

具時窗多趟次車輛途程問題與委託零擔貨運服務之模式^①

A Mathematical Model for a Multiple Trip Vehicle Routing Problem with Time Window and Outsider Carrier Selection

朱經武 (Ching-Wu Chu)^{②*}、吳朝升 (Chao-Sheng Wu)^③、許秀麗 (Hsiu-Li Hsu)^④

摘要

物流為航運管理重要的一環，如何將貨物由配送中心運送給顧客，是一項很重要的實務問題，因為運輸成本在物流各項成本中所占之比例很高。在實際生活中，由於需求具有波動與不確定性，當顧客需求超過業者所擁有之車隊容量時，業者必須考慮以員工加班運送或將過剩的需求委託零擔貨運運送。本研究以單一配送中心為研究對象，主要研究目的為在配送中心擁有不同車種與面臨需求超載之情境下，建構一整合具時窗多趟次車輛途程與委託零擔貨運服務之整數規劃模式，協助物流管理者解決問題。研究結果顯示，藉由本研究中所建構之整數規劃模式可提供物流管理者對車輛指派更具調度彈性，降低營運成本，增加公司利潤。

關鍵字：車輛途程問題、多趟次、零擔貨運、整數規劃

Abstract

Physical distribution plays an important role in the shipping industry. Considering transportation costs amount for a fifth or even a quarter of the

^① 本研究為科技部專題研究 MOST 105-2410-H-019-005- 之部分內容，作者特別感謝科技部之補助經費。

^{②*} 通訊作者，國立臺灣海洋大學航運管理學系教授；聯絡地址：基隆市 20224 中正區北寧路 2 號，國立臺灣海洋大學航運管理學系，電話：02-24622192 轉 3407；E-mail: cwchu@mail.ntou.edu.tw。

^③ 臺北城市科技大學行銷與流通管理系副教授。

^④ 臺北海洋科技大學海空物流與行銷系副教授。

average sales dollars, the delivery of goods from a depot to local customers is an important and practical problem for logistics managers. In reality, we are facing the fluctuation of demand. When the total demand is greater than the whole capacity of owned trucks, logistics managers may consider adopting a multi-trip strategy or using an outsider carrier. In this study, logistics managers must route a fixed number of trucks with different capacities from a single depot to customers with certain demand while trucks can operate multi trips with time window constraints or logistics managers make a selection of less-than-truckload carriers. The main objective of this study is to develop mathematical model to help logistics managers solving the problem. The results show that the proposed integer programming model can provide more flexible vehicle scheduling for logistics managers, lower operating costs and increase profits for a company.

Keywords: Vehicle routing problem, Multi-trip, Less-than-truckload carrier, Integer programming

壹、前言

由配送中心運送貨物給顧客是物流管理者每日所面臨的決策問題，如何選擇一合適的運輸方式或業者運送貨物對物流管理而言，是一項很重要的決策，因為運輸成本在物流各項成本中所佔之比例很高，除此之外，速度也是一完善物流系統不可或缺的服務，例如目前全球前幾大個人電腦公司 (IBM, DELL) 均努力達到 983 模式，亦即 98% 產品將於下單三日內送達顧客手中。

在每日配送規劃中，車隊的容量是固定。但實際生活中需求具有波動性與不確定性。所以當需求量大於業者本身車隊的容量時 (例如過年或旺季)，倘若時間許

可，物流管理者可請員工加班進行多趟次運送；倘若時間不許可，可考慮將過剩的需求委託零擔貨運運送；當需求小於業者本身車隊容量時，則自行規劃以自有車隊運送即可，不必考量委託零擔貨運運送。

本研究針對上述情境探討如何整合多趟次運送與委託零擔貨運運送，建立一整數規劃模式供業者選擇合適的運輸方式，以節省成本。基本上有兩種運輸方式可供業者選擇，一種是以自有車輛運送，另者是以零擔貨運運送。以自有車輛運送允許以同一車合併許多不同的運送，到達不同的目的地，所以運輸成本通常是行駛距離的函數。為了確保運送能滿足公司的成本與服務之目標，物流管理者需要決定的是合併那些運送在同一車和規劃運送路線。

而車隊的司機，只是去執行物流管理者的運送計畫。

零擔貨運通常分別接受顧客委託，再將不同顧客之貨物併車，其運費通常是與貨物種類、目的地、重量相關。貨運公司，負責規劃每次從運送地至目的地的路線，物流管理者只需將貨物交給他們即可。相較於以自有車或租車運送，零擔貨運之運費較高。市場上常見的新竹貨運、與大榮貨運屬於上述情形。

在上述以自有車輛運送與委託零擔貨運運送的情境下，運銷管理者需要回答二項問題：

1. 車隊的容量足夠時，則以自有車輛運送，此時需規劃如何將不同的貨物合併在同一車及安排一般運送路線及多趟次運送路線並符合顧客之時窗要求。
2. 車隊的容量不足時，貨物是要以
 - (1) 自有車輛多趟次或委託零擔貨運運送；
 - (2) 同時採用自有車輛多趟次運送與委託零擔貨運運送。

理想的狀況下，物流管理者應完整的分析一組運送者，車種分配和路線選擇，進而發展出一運送計畫，也就是最適解 (exact procedure)。不過這項分析將十分複雜，無法藉由工作經驗獲得，因為物流管理者面對的問題，是一多趟次時窗限制車輛途程問題 (Multi Trips Vehicle Routing Problem with Time Windows, MTRVPTW)，

由於 MTRVPTW 的計算複雜度屬於 NP-Hard，解決此一車輛途程問題，需要許多的計算資源，再加上委託零擔貨運運送將使問題更加複雜，建立一整數規劃模式協助物流管理者解決上述問題，實有其必要性。

貳、文獻回顧

2.1 車輛途程問題的基本定義與求解方法

車輛途程問題 (Vehicle Routing Problem, VRP) 可被定義為：「由一個或數個物流中心 (場站)，指派車輛運送貨物給一群已知需求且確知位置的客戶，最後服務完畢後將會再回場站之問題，其中，每位客戶均只能被服務一次，且任一條路線的客戶的需求量總和不得超過行駛該路線車輛的載貨容量。換言之，車輛途程問題是要在已知車輛數與客戶相關資訊的基礎上，為滿足客戶訂單需求條件，求解以決定所需的車輛數目，及各車輛繞行服務客戶的順序。」

依據 Bodin et al. (1983) 之研究，他們將車輛途程問題求解方法大致分為以下七種類型：

1. 分群再排路線 (Cluster First-Route Second)：先將需求點分成幾個群組，然後再對各群組進行途程安排。

2. **先排路線再分群 (Route First-Cluster Second)**：本解法與第一策略方式相反；建構一巡迴所有需求點之最短距離的路線，再依條件限制，將此路線分割為數個較小且獨立的可行解路線，利用此策略來解單一途程問題。
3. **節省法或插入法 (Saving or Insertion)**：在求解的過程中。使用節省成本最大的可行方式並考量各種限制條件以構建路線，直到目標函數值無法再節省為止。另 Mole and Jameson (1976) 將節省值的概念應用於循序路線構造上，以距離物流中心最遠的點當作起始點，再配合鄰點插入法來構建路線。
4. **改善和交換 (Improvement or Exchange)**：本解法乃針對已存在之途程加以改善直到不能改善，Lin and Kwenighan (1973) 提出 K-optimal 法，本是求解 TSP 的一種方法，但經由 Christofides and Eilon (1969) 擴大應用到配送車輛途程規劃的擬定。
5. **數學規劃法 (Mathematical Programming)**：利用數學模式進行最佳化作業，Held and Karp (1962) 使用動態規劃法求解 TSP 的問題。Stewart and Golden (1979)，Christofides et al. (1981) 則應用拉格朗齊鬆弛法 (Lagrangean Relaxation) 於車輛途程規劃問題上。
6. **人機互動法 (Interactive Optimization)**：乃是一種將使用者的直覺、反應及經驗等能力，納入問題求解過程的一般性

解題方法。此種策略使得決策者可在使用電腦系統的規劃階段中，因應真實世界配送網路限制條件之改變做適當的修正，使得最後所得的答案符合真實情況，且因其綜合決策者的直覺、反應及經驗等，配合電腦系統計算快速的優點而求得較合理滿意的解值。

7. **最佳解法 (Exact Procedures)**：最佳解是指目標函數之值在整個可行域中為最有利解。此類方法皆可求得最適解，並可進行敏感度分析。如分支界限法 (Branch and Bound) 及 Miller et al. (1960) 建立整數規劃模式來解決旅行銷售員問題。Christofides et al. (1981) 提出以分枝定界法來求解 VRP 問題；Laporte et al. (1985) 提出應用切面法求解。

2.2 委託零擔貨運服務

探討選擇以自有車輛送貨或委託零擔貨運服務，這類型問題的文獻不多，僅列出較相關論文五篇。Ball et al. (1983) 考慮一車隊送貨問題，外在的貨運運送業者可供選擇。Agarwal (1985) 探討一靜態車隊規劃問題，其中車輛數目有限。在無法滿足顧客需求時，可以考量向外租借車輛或委託貨運公司運送。Klincewicz et al. (1990) 發展一方法規劃車隊，其中顧客的需求為隨機，無法滿足顧客需求時，貨運運送業者亦可供選擇。

Chu (2005) 以單一配送中心為研究對象，考慮不同車種與選擇零擔貨運之車

輛途程問題，研究中首先改良 Clarke 和 Wright 的節省法，接著使用傳統演算做為最佳化法的方法，演算法無論在精確度與效率均表現良好。Hernández and Peeta (2014) 考量零擔貨運業者的協同運輸問題 (Single Carrier Collaboration Problem, SCCP)，研究中採用分支與切割演算法求解，對於中小型的業者而言，這是透過所謂的協做方式 (Co-Load) 搭配出車的策略，目的均是以儘量節省用車空間，降低燃料成本為主。

Wu et al. (2017) 發展一啟發式演算法，在貨物量已知與時窗限制下，快速有效的為配送業者規劃出自有車輛以及使用零擔貨運服務的物流配送選擇方案。研究結果顯示，無論在運算時間或成本最小化，都能快速獲得最佳解或近似最佳解。

2.3 多趟次車輛途程問題

Taillard et al. (1996) 針對多趟次途程規劃問題提出演算法進行求解，演算法可分為三個階段，第一階段利用禁忌搜尋法針對車輛途程問題進行 h 次求解，依據整組解的目標函數給予一個權重，再放入路徑清單中。接著依據權重大小決定被抽取的機率，所選取的路徑與之前選取的路徑如有重複之需求點，則重新抽取，抽選完畢後，利用禁忌搜尋法求解車輛途程問題，將所得路徑給予權重值，利用所得路徑更新路徑清單。第二階段自路徑清單中利用搜尋樹產生 k 組車輛途程問題的解。

第三階段針對第二階段所產生的解，利用裝箱演算法將路徑合併後，最後再從中挑選出最佳解。

Brandao and Mercer (1997) 除了允許車輛進行多趟次的配送外，更考慮允許司機加班、司機有法定休息時間、最大行車時間、卸貨時間等多種情形下建構啟發式演算法求解，個案中包含 45 ~ 70 位顧客、11 輛箱型車與 11 輛拖車。

Petch and Salhi (2004) 建構出三階段的演算法對多趟次車輛途程問題求解。第一階段利用節省法求解 n 次車輛途程問題。每一組解利用裝箱演算法進行路徑合併，再用 2-opt 及 3-opt 改善。2-opt 是一簡易區域搜尋演算法於 1958 年由 Croes 提出、其方法系交換任意兩不相鄰之節線，3-opt 也是一區域搜尋演算法，藉由移除三節線，再將其連結，2-opt 與 3-opt 均為車輛途程問題中廣泛應用之方法。第二階段利用途程切割法求解 n 次車輛途程問題，每一組解再利用裝箱演算法進行路徑合併，再 2-opt 與 3-opt 改善。第三階段則挑出兩個階段中最好的一組解成為多趟次車輛途程問題的解。

Olivera and Viera (2007) 建構的演算法可以分為兩個階段進行求解，第一階段為建構階段，利用掃描法求解，得到一組起始解後，針對改善後的每條路徑設定標籤後更新 Adaptive Memory，Adaptive Memory 演算法首先由 Rochat and Taillard (1995) 提出做為禁忌搜尋之強化版用以解

決車輛途程問題。演算法持續 n 個遞迴後，第一階段結束。第二階段為改善階段利用禁忌搜尋法對起始解進行改善。

最近的文獻，Azi et al. (2014) 探討多趟次車輛途程問題，每輛車可以在其業務期間內執行多趟次任務而每條路線可執行任務時間是有限制的，例如運輸易腐貨物。研究中，假設車隊大小是固定，由於時間限制，它可能無法滿足所有的顧客需求。因此，首要目的是盡可能服務更多位顧客，然後，減少總行駛距離。研究中採用大範圍鄰域搜索、破壞和重建解決問題。經由知名測試題庫的計算結果得知，利用問題階層的性質，無論在顧客、路線或工作日等水準下均獲得不錯結果。

綜合上述文獻，本研究不同於目前所有文獻在於我們同時考慮帶有時間窗的多趟次車輛途程與委託零擔貨運服務，這是整合實際應用之情境，並且補足目前車輛途程研究之缺口。據我們所知，此種情境在文獻中未曾被討論過。除此之外，倘若時間許可，物流管理者可請員工加班進行多趟次運送；倘若時間不許可或出貨量很少，可考慮將過剩的需求委託零擔貨運運送。本研究提出一個數學模型來解決這個問題將可為公司帶來大量的成本節省。本論文之架構如下，下一節建構數學模型，計算結果於第 4 節中呈現。最後，在第 5 節提出結論與建議。

參、整數規劃模式

數學模型之基本假設如下：

1. 考慮單一配送中心；所有的卡車從倉庫出發並回到倉庫。
2. 僅限於送貨。
3. 所有客戶需求為已知且不能超過卡車容量。
4. 每個客戶的時間窗為已知。
5. 卡車被允許多趟次運送。
6. 每條路線均有最大行駛時間限制。
7. 每位客戶均由一輛卡車服務（由自有車輛或委託零擔貨運運送），所有客戶的需求必須被滿足。
8. 經營卡車車隊的成本包含固定成本和變動成本。固定成本中的主要項目包括人員薪資、保險和卡車折舊。變動成本主要項目是燃料成本，其通常與旅行距離成正比。

數學模式中之相關符號與定義如下：

集合、註標與參數：

I ：起點。

D ：終點。

N ：所有需求點的集合。

TN ：所有節點的集合（需求點加上起點與終點）。 $TN \in N \cup \{I, D\}$ 。

R ：車輛工作時間內所執行配送任務的集合。

K ：所有車輛的集合。

i ：顧客 $\{i = 1, 2, \dots, n\}$ ，其中 1 代表配送中心。

j : 顧客 $\{j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

k : 車輛 $\{k = 1, 2, \dots, m\}$ 。

r : 趟次 $\{r = 1, 2, \dots, R\}$ 。

n : 顧客數。

m : 車輛數。

R : 設定最大趟次。

FC_k : 自有車輛 k 的固定成本。

C_{ijk} : 自有車輛 k 從顧客 i 到顧客 j 之間的成本。

CL_i : 貨運公司服務顧客 i 的成本。

q_i : 顧客 i 的需求。

$X_{ijkr} = \begin{cases} 1, & \text{顧客 } i \text{ 至顧客 } j \text{ 的路段, 由車輛 } k \text{ 的第 } r \text{ 趟次配送服務} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

$Y_{ikr} = \begin{cases} 1, & \text{顧客 } i \text{ 由第 } k \text{ 輛車的第 } r \text{ 趟次配送服務} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

$L_i = \begin{cases} 1, & \text{顧客 } i \text{ 委託貨運公司服務} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

T_{ikr} : 車輛 k 第 r 趟次配送任務, 開始服務顧客 i 的時間。

LQ_{ij} : 由顧客 i 出發, 抵達顧客 j 時, 未服務顧客 j 前, 車上的商品數量。

$$\min z = \sum_{k \in K} FC_k \times Y_{1k1} + \sum_{r \in R} \sum_{i \in TN} \sum_{j \in TN} \sum_{k \in K} C_{ijk} \times X_{ijkr} + \sum_{i \in N} CL_i \times L_i$$

Subject to

$$\sum_{k \in K} Y_{1k1} \leq m \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} Y_{ikr} + L_i = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in TN} X_{ijkr} = Y_{ikr} \quad \forall i \in TN, k \in K, r \in R \quad (3)$$

Q_k : 自有車輛 k 的裝載量。

s_i : 服務顧客 i 所需時間。

t_{ij} : 自顧客 i 到顧客 j 車輛途程時間。

e_i : 開始服務顧客 i 之最早時間 (時窗下限)。

l_i : 開始服務顧客 i 之最晚時間 (時窗上限)。

M : 虛擬大數。

T_{\max} : 允許某部卡車之最大行駛時間。

決策變數 :

$$\sum_{j \in TN} X_{jikr} = Y_{ikr} \quad \forall i \in TN, k \in K, r \in R \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} q_i \times Y_{ikr} \leq Q_k \quad \forall k \in K, r \in R \quad (5)$$

$$T_{ikr} + S_i + t_{ij} - M(1 - X_{ijkr}) \leq T_{jkr} \quad \forall i, j \in TN, k \in K, r \in R \quad (6)$$

$$e_j \times \sum_{i \in TN} X_{ijkr} \leq T_{jkr} \leq l_j \times \sum_{i \in TN} X_{ijkr} \quad \forall j \in TN, k \in K, r \in R \quad (7)$$

$$T_{ikr} + S_i + t_{iD} \leq T_{\max} \quad \forall i \in N, k \in K, r \in R \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} X_{1ikr} - \sum_{i \in N} X_{iDkr} = 1 \quad \forall k \in K, r \in R \quad (9)$$

$$\sum_{i \in TN} LQ_{ij} - \sum_{i \in TN} LQ_{ji} = q_j \quad \forall j \in N \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N} LQ_{1j} = \sum_{j \in N} q_j \quad (11)$$

$$0 \leq LQ_{ij} \leq \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} Q_k \times X_{ijk} \quad \forall i, j \in TN \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N} X_{1jkr} \geq \sum_{j \in N} X_{1jkr+1} \quad (13)$$

$\forall k \in K, r \in \{1, 2, \dots, |R| - 1\}$

$$T_{DKr} = T_{1kr+1} \quad (14)$$

$\forall k \in K, r \in \{1, 2, \dots, |R| - 1\}$

$$\forall X_{ijk}, Y_{ikr}, L_i \in \{0, 1\}; T_{ikr}, LQ_{ij} \geq 0$$

此一模式之目標式，是整合使用自有車輛運送或委託貨運公司運送情況下，求取總成本最低為目標。第一、二項分別為自有車輛之固定與變動成本。最後一項為委託貨運公司運送之成本。

限制式 (1) 確保自有車輛可全部派出，派出之車輛數目小於 (或等於) 所有自有車輛數目。

限制式 (2) 確保每一位顧客只派給一輛車的某趟次，無論是使用自有車輛或是零擔貨運服務公司出車。

限制式 (3) 與 (4) 為流量守恆式，確保每一輛車在拜訪過一位顧客後，同時亦會從一位顧客處離開。

限制式 (5) 確保每一輛車所裝載的貨物量，不超過每一輛車的裝載量。

限制式 (6) ~ (8) 為時窗限制式：限制式 (6) 確保服務顧客到達時間之次序。限制式 (7) 確保在顧客 i 所規定的時窗上、

下限內到達。限制式 (8) 一部車之總服務時間應小於 (或等於) 該車允許最大行駛時間。

限制式 (9) 確保車輛執行每一趟的配送任務時，對於起點只會有離開的動作，對於終點只會有進入的動作，對於起點而言，車輛離開起點的次數扣除回到起點的次數限定為一。

限制式 (10) 確保車輛服務完需求點 j 後離開，此時車上的貨物數量應該等於剛進入需求點 j 而未進行服務時的貨物數量 LQ_{ij} 扣除需求點 j 的需求。

限制式 (11) 限制所有從起點時所裝載的商品數量總和要等於所有需求點的需求總和。

限制式 (12) 確保 (a) 限制車輛上的貨物數量不可以小於零，可以確保當車輛上的貨物數量無法滿足某一個需求點的需求時，將不會到該需求點進行服務。(b) 所有車輛必須要遵守裝載限制，車輛上的貨物數量不可以超過車輛的裝載限制。(c) 當車輛行駛節點 i 至節點 j 路段時，從節點 i 至節點 j 才會產生貨物數量的變化，此時需要限制貨物數量的範圍；若是節點 i 至節點 j 路段沒有車輛行駛，此時車上的貨物數量為零。

限制式 (13) 確保車輛 k 只有在第 r 趟次配送任務存在時，第 $r + 1$ 趟次的配送任務才有可能存在。

限制式 (14) 確保對於車輛 k 而言，第 r 趟次配送任務回到終點的時間將成為第 $r + 1$ 趟次配送任務從起點出發的時間。

肆、範例驗證

由於本研究的問題在文獻中未曾被探討過，因此並沒有標準測試題庫可供使用，如文獻回顧 2.2 中所述，Wu et al. (2017) 考慮有時窗限制的車輛途程問題，有效的為配送業者規劃出自有車輛以及使用零擔貨運服務的物流配送選擇方案。本研究同時考慮帶有時間窗的多趟次車輛途

程與委託零擔貨運服務，這是整合實際應用之情境，Wu et al. (2017) 之單趟次運送為本研究多趟次運送之特殊個案，本研究之求解績效自然會比 Wu et al. (2017) 之研究結果更好。因此，本研究依據 Wu et al. (2017) 設計之 40 組測試數據來評估本研究所建構的數學模式。

相關測試資料如表 1 與表 2 所示，表 3 則分別列出來所有測試顧客的座標值、

表 1 五位顧客題組之不同車載容量與相關成本

題組編號	車載容量 (cwt.)	固定成本 (\$)	變動成本 (\$)
1-1	30	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-2	40	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-3	50	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-4	60	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-5	70	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-6	80	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-7	90	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-8	100	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-9	110	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
1-10	120	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-1	30	50	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-2	40	60	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-3	50	70	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-4	60	80	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-5	70	90	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-6	80	100	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-7	90	110	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-8	100	120	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-9	110	130	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
2-10	120	140	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile

註：TL (Truckload)：自有車輛；LTL (Less-than-truckload)：零擔貨運；cwt. (cubic weight tonnage): hundredweight (美為 100 磅，英為 112 磅)。

表 2 十位顧客題組之不同車載容量與相關成本

題組編號	車載容量 (cwt.)	固定成本 (\$)	變動成本 (\$)
3-1	250	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-2	260	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-3	270	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-4	280	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-5	290	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-6	300	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-7	310	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-8	320	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-9	330	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
3-10	340	250	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-1	100, 100	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-2	105, 105	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-3	110, 110	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-4	115, 115	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-5	120, 120	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-6	125, 125	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-7	130, 130	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-8	135, 135	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-9	140, 140	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile
4-10	145, 145	150, 150	TL \$1/per mile, LTL \$5/per mile

註：TL：自有車輛；LTL：零擔貨運；cwt.: hundredweight (美為 100 磅，英為 112 磅)。

顧客時窗限制以及顧客需求，也涵蓋了車輛容量和相關的成本數據。本研究依據第參節建構之數學模式，使用 FORTRAN 程式語言編撰出 LINGO 數學規劃語法並以 2000 MHz 處理器的電腦運算 Wu et al. (2017) 40 個題組，其相關結果呈現於表 4 至表 7。

表 4 提供五位顧客途程總成本與求解時間彙整表，由該表中可以看出，本

研究共有 16 個題組的總成本均提供大量的成本節省，題組 1-4 之成本節省高達 43.27%。除了第 1-9, 1-10, 2-9, 2-10 這四個題組，總成本沒有差異之外，其他 16 個題組的總成本均較單趟次之成本低且求解時間差異不大。

我們進一步組合前述表 1 題組中的所有車輛容量，與表 4 演算成果中的總成本關係，將關係圖繪製如圖 1 與圖 2，可以

表 3 顧客座標與相關需求資料之測試數據

顧客編號	顧客所在 位置座標	顧客需求量	開始服務顧客 之最早時間 (時窗下限)	開始服務顧客 之最晚時間 (時窗上限)	零擔貨運服 務公司服務 顧客的成本
1	(0, 0)	0	0	480	0
2	(11, 6)	11	0	480	62.65
3	(-2, 7)	22	0	480	36.4
4	(23, -5)	16	100	200	117.69
5	(-18, -18)	37	50	250	127.28
6	(-6, -15)	19	100	250	80.78
7	(-22, -5)	46	300	350	112.81
8	(6, -18)	63	400	450	94.87
9	(12, -12)	27	0	480	84.85
10	(-9, 23)	43	0	480	123.49
11	(-13, 16)	36	0	480	103.08

註：座標 (0, 0) 為配送中心；委外運輸成本為依據顧客位置遠近計算；一天以 8 小時 (480 分鐘) 計算，若整天都無時窗限制，則以 (0, 480) 表示。

發現 1-1 至 1-10 題組在車容量與總成本關係上均為趨勢向下的負相關。此圖可以說明當需求大於自有車總容量時，車容量愈大時，則總成本將遞減；同時也說明了，採用自有車運送的容量愈大則成本相對較低，而本文研究主題意在使用多趟次運送減少零擔貨運服務的數量，在此證明得到了確切的效果。

由於採自有車運送的容量與運輸總成本的趨勢向下關係，隨車容量逐漸加大，求解結果將會全部由自有車以三趟次運送 (詳表 5，題組 1-2 至 1-10)。唯值得留意的此一現象有一定限制，主要是受車容量本身的限制，不可能一直加大，除此之外，路徑最大行駛時間亦為一重要限制。

圖 2 可以發現 2-1 至 2-10 題組在車

容量與總成本關係為趨勢先向下，然後再上升。此圖可以說明當需求大於自有車總容量時，車容量愈大時，則總成本將遞減；採用自有車運送的容量愈大則成本相對較低，使用多趟次運送可減省零擔貨運服務之成本。但因固定成本逐步上升，採用多趟次降低之成本無法抵銷增加之固定成本，總成本終將隨之上升。

表 6 提供十位顧客途程總成本與求解時間彙整表，由該表中可以看出，題組 3-1 至 3-10 所執行的測試結果，總成本沒有改善。題組 4-1 至 4-10 這 10 個題組的總成本均提供大量的成本節省，題組 4-2 之成本節省高達 35.53%。其餘各題組之成本節省介於 21.54% 至 31.88 之間，但求解時間大幅增加。

表 4 五位顧客途程總成本與求解時間彙整表

題組編號	單趟次最佳解 *		多趟次最佳解 **		節省 %
	總成本 (\$)	執行時間 (秒)	總成本 (\$)	執行時間 (秒)	
1-1	346.8	1	276.51	小於 1 秒	20.27%
1-2	346.7	1	204.15	小於 1 秒	41.12%
1-3	289.32	1	191.13	1	33.94%
1-4	289.32	1	164.13	2	43.27%
1-5	260.71	1	164.13	2	37.04%
1-6	241.09	1	164.13	2	31.92%
1-7	183.71	1	161.88	2	11.88%
1-8	183.71	1	161.88	2	11.88%
1-9	155.1	1	155.11	2	0.00%
1-10	155.1	1	155.11	2	0.00%
2-1	346.8	1	276.51	小於 1 秒	20.27%
2-2	356.7	1	214.15	小於 1 秒	39.96%
2-3	309.32	1	211.13	1	31.74%
2-4	319.32	1	194.13	2	39.21%
2-5	300.71	1	204.13	2	32.12%
2-6	291.09	1	214.13	2	26.44%
2-7	243.71	1	221.88	2	8.96%
2-8	253.71	1	231.88	3	8.60%
2-9	235.1	1	235.11	3	0.00%
2-10	245.1	1	245.11	3	0.00%

註：* 資料來源 Wu et al. (2017)；** 本研究結果。

表 6 中測試題組 4-1 至 4-10，進一步擴增顧客數達到 10 位且車輛數目增加為兩輛，相較於 Wu et al. (2017) 之求解結果，以兩輛自有車以單趟次與零擔貨運運送，本研究之求解結果全部由一輛自有車以三趟次運送與零擔貨運服務（詳表 7），如此會大幅減少運送成本，但計算時間隨著大幅度的增加，大約四小時。此種長時

間計算，幾乎已無法滿足實務上需求。

以本研究獲得成果而言，測試了 40 組不同的題目，各題組都得到最佳解，也能夠在各種時窗限制條件下，以多趟次運送並挑選出零擔委外服務的顧客。此外，在路徑規劃上都合理配置，在目標式最低成本的整體考量上，整體節省平均值為 17.94% 就降低成本面考量相當令人滿意。

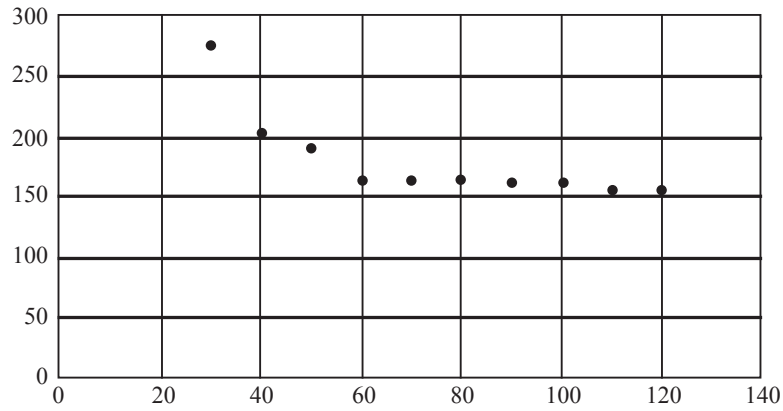


圖 1 題組 1-1 至 1-10 車容量與總成本關係圖

表 5 五位顧客單趟次與多趟次最佳路線規劃彙整表

題組編號	單趟次最佳路線規劃 *	多趟次最佳路線規劃 **
1-1	1- 4- 2- 1 L3, L5 and L6	1-3-7-6-7-4-2-7 L5
1-2	1- 6- 4- 1 L2, L3 and L5	1-5-7-6-4-7-3-2-7
1-3	1- 6- 4- 2- 1 L3 and L5	1-3-7-5-7-2-4-6-7
1-4	1- 6- 4- 2- 1 L3 and L5	1-3-2-4-7-5-6-7
1-5	1- 3- 2- 4- 6- 1 L5	1-4-2-3-7-6-5-7
1-6	1- 4- 6- 5- 1 L2 and L3	1-4-2-3-7-6-5-7
1-7	1- 2- 4- 6- 5- 1 L3	1-3-7-2-4-6-5-7
1-8	1- 2- 4- 6- 5- 1 L3	1-2-4-6-5-7-3-7
1-9	1- 3- 2- 4- 6- 5- 1	1-5-6-4-2-3-7
1-10	1- 3- 2- 4- 6- 5- 1	1-5-6-4-2-3-7
2-1	1- 4- 2- 1 L3, L5 and L6	1-3-7-6-7-4-2-7 L5
2-2	1- 6- 4- 1 L2, L3 and L5	1-5-7-6-4-7-3-2-7
2-3	1- 6- 4- 2- 1 L3 and L5	1-3-7-5-7-2-4-6-7
2-4	1- 6- 4- 2- 1 L3 and L5	1-3-2-4-7-5-6-7
2-5	1- 3- 2- 4- 6- 1 L5	1-4-2-3-7-6-5-7
2-6	1- 4- 6- 5- 1 L2 and L3	1-4-2-3-7-6-5-7
2-7	1- 2- 4- 6- 5- 1 L3	1-3-7-2-4-6-5-7
2-8	1- 2- 4- 6- 5- 1 L3	1-2-4-6-5-7-3-7
2-9	1- 3- 2- 4- 6- 5- 1	1-5-6-4-2-3-7
2-10	1- 3- 2- 4- 6- 5- 1	1-5-6-4-2-3-7

註：* 資料來源 Wu et al. (2017)；** 本研究結果，其中 7 代表多趟次第二次拜訪之配送中心。

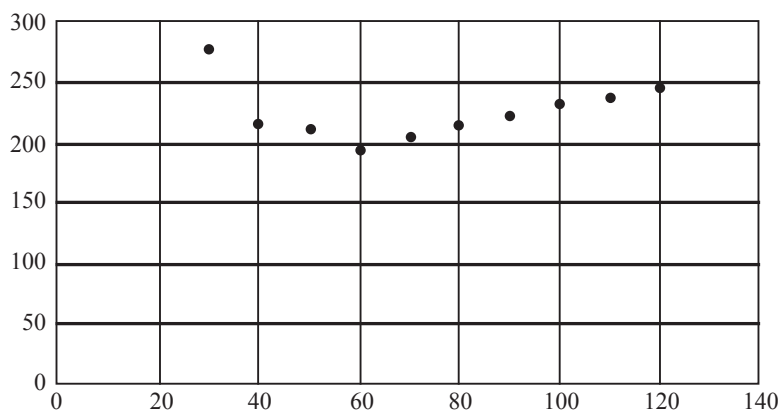


圖 2 題組 2-1 至 2-10 車容量與總成本關係圖

表 6 十位顧客途程總成本與求解時間彙整表

題組編號	單趟次最佳解 *		多趟次最佳解 **		節省 %
	總成本 (\$)	執行時間 (秒)	總成本 (\$)	執行時間 (秒)	
3-1	549.22	131	549.23	2498	0.00%
3-2	512.86	294	512.87	2321	0.00%
3-3	512.86	280	512.87	1950	0.00%
3-4	512.86	292	512.87	2189	0.00%
3-5	512.86	351	512.87	1797	0.00%
3-6	512.86	227	512.87	1896	0.00%
3-7	512.86	284	512.87	2123	0.00%
3-8	512.86	303	512.87	1690	0.00%
3-9	512.86	293	512.87	1741	0.00%
3-10	512.86	301	512.87	1939	0.00%
4-1	704.2	788	498.53	17203	29.21%
4-2	696.28	1352	448.91	16411	35.53%
4-3	659.03	1128	448.91	18085	31.88%
4-4	659.03	1733	448.91	23252	31.88%
4-5	655.46	3031	448.91	7404	31.51%
4-6	607.36	3929	446.29	11882	26.52%
4-7	607.36	4360	446.29	7543	26.52%
4-8	568.81	3483	446.29	13739	21.54%
4-9	568.81	5520	442.27	15173	22.25%
4-10	568.81	8783	442.27	13357	22.25%

註：* 資料來源 Wu et al. (2017)；** 本研究結果。

表 7 十位顧客單趟次與多趟次最佳路線規劃彙整表

題組編號	單趟次最佳路線規劃 *	多趟次最佳路線規劃 **
3-1	1-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L3, L8	1-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L3, L8
3-2	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-3	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-4	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-5	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-6	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-7	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-9	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
3-10	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-1 L8	1-3-10-2-4-9-6-5-7-11-12 L8
4-1	R1 : 1- 5- 6- 9- 4- 1 R2 : 1- 11- 10- 2- 1 L3, L7 and L8	1-10-2-4-9-12-6-5-12-7-11-12 L3 and L8
4-2	R1 : 1- 10- 2- 4- 9- 1 R2 : 1- 6- 5- 7- 1 L3, L8 and L11	1-10-2-4-9-12-6-5-7-12-3-11-12 L8
4-3	R1 : 1- 5- 6- 9- 4- 2- 1 R2 : 1- 3- 10- 11- 1 L7 and L8	1-10-2-4-9-12-6-5-7-12-3-11-12 L8
4-4	R1 : 1- 5- 6- 9- 4- 2- 1 R2 : 1- 11- 10- 3- 1 L7 and L8	1-10-2-4-9-12-6-5-7-12-3-11-12 L8
4-5	R1 : 1- 3- 10- 2- 4- 9- 1 R2 : 1- 5- 7- 11- 1 L6 and L8	1-10-2-4-9-12-6-5-7-12-3-11-12 L8
4-6	R1 : 1- 2- 4- 9- 6- 5- 1 R2 : 1- 7- 11- 10- 1 L3 and L8	1-11-10-2-4-12-6-5-7-3-12-9-12 L8
4-7	R1: 1- 5- 6- 9- 4- 2- 1 R2 : 1- 7- 11- 10- 1 L3 and L8	1-11-10-2-4-12-6-5-7-3-12-9-12 L8
4-8	R1 : 1- 6- 5- 7- 3- 1 R2 : 1- 9- 4- 2- 10- 11- 1 L8	1-11-10-2-4-12-6-5-7-3-12-9-12 L8
4-9	R1 : 1- 6- 5- 7- 3- 1 R2 : 1- 9- 4- 2- 10- 11- 1 L8	1-10-2-4-9-12-6-5-7-11-12-3-12 L8
4-10	R1 : 1- 6- 5- 7- 3- 1 R2 : 1- 9- 4- 2- 10- 11- 1 L8	1-10-2-4-9-12-6-5-7-11-12-3-12 L8

註：* 資料來源 Wu et al. (2017)；** 本研究結果，其中 12 代表多趟次第二次拜訪之配送中心。

伍、結論與建議

物流配送之車輛途程問題在實務上始

終受到重視，本研究建構一整合具時窗多趟次車輛途程與委託零擔貨運服務之整數規劃模式，協助物流管理者解決問題。茲將整個研究結果與建議，敘述如下：

5.1 結論

1. 本研究建構一整合具時窗多趟次車輛途程與委託零擔貨運服務之整數規劃模式，此種情境在文獻中未曾被討論過。研究中並測試了 40 組不同層次的題目，各題組都得到最佳解，也能夠在各種時窗限制條件下，以多趟次運送並挑選出零擔委外服務的顧客。整體而言，在目標式最低成本的考量上，最佳之成本節省高達 43.27%，整體節省平均值為 17.94% 就降低成本面考量相當令人滿意。
2. 因配送車輛途程問題具有 NP-hard 的性質，由本研究發展的整數規劃求解此問題，雖然可獲得最佳解，但是相當耗費時間與人力，僅適用於車輛數目與顧客少的小型問題。

5.2 建議

根據本研究所獲得的結論，茲提出後續研究建議如下：

1. 未來研究方向，可以本研究之整數規劃為基礎，建構 branch and price 數學規劃模式或發展一禁忌搜尋 (Tabu Search) 啟發式演算法，以求解大型問題。
2. 本研究所設定的配送時窗長度僅以八小時為限，然物流實務運作上以 24 小時不間段的配送方式亦有採之，後續研究可以再增加不同的測試時窗以驗證模式實用性。

3. 就零擔貨運服務貨物的選取上，可考慮的是運用租車配送，亦或是考慮與其他業者協作合併貨 (co-load) 方式進行，成為選擇委外運送型態下新的車輛途程問題。

參考文獻

- Agarwal, Y.K., 1985. Vehicle routing with limited fleet and common carrier option, presented at TIMS/ORSA Joint National Meeting, Boston.
- Azi, N., Gendreau, M. and Potvin, J.Y., 2014. An adaptive large neighborhood search for a vehicle routing problem with multiple routes. *Computers & Operations Research*, 41, 167-173.
- Ball, M.O., Golden, A., Assad, A. and Bodin, L.D., 1983. Planning for truck fleet size in the presence of a common-carrier option. *Decision Sciences*, 14, 103-120.
- Bodin, L., Golden, B., Assad, A. and Ball, M., 1983. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers & Operations Research*, 10, 62-212.
- Brandao, J. and Mercer, A., 1997. A Tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 100, 180-191.

- Christofides, N. and Eilon, S., 1969. An algorithm for the vehicle dispatching problems. *Operational Research Quarterly*, 20, 309-318.
- Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P., 1981. Exact algorithms for the vehicles routing problems, based on spanning tree and shortest path relaxations. *Mathematical Programming*, 20, 255-282
- Chu, C.W., 2005. A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem. *European Journal of Operational Research*, 165, 657-667.
- Held, M. and Karp, R.M., 1962. A dynamic programming approach to sequencing problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 10(1), 196-210.
- Hernández, S. and Peeta, S., 2014. A carrier collaboration problem for less-than-truckload carriers: characteristics and carrier collaboration model. *Transportmetrica A: Transport Science*, 10(4), 327-349.
- Klincewicz, J.G., Luss, H. and Pilcher, M.G., 1990. Fleet size planning when outside carrier service are available. *Transportation Science*, 24, 169-182.
- Laporte, G., Nobert, Y. and Desrochers, M., 1985. Optimal routing under capacity and distance restrictions. *Operations research*, 33, 1050-1073.
- Lin, S. and Kernighan, B., 1973. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. *Operational Research*, 21, 498-516.
- Miller, C.E., Tucker, A.W. and Zemlin, R.A., 1960. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM*, 7(4), 326-329.
- Mole, R.H. and Jameson, S.R. 1976. A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion. *Journal of the Operational Research Society*, 27(2), 503-511.
- Olivera, A. and Viera, O., 2007. Adaptive memory programming for the vehicle routing problem with multiple trips. *Computers and Operations Research*, 34, 28-47.
- Petch, R.J. and Salhi, S., 2004. A multi-phase constructive heuristic for the vehicle routing problems with multiple trips. *Discrete Applied Mathematics*, 133, 69-92.
- Rochat, Y. and Taillard, E., 1995. Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. *Journal of Heuristics*, 1, 147-167.
- Stewart, W. and Golden, B. 1979. A vehicle routing algorithm based on generalized lagrange multipliers. In *Proceeding of AIDS 979 Annual Convention* (L. Moore, K. Moore and B. Taylor, eds.), pp. 108-110, New Orleans, USA.
- Taillard, E., Laporte, G. and Gendreau, M., 1996. Vehicle routing problem with multiple use of vehicles. *Journal of the Operational Research Society*, 47, 1065-1070.

Wu, C.S., Chu, C.W. and Hsu, H.L., 2017. A heuristic algorithm of vehicle routing problem with time windows and less-than-truckload carrier selection. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(2), 129-141.