

國立交通大學

運輸與物流管理學系

碩士論文

以無人機配送餐點之最佳化排程問題
Optimal Scheduling For Meal Delivery Services
Using Unmanned Aerial Vehicles

研究生：藍奕丞

指導教授：盧宗成教授

中華民國一〇九年六月

以無人機配送餐點之最佳化排程問題
Optimal Scheduling For Meal Delivery Services
Using Unmanned Aerial Vehicles

研 究 生：藍奕丞

Student : Yi - Cheng Lan

指導教授：盧宗成

Advisor : Chung - Cheng Lu

國立交通大學

運輸與物流管理學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management

College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Traffic and Transportation

June 2020

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇九年六月

論文口試委員會審定書

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 運輸與物流管理學系物流管理碩士班 藍奕丞 君

所提論文 以無人機配送餐點之最佳化排程問題

合於碩士資格水準、業經本委員會評審認可。

口試委員：

盧家成

丁慶榮

顏上堯

指導教授：

盧家成

系主任：

黃明居

中 華 民 國 109 年 6 月 30 日

以無人機配送餐點之最佳化排程問題

學生：藍奕丞

指導教授：盧宗成

國立交通大學運輸與物流管理學系碩士班

摘要

應用無人機於物流配送最後一哩路為未來趨勢，無人機的機動性較高，較不受交通路況所影響，可應用於定期送餐給行動不便之長者；因應近期全球因 COVID-19 疫情所影響，可於發生緊急公共衛生事件減少餐飲外送平台的送貨員與顧客的接觸。本研究針對以無人機配送餐點之排程問題進行建模與求解，此問題考慮一個機隊規模固定的無人機群為連鎖餐廳業者所有，無人機至餐廳取得餐點，並在顧客預約之時間窗內載運餐點前往顧客處，而餐廳也可作為無人機更換電池的基地。本研究應用時空網路流動技巧，考量無人機電池電量限制，建構以無人機配送餐點之最佳化排程模式，目標為最小化總配送成本。由於本研究所建構之模式屬於多場站車輛排程問題，問題規模過大時，模式無法於合理時間內求得最佳解，為了提升大規模問題之求解效率，本研究發展以將無人機隊分解為基礎之啟發式演算法，並應用數學規劃軟體 Gurobi 進行模式求解。本研究以 Solomon Benchmark 之 VRPTW 題庫為基礎，設計不同規模範例進行求解，以測試本研究數學模式正確性及啟發式演算法之績效。根據求解結果，在不同範例中應用啟發式演算法皆能在合理時間內求得品質優良的可行解，啟發解之目標值與 Gurobi 求得之下限解差距皆在 5% 內，說明本研究之數學模式以及啟發式演算法可應用於實務問題求解。本研究結果可提供外送平台及餐廳業者於未來應用無人機配送餐點之排程規劃參考。

關鍵字：無人機、無人機配送、時空網路、排程問題、啟發式演算法

Optimal Scheduling for Meal Delivery Services

Using Unmanned Aerial Vehicles

Student: Yi-Cheng Lan

Advisor: Chung Cheng Lu

Department of Transportation and Logistics Management
National Chiao Tung University

Abstract

This study proposes an optimization model and an algorithm to solve the scheduling problem of unmanned aerial vehicles (UAV) for meal delivery services. This problem considers a fixed size fleet of UAVs owned and operated by a chain restaurant. The UAVs pick up meals from the specified restaurants and deliver orders to customers within designed time windows. These restaurants are also the bases for replacing the batteries for UAVs. This study applies the time-space network flow technique to develop the optimal UAV scheduling model for meal delivery services. The model takes into account the battery capacity constraint of UAVs and aims to minimize the total distribution cost. The proposed model is a multi-depot vehicle scheduling problem, which is characterized as NP-hard. In order to efficiently solve large problem instances, this study develops a math-heuristic, network decomposition by drones, which integrates Gurobi solver to solve the decomposed sub-problems. The model and the algorithm are examined and evaluated using the test instances generated based on Solomon's VRPTW benchmark instances. The heuristic is able to obtain good quality solutions in a reasonable amount of time. The differences between the objective values of the heuristic solutions and those of the lower bounds produced by Gurobi are less than 5% for all the test instances. The results show that the proposed model and the heuristic can be applied to solve the problem instances with practical sizes. The finding of this study can provide a reference on scheduling UAVs to operators who plan to use drones for meal delivery services.

Keywords: UAVs (Drones), UAVs delivery, time-space network, scheduling problem, heuristic algorithm

誌謝

回想起在交通大學的時間過得好快，轉眼間，充實的兩年碩士班生活結束了。剛考上交大的時候懵懵懂懂，對於不適應新竹的生活也逐漸成為半個新竹人。剛入學入住的地方是交大博愛校區，心中總想著這裡離交大光復好遠，而且好安靜，總是有點那麼不習慣，每天早上起床只求外面天氣晴朗不要下雨，這是一種不一樣的感覺。直到碩士二年級，我回歸了光復本校區的懷抱，不需要每天提早起床驅車上學。在兩年的碩士求學生活中，自己遇到了許多朋友以及貴人們的幫助。在 10 樓統艙，運管系就像是一個大家庭，讓我結交了很多一起奮鬥的朋友。面對任何考試的時候，大家都會聚在一起念書，以求得可以克服考題的方法；在製作團體報告的時候，隊友會聚在一起不斷地重複練習只求在報告當天可以說服老師；而在閒暇放鬆的時候也會遇到每天必須面對的問題，那就是「等等要吃什麼？」，摩托車一騎，朋友找一找就前往新竹市區覓食；有時候還會健健身、看看電影，這些回憶依然強烈且深刻。非常謝謝這些好同學、好朋友，族繁不及備載，希望畢業後的我們各奔前程之外，當初所創造屬於交大的每一個回憶也可以烙印在心中。

在這裡，自己非常感謝從剛入學就一直指導我的老師，盧宗成老師。從剛認識老師討論研究方向，到現在，老師都會適時地提供我相當多可以應用在碩士論文中的國內、外相關文獻，而在遇到困難時，老師也會指導我前進的方向以及相關建議，讓自己突破所遇到的難題；偶爾老師也會提供我前往研討會的機會，讓我可以與許多領域中的學者以及同學們進行交流，並在過程中學習以及累積經驗，持續增強可以帶著走的能力。真的非常謝謝老師，老師您辛苦了。在此同時，我也要感謝胡守任老師，在與胡老師導聚以及談話的過程中解開了自己的疑問，讓我獲益良多。

最後，在這裡要謝謝支持我的家人，家人是讓我繼續前進的動力。謝謝我的爸爸以及我的媽媽，在求學過程中任何階段都鼓勵著我前進，遇到困難也會提點我解決的方向。爸爸、媽媽您們供我念書，辛苦了。也謝謝我的姊姊，在學習的過程中都會照顧我，有時候還會互相一起討論課業上遇到的困難以及生活中有趣的事。最後我想謝謝我自己，當初入學時即給自己許下一個期望及目標，自己也順利達成了取得一個碩士學位的成就。期許在下一階段以及未來的過程中，可以繼續加油，向著自己所設定的目標邁進，莫忘初衷。

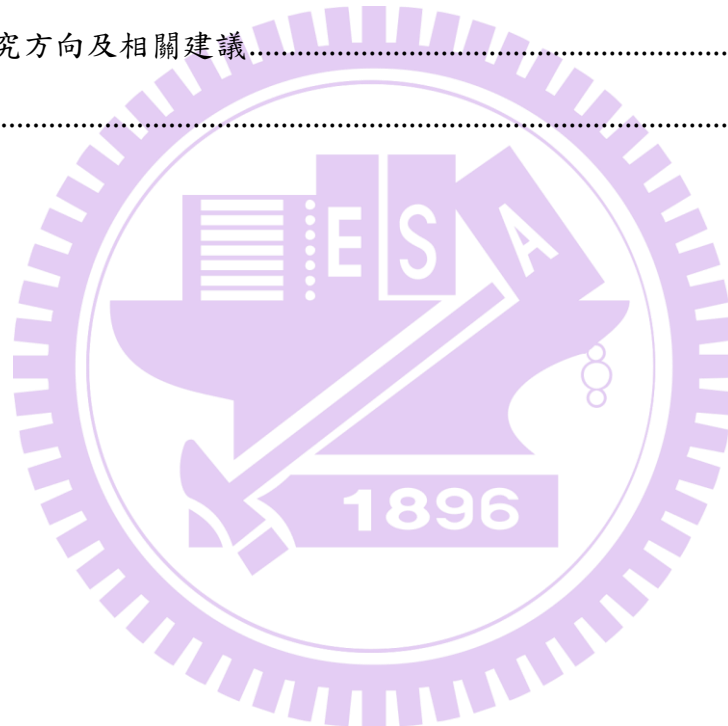
藍奕丞 謹誌
新竹 國立交通大學
2020 年 7 月

目錄

摘要.....	iii
Abstract	iv
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	3
1.3 研究目的.....	5
1.4 研究方法與流程.....	5
第二章 文獻回顧.....	7
2.1 城市物流.....	7
2.2 無人載具於運輸物流領域之應用.....	8
2.3 時空網路相關文獻.....	9
2.3.1 調度排程.....	9
2.3.2 車輛路徑途程問題.....	10
2.3.3 公共運輸系統.....	11
2.4 小結.....	11
第三章 模式建構.....	12
3.1 問題描述.....	12
3.1.1 假設條件.....	13
3.2 無人機時空網路.....	14
3.2.1 連鎖餐廳自用無人機.....	14

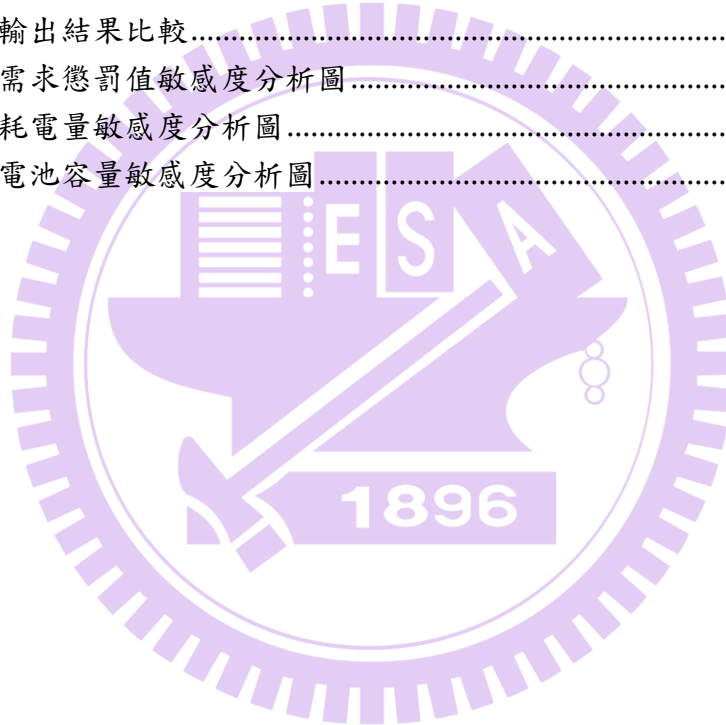
3.2.2 無人機時空網路節點.....	15
3.2.3 無人機時空網路節線.....	16
3.3 無人機最佳化餐點配送排程模式.....	18
3.4 小範例測試.....	21
3.4.1 相關參數設定.....	21
3.4.2 小範例測試結果.....	23
3.4.3 小範例時空網路排程規劃.....	24
3.4.4 小範例餐點配送排程.....	25
3.5 啟發式演算法.....	26
3.5.1 無人機分割法(Network Decomposition by Drones, NDD)	26
3.5.2 演算過程.....	26
3.5.3 演算步驟.....	27
3.6 小結.....	29
第四章 範例測試.....	30
4.1 範例設計.....	30
4.1.1 例題配送網路設計.....	30
4.1.2 無人機配送路網參數設置.....	31
4.1.3 無人機配送成本.....	31
4.1.4 配送排程需求設定.....	31
4.1.5 模式求解作業環境.....	32
4.1.6 求解資料輸出.....	33
4.2 範例測試求解結果.....	34
4.2.1 範例一-Gurobi 與啟發式演算法求解比較.....	34
4.2.2 範例二-Gurobi 與啟發式演算法求解比較.....	36
4.2.3 範例三-Gurobi 與啟發式演算法求解比較.....	38
4.2.4 範例四-Gurobi 與啟發式演算法求解比較.....	40

4.2.5 範例五-Gurobi 與啟發式演算法求解比較	43
4.3 敏感度分析(Sensitivity Analysis)	48
4.3.1 未配送餐點需求懲罰值敏感度分析	48
4.3.2 無人機每公里耗費電量敏感度分析	50
4.3.3 無人機電池容量敏感度分析	52
4.4 小結	53
第五章 結論與建議	54
5.1 研究結論	54
5.2 未來研究方向及相關建議	55
參考文獻	56



圖目錄

圖 1.1 Uber Eats 配送無人機.....	2
圖 1.2 全球外送市場營收總金額.....	3
圖 1.3 無人載具整合研究流程圖.....	6
圖 3.1 連鎖餐廳自用無人機餐點配送模型.....	12
圖 3.2 無人機時空網路.....	14
圖 3.3 無人機-顧客時空網路圖	22
圖 3.4 小範例 UAV 1 排程規劃.....	24
圖 3.5 小範例 UAV 2 排程規劃.....	24
圖 3.6 小範例 UAV 3 排程規劃.....	24
圖 3.7 無人機分割啟發式演算流程.....	28
圖 4.1 大範例輸出結果比較.....	47
圖 4.2 未服務需求懲罰值敏感度分析圖.....	49
圖 4.3 每公里耗電量敏感度分析圖.....	51
圖 4.4 無人機電池容量敏感度分析圖.....	52



表目錄

表 2.1 無人載具配送規劃研究概述.....	9
表 3.1 時空網路節線說明.....	17
表 3.2 小規模問題相關參數.....	21
表 3.3 小範例問題規模.....	22
表 3.4 小範例求解結果.....	23
表 4.1 求解範例概述.....	32
表 4.2 測試範例參數規模.....	32
表 4.3 大範例數學模型規模.....	32
表 4.4 研究作業環境.....	32
表 4.5 資料輸入及結果輸出.....	33
表 4.6 範例一啟發式解法數據結果.....	34
表 4.7 範例一啟發式解法排程規劃.....	34
表 4.8 範例一啟發式單一架/Gurobi 求解比較	35
表 4.9 範例一啟發式多架/Gurobi 求解比較	35
表 4.10 範例二啟發式解法數據結果.....	36
表 4.11 範例二啟發式解法排程規劃.....	36
表 4.12 範例二啟發式單一架/Gurobi 求解比較	37
表 4.13 範例二啟發式多架/Gurobi 求解比較	37
表 4.14 範例三啟發式解法數據結果.....	38
表 4.15 範例三啟發式解法排程規劃.....	38
表 4.16 範例三啟發式單一架/Gurobi 求解比較	39
表 4.17 範例三啟發式多架/Gurobi 求解比較	40
表 4.18 範例四啟發式解法數據結果.....	40
表 4.19 範例四啟發式解法排程規劃.....	41
表 4.20 範例四啟發式單一架/Gurobi 求解比較	42
表 4.21 範例四啟發式多架/Gurobi 求解比較	42
表 4.22 範例五啟發式解法數據結果.....	43
表 4.23 範例五啟發式解法排程規劃.....	43
表 4.24 範例五啟發式單一架/Gurobi 求解比較	45
表 4.25 範例五啟發式多架/Gurobi 求解比較	46
表 4.26 未服務需求懲罰值敏感度分析表.....	48
表 4.27 每公里耗電量敏感度分析表.....	50
表 4.28 無人機電池容量敏感度分析表.....	52

第一章 緒論

1.1 研究背景

現今全球因科技的發展，具有高度效率且可以降低成本的運輸模式都將成為未來發展的趨勢。電子商務及線上商城的興起讓貨運量逐年攀升，且配送模式多元，顧客不需要前往實體店面及可在家取得所需的貨物，其中在近年崛起的就是生鮮食物的配送。

昔日在路上進行食物運送較常見的是速食或是披薩的配送，然而，現在因為外送平台的崛起，許多民眾不需要出門即可取得想要的食物，且外送種類相當地多。國外已有許多配送熱食案例，而在機車密度相當高的台灣也讓業者嗅出一個在未來配送熱食龐大的商機。各外送平台的戰場開始擴展到食物的流通，外送食物平台是否成功，物流成為一個相當重要的關鍵。根據調查(MIC, 2011)，顧客在線上購買商品時，希望商品準時送達的比例為 48.5%，且能配合買家時間者約占 43.4%，佔比相當地高，且因為食物的外送，食用的品質一定是剛做好的時候更加地新鮮，能夠保存的期限相較於一般商品來得較低，高效率配送對於業者來說成為一個相當重要的議題以及研究方向。訂單需求的增長以及需要考慮到路況影響和交通擁塞等因素使配送路線的規劃以及執行逐漸變得複雜，因此有創新的物流模式和運營之需求，使用無人機運送貨物成為最新發展的外送項目之一。然而無人載具並非只應用於外送平台食物的運送中，在緊急情況時亦可應用於緊急醫療及藥物運輸，大幅提升其運輸效率及救援機率。

隨著主流消費人口平均年齡的下降，以及新興科技的成熟應用，多重因素匯集所產生的嶄新經濟文化與價值，於非常短的時間促進餐飲外送平台席捲世界各國。目前全球外送平台產業之經濟規模已超過約一千億美元，未來商機的龐大不言而喻。全球的外送商機讓業者產生更高效率配送模式的議題，現今研發階段已有外送平台將資源投入發展無人載具運輸的研究，以確保在此新興物流競爭環境中領先其他對手。

應用無人載具自動送貨，似乎是電商與物流所預見的未來送貨方式。例如：Amazon 於 2019 年發表其無人車，Scout，正在美國華盛頓進行測試；FedEx 也加入這場無人載具競爭中，將其無人配送機器人 SameDay Bot 投入測試；美國知名外送平台，Postmates，也開發出 Serve 送餐機器人，測試後期望未來能在舊金山投入營運。全球已有許多國家及企業已開始發展無人機配送模式，其中之一即為美國，其地形廣泛，有著大量的別墅類房屋及其庭院，此為產生無人載具物流模式「門前投遞」以及「降落傘式投遞」的基礎之一。美食外送平台 Uber Eats 將首度在高人口密度的市區中，進行其商業化無人機餐點的配送測試。2018 年，Uber 與聖地牙哥市共同贏得美國聯邦航空局(FAA)的無人機整合試驗計劃標案，獲准對其商用無人機送餐服務進行測試，朝無人機送餐服務邁進了一大步，展現外送平台的未來發展樣貌。



圖 1.1 Uber Eats 配送無人機

資料來源：Uber Elevate (2019)

將 Uber Elevate 的創新科技與 Uber Eats 在網絡與物流的專業相互結合，無人機餐點配送服務將為消費者縮短取得餐點的時間並增加更多的美食選項。然而，無人機並不會直接飛到目的地進行「空投」的動作，其由 Elevate Cloud Systems 專屬空域管理系統進行運作，可獨立追蹤和操作無人機的飛行與起、降，餐廳將餐點放置在無人機上並從餐廳起飛之後，Uber Elevate 將通知附近的外送夥伴前往無人機降落點，確保其取得餐點後親自遞送給消費者。Uber Eats 希望未來藉由結合 Uber 駕駛的網路資訊，透過 QR Code 讓無人機能準確且安全地降落在送餐地點附近之 Uber 車頂上，最後由駕駛親自將餐點送到消費者手中。初期有合作餐廳夥伴如麥當勞以及 Juniper 等當地餐廳於聖地牙哥參與 Uber Eats 以無人機送餐的配送模式。由無人機送餐服務所累積的經驗，將對未來 Uber Elevate 在發展空中共乘服務路網建立良好的基礎。

而提到澳洲，Google 專門進行無人機研究及開發的無人機公司，Wing Aviation 於 2019 年獲得澳洲航空管理機構核准，可營運向首都坎培拉居民餐點外送的服務。試營運期間大約達成 3,000 次成功交易，讓澳洲飛航安全單位得以判定無人機外送服務是安全可行的計畫，也是澳洲史上第一次批准無人機外送服務，更讓澳洲擠身世界首批無人機投入商務服務的行列中。然而，這些無人機必須由操作員駕駛，不能完全自動飛行，初步營運範圍約莫 100 戶住家，但在不久後會迅速擴大服務版圖。除了澳洲，印度外送平台 Zomato 也在進行無人機的配送測試。該平台表示無人機在 10 分鐘即內可覆蓋約 5 公里範圍，而且只有採用空中配送才可以實現縮短配送時間的目標。目前已完成無人機的最終設計與測試，雖為完全自動化，但每架無人機目前飛行遠程任務隨時處於監控中，以確保安全。

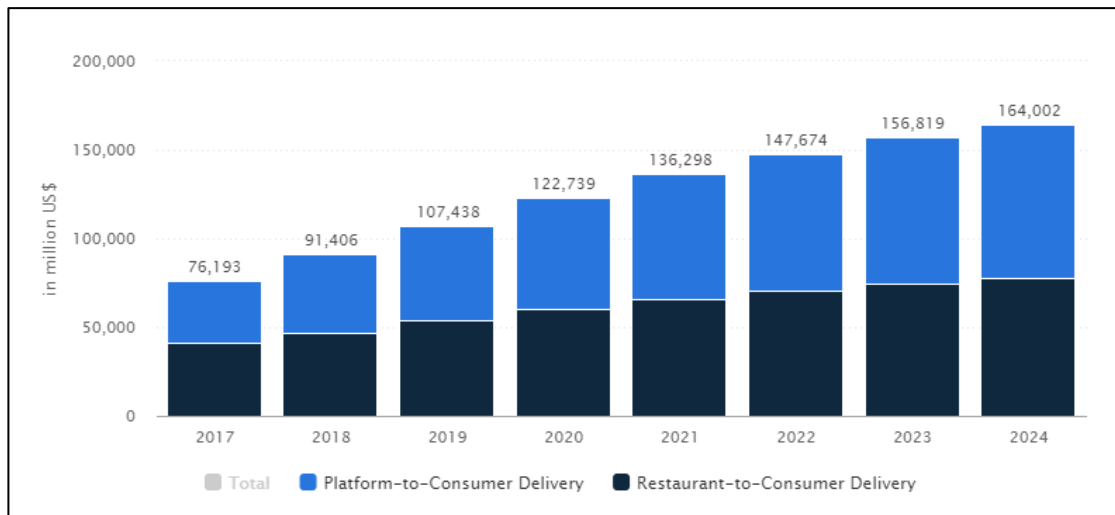


圖 1.2 全球外送市場營收總金額

資料來源：Statista.com (2020)

日本在這場競爭中亦不缺席，其電子商務平台樂天集團已開始將無人機投入配送業務中，更與超市業者進行合作提供第一個日本商業無人機配送服務，由城市倉儲中心將貨物配送至離島。日本商業協會一直以來考慮使用無人機促進旅遊產業，計劃提供登山遊客盒裝便當以及飲用水等物資。樂天集團現階段致力於發展無人機配送物流服務，為日本人力成本的提升以及勞動力短缺等問題提供一個新模式。而在離島以及偏遠地區離島顧客則可更快速且方便地取得貨物，樂天期待未來其無人機專案能普遍在日本都市內進行配送，挑戰商務營運商機。

根據各國無人機配送餐點的發展趨勢，無人機為一個新興物流模式外，已成為外送平台未來所需發展的重點。在充滿競爭的商業環境中，高效率且具成本效益的配送營運模式儼然成為現今外送平台發展之關鍵因素，若可投入平台運作，可縮短將貨物送至顧客手中的時間，而光在時間的花費因素上即可領先其他競爭對手。然而，目前最常見的配送模式依然為車輛運輸，在配送貨物過程中，成本無法降低的因素仍在於道路配送中所產生之成本以及所花費的時間，且人工成本越來越高，無人化或自動化的產業結構於未來勢在必行，所以利用無人載具進行貨物配送已是現在進行式，也是未來新興配送科技的發展趨勢。

1.2 研究動機

將無人機投入商用的市場日漸擴大，目前主要為電子商務以及物流業者等逐漸應用無人機於物流配送最後一哩路。傳統車輛配送貨物時會受交通狀況影響，除了路況壅塞導致配送時間拉長之外，車輛在路上行駛也有交通事故的風險，配送人員也須隨時注意行車安全。從前述的研究背景中可知，目前國外已有餐飲業者使用無人機將餐點配送至顧客，無人機的機動性較高，較不受交通路況所影響，在老人長照中，也可利用無人機定期送餐給行動不便的年長者，且因應近期全球因 COVID-19 疫情所影響，無人機可在發生緊急公共衛生事件時，減少餐飲外送平台的送貨員與顧客的接觸，降低感染發生風險。

在應用無人機於實務餐點配送情境時，因為無人機具有載重限制，每趟運送結束後須返回餐廳進行餐點的裝載，且無人機依靠電池能量進行飛行，電池的電量限制會導致無人機的飛行範圍受到侷限，必須補充電源以執行多趟配送任務。無人機的載重與電池電量限制，導致無法使用單架無人機進行大範圍與大量餐點配送，然而整合多架無人機進行餐點配送將可有助於克服無人機載重與電池電量的限制。本研究將探討應用無人機配送餐點時會遭遇到的配送任務排程問題。其中，無人機為「連鎖餐廳業者」所有，無人機從業者指定的餐廳出發，將餐點配送到顧客指定的地點，而連鎖餐廳具有更換電池的功能，可供無人機補充能源。

本研究整合多架無人機進行配送餐點，實務上在應用多架無人機進行餐點配送的模式中，如何規劃無人機的配送排程是相當重要的課題。然而，目前文獻中較少針對此一配送排程規劃問題進行探討。鑑於以上所述之實務與理論上之研究需求與缺口，本研究將針對使用多架無人機進行餐點配送之排程規劃問題進行系統性地探討與求解。



1.3 研究目的

本研究之研究目的說明如下：

- (1) 界定應用無人機於餐點配送排程問題，針對無人機飛行配送特性、問題求解目標以及各項假設與限制進行深入探討。
- (2) 建構應用無人機於餐點配送排程問題之數學規劃模式，並進行相關例題測試。
- (3) 針對大規模問題發展啟發式演算法進行求解，以期在合理時間求得高品質可行解。
- (4) 探討求解後產生之排程規劃，並進行例題求解結果比較及相關參數敏感度分析。

1.4 研究方法與流程

本研究探討應用無人機於餐點配送排程問題之研究方法及步驟如下，完整研究流程如圖 1.5 所示：

1. 問題定義及研究界定

進行本研究之研究問題進行定義，確認欲求解之範圍，以及說明、敘述所需使用之研究方法與相關研究求解工具。

2. 文獻探討

根據本研究所定義的問題，進行國內、外相關文獻的收集以及回顧。因本研究為規劃排程配送問題，本章將針對「城市物流」、「無人載具應用於物流及運輸」以及「時空網路模型的運輸及物流應用」等相關領域的文獻進行文獻回顧及探討。上述步驟進行後可作為後續建構數學模式以及研究方法建立所須之基礎，提升研究效率。

3. 建構無人機整合配送模式

本研究以時空網路模型進行無人機配送規劃之整合，其中加入電池電量的限制考量，無人機需更換電池之條件，以最小化配送總成本為目標，建構無人機餐點配送排程之最佳化數學模式。

4. 發展啟發式演算法

本研究所探討之問題當規模提升時，以最佳化求解軟體可能無法於合理時間內求得一最佳解。因此本研究亦將發展演算法，針對較大規模的問題進行求解。之後將演算結果與最佳化軟體產生之排程規劃進行比較及分析。

5. 範例測試結果及分析

本研究應用 C++ 程式語言進行程式的撰寫，應用求解最佳化數學模式之數學軟體 Gurobi 進行本研究數學模型之構建與最佳解的求解。透過參考業者實際資料為範例測試數學模型之求解效率，並應用敏感度分析，探討不同參數值對目標值的影響。

6. 結論與建議

彙整求解所得到的結果，包括本研究例題測試及演算法求解結果，並進行分析及提出結論，針對後續美食外送研究發展提出建議。

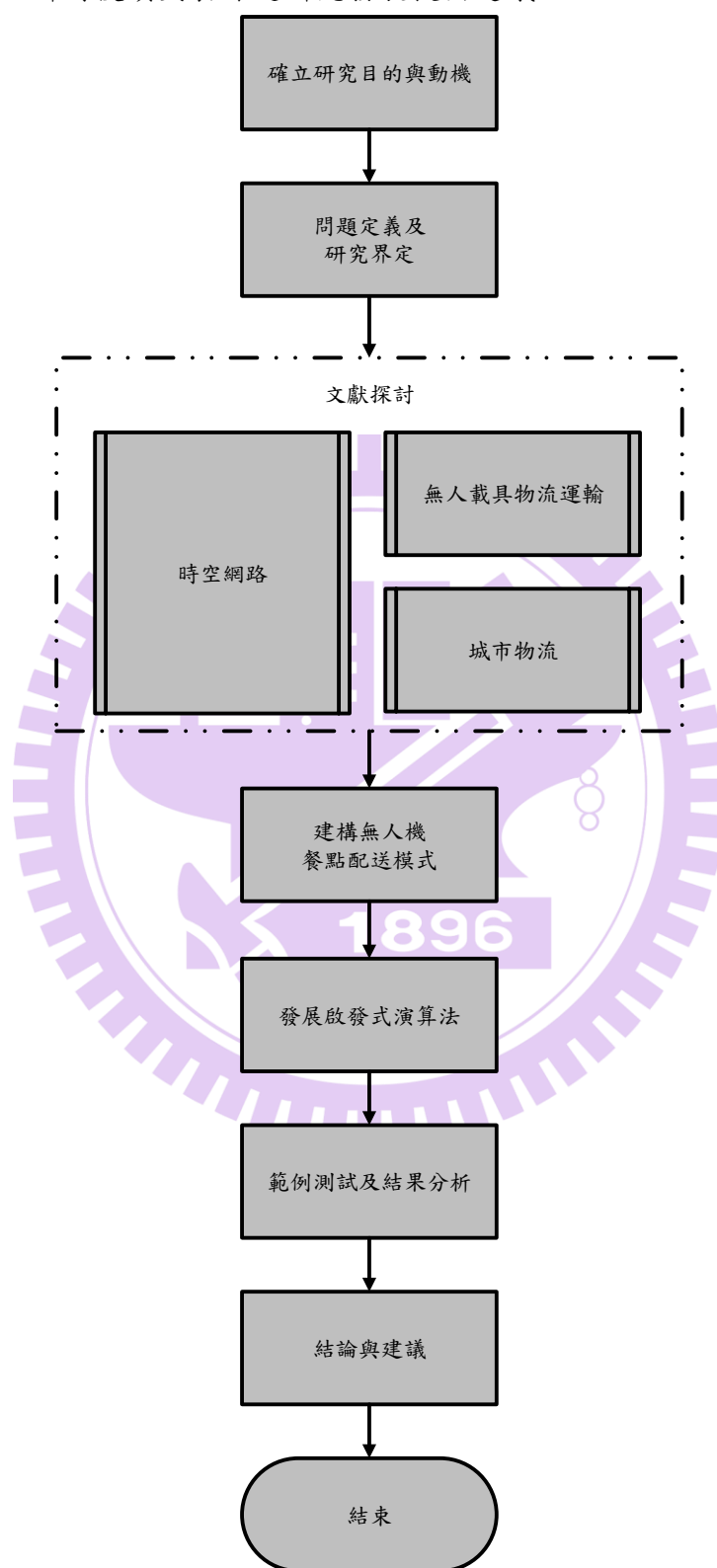


圖 1.3 無人載具整合研究流程圖

圖表製作：藍奕丞(2020)

第二章 文獻回顧

本研究目標為建構一無人機餐點配送規劃排程模式。因外送美食為區域性配送，遂可視為與城市物流具有高度相關性，首先於 2.1 節針對城市物流之文獻進行探討，說明本研究與城市物流之連結；於 2.2 節進行無人載具物流運輸相關之文獻進行探討。將無人載具運輸相應概念進行回顧之後，於 2.3 節回顧本研究建構模式時所運用之時空網路模式研究方法，將無人機時空網路模型進行建構之後，整合多架配送。最後於 2.4 節進行本章文獻探討的小結說明。

2.1 城市物流

Muñuzuri et al. (2005)提出城市物流之概念，現今交通運輸方式多元，相對而來的是全球化趨勢影響，我們生活周遭均是來來往往的車流、人流及物流等。然而，都市中廣大的流動導致小空間中必須容納下相當多的車輛及人口，其可能造成都市擁塞的結果產生。其中物流業所進行的營運模式為將貨品完成最後一哩路配送，途中所會遭遇到相當多因人流以及車流等變數所造成配送任務進而被影響。

Larsen et al. (2012)說明，進行回收資源為任何城市中重要的物流作業，其中，有效率地進行資源回收是作者探討的重點。加入具有時間窗的資源回收車輛，其路徑排程與車輛的成本最佳路徑有關，目的為清空所有垃圾桶，將資源載運到場站，同時遵守客戶時間窗，確保駕駛得到法律限制之休息時間。研究提出了一自適應大鄰域搜索演算法，該演算法可改善丹麥資源回收公司所提供的實際範例，進而表示該演算法之實用性。

Dablanc et al. (2013)研究貨運物流對城市圈的功能。貨運物流會產生許多如空氣污染、交通壅塞、溫室氣體以及噪音等外部效應，全球大部分城市都在尋求管理城市物流及其所帶來衝擊的方法。研究介紹了對城市貨運管理策略所進行的調查結果，目的為檢驗替代策略的有效性。研究將城市貨運策略分為三個類型：最初-最後一哩配送及取貨、友善環境以及貿易節點策略。利用相關認證系統可以更加有效地管理城市物流，獎勵自願減排計畫之業者，規劃土地使用和停車政策，以及更嚴格地控管重型卡車燃油和排放標準等相關政策均可將衝擊降低。

Taniguchi (2014)提出可永續且宜居的城市物流概念。城市物流可發展建立更高效、更環保的城市貨運系統。「資通訊技術(Information and Communication Technology, ICT)」以及「智慧運輸系統(Intelligent Transportation System, ITS)」等創新技術的應用、物流管理者思維方式的改變以及公私伙伴關係可促進城市物流政策的實施。將城市物流管理流程依序分為為計劃、進行、檢查以及執行為一週期的自適應管理系統。

Taniguchi et al. (2014)研究隨著城市面積的擴增以及現今年齡老化問題，老年人需要在家中獲得更多醫療保健。然而，在城市內部運輸配送商品存在許多挑戰。空氣品質也受到城市物流貨運卡車的影響。其研究對城市物流建模的最新趨勢、

條件以及創新進行說明探討。發展與建構在具有環境、醫療保健以及城市開發相關條件的城市物流新技術，並介紹了這些模型的公式，應用以及解決方法。

2.2 無人載具於運輸物流領域之應用

目前許多國家持續地發展及研究將無人載具投入配送營運，相關研究、測試正如火如荼進行中，未來可將其投入營運的國家越來越多，無人載具的時代已經來臨，可視其為一場科學革命。

獲美國 FAA 批准的澳洲新創無人機公司 Flirtey，在美國境內進行多次送貨無人機試飛測試。於 2016 年，Flirtey 與 7-Eleven 集團合作，在美國內華達州進行了更貼近商業運作的無人機宅配模擬測試。其中，實際測試有顧客點選了雞肉三明治、冰品以及熱咖啡等商品，在家中靜待數分鐘即取得了食物。無人機透過 GPS 座標，抵達顧客端之後，在半空懸停將貨物緩緩放下。其中，因這次測試有冰品也有熱飲，為確保食物的品質，送至顧客手中的時間必須縮短，冰品不可融化，熱食不會降溫，遂將無人載具進行測試可模擬未來投入營運時會遭遇的各種狀況，達成美國首次全自動無人機配送測試，顧客不需出門便能經由無人機收取訂購貨件。然而，無人機測試需要事前進行詳細的飛行路線規劃、飛行程序的制定以及相關風險分析，以確保配送覆蓋區中居民的人身安全以及保障個人隱私，無人機送貨首要克服的並非技術問題，而是減少配送覆蓋範圍內居民的疑慮。根據上述實際案例，將無人機投入營運後，各平台的研究及發展依然持續地進行，並改善及優化其性能。遂本節將回顧現今無人載具被應用於物流運輸領域之相關研究。

Murray and Chu (2015)認為原本僅侷限運用在軍事科技領域之無人機系統，現全球將其投入商業、物流等領域並得到廣泛採用。物流業部署無人機是為貨物配送中，進行最後一哩路的最佳化營運模式。目前全球正在進行大量無人載具相關之研究以改進、發展無人機投入營運所需之技術。

Liu (2019)探討現今運輸模式的高度靈活性改變企業競爭模式，連帶導致按需求餐點運送服務於全球產生一個潛在市場。在發展無人機作為運送餐點的新興模式時，無人機機隊規劃是一個相當重要的營運重點。研究發展一混合整數規劃模型，用於無人機隊調度排程之最佳化。在離散時間窗和連續空間內考慮幾何以及移動性，遂允許於任意取餐和送餐位置輸入動態訂單資訊。模型增加了人工目標函數，可於連續時間範圍中有效傳遞系統狀態。

Jeong et al. (2019)說明，相較於最初之研究，其無人機與卡車整合配送加入無人機具有「貨物荷重」以及「禁航區」相關實際配送時會遭遇到之時間及空間飛航限制。其使用卡車作為無人機的行動場站，可選擇性地整合運用這些獨立無人載具之優勢進行運輸任務。透過考量兩個重要的實際限制：載荷重對無人機能源消耗的影響以及飛行區域的限制，將傳統車輛途程問題模型擴展到整合運輸系統。由於電池能源有限，無人機的飛行範圍極易受到載荷重量影響；以及天氣等因素，無人機不得途經敏感設施或暫時飛越某些地區。本研究提出一兩階段架構及啟發式搜索演算法，數據結果證明演算法之效率及效能。根據表 2.1 所示，為研究彙整

之無人載具整合配送路徑規劃研究相關限制及假設條件，其中可以看到作者將載荷限制及禁航區首先加入限制條件中，進而可求得更加趨於現實情況之演算結果。

表 2.1 無人載具配送規劃研究概述

Problem type	Literature	Number of		Parcel Weight	No-Fly Zone	Solution Approach
		Trucks	Drones			
FSTSP-ECNZ	Jeong et al. (2019)	Single	Single	○	○	MILP Heuristic
FSTSP	Murray & Chu (2015)	Single	Single	×	×	MILP Heuristic
	Ferrandez et al. (2016)	Single	Multi.	×	×	GA & K-means
	Ponza (2016)	Single	Single	×	×	SA
	de Freitas & Penna (2018)	Single	Single	×	×	Heuristic
TSP-D	Agatz et al. (2018)	Single	Single	×	×	MILP Heuristic
	Ha et al. (2018)	Single	Single	×	×	MILP Heuristic
HDP	Mathew et al. (2015)	Single	Single	×	×	Reduction to GTSP, TSP Heu.

資料來源：Jeong et al. (2019)

Gonzalez-R et al. (2020)提出相關無人機之實際應用問題，並探討無人機於物流配送中之最後一哩概念。研究考量整合卡車與無人機配送應用，加入無人機具有電池壽命限制，需於匯集點進行充電。且研究發展一基於破壞與重新建構之啟發式貪婪演算法(Greedy Algorithm)，並透過模擬退火演算法(Simulated Annealing)協調求解演算過程。

2.3 時空網路相關文獻

2.3.1 調度排程

Gintner et al. (2005)研究公共運輸巴士產生之多場站與多種車輛類型整合排程問題(Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem, MDVSP)。其研究目的為在考慮實際需求情況下如：多個場站、多種車輛類型以及場站可容車輛容量等，分配公車以覆蓋表定時間表排程。此外，針對公車可能在晚上無法抵達本站點，遂分配其前往其他站點，於早上才開始進行工作等較為現實之研究條件。其目標為求解最小化車隊規模以及總運營成本。為了處理大規模之實際案例，研究提出了一兩階段架構方法，產生接近最佳化的求解結果。

Kliewer et al. (2006)研究公共運輸巴士公司中所產生之車輛排程問題。在考慮到多個場站、多車輛類型以及場站容量等實際需求之基礎上，調度及分配公車以在給定的時間窗內完成運輸任務。其目標為最小化車隊規模以及最小化總運營成本。研究對於 MDVSP (Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem)的模式建立所使用的是基於時空網路而非基於路徑連結之傳統車輛途程問題網路。然而，與發展成熟之基於路徑連結的網路模型相比，其相應的數學模型的求解規模縮小，遂研

究與交通規劃求解軟體「PTV AG」開發者合作發展相關之研究結果。

Yan et al. (2014)研究表示，作業階段的隨機因素，可能會導致緊急公路維修工程的物料物流排程產生重大影響。因此，當實際作業發生隨機干擾可能會失去其最佳化特性。研究採用網路流量技術建構隨機旅行時間下的物流排程模型，且提出了時間不一致的概念，以估計在規劃階段因車輛排程時間的變化而導致的隨機干擾影響。該模型的目標為根據緊急維修工程時間表，在相關作業條件限制下，最小化短期隨機旅行時間內，總物流排程意外損失作業成本。數學模式建構為一混合整數之多商品網路問題，其具有 NP-Hard 之特徵。此外，研究提出了一基於分解問題和變量修復之啟發式演算法。實際測試範例為台灣於 1999 年集集地震之相關數據。測試結果證明所提出的隨機模型以及求解演算法在實際案例中潛在實用性。

Mahmoudi and Zhou (2016)研究說明，按需求運輸系統以及共享乘車服務的最佳化問題為牽涉時間窗(Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery Services with Time Windows, VRPPDTW)的配送及取貨之車輛途程問題。研究首先基於時空網路中車輛載運狀態，提出了一離散時間性之多商品路網模型，進而求解顧客車輛指派以及車輛逐行之整合最佳化。提出三維度網路：狀態-時間-空間網路，可建構車輛時空網路在任何給定時間中可能的運輸狀態，並進一步使用正向動態規劃求解演算法解決單車輛問題，透過拉格朗日鬆弛法將原始多車輛路徑問題進行分解。之後進一步探討許多收縮搜索空間策略，測試演算法效率。

Yuan and Tang (2017)提出一種基於事件的時空網路模型，探討線圈倉庫中的起重機調度問題。調度過程中，起重機應確認處理線圈程序的順序請求以及線圈的移動位置。模型是基於網路所建立，每個節點表示特定階段結束時，倉庫中的位置，每一節線均表示起重機在階段中兩個位置間的移動。為了大規模問題的求解，研究發展一精確動態演算法，基於二分網路中線圈和位置之間的最佳化分配。研究數據結果證明，與傳統模型相比，針對文獻中減少起重機調度問題和標準時空網路模型，該模型較傳統模型更為緊密，而且可以更快速地求解。研究所發展之演算法可於短時間內為大規模實際案例求得品質較佳的解決方案。

Zhang et al. (2019)探討循環火車時間問題，使有限的營運資源同步。透過擴展的時空網路模型，針對雙線鐵路上的循環列車時間問題提出一新興整數規劃模型。將周期性事件調度問題(Periodic Event Scheduling Problem)的數學模型轉換為多商品網路流模型。採用拉格朗日鬆弛法進行建構，對於每個列車的特定子問題，研究發展一動態演算方法，以在多個時間窗內跨時空網路找到與時間相關的最低成本求解結果。

2.3.2 車輛路徑途程問題

Suzuki et al. (2014)針對固定路線車輛加油問題(Fixed-Route Vehicle-Refueling Problem, FRVRP)進行探討，其為卡車運輸業中廣泛被討論的數學規劃問題。FRVRP 針對固定起、迄點路徑求取最佳化加油策略，亦即加油站的拜訪順序以及每次的加油量，以最小化車輛加油成本。研究提出了一種針對 FRVRP 的求解模式，考慮

了始終在油箱中保留一定空間，進而提升燃油經濟性。透過研究結果表明，不僅獲得了更便宜的加油成本，且降低了燃油消耗比。

Murakami (2020)探討應用自動導引車輛(Automated Guided Vehicle, AGV)於製造系統中，應用 AGV 進行原料運輸。研究探討其行駛路徑問題，產生相關排程調度及較低衝突路徑產生之系統。在運送原料的同時為了避免 AGV 相互碰撞以及 AGV 容量等限制，應用時空網路對運送系統進行建模，遂 AGV 運送可視為混合整數線性規劃(Mixed Integer Linear Problem, MILP)。在時空網路中分別考慮了 AGV 以及原料的流動，並產生限制使這些流動同步。實驗結果證明研究所提出的方法可為先前研究中實際案例提供最佳化之解決方案。

2.3.3 公共運輸系統

Lu et al. (2018)探討資源充電區位-路徑規劃問題，其為關鍵資源消耗與充電限制路徑途程問題之一般化。研究提出一最佳化動態基礎設施位置和路徑決策之數學通式，探討鐵路火車頭路徑以及充電問題。研究發展整數線性規劃模式可透過建構多維網路簡化時間窗、資源變化等相關限制。基於拉格朗日鬆弛法的近似求解方案，將問題分解為背包問題，以選擇時空網路中，車頭充電站和車輛路徑途程問題，並透過動態演算法進行最佳解之求解。

Liu and Zhou (2019)發展一框架，系統性地探討公共運輸系統中的多源感測器訊號，並應用線性規劃以及不等式，利用感測系統的數據建構訊號空間。研究代入投影函數進行訊號空間與不同系統狀態間的關係的比較，如：在特定時間間隔內，車輛中的乘客流量或密度，將每一路徑流量作為研究對象。透過時空網路模型中計算其最大可行狀態範圍，進一步量化由狀態估計產生之不確定性表示其相應的可觀察性。研究提出的模型均透過 Dantzig-Wolfe 分解作為線性規劃模型進行求解，並且提出了一種基於 k 最短路徑的近似方法來解決大規模網路中的模型。進行實驗求證研究所提出的方法以及演算。

2.4 小結

針對目前關於無人載具及時空網路等研究文獻之相關回顧，無人載具在未來應用之潛在市場相當龐大，其中，投入貨物及餐點的配送對於物流及外送平台為相當重要之趨勢，目前相關領域的研究持續地在發展進行中，例如：Liu (2019)等。然而，過去研究主要考量無人機飛行路徑規劃，較少將無人機實際配送時會遭遇到的限制加入考量，例如：電池能源的限制、無人機載重負荷等實務配送條件。此外，時空網路模式至今已有許多在物流、車輛路徑以及作業排程等問題成功應用之研究案例，但目前時空網路模型較少投入無人載具配送領域中進行求解，特別是餐點配送；若應用時空網路，其建模之彈性及品質可提升本研究探討應用無人機餐點配送排程規劃問題之求解效率。

第三章 模式建構

本章將針對研究所提出之無人機餐點配送排程規劃模式進行詳細介紹。3.1 節為問題描述，3.2 節為介紹及說明時空網路模型於本研究之應用，3.3 節為本研究所建構之最佳化數學模式，3.4 節為小範例測試，將本研究所設計小範例套入本研究之數學模式，進行最佳化配送排程規劃求解。3.5 節則進行啟發式演算法之說明。3.6 節進行本章節小結說明。

3.1 問題描述

本研究探討將無人機應用於餐點配送之排程規劃問題，將更換電池限制加入無人機配送排程模式，根據實務情境進行餐點配送排程規劃求解。無人機為「連鎖餐廳業者」所有，依據圖 3.1 模型，餐廳業者於起點 D_e 將無人機釋放後，無人機即開始針對區域的顧客進行餐點的配送。若有配送需求產生，無人機會在餐廳及顧客中穿梭進行餐點運送，例如第二架無人機根據配送排程，首先前往餐廳 R_2^1 取餐後，將餐點運送至 C_2^1 ，該架無人機接受的排程規劃為將三個不同餐廳之餐點運送至各個具有需求之顧客點。而第一架無人機則被指派配送兩個顧客需求。因無人機為餐廳所有，無人機除了從餐廳取得餐點之外，餐廳還包含了可對無人機更換電池的功能，所以若電池電量不足以支援任務時，無人機可在其中一間餐廳停下進行能源補充，等到電池更換後即可繼續配送任務，直到所有顧客的需求被滿足。本研究為一 Pickup and Delivery Problem (PDP) 模式，範例模型依據圖 3.1 所示：

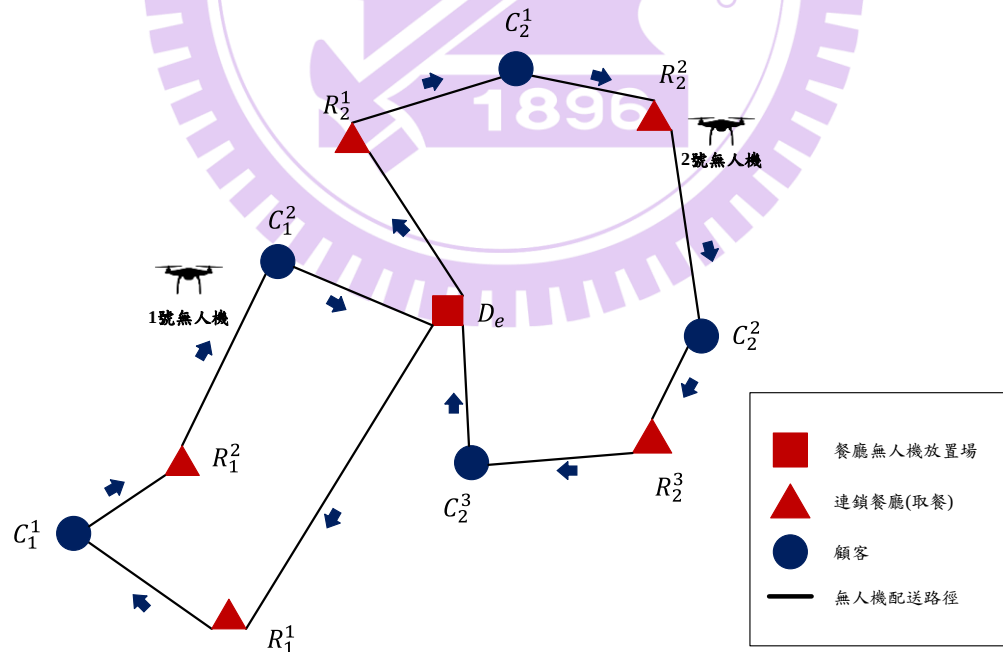


圖 3.1 連鎖餐廳自用無人機餐點配送模型

圖表製作：藍奕丞(2020)

無人機於配送排程規劃中均可透過資訊整合進行控制，其可在餐廳與顧客間來往，若電量剩餘率較低則可選擇其中一間餐廳更換電池，目標為求得最佳無人

機顧客服務排程規劃，並以最少服務成本完成所有需求顧客的餐點配送。

3.1.1 假設條件

本研究提出數項基本假設與限制條件其列舉如下：

供給面

1. 每架無人機的飛行時速相同。
2. 每架無人機可執行多次餐點配送任務。
3. 每架無人機必從起點起飛並最終返回迄點。
無人機起始於餐廳，將所有顧客需求滿足後返回餐廳進行匯合，完成配送任務。
4. 無人機於顧客(需求節點)間往來為直線飛行，包括返回場站、離開場站亦為直線飛行。
無人機較不受地理限制影響，其飛行往來均為直線飛行，增加效率且節省配送時間。
5. 餐廳可同時容納多架無人機。
6. 無人機相關飛行參數為已知常數：
 - I. 貨件裝載時間
 - II. 最大續航時間
 - III. 飛行速度
 - IV. 更換電池時間
 - V. 從飛行高度降落至場站(或交貨點)所需時間
 - VI. 起飛至飛行高度所需時間
 - VII. 顧客服務時間

需求面

1. 每一位顧客之配送需求時間窗為已知
2. 每個顧客(需求節點)座標已知，其需求配送量可由一架無人機進行服務一次後即完成配送。
本研究針對無人機配送進行排程規劃，當無人機起飛時即裝載當下須滿足的餐點需求量，並且服務一次後即可滿足該顧客之需求。
3. 基地之容量包含所有顧客之需求量。
基地(餐廳)可存儲無人機所須運送之餐點總需求量。

3.2 無人機時空網路

3.2 節進行無人機配送之時空網路模型說明。其中，本研究將整合多架無人機進行餐點配送排程規劃，每一層時空網路即表示一架無人機的配送排程。

3.2.1 連鎖餐廳自用無人機

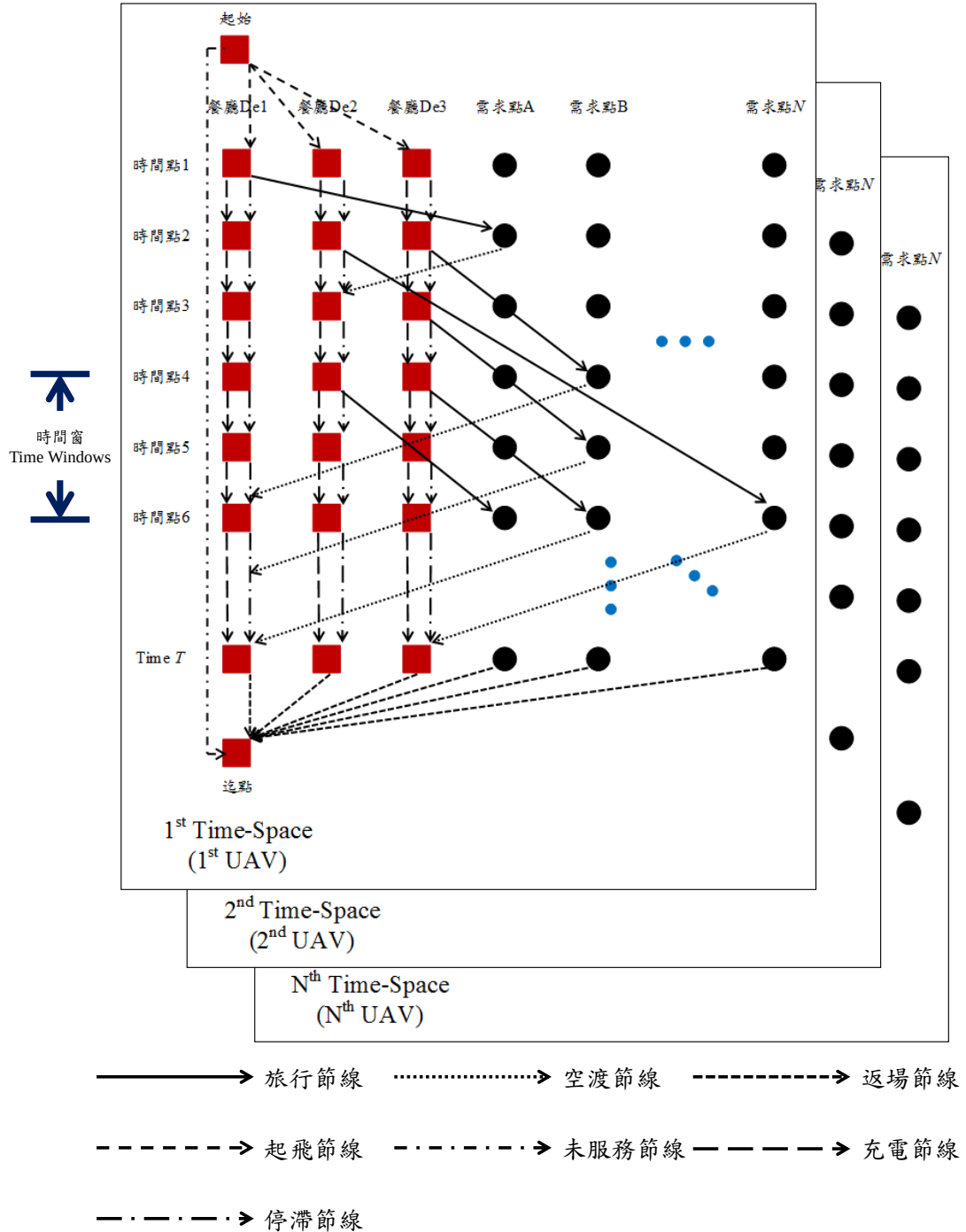


圖 3.2 無人機時空網路

根據圖 3.2 時空網路，無人機為連鎖餐廳所有。從起點起飛之後，可前往餐廳進行取餐，拜訪顧客完成配送。然而，因餐廳使用無人機進行外送，所以各個餐廳除了取貨之外，對於無人機還有更換電池的功能，若無人機電池剩餘電量不夠支援任務時，依據系統最佳化排程該無人機可選擇前往其中一個連鎖餐廳補充能源。每一位顧客均有可取貨的時間窗，若有需求同時只需要一架無人機即可完成該餐點的配送。待所有顧客被無人機拜訪後，無人機即可返回迄點，排程結束。而顧客依據其與餐廳的距離，讓無人機前往離該顧客最近的餐廳進行取餐，縮短顧客等待時間。

3.2.2 無人機時空網路節點

本研究所建構之無人機整合配送時空網路模型，其網路節點具有四種，分別為「起始節點」、「餐廳節點」、「迄點節點」、「需求節點」。各種節點說明依序如下：

1. 起始節點 (Start Node)

起始節點為無人機進行配送任務前所在之無人機放置區。無人機起飛後，先前往其連鎖餐廳取貨進行餐點的配送；若無人機尚未被指派則停留在餐廳中等待接受配送任務。

2. 餐廳節點 (Restaurant Node)

連鎖餐廳於時空網路中即為餐廳節點。無人機由起始節點出發前往餐廳進行取貨，取得餐點之後前往需求點進行餐點的配送。過程中，連鎖餐廳除了提供餐點由無人機配送之外，還包括更換電池功能，可供無人機前往進行能源補充。

3. 迄點節點 (End Node)

連鎖餐廳將所有顧客的餐點交由無人機配送之後，無人機最後需返回無人機放置區，且所有無人機抵達後排程才結束。起始節點以及迄點節點在空間中均屬於連鎖餐廳的無人機放置區，供無人機起降。

4. 需求節點 (Demand Node)

需求節點為顧客所在之地點。無人機由起始節點起飛前往餐廳取餐之後，即前往需求點送餐，其中無人機將餐點配送結束後，需前往其餐廳取餐以繼續進行下一趟配送，直到所有顧客的需求被滿足。

3.2.3 無人機時空網路節線

本研究所建構之無人機時空網路模型中，共有七種節線，分別為「起飛節線」、「返場節線」、「旅行節線」、「換電池節線」、「停滯節線」、「空渡節線」以及「未服務節線」。建構之時空網路模型其節線成本、流量之上限、下限以及消耗電量設計，依序說明如下：

1. 起飛節線 (Launching Arc)

起飛節線為連結流量由起始節點前往餐廳節點之節線。餐廳節點表示連鎖餐廳於空間中的地點。無人機由起始節點出發後，根據指派規劃會先抵達餐廳進行取餐，接著前往顧客需求點進行餐點的配送。節線成本為無人機旅行成本，其中包含電量消耗成本，其中起飛節線之消耗電量為無人機由起始點離開至餐廳所在地點所消耗之電量估計值。起飛節線之成本與消耗電量為一固定正值。流量上限為 1，表示無人機由起始點起飛前往餐廳取貨以進行餐點運送；下限為 0，代表無人機該時間點沒有被指派任務。

2. 返場節線 (Merging Arc)

連鎖餐廳將無人機釋放後進行餐點配送，將所有需求滿足時，無人機必須返回連鎖餐廳之無人機放置區。空間中，迄點為無人機放置區。返場節線為迄點節點連結餐廳節點以及需求節點之節線，根據流量守恒限制，無人機須返回放置區，配送過程才可被視為結束。返場節線消耗電量為一固定正值。返回節線流量上限為 1，表示無人機滿足所有需求並返回放置區；下限為 0，表示無人機未返回放置區。

3. 旅行節線 (Travel Arc)

旅行節線為無人機由連鎖餐廳取貨之後，前往顧客端送餐之節線。在空間中，餐廳節點表示連鎖餐廳之所在位置。流量由餐廳節點流經旅行節線至需求節點，表示無人機正在執行餐點配送任務。旅行節線成本為無人機之旅行成本，包含電量消耗成本以及無人機養護成本。電量消耗為無人機由取餐點移動至送餐點所消耗之估計值，旅行成本為一固定正值。流量上限為 1，表示無人機執行餐點的運送任務；下限為 0，表示無人機沒有執行餐點配送。

4. 換電池節線 (Replacement Arc)

無人機為連鎖餐廳所有，連鎖餐廳除了供無人機取餐之外，也具有更換電池之功能，無人機若有電量需求時須前往餐廳換電池以繼續配送。換電池節線為無人機連結不同時間點下餐廳節點之節線，無人機若處於餐點已裝載，正在配送餐點的狀態時，不允許前往更換電池，優先進行餐點的配送。更換完成後無人機才可根據排程規劃繼續進行餐點的運送。換電池節線之電量消耗為一固定負值，更換之後電量狀態等於電池比例上限值，為 2.46kW。節線流量上限為 1，表示無人機正在更換電池；下限為 0，代表無人機在該時間點沒有電池更換動作。

5. 停滯節線 (Holding Arc)

停滯節線為無人機連結不同時間點下的餐廳節點之節線，因停滯節線僅有時間上的移動，遂無相關電量消耗以及節線成本，成本及耗電量皆為 0。停滯節線流

量上限為 1，說明無人機於該節點某時段進行停留；節線下限為 0，表示無人機在該節點某時段無進行停留。

6. 空渡節線 (Deadhead Arc)

無人機若沒有載運餐點進行飛行，空渡節線則為送餐後無人機從一需求節點連結到餐廳節點之節線。無人機沒有載運貨物，但仍有飛行的動作，遂節線成本為無人機之旅行成本，其為電量消耗成本以及養護成本。節線耗費電量為一固定正值，與旅行路段之距離相關。空渡節線流量上限為 1，說明無人機在未載運餐點的情況下進行飛行；下限為 0，表示無人機未於該時段進行飛行。

7. 未服務節線 (Unused Arc)

無人機若沒有被餐廳指派配送餐點，未服務節線為其連結起始節點及迄點節點之節線，表示無人機停留於餐廳的無人機放置區中。本研究餐點配送排程以最小化總營運成本為主要目標。當無人機被指派進行送餐，若現行顧客需求在最佳化排程被現有指派之無人機所拜訪滿足其需求後，未被指派的無人機則可停留於放置區，以減少不必要的營運成本。該節線電量消耗為 0。流量上限為 1，表示該無人機沒有被指派執行任務；下限為 0，表示該無人機有被指派餐點配送。

各類型時空網路節線彙整如表 3.1 說明：

表 3.1 時空網路節線說明

節線類型	上游節點	下游節點	營運成本	節線電量消耗
起飛節線	起始節點	餐廳節點	折舊成本 旅行成本	正值
返場節線	餐廳節點 需求節點	迄點節點	旅行成本	正值
旅行節線	餐廳節點	需求節點	旅行成本	正值
換電池節線	餐廳節點	餐廳節點	管理成本 (停滯)	負值
停滯節線	餐廳節點	餐廳節點	管理成本 (停滯)	--
空渡節線	需求節點	餐廳節點	旅行成本	正值
未服務節線	起始節點	迄點節點	管理成本	--

3.3 無人機最佳化餐點配送排程模式

本研究為應用時空網路探討無人機進行餐點配送排程，研究所建構之數學最佳化排程模式，目標為最小化總營運成本之求解。本節將分別針對所建構之數學模式集合、相關參數以及決策變數定義依序進行說明。

集合

- U : 無人機集合。無人機數量即為無人機時空網路層數。
- u : 無人機指標或無人機時空網路指標
- i, j : 時空網路中之節點指標

- N^u : 第 u 層無人機時空網路之所有節點集合。
- S^u : 第 u 層無人機時空網路之起始節點集合。
- D^u : 第 u 層無人機時空網路之餐廳節點集合。
- R^u : 第 u 層無人機時空網路之需求點集合。
- F_r^u : 第 u 層無人機時空網路之需求時間節點集合。
- Γ^- : 第 u 層無人機時空網路每節點之上游節點集合。
- Γ^+ : 第 u 層無人機時空網路每節點之下游節點集合。
- E^u : 第 u 層無人機時空網路之迄點節點集合。

- A^u : 第 u 層無人機時空網路之所有節線集合。
- L^u : 第 u 層無人機時空網路之起始節線集合。
- I^u : 第 u 層無人機時空網路之未服務節線集合。
- M^u : 第 u 層無人機時空網路之返場節線集合。

參數

- c_{ij}^u : 第 u 層無人機時空網路中節線 (i, j) 之成本。
- e_{ij}^u : 第 u 層無人機時空網路中節線 (i, j) 之耗電量。
- v^{max} : 無人機剩餘電量比例之預設上限值。
- v^{min} : 無人機剩餘電量比例之預設下限值。
- a_i^u : 第 u 層無人機時空網路中，節點 i 之供給或需求。當 a_i^u 值為1時表示節點 i 屬於 S^u ；其值為-1時表示節點 i 屬於 E^u ；若值為0時則節點 i 屬於 D^u 或 R^u 。
- uns^r : 未服務需求懲罰值

決策變數

$$x_{ij}^u = \begin{cases} 1, & \text{第} u \text{層無人機時空網路中流量經過節線}(i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$z_j^u = \begin{cases} 1, & \text{第} u \text{層無人機時空網路中無人機前往拜訪需求節點} j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$p^r = \begin{cases} 1, & \text{需求} r \text{未被服務} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

v_i^u : 連續變數。表示第 u 層無人機時空網路中，抵達需求點 i 之剩餘電量佔電池總容量之比例。

數學模型

目標式

Minimize

$$\sum_{u \in U} \sum_{(i,j) \in A^u} c_{ij}^u \times x_{ij}^u + \sum_{r \in R^u} uns^r \times p^r \quad (1)$$

限制式

Subject to

$$\sum_{j \in \Gamma_{(i)}^+} x_{ij}^u - \sum_{k \in \Gamma_{(i)}^-} x_{ki}^u = a_i^u \quad \forall u \in U, \forall i \in N^u \quad (2)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{j \in F_r^u} z_j^u + p^r = 1 \quad \forall r \in R^u \quad (3)$$

$$x_{ij}^u \leq z_j^u \quad \forall i \in \Gamma_{(j)}^-, \forall u \in U \quad (4)$$

$$x_{jk}^u \leq z_j^u \quad \forall k \in \Gamma_{(j)}^+, \forall u \in U \quad (5)$$

$$v_i^u = v^{max} \quad \forall i \in S^u, \forall u \in U \quad (6)$$

$$v_i^u - v_j^u + M(1 - x_{ij}^u) \geq e_{ij}^u \quad \forall i, j \in A^u, \forall u \in U \quad (7)$$

$$x_{ij}^u \in \mathbf{B} \quad \forall i, j \in A^u, \forall u \in U \quad (8)$$

$$z_j^u \in \mathbf{B} \quad \forall j \in R^u, \forall u \in U \quad (9)$$

$$p^r \in \mathbf{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall r \in R^u \quad (10)$$

$$v^{min} \leq v_i^u \leq v^{max}, v_i^u \in \mathbf{R}_+ \quad \forall i \in N^u, \forall u \in U \quad (11)$$

- 目標式(1)為最小化無人機總餐點配送成本，包括無人機於配送時所產生之旅行成本與耗電成本；若有顧客沒被服務到，則具有相對應之未服務懲罰成本。
- 限制式(2)確保每層無人機時空網路中，節點及節線均符合流量守恆之限制。
- 限制式(3)確保每位顧客最多由一架無人機服務一次。
- 限制式(4)-(5)表示若節點 j 被無人機 u 拜訪滿足其需求，無人機 u 由餐廳前往需求節點，結束服務後無人機 u 則從需求節點返回餐廳。
- 限制式(6)表示無人機位於基地(放置區)尚未出發時之剩餘電量，其為電量的上限值，代表出發前電量充足。
- 限制式(7)針對無人機時空網路行經各需求後之剩餘電量進行定義，起飛以及返場節線之耗電量為正值，換電池節線之耗電量為負值。
- 限制式(8)定義決策變數 x_{ij}^u 。
- 限制式(9)定義決策變數 z_j^u 。
- 限制式(10)定義決策變數 p^r 。
- 限制式(11)限制無人機於各節點之剩餘電量須介於電池容量之上限、下限之間。

3.4 小範例測試

根據本研究所建構之無人機餐點配送排程數學模式，本節設計一小型範例，用以測試數學模式的正確性，其中求解方式為應用 C++ 程式語言呼叫數學規劃軟體 Gurobi 進行求解，進行數學模式的小範例最佳化排程求解。

3.4.1 相關參數設定

本研究根據無人機配送排程規劃情境，設計一小範例進行模式的正確性測試。假設有 10 個需求點以及 4 個連鎖餐廳供無人機取餐及進行換電池。其中時空網路模型中，需求點的編號為需求點 A、需求點 B 至需求點 J；而餐廳的編號為基地 De1、De2 至 De4。排程規劃的時間為上午 08：00 至 11：10，以每十分鐘為一個時點，其表示節點間的間距(節點密度)，遂共有 20 個時點。無人機架數為連鎖餐廳業者可指派配送的數量，共 3 架投入營運，無人機除了前往餐廳取餐之外，若其有換電池需求，則可前往餐廳進行更換。每一個顧客只需要其中一架無人機拜訪後即可滿足其需求。表 3.2 為小範例情境相關參數。

表 3.2 小規模問題相關參數

	耗電量(mAh)	配送成本(元)
起飛	67	2
旅行	67	2
停滯	0	0
空渡	67	2
換電池	0	0
返場	67	2
未服務	0	0

研究假設配送排程中，每一架無人機之電池剩餘電量上限為 615 mAh，下限為 135 mAh。無人機由起始點起飛時電量消耗為 67 mAh，無人機若被指派進行餐點配送服務，旅行成本為每公里 2 元，飛行返回迄點每公里成本為 2 元，無人機於換電池過程中以及停滯於某一地點，均因沒有飛行的動作，所以沒有成本的花費。

表 3.3 小範例問題規模

無人機時空網路規模	
時空網路層數(無人機架數)	3
時空網路節點數	282
時空網路節線數	1011
數學模型規模	
二元變數數量(B)	1303
連續變數數量	282
流量守恆限制式	1011
服務需求量限制式	282

根據表 3.3 所示，配送週期為每架無人機具有 20 個時點可供排程，時空網路層數為 3 層，表示現行共 3 架無人機可供指派，每一節點均符合流量守恆限制式，對應至每架無人機在每一個時間點電池之剩餘電量，總數為 1011 個，表示配送系統中，無人機在時空網路中可能產生流動之情形；時空網路節點數量表示總服務需求量之限制式，共有 282 個節點。

	0													
1	21	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221	241	261	
2	22	42	62	82	102	122	142	162	182	202	222	242	262	
3	23	43	63	83	103	123	143	163	183	203	223	243	263	
4	24	44	64	84	104	124	144	164	184	204	224	244	264	
5	25	45	65	85	105	125	145	165	185	205	225	245	265	
6	26	46	66	86	106	126	146	166	186	206	226	246	266	
7	27	47	67	87	107	127	147	167	187	207	227	247	267	
8	28	48	68	88	108	128	148	168	188	208	228	248	268	
9	29	49	69	89	109	129	149	169	189	209	229	249	269	
10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	
11	31	51	71	91	111	131	151	171	191	211	231	251	271	
12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	
13	33	53	73	93	113	133	153	173	193	213	233	253	273	
14	34	54	74	94	114	134	154	174	194	214	234	254	274	
15	35	55	75	95	115	135	155	175	195	215	235	255	275	
16	36	56	76	96	116	136	156	176	196	216	236	256	276	
17	37	57	77	97	117	137	157	177	197	217	237	257	277	
18	38	58	78	98	118	138	158	178	198	218	238	258	278	
19	39	59	79	99	119	139	159	179	199	219	239	259	279	
20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	
	281													

圖 3.3 無人機-顧客時空網路圖

圖 3.3 中黃色欄位為測試小範例之時間窗，均為隨機產生之時間窗規劃，無人機必須遵守時間窗進行顧客需求配送。

3.4.2 小範例測試結果

表 3.4 小範例求解結果

連鎖餐廳自用無人機餐點配送		
配送成本	第一架無人機	18 元
	第二架無人機	0 元
	第三架無人機	26 元
無人機需求服務(無人機配置)	第一架無人機	4 個需求
	第二架無人機	0 個需求
	第三架無人機	6 個需求
求解時間	$\leq 1s$	

本研究將所設計之相關參數、節線成本以及需求代入數學模式中，進行模式的測試以及小範例求解。

情境設計 10 個需求點，每一個顧客表示一個需求，無人機須由 4 個連鎖餐廳中取餐配送。根據最佳化排程，第一架被指派拜訪 4 個顧客需求點，營運成本為 18 元；第三架無人機滿足 6 個顧客需求，其營運成本為 26 元。而因為 10 位顧客均已被第一及第三架無人機拜訪，所以第二架無人機沒有被指派進行配送，其配送成本為 0 元。應用三架無人機所求得模式之最小配送總成本為 44 元。

3.4.3 小範例時空網路排程規劃

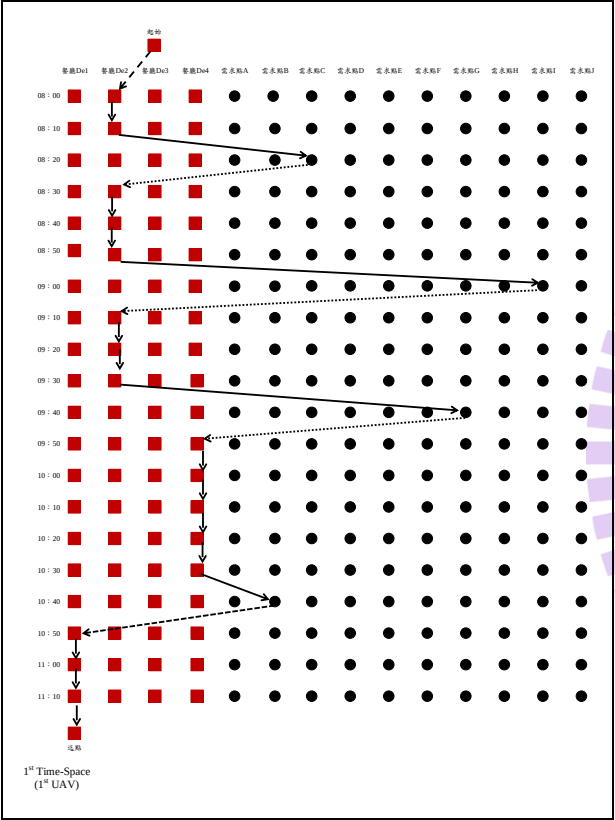


圖 3.4 小範例 UAV 1 排程規劃

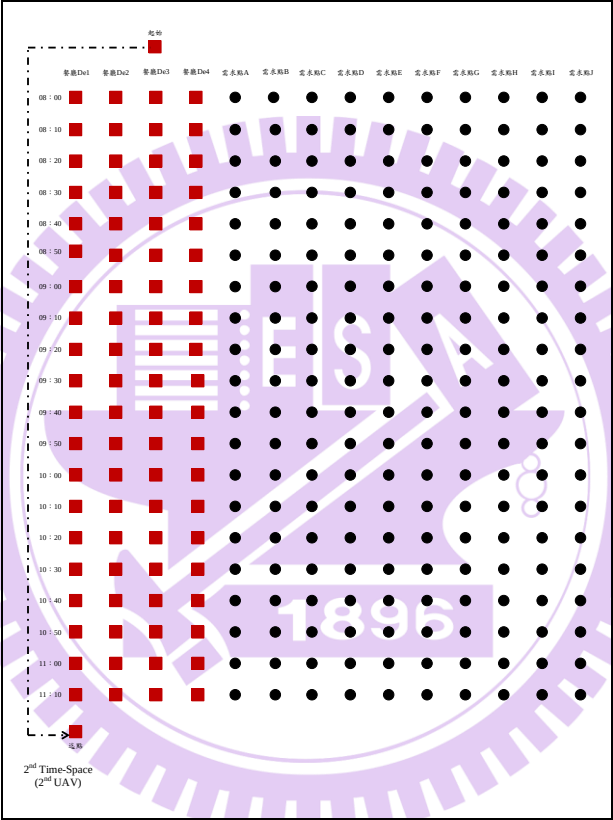


圖 3.5 小範例 UAV 2 排程規劃

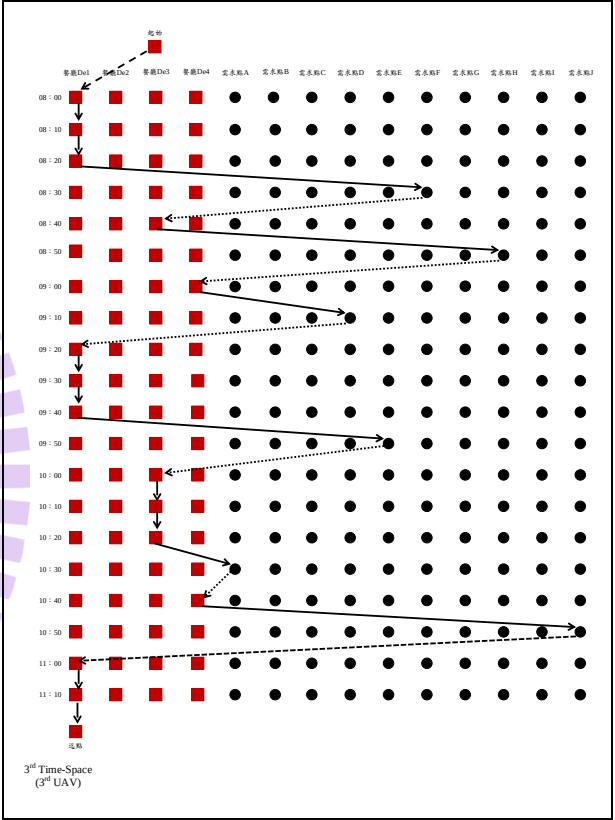


圖 3.6 小範例 UAV 3 排程規劃

3.4.4 小範例餐點配送排程

連鎖餐廳業者投入無人機進行餐點配送。三架無人機於營運開始前均位於餐廳之無人機放置基地中待命配送任務。

第一架無人機從放置區出發，於 08:00 抵達餐廳 De2 進行取餐，取得之後出發前往需求點 C 進行配送，於 08:20 完成顧客 C 的配送需求。之後前往餐廳 De2 取餐，並在 09:00 時拜訪該架無人機的第二個顧客，需求點 I，完成餐點配送，返回 De2 至 09:30 後取餐準備下一位顧客需求服務，遂於 09:40 滿足顧客 G 的需求。09:50 前往 De4 取餐並在 10:40 完成需求點 B 的餐點需求。接著返回 De1 點待命直到配送時間結束，返回放置基地，完成該架無人機所指派之餐點排程規劃。

第三架同時於基地中準備出發，08:00 前往餐廳 De1 取餐，餐點裝載後接著於 08:30 抵達需求點 F，滿足 F 之配送需求。配送結束後前往餐廳 De3 取餐欲進行該架無人機的第二個需求點的拜訪，遂於 08:50 前往拜訪需求點 H，配送完成後抵達 De4 取餐繼續接受調度指派，於 09:10 完成需求點 D 的餐點配送。第三架無人機接著分別在 09:50 完成需求點 E、10:30 前往拜訪需求點 A 以及 10:50 滿足 J 顧客的需求，之後返回 De1 待命直到配送時間結束，返回場站，第三架無人機也完成規劃之配送任務。

小範例情境設計共有 10 位顧客的需求必須被投入的 3 架無人機滿足，第一架以及第三架已被分別指派完成 4 個以及 6 個餐點配送任務，根據數學模式的求解目標，以最小化成本進行餐點配送排程，所以第二架無人機沒有被系統指派，可停留於放置基地中，減少營運成本。根據求解所產生的結果得知，因最小化營運成本之目標，連鎖餐廳不需要將所有投入營運的無人機進行配送排程，且第一架及第三架無人機可完成 10 位顧客需求的滿足，可視為營運方投入配送之無人機架數足夠，運能相當充足。

3.5 啟發式演算法

3.5.1 無人機分割法(Network Decomposition by Drones, NDD)

本研究之數學模式為多場站車輛排程問題(Multiple - Depot Vehicle Scheduling Problem)，為 NP-Hard 問題，當求解規模變大時，無法於有限且合理的時間內求出一個最佳解，遂本研究發展一啟發式演算法，「無人機分割法(Network Decomposition by Drones, NDD)」進行模式的求解，以期在合理的時間中，針對大規模排程規劃問題求得一可行解。本研究無人機分割法為將具有 $|U|$ 層時空網路之大規模主問題進行分割，產生多個縮小規模之子問題，將子問題求解後再將其整合。

3.5.2 演算過程

大規模之主問題具有 $|U|$ 層時空網路，將欲分割之時空網路層數分為 K 個群組。其中， K 組則表示主問題時空網路被分割為 K 個子問題，每一組 U_k 中則有 u_k 層時空網路組成，表示有 u_k 架無人機於群組中進行子問題排程求解。在進行啟發式求解中，每一個子問題群組中無人機架數允許不相同。分割後，演算法每一個迭代即求解一個群組，利用數學規劃軟體 Gurobi 依序對每個子問題進行求解，確定每個群組中無人機配送排程規劃結果。

將主問題分割為 K 個群組後，開始針對第一組，也就是第一個子問題進行求解。本研究以最小化配送成本為求解目標，其中加入懲罰值，目的為針對顧客需求沒有被滿足之狀態，遂模式允許每一個迭代未滿足需求之顧客，將其代入下一個迭代的子問題中進行求解規劃。其中，第一個群組的無人機進行求解之後，產生相對應之已滿足需求服務，此時進行標記，於後續迭代中則不會包含該需求。其他根據排程之未滿足需求則為尚未標記之需求，會於下一個迭代求解時進行排程規劃。然而，每一個求解子問題之迭代均會產生未服務需求相對應之懲罰值，於最後若投入的無人機架數全都指派完成後則會進行扣除，將已服務之需求懲罰值進行消除。

針對每個子問題的迭代求解結束後，所有無人機 U 被指派完成，配送結束，整合後輸出主問題之規劃排程結果。

3.5.3 演算步驟

Step 1. 讀取主問題相關資料

將主問題之相關資料條件輸入系統中，包括無人機配送成本、電量消耗以及相關節線等，以進行排程規劃求解。

Step 2. 輸入問題規模參數

輸入問題規劃求解相關參數，包括無人機架數、時空網路規模、節線數量以及節線類型等。

Step 3. 分割主問題時空網路層

將主問題之時空網路 U 層進行分群，產生 K 個子問題提供模式求解。其中，每一群組(子問題)具有該子問題之無人機架數 u_k 。

Step 4. 演算法迭代：指派無人機排程規劃

子問題 U_k 之無人機進行指派，將已被服務之顧客於節線規模中標記為已服務之需求。

Step 5. 保留未服務顧客需求

已服務之顧客在時空網路中進行標記，未服務顧客進入下一個迭代。

Step 6. 確認無人機排程狀態

確認是否所有子問題的無人機均已被指派服務排程。若所有子問題之無人機已被指派進行服務，進入 Step 7；若還有無人機尚未被指派服務排程，則回到 Step 4。

Step 7. 輸出排程規劃結果

將排程結果輸出，整合所有子問題之結果成為主問題大規模排程配送規劃。

Step 8. 排程結束

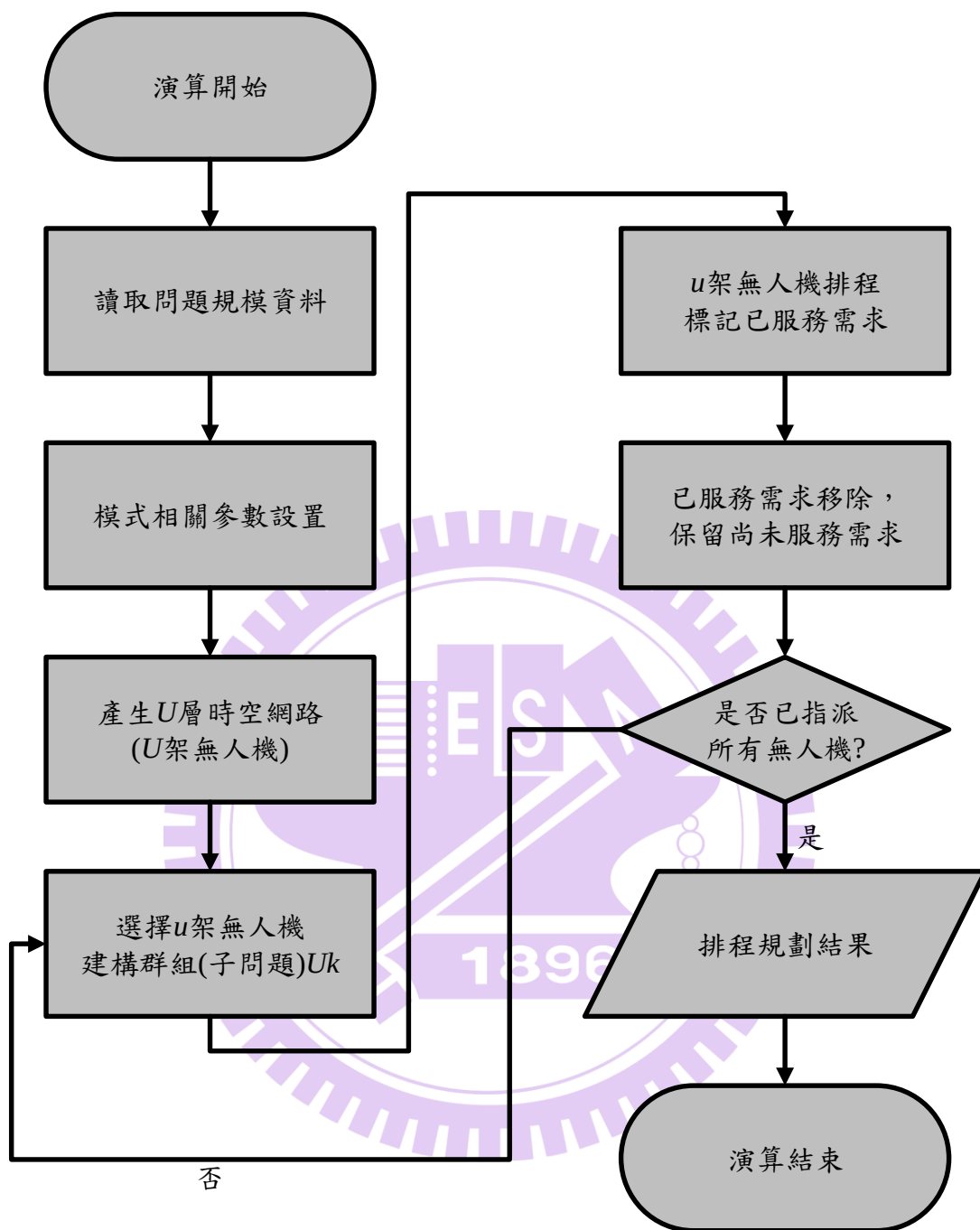
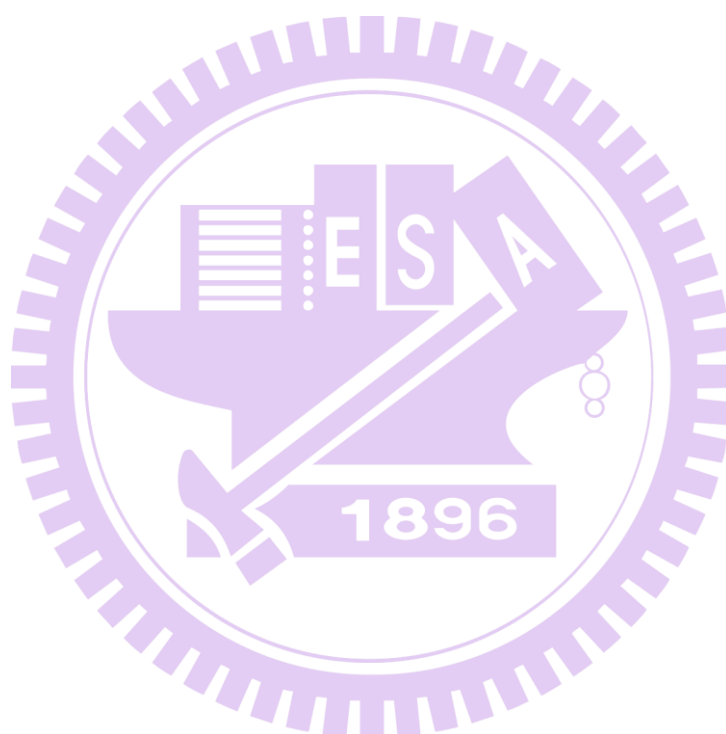


圖 3.7 無人機分割啟發式演算流程

圖表製作：藍奕丞(2020)

3.6 小結

根據本節說明之研究方法，將應用時空網路模式進行本研究無人機餐點配送排程數學模式之測試，驗證是否可將本研究所建構之模式投入實務配送中。若排程問題規模較小可利用模式進行排程規劃；若問題規模提升，數學軟體可能無法在合理且短時間內求出一可行解，所以可將本研究所發展之無人機分割啟發式演算法投入排程規劃，提升求解效率，以期在短時間內求得一品質好的可行解，也較符合實務中配送情形。求解結果希望可以提供外送平台業者或連鎖餐廳業者於未來投入無人機配送之參考，降低配送成本，相對提升利潤。



第四章 範例測試

本研究探討應用無人機於餐點配送排程規劃問題，目標為將多架無人機進行整合指派，最小化連鎖餐廳業者之配送成本，相對提升營運利潤，求出一最佳化餐點配送排程規劃。為進行本研究建構之無人機餐點配送排程模式於實務應用之精確度及績效測試，研究以 Solomon Benchmark 之時間窗車輛路線問題(VRPTW) 標竿例題為求解範例，產生相對應之測試資料，其中包括無人機機隊規模、路網規模、顧客需求數及配送距離等相關參數，共設計五個不同規模之測試例題。本章分為三個小節，其中 4.1 節為測試範例說明，進行相關資料以及參數設定之說明；4.2 節說明範例測試求解之結果；4.3 節則為敏感度分析，探討不同參數對本研究配送規劃模式之影響。4.4 節則進行本章小結整理。

4.1 範例設計

例題測試所需輸入之資料包含無人機於配送路程中所帶動之各種成本值，其中包括旅行成本及停滯成本等，或是配送時可能產生的餐廳及顧客之需求起、迄對，以及電池於配送中之耗電量值以及路網相關資訊。上述資訊均為參考現今商用無人機飛行時之相關參數為本研究設計讀取資料，進行路網規模設計。

每架無人機每單位公里飛行之相關成本如：旅行成本及消耗電量亦可經由計算產生。除旅行成本之外，配送時也包含維護保養成本，無人機起飛配送也會產生固定成本與電池養護成本等。本研究配送路網相關參數設計方式會於本節進行詳細說明。

4.1.1 例題配送網路設計

根據範例中，每一位顧客之座標與 3 個連鎖餐廳產生相對應之配送距離，範例一將隨機從顧客中隨機抽取 20 位顧客供無人機於規劃時程內進行配送服務；範例二則將無人機投入須完成 30 位顧客需求的餐點配送指派；範例三則為無人機須規劃完成配送 40 位顧客規模之餐點需求；範例四無人機須被指派具有 50 位顧客餐點配送規模之排程規劃；以及範例五則有 100 位顧客需求規模須進行配送。

經整理後之資料可得知，每一位顧客與連鎖餐廳平均距離相當接近，且無人機飛行時較不受路面狀況影響，配送速度較普通車輛運送要快，遂將每個時間區間單位設置為 10 分鐘。其中，每一起迄飛行的配送時間為餐廳及顧客之距離除以平均無人機飛行時間計算求得。將所有顧客需求及餐廳相對應之距離進行計算之後，即產生配送時無人機可能飛行之起迄對節線，並根據無人機每車公里產生相關配送成本例如：旅行成本等，以及配送消耗之電池電量。

4.1.2 無人機配送路網參數設置

本研究之無人機平均飛行速度設定為每小時 36 公里，其中相關飛行參數為參考現今投入空拍或是送貨測試之商用無人機，其中數值包括電池電量之上、下限、飛行時速以及飛行每公里消耗之電量等。電池規格方面，從商用無人機飛行資料來看現今投入測試及使用之無人機具有多種電池容量規格，平均最常見的電池容量為 3830 mAh (Dronesplayer.com, 2017)，本研究無人機飛行時速約為每小時 36 公里，載運餐點消耗之電池電量則設定為每公里約 378.329 mAh，而未載運餐點包括從放置區出發以及返回放置區則設定為每公里消耗 302.663 mAh。然而，實務中許多種類的載具在旅行的過程對於能源需求均相同，以汽車為例，若油量較低時不會在油量耗盡時才前往加油，無人機於飛行的過程中亦為如此，因此為了讓無人機電池電量較低時的狀態可以保留電量前往餐廳進行電池更換，本研究將電池剩餘電量之上限設定為容量之 90%，約 3447 mAh；下限值則設置為總電池容量之 15%，即為 575 mAh，於配送的過程中，模式會將旅行時所剩餘的電池電量侷限於設定之電池容量上、下限之間。

4.1.3 無人機配送成本

根據本研究所設計之各項配送時所產生之成本值，其包含無人機營運成本(旅行成本)，以及產生未服務需求時之懲罰成本等，相關成本參數設置將於本小節進行詳細說明：

1. 營運成本(旅行成本)

營運成本為將無人機投入進行餐點配送之變動成本，其為無人機接獲每個餐點訂單所產生之外送費用。現今各外送平台以人工進行配送時，每單餐點約需要產生 50 元薪資外加一筆廣告費用 10 元，給予配送人員，所以比方外送人員接獲三個訂單，則其薪資成本為 $(3 \times 50) + 10 = 160$ (NTD)。然而，無人機的相關成本較人工配送來的低，每個人工配送成本約為 7 至 10 元不等，但是無人機配送可將配送成本價格壓在 2 元以內，約為人工配送之 0.2 至 0.3 倍，相對地低很多，所以本研究將無人機之實務配送成本設置為每公里旅行成本 2 元，加總為配送營運成本。

2. 未服務需求之懲罰成本

本研究進行配送排程規劃時，考量實務配送時之情形。其中，連鎖餐廳中的無人機沒辦法無限擴增，若在投入有限的無人機條件下進行配送，可能會產生顧客需求無法被滿足之情況，需要額外產生一筆懲罰值，需要將未被服務之顧客交由連鎖餐廳中的配送員進行配送，可視為配送員之薪資成本。本研究將每一單未配送餐點之懲罰值設為人工配送成本 10 元，只要產生未服務需求，即必須增加在總配送成本中。

4.1.4 配送排程需求設定

本研究參考 Solomon 之 VRPTW Benchmark – C102 標竿例題，從中取得顧客的資料，包括座標位置以及時間窗。其中座標位置可應用於進行餐廳與顧客的距離計算，時間窗則可得知每一位顧客具有各自屬意的取餐時間，無人機配送時需

遵守時間窗，對顧客進行餐點配送，規劃排程任務。本研究由題庫中隨機取得 20 位、30 位、40 位、50 位以及 100 位顧客之資料進行大規模範例設計，時間軸中設定每一時點間隔為 10 分鐘，無人機須於規劃之配送時程內完成餐點配送。取得顧客位置及時間窗後，每一位顧客之餐點配送時間、需求起、迄點等資訊會根據時空網路的規模進行設計與編碼，並將編碼過後之顧客資料以及相關無人機配送參數等資訊輸入系統供模式進行求解。

本餐點配送排程規劃研究將會針對五種大規模範例進行配送排程規劃之探討，範例規模概述如表 4.1 所示：

表 4.1 求解範例概述

	範例一	範例二	範例三	範例四	範例五
需求數	20 需求	30 需求	40 需求	50 需求	100 需求
無人機指派數	3 架	5 架	5 架	7 架	10 架

將相關顧客資料如：需求數等資訊以及無人機參數如：配送耗電量、營運成本以及電池容量之上、下限值等輸入無人機配送餐點排程模式之後，各種規模範例之無人機時空網路規模與數學模型規模根據表 4.2 以及表 4.3 所示。

表 4.2 測試範例參數規模

無人機時空網路規模	範例一	範例二	範例三	範例四	範例五
時空網路層數(架數)	3	5	5	7	10
時空網路節點數	508	728	948	1168	2268
時空網路節線數	1193	1729	2523	3161	6279

表 4.3 大範例數學模型規模

數學模型規模	範例一	範例二	範例三	範例四	範例五
二元變數數量(B)	1721	2487	3511	4379	8647
連續變數數量	508	728	948	1168	2268
流量守恒限制式	508	728	948	1168	2268
服務需求量限制式	1193	1729	2523	3161	6279
更換電池電量限制式	66	66	66	66	66

4.1.5 模式求解作業環境

表 4.4 研究作業環境

項目	型態
作業系統	Microsoft Window 10
CPU	Intel(R) Core(TM) i7 - 7700 CPU @ 3.60 GHz 3.60 GHz
記憶體 RAM	16.0 GB
程式語言	Microsoft Visual Studio 2017 C++

本研究應用 Microsoft Wondow 10 為求解環境，並透過 Microsoft Visual Studio C++進行數學規劃軟體 Gurobi 的程式語言撰寫，求解排程規劃問題。

4.1.6 求解資料輸出

表 4.5 資料輸入及結果輸出

輸入讀取	輸出結果
時空網路路網規模	求解時間
顧客需求資訊	目標值
顧客距離	每一架無人機執行需求配送量
無人機機隊規模	配送成本
無人機電量消耗	無人機更換電池資訊
各項配送成本值	配送排程規劃結果

根據表 4.5，相關顧客資料、無人機機隊參數以及時空網路規模均會輸入系統供模式讀取求解，而輸出結果為目標式值及排程規劃等相關資訊。

註：與 Gurobi 下限值差距%(GAP)=[(求解最佳解-下限值)/求解下限值]×100%



4.2 範例測試求解結果

4.2.1 範例一-Gurobi 與啟發式演算法求解比較

根據應用數學規劃軟體 Gurobi 求解之結果，大規模餐點配送環境無法於合理且有限時間內求得一最佳可行解。4.2.1 至 4.2.5 節將應用 3.5 節介紹及說明之啟發式演算法-無人機分割法，針對每一個大規模範例情境進行求解演算，以期在實務配送環境中，可在合理的時間內求得一最佳解。啟發式將會針對多架結果以及單一架與 Gurobi 結果進行比較及探討。

範例一為連鎖餐廳業者投入 3 架無人機進行 20 個顧客訂單之配送。模式須從早上 09：00 至 12：30 規劃時程中將所有無人機指派完成。本研究應用 NDD 啟發式演算法將 3 架無人機分割為 2 個群組(子問題)，第一個群組 2 架，第二個群組則為剩餘未指派 1 架，進行 20 個顧客餐點需求之配送排程規劃。

表 4.6 範例一啟發式解法數據結果

範例一	迭代一	迭代二
求解時間	93.182 秒	0.215 秒
最佳解目標值	66.0	14.0
已服務需求	15 個	3 個

表 4.7 範例一啟發式解法排程規劃

迭代一	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 1	34 元	顧客 14 (09：10)	10：00
		顧客 15 (09：30)	10：10
		顧客 12 (09：50)	10：40
		顧客 3 (10：30)	
		顧客 19 (11：00)	
		顧客 18 (11：20)	
		顧客 4 (11：40)	
		顧客 17 (12：00)	
UAV 2	32 元	顧客 10 (09：10)	10：00
		顧客 5 (09：30)	10：40
		顧客 16 (09：50)	
		顧客 6 (10：20)	
		顧客 1 (11：00)	
		顧客 2 (11：20)	
		顧客 9 (11：50)	

迭代二	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 3	14 元	顧客 20 (09：10)	09：20
		顧客 7 (09：50)	09：30
		顧客 8 (10：10)	

- 已完成餐點配送之需求數：18 單
- 未完成餐點配送之需求數：2 單(顧客 11、顧客 13)
- 總配送成本：100 元

表 4.8 範例一啟發式單一架/Gurobi 求解比較

範例一	啟發式演算 (單一架)	Gurobi
求解時間	2.97 秒	24.7 秒
最佳解目標值	96.0	96.0
配送成本	86	86
懲罰成本	10	10
已服務餐點需求	19 個	19 個
未服務餐點需求	1 個	1 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	0.00%	0.00%

表 4.9 範例一啟發式多架/Gurobi 求解比較

範例一	啟發式演算 (多架)	Gurobi
求解時間	93.4 秒	24.7 秒
最佳解目標值	100.0	96.0
配送成本	80	86
懲罰成本	20	10
已服務餐點需求	18 個	19 個
未服務餐點需求	2 個	1 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	4.17%	0.00%

範例一之規模為投入 3 架無人機進行 20 個顧客的餐點配送規劃，應用 NDD 啟發式解法分割為兩個群組，第一個群組分割 2 架無人機，第二個群組則為剩餘未分割 1 架。其中群組一先指派 2 架無人機產生配送 20 個餐點之排程規劃，所花費的時間較長，之後群組二指派 1 架無人機因為規模的縮小，求解所花費的時間在 1 秒以內。根據表 4.8 及表 4.9 所示，Gurobi 之求解差距(GAP)約為 0.00%，而啟發式求解結果之下限值差距約為 4.17%，範例一與其他範例比較相對規模較小，無人機服務 18 個需求較 Gurobi 求解少服務 1 個顧客，懲罰值相對於配送成本提升較顯著。範例一同時應用 Gurobi 以及啟發式演算法進行求解均可得到最佳解，Gurobi 所花費的時間較長約 25 秒，表示其可於合理的時間內求得一最佳解。因範例一之規模較小，若有未服務需求所產生之懲罰值會影響配送成本較顯著。

範例規模提升後，因每群組分割多架無人機進行排程會產生較長求解時間，

因此每個迭代停止標準設定為差距(GAP)控制於 3%以內即可停止。

4.2.2 範例二-Gurobi 與啟發式演算法求解比較

範例二為連鎖餐廳投入 5 架無人機進行 30 個顧客訂單之配送，須從早上 09：00 至中午 12：30 規劃時程中將所有無人機指派完成。本研究應用 NDD 啟發式演算法將 5 架無人機分割為三個群組，第一群分割 2 架、第二群也分配 2 架以及第三群組分配剩餘 1 架無人機進行餐點配送。

表 4.10 範例二啟發式解法數據結果

範例二	迭代一	迭代二	迭代三
求解時間	1.68 秒	0.83 秒	0.329 秒
最佳解目標值	70.0	56.0	24.0
已服務需求	16 個	8 個	3 個

表 4.11 範例二啟發式解法排程規劃

迭代一	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 1	34 元	顧客 28 (09：10)	10：00
		顧客 27 (09：30)	10：30
		顧客 16 (09：50)	
		顧客 4 (10：20)	
		顧客 30 (10：50)	
		顧客 9 (11：10)	
		顧客 14 (11：30)	
		顧客 17 (11：50)	
UAV 2	36 元	顧客 8 (09：10)	10：00
		顧客 6 (09：30)	11：10
		顧客 2 (09：50)	
		顧客 3 (10：20)	
		顧客 7 (10：40)	
		顧客 10 (11：00)	
		顧客 11 (11：30)	
		顧客 24 (12：00)	

迭代二	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 3	28 元	顧客 20 (09 : 20)	09 : 40
		顧客 1 (10 : 10)	09 : 50
		顧客 19 (10 : 40)	11 : 30
		顧客 23 (12 : 00)	
UAV 4	28 元	顧客 5 (09 : 30)	09 : 00
		顧客 15 (10 : 10)	09 : 10
		顧客 22 (11 : 00)	09 : 40
		顧客 26 (12 : 00)	11 : 30
迭代三	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 5	24 元	顧客 18 (09 : 20)	09 : 40
		顧客 12 (10 : 10)	
		顧客 21 (10 : 50)	

- 已完成餐點配送之需求數：27 單
- 未完成餐點配送之需求數：3 單(顧客 13、顧客 25 及顧客 29)
- 總配送成本：180 元

表 4.12 範例二啟發式單一架/Gurobi 求解比較

範例二	啟發式演算 (單一架)	Gurobi
求解時間	3.90 秒	3601.64 秒
最佳解目標值	180.0	176.0
配送成本	150	156
懲罰成本	30	20
已服務餐點需求	27 個	28 個
未服務餐點需求	3 個	2 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	3.45%	1.14%

表 4.13 範例二啟發式多架/Gurobi 求解比較

範例二	啟發式演算 (多架)	Gurobi
求解時間	2.84 秒	3601.64 秒
最佳解目標值	180.0	176.0
配送成本	150	156
懲罰成本	30	20
已服務餐點需求	27 個	28 個
未服務餐點需求	3 個	2 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	3.45%	1.14%

範例二之排程規劃規模為 5 架無人機配送 30 個餐點需求，Gurobi 無法於有限的時間內(1 小時)求出指派 5 架無人機的排程規劃最佳解，因此應用 NDD 啟發式

解法將無人機機隊進行分割，可有效縮短配送時間，於合理時間中求得一最佳可行解。啟發式解法將範例二分割為三個群組，第一群以及第二群各分配 2 架，第三群則分割剩餘 1 架。根據表 4.12 及表 4.13，啟發式求解結果與 Gurobi 之求解下限值差距(GAP)約為 3.45%，演算法求解時規模逐漸縮小，除了迭代一之外每個迭代所花費的均小於一秒。已完成訂單數為 27 位，未完成服務之訂單數為 3 位；總配送成本為 180 元。

4.2.3 範例三-Gurobi 與啟發式演算法求解比較

範例三為連鎖餐廳投入 5 架無人機進行 40 個顧客訂單之配送，須從早上 09：00 至 12：30 規劃時程中將所有無人機指派完成。NDD 啟發式演算法將 5 架無人機分割為 3 個群組(子問題)，第一個迭代為指派群組一，2 架無人機進行 40 個餐點需求進行配送，配送完成後，將第一個群組已完成送餐之顧客需求標記為已滿足需求；之後迭代二分割 2 架無人機，演算將前一個迭代未被服務之顧客，延伸進入到下一個迭代，最後則為剩餘 1 架無人機，直到三個群組中 5 架無人機全完成配送餐點規劃指派。

表 4.14 範例三啟發式解法數據結果

範例三	迭代一	迭代二	迭代三
求解時間	2.23 秒	1.44 秒	0.39 秒
最佳解目標值	70.0	60.0	32.0
已服務需求	16 位	9 位	4 位

表 4.15 範例三啟發式解法排程規劃

迭代一	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 1	36 元	顧客 8 (09：10)	10：00
		顧客 27 (09：30)	11：10
		顧客 16 (09：50)	
		顧客 1 (10：20)	
		顧客 7 (10：40)	
		顧客 10 (11：00)	
		顧客 14 (11：30)	
		顧客 23 (12：00)	
UAV 2	34 元	顧客 28 (09：10)	10：00
		顧客 5 (09：30)	10：40
		顧客 31 (09：50)	
		顧客 3 (10：20)	
		顧客 30 (11：00)	
		顧客 11 (11：20)	
		顧客 17 (11：40)	
		顧客 2 (12：00)	

迭代二	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 3	28 元	顧客 26 (10 : 00)	09 : 00
		顧客 40 (10 : 50)	09 : 30
		顧客 9 (11 : 20)	10 : 20
		顧客 24 (12 : 00)	11 : 30
UAV 4	32 元	顧客 6 (09 : 20)	09 : 00
		顧客 35 (09 : 50)	10 : 30
		顧客 4 (10 : 20)	
		顧客 36 (11 : 00)	
		顧客 34 (11 : 40)	
迭代三	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 5	32 元	顧客 20 (09 : 20)	09 : 40
		顧客 33 (10 : 10)	11 : 30
		顧客 21 (10 : 50)	
		顧客 38 (12 : 00)	

- 已完成餐點配送之需求數：29 單
- 未完成餐點配送之需求數：11 單
- 總配送成本：272 元

表 4.16 範例三啟發式單一架/Gurobi 求解比較

範例三	啟發式演算 (單一架)	Gurobi
求解時間	14.23 秒	3602.52 秒
最佳解目標值	274.0	266.0
配送成本	154	176
懲罰成本	120	90
已服務餐點需求	28 個	31 個
未服務餐點需求	12 個	9 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	4.38%	1.50%

表 4.17 範例三啟發式多架/Gurobi 求解比較

範例三	啟發式演算 (多架)	Gurobi
求解時間	4.06 秒	3602.52 秒
最佳解目標值	272.0	266.0
配送成本	162	176
懲罰成本	110	90
已服務餐點需求	29 個	31 個
未服務餐點需求	11 個	9 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	3.82%	1.50%

範例三之排程規劃規模為 5 架無人機配送 40 個餐點需求，與範例二同樣為規模較大之排程規劃，無法於有限的時間內求出一次指派 5 架無人機的排程規劃最佳解。根據表 4.16 及表 4.17 啟發式解法求解數據結果可以得知，利用 NDD 啟發式解法後，將無人機機隊進行分割，可有效縮短餐點配送時間，於合理時間中求得一最佳可行解。範例三將無人機隊分割為三個群組，第一個及第二個群組分別各 2 架無人機，第三個群組分割剩餘 1 架。除了前兩個迭代花費時間較第三個迭代長之外，因迭代三所分配的架數為 1 架，只需要求解 1 架次在時空網路中的配送排程，但每個迭代求解時間均控制於 3 秒以內。啟發式求解已完成訂單數為 29 位，未完成服務之訂單數為 11 位。相較於範例一及範例二，範例三與 Gurobi 下限值之差距(GAP)約 3.82%，可能的原因為所指派的有限無人機 5 架無法涵蓋 40 個餐點的部分需求，連鎖餐廳可增購無人機，提升運能。啟發式解法排程結果如表 4.15 所示。

4.2.4 範例四-Gurobi 與啟發式演算法求解比較

範例四將投入有限 7 架無人機進行 50 個顧客規模餐點訂單之配送。NDD 啟發式演算法將 7 架無人機分割為四個群組(子問題)，前三個群組(迭代)各分配 2 架無人機進行指派，最後一個群組則為剩餘 1 架未指派無人機。啟發式演算法會針對每個迭代會進行無人機的指派直到四個無人機分割群組中 7 架無人機全數完成配送餐點排程規劃。

表 4.18 範例四啟發式解法數據結果

範例四	Iteration			
	I	II	III	IV
求解時間(秒)	1.76	2.21	1.08	0.48
最佳解目標值	70.0	84.0	64.0	32.0
已服務需求	16 位	12 位	8 位	4 位

表 4.19 範例四啟發式解法排程規劃

I	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 1	36 元	顧客 8 (09 : 10)	10 : 00
		顧客 6 (09 : 30)	10 : 10
		顧客 14 (09 : 50)	11 : 00
		顧客 4 (10 : 30)	
		顧客 30 (10 : 50)	
		顧客 9 (11 : 20)	
		顧客 31 (11 : 40)	
		顧客 43 (12 : 00)	
UAV 2	34 元	顧客 28 (09 : 10)	10 : 00
		顧客 5 (09 : 30)	11 : 20
		顧客 16 (09 : 50)	
		顧客 3 (10 : 20)	
		顧客 7 (10 : 40)	
		顧客 2 (11 : 40)	
		顧客 10 (11 : 00)	
		顧客 17 (12 : 00)	
II	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 3	40 元	顧客 50 (09 : 10)	09 : 30
		顧客 48 (09 : 50)	10 : 40
		顧客 34 (10 : 20)	10 : 50
		顧客 38 (11 : 20)	
		顧客 23 (12 : 00)	
UAV 4	44 元	顧客 45 (09 : 10)	09 : 40
		顧客 27 (09 : 30)	10 : 30
		顧客 41 (10 : 00)	11 : 30
		顧客 1 (10 : 20)	
		顧客 47 (11 : 00)	
		顧客 11 (11 : 20)	
		顧客 26 (12 : 00)	

III	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 5	32 元	顧客 35 (09 : 20)	09 : 50
		顧客 37 (10 : 20)	10 : 40
		顧客 36 (11 : 20)	10 : 50
		顧客 24 (12 : 00)	
UAV 6	32 元	顧客 49 (09 : 20)	09 : 00
		顧客 12 (09 : 50)	10 : 30
		顧客 22 (11 : 10)	10 : 40
		顧客 44 (11 : 40)	
IV	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 7	32 元	顧客 18 (09 : 30)	09 : 00
		顧客 15 (10 : 10)	10 : 40
		顧客 39 (11 : 10)	11 : 30
		顧客 42 (11 : 50)	

- 已完成餐點配送之需求數：40 單
- 未完成餐點配送之需求數：10 單
- 總配送成本：350 元

表 4.20 範例四啟發式單一架/Gurobi 求解比較

範例四	啟發式演算 (單一架)	Gurobi
求解時間	62.68 秒	3603.94 秒
最佳解目標值	348.0	342.0
配送成本	258	272
懲罰成本	90	70
已服務餐點需求	41 個	43 個
未服務餐點需求	9 個	7 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	4.02%	2.34%

表 4.21 範例四啟發式多架/Gurobi 求解比較

範例四	啟發式演算 (多架)	Gurobi
求解時間	5.53 秒	3603.94 秒
最佳解目標值	350.0	342.0
配送成本	250	272
懲罰成本	100	70
已服務餐點需求	40 個	43 個
未服務餐點需求	10 個	7 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	4.57%	2.34%

範例四排程設計為 7 架無人機配送 50 個餐點需求規劃，與範例二及範例三相同，Gurobi 無法於有限的時間內求出一指派 7 架無人機的排程規劃最佳解。根據表 4.20 極表 4.21 求解數據結果可以得知，利用啟發式解法後，將範例四無人機隊分割為四個群組，前三個迭代各分配 2 架無人機，最後一個迭代則為剩餘 1 架。因每個迭代設置為差距為 3% 以內即停止，遂每個迭代求解平均花費時間為 3 秒以內即可求得品質佳的可行解。啟發式求解 7 架無人機配送已完成訂單數為 40 位，未完成服務之訂單數為 10 位。啟發式解法排程結果如表 4.19 所示。

4.2.5 範例五-Gurobi 與啟發式演算法求解比較

範例五為連鎖餐廳投入 10 架無人機排程進行 100 顧客需求之配送。NDD 啟發式演算法將 10 架無人機分割為五個群組(子問題)，每個群組指派 2 架無人機，第一個迭代指派群組一 2 架無人機先行指派針對 100 個餐點需求進行配送。配送完成後則將已完成送餐之顧客需求標記為已滿足需求，後續每一個迭代的演算則會將先前演算未被進行服務的顧客延伸到下一個迭代，直到十個群組中 10 架無人機全被指派規劃完成配送餐點。

表 4.22 範例五啟發式解法數據結果

範例五	迭代一	迭代二	迭代三	迭代四	迭代五
求解時間	4.29 秒	3.58 秒	29.43 秒	3.17 秒	8.05 秒
最佳解	64.0	68.0	76.0	72.0	80.0
已服務需求	15 位	16 位	16 位	10 位	10 位

表 4.23 範例五啟發式解法排程規劃

迭代一	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 1	30 元	顧客 28 (09:10)	09:20
		顧客 67 (09:50)	09:30
		顧客 95 (10:10)	10:40
		顧客 55 (10:30)	10:50
		顧客 60 (11:10)	
		顧客 31 (11:40)	
		顧客 65 (12:00)	
UAV 2	34 元	顧客 59 (09:10)	10:10
		顧客 78 (09:30)	11:20
		顧客 2 (09:50)	
		顧客 54 (10:30)	
		顧客 10 (10:50)	
		顧客 17 (11:10)	
		顧客 53 (11:40)	
		顧客 100 (12:00)	

迭代二	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 3	34 元	顧客 79 (09 : 10)	09 : 40
		顧客 57 (09 : 30)	10 : 50
		顧客 16 (10 : 00)	11 : 00
		顧客 92 (10 : 20)	
		顧客 98 (10 : 40)	
		顧客 9 (11 : 20)	
		顧客 14 (11 : 40)	
		顧客 68 (12 : 00)	
UAV 4	34 元	顧客 27 (09 : 20)	10 : 10
		顧客 5 (09 : 40)	10 : 40
		顧客 93 (10 : 00)	
		顧客 3 (10 : 30)	
		顧客 30 (11 : 00)	
		顧客 11 (11 : 20)	
		顧客 99 (11 : 40)	
		顧客 82 (12 : 00)	
迭代三	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 5	40 元	顧客 97 (09 : 10)	09 : 40
		顧客 56 (09 : 30)	11 : 10
		顧客 94 (10 : 00)	
		顧客 1 (10 : 20)	
		顧客 58 (10 : 40)	
		顧客 81 (11 : 00)	
		顧客 47 (11 : 40)	
		顧客 42 (12 : 00)	
UAV 6	36 元	顧客 96 (09 : 10)	10 : 00
		顧客 6 (09 : 30)	11 : 10
		顧客 51 (09 : 50)	
		顧客 52 (10 : 20)	
		顧客 7 (10 : 40)	
		顧客 61 (11 : 00)	
		顧客 62 (11 : 30)	
		顧客 77 (12 : 00)	

迭代四	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 7	36 元	顧客 50 (09 : 10)	09 : 30
		顧客 43 (09 : 50)	10 : 00
		顧客 4 (10 : 20)	10 : 30
		顧客 23 (11 : 20)	10 : 40
		顧客 89 (12 : 00)	10 : 50
UAV 8	36 元	顧客 8 (09 : 10)	10 : 00
		顧客 24 (09 : 40)	10 : 30
		顧客 88 (10 : 30)	10 : 40
		顧客 34 (11 : 10)	
		顧客 45 (12 : 00)	
迭代五	配送成本	完成餐點訂單	更換電池行程
UAV 9	40 元	顧客 20 (09 : 20)	09 : 40
		顧客 41 (10 : 00)	10 : 50
		顧客 70 (10 : 30)	
		顧客 75 (11 : 20)	
		顧客 74 (12 : 00)	
UAV 10	40 元	顧客 49 (09 : 20)	09 : 30
		顧客 48 (09 : 50)	10 : 50
		顧客 15 (10 : 20)	
		顧客 44 (11 : 20)	
		顧客 87 (11 : 50)	

- 已完成餐點配送之需求數：67 單
- 未完成餐點配送之需求數：33 單
- 總配送成本：690 元

表 4.24 範例五啟發式單一架/Gurobi 求解比較

範例五	啟發式演算 (單一架)	Gurobi
求解時間	1841.08 秒	3610.02 秒
最佳解目標值	690.0	702.0
配送成本	360	352
懲罰成本	330	350
已服務餐點需求	67 個	65 個
未服務餐點需求	33 個	35 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	4.06%	5.70%

表 4.25 範例五啟發式多架/Gurobi 求解比較

範例五	啟發式演算 (多架)	Gurobi
求解時間	48.52 秒	3610.02 秒
最佳解目標值	690.0	702.0
配送成本	360	352
懲罰成本	330	350
已服務餐點需求	67 個	65 個
未服務餐點需求	33 個	35 個
與 Gurobi 下限解差距(GAP)	4.06%	5.70%

範例五配送需求規模為 10 架無人機進行 100 個餐點需求配送。大規模導致模式無法在有限時間內求出 10 架無人機配送排程規劃最佳解。根據表 4.18 啟發式解法求解數據結果可以得知，因規模提升為 100 個需求，將每個群組之無人機數量分割為 2 架進行排程，求解中每個迭代的最佳解差距(GAP)停止基準設置為 3%。將每個迭代求解所花費的時間加總之總求解時間約 50 秒，表示於合理時間內本研究啟發式演算法可求得一品質較佳之可行解。應用 NDD 啟發式解法可將無人機機隊進行分割，有效縮短餐點配送時間，於合理時間中求得一最佳可行解。啟發式求解已完成訂單數為 67 位，未完成服務之訂單數為 33 位，與 Gurobi 之下限值差距(GAP)約 4.23%。範例五啟發式解法排程結果如表 4.19 所示。

本節求解範例一至範例五輸出結果比較如圖 4.1 所示。根據圖 4.1，範例一之規模為 20 餐點需求等待 3 架無人機配送，其中啟發式求解時間約 1.5 分鐘，其原因為從範例二開始至範例五每個迭代之停止基準均設置為 GAP 為 3%以下即停止，若無設置基準求解時間可能會提升，超過 1 小時，無法於有限時間中求得排程解，較不符合實務營運利益，因此每個迭代求解時均可於短時間中符合停止基準。然而，範例一因其規模大小可於短時間中求解，本研究未在範例一中設置停止基準讓每個迭代自己求出最佳解後即停止，遂花費時間約 1.5 分鐘。

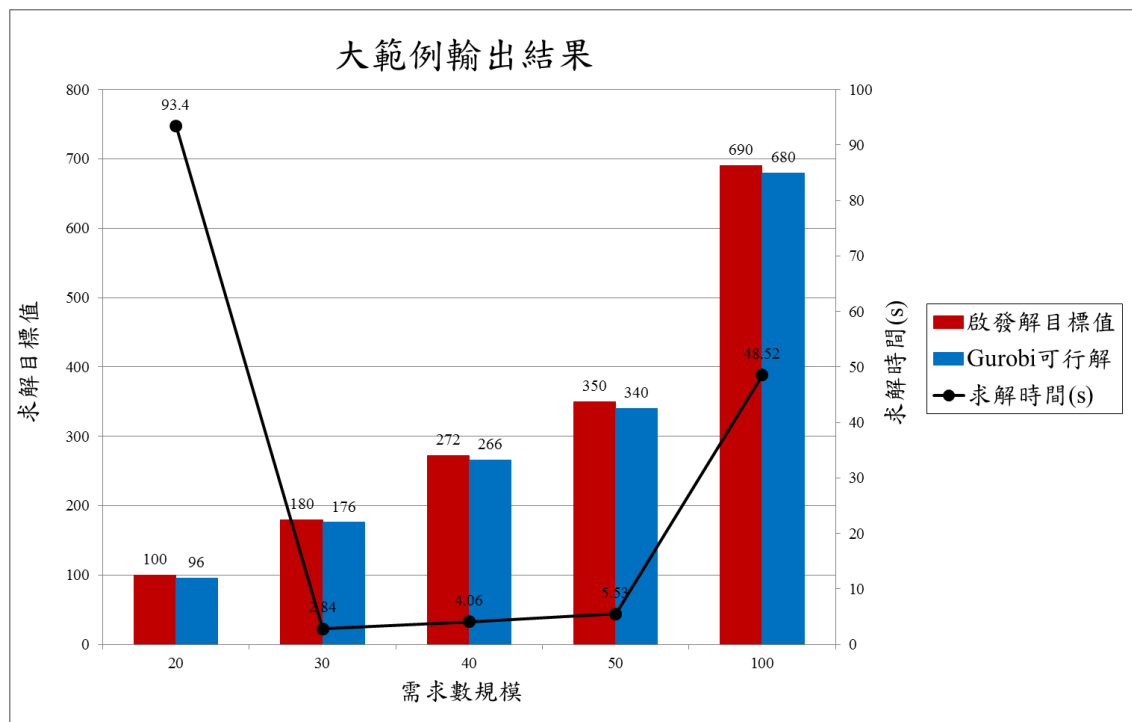


圖 4.1 大範例輸出結果比較



4.3 敏感度分析(Sensitivity Analysis)

為探討將輸入模式之相關參數數值進行更改後，對於本研究之無人機餐點配送排程規劃目標值之影響程度，本節將針對模式中重要參數進行改變，包括懲罰成本、電池容量以及每公里無人機消耗電池電量，並將排程規劃求解結果進行敏感度分析。研究將應用 4.2.1 之範例一：3 架無人機於早上 09：00 至中午 12：30 之時程，配送 20 個餐點需求規模，並根據排程求解結果探討更改參數後對於目標式值比較以及敏感度分析。

4.3.1 未配送餐點需求懲罰值敏感度分析

為探討針對未配送餐點進行相應之懲罰對目標值影響，於研究情境中，固定有限配送無人機 3 架以及 20 個餐點需求訂單。其中，將初始懲罰值未服務需求每單懲罰 10 元改變設置為每單懲罰 6 元、8 元以及 12 元。求解後針對每個相異懲罰值對於配送總成本之影響以及需求滿足數量之差異進行探討，並分析結果。未服務需求懲罰值求解結果比較如表 4.18 及圖 4.2 所示：

表 4.26 未服務需求懲罰值敏感度分析表

服務需求數	20 需求			
無人機架數	3 架			
懲罰值(元/單)	6	8	10 (Base)	12
目標值(元)	92	94	96	98
已服務需求(個)	18	19	19	19
未服務需求(個)	2	1	1	1
求解時間(s)	0.915	1.327	24.54	2803.83
目標值變化(%)	-4.35%	-2.13%	0.00%	+2.04%

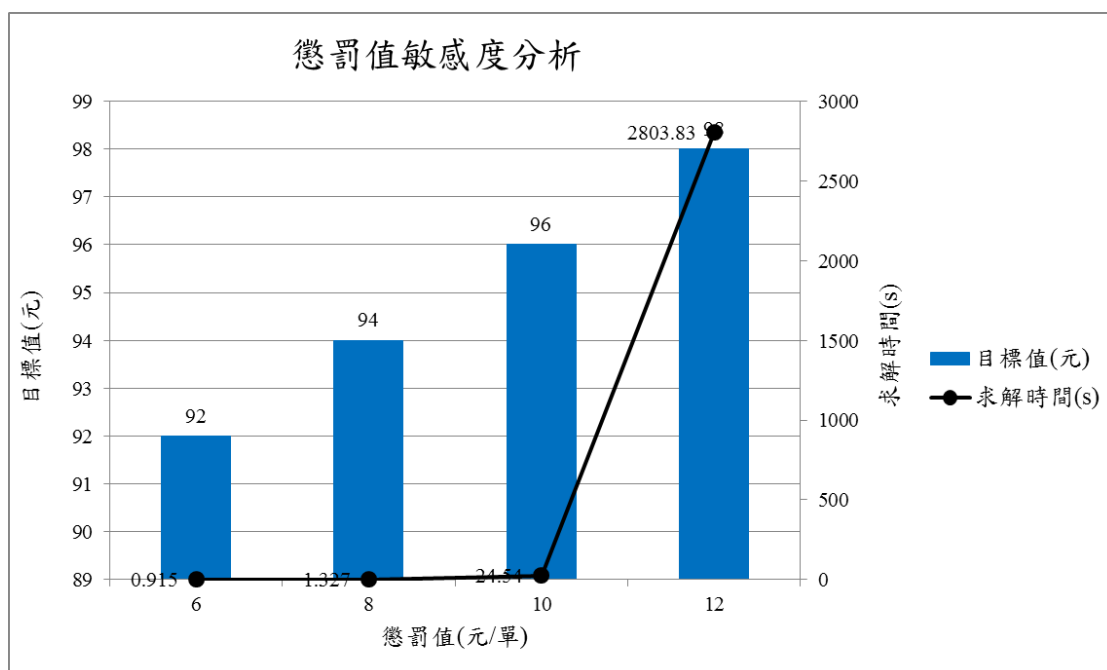


圖 4.2 未服務需求懲罰值敏感度分析圖

根據表 4.18 所示為研究針對未服務需求懲罰成本之求解結果。若將未服務需求懲罰成本每單調降為 6 元時，產生排程規劃未服務需求 2 個，總配送成本為 92 元；若將未服務需求懲罰成本每單設置為 8 元時，最佳餐點配送規劃之已服務需求為 19 個，未服務需求 1 個，總配送成本為 94 元；若將未服務需求成本調漲為每單 12 元時，最佳配送規劃也滿足了 19 個顧客餐點需求，未服務需求 1 個，與最佳解差距約 2.04%，總配送成本約 98 元。其中，若調漲懲罰值成本，則求解時間也會跟著提升，可能原因在於設定 10 元為懲罰值成本後，最佳餐點運送規劃有 19 個餐點被無人機運送完成，然而，隨著懲罰成本的提升，模式求解排程時會求出一個離現有最佳解較近之最佳可行解，希望懲罰成本影響總配送成本的程度越少越好，遂有可能取得 20 個需求全數滿足之排程規劃，所以模式求解所耗費時間會根據懲罰值相對地提升。

4.3.2 無人機每公里耗費電量敏感度分析

針對未服務需求懲罰成本對於排程規劃目標值之影響進行分析後，研究將探討無人機飛行每公里所消耗的電量對目標值之影響程度。根據 4.1 節所述，研究情境中，無人機電池容量規格設定為 3830 mAh；耗電量設定為每公里約 378.33 mAh，投入有限無人機 3 架配送 20 個餐點需求訂單。因根據往後科技的發展，考量電池耗電量會越來越少，效能更高，所以進行耗電量參數敏感度分析為調降無人機飛行每公里耗費電量為初始耗電量之 80%與 90%，以及調升為初始耗電量之 110%以及 120%，並將參數輸入模式進行排程規劃求解。求得結果後將針對不同耗電量對於餐點配送總成本之相關影響以及差異進行探討。每公里耗電量敏感度分析結果如表 4.19 及圖 4.3 所示：

表 4.27 每公里耗電量敏感度分析表

服務需求數		20 需求				
無人機架數		3 架				
耗電量(mA/km)		80%	90%	100%	110%	120%
		(Base)				
目標值(元)		96	96	96	96	96
更換電池行程	UAV 1	0	1	2	2	3
	UAV 2	3	3	1	2	3
	UAV 3	2	2	2	1	1
服務顧客數		19 單	19 單	19 單	19 單	19 單
求解時間(s)		15.14	38.40	24.54	40.99	8.077
目標值變化(%)		--	--	--	--	--

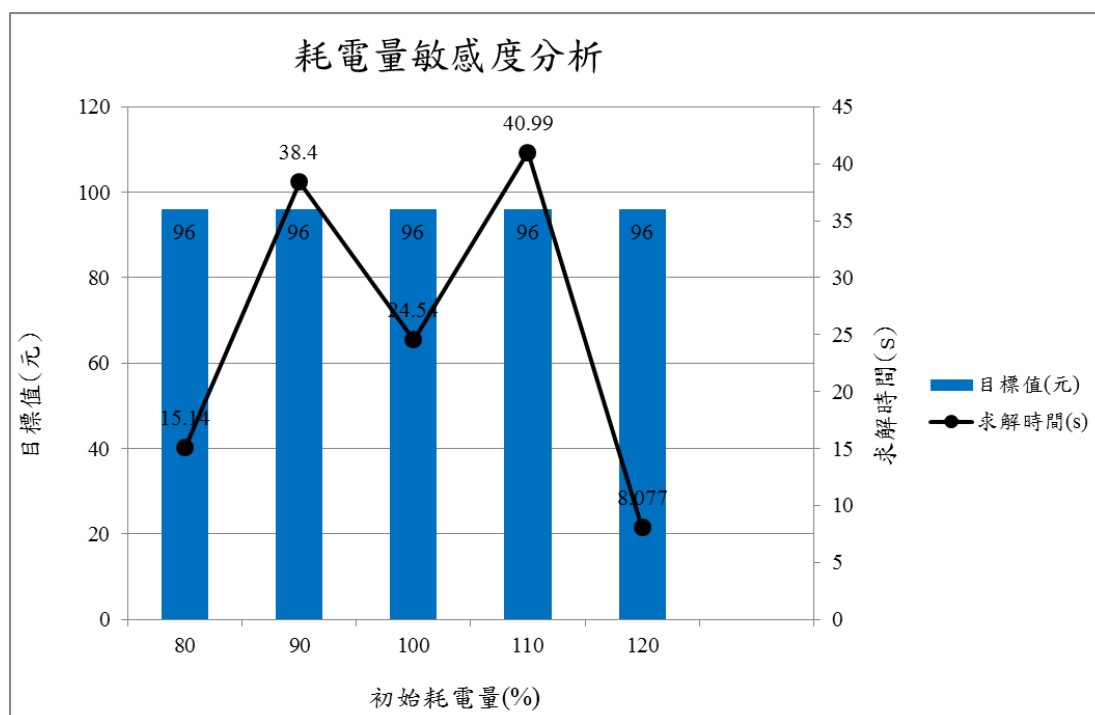


圖 4.3 每公里耗電量敏感度分析圖

根據表 4.19 之耗電量敏感度分析結果，將每公里耗電量調降為初始之 80% 以及 90% 可降低每架無人機更換電池次數；若提升每公里耗電量則會增加充電行程次數，提升至初始每公里耗電量之 110% 除了無人機換電池次數增加之外，求解的時間也相對地增加，約需 41 秒，最佳可行解為 96 元。根據漲幅推斷，初始耗電量之 90% 與 110% 所求解的時間最高，超過上述臨界值後，初始耗電量之 80% 以及 120% 之求解花費時間呈現逐漸減少。

4.3.3 無人機電池容量敏感度分析

本研究情境之無人機電池容量規格為 3830 mAh，但因無人機無法於電池趨於沒電的狀態才前往更換電池，遂設定電池上限值為 3447 mAh 及下限為 575 mAh。研究將調整現有狀態下無人機之飛行續航力，分別將現有電量之上、下限值擴充 10% 以及 15%；縮減 10% 以及 15%，耗電量設為初始每公里約 378.33 mAh。將參數輸入模式後進行排程規劃求解，並針對不同電池容量與初始電池容量對目標值產生之影響以及差異進行探討。電池容量敏感度分析結果如表 4.20 及圖 4.4 所示：

表 4.28 無人機電池容量敏感度分析表

服務需求數		20 需求				
無人機架數		3 架				
現有電池容量 擴增減少(mAh)		-15%	-10%	0% (Base)	+10%	+15%
目標值(元)		96	96	96	96	96
服務顧客數		19 單	19 單	19 單	19 單	19 單
更換電池行程	UAV 1	3	3	2	1	0
	UAV 2	2	1	1	1	3
	UAV 3	1	3	2	3	2
求解時間(s)		8.99	17.07	24.54	47.87	147.39
目標值變化(%)		--	--	--	--	--

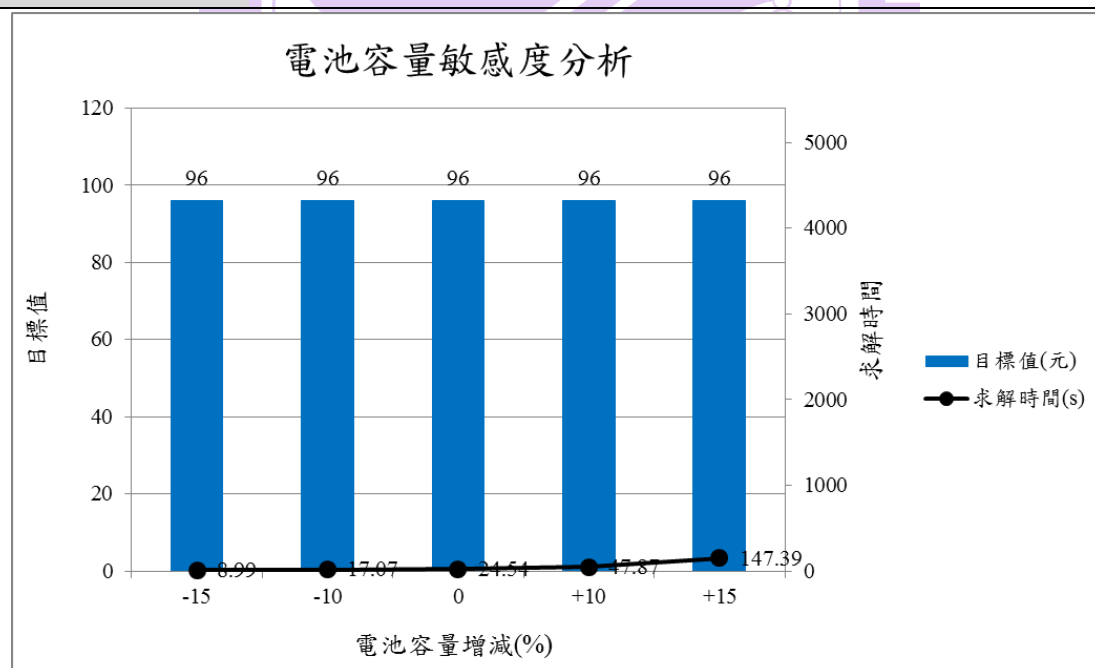


圖 4.4 無人機電池容量敏感度分析圖

根據表 4.20 之電池容量求解結果，將現有電池容量擴增 15%之配送成本為 96 元，求解耗費時間約 148 秒；若縮減電池容量至 10%以及 15%，求解耗費時間約可控制於 20 秒內，配送成本均 96 元。根據漲幅說明，擴增電池容量使無人機可於現有成本中減少換電池次數；初始電池容量縮減越多，求解時模式需更換電池次數增加則求解時間亦提升。

4.4 小結

根據本章進行大規模範例測試求解，測試結果證明可將本研究所建構之無人機餐點配送排程模式投入於實務餐點配送應用中。在每一不同情境之範例中，均將無人機進行多架分割，每個群組投入多架無人機求解，啟發式演算法均可將求解差距(GAP)控制於 5%中，且若範例規模提升，啟發式解法之求解結果較數學規劃軟體 Gurobi 求解佳。之後可進行不同求解規模以及改變相關參數，探討改變之後對本研究數學模型求解目標結果產生的影響，進而針對該因素進行改善，減少多餘配送成本，提升利潤。



第五章 結論與建議

科技演變造就現今多元化運輸模式的發展，也因有限的資源，因應永續環境保護的運輸方法於學、業界的投入越來越廣泛。人工成本的增加導致業者營運負擔增加，遂產生了利用無人載具配送之想法。然而，目前多數業者仍然利用傳統車輛進行不論是餐點或是貨物運送，無人機的配送營運尚位在發展階段，以期未來廣泛且成熟的應用無人機的過程中可投入餐點配送營運，以減少人工成本支出以及降低發生人為交通因素。本研究針對應用無人機配送餐點排程規劃進行探討，考量連鎖餐廳業者營運立場，在更換電池的飛航實務限制中，有能力滿足最多顧客數，以花費最少配送時所產生之成本。

本章將針對本研究產生之結論進行探討，並建議後續研究可進行延伸及改善之處。

5.1 研究結論

1. 本研究考量連鎖餐廳業者之營運角度，針對每一個已預定之餐點進行配送排程規劃，無人機須視顧客距離前往最近之餐廳進行取餐，每一位顧客被拜訪之後即可滿足其需求。本研究以最小化總配送成本為目標，其中包括營運旅行成本以及若產生未服務需求則進行懲罰之懲罰成本。透過時空網路之彈性及流量流動手法，進行本研究之無人機餐點配送排程規劃之數學模式建構。
2. 本研究屬多場站車輛排程規劃問題，為一 NP-Hard 問題，模式若無法於合理且有限時間內求得一最佳解，較不符合實務應用。因此本研究發展一套以分割無人機規模為基礎之啟發式演算法，將無人機機隊分割為單一架次進行配送，將每一個子問題投入演算法中每個迭代，並應用 Gurobi 數學規劃軟體進行排程規劃求解。將各個迭代已完成之需求進行標記以縮減問題規模，直至所有無人機被指派完成。演算結果說明可將求解時間減少且控制於合理時間中。
3. 本研究參考 Solomon Benchmark 之 VRPTW 範例資料進行餐點運送之路網及配送需求設計，設計出五種相異大規模配送需求之測試例題，共有 20 單、30 單、40 單、50 單以及 100 單的餐點配送需求規模。為測試數學模型之正確性以及啟發式演算法之實用性，透過啟發式演算法取得排程求解結果後與 Gurobi 求解結果之下限值進行比較。根據模式求解結果，範例一至範例五所求得之啟發解與 Gurobi 下限解差距(GAP)皆在 5% 內，說明數學模式以及本研究啟發式演算法符合實務應用。
4. 本研究針對未配送餐點需求懲罰值、無人機耗電量以及電池容量參數進行敏感度分析。根據結果，在無人機隊固定之下，懲罰值增加，無人機隊配送成本將提升，若減少則無人機隊所服務顧客數會下降，求解時間減少；當每公里耗電量增加時，無人機隊更換電池次數則會影響到演算時間；而若將電池電量擴增時，無人機隊於有限時間中可將未服務需求降至最少，而減少電池

容量時，求解花費時間增加外，無人機指派更換電池之行程也跟著增加。

5.2 未來研究方向及相關建議

1. 本研究為無人機配送已知需求之訂單，意即顧客已先預訂配送時間待無人機隊前往拜訪配送餐點。於實務應用中，可延伸至後續研究，針對動態顧客餐點需求，根據時間所產生之需求進行配送排程規劃，建構一無人機動態餐點配送排程規劃模式。
2. 本研究探討單一運具無人機進行餐點運送，未來研究可將無人機與卡車進行結合，探討加入不同載具能源問題之配送實務限制以及載重限制，建構一整合載具餐點配送排程規劃數學模式。
3. 本研究具有考量無人機電量問題之限制，若無人機電量需要補充時則飛往餐廳更換電池。建議之後研究可探討無人機「充電限制」，並將充電時間加入考量，且餐點載重是否也會影響無人機飛行配送時之電量消耗及飛行速度。
4. 本研究設計無人機配送規劃時程長度為固定且已知，但在實務配送中，若非配送已預訂之顧客需求，大部分訂單均為隨機產生，且運送至顧客手中所花費時間越短越好。為更貼近實務營運狀況，於未來研究可延伸至動態時間系統，探討不確定性之時間需求下無人機之餐點配送排程規劃。
5. 本研究連鎖餐廳擁有之無人機為有限固定數目，未來研究可發展一啟發式演算法，根據每一個顧客位置與餐廳距離，計算單一架無人機在規劃配送時程內最多可服務最多顧客，降低未服務需求，將無人機數加總後即為需要投入之總架數。目的在於提升顧客服務需求數減少未服務需求，可供未來餐廳及外送平台業者進行購入無人機數目之參考。
6. 本研究啟發式演算法於實務上可加入考量無人機均衡送貨數量，演算法起初幾個迭代會根據配送時程盡量配送較多餐點，之後迭代呈現遞減，於未來研究可進行每一架無人機平均配送考量。

參考文獻

- [1] 孫瑞璟 (2019)。電動機車快遞服務車輛排程最佳化問題。國立交通大學運輸與物流管理學系研究所碩士論文，新竹市。
- [2] Buhrkal, K., Larsen, A., & Ropke, S. (2012). The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 241-254.
- [3] Belgin, O., Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2018). Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 1-16.
- [4] Dablanc, L., Giuliano, G., Holliday, K., & O'Brien, T. (2013). Best practices in urban freight management: Lessons from an international survey. *Transportation Research Record*, 2379, 29-38.
- [5] Gintner, V., Kliewer, N., & Suhl, L. (2005). Solving large multiple-depot multiple-vehicle-type bus scheduling problems in practice. *OR Spectrum*, 27(4), 507-523.
- [6] Gonzalez-R, P. L., Canca, D., Andrade-Pineda, J. L., Calle, M., & Leon-Blanco, J. M. (2020). Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 657-680.
- [7] Jeong, H. Y., Song, B. D., & Lee, S. (2019). Truck-drone hybrid delivery routing: Payload-energy dependency and No-Fly zones. *International Journal of Production Economics*, 214, 220-233.
- [8] Kliewer, N., Mellouli, T., & Suhl, L. (2006). A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1616-1627.
- [9] Liu, J., & Zhou, X. (2019). Observability quantification of public transportation

- systems with heterogeneous data sources: An information-space projection approach based on discretized space-time network flow models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 128, 302-323.
- [10] Lu, G., Zhou, X., Mahmoudi, M., Shi, T., & Peng, Q. (2019). Optimizing resource recharging location-routing plans: A resource-space-time network modeling framework for railway locomotive refueling applications. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 1241-1258.
- [11] Liu, Y. (2019). An optimization-driven dynamic vehicle routing algorithm for on-demand meal delivery using drones. *Computers & Operations Research*, 111, 1-20.
- [12] Muñuzuri, J., Larrañeta, J., Onieva, L., & Cortés, P. (2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities*, 22(1), 15-28.
- [13] Murray, C. C., & Chu, A. G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 86-109.
- [14] Mahmoudi, M., & Zhou, X. (2016). Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state-space-time network representations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 89, 19-42.
- [15] Murakami, K. (2020). Time-Space Network Model and MILP Formulation of the Conflict-Free Routing Problem of a Capacitated AGV system. *Computers & Industrial Engineering*, 106270.
- [16] Suzuki, Y., Montabon, F., & Lu, S. H. (2014). DSS of vehicle refueling: A new enhanced approach with fuel weight considerations. *Decision Support Systems*, 68, 15-25.
- [17] Taniguchi, E. (2014). Concepts of city logistics for sustainable and liveable cities.

Procedia-social and behavioral sciences, 151, 310-317.

- [18] Taniguchi, E., Thompson, R. G., & Yamada, T. (2014). Recent trends and innovations in modelling city logistics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125, 4-14.
- [19] Veenstra, M., Roodbergen, K. J., Coelho, L. C., & Zhu, S. X. (2018). A simultaneous facility location and vehicle routing problem arising in health care logistics in the Netherlands. *European Journal of Operational Research*, 268(2), 703-715.
- [20] Yan, S., Lin, C. K., & Chen, S. Y. (2014). Logistical support scheduling under stochastic travel times given an emergency repair work schedule. *Computers & Industrial Engineering*, 67, 20-35.
- [21] Yang, X., Bostel, N., & Dejax, P. (2019). A MILP model and memetic algorithm for the Hub Location and Routing problem with distinct collection and delivery tours. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 105-119.
- [22] Yuan, Y., & Tang, L. (2017). Novel time-space network flow formulation and approximate dynamic programming approach for the crane scheduling in a coil warehouse. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 424-437.
- [23] Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D., & Wang, X. (2018). A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 765-778.
- [24] Zhang, Y., Peng, Q., Yao, Y., Zhang, X., & Zhou, X. (2019). Solving cyclic train timetabling problem through model reformulation: Extended time-space network construct and alternating direction method of multipliers methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, 128, 344-379.
- [25] Dronesplayer.com , 2019 , 擷取自 : <https://dronesplayer.com/news/>