

運用改良基因演算法求解時間窗越野尋蹤問題及 應用於自助旅遊路線規劃

Application of Improved Genetic Algorithm to Solve the Orienteering Problem with Time Windows and Individual Travel Route Planning

蘇昭銘 Jau-Ming Su¹

吳冠廷 Kuan-Ting Wu²

(收稿 2022/1/29，第一次修改 2022/5/13，第二次修改 2022/12/12，第三次
修改 2023/2/20，接受 2023/3/19)

摘要

越野尋蹤問題 (orienteering problem, OP) 屬於旅行銷售員問題 (traveling salesman problem, TSP) 之延伸問題，在 OP 所延伸出的具時間窗限制之越野尋蹤問題 (orienteering problem with time windows, OPTW) 中，時間窗之限制也提升求解之複雜度。近年來發展基因演算法 (genetic algorithm, GA) 結合路徑重連結 (path relinking) 之方式因應時間窗特性之限制，本研究為探討不同路徑重連結之方式之求解效率，以基因演算法為基礎，設計不同路徑重連結之演算流程求解軟時間窗限制之 OPTW 並進行國際例題之測試。結果顯示所提出之改良基因演算法求解點位數不超過 144 之問題規模，平均求解誤差為 4% 以內。未來 OPTW 可應用於自助旅遊路線之規劃，並可於旅遊網站進行自助旅遊路線規劃之參考，提升自助旅遊服務之客製化程度。

關鍵詞：越野尋蹤問題、路線規劃、自助旅遊

¹ 逢甲大學運輸與物流學系教授兼建設學院院長 (聯絡地址：40724 台中市西屯區文華路 100 號；電話：04-24517250#4659；E-mail：jmsu@fcu.edu.tw)。

² 鼎漢國際工程顧問股份有限公司助理規劃師。

Abstract

The Orienteering Problem (OP) is an extension of the Traveling Salesman Problem (TSP). At the same time, many algorithms for solving optimization problems have been developed in recent years. The OP problem can be further extended to incorporate time windows, resulting in the Orienteering Problem with Time Windows (OPTW). The time window limitation also increases the complexity of the solution. In recent years, genetic algorithm (GA) combined with Path Relinking has been developed in response to the limitation of time window characteristics. This study is to explore the efficiency of different path relinking methods, based on genetic algorithm, design the calculation process of reconnecting different paths to solve the OPTW problem with soft time window limitation, and test the algorithm with the international example. The results show that the improved genetic algorithm proposed by this research solves the problem scale with no more than 144 points, and the average solution error is within 4%. In the future, OPTW can be applied to the planning of individual travel routes, and can be used as a reference for individual travel route planning on travel websites to enhance the degree of customization of individual travel services.

Keywords: Orienteering problem, Path planning, Individual travel

一、前言

OP 雖然其問題由 TSP 發展而來，但其問題特性卻與 TSP 有著明顯的差異。在 OP 中，所有需求點皆有其對應的分數，並在有限的時間內決定拜訪路線進而追求分數最大化的拜訪路線，同時也囿於最大可使用時間之故，使所有需求點不一定全能被拜訪，由此可知 OP 與 TSP 之目標追求成本最小化、無限制最大可使用時間，也限制所有需求點必須被拜訪等特性之差異。在 Gavalas *et al.* (2014) 的研究中，曾對旅遊行程規劃問題 (tourist trip design problem, TTDP) 之相關文獻進行整理，並說明旅遊行程規劃問題分為單旅程和多旅程，也提出單旅程和多旅程所發展出的數個 OP 變體，當中也包含 OPTW，即是在 OP 中納入時間窗之概念，使得拜訪需求點時需符合其開放時間之限制，同時時間窗限制也分為軟時窗與硬時窗，不同開放時間之限制使得解題複雜度也隨之上升。近年來則發展基因演算法求解 OPTW，Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014a) 曾利用基因演算法求解 OPTW，在交配 (crossover) 的過程中找出交配點內具相似時間窗的路線進行交換。後來 Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014b) 在基因演算法中以路徑重連結取代原本交配之演算步驟，以因應時間窗特性的複雜程度，結果顯示使用路徑重連結所求得的解優於交配，改善程度約為 6%；在求解效率上，使用路徑重連結的平均求解速度比交配快 22 倍。本研究旨在以基因演算法求解軟時間窗限制的 OPTW，藉由放寬各節點僅能於開放時間內抵達之限制，允許在各節點開放時間之前抵達，但仍須等待各節點開放時間之後才可進行拜訪。而原本的基因演算法求解會因時間窗限制之特性而導致求解複雜

度提升，因此本研究將對基因演算法進行修改，其做法參考 Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014b) 所提出之路徑重連結，並以不同於 Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014b) 所提出之以兩條路線找尋插入新點之路徑重連結，本研究為提升深度搜尋之效率，改為自所有節點中找尋符合限制條件且不在已經過路線當中之節點作為找尋插入新點之路徑重連結方式，並以此探討求解 OPTW 之成效。目前國內運輸領域在旅遊方面之研究並不多，王國川等人 (2014) 曾對國內旅遊者進行習慣性運具選擇之探討，王晉元等人 (2018) 曾透過手機信令資料之探勘，比較潛在公共運輸旅客的觀光旅運需求，找出花蓮縣兩條臺灣好行路線之服務缺口並提出改善建議，針對旅遊行程規劃選擇之研究則相對少見，因此本研究利用 OPTW 之問題特性，進一步探討將 OPTW 應用於自助旅遊路線規劃之適用性。

二、文獻回顧

越野尋蹤問題最早由 Tsiligirides (1984) 提出，並提出兩種啟發式演算法求解越野尋蹤問題，分別為隨機演算法與確定性演算法。這兩種啟發式演算法也經過 32 個點位規模的例題進行測試，結果顯示隨機演算法的求解結果優於確定性演算法的求解結果，同時也提到求解時間會隨著點位數量而增加。Golden *et al.* (1987) 證明越野尋蹤問題屬於 NP-hard 問題，意即當問題規模很大時，幾乎無法在有效的時間內求得真確最佳解 (exact solution)。Chao *et al.* (1996) 提出快速啟發式演算法，此演算法由兩個階段所組成，第一階段以貪婪法求得初始解，其建構初始解的規則為選擇找尋與當前節點距離最短的節點，各節點間的分數不納入考量；第二階段則是改善初始解，包含兩點交換 (two-point exchange)、一點移動 (one-point movement)、清理 (clean up) 和重新初始化 (reinitialization)，並將此快速啟發式演算法與 Tsiligirides (1984) 所提出的隨機演算法在 14 個測試例題上進行比較，結果顯示此快速啟發式演算法求解所有例題所產生的解皆優於 Tsiligirides (1984) 所提出的隨機演算法。Tasgetiren and Smith (2000) 提出基因演算法求解 OP，以節點的編號從 1 開始作為編碼方式，在建立初始解時會從 N 個節點當中隨機排序，並在每個節點上設一個介於 0 至 1 的隨機變數，若產生的值小於省略機率則將該節點編號設為 0，藉此讓路線總花費的時間不超過一天當中的可用時間。交配的步驟採用順序交配的方式，區域搜尋突變包含添加點、省略點和替換點三種方式，突變點的位置皆為隨機選取，在進行突變的過程中會重複進行十次，每一次的突變皆會對所產生的新解進行評估，並將原本的解替換為經評估後表現最好的新解。Kantor and Rosenwein (1992) 說明 OPTW 屬於 NP-hard 問題，並提出插入啟發式演算法 (insertion heuristic) 求解 OPTW，在不違反時間窗限制的條件下，由不在路線上的剩餘點進行插入，並比較剩餘點在插入路線時的獲益值與插入後所花費時間的比值，將

所選的剩餘點插入至最高比值的位置，直到沒有剩餘點能插入至路線當中。

Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014a) 應用基因演算法求解 OPTW，在交配步驟中，隨機選取兩條不同的路線，若兩條路線的交配點有類似的時間窗且皆符合總時間的限制條件，才可以進行兩條路線的交配產生新的解。在突變的步驟 (mutation) 中，將突變分為插入突變與刪除突變，發生的機率各為 50%。插入突變類似於 Kantor and Rosenwein (1992) 所使用的插入啟發式演算法；刪除突變則是隨機刪除被選擇的基因（不包含第一個點和最後一個點）以縮短旅遊時間。Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014b) 提出混合型基因演算法求解 OPTW，以路徑重連結的方式取代原本交配的步驟。其中路徑重連結的方式為隨機挑選兩條路線 R_1 和 R_2 ， $V_{R_1-R_2}$ 表示在 R_1 所擁有的點不在 R_2 當中。 $PR(R_1, R_2)$ 則表示試圖將 $V_{R_1-R_2}$ 中的點插入 R_1 中的最佳位置，若插入新點後超出限制條件，將此點移除，以恢復插入新點的可能性，若新產生的路線其適合度高於 R_1 和 R_2 ，則將其替換，並以此方法在 OPTW 的測試例題上進行求解，結果顯示使用路徑重連結可有效解決 OPTW。GamaHugo and Fernandes (2021) 利用強化學習 (reinforcement learning, RL) 求解 OPTW，透過長達 72 小時的時間訓練模型後求解測試例題，並將測試結果與迭代區域搜尋法 (iterated local search, ILS) 進行比較，結果顯示以強化學習求解之求解品質比 ILS 更佳。鑒於基因演算法近年來在國內也廣泛應用在許多運輸領域，如：王晉元與林誌銘 (2007) 曾利用基因演算法產製捷運系統列車之運行計畫；蘇純繒與翁瑞聰 (2004) 曾以螞蟻群聚最佳化整合基因演算法求解轉接點位置問題；廖述賢等人 (2017) 亦曾將基因演算法應用於求解定址-存貨整合問題以及車輛路線問題。且 Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014a, 2014b) 之研究中亦採用基因演算法求解 OPTW 獲得不錯之求解品質，故本研究將以基因演算法為基礎進行改良，進行自助旅遊路線規劃之 OPTW。

三、模式與求解演算法

3.1 模式建構

3.1.1 參數介紹

P_i ：點 i 的分數。

V_i ：在點 i 所服務的時間。意即在點 i 拜訪的時間。

t_{ij} ：從點 i 出發至點 j 所需的時間。本研究依據國際例題之限制，以歐幾里得距離計算之。

T_{maxi} ：最大可使用時間。

O_i ：點 i 的開啟時間。即最早可於點 i 拜訪之時間。

C_i ：點 i 的關閉時間。意指最晚可在點 i 拜訪之時間。

3.1.2 變數介紹

a_i ：抵達點 i 時的時間。此變數為本研究因應軟時窗限制所設置，由路線中 t_{ij} 、 V_i 與 $Wait_i$ 之加總可得抵達點 i 時的時間。藉由此變數計算抵達點 i 的時間。

$Wait_i$ ：等待點 i 開門的時間。此變數為本研究因應軟時窗限制所設置，為抵達時間 a_i 小於點 i 的開放時間時，計算等待點 i 開放時所需的等待時間。

S_i ：開始在點 i 訪問的時間。因考量到抵達點 i 後可能會出現需等待點 i 開放之情形，因此開始於點 i 拜訪的時間之計算方式為抵達時間 a_i 與等待點 i 開放時間 $Wait_i$ 之和，即是開始在點 i 拜訪的時間不全然等於抵達點 i 時的時間，故設置此變數。

y_i ：是否拜訪過點 i 。本研究為確保路線有經過到點 i 才可於點 i 拜訪，故設置此變數。

X_{ij} ：行經路線是否包含點 i 至點 j 之路線。

本研究參考 Vansteenwegen (2011) 等學者所提出的 OPTW 之數學模式並依據 The orienteering problem: test instances 提供的測試例題之限制，將數學模式加以修改，使出發點與結束點設為相同外，也在路線時間軸之限制式上納入在各節點拜訪的時間。同時也因應本研究之軟時窗限制，透過新增參數和限制式將原本的硬時窗特性修改為軟時窗特性，使所規劃的路線變得能等待尚未開放的節點開啟。經本研究修改之數學模式如下：

$$MAX \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^N P_i X_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j=2}^N X_{1j} = \sum_{j=2}^N X_{j1} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} X_{ik} = \sum_{j=2}^N X_{kj} \leq 1 \quad ; \quad \forall k = 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$S_i + V_i + t_{ij} - S_j \leq M(1 - X_{ij}) \quad ; \quad \forall i, j = 1, \dots, N \quad ; \quad i \neq j \quad (4)$$

$$Wait_i = \max[0, O_i - a_i] \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} (Wait_i y_i + V_i y_i) + \sum_{j=2}^N t_{ij} X_{ij} \leq T_{max} \quad ; \quad i \neq j \quad (6)$$

$$O_i \leq S_i ; \forall i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$S_i + V_i \leq C_i ; \forall i = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} ; \forall i, j = 1, \dots, N ; i \neq j \quad (9)$$

$$y_i \in \{0,1\} ; \forall i = 1, \dots, N \quad (10)$$

公式 (1) 表示將路線所經過的點 i 當中的分數進行加總，目標求出極大化分數的路線。公式 (2) 為本研究所修改之部分，代表路線必須自起點 ($i=1$) 開始，並在終點 ($i=N$) 結束。公式 (3) 代表若自點 i 出發至點 k ，接下來必須自點 k 前往至點 j ，以確保旅遊路線的流量守恆。同時也限制每一個點最多只能經過一次。公式 (4) 同為本研究所修改之部分，表示於點 i 拜訪之後，前往點 j 之時間必須小於開始在點 j 遊玩的時間，確保旅遊路線的時間軸。公式 (5) 為本研究新增之限制式，說明點 i 的等待時間為點 i 的開門時間減去抵達點 i 的時間，同時等待時間不可小於 0。公式 (6) 為本研究所修改之部分，表示等待點 i 開放時間、在點 i 遊玩的時間與自點 i 移動至點 j 所需的時間之加總不可超過最大可使用時間的限制，透過加入等待點 i 開放時間之計算，使原本硬時窗特性修改為軟時窗特性之限制，同時只有路線有經過至點 i 時，才可拜訪點 i 和具有等待點 i 開放的時間。公式 (7) 表示在點 i 訪問的時間必須在開放時間以後。公式 (8) 說明在點 i 訪問完畢時的時間必須在關閉時間以前。公式 (9) 說明自點 i 到點 j 的路徑， $X_{ij}=1$ 表示行經路線包含 (i,j) 路線，反之， $X_{ij}=0$ 。公式 (10) 說明點 i 是否在已規劃的路線當中，意即判斷點 i 是否已拜訪過， $y_i = 1$ 表示點 i 已拜訪並在路線當中； $y_i = 0$ 則表示點 i 尚未拜訪並不在路線當中。

3.2 求解演算法

根據文獻回顧之探討，本研究擬以基因演算法做為具時間窗限制之越野尋蹤問題之解題架構，為配合時間窗之特性，將會結合路徑重連結以強化區域搜尋之搜尋範圍。基因演算法最早 1975 年由 John Holland 提出，透過模仿自然生態演化的過程，藉由模擬生物中在 DNA 中看到的染色體的基因作為運算分子，在每個世代間進行演化，透過選擇 (selection)、複製 (reproduction)、交配及突變等步驟來演化出更好的下一代，使新產生的染色體越來越佳，藉以演化出近似最佳解的目的。再加上本研究使用基因演算法求解 OPTW 時，考量軟時間窗、各節點時間窗衝突之限制等時間窗之特性而加入的路徑重連結策略，期望發展一有效解決 OPTW 之求解演算法。整體的求解架構可分為以下四個步驟：(1) 建構初始解；(2) 選擇；(3) 交配；

(4) 突變。以下將個別說明之。求解演算法流程圖如圖 1 所示，若在求解過程中以達本研究所設置之停止條件，如迭代次數已達到設定之次數、已求得真確最佳解或文獻已知最佳解、整體族群已達收斂或者經過一定迭代次數後所得的解沒有改善等，則會停止進行迭代，並輸出最佳之路線。

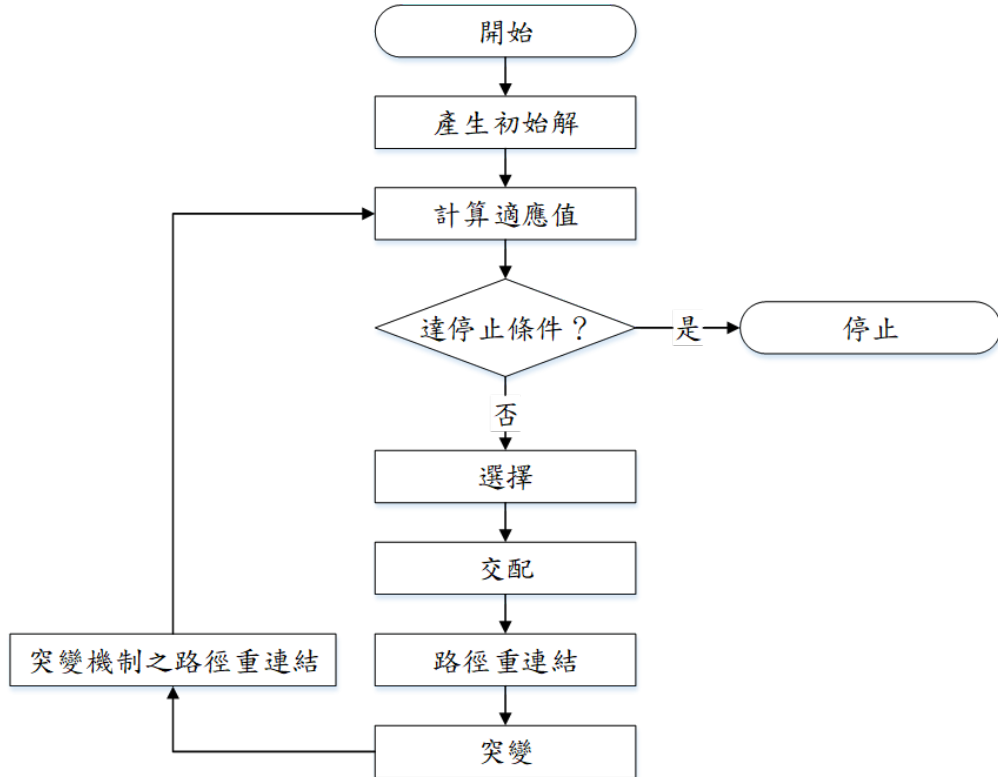


圖1 求解演算法流程圖

3. 2. 1 建構初始解

在產生初始解之前，要先決定編碼及解碼的方式，編碼也有分二元編碼、排列編碼及實數編碼等不同之編碼方式，而解決 OPTW 之關鍵即是決定拜訪節點的順序，意即路線順序問題，為節省編碼中的比對時間，本研究採用排列編碼作為編碼方式，並以國際例題提供之節點編號作排列編碼的決策變數。

對於產生初始解的方式本研究使用貪婪法結合 Feo and Resende (1995) 所提出的貪婪隨機自適應性搜尋法 (greedy randomized adaptive search procedure, GRASP)。因在貪婪法的基礎上，一固定起點所能得出的解只有一種，僅依靠貪婪法產生初始解遠遠無法滿足基因演算法中所設定的族群數量，因此在使用貪婪法得出一個初始解之後，需要再透過其他產生初始解的方式補足族群所規定的數量。因此採用 GRASP 建構初始解的方式，其概

念為挑選出符合限制條件的候選景點，再由貪婪法或輪盤法來決定下一個要拜訪的景點為何，而決定用貪婪法或輪盤法則由一個二元隨機變數決定，使選到兩種方法的機率各為一半。

3.2.2 選擇

在此階段開始將會是基因演算法的尋優過程，使品質越佳的解就有越大的機會存活下來。在判斷解的品質時，會透過適應值 (fitness) 的計算來給予可行解分數，分數越高代表其適應能力越好、能有越大的機會存活下來，因此本研究為追求分數最大化，以目標函數值作為適應值計算的依據。但若是在選擇階段僅選擇分數高的解，很有可能會在之後造成過早收斂的現象，也就是說，分數高的解在選擇的過程中並不是絕對會被選中的，而是利用輪盤法來進行選取。輪盤法主要是透過將所有可行解的適應值做加總，藉此來製造一個輪盤的概念，在輪盤中，被分別加總起來的適應值則代表族群當中各自的適應值，也就是被選取到的機率，若適應值越大，那麼在選擇的過程中被選取的機會也就越高，此作法讓適應值小的解也有機會被選擇到，藉以豐富解的多樣性，也降低過早收斂的可能性。其輪盤法示意圖如圖 2 所示。

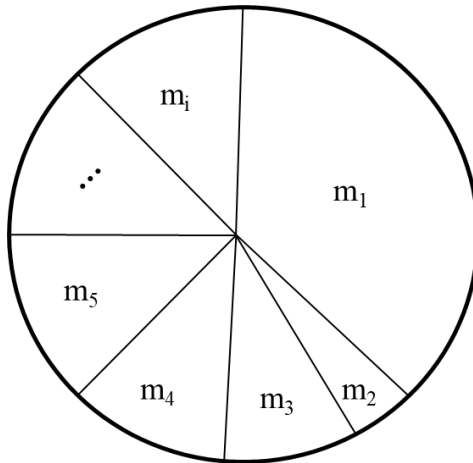


圖2 輪盤法示意圖

3.2.3 交配

在此階段會透過交配的方式讓染色體之間做部分基因的互換，使新產生的染色體有機會得到比母代染色體更高的適應值。而決定是否要交配則是會先產生一個 0~1 的隨機變數，若此隨機變數達到所設定的交配率之門檻，則進行交配。本研究所設置的交配率為 0.8，採用的交配方式為雙點交配，其做法為挑選兩條長度一致的染色體，分別作為母代 1 與母代 2，並隨

機在基因值當中挑選兩個位置做為切點，在切點範圍內之基因值進行交換，以產生兩個新的解，分別為子代 1 與子代 2。若產生的子代基因違反時間窗之限制條件而變為不可行解，則將違反時間窗限制之基因值刪除，直至所有基因值皆符合限制條件。其雙點交配示意圖如圖 3 所示。

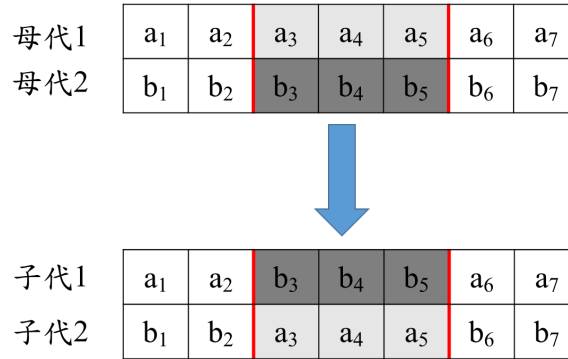


圖3 雙點交配示意圖

然而，不論是 OP 或是 OPTW，因具有「不必每個點都經過」之特性，在進行交配階段時必須先確認兩條染色體的長度相同，因此在面對兩條染色體長度不同的母代染色體需先調整各自染色體的長度，使兩條染色體長度一致才可進行雙點交配步驟。若兩條染色體長度不同時，將染色體長度較短的母代染色體插入「虛擬景點」使兩條染色體的長度相同。因本研究使用的編碼方式是以景點編號做為決策變數，因此所有景點編號皆為自然數，因此虛擬景點之代號以自然數以外的-1 表示，並在交配步驟完成後將虛擬景點移除以恢復原本染色體的長度。其插入虛擬景點示意圖如圖 4 所示。

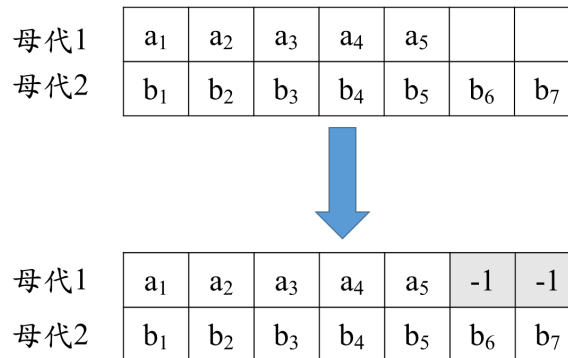


圖4 插入虛擬景點示意圖

在交配步驟完成後，產出的子代染色體需檢查是否違反限制條件，並由路線中的第一個基因值開始檢查是否符合時間窗限制，如符合時間窗限制則檢查下一基因值的時間窗，直至檢查完所有基因值。若產生的子代其基因值違反時間窗限制，就將該基因值予以剔除。同時也為避免在剔除基因值的過程中造成每一次迭代的染色體長度越來越短，造成無法將分數最大化、陷

入拜訪節點的數目越來越少之情形，本研究對交配過後所產生的子代進行路徑重連結。具體做法參考 Karbowska-Chilinska and Zabielski (2014b) 所提出的路徑重連結之方式，不過在尋找可插入之候選點時，為提升深度搜尋之效率，則是在所有節點當中找尋符合限制條件且不在已經過路線當中之節點，並於候選點當中透過公式 (11) 計算該候選點在可插入之位置中，插入該候選點之後的比值，目的在於在當前點 i 中找尋花費時間相對少，且取得的分數相對高的點 j ，同時因應本研究軟時窗限制 OPTW 之等待節點開放時間之特性，若抵達尚未開放的點 j 時會額外加入等待點 j 開放的時間以作為懲罰值。並在計算完所有可插入之候選點後，插入比值最高之候選點，在插入所選擇的比值最高候選點的同時，也會對變更後的染色體進行檢查，若發現染色體當中的基因值因插入候選點而導致該基因值不符合時間窗限制，則將該基因值自染色體中剔除。本研究設計之路徑重連結示意圖如圖 5 所示。

$$Ratio_{ij} = \frac{P_j}{t_{ij} + Wait_j} ; \forall i, j = 1, \dots, N \quad (11)$$

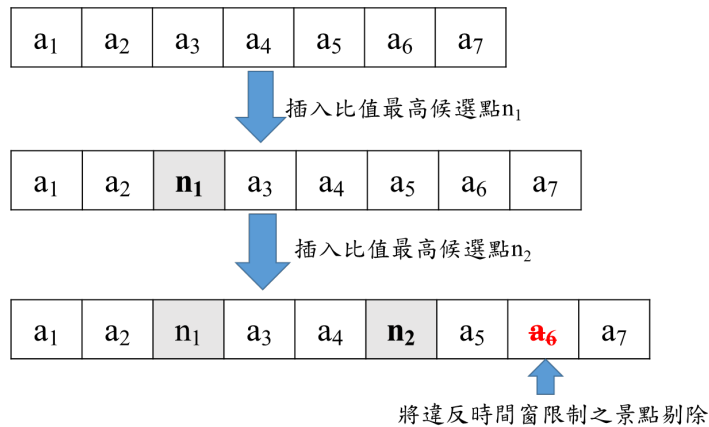


圖5 路徑重連結示意圖

同時也為避免在路徑重連結時產生插入候選點與剔除違反時間窗限制之景點的步驟中產生無限巡迴，會透過程式當中的亂數產生器，隨機產生 1 或 2 之整數作為路徑重連結時的停止依據，而在進行路徑重連結時，若路線的總花費時間小於最大可使用時間之限制，則可繼續進行路徑重連結之步驟並將所花費時間最多之路線保留，並以此路線繼續進行路徑重連結，藉以讓路線所花費時間接近最大可使用時間，同時也為避免路徑重連結進入插入基因值與剔除基因值的無限巡迴，在路線所花費時間最接近最大可使用時間時，意即該染色體無法再透過路徑重連結插入任何基因值時，路徑重連結次數會增加一，此時若經亂數所隨機產生之 1 或 2 隨機整數等於路徑重連結之次數，則停止路徑重連結之步驟。關於本研究所設計之路徑重連結步驟流程圖如圖 6 所示，首先取得經雙點交配後的染色體，並在染色體的

各基因值位置當中，判斷所有未拜訪之節點是否能插入至染色體之中，並計算可拜訪之節點在可插入染色體位置的比值，從中找出比值最高的節點並插入於染色體之中並重複此過程，直至路徑重連結次數達到最大次數限制。

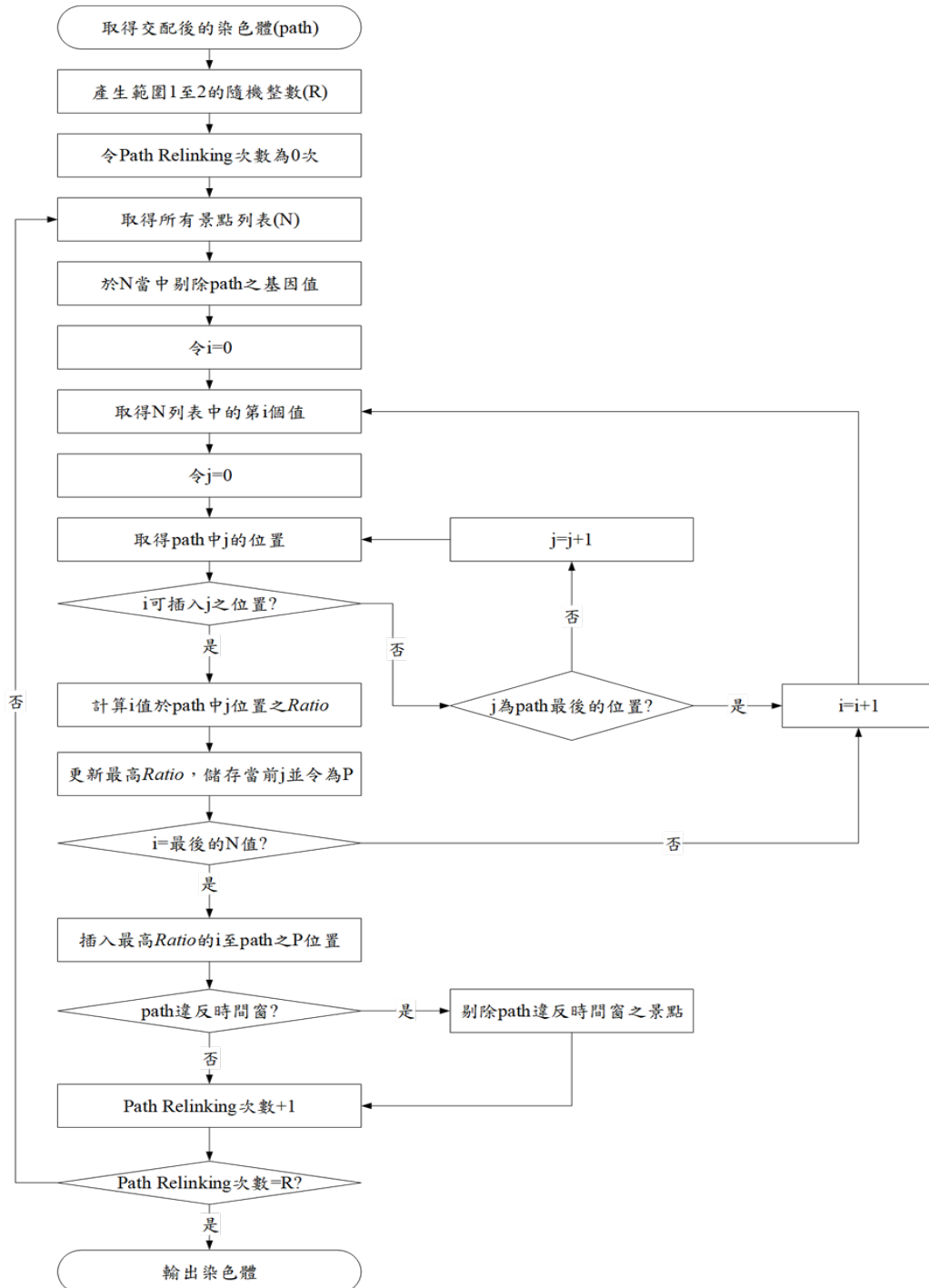


圖6 路徑重連結步驟流程圖

3.2.4 突變

在基因演算法求解過程中，為避免染色體在選擇與交配的階段中發生過早收斂而導致陷入區域最佳解，因此本研究採用刪除突變的方式做隨機擾動，藉以跳出區域最佳解，使受到擾動的染色體在區域最佳解以外的範圍進行搜尋以取得全域最佳解。在決定染色體是否要進行突變時，其做法也與交配階段類似，需設置突變率，本研究所設置的突變率為 0.15。在突變階段會對每條染色體取一個 0~1 隨機變數，藉以決定此染色體是否進行突變，若達突變門檻，將會對染色體隨機選取一基因位置，將該位置以後的基因值全部刪除。刪除突變示意圖如圖 7 所示，若有一條準備進行突變的染色體，其基因為 a_1 至 a_7 ，突變位置則會自 a_1 至 a_7 中隨機選一位置，假設經隨機選取選到 a_3 之位置，則將 a_3 以後之基因值刪除。

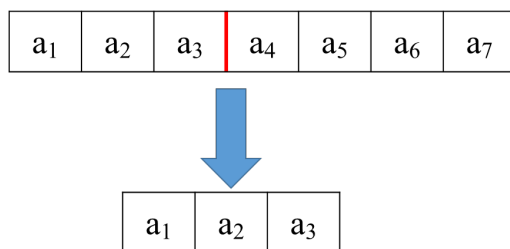


圖7 刪除突變示意圖

同時，以該基因位置作為基準點進行突變機制之路徑重連結。突變機制之路徑重連結與交配階段的路徑重連結稍有不同，突變機制之路徑重連結在尋找可插入候選點同樣是在所有節點當中找尋符合限制條件且不在已經過路線當中之節點，但在插入候選點時會以「插入比值最高之候選點」或「輪盤法插入候選點」兩種做法進行候選點的插入，並透過一個二元隨機變數使兩種方法被選取到的機率各半，藉以決定該次插入候選點的做法。突變機制之路徑重連結示意圖如圖 8 所示，接續上述刪除突變之範例，於 a_3 的位置以輪盤法或插入比值最高之節點之方式插入 n_1 ，再以 n_1 位置為基準用輪盤法或插入比值最高之節點之方式插入 n_2 ，接著再以 n_2 為基準，用相同方式插入新的節點，藉此使路線總花費時間接近最大可使用時間，直至沒有節點可插入為止。

突變機制之路徑重連結流程圖如圖 9 所示，首先在染色體中取得刪除突變之位置，以此位置為基準判斷是否有可插入此位置的候選點，並計算可插入候選點之比值，取得所有可插入候選點與比值後，用二元隨機變數所產生的值決定插入候選點之方式，若二元隨機變數等於 0，便插入最高比值之候選點；若二元隨機變數等於 1，則使用輪盤法插入候選點。插入候選點之

後，將基準點之參考位置移至所插入的候選點位置，並繼續進行插入的步驟，直至沒有任何候選點可插入為止。

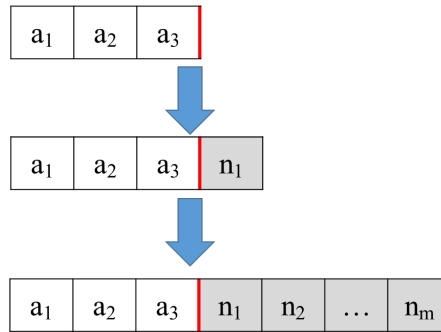


圖8 突變機制之路徑重連結示意圖

3.3 邏輯驗證

依據上述之模式與求解演算法，本研究之測試執行架構以 Python 3.74 撰寫程式，執行環境為 Intel (R) Core (TM) i5-4250U CPU 1.30GHz 1.90 GHz，RAM 為 4.00GB。

為驗證本研究所建構之數學模型之正確性，透過 IBM® Decision Optimization CPLEX® Modeling for Python (DOcplex) 呼叫 CPLEX 模型求解工具求解本研究所設計之小型例題，並與本研究所提出之求解演算法進行求解結果比較。本研究所設計之小型例題資訊如表 1 所示，資料中包含本研究隨機設置之 10 個節點編號、X 軸座標、Y 軸座標、節點的拜訪時間、拜訪節點可取得的分數以及節點的開啟時間與關閉時間。此小型例題以節點編號 0 作為起訖點，並以節點編號 0 之關閉時間作為最大可使用時間，另外，本研究對於各點間的距離以歐幾里得距離計算之，並四捨五入至小數點第二位。

表 1 本研究設計之小型例題資訊

節點編號	X軸座標	Y軸座標	拜訪時間	節點分數	開啟時間	關閉時間
0	4	13	0	0	0	600
1	-29	64	2	12	276	548
2	-30	5	7	8	98	438
3	51	5	21	16	91	330
4	-13	69	24	5	177	505
5	-67	68	1	12	282	581
6	48	6	17	5	262	445
7	5	22	6	13	223	458
8	-65	77	5	20	109	352
9	-4	-1	7	13	262	588
10	23	11	1	18	150	447

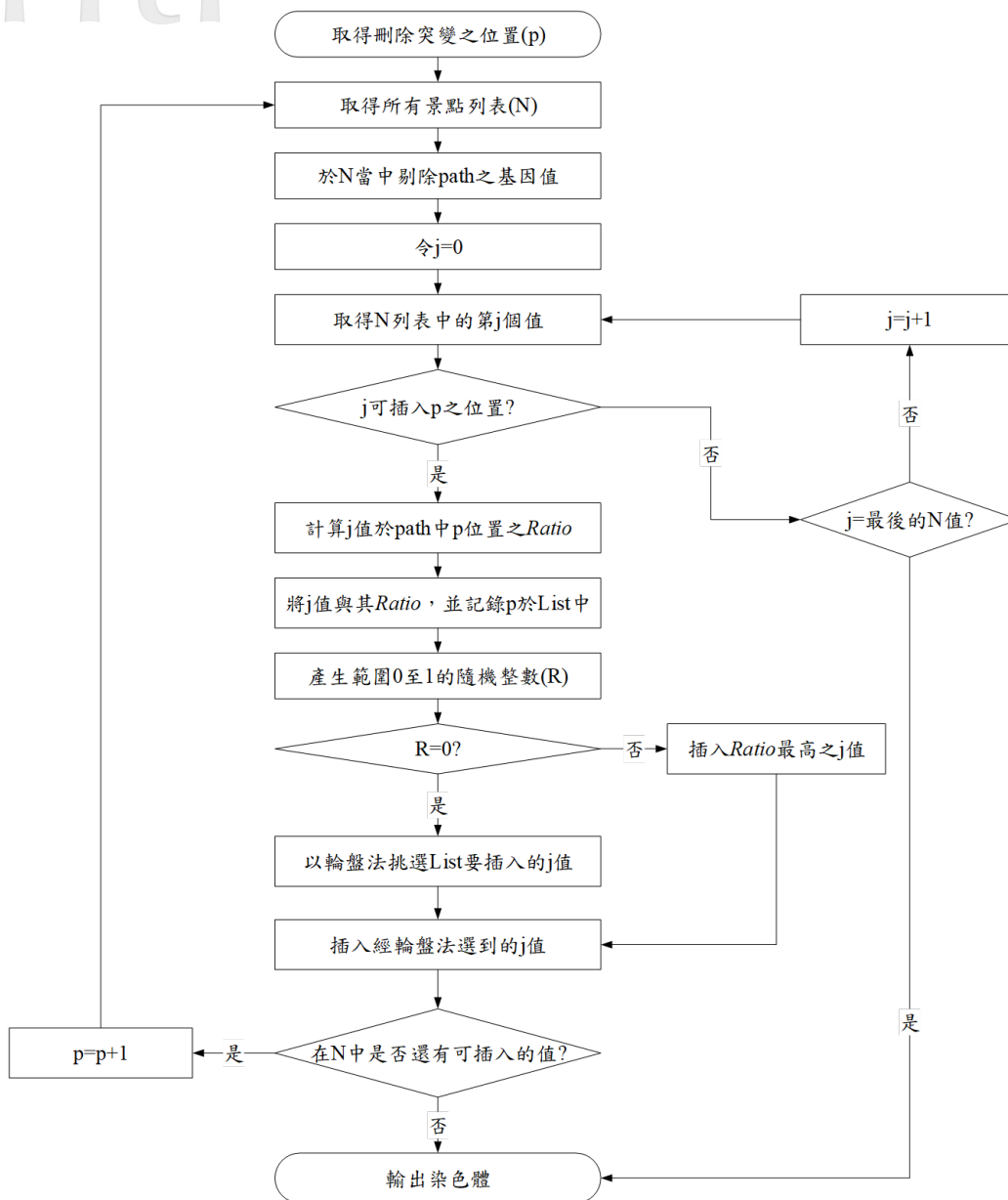


圖9 突變機制之路徑重連結流程圖

利用 CPLEX 模型求解工具求解本研究所設計之小型例題結果如圖 10、表 2 所示，資料中顯示各節點之編號、開啟時間與關閉時間等資訊，求解結果為 $0 \rightarrow 3 \rightarrow 10 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 0$ 。此路線所獲得的分數為 117，路線總花費時間為 484.81。

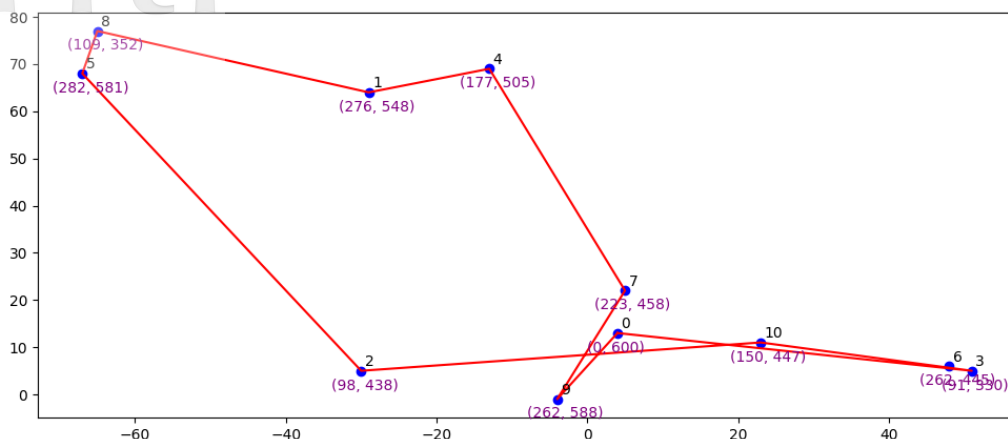


圖10 CPLEX模型求解工具求解本研究所設計之小型例題結果示意圖

表 2 CPLEX 模型求解工具求解本研究所設計之小型例題結果

節點 編號	節點 分數	抵達時間	等待節點 開放時間	拜訪 時間	離開節點 時間	路線所獲得 的分數
0	0	0	0	0	0	117
3	16	47.68	43.32	21	112	路線總花費時間
10	18	140.64	9.36	1	151	484.81
2	8	204.34	0	7	211.34	
5	12	284.4	0	1	285.4	
8	20	294.62	0	5	299.62	
1	12	337.9	0	2	339.9	
4	5	256.66	0	24	380.66	
7	13	430.99	0	6	436.99	
9	13	461.69	0	7	468.69	
0	0	484.81	0	0	484.81	

透過本研究提出之求解演算法求解本研究所設計之小型例題結果如圖 11、表 3 所示，資料中顯示旅遊路線的所拜訪的節點編號，求解結果為 0 → 3 → 10 → 2 → 5 → 8 → 1 → 4 → 7 → 9 → 0，此路線所獲得的分數為 117，路線總花費時間為 484.81。

由上述測試結果可知本研究所建立之數學模型確實考量到各參數與限制式，並規劃出起訖點相同的 OPTW 路線，並且在以相同例題測試下發現本研究提出之求解演算法與 CPLEX 模型求解工具求得的結果一致，說明本研究所提出之數學模型與求解演算法之正確性。

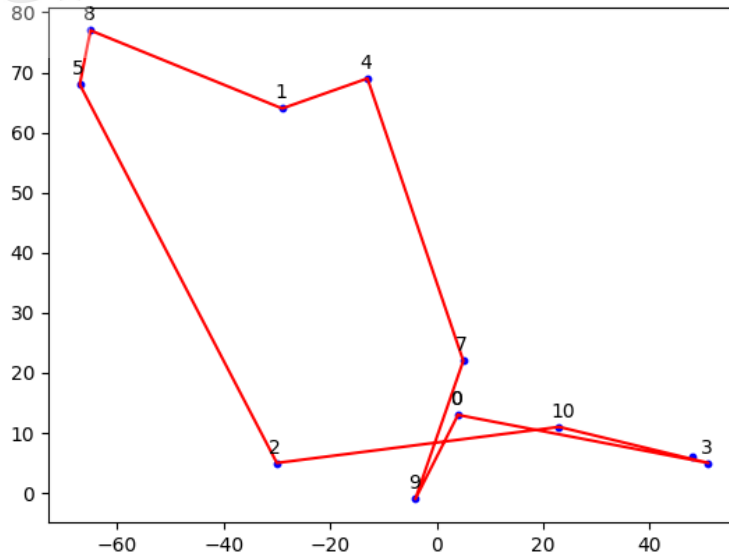


圖11 本研究提出之求解演算法求解本研究所設計之小型例題結果示意圖

表 3 本研究提出之求解演算法求解本研究所設計之小型例題結果

節點 編號	節點 分數	抵達時間	等待節點 開放時間	拜訪 時間	離開節點 時間	路線所獲得 的分數
0	0	0	0	0	0	117
3	16	47.68	43.32	21	112	路線總花費時間
10	18	140.64	9.36	1	151	484.81
2	8	204.34	0	7	211.34	
5	12	284.4	0	1	285.4	
8	20	294.62	0	5	299.62	
1	12	337.9	0	2	339.9	
4	5	256.66	0	24	380.66	
7	13	430.99	0	6	436.99	
9	13	461.69	0	7	468.69	
0	0	484.81	0	0	484.81	

3. 4 求解演算法執行模組設計

為探討求解演算法在使用不同尋優策略之求解效率，本研究於交配與突變階段設計 3 種不同尋優策略之方式，分別為 G1 模組、G2 模組與 G3 模組。G1 模組之演算流程圖如圖 12 所示，G1 模組之尋優策略在交配的階段中使用雙點交配並在路徑重連結中尋找最高比值的候選點插入至路線之中，

突變階段則是在路線中隨機選取一位置，並將其位置以後的基因刪除，接著再進行突變機制之路徑重連結。

G2 模組之演算流程圖如圖 13 所示，G2 模組之尋優策略在交配階段與 G1 模組相同，但在突變階段則是在路線中隨機選取一位置，將該位置的基因刪除，再進行路徑重連結，但選擇插入候選點則是以輪盤法的方式進行插入。

G3 模組之演算流程圖如圖 14 所示，G3 模組之尋優策略在交配階段採用雙點交配再進行路徑重連結，但選擇插入候選點則是以輪盤法的方式進行插入，突變階段為路線中隨機選取一位置，將該位置的基因刪除，再進行路徑重連結，但選擇插入候選點則是以輪盤法的方式進行插入，即是採用與 G2 模組相同之突變方式。

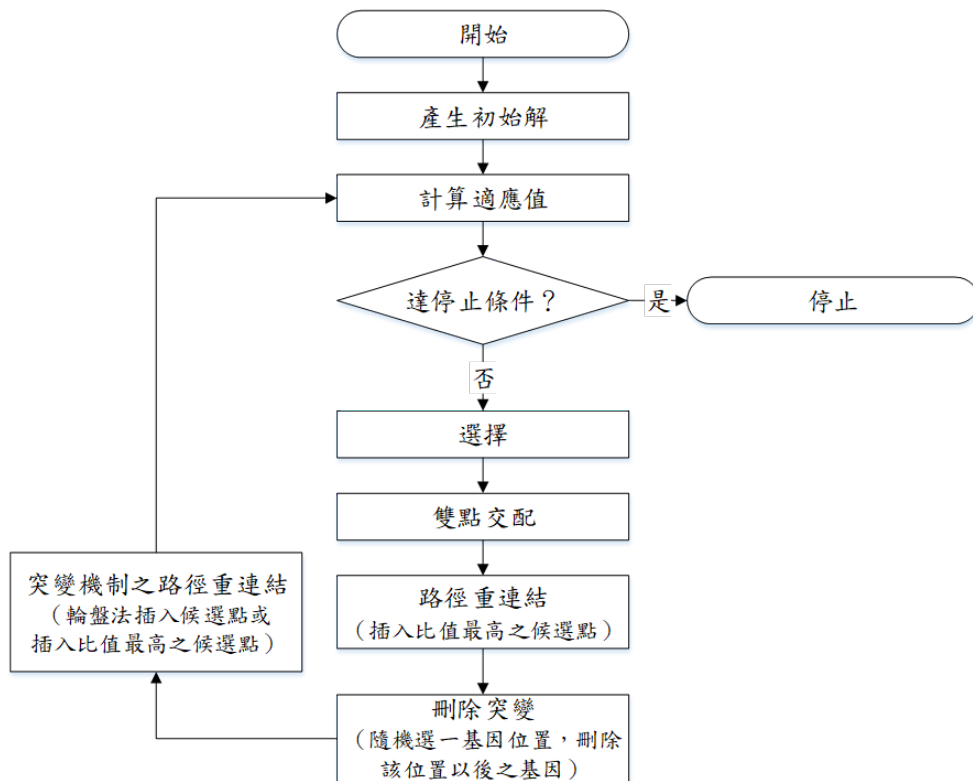


圖12 G1模組演算流程圖

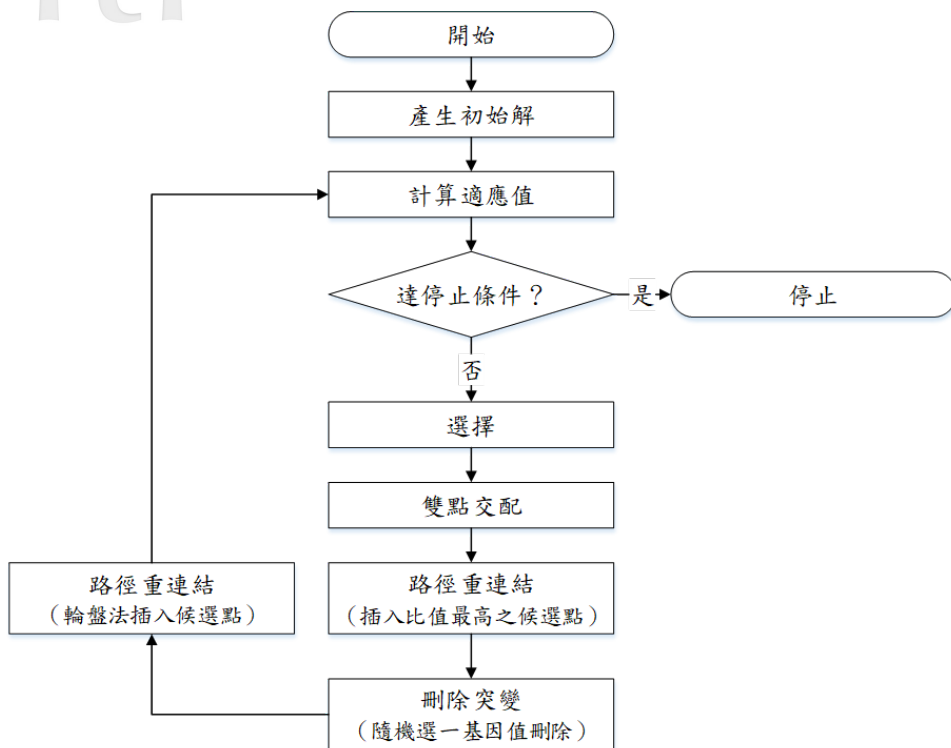


圖13 G2模組演算流程圖

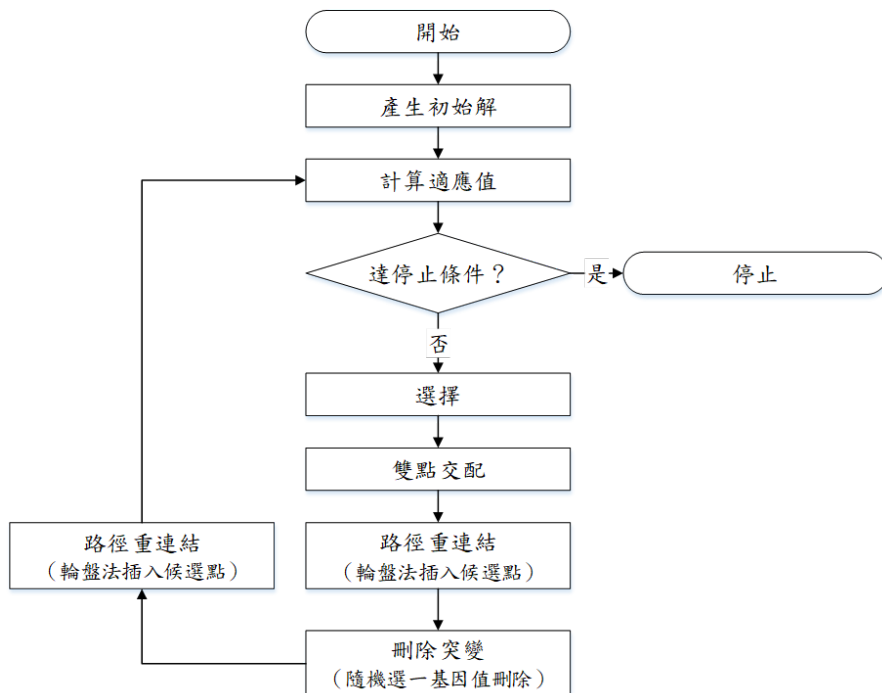


圖14 G3模組演算流程圖

四、求解品質比較

為比較不同尋優策略之方式，本研究 The orienteering problem: test instances 提供之國際測試例題進行不同執行模組間的求解效率之比較。此國際測試例題包含 c 類、r 類、rc 類以及 pr 類例題，其不同類型測試例題之屬性如表 4 所示，資料顯示不同類型例題的節點分布方式含分群型、隨機型、分群隨機混合型以及座標含有小數及負值之類型，節點數目除 pr 類例題為 48 至 288，其餘類型例題皆為 100。另外在國際測試例題中所提供的節點開放時間與關閉時間，其中開放時間為「最早可進入該節點拜訪的時間」、關閉時間為「最晚可於該節點拜訪的時間」，因此，此國際例題所指的關閉時間並非實際節點關閉而無法去拜訪的時間，意旨在關閉時間之前或目前時間與關閉時間相同時，皆允許拜訪節點；反之，若目前時間在關閉時間之後則不可拜訪該節點。

表 4 不同類型測試例題之屬性

例題類型	點位數目	節點分布方式
c 類	100	分群
r 類		隨機
rc 類		分群與隨機之混合
pr 類	48~288	座標具小數及負值

本研究為比較不同執行模組之求解效率，以 G1、G2、G3 執行模組對 c 類例題 c101 至 c105 例題、r 類例題 r101 至 r105 例題，及 rc 類例題 rc101 至 rc108 例題各進行五次求解測試，並與文獻已知最佳解進行求解品質之比較，同時於三種執行模組中挑選求解效率最高之執行模組對 pr 類不同點位規模大小之例題進行測試。各執行模組之參數設置皆為迭代次數 1000 次、族群大小為 100、交配率為 0.8、突變率為 0.15，並以迭代次數達 1000 次、整體族群已達收斂或經過 100 次迭代後所得的解沒有改善等，作為停止迭代之依據。

G1、G2、G3 執行模組對 c 類、r 類及 rc 類例題求解之結果如附錄一所示。G1、G2、G3 求解結果與文獻已知最佳解相比之平均誤差如表 5 所示，資料中可看出 G1 執行模組對於 c 類、r 類及 rc 類例題之平均求解誤差相比為最小，說明 G1 執行模組在不同節點分布方式下具有較佳之求解效率，因此本研究將以 G1 執行模組進一步進行 pr 類例題之測試。

表 5 各執行模組之平均求解效率

執行模組 名稱	c 類例題		r 類例題		rc 類例題	
	平均執行 時間	平均誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
G1	00:00:45	3.03	00:00:39	0.75	00:00:31	3.09
G2	00:02:39	9.51	00:02:14	5.18	00:02:10	9.07
G3	00:00:45	13.62	00:00:33	8.64	00:00:31	9.58

本研究由 pr 類例題取自 pr01 至 pr03 點位數介於 48 至 144 之間之例題做為求解演算法之測試例題，並以三種執行模組中求解效率最高之 G1 執行模組進行求解，pr 類例題 pr01 至 pr03 以 G1 執行模組求解之求解結果如表 6 所示，由資料中可得知本研究所建構之求解演算法在不同規模大小的測試例題上之表現，本研究之求解品質與 pr01、pr02、pr03 等例題之文獻已知最佳解相比，平均求解誤差皆於容許範圍 5% 以內，說明本研究之求解演算法可適用於點位數 144 以內之問題規模。

表 6 pr01 至 pr03 例題測試結果

例題名稱	點位數目	已知最佳解	本研究	誤差 (%)	平均誤差 (%)
pr01	48	308	304	1.30	1.30
			304	1.30	
			304	1.30	
			304	1.30	
			304	1.30	
pr02	96	404	391	3.22	2.82
			398	1.49	
			391	3.22	
			385	4.70	
			398	1.49	
pr03	144	394	384	2.54	3.96
			371	5.84	
			389	1.27	
			371	5.84	
			377	4.31	

五、自助旅遊路線之應用

關於 OPTW 之應用，王貴枝 (2012) 曾依據規劃旅遊行程時所需考慮的因素，並根據其特性應用於硬時窗特性之 OPTW，透過基因演算法求出個人偏好的旅遊行程。而本研究所提出之軟時窗之 OPTW 數學模型，其特性包含起訖點相同、可於節點開放前抵達、不可於節點關閉後進行拜訪，在自助旅遊之應用上可考量到某些景點可在開放時間之前等待景點開門再去

拜訪之情形，藉以更加貼近使用者之需求。因此若將 OPTW 應用於自助旅遊路線之規劃，可適用於旅遊起訖點相同、遊玩的景點有限制的開放間以及整趟旅遊中含有最大可旅遊時間限制之情形之民眾使用，同時民眾也可對於自己所選取感興趣的景點進行效用值的評估，意即遊玩該景點可對該民眾帶來多高程度之效用，使民眾可透過設置模式中之參數求得符合自身需求之旅遊路線。

同時，由於本研究採國際例題進行求解測試，各節點間的距離以歐幾里得距離計算之，但在現實生活中將各景點間的距離以歐幾里得距離進行計算會有很可能不貼近於實際旅行時間，因此若要將 OPTW 應用於實際旅遊路線之規劃，在各景點間的距離可利用 Google Maps API (application programming interface) 當中的 Distance Matrix Service 取得各景點間的實際行車距離，取得距離的單位可為時間單位，其計算各點間真實行車距離的計算方式是以道路所限制的最高行車速限作為計算距離之依據。

本研究以臺中市景點為例，依據臺中市政府資料開放平台取得所有 363 個景點，各景點之開放時間、關門時間、遊玩時間與各景點之效用值皆參考 Google 評分為設置參數之依據，並透過此 API 取得各景點間之實際行車距離。囿於使用 Distance Matrix Service 取得真實行車距離上有一定免費額度的限制，同時也考量到本研究之求解演算法適用於點位數小於 144 以內之問題規模，因此本研究以 100 個景點數作為問題規模範圍，並在臺中市全部 363 個景點中隨機選取 100 個臺中市景點作為使用者感興趣之景點數進行實例測試。隨機選取之 100 個臺中市景點資料的實際位置如圖 15 所示。

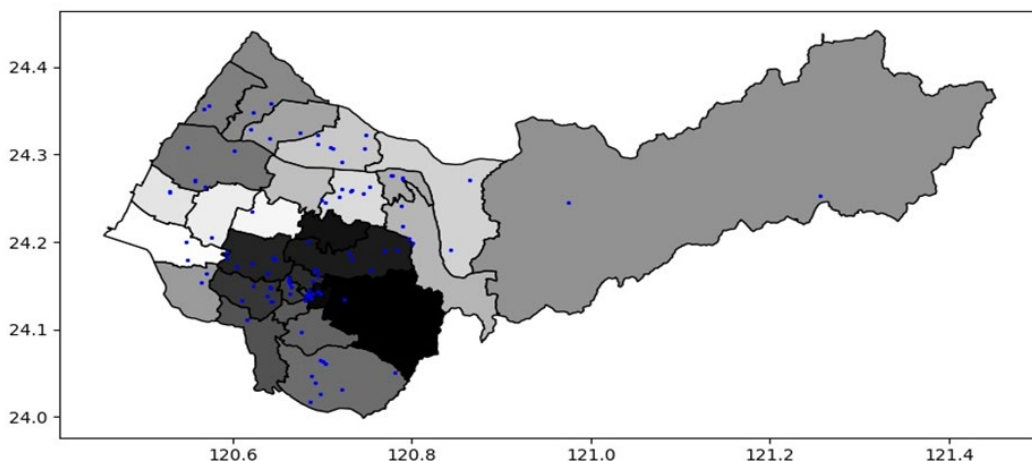


圖15 隨機選取100個臺中市景點之資料

臺中市 100 個景點之基本資料如附錄二所示，資料中包括：各景點之景點編號、景點名稱、各景點之經緯度、遊玩景點可獲得的效用值、在各景點遊玩的時間以及各景點之開放、關閉時間等資訊。

為測試使用者在自助旅遊路線規劃之情形，本研究假設旅遊者自高鐵臺中站租用汽車，並於租車站作為旅遊的出發點開始旅遊。出發時間為 9:00，結束時間為 21:00，可旅遊的時間為 12 小時。並以此情境作為實例測試，其路線規劃結果如表 7 所示，資料中可看出將本研究提出之數學模式進行自助旅遊路線規劃之結果可提供使用者旅遊路線之拜訪順序、抵達景點時間、等待景點開放時間、離開景點時間、總效用值、總旅遊時間、總實際遊玩時間、總實際行車時間與總等待景點開放時間等資訊。其中所求得的旅遊路線為高鐵臺中站 → 張家祖廟 → 大甲鐵砧山風景特定區 → 清水趙家古厝 → 龍目井 → 竹坑_南寮登山步道 → 葫蘆墩公園 → 廟東夜市 → 寶泉甘味手造所 → 公老坪 → 湖水岸藝術街坊 → 臺中市文昌公廟 → 阿薩斯雕像 → 宮原眼科 → 高鐵臺中站，自高鐵臺中站出發後共造訪 13 個景點，最後回至高鐵臺中站。此旅遊路線可讓使用者獲得 54.5 之效用值；總旅遊時間為 11 小時 40 分鐘 10 秒；總實際遊玩時間為 8 小時 40 分鐘；總實際行車時間為 3 小時，並且沒有總等待景點開放的時間。實際旅遊路線示意圖如圖 16 所示，並以星型標記表示旅遊的起訖點

表 7 臺中市自助旅遊路線規劃結果

拜訪 景點 順序	景點名稱	效用值	抵達時間	等待景點 開放時間 (分鐘)	遊玩 時間 (分鐘)	離開 時間	總效用值
1	高鐵臺中站	0	09:00:00	0	0	09:00:00	54.5
2	張家祖廟	4.2	09:14:30	0	45	09:59:30	總旅遊時間
3	鞋寶觀光工廠	4	10:06:50	0	60	11:06:50	11 小時 40 分鐘 10 秒
4	大肚瑞井里	4	11:17:13	0	45	12:02:13	總實際遊玩時間
5	萬里長城 登山步道	4.3	12:08:01	0	60	13:08:01	08 小時 40 分鐘 00 秒
6	竹坑_南寮 登山步道	4.5	13:17:56	0	30	13:47:56	總實際行車時間
7	龍目井	4	13:56:06	0	30	14:26:06	03 小時 00 分鐘 10 秒
8	后里區花卉產業 文化館	4.1	14:55:11	0	15	15:10:11	總等待景點 開放時間
9	后里薩克斯風玩 家館	4.6	15:11:32	0	75	16:26:32	00 小時 00 分鐘 00 秒
10	公老坪	4	16:50:48	0	15	17:05:48	
11	寶泉甘味手造所	4	17:16:23	0	30	17:46:23	
12	葫蘆墩公園	4.2	17:50:05	0	45	18:35:05	
13	廟東夜市	4.1	18:40:21	0	40	19:20:21	
14	阿薩斯雕像	4.5	19:50:15	0	30	20:20:15	
15	高鐵臺中站	0	20:40:10	0	0	20:40:10	

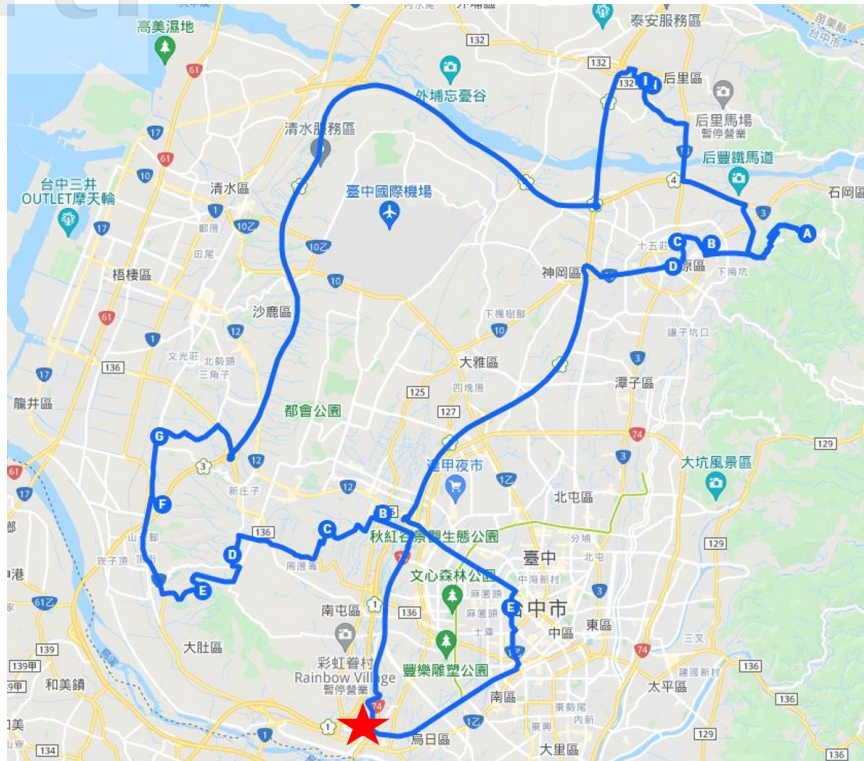


圖16 臺中市自助旅遊路線示意圖

同時本研究提出之數學模式在未來應用上可與旅遊網站平台結合，並透過 API 傳遞資訊給使用者，使用者僅需提供出發地點、感興趣的景點、出發時間、可遊玩時間，即可規劃旅遊路線，並獲得各景點的抵達時間、等待時間等資訊。同時也可透過會員制設定自己對於各景點的效用值、預計停留時間，以規劃個人化的旅遊路線。

六、結論與建議

1. 本研究透過修改基因演算法求解 OPTW，於基因演算法之求解過程中新增路徑重連結與突變機制之路徑重連結，並將原本路徑重連結與本研究設計之突變機制之路徑重連結搜尋候選點的方式進行修改，將原本自兩條路線中搜尋可插入候選點的機制修改為搜尋不包含路線中的節點且插入之位置符合時間窗之節點，並將修改後的演算法透過不同執行模組對不同節點分布方式之國際例題進行比較，發現本研究提出之 G1 執行模組 c 類、r 類與 rc 類等國際例題之求解測試中，求得結果與文獻已知最佳解相比平均誤差不超過 3.09%。同時也為三種執行模組中，對於 c 類、r 類與 rc 類例題平均求解誤差最小之執行模組。其中 G1 執行模組之演算流程為交配階段以雙點交配後利用插入比值最高候

選點之路徑重連結之方式；突變階段則隨機選取一基因位置並刪除該位置以後基因值之刪除突變之方式，並以此位置為基準，利用輪盤法或選取比值最高候選點之方式進行突變機制之路徑重連結。

2. 本研究以 The orienteering problem: test instances 提供之 OPTW 國際例題作為改良基因演算法之求解測試例題，發現例題所提供的節點關閉時間係指「最晚可於該節點拜訪的時間」，並非實際節點關閉而無法去拜訪的時間。
3. 本研究利用 G1 執行模組進一步對具不同問題規模之 pr 類例題進行求解測試，結果顯示本研究提出之求解演算法可適用於點位數不超過 144 之問題規模，在此問題規模下之平均求解誤差皆於 4% 以內。
4. 以本研究提出之 OPTW 數學模型對隨機選取之 100 個臺中市景點進行假設情境之自助旅遊路線規劃測試，其中各景點間的距離利用 Google Maps API 當中的 Distance Matrix Service 取得各景點間的實際行車距離，結果顯示本研究提出之 OPTW 數學模型確實可在使用者設定起訖點及有興趣拜訪景點條件下，產生對使用者效益最大之拜訪景點順序與路線規劃，未來使用者可依據自己主觀之判斷對各景點之評分、評分分數之上下限以及各景點之遊玩時間給予設定。
5. 未來在應用 OPTW 之問題特性進行自助旅遊路線之規劃時，也可與旅遊網站平台結合，並透過 API 傳遞資訊給使用者，讓使用者僅需提供出發地點、感興趣的景點、出發時間、可遊玩時間，即可規劃旅遊路線，並獲得各景點的抵達時間、等待時間等資訊。同時也可透過會員制設定自己對於各景點的效用值、預計停留時間，以規劃個人化的旅遊路線。
6. 本研究透過修改基因演算法對 OPTW 進行求解測試，在演算流程中進行路徑重連結與突變機制之路徑重連結時，為避免插入新節點與剔除不符合時間窗限制之節點出現無限巡迴之情形，本研究選擇以剔除違反時間窗限制之節點作為處理不可行解之方式，未來若發生插入新節點而產生不可行解之情形時，可嘗試選擇不插入該新節點作為處理不可行解之方式。

參考文獻

- 王晉元、林誌銘(2007)，「應用基因演算法於捷運列車運行計畫之研究」，*運輸計劃季刊*，第三十六卷第一期，頁 115-145。
- 王晉元、盧宗成、李晟豪、陳其華、吳東凌、陳翔捷(2018)，「手機信令資料探勘於改善觀光旅客公共運輸服務之研究—以花蓮縣臺灣好行路線為例」，*運輸計劃季刊*，第四十八卷第二期，頁 105-131。

- 王國川、張新立、林燕姬、Hedeker D. (2014), 「多個層級、關聯隨機效果邏輯迴歸模型應用於探討休閒旅遊者習慣性的運具選擇行為及其影響因素」, *運輸學刊*, 第二十六卷第四期, 頁 497-528。
- 王貴枝(2012), 考量個人偏好之旅遊行程規劃系統, 中華大學運輸科技與物流管理學系碩士論文。
- 廖述賢、謝佳琳、何衛中(2017), 「以混合遺傳演算法求解整合性區位存貨、定址以及運輸路徑之兩階層供應鏈分銷網路設計」, *運輸學刊*, 第二十九卷第一期, 頁 97-121。
- 蘇純繒、翁瑞聰(2004), 「以螞蟻群聚最佳化整合基因演算法求解無資源限制單一指派中位轉接點問題」, *運輸學刊*, 第十六卷第二期, 頁 99-114。
- Feo, T. A. and M. G. C. Resende (1995), "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures," *Journal of Global Optimization*, Vol. 6, pp. 109-133.
- Gama, R. and Fernandes, H. L.(2021), "A Reinforcement Learning Approach to the Orienteering Problem with Time Windows," *Computers and Operations Research*, Vol. 133, No. 105357.
- Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Mastakas, K., and Pantziou, G. (2014), "A Survey on Algorithmic Approaches for Solving Tourist Trip Design Problems," *Journal of Heuristics*, Vol. 20, No. 3, pp. 291-328.
- Golden, B. L., L, Levy, L., and Vohra, R. (1987), "The Orienteering Problem," *Naval Research Logistics*, Vol. 34, No. 3, pp. 307-318.
- Kantor, M. G. and Rosenwein, M. B. (1992), "The Orienteering Problem with Time Windows," *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 43, No. 6, pp. 629-635.
- Karbowska-Chilinska, J. and Zabielski, P. (2014a), "Genetic Algorithm Solving the Orienteering Problem with Time Windows," *Advances in Systems Science*, Vol. 240, pp. 609-619.
- Karbowska-Chilinska, J. and Zabielski, P. (2014b), "Genetic Algorithm with Path Relinking for the Orienteering Problem with Time Windows," *Fundamenta Informaticae*, Vol. 135, No. 4, pp. 419-431.
- Tasgetiren, M. F. and Smith, A. E. (2000), "A Genetic Algorithm for the Orienteering Problem," *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*, Vol. 2, pp. 910-915.
- The orienteering problem: test instances, Retrieved May 1st, 2023, website: <https://www.mech.kuleuven.be/en/cib/op>

Tsiligrirides, T. (1984), "Heuristic Methods Applied to Orienteering," *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 35, No. 9, pp. 797-809.

Vansteenwegen, P., Souffriau, W., and Van Oudheusden, D. (2011), "The orienteering problem: A survey," *European Journal of Operational Research*, Vol. 209, No. 1, pp. 1-10.

附錄一 G1、G2、G3 執行模組求解 c 類、r 類及 rc 類例題結果

G1							
例題名稱	點位數目	已知最佳解	本研究	執行時間	誤差(%)	平均執行時間	平均誤差(%)
c101	100	320	320	00:00:42	0.00	00:00:32	0.00
			320	00:00:26	0.00		
			320	00:00:08	0.00		
			320	00:00:41	0.00		
			320	00:00:42	0.00		
c102	100	360	360	00:00:31	0.00	00:00:26	0.00
			360	00:00:12	0.00		
			360	00:00:10	0.00		
			360	00:00:59	0.00		
			360	00:00:20	0.00		
c103	100	400	380	00:01:10	5.00	00:01:02	4.50
			380	00:01:13	5.00		
			400	00:01:15	0.00		
			370	00:00:17	7.50		
			380	00:01:14	5.00		
c105	100	340	330	00:00:53	2.94	00:00:37	3.53
			310	00:00:18	8.82		
			320	00:00:52	5.88		
			340	00:00:08	0.00		
			340	00:00:52	0.00		
r101	100	198	198	00:00:04	0.00	00:00:15	0.00
			198	00:00:07	0.00		
			198	00:00:25	0.00		
			198	00:00:32	0.00		
			198	00:00:06	0.00		
r102	100	286	286	00:00:54	0.00	00:00:53	0.21
			283	00:00:51	1.05		
			286	00:00:53	0.00		
			286	00:00:53	0.00		
			286	00:00:54	0.00		
r103	100	293	287	00:00:54	2.05	00:00:54	1.09
			288	00:00:56	1.71		
			293	00:00:53	0.00		
			293	00:00:56	0.00		

G1							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
			288	00:00:51	1.71		
r104	100	303	295	00:01:01	2.64	00:00:45	1.98
			286	00:00:28	5.61		
			303	00:00:30	0.00		
			298	00:00:43	1.65		
			303	00:01:05	0.00		

G1							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
r105	100	247	241	00:00:16	2.43	00:00:27	0.49
			247	00:00:40	0.00		
			247	00:00:33	0.00		
			247	00:00:23	0.00		
			247	00:00:25	0.00		

G2							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
r101	100	198	198	00:01:23	0.00	00:01:22	0.20
			197	00:01:24	0.51		
			198	00:01:22	0.00		
			198	00:01:22	0.00		
			197	00:01:21	0.51		
r102	100	286	275	00:02:22	3.85	00:02:24	4.55
			274	00:02:23	4.20		
			274	00:02:23	4.20		
			267	00:02:23	6.64		
			275	00:02:28	3.85		
r105	100	247	240	00:02:33	2.83	00:02:06	1.86
			244	00:02:19	1.21		
			244	00:02:27	1.21		
			237	00:02:08	4.05		
			247	00:01:01	0.00		

G3							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
r101	100	198	198	00:00:30	0.00	00:00:18	0.00
			198	00:00:29	0.00		
			198	00:00:10	0.00		
			198	00:00:11	0.00		
			198	00:00:10	0.00		

G3							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
r105	100	247	237	00:00:16	4.05	00:00:53	4.53
			238	00:00:59	3.64		
			238	00:00:32	3.64		
			229	00:00:20	7.29		
			237	00:02:18	4.05		

G1							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
rc101	100	219	219	00:00:18	0.00	00:00:20	0.00
			219	00:00:42	0.00		
			219	00:00:10	0.00		
			219	00:00:13	0.00		
			219	00:00:18	0.00		
rc102	100	266	259	00:00:18	2.63	00:00:13	3.83
			255	00:00:15	4.14		
			255	00:00:19	4.14		
			255	00:00:06	4.14		
			255	00:00:09	4.14		
rc103	100	266	265	00:00:30	0.38	00:00:32	2.93
			249	00:00:43	6.39		
			259	00:00:22	2.63		
			259	00:00:43	2.63		
			259	00:00:24	2.63		
rc105	100	244	244	00:00:13	0.00	00:00:22	0.41
			239	00:00:49	2.05		
			244	00:00:21	0.00		
			244	00:00:13	0.00		
			244	00:00:15	0.00		
rc106	100	252	252	00:00:51	0.00	00:00:30	0.79
			245	00:00:50	2.78		
			252	00:00:09	0.00		
			249	00:00:06	1.19		
			252	00:00:33	0.00		
rc107	100	277	274	00:00:53	1.08	00:00:49	0.65
			274	00:00:34	1.08		
			277	00:00:51	0.00		
			277	00:00:52	0.00		
			274	00:00:54	1.08		

G2							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
rc101	100	219	219	00:00:16	0.00	00:01:36	1.10
			216	00:02:00	1.37		
			216	00:02:04	1.37		
			216	00:01:57	1.37		
			216	00:01:45	1.37		

G3							
例題 名稱	點位 數目	已知 最佳解	本研究	執行時間	誤差 (%)	平均執行 時間	平均誤差 (%)
rc101	100	219	219	00:00:49	0.00	00:00:26	0.27
			219	00:00:15	0.00		
			219	00:00:34	0.00		
			219	00:00:15	0.00		
			216	00:00:16	1.37		

附錄二 臺中市 100 個測試景點基本資料

景點 ID	名稱	東經	北緯	效用值	拜訪 時間 (min)	開啟 時間 (hr)	關閉 時間 (hr)
0	高鐵臺中站	120.6161	24.11169	0	45	6	24
1	文化部文化資產園區	120.6809	24.13314	4.1	90	10	18
2	后里區花卉產業 文化館	120.7124	24.30685	4.1	15	8	16
3	豐園北科大木創中心	120.7336	24.25961	5	180	9	17
4	國定古蹟 霧峰林家菜園	120.7009	24.06312	4.1	30	8	18
5	清水趙家古厝	120.6012	24.30487	4	30	0	24
6	大坑 9 號及 9-1 號 步道	120.7336	24.18015	4.3	160	0	24
7	豐樂雕塑公園	120.6433	24.13151	4.3	90	0	24
8	天梯步道	120.8436	24.19136	3.9	150	0	24
9	鞋寶觀光工廠	120.6041	24.17108	4	60	9.5	17
10	葫蘆墩公園	120.7219	24.26055	4.2	45	9	19
11	寶泉甘味手造所	120.7321	24.2583	4	30	8	19
12	台中港區運動公園	120.5767	24.20565	4.2	120	6	22
13	高美濕地景觀橋	120.5496	24.30842	4.2	60	0	24
14	老虎城購物中心	120.6379	24.16428	4.1	120	11	22

景點 ID	名稱	東經	北緯	效用值	拜訪 時間 (min)	開啟 時間 (hr)	關閉 時間 (hr)
15	龍目井	120.5477	24.20007	4	30	0	24
16	大肚瑞井里	120.5711	24.1634	4	45	0	24
17	公老坪	120.7536	24.26352	4	15	0	24
18	大坑3號步道 (暫時封閉全線步道)	120.7544	24.16825	4.4	120	0	24
19	東海夜市	120.5926	24.1815	4.1	30	16	24
20	圓滿教堂	120.7223	24.03127	3.4	90	10	16.5
21	臺中市美術家資料館	120.5577	24.26957	4.2	75	9	17.5
22	天籟園	120.7903	24.21866	3.1	90	8	17
23	綠川水岸廊道	120.6845	24.139	4.2	45	8	22
24	昌平路皮鞋街	120.693	24.1678	4.1	90	10	22
25	七分窯	120.7885	24.24152	4.4	120	9	17
26	大安休閒農場	120.5737	24.35648	3.7	150	9	19
27	張廖家廟	120.6456	24.18231	4.3	75	9	17
28	石岡穀倉	120.7765	24.27553	4.1	45	9.5	17
29	慈善寺	120.6904	24.16812	4.2	90	8.5	17
30	霧峰林家花園 林獻堂博物館	120.7037	24.06058	4.6	120	8.5	18
31	大坑6號步道	120.7308	24.18768	4.3	120	0	24
32	情人木橋	120.789	24.27242	3.8	45	0	24
33	水流東桐花步道	120.6747	24.32562	3.8	40	0	24
34	木匠兄妹木工房	120.7213	24.29136	4.8	90	9	17
35	佛光山惠中寺	120.641	24.14909	4.5	75	7.5	21
36	臺灣菇類文化暨 農村文物館	120.6981	24.06488	3.6	45	9	16
37	新社商圈	120.7962	24.20432	4	75	10	17
38	梧棲老街	120.5299	24.25776	3.7	60	8	21
39	竹坑_南寮登山步道	120.5496	24.1788	4.5	30	0	24
40	湖水岸藝術街坊	120.6445	24.13153	3.5	90	0	24
41	太平買菸場	120.7245	24.13406	4.1	45	9	17
42	東豐自行車綠廊	120.7789	24.27604	4.5	30	0	24
43	昇和香菇農園	120.8009	24.19856	4.5	75	8	17
44	臺中市港區藝術中心	120.5578	24.27073	4.2	75	9	17.5
45	亞洲大學現代美術館	120.6882	24.04711	4.4	75	9	17.5

景點 ID	名稱	東經	北緯	效用值	拜訪 時間 (min)	開啟 時間 (hr)	關閉 時間 (hr)
46	后里薩克斯風玩家館	120.7098	24.30816	4.6	75	10	17.5
47	秀泰生活台中站前店	120.6897	24.14057	4.2	150	11	22
48	萬里長城登山步道	120.5649	24.15395	4.3	60	0	24
49	大甲鐵砧山風景特定區	120.6432	24.35804	4.2	30	0	24
50	東海藝術街商園	120.5932	24.18802	3.8	60	11	21
51	麗寶樂園渡假區	120.6956	24.32302	4.2	270	9.5	17
52	樂成宮	120.698	24.1407	4.7	75	6.5	22
53	阿罩霧櫻花杜鵑步道	120.7032	24.06087	4.4	75	0	24
54	台中南天宮-關帝聖君	120.6954	24.14292	4.4	90	8	21
55	大坑 1 號步道	120.7841	24.19043	4.3	120	0	24
56	新社星願紫風車	120.7968	24.20411	3.5	30	0	24
57	擁葉生態農場	120.8642	24.27134	4.3	75	10	19
58	勤美術館	120.6636	24.15235	4.2	105	11	17
59	梨山文化陳列館	121.2565	24.25243	4.2	30	8.5	17
60	臺中市孔廟	120.69	24.15432	4.4	105	9	17
61	IKEA 宜家家居	120.6429	24.14704	4.4	105	10	22
62	劉秀才古厝	120.6412	24.31887	3.3	75	13	17
63	廣三 SOGO 百貨	120.6621	24.15538	4.1	120	11	22
64	大雪山國家森林遊樂區	120.9746	24.24477	4.5	240	6.5	17
65	台灣氣球博物館	120.6991	24.24733	4	45	9	17
66	張連昌薩克斯風博物館	120.6946	24.31239	4.3	120	9	17
67	豐原漆藝館	120.7458	24.25509	4	90	9	17
68	萬豐環山步道	120.6984	24.02633	4	105	0	24
69	臺中市原住民綜合服務中心	120.6221	24.23539	3.8	90	8	17
70	彩虹眷村	120.6098	24.13368	4.1	60	8	18
71	中華民國農會休閒綜合農牧場	120.6206	24.32924	3.8	210	8	17
72	宮原眼科	120.6834	24.13781	4.2	40	10	22
73	逢甲夜市_逢甲商園	120.6463	24.17951	4.2	60	16	24
74	南埔鷺鷥林	120.5679	24.35167	3.7	45	0	24

景點 ID	名稱	東經	北緯	效用值	拜訪 時間 (min)	開啟 時間 (hr)	關閉 時間 (hr)
75	大坑風景區	120.7694	24.18978	4.2	120	0	24
76	阿薩斯雕像	120.666	24.14867	4.5	30	0	24
77	臺中市眷村文物館	120.6952	24.16124	4	75	10	17
78	鳳凰山農場	120.7479	24.30642	3.6	120	8	18
79	張家祖廟	120.6221	24.17611	4.2	45	9	17
80	臺中市文昌公廟	120.6386	24.13798	4.7	75	6	22
81	臺中市洲際棒球場	120.684	24.19966	4.8	225	9	18
82	八方國際商城 八方國際觀光夜市	120.7039	24.24539	3.7	40	17	24
83	震災復興紀念碑	120.7491	24.32285	4.2	45	0	24
84	大甲文昌祠	120.6228	24.34776	4.2	75	7	19
85	縱貫鐵路 海線清水車站	120.5692	24.26362	0	30	5	24
86	霧峰落羽杉	120.6871	24.01664	2.4	45	0	24
87	大里老街	120.6773	24.09739	3.9	30	8	23
88	中區再生基地	120.6822	24.13868	4.3	75	9	18
89	霧峰·民生·故事館	120.6927	24.03936	4.4	90	9	17
90	梧棲朝元宮	120.5298	24.25645	4.6	45	8	17
91	廟東夜市	120.7191	24.25157	4.1	40	10	23
92	食水料休閒農業區	120.7894	24.27352	3.8	90	0	24
93	第四信用合作社	120.682	24.139	4.4	90	10	22
94	青桐林生態園區	120.7806	24.05121	4.2	165	0	24
95	河畔藝術街	120.6619	24.15868	4	90	14	22
96	台中市魚市場 哈漁碼頭	120.6228	24.14954	4	50	4	6
97	大魯閣新時代	120.6878	24.13578	4.2	110	11	22
98	國立臺灣美術館	120.6635	24.14094	4.6	120	9	17
99	臺中公園	120.6857	24.14431	4.2	90	0	24