘客叫車後, 派遣中心會指派螢幕上最接近之計程車, 司機若按鈕接受後會直接前往載客, 若兩分鐘後該司機仍無反應, 將自動跳至下一位鄰近司機。其中派遣到載客地之費用由派遣公司負擔。紐約之通用計程車發展預計全面汰換現有計程車為無障礙計程車, 費用將由市府全額補助, 採全市計程車皆為無障礙計程車, 不限制乘客搭乘使用, 故收費方式與原有計程車收費標準相同^[14]。

澳大利亞社區交通協會 (Australian Community Transport Association, ACTA)^[15] 是澳洲負責社區運輸的國家級主管部門, 其於 2016 年首度制定規範, 確立 ACTA 持續推動創新、永續的交通服務, 提供身心障礙者完善的交通服務。雪梨的 Easy Transport 是當地的社區運輸服務系統之一, 針對有運輸需求且無力駕駛者提供及戶的運輸服務而設計^[16]。雪梨無障礙小客車的服務對象包括高齡者、身心障礙者與看護的就醫、購物與社交休閒活動, 所提供的服務車輛包括汽車、小型巴士與貨車。欲申請者需直接聯繫當地的各社區交通服務業者, 業者以電話評估申請人是否具有使用服務的資格。業者之營運資金來源包括個人捐贈、遺產捐贈與慈善組織贊助^[17]。再者, 雪梨的 Easy Transport 費率由政府補貼, 若乘客無力支付也可搭乘。另外, 墨爾本的 LINK Community Transport (LCT)^[18] 是一間私

人的非營利公司，主要提供無障礙小客車的運輸服務。LCT 的司機都是志工，在正式上路載客前都需要參與事前訓練，主要在墨爾本的北部和西部提供服務。

2.2 運輸撥召問題

Flood^[19] 提出旅行推銷者問題 (Traveling Salesman Problem, TSP)，是經典的行程規劃問題，敘述一名推銷員從起點出發後，通過所有給定的需求點，最終回到出發位置，求解該名推銷員最低成本的移動路徑。Dantzig and Ramser^[20] 將 TSP 進行延伸，發展出車輛繞境問題 (Vehicle Routing Problem, VRP)。VRP 概念與 TSP 相當類似，但採用車輛前往拜訪所有需求點載送貨物，求解成本最低的移動路徑。此類問題會因車型容量限制、場站數量、顧客時窗等而產生許多延伸課題。此類問題已被證明屬於 NP-hard 問題，靳蕃等人^[21] 整理路網節點數對應求解時間的關係，顯示隨節點數增加求解複雜度呈現指數型上升，故許多學者提出各式演算法，嘗試逼近此類問題的最佳解。

而時窗限制車輛路徑問題 (Vehicle Routing Problems with Time Windows, VRPTW) 是具有時窗的 VRP 問題，車輛必須在特定的時窗內抵達每個需求點。Pullen and Webb^[22]、Knight and Hofer^[23] 透過啟發式演算法求解 VRPTW 問題，是此類問題最早的相關文獻。一般而言 VRPTW 所運送的對象為貨物，然而運送的對象若是人，則通常稱為撥召服務問題 (Dial-A-Ride Problem, DARP) 或時窗限制接送問題 (The Pickup and Delivery Problem with Time Windows, PDPTW)。主要差異在於人的移動會有明確的起迄點，車輛是根據需求者的預約內容來進行排班及派遣，不像公車有固定的班次與路線，這種根據實際需求而產生彈性的服務模式，稱作「需求反應式運輸服務」。

1970 年美國俄亥俄州的曼斯菲爾德市所試辦第一個需求反應式公共運輸服務，稱作 Dial-A-Ride。1972 年英國 Abingdon 區域開始提供 Dial-A-Ride Service，尤其針對身心障礙者給予交通接送服務，由於身心障礙者對於及門運輸服務的需求遠比一班民眾高，往往必須透過提前的預約叫車來滿足未來的就醫及日常活動，也因此需求反應式所提供的彈性服務模式，便顯得相當重要。2.1 節所回顧各國無障礙運輸服務，便是基於上述的背景衍生而來。後期關於無障礙的需求反應式服務，便多以 DARP (Dial-a-Ride Problem) 作為此類問題的代稱。

DARP 可分成四種情境。根據決策者的營運策略分為靜態排班與動態排班，靜態排班意指當班表排定後，不再根據實際情形作調整，動態排班則具有即時規劃的能力。根據需求者的特性分為靜態需求與變動需求，前者表示問題中所有的需求預先知道且不會變動，後者則表示需求可能隨時間而產生改變。本研究將四種情境彙整如表 2 所示。

靜態規劃求解靜態需求是 DARP 文獻中最常見的類型，主要追求透過演算法求出更好的解答，或是透過更複雜的限制來貼近現實生活的情況。Braekers et al.^[24] 採用同一司機服務特定乘客在一日內的多趟旅次，並考量相異車型造成的容量差異，結果顯示該情境下成本比正常提高 27.98%，然而當條件鬆綁為二位司機，成本僅增加 5.8%。Schönberger^[25] 考

表 2 DARP 情境分類

		需求者特性	
		靜態需求	動態需求
營運者決策	靜態規劃	Static and deterministic	Static and stochastic
	動態規劃	Dynamic and deterministic	Dynamic and stochastic

量使用者旅次可能需要轉乘，將 Transfer Scheduling Constrains (TSC) 加入 DARP 模式中進行求解，以保證每個使用者下車後擁有充足且舒適的轉乘時間。Lim et al.^[26] 以香港醫療接送服務為對象，將醫院人力排班問題融入多途程運輸撥召問題，建立 ILS-VND 演算法進行求解。Molenbruch et al.^[27] 研究顯示業者彼此合作後確實能降低營運成本，並認為後續研究若加入動態需求至合作情境，更能彰顯合作效益。

靜態規劃求解動態需求較為少見，具代表性的文獻大多強調使用者在起點所產生的隨機性。Hyytiä et al.^[28] 假設使用者抵達時間為 Poisson 分配，求解運輸撥召系統的服務品質。Ho and Haugland^[29]、Heilporn et al.^[30] 分別將起點上車人數、使用者抵達時間設為一機率分布，求解模式對於未來事件的應變能力。

動態規劃求解靜態需求文獻中，主要處理當一個新的預約需求產生時，業者所及時採取的規劃策略。Häll et al.^[31] 模擬以動態撥召服務取代一般副大眾運輸系統造成的差異，該研究考量車輛行駛成本以及乘客等待與額外繞行的時間成本，結果表示因動態規劃所及時解決的乘客時間成本較車輛行駛成本要為顯著。Markovic et al.^[32] 開發 MRMS 系統優化馬里蘭地區每日約 450 趟次的運輸撥召服務，該系統提供車上導航設備，協助司機行駛與業者監控司機值勤表現，其演算法的結果預期節省業者 18% 的年營運成本。

動態規劃求解動態需求相對上述三者具有更高的複雜度。Maalouf et al.^[33] 運用動態模糊邏輯進行排班，該研究僅考量乘客期望抵達時間，藉以安排每位乘客的起點接送時間，因模糊邏輯求解時間極短，可達到即時之動態規劃。Muñoz-Carpintero et al.^[34] 建立需求預測模型，在面對各種需求情境下，以 GA 演算法搭配 PSO 演算法達到即時的求解規劃。

2.3 巨集啟發式演算法

DARP 本身具高度複雜性，面對小規模的 DARP，學者們透過精確解方法來獲得最佳解，其概念主要基於 Held and Karp^[35] 提出的 Branch-and-Bound (B&B) 方法。然而，面對規模稍大的 DARP，精確解便因無法窮舉而不堪使用。建構啟發式演算法因此被大量應用，其中以鄰近演算法、貪婪演算法最為常見。透過簡易的局部搜尋，通常能快速獲得可行解，然而缺點是容易落入局部最佳解。為了更逼近全域最佳解，學者紛紛提出巨集啟發式演算法來進行求解，如基因演算法、模擬退火演算法、禁忌演算法、蟻群演算法、大規模鄰近搜尋演算法等。

Holland^[36] 提出基因演算法 (Genetic Algorithm, GA)，其概念源自生物學中的演化理

論。GA 視每個初始解為一個個體，藉由個體的交配、突變來產生後代，表現優良的後代便能持續繁衍，基於優生學的角度來逼近全域最佳解。

Kirkpatrick et al.^[37] 提出模擬退火演算法 (Simulate Anneal Arithmetic, SA)，其源自物理學中固體的分子因高溫而激烈運動，而後隨著溫度冷卻趨於穩定的概念。每次搜尋的結果會與當前最佳解進行比較，根據當下的溫度計算出一機率值來決定是否接受該結果，同時亦接受劣解來防止落入局部最佳解，最終因溫度降低而朝全域最佳解收斂。Brackens et al.^[38] 提出 Deterministic Annealing (DA)，該研究選用更多元的搜尋機制，並將接收劣解的條件從機率值改為門檻值，一旦劣解達到門檻便選擇接受，搜尋效率顯示優於 SA。

Glover^[39] 提出禁忌演算法 (Tabu Search)，Cordeau and Laporte^[40] 首次將禁忌演算法應用於 DARP 的求解。禁忌演算法將每次良好搜索的結果紀錄於禁忌列表，在未來一定的記憶長度內，能防止該結果再被更動。此外，為了防止落入局部最佳解，禁忌演算法允許劣解的產生來擴大搜尋範圍。

Dorigo et al.^[41] 提出蟻群演算法 (Ant Colony Optimization, ACO)，其概念取自螞蟻覓食的行為模式。該演算法中每個個體在空間上具有獨立搜尋的能力，故其搜尋範圍較為全面，而透過個體之間的正向回饋機制，能逐漸逼近全域最佳解。

Shaw^[42] 提出大鄰域搜索 (Large Neighborhood Search, LNS) 演算法，透過 Shaw Removal 作為解構演算法，搭配 Branch and Bound 作為重構演算法，反覆執行解構與重構的步驟，證明能有效改善路線。Røpke and Pisinger^[43] 將適應性機制加入 LNS 演算法，提出適應性大鄰域搜索 (Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS)，除了增加解構與重構邏輯的多樣性，更強調每次運算的結果將反映在該演算法下次再被選中的機率值。透過例題測試證明求解效率與成果皆優於 LNS 演算法。

2.4 小結

本節回顧國內外無障礙運輸服務現況，充分了解 DARP 問題的特性，認為一個有效的排班機制能降低業者的營運成本，進而能提供民眾更優質的服務。根據臺南市復康巴士營運績效，平均每天有 1,200 個訂單需求，車輛分布於 11 個場站並分成 3 區排班，在民眾需求的起點、迄點、時窗不盡相同的情況下，排班實屬相當複雜的問題。而透過演算法的回顧，ALNS 演算法擁有卓越的搜尋能力處理複雜且大規模的 DARP 問題。Ho et al.^[44] 彙整 2007 年至 2018 年求解 DARP 標竿例題之相關文獻，本研究依作者、演算法與問題種類綜整於表 3，可發現以 LNS、ALNS 方法最廣為應用。故本研究將採用 ALNS 演算法作為實證分析的求解基礎。

三、研究方法

Cordeau et al.^[45] 針對單一場站 Dial-a-Ride Problem (DARP) 建立了基礎模型，其在滿

足節點的時窗、需求量、流量守恒以及車輛容量等限制下，求取最小的業者行駛成本。本研究採用之多場站運輸撥召模型即為該基礎模型之延伸，透過參數 a 控制車輛提供載客之限制條件，當條件嚴謹時，表示業者之間無法共享同一位乘客，反之表示資訊彼此流通。關於 MD-DARP 之目標式與限制式於 3.1 節進行說明。此外，已知 DARP 屬 NP-Hard 問題，面對規模較大之案例必須採用演算法進行求解，本研究基於 Røpke and Pisinger^[43] 對於演算法的比較分析，選擇應用 ALNS 演算法求解，將於 3.2 節針對 ALNS 演算法進行說明。

表 3 DARP 標竿例題與演算法統整

作者	演算法	DARP	HDARP	MD-HDARP
Parragh et al. (2010)	VNS	O		
Parragh (2011)	VNS	O	O	
Parragh and Schmid (2013)	CG+LNS	O		
Qu and Bard (2013)	MS-ALNS		O	
Braekers et al. (2014)	DA	O	O	O
Masson et al. (2014)	ALNS	O		
Chassaing et al. (2016)	ELS	O		
Gschwind and Drexler (2016)	ALNS	O		
Gschwind and Drexler (2016)	H-ALNS	O		
Ritzinger et al. (2016)	LNS+DP	O		
Masmoudi et al. (2016)	ALNS			O
Masmoudi et al. (2016)	BA-DA			O
Masmoudi et al. (2016)	BA-SA			O
Masmoudi et al. (2017)	GA+LS	O	O	
Molenbruch et al. (2017)	LNS	O		O

資料來源：Ho et al.^[44]、本研究彙整。

3.1 MD-DARP 數學模型

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ijk} * X_{ijk} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ijk} - \sum_{j \in V} X_{n+i,j,k} = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} X_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} X_{jik} - \sum_{j \in V} X_{ijk} = 0 \quad \forall i \in P \cup D, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} X_{i,2n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$B_{jk} \geq (B_{ik} + s_i + t_{ij}) * X_{ijk} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (7)$$

$$Q_{jk} \geq (Q_{ik} + q_j) * X_{ijk} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ijk} \leq a_{ik} \quad \forall i \in P, \forall k \in K \quad (9)$$

$$t_{i,n+i} \leq [B_{n+i,k} - (B_{ik} + s_i)] \leq L \quad \forall i \in P, k \in K \quad (10)$$

$$B_{2n+1,k} - B_{0k} \leq T_k \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$\max \{0, q_i\} \leq Q_{ik} \leq \min \{M_k, M_k + q_i\} \quad \forall i \in V, k \in K \quad (12)$$

$$e_i \leq B_{ik} \leq l_i \quad \forall i \in V, k \in K \quad (13)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad (14)$$

標號

0, 2n+1 : 場站節點

i, j : 需求起訖節點

k : 車輛編號

集合

Vertex (V) : 節點集合 = {Pickup, Delivery, Depot}

Pickup (P) : 起點集合 = {1, 2, 3, ..., n}

Delivery (D) : 迄點集合 = {n+1, n+2, n+3, ..., 2n}

Depot : 場站集合 = {0, 2n+1}

Vehicle (K) : 車輛集合 = {1, 2, 3, ..., k}

參數

q_i : 節點 i 的上/下車人數 ($q_{n+i} = -q_i$, $q_0 = q_{2n+1} = 0$)

s_i : 節點 i 的服務時間 ($s_0 = s_{2n+1} = 0$)

e_i : 節點 i 時窗開啟時間

l_i : 節點 i 時窗關閉時間

C_{ijk} : 車輛 k 行駛路線 (i, j) 的時間

t_{ij} : 車輛行駛路線 (i, j) 的時間

T_k : 車輛 k 每天最大行駛時間

L : 乘客最大車上時間

- M_k : 車輛 k 的容量限制
 a_{ik} : 二元常數, $a = 1$ 表示節點 i 能被車輛 k 所服務, 反之則 $a = 0$

變數

- X_{ijk} : 二元變數, $X = 1$ 表示車輛 k 有行駛路線 (i, j) , $X = 0$ 表示無。
 B_{ik} : 車輛 k 實際抵達節點 i 的時間
 Q_{ik} : 車輛 k 服務完節點 i 後的車內乘客數

目標式(1)中 Z 表示最小化總行駛時間。限制式(2)、(3)表示每個需求皆被服務恰好一次, 且抵達該需求之起點與迄點必須為同一台車。式(4)、(5)、(6)保證車輛皆從場站出發後, 其行駛過程必須滿足流量守恒, 最終回到場站。式(7)、(8)強調起點與迄點在時間、容量上的一致性, 意即抵達時間必定不小於出發時間、行駛時間、服務時間之總和; 服務後的車上人數必不小於原先車上人數與該需求點上/下車人數之總和。式(9)透過二元參數 a 的設定, 調控不同場站之間的車輛是否能服務特定乘客。式(10)、(11)、(12)分別限制民眾最大車上時間、司機最大工作時間以及車內最大容量。式(13)針對每個需求點設定時窗限制, 式(14)限制 X_{ijk} 為 0,1 二元變數。

3.2 演算法設計

3.2.1 演算法架構

本研究欲建立復康巴士自動排班模式, 使用 ALNS 演算法求解大規模之 MD-DARP, 初始解利用 NNH 演算法產生, 並將該初始解輸入至 ALNS 演算法進行改善, 改善方法主要透過「解構機制」、「重構機制」反覆運用使總成本逐漸降低。Røpke and Pisinger^[43] 已驗證 ALNS 演算法因加入多重邏輯使求解效果優於 LNS 演算法, 故本研究針對二種機制亦各設計了 3 種邏輯, 每次迭代模式會針對機制各隨機選擇 1 種邏輯進行演算, 但當結果優於現況時, 「適應性機率模型」將增加下次迭代選到該邏輯之機率。反之, 當結果劣於現況時, 「劣解接受機制」將計算接受該劣解之機率值提供模式判斷。模式會記錄每次迭代後的結果, 一旦達到最大迭代次數或連續 N 次未更新最佳解, 便會停止運算並輸出歷史最佳解。圖 1 是 ALNS 演算流程, 3.2.2 至 3.2.6 節則針對初始解構建、解構機制、重構機制、適應性機率模型、劣解接受機制進行說明。

3.2.2 初始解構建

最鄰近搜尋法(Nearest Neighbor Search, NNH)是業者皆指派最鄰近需求點的車輛前往服務, 反覆執行直到滿足所有需求點。其中, 業者指派的車輛必須符合時窗、容量、工作量等相關限制。而本階段為講求初始解的產生效率, 排除共乘機制, 單純以產生可行解為目標。共乘之情境則是交由 ALNS 演算法的重構與解構邏輯來滿足。

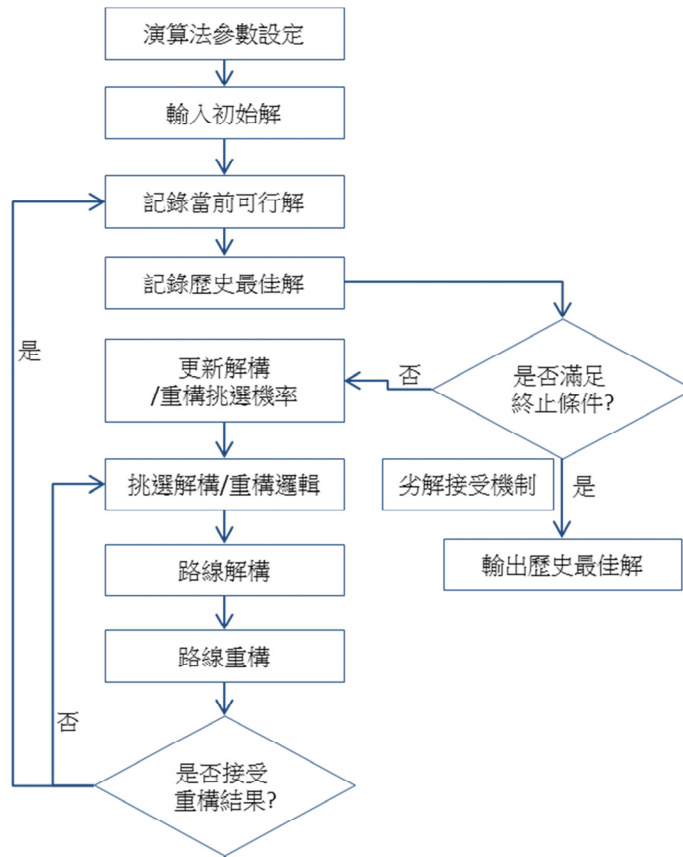


圖 1 ALNS 演算法流程

3.2.3 解構機制

當特定需求造成特定路線成本過高時，演算法便猜測該需求可能不適合由該車輛進行服務。解構機制是將這群已服務需求移轉至未服務需求區的方法，本研究採用之判斷邏輯有以下三種。

1. 隨機需求解構：隨機產生參數 $\lambda = \{0.1, 0.2, 0.3\}$ ，假設目前已服務需求總數為 D ，則模式從 D 中隨機挑選 λD 個需求起訖對重置於為服務需求區，藉由隨機的特性強化演算法的探勘能力。
2. 最差路線解構：比較當前每條路線的總成本，並將成本最大路線內的所有需求移轉至未服務需求區，藉此降低潛在的無謂繞行，是解構機制中能大幅優化排班結果的核心邏輯。
3. Shaw 解構：Shaw 解構邏輯是 Shaw^[42] 提出的邏輯，該研究指出透過解構相似度高的需求點，可提升未來重構時產生交換或共乘的機率。模式隨機挑選出一個需求起訖對 $(r1, r2)$ ，利用 $R(i,j)$ 方程式計算所有需求與該需求在時間、空間關係的相似程度（公式詳見式 15），並將相似程度排名前 $y\%$ 的需求移轉至為服務需求區，本研究隨機產生介於 5%

至 10%之參數 y 。

$$R(i, j) = w_1 \times \frac{d_{ij}}{d_{max}} + w_2 \times \frac{|t_i - t_j|}{(t_{max} - t_{min})} \quad (15)$$

$R(i, j)$: 需求 i 、需求 j 之間的相似程度

w_1, w_2 : 權重

d_{ij} : 需求 i 與需求 j 之間的距離

t_i, t_j : 需求 i 、需求 j 被服務的時間點

d_{max} : 所有需求之間距離的最大值

t_{max} : 所有需求中第一個與最後一個被服務的時間間隔最大值

t_{min} : 所有需求中第一個與最後一個被服務的時間間隔最小值

3.2.4 重構機制

重構機制為解構機制的反向操作，其將因解構而位於未服務區之需求重新插入至路線當中，本研究選用之安插邏輯有以下三種。

1. 隨機路線插入：模式計算所有可行解路線後，隨機選擇一條路線做為插入對象，隨機插入通常並非當下最好的結果，但其主要目的在增強模式的探勘能力。
2. 最佳路線插入：模式計算所有可行解路線後，選擇成本增加最少的路線為插入對象。
3. 最小後悔插入：Potvin and Rousseau^[46] 提出利用後悔值作為路線選擇的依據，即選擇一個在未來後悔程度最小的方案作為決策。其概念較前兩者遠視，但因為平行考量情況較為複雜，需要更長的決策計算時間。舉例說明，假設未服務需求區有 3 個需求，而路網中有 A,B,C 三條路線。模式便能構建一後悔矩陣如表 4，表中數值為需求對應路線插入後的最佳成本，若無法插入則以極大值 100,000,000 作為替代。總後悔值的計算方式該需求為放棄最佳路線而造成各路線後悔值之總和。舉例而言，需求 2 的最佳路線為路線 A，若指派該需求於路線 B，將造成 70-65=5 的後悔值；若指派該需求於路線 C，將造成 85-65=20 的後悔值，故需求 2 的總後悔值為 25。需求 1、需求 3 的總後悔值以此類推，故選擇總後悔值最小的需求 2 插入路線 A 作為最終決策。

表 4 後悔矩陣

	路線 A	路線 B	路線 C	總後悔值
需求 1	100,000,000	100	150	99,999,950
需求 2	65	70	85	25
需求 3	120	100,000,000	30	100,000,060

3.2.5 適應性機率模型

當重構失敗時，本研究利用一記憶列表紀錄造成失敗之結果，以防止在同一情境下反覆選到該演算邏輯，該記憶列表於每次求得新結果時清空。此外，適應性機率模型將每次求解的效果反映在下次挑選該解構與重構方法的機率，當結果優於歷史最佳解，該方法增加 δ_1 個機率種子；當結果在過去不曾被接受，而現在接受且優於目前結果，該方法增加 δ_2 個機率種子；當結果在過去不曾被接受，而現在接受但劣於目前結果，該方法增加 δ_3 個機率種子。本研究認為最佳解之優化較拓展搜尋範圍更為重要，而回顧過去文獻亦無明定其機率調整幅度，故設定 $\delta_1=3$ 、 $\delta_2=2$ 、 $\delta_3=1$ 。而實際設定上，需將演算法之總迭代次數切分為 N 個區段，每個解構與重構方法在區段起點被挑選的機率相同，機率值隨著求解過程不斷調整，並於下一區段之起點重設初始機率。

3.2.6 劣解接受機制

巨集啟發式演算法為了增加求解範圍的廣度，往往在一定條件下選擇接受劣解，然而若無條件地接受劣解，則無法引導演算法趨近最佳解，反而陷入錯誤的局部探勘。故在過去文獻大多設定一機率值，當劣解發生時僅有一定機率接受該結果。本研究於第二節回顧模擬退火演算法，其概念為透過溫度的調控，使接受劣解之機率隨溫度冷卻而收斂，本研究將此概念融合於 ALNS 演算法，其機率 $F(i)$ 計算方法如式(16)所示，其中冷卻率 ρ 參考 Vincent et al.^[47] 使用 0.99，初始溫度 $T_0=100$ 。

$$F(i) = e^{(x_i - x_{cur})/T_i} \quad (16)$$

$F(i)$: 接受該劣解之機率值

I : 當前迭代次數

x_i : 劣解值

x_{cur} : 當前目標值

T_i : 當前溫度，其中 $T_i = \rho * T_{i-1}$ ， ρ 為冷卻率

四、案例測試與實證分析

本節首先評估 ALNS 演算法求解績效，採用 Gurobi Solver 求取小案例最佳解與 ALNS 演算法之結果進行比較。4.1 節案例一為本研究以亂數方式產生 10 個需求起迄點進行測試；4.2 節案例二引用魏健宏等人^[48] 提供之復康巴士 24 個需求點測試範例，由於該範例為單一場站問題，本研究將增設場站以符合 MD-DARP 之情境。4.3 小節針對 2019 年 3 月份之臺南復康巴士營運數據進行實證分析。

4.1 案例一

為測試本研究建立之自動化排班模型求解績效，故以隨機方式產生 10 個小案例，比較演算法結果與實際最佳解之差距。每個案例採亂數方式於早上 8 點至 12 點產生 10 組需求，起迄點介於(10,5)、(10,-5)、(-10,5)、(-10,-5)之包絡範圍內，並以直線 $x = 0$ 作為 A、B 業者區域劃分之界線，若起點之 x 座標小於 0 則該訂單屬於 A 業者，反之屬於 B 業者。此外，A 業者之場站設於(-3,0)、B 業者場站設於(3,0)，兩家業者各擁有 2 台車。

統計 10 次的求解誤差分布，可知在分區排班情境下 ALNS 演算法求得之結果與最佳解的平均誤差僅 0.78%。而在全區排班情境下，由於限制條件鬆綁，有限時間內演算法需探勘更多元的路線組合，造成其平均誤差提升至 3.62%。雖在不同需求情境下，無法保證演算法能求得最佳之結果，但回顧過去文獻多認為當誤差收斂至 5%以內時視為可接受之範圍，故認為本研究建立之自動化排班模式應用 ALNS 演算法已具優良之求解能力。

為進一步說明模式能處理共乘、跨區以及兩種排班概念，本研究額外產生一組小案例進行說明，詳細需求資訊陳列於表 5。其中編號 1 與編號 11 為同一組需求起迄對，以此類推。

表 5 案例一需求資料

起點編號	起點	迄點編號	迄點	時窗範圍	隸屬場站
1	(-4.9, 0.9)	11	(-1.9, -0.6)	[656, 670]	A
2	(2.5, -3.4)	12	(-5.3, -4.1)	[485, 517]	B
3	(9.7, 0.5)	13	(9.1, 4.3)	[673, 689]	B
4	(8.4, 0.8)	14	(8.0, -2.7)	[536, 552]	B
5	(6.3, 1.5)	15	(4.9, 2.7)	[686, 694]	B
6	(-5.3, -3.5)	16	(-7.6, -1.8)	[723, 735]	A
7	(6.2, -0.5)	17	(1.3, -2.2)	[512, 534]	B
8	(-5.2, 3.4)	18	(-1.9, 1.0)	[663, 681]	A
9	(-8.7, 5.0)	19	(5.5, 3.4)	[654, 712]	A
10	(9.1, 0.3)	20	(6.0, 2.1)	[528, 544]	B

當 A、B 場站分屬兩間業者時，其必須按其資源以及分區規定進行排班。表 6 列出分區排班之求解結果，其中 Gurobi solver 花費 0.16 秒便求得最佳解 252，而 ALNS 演算法花費 1.35 秒求得結果 253，兩者之間誤差值僅 0.4%。使用之車輛數皆為四台，A 場站之路線規劃在需求 6 產生差異，最佳解選擇將需求 6 分派於 Car1 路線，而 ALNS 演算法將其納入 Car2 路線。B 場站的路線規劃則完全一致，詳細的路線示意圖可見圖 2、圖 3。

表 6 案例一分區排班求解比較

	分區排班	
	Gurobi solver	ALNS 演算法
求解時間	0.16 sec	1.35 sec
最佳解	252	253 (Gap = 0.4%)
A 場站排班	Car1: A, 1, 11, 6, 16, A Car2: A, 9, 8, 18, 19, A	Car1: A, 1, 11, A Car2: A, 9, 8, 18, 19, 6, 16, A
B 場站排班	Car3: B, 2, 12, 10, 20, B Car4: B, 7, 17, 4, 14, 3, 13, 5, 15, B	Car3: B, 2, 12, 10, 20, B Car4: B, 7, 17, 4, 14, 3, 13, 5, 15, B

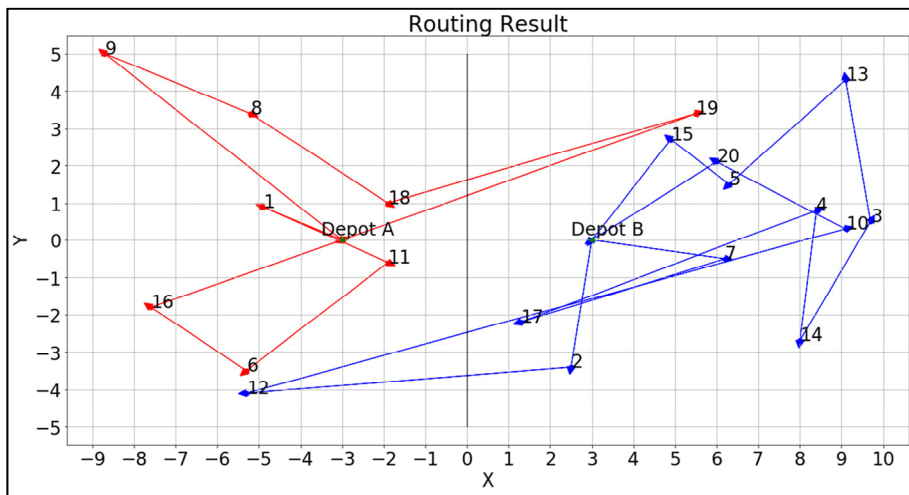


圖 2 案例一 Gurobi Solver 分區排班結果

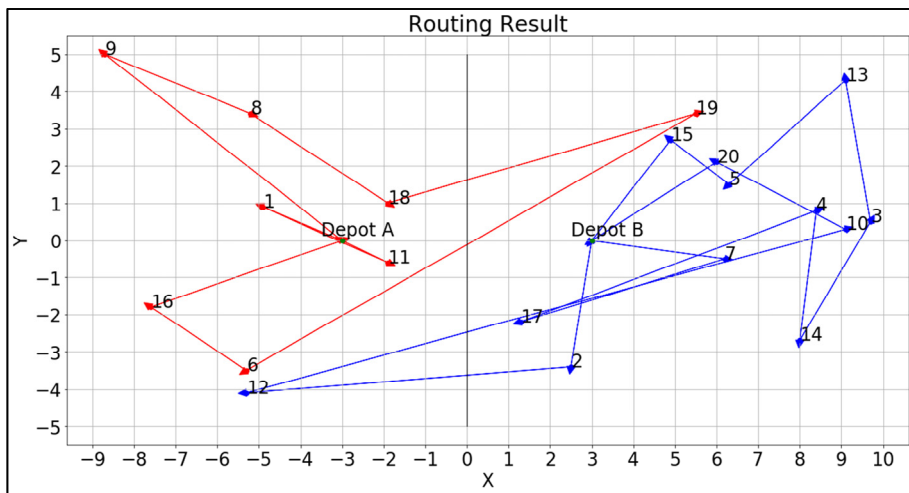


圖 3 案例一 ALNS 分區排班結果

當 A、B 場站屬於同一間業者時，業者在排班規劃上便增加許多彈性，其服務對象不再受到區域限制，可在有限資源下安排更適合之車輛提供服務。表 7 列出全區排班的求解結果。其中 Gurobi solver 花費 5.18 秒求得最佳解 217，而 ALNS 演算法花費 3.47 秒求得結果 227，兩者之間誤差值 4.4%。

表 7 案例一全區排班求解比較

	全區排班	
	Gurobi solver	ALNS 演算法
求解時間	5.18 sec	3.47 sec
最佳解	217	227 (Gap = 4.4%)
A 場站排班	Car1: A, 1, 11, A Car2: A, 2, 12, 6, 16, A	Car1: A, A Car2: A, 2, 12, 1, 11, 6, 16, A
B 場站排班	Car3: B, 7, 17, 9, 8, 18, 19, B Car4: B, 10, 20, 4, 14, 3, 13, 5, 15, B	Car3: B, 7, 17, 9, 8, 18, 19, B Car4: B, 10, 20, 4, 14, 3, 13, 5, 15, B

比較分區排班情形，全區排班因問題複雜度的提升造成求解時間明顯增加，演算法結果誤差也隨之提升，然而兩種方法皆顯示全區排班確實降低了業者之總成本。其中，Gurobi solver 求得之最佳解仍然使用 4 台車，ALNS 演算法僅使用 3 台，選擇將 Car1 中需求 1 納入 Car2 路線，Car3、Car4 之路線則一致。

4.2 案例二

本案例將魏健宏等人^[48]提供之復康巴士測試範例修改為多場站模式，其包含 24 個需求起迄對，編號 1 與編號 25 為同一組需求起迄對，以此類推。本研究依原題目所訂之出發時間設為時窗開啟，並於該時點之 30 分鐘後設為時窗關閉。此外，本研究按其需求分布情形，選擇以直線 $x = -2$ 作為 A、B 業者分區之界線，左半部屬於 A 業者，其場站位於 (-5,0)，右半部屬於 B 業者，其場站位於 (1,0)，兩間業者皆擁有 3 台車。詳細情形可參考圖 4。

案例二求解結果比較如表 8，當 A、B 場站分屬兩間業者時，Gurobi solver 可在 140 秒求出分區排班最佳解 510，而 ALNS 演算法花費 3.41 秒，求得結果 529，與最佳解誤差 3.59%。然而在當 A、B 場站屬於同一業者時，業者採用全區排班，結果顯示 Gurobi 求解 30 小時仍無法收斂至最佳解，其上下界之 Gap 仍存在 23.24%，選用上界 482 作為求得之結果。ALNS 演算法面對複雜之全區排班，花費 4.19 秒便將成本收斂至 484，與 Gurobi solver 求解 30 小時之結果誤差僅 0.41%，顯示當問題複雜度提升、求解規模放大時，ALNS 演算法確實擁有較佳的求解效率。

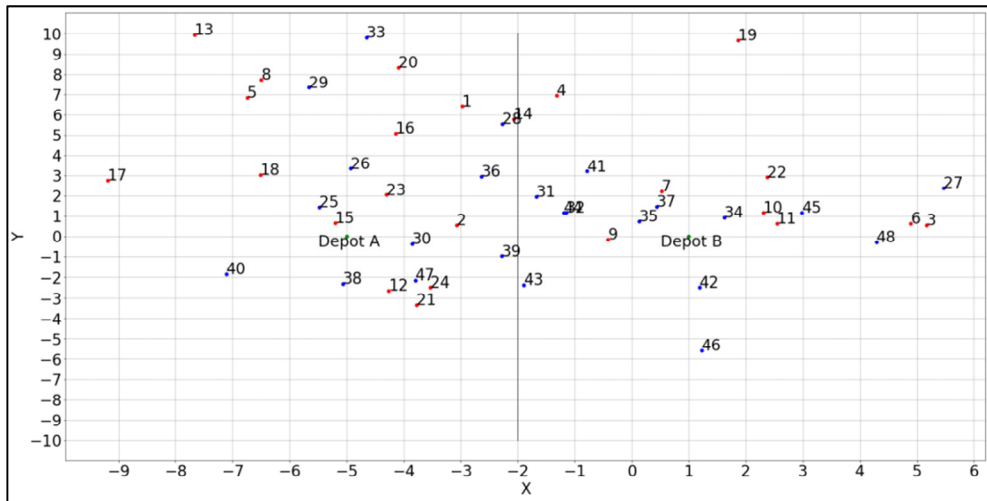


圖 4 案例二需求分布示意圖

表 8 案例二結果比較

		Gurobi solver	ALNS
分區排班	求解時間	140 秒	3.41 秒
	總成本	510	529 (Gap = 3.59 %)
全區排班	求解時間	>30 小時	4.19 秒
	總成本	482	484 (Gap = 0.41 %)

4.3 實證案例簡介

根據 2019 年內政部及衛福部統計，臺南市 1,883,831 人口中有 97,809 位身心障礙者。本研究整理了六都身心障礙人口佔縣市總人口數的比例（如表 9），結果顯示臺南市高達 5.19%，位居六都之首。

表 9 六都身心障礙人口比例

	身心障礙者人數 (人)	總人口 (人)	身心障礙者比例 (%)
新北市	167,297	3,995,717	4.18%
臺北市	120,721	2,668,572	4.52%
桃園市	83,585	2,220,872	3.76%
臺中市	124,114	2,803,894	4.43%
臺南市	97,809	1,883,831	5.19%
高雄市	140,856	2,773,533	5.08%

臺南市復康巴士服務由社會局委託臺南都志願服務協會辦理，現有 140 位司機及 147 輛復康巴士，採用人工排班，目前每日需求量平均高達 1,200 趟次，在有限的「人腦運算」條件下，業者將行政區劃分為溪北區、溪南區、永華區進行排班，民眾則是根據本身的戶籍地址所進行電話預約。根據業者訪談可知，目前每張班表至少花費 6 至 8 小時來排班，民眾必須等待在業者排班完成後，才得知是否能如期搭車，業者則是以電話通知無法搭車的民眾成為候補名單。目前臺南市復康巴士計費方式如表 10，根據業者現有排班方式僅能保障第一級使用者能於 7 天前進行預約，第二級使用者則為 5 天前。由於機制的設定與人工排班的限制，使得輕度障礙者容易在最後一刻才得知成為候補名單，造成使用者的不安與困擾，此一現象亦為其他縣市以人工排班所顯示的課題。

表 10 臺南市復康巴士計費方式

編號	項目	收費方式
1	一般戶搭乘者	依臺南市計程車費率 1/3 計費，小數點以下無條件捨去。
2	一般戶共乘者	共乘趟次全程依臺南市計程車費率 1/6 計費，小數點以下無條件捨去；由搭乘者各自負擔。
3	一名陪同搭乘者	免費。
4	每增加一名陪同搭乘者	每人每單趟加收新臺幣 50 元整。
5	本市列冊低收入戶、中低收入戶每週搭乘六次單趟以內者	免費。
6	就醫者，起點或迄點位於本市偏遠地區（南化區、左鎮區、楠西區、龍崎區）	依臺南市計程車費率 1/6 計費，小數點以下無條件捨去。
7	停車費及行駛國道高速公路通行費	依實際支付金額計收。（若有免收通行費配套方案，先執行配套方案結束後再行收費）。
8	已辦理免徵使用牌照稅搭乘者	依臺南市計程車費率全額計費，小數點以下無條件捨去。
9	已辦理免徵使用牌照稅共乘者	共乘趟次全程依臺南市計程車費率 1/2 計費，小數點以下無條件捨去；由搭乘者各自負擔。
備註	一、已辦理免徵使用牌照稅者，依稅務單位核准日為生效基準，補繳乘車費用之差額。 二、已辦理免徵使用牌照稅者，因免稅條件變更而取消免徵使用牌照稅，依稅務單位核准日為生效基準，溢繳乘車費用採申請制辦理差額之退款。 三、若為第一次乘車民眾於免徵使用牌照稅系統尚未更新前乘車，將於乘車時先收取本市計程車費率全額收費，若系統更新後為未辦理免徵使用牌照稅者，將退溢繳乘車費。 四、民眾若為低收入戶或中低收入戶並享有免徵牌照稅者，乘車收費方式以該民眾最佳利益考量為原則。	

本研究透過臺南市社會局取得業者 2019 年 3 月份共 25,389 個預約需求之營運數據，每個需求共計 56 個欄位資料，本研究針對使用者之性別、年齡、障別、旅次目的、旅次分布，以及業者之收費、司機工時、行駛里程、共乘率等營運現況之 20 個重要欄位進行分析。25,389 筆資料中重複使用者 1,635 人，意即復康巴士資源集中使用於 1.7% 身心障礙人士，其中男性 894 人、女性 741 人，主要年齡層集中於 60 至 80 歲之長者。障礙類別則以中度、重度之肢障人士為主。使用者之旅次目的高達 95% 為就醫，每人平均每月使用約 16 次（來回趟算 2 次），其中最高者為 80 趟次，包含平常日每日 2 趟次就醫、2 趟次就學。且通常為配合醫院門診時間，同一使用者之旅次行為往往具高度重現性。根據圖 5，可見週一、三、五屬於相對尖峰日，週二、四則為相對微低，周末由於醫院門診休息，大部分為教會、觀光、休閒旅次，基本上每周服務需求相當穩定且模式相當固定。

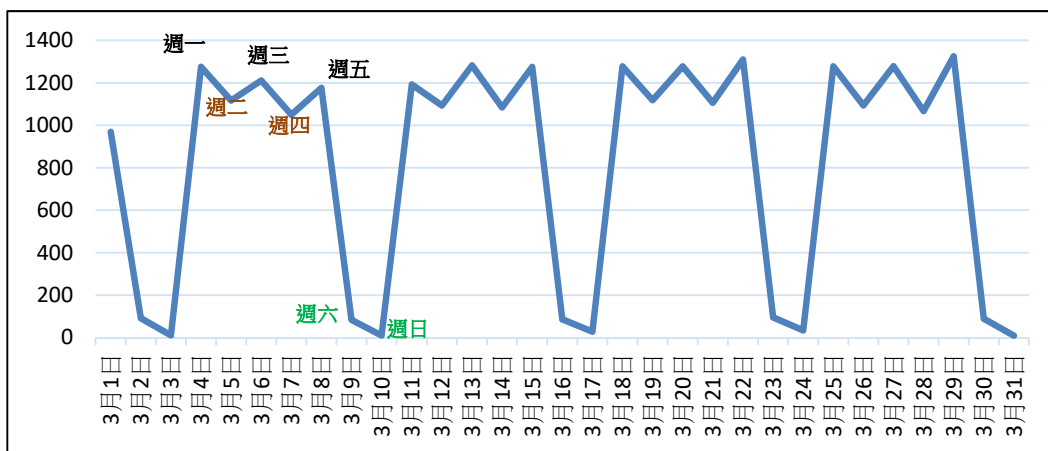


圖 5 臺南市復康巴士 2019 年 3 月每日趟次

本研究進一步將需求量以每 30 分鐘進行切分，圖 6 為三月份每天各時段之平均需求

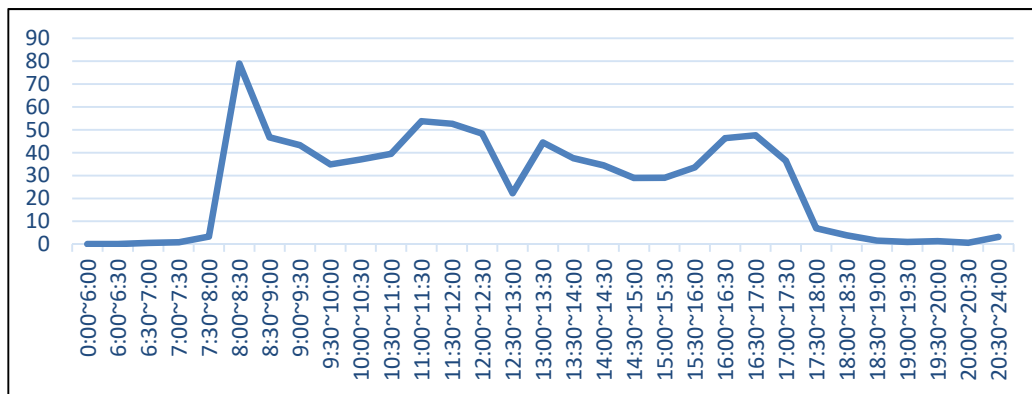


圖 6 臺南市每 30 分鐘平均需求趟次

量，上午 8 點至 8 點 30 分為整日之需求高峰 (80 趟)，推測為民眾前往門診就醫，第二波高峰約為中午 12 點 (54 趟)，此為第一波高峰之回程旅次。而在下午 1 點 (44 趟) 以及 5 點 (47 趟)，亦有兩波高峰，合理推斷為下午之就醫與其回程旅次所造成。

由於需求特性相當穩定，業者每日所提供之供給量也隨之穩定，圖 7 呈現每日使用車輛數，週一至五平均使用 130 至 140 輛復康巴士，週末則低於 20 輛。圖 8 為每車平均服務趟次與共乘趟次，目前採用業者媒合共乘方式，故每日平均 10 趟約有 2 趟為共乘趟次，共乘率 20%。司機平均工作時間則介於 8 至 8.5 小時。

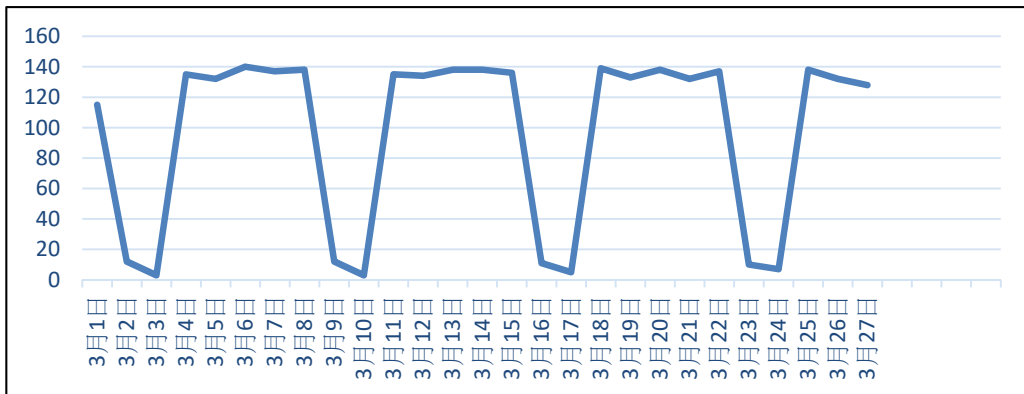


圖 7 臺南市復康巴士使用車輛數

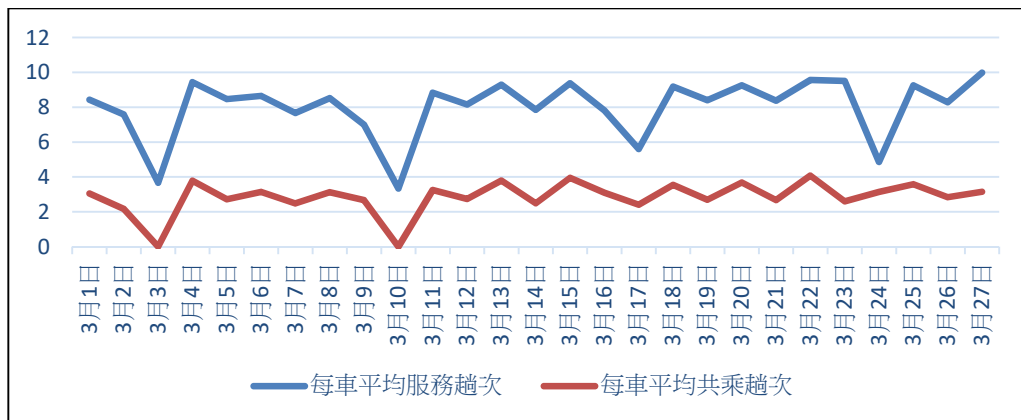


圖 8 臺南市復康巴士每車平均服務趟次/共乘趟次

4.4 模式實證分析

模式實證分析採用臺南復康巴士 2019 年 3 月 18 至 2019 年 3 月 22 日實際營運趟次資料進行。但由於起迄點的原始資料為地址或地名之文字記錄，且業者還有標註特殊註記、

代號、特殊字元等以利派車，故本研究需先以 Python 3.6 撰寫地址正規劃程式，清除特殊註記、代號、特殊字元等，並串接 Google 提供之 Geocoding API 才能將地址逐一轉換為經緯度坐標。其中，當遇有資料紀錄不全、坐標轉換失敗、或該趟次為包車旅遊之跨縣市趟次者，則需剔除該筆資料。平均而言每日約剔除 7.8% 之趟次資料（參見表 11）。再者，進一步將需求點的經緯度坐標描繪於臺南市地圖，可見需求集中於臺南市市中心；每日需求量則以永華區最多，溪南區次之，溪北區最少，如圖 9 所示。

表 11 資料清洗結果

		需求量 (趟次)				
日期		3/18 (一)	3/19 (二)	3/20 (三)	3/21 (四)	3/22 (五)
原需求量		1,277	1,118	1,277	1,106	1,310
剔除量		67	78	85	100	113
總計		1,210	1,040	1,192	1,006	1,197
分區	溪北	315	282	298	257	333
	永華	492	398	512	386	468
	溪南	403	360	382	363	396

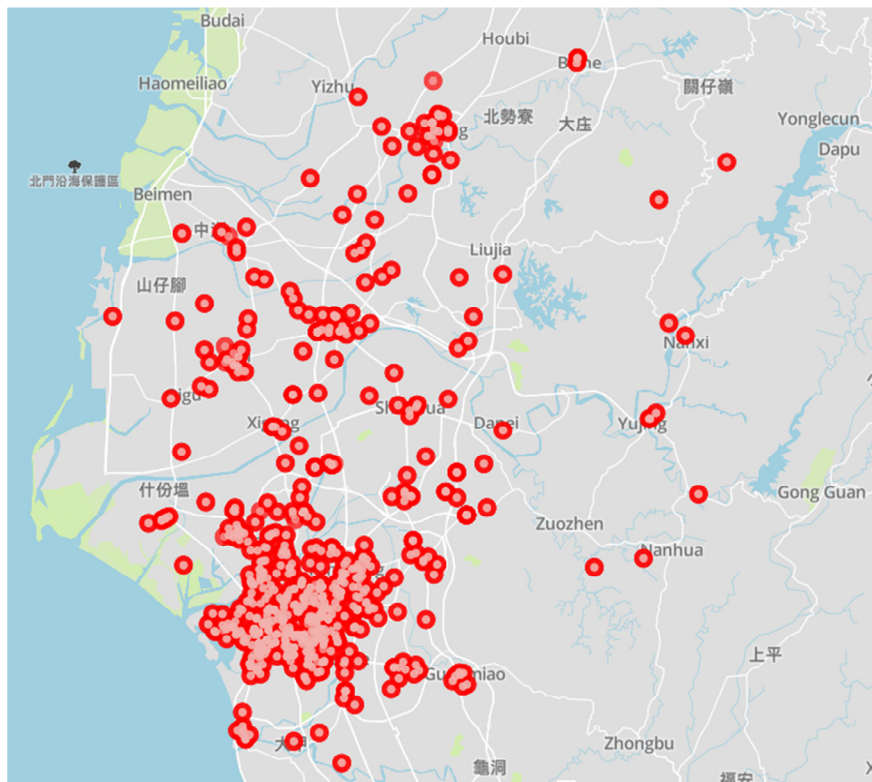


圖 9 需求熱點示意圖

根據業者實際營運數據，司機平均每天工時 8 至 9 小時，服務趟次約為 8 至 10 趟不等。本研究為求兼顧司機工作時間與效率，設定每位司機一天最大工時為 8 小時，最大服務趟次則為 15 趟。當兩者滿足其中一個條件時，便強迫該名司機回到場站結束當天工作。

關於需求時窗之設定，由於業者預約資料僅記錄民眾預約上車之時間，並註明實際抵達之時間，故本研究擬採用直達時間之 1.5 倍作為時窗關閉之時間。舉例而言，一名乘客預約上車時間為早上 8:00，經計算其起點至迄點之直達時間（即未與他人共乘）為 20 分鐘，則本研究將以 20 分鐘之 1.5 倍作為時間關閉之時間，保證其在 8:30 分之前抵達，且時窗限制不容許違反。由於本研究觀察平均旅次直達時間約為 10 至 15 分鐘，故此處 1.5 倍之設定乃本研究依主觀認定乘客可接受額外等待時間進行假設。此外，根據一般小型復康巴士容量，最多可承載 2 位輪椅乘客，故本研究依此設定每車最大容量，即每個需求同時最多僅能與 1 位需求共乘。上述之假設乃根據貼近現實情境進行設定，而對於不同之時窗倍率及車輛容量造成之影響，則於敏感度分析進行評估。

4.5 演算法求解

根據本研究實際求解臺南案例得知，演算法之迭代次數多能於 1,000 次以內收斂，故設定最大迭代次數為 1,000 次，並以每 50 次為一迭代區間，用於適應性機率模型之更新。另外，當連續 100 次未更新最佳解時視為收斂，停止運算。圖 10 分別為求解 2019 年 3 月 18 日至 2019 年 3 月 22 日之結果，並依照每次迭代之時間點（秒）對應之總成本（元）描繪出求解曲線。從圖中得知單位時間總成本下降幅度隨總成本越低而逐漸趨緩，直到完全收斂。其中，藍色線代表自動化分區排班之總成本、綠色線表自動化全區排班之總成本、紅色線代表業者透過人工排班之總成本。平均而言，藍色線能更快突破人工排班之總成本線，此乃分區排班所需考量之情境較為單一，故求解效率較高。反觀綠色線下降斜率較為平緩，求解時間較長，但整體而言仍能於 5 分鐘內突破人工排班之結果，且由於全區排班擁有更彈性的調度空間，相較分區排班結果能節省更多總成本。

整體而言，演算法能於 10 分鐘內求得優於人工排班 6 至 8 小時之結果，顯示其優異的排班效率與效能。圖 11 比較三種排班方式之總成本，自動化分區排班相較人工排班結果平均節省 12.28%，然而臺南實為單一業者之情形，故當其採用自動化全區排班時，相較人工排班可節省 16.93%。此外，圖 12 針對三種排班結果使用之車輛數進行比較，顯示自動化排班能更有效運用車輛，平均減少使用 12 輛復康巴士，而採用全區排班平均可再減少使用 7 輛復康巴士。由於本研究設定之目標式僅考量車輛行駛之成本，未考量人力、車輛維護等成本，故在實際營運上，營運車輛數的減少可望帶來更多效益。對於業者而言，可考量減少車輛採購之沉默成本；對於政府，則可擬定相關補貼政策，協助業者資源整併以滿足更多使用者需求。

4.6 延伸探討

本研究驗證自動化排班確實能大幅提升排班效率，而依據單一業者（全區排班）與多

元業者（分區排班）兩種情境，其影響成本下降之幅度以及所需使用之車輛數亦存在差異。有鑑於目前各縣市營運模式相當多元，本研究將針對二種情境下之共乘率、額外繞行時間、里程空車率、動態需求規劃能力進行延伸探討，以提供未來各縣市政府之施政方針及業者營運策略參考依據。

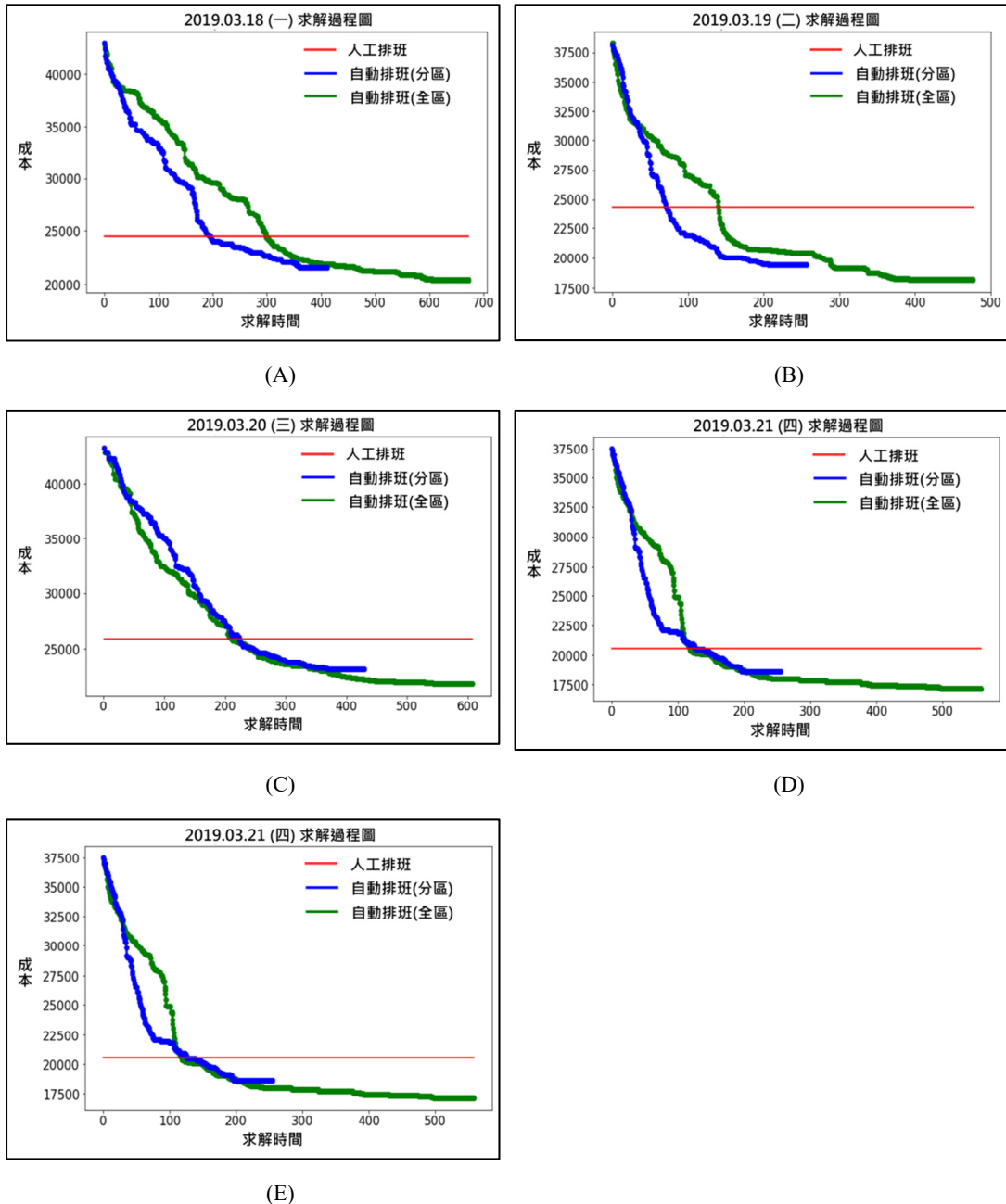


圖 10 五日求解成果

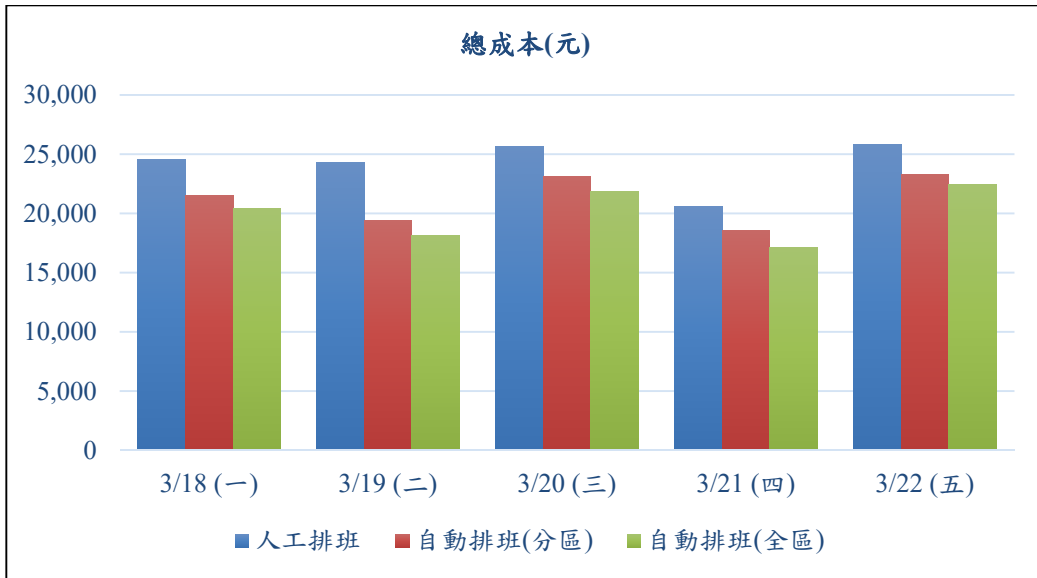


圖 11 總行駛成本比較

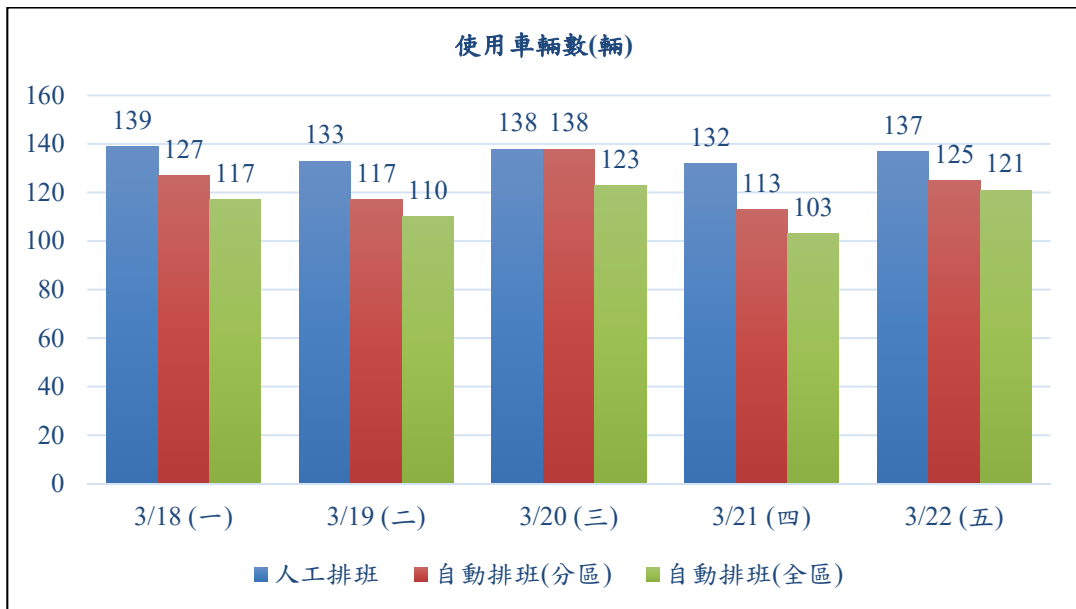


圖 12 使用車輛數比較

本研究定義之共乘率是以共乘趟次占總趟次之比例為依據，根據圖 13 顯示全區排班相對分區排班之共乘率平均僅提升 0.19%，由於在容量限制最多共乘 1 人之情境下，共乘對象仍以同分區之需求點為主，而跨區共乘容易受限於時窗限制之鬆緊，故在現有條件

下，兩種排班方式所能安排之共乘名單便顯得相當一致。此外，當共乘趟次產生時，將造成部分乘客額外之車上時間。故本研究計算旅客直達時間與實際車上時間之差值為額外繞行時間，平均而言額外繞行時間介於 2 分鐘至 3 分鐘，而本研究車輛行駛速率選用平均時速 30 公里，故額外繞行距離介於 1 公里至 1.5 公里不等，可參考圖 14。

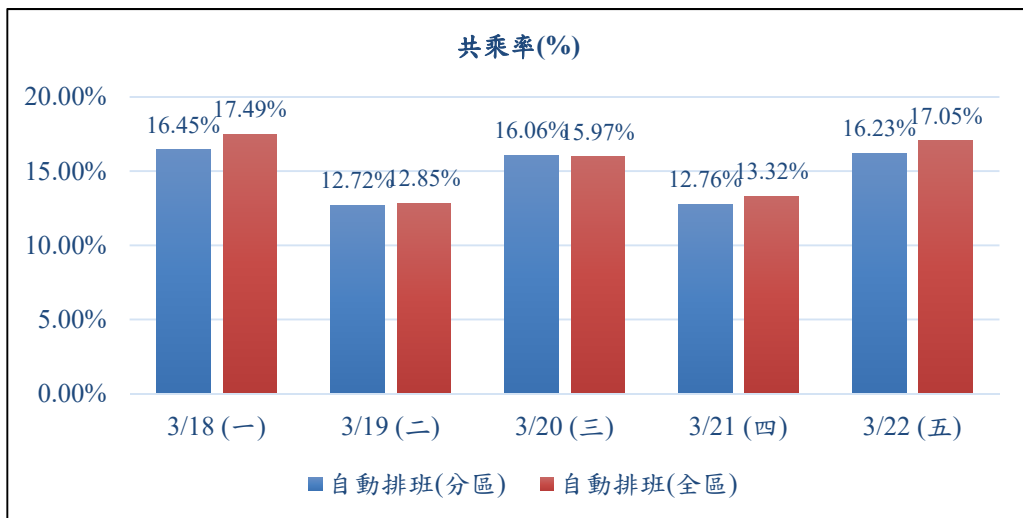


圖 13 共乘率比較

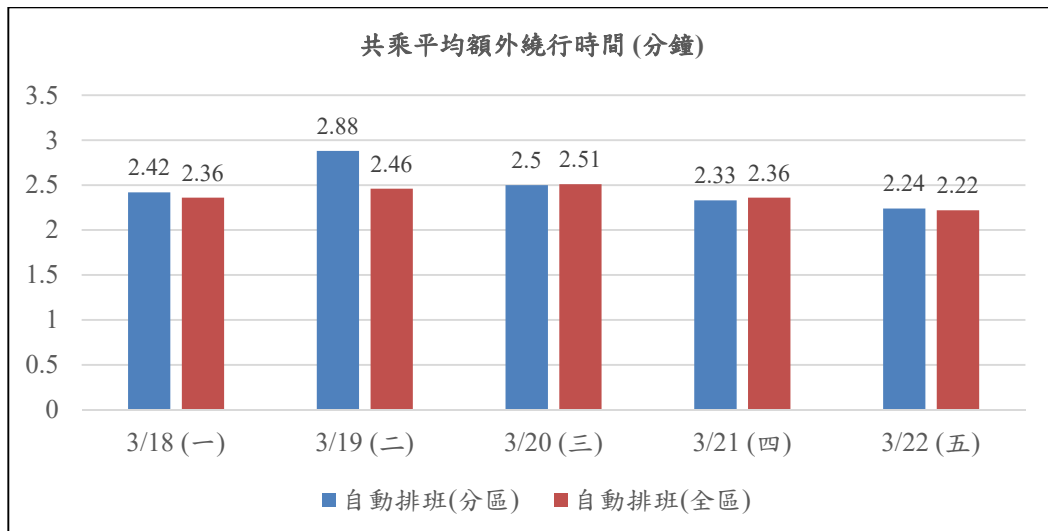


圖 14 額外繞行時間比較

本研究定義當車上沒有乘客時所行駛之里程數為空駛里程，而里程空車率便是空駛里程占總行駛里程之比例。根據前段所述，兩者在共乘率表現沒有明顯差異，而根據圖 15

顯示全區排班之里程空車率較分區排班下降平均 4.69%。其兩項指標之差異在於車輛出現跨區服務時，雖未能順利共乘他區之乘客，但車輛是否能立即服務鄰近之其他需求點成為主要差異。對於分區排班之情境，業者往往只能將該車輛空駛回所屬之分區，反觀全區排班，業者能彈性運用所有車輛提供服務。總結里程空車率之高低，是影響總行駛成本高低之關鍵因子。

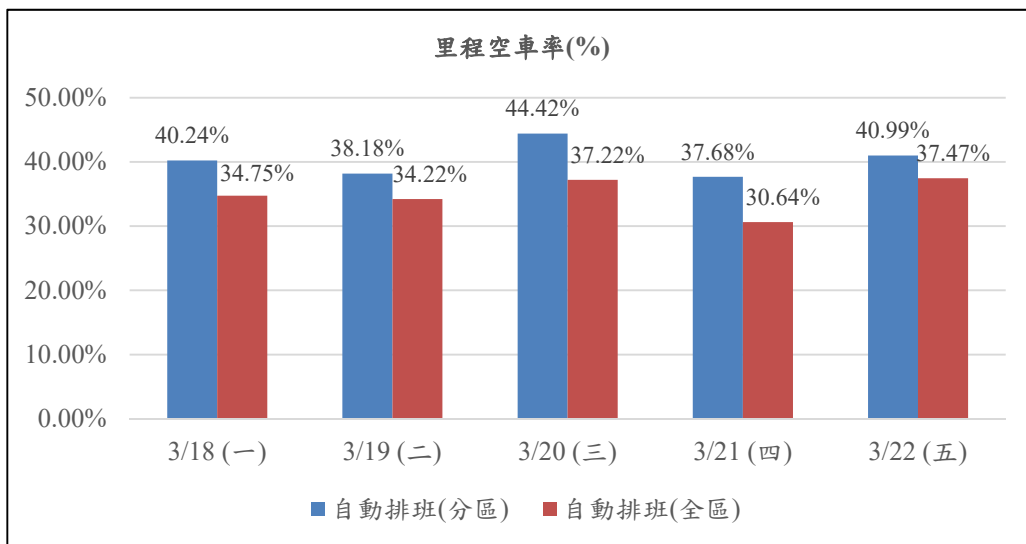


圖 15 里程空車率比較

上述實證分析乃針對靜態預約需求進行求解，然而面對動態之臨時需求，本研究所提出之演算法多能於 1 秒內判斷是否能服務該動態需求並安排至適當路線，故實務上亦能處理動態需求之情境。有鑑於諸多文獻對於動態運輸撥召問題有不同之解釋，本研究定義之動態概念乃於系統營運下產生臨時之動態需求，而系統能在極短時間且不影響原定班表之條件下，有效處理該臨時需求。

根據本研究訪談臺南復康巴士業者，得知民眾為配合就醫時間，往往必須提前預約，故每日動態需求數量不及原有靜態需求之 5%。此外，受限於人工排班規劃能力，此類動態需求往往難以滿足。有鑑於目前每日靜態需求量介於 1,000 至 1,200，本研究以亂數的方式產生 50 至 60 個動態需求，需求所屬之服務業者根據起點位置判斷為溪北區、溪南區或永華區，時窗範圍則與靜態需求設定方式一致。

本研究定義之動態需求滿足率為在不從場站額外發車之前提下能滿足動態需求之程度，故在車輛數有限之情境下，並未要求業者滿足所有之動態需求。舉例而言，業者面對 50 個動態需求，並以路網內執勤中之車輛滿足了其中 25 個，那動態需求滿足率便為 50%。而為了防止因亂數所造成之偏誤，圖 16 所呈現之數值皆為 30 次亂數取平均之結果。從圖中得知，全區排班平均能滿足 92.48% 之動態需求，而分區排班之滿足率僅 61.84%。另外，為了滿足動態需求，業者之總成本勢必增加。全區排班情境下，一個動態需求平均增加總

成本 0.26%，分區排班則為 0.31%，藉此證實全區排班除了擁有較高的滿足率，單位需求造成的成本增加也較少。

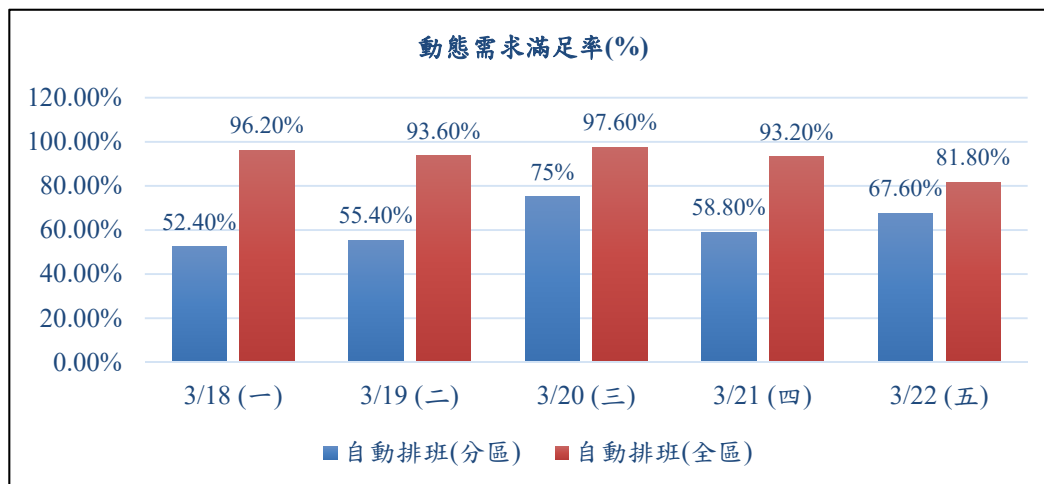


圖 16 動態需求滿足率比較

一般而言，動態需求並非產生當下便立即接受服務，仍需有提前預約之情形，業者能允許民眾提前預約之時間越短，表示其服務水準越高。然而，使用者進行預約的當下系統同時動態運作，故兩者皆為動態之情境下無法計算出適合之提前預約時間。故本研究首先確認動態需求成功插入後，反推其前提為動態需求最晚必須在該名司機完成前一個需求前進行預約，故提前預約時間計算方式為前一個需求完成之時間點至動態需求被服務之時間間隔。平均而言，全區排班允許民眾提前 37.7 分鐘預約，分區排班則為 43 分鐘，見圖 17。

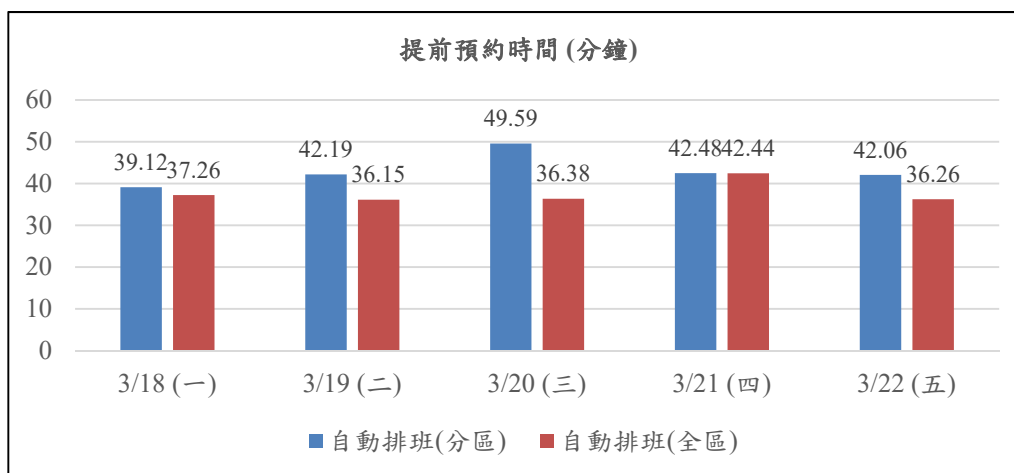


圖 17 提前預約時間比較

綜觀實證分析結果，自動排班確實能有效改善目前人工排班面臨之困境，雖說實務上動態需求不高，但全區排班仍凸顯其相對彈性之規劃能力，提供使用者更高的服務水準。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 高齡化與身心障礙者行動力議題逐年受到重視，本研究首先了解國內復康巴士、長照巴士、通用計程車之實施辦法及詳細規範，並彙整國外之無障礙運輸營運現況，以檢視國內外之差異與發展方向。復康巴士屬於發展歷程較為悠久之無障礙運輸服務，本研究訪問我國六都之復康巴士業者與政府機關，將目前營運模式分為單一業者與多元業者對應至分區排班與全區排班之模式，然而在各種經營模式下，業者仍採用人工排班。因此，本研究應用 ALNS 演算法建立自動化排班方式，期能改善目前排班效率低落之問題。
2. 本研究了解 DARP 屬於 NP-Hard 問題，故研究方法除了建立 MIP 數學模型，仍須建立演算法求解較大規模之 DARP。而在各式巨集啟發式演算法中，ALNS 演算法已被多篇期刊證實能有效求解 DARP 相關之議題，故本研究選用之演算法即建立於 ALNS 之基礎。
3. 本研究以臺南復康巴士為實證分析對象，對於臺南復康巴士 2019 年 3 月份之營運數據分析結果顯示，使用者年齡集中於 60 歲至 80 歲之中度與重度肢障者，且由於復康巴士之使用者高達 95% 以就醫為旅次目的，故其旅次行為具有高度重現性，以星期一、星期三、星期五為相對尖峰日，星期二、星期四為相對離峰日，周末則以休閒娛樂及教會旅次為主。另外，每日之尖離峰特性亦相當一致，以早上尖峰時段為 8 點與 12 點，下午則為 1 點及 5 點，其恰好皆為民眾前往就醫與返家所造成之尖峰情形。
4. ALNS 演算法將初始解路線反覆地解構與重構，並依據每次迭代求得之結果優劣，影響再次挑選該邏輯之機率值，最終逼近全域之最佳解。本研究特別將禁忌演算法之記憶列表概念融入 ALNS 演算法，使其在挑選演算邏輯時記取曾經造成失敗之經驗，節省求解效率。另外，劣解之接受方式則參考模擬退火演算法，透過溫度之調控使接受機率值隨溫度冷卻而收斂。
5. 本研究透過案例一驗證演算法求解之績效，平均而言與精缺解之誤差小於 5%。案例二將魏健宏等人提出之復康巴士範例修改為多場站模式，在全區排班情境下，Gurobi Solver 無法於 30 小時內收斂至最佳解，而 ALNS 演算法花費 4.19 秒便完成求解，且結果僅與 Gurobi solver 誤差 1.63%，顯示當面對規模較大之 DARP 問題，ALNS 演算法具有顯著的求解優勢。
6. 案例三採用臺南市 2019 年 3 月 18 至 3 月 22 之營運資料進行實證分析，結果顯示自動化排班多能於 10 分鐘內完成求解，且約於 3 分鐘處突破人工排班之結果，平均而言自

動化分區排班較人工排班節省 12.28% 之總成本，自動化全區排班則擴大至 16.93%，無論在求解效率及效果皆優於目前人工排班之結果。此外，當進一步比較分區排班與全區排班之差異時，共乘率及額外繞行時間無顯著差異，而里程空車率及面對動態需求之處理能力全區排班表現俱有明顯優勢。

7. 敏感度分析部分針對需求釋出比例、時窗以及容量進行調整。本研究按照起迄點之距離、起點與場站之距離、起迄點周圍可服務之需求數將各別業者之需求依難以服務程度進行排名，並假設業者由最難服務之需求優先釋出。研究主要發現：當前 20% 之需求釋出後，便已改善 7 成之成本差異，其餘 3 成則分攤於後 80% 之需求釋出。另外，隨著時窗與容量的放鬆，總成本、使用車輛數、里程空車率呈現下降趨勢；共乘率與額外繞行時間主要受時窗影響但不受容量影響；動態需求滿足率呈現穩定，而提前預約時間隨容量增加而下降。
8. 本研究藉由 ALNS 演算法之建立，有效求解多場站運輸撥召問題。比較臺南復康巴士營運現況，本研究提出之自動化排班能有效改善人工排班之困境。此外，藉由分區排班與全區排班模擬單一業者與多元業者之營運情境，並歸納全區排班所能提升之效益。總結本研究各項結果，可供未來各縣市政府及業者提升復康巴士營運效率與服務品質之重要參考。

5.2 建議

1. 本研究建立路網之節點間距離採用坐標直線距離進行換算，有關實際交通量、交通規範、突發狀況並無限制，建議後續研究可逐一納入考量，以求更貼近現實營運情境。
2. 有關於不同障別與障礙等級之需求者，應於被服務時有個別之需求特性，然而礙於本研究取得營運數據之欄位紀錄不全，除了合理捨棄部分資料，本研究亦將所有需求者一視同仁，建議後續研究可考量將使用者需求之差異性融入於模式進行求解。
3. 本研究站在業者角度進行最佳化排班，雖於限制式中保障需求者之最大旅行時間，但並未考量使用者成本於目標式。此外，有關無障礙運輸所帶來之社會福利相關效益亦無著墨，建議後續研究能考量多目標之情境，期能在權衡多方角色間效益後求取最佳解。
4. 本研究驗證業者間之資源共享能有效提升營運效率並降低總成本，然而關於資源共享背後之利益與成本分攤並未深入探討，建議後續研究可以再增加成本與利益分攤邏輯於模式中，提供業者更具參考性之合作方式。
5. 本研究主要探討自動化排班與業者間合作帶來之效益，然而實務上亦能加入多元運具之合作，包含長照巴士、通用計程車及大眾運輸系統等與復康巴士之整併及聯營合作，同時引入數位科技與智慧行動平台整體思維^[49]，可望提供高齡者與身心障礙者更優質之運輸環境，此有待後續進一步研究。

參考文獻

1. 國家發展委員會，中華民國人口推估（2018 至 2065 年），https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=84223C65B6F94D72，民國 111 年。
2. 衛生福利部統計處，身心障礙者人數按縣市及類別分，<https://dep.mohw.gov.tw/dos/cp-5224-62359-113.html>，民國 111 年。
3. 衛生福利部統計處，長期照顧十年計畫 2.0(106~115 年)，<https://www.mohw.gov.tw/dl-46355-2d5102fb-23c8-49c8-9462-c4bfeb376d92.html>，民國 111 年。
4. 衛生福利部社會及家庭署身心障礙服務入口網，各直轄市、縣市政府辦理身心障礙者復康巴士服務彙整表，<https://nhuwebfile.nhu.edu.tw/UploadedFiles/2020/5/b419ac6d-14d2-4e88-a040-4c8ed02bed79.pdf>，民國 111 年。
5. 交通部運輸研究所，預約式無障礙小客車運輸服務之整合研究(1/2)，民國 107 年。
6. 交通部運輸研究所，預約式無障礙小客車運輸服務之整合研究(2/2)，民國 108 年。
7. 香港復康會，香港復康巴士簡介，<https://www.rehabsociety.org.hk/zh-hant/>，民國 108 年。
8. Canadian Urban Transit Association, Accessibility Services, <https://cutaactu.ca/>, 2022.
9. TRANSLink, Accessibility Services, <https://translink.com.au/travel-with-us/accessibility>, 2019.
10. TRANSLink, HandyDART, <https://www.translink.ca/Rider-Guide/Accessible-Transit/HandyDART.aspx>, 2019.
11. Transport for London, Dial-a-ride Policy, <https://tfl.gov.uk/modes/dial-a-ride/>, 2019.
12. Sweden, Sweden's Disability Policy, <https://sweden.se/society/swedens-disability-policy/>, 2019.
13. ADA.gov, the Americans with Disabilities Act, United States Department of Justice, Civil Rights Division, <https://www.ada.gov/>, 2019.
14. NYC Taxi & Limousine Commission, Citywide Accessible Dispatch Service, <https://www1.nyc.gov/site/tlc/about/accessible-dispatch.page>, 2019.
15. Australian Community Transport Association, Community Transport in 2030, <https://communitytransportaustralia.org.au/>, 2019.
16. Australian Government, Disability Standards for Accessible Public Transport 2002, <https://www.legislation.gov.au/Details/F2011C00213>, 2019.
17. NSW Government, Accessible travel. Transport for NSW, <https://transportnsw.info/travel-info/using-public-transport/accessible-travel>, 2019.
18. Link Community Transport, Transport Solutions for People and Communities, <http://www.linkcommunitytransport.org.au/>, 2019.
19. Flood, M. M., "The Travelling Salesman Problem", *Operations Research*, Vol.4, 1956, pp.61-75.

20. Dantzig, G. and Ramser, J., “The Truck Dispatching Problem”, *Management Science*, Vol.6, No.1, 1959, pp.80-91.
21. 靳蕃、範俊波、譚永東，*神經網路與神經計算機*，儒林出版社，臺北，民國 81 年。
22. Pullen, H. G. M. and Webb, M. H. J., “A Computer Application to a Transport Scheduling Problem”, *The Computer Journal*, Vol.10, No.1, 1967, pp.10-13.
23. Knight, K. W. and Hofer, J. P., “Vehicle Scheduling with Timed and Connected Calls: A Case Study”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.19, No.3, 1968, pp.299-310.
24. Braekers, K. and Kovacs, A. A., “A Multi-Period Dial-A-Ride Problem with Driver Consistency”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.94, 2016, pp.355-377.
25. Schönberger, J., “Scheduling Constraints in Dial-A-Ride Problems with Transfers: A Metaheuristic Approach Incorporating a Cross-Route Scheduling Procedure with Postponement Opportunities”, *Public Transport*, Vol.9, No.1-2, 2017, pp.243-272.
26. Lim, A., Zhang, Z. & Qin, H., “Pickup and Delivery Service with Manpower Planning in Hong Kong Public Hospitals”, *Transportation Science*, Vol.51, No.2, 2017, pp.688-705.
27. Molenbruch, Y., Braekers, K. & Caris, A., “Benefits of Horizontal Cooperation in Dial-A-Ride Services”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.107, 2017, pp.97-119.
28. Hyytiä, E., Aalto, S., Penttinen, A. & Sulonen, R., “A Stochastic Model for a Vehicle in a Dial-A-Ride System”, *Operations Research Letters*, Vol.38, No.5, 2010, pp.432-435.
29. Ho, S. C. and Haugland, D., “Local Search Heuristics for the Probabilistic Dial-A-Ride Problem”, *OR Spectrum*, Vol.33, No.4, 2011, pp.961-988.
30. Heilporn, G., Cordeau, J. F. & Laporte, G., “An Integer L-Shaped Algorithm for the Dial-A-Ride Problem with Stochastic Customer Delays”, *Discrete Applied Mathematics*, Vol.159, No.9, 2011, pp.883-895.
31. Häll, C. H., Lundgren, J. T. & Voß, S., “Evaluating the Performance of A Dial-A-Ride Service Using Simulation”, *Public Transport*, Vol.7, No.2, 2015, pp.139-157.
32. Marković, N., Nair, R., Schonfeld, P., Miller-Hooks, E. & Mohebbi, M., “Optimizing Dial-A-Ride Services in Maryland: Benefits of Computerized Routing and Scheduling”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.55, 2015, pp.156-165.
33. Maalouf, M., MacKenzie, C. A., Radakrishnan, S., Court, Mary., “A New Fuzzy Logic Approach to Capacitated Dynamic Dial-a-Ride Problem”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.255, 2014, pp.30-40.
34. Muñoz-Carpintero, D., Sáez, D., Cortés, C. E. & Núñez, A., “A Methodology Based on Evolutionary Algorithms to Solve a Dynamic Pickup and Delivery Problem under a Hybrid Predictive Control Approach”, *Transportation Science*, Vol.49, No.2, 2015, pp.239-253.
35. Held, M., and Karp, R. M., “The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees,”, *Operations Research*, Vol.18, No.6, 1970, pp.1138-1162.
36. Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press,

- 1975.
37. Kirkpatrick, S., Gelatt Jr C. D., Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol.220, No.4598, 1983, pp.671-680.
 38. Brackers, K., Caris, A., Janssens, G., "Bi-Objective Optimization of Drayage Operations in the Service Area of Intermodal Terminals", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.65, 2014, pp.50-69.
 39. Glover, F., "Tabu Search-Part I", *ORSA Journal on Computing*, Vol.1, 1989, pp.190-206.
 40. Cordeau, J. F. & Laporte, G., "The Dial-A-Ride Problem (DARP): Variants, Modeling Issues and Algorithms", *Quarterly Journal of the Belgian French and Italian Operations Research Societies*, Vol.1, No.2, 2003, pp.89-101.
 41. Dorigo, M., Maniezzo, V. & Colomi, A., *Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process*, Technical Report TR91-016, 1991.
 42. Shaw, P., "Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems", *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, CP 1998: Principles and Practice of Constraint Programming-CP98, 1998, pp.417-431.
 43. Røpke, S., and Pisinger, D., "An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery with Time Windows", *Transportation Science*, Vol.40, No.4, 2006, pp.455-472.
 44. Ho, S. C., Szeto, W. Y., Kuo, Y. H., Leung, J. M., Petering, M., Tou, T., "A Survey of Dial-A-Ride Problems: Literature Review and Recent Development", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.111, 2018, pp.395-421.
 45. Cordeau, J. F., "A Branch-and-Cut Algorithm for the Dial-a-Ride Problem", *Operations Research*, Vol.54, No.3, 2006, pp.573-586.
 46. 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.
 47. Vincent, F. Y., Jewpanya, P., & Redi, A. P., "Open Vehicle Routing Problem with Cross-Docking", *Computers & Industrial Engineering*, Vol.94, 2016, pp.6-17.
 48. 魏健宏、王穆衡、蔡欽同、辛孟鑫，「臺北市復康巴士路線規劃問題之研究」，*運輸學刊*，第 19 卷，第 3 期，民國 96 年，第 301-332 頁。
 49. 張學孔，「高齡智慧行動之數位生活環境發展願景」，*國土及公共治理季刊*，第 8 卷，第 1 期，民國 109 年，第 68-79 頁。