

載貨無人機與傳統運送服務環境效益差異之案例分析

運輸工程組 王怡婷

研究期間:民國 111 年 2 月至 12 月

摘要

本研究目的在於分析及量化無人機運送的潛在環境影響，提出應用無人機於物流運送之建議。經分析三款無人機與現有中華郵政之郵務摩托車，在桃園復興區華陵里、高義里及三光里進行包裹運送，並以能源消耗及二氧化碳排放量等做為比較環境效益之指標，結果顯示無人機物流運送要具備能耗優勢，需用於貨物交付距離較短之需求服務(運送往返里程較短)。

本研究進一步分析若要達到與郵務摩托車相同能源效率，除提升電池效率外，也可使用其他動力來源如燃料電池，然欲達到郵務車的碳排水準，則電池能量密度要提升 2 至 3 倍，以現有電池技術而言似乎較困難，此外若以能源成本估算無人機運送成本，以無人機每單位載重能源需求及目前電池組每瓦成本計算，顯示無人機每單位運送能源成本遠高於郵務摩托車。

關鍵詞：

無人機、物流運送、環境效益

載貨無人機與傳統運送服務環境效益差異之案例分析

一、前言

載貨無人機(delivery drone)是一種運輸貨物的無人機，當 Amazon 自 2013 年宣布將開始探索使用無人機商品運送後，掀起無人機運送貨物熱潮，但伴隨而來的是各界對無人機運送產生的挑戰和疑慮，其中運送安全、安保和監管是最受關注的問題 (Robillard & Byers, 2013)。

國際上已有許多成功投入使用無人機運送領域案例，特別是在醫療和食品配送應用領域 (Rosen, 2017; McFarland, 2018)。從最早 2016 年紐西蘭達美樂披薩公司 (Domino's Pizza) 和無人機新創公司 Flirtey (現在為 SkyDrop) 合作，推出商用無人機送貨服務，並成功完成無人機的第一次披薩外送，隨之在新冠疫情高峰期間，無接觸運送服務概念的普及化，更加速無人機運送發展速度，包括如何替居家隔離患者提供藥品及食物，如何利用無人機載運新冠疫苗等，都是當前熱門話題。為搶佔無人機服務市占率，許多物流及零售商都已競相推出各種服務試驗。對物流及零售商而言，無人機運送相較於目前陸路運輸模式，具有相當大的發展潛力，包括縮短運送時間及運送成本等。

導入無人機進行商業應用，除了考量成本、法規及社會層面外，亦有許多文獻認為應考量其對環境影響。從環保角度而言，因無人機比貨車尺寸小得多，能源消耗可以更少，且已有許多無人機開發使用如太陽能及風能等再生能源，加上無人機送貨可方便到達陸路無法到達或難以到達的地區，避免交通擁堵，縮短送貨時間，因此與傳統的柴油卡車相比，無人機運送可能更環保。

然而由於小型無人機的有效負載能力及續航力都很有限，不適合用於長距離或大容量貨物運送，通常需要額外的基礎設施或配備，如配送倉庫或無人機場(drone port)及充電站等，才能有效擴展無人機運送服務範圍，然而這也因此抵銷無人機的能源效率及碳排優勢，此外還需考慮未來有更多使用純電力或替代能源驅動的貨車。因此有許多文獻研究顯示，無人機對環境的影響仍存在不確定性。

隨著無人機的技術和社會觀感不斷變化，利用無人機進行物流的相關規範逐漸整備，雖然目前除包括美國及日本在內的 27 個國家，允許在事先獲得批准或在特定重量或高度的情況下可以使用無人機商用外，我國及多

數國家仍禁止無人機的商業使用，但預期未來將有越來越多國家允許無人機物流商業應用。由於載貨無人機同時存在潛在的優劣勢，無人機是否比傳統陸路運送更好，以及在什麼情況下無人機優於傳統運送方式，當政府在為無人機應用在物流行業做準備時，應了解無人機在貨物運送時對環境的影響。

本研究的主要目的在於分析及量化無人機運送的潛在環境效益，以提出使用無人機於運送應用之建議。章節架構安排如下，第 2 章回顧載貨無人機環境效益評估議題，及蒐集載貨無人機現行動力來源及能源消耗評估之相關文獻，第 3 章介紹評估分析工具，第 4 章以案例比較利用三款無人機與現有中華郵政之郵務摩托車，在桃園復興區進行郵務運送，分析其能源消耗及碳排差異，最後於第 5 章提出對我國未來發展無人機運送服務之建議。

二、文獻回顧

2.1 載貨無人機物流運送

商業無人機要能順利推廣運用，目前仍有許多需克服的困難，包括監管、技術及資本。在物流應用部分，由於無人機物流服務的安全性一直受到存疑，「門前投遞」的無人機快遞無法如預期般快速普及化。

最早取得美國聯邦航空總署（Federal Aviation Administration，FAA）核准的 Alphabet 的無人機子公司 Wing，順利在 2019 年送出第一趟貨物，但載送貨品重量不可超過 1.3 公斤，只獲准在少數維吉尼亞州的城市進行小包裏送貨，此外該台無人機抵達目的地後不會降落，而是盤旋在目的地半空，由繩索垂降包裹。

雖然無法做到門前投遞，對老牌物流商如 UPS 來說，已經具備成熟的陸運配送網路，仍可利用無人機在其物流中心和分揀中心傳遞包裹，再由卡車送到客戶手裡。但從整條物流鏈來說，效率最低且成本最高的部分就在最後一英里送貨到府，從這一個角度而言，反倒給了非傳統物流服務商的一個大商機，這也是網路零售商 Amazon 積極投資自動化物流技術的主因，目前已擁有許多無人機技術專利。

Amazon 的陸運配送網路密集度遠不如傳統物流服務商，渴望透過自動化物流技術的突破，領先在最後一哩路配送服務上。「Prime Air」無人機送貨服務，早在 2016 年就首度測試完成無人機宅配任務，亦於 2019 年獲得 FAA 核准，但 Prime Air 僅能飛行 24 公里，承載 5 磅（約 2.26 公斤）重貨物。

但要實現無人機物流服務的商業模式，最終須回到成本效益分析問題。安全監管牽涉到載重及飛行高度限制，直接影響服務商的獲利能力。當前在臺灣民航局訂立遙控無人機專章及相關法規命令中，對於要使用無人機進行物流活動相關監管包括只有農噴活動及緊急事故得申請無人機投擲動作，且逾 25 公斤的無人機則要通過實機檢驗和註冊發照，再加上規定高度限制及指定範圍內飛行等。

以臺灣來說，若要使用無人機運送山區包裹及郵件，據估計承載重量至少要達到 30 公斤以上才符合效益，此外無人機運送郵件，是考量可用降低山區道路因天然災害造成土石崩塌時，須仰賴人力涉險挺進災區的風險。

中華郵政曾在 2018 年成功驗證偏鄉平坦地形地無人機物流測試，載運五公斤以下內裝茶葉與咖啡的包裹，從台南市左鎮晨曦山莊飛往左鎮郵局，成功驗證在較為已能順利開展服務，又在 2019 年測試無人機克服山區地形高低海拔落差問題，成功完成阿里山運送血清郵件的測試。

但不是每個測試都能如此順利，2021 年年 4 月測試無人機跨海離島包裹運送任務，共有 5 架無人機參加測試，從東港載運郵件(機體重量加包裹重量不超過 25 公斤限制)直飛小琉球，測試結果只有兩架可順利完成運送任務，且其一雖完成任務，但過程中一度失去控制，所幸最後順利返航完成任務。

儘管存在許多疑慮，國際上已有許多成功投入使用無人機運送領域案例，特別是在醫療和食品配送應用領域。從最早 2016 年紐西蘭達美樂披薩公司(Domino's Pizza)和無人機新創公司 Flirtey(現在為 SkyDrop)合作，推出商用無人機送貨服務，成功完成無人機的第一次披薩外送。疫情高峰期間，無接觸運送服務概念的普及化，更加速無人機運送發展速度，包括如何替居家隔離患者提供藥品及食物，如何利用無人機載運新冠疫苗等，都是當前熱門話題。

從消費者角度而言，顯然社會大眾對無人機運送的疑慮，或許隨著技術漸趨成熟，以及大環境應用的改變，其接受度也越來越高。而無人機交貨方式(與顧客的互動方式)，是目前用來評估無人機能否順利導入運送，進行商品交付可行性的重要指標。以 Google 旗下無人機送貨事業 Wing，與澳洲零售與地產商 Vicinity Centers 合作為例，透過商場現有閒置的屋頂空間，零售商可將貨物從販售點直接運送到客戶家中，而收貨方不直接與無人機交貨，而是無人機在離地面約 7 公尺處盤旋，利用繫繩將包裹緩慢下降到地面，包裹到達地面後，將貨物從繫繩中釋放，當無人機飛走後，客戶可以拿起包裹。

無人機貨運要落地商用仍存在許多挑戰與條件姑且先不論消費者對載貨無人機的接受度如何，服務商要真正讓無人機貨物運送落地，仍有許多當前無人機技術在物流領域應用的限制，包括在營運面如安裝貨物的容器設計須耐用且容易操作，以及須避免人口稠密區，降低無人機碰撞或墜機風險，尚需考量貨物或文件損毀成本，以及連帶相關的保險議題，對零售商而言，還須思考是否導入無人機配送中心(drone port)及充電站等，均會增加額外營運成本。

2.2 無人機動力來源

載貨無人機的技術成熟度(Technology Readiness)，包括速度、耐力、距離和有效載荷，都是用來評估載貨無人機能否順利被導入市場應用的基礎。在所有技術中，續航力目前是發展在貨物無人機的一個較難但亟需突破的技術瓶頸。以 Wing 輕型送貨無人機為例，為全電力系統驅動，然受限於電池電力，最遠航行距離只達約 9.6 公里。

為了有較高的酬載與滯空能力，能源挑選需考量重量能量密度（每單位重量所能儲存的電能量 mass-specific energy, Wh/Kg（瓦時／公斤）及體積能量密度（每單位體積所能儲存的電能量 volumetric specific energy, Wh/L（瓦時／公升），不同能源的重量能量密度及體積能量密度如圖 1。

由於鋰聚合物（Li-Po）和鋰離子（Li-ion）電池非常小巧且價格合理，目前絕大多數（約 96%以上）商用無人機電源都採用此類電池方案。目前無人機鋰電池能量密度約為 160Wh/kg，最高可飛行時間約落在 15 至 20 分鐘，若要酬載大型貨物，其續航力甚至可能降低。但若增加電池尺寸或數量，便會影響到總載貨重量及飛行距離，且當前電池在能量密度技術發展上有其極限，使用直流馬達為動力，以特斯拉 Model 3 為例，該車款使用松下的鋰電池，其能量密度為 260 Wh/kg，而根據松下預估未來五年內，可將能量密度提高 20%。但對無人機來說，電池的能量密度需要提高到 400 Wh/kg 以上，才能實現可行的商業電動飛行的目標。

此外，一般而言大型無人機得以載重更多的電池以具備更長的續航力，具有更高的載重能力，但僅增加更多電池或採用能量密度極高的動力來源，可能也無法提高續航力及增加酬載能力，因為整個系統都會影響飛行性能，包括推進系統重量、推進系統的熱效率(燃料燃燒的熱能轉換為機械動能的比率)等，如電池供電系統達到 73%，燃料電池達 44%，而傳統燃油引擎

僅有 39%。



資料來源：Drone Industry Insights (2017)

圖 1 不同能源之能量密度比較

顯然無人機若使用純電池系做為動力來源，就得受限於電池的能量密度無法快速成長的瓶頸，加上近年來高漲的環保意識，使得燃料電池無人機開始受到關注，尤其氫燃料電池具備高能量密度優勢，能提供無人機長時間執行任務，最被看好。目前國際上已有許多使用案例。2021 年初，韓國斗山創新 (Doosan Mobility Innovation, DMI) 的氢能無人機，成功完成 2 個小時的飛行紀錄。看好燃料電池發展前景，長期投入相關研究的工研院材化所，在 2020 年與台灣田屋科技合作，研發以氫氣為主的燃料電池，裝置在田屋科技的無人直昇機上，透過遠端遙控無人直昇機，從宜蘭烏石港飛向的龜山島，再飛回原地，單程 12 公里，總航程飛行 40 分鐘。

表 1 整理各類動力來源及特性，在所有動力來源中，當前以前 4 項目為市面上較常見的應用來源。

表 1 無人機動力來源及特性

項目	特性
電池	- 可以在任何地方充電，透過更換電池組即可完成“加油”。 - Li-Po 和 Li-Ion 是無人機最常見的來源。
汽油	- 已有許多成熟的汽油動力解決方案(petrol-powered solutions)可供選擇。 - 除具有續航優勢外，隨著飛行時間拉長燃料重量可因而減輕，

	從而使機身更輕，而進一步增加航程。 ● 與鋰聚合物電池相比，汽油的重量能量密度增加了 48 倍，體積能量密度僅增加 13 倍。 ● 內燃式引擎具有堅固、體積小、重量輕的優點，也有較好的熱效率。
氫燃料電池	● 低污染及噪音。 ● 能量密度為鋰聚合物電池的 150 倍。 ● 已有許多測試機型案例。
油電混合動力	結合電力發動機的快速反應與汽油內燃機動力的優點。
太陽能	● 太陽能電池效率因技術成長不斷增加，從 10%到近 46%，功率比約 175W/m²。 ● 適用於高海拔及長航時 (High Altitude Long Endurance, HALE) 無人機，設計目的是在不需要燃料的情況下保持飛行數年。 ● 若使用於多旋翼無人機，需在整個機翼的表面上覆蓋大面積的太陽能板才能正常運作。
超級/超電容器 (Super/Ultra-Capacitors, SuperCaps) 如 石墨烯	● 超電容的功能與「電池」頗為相似，都是儲存、供給電能的裝置。但相較於一般充電電池，「超電容」有更高的輸出功率、更長的使用壽命（充、放電次數超多）、充電效率更高、可靠度更好等諸多優點。 ● 能量密度太低為其缺點，遠落後於電池。 ● 「超電容」當前積極運用於「大眾交通工具」的動力來源，如高雄輕軌捷運。
雷射 (laser)	原理是利用雷射光束，照射在無人機的感光板進行空中充電。

資料來源：Drone Industry Insights (2017)

2.2 載貨無人機物流運送環境影響

載貨無人機進行商業應用，除了考量成本和法規層面外，亦有許多文獻認為此類新技術之應用，應考量其對環境影響並加以分析。直觀而言，因無人機尺寸小，可減少能源消耗，且目前已有許多無人機使用再生能源，例如前述之太陽能及風能等產生電力，加上無人機可方便運送陸路無法到達或難以到達的地區，避免交通壅塞，縮短送貨時間，因此可減少溫室氣體排放量。

然而由於小型無人機的有效載重及續航力都有其限制，目前技術並不適合長距離或大重量貨物運送，且若需採用無人機物流系統所需額外倉儲相關所產生排放，如配送倉庫、無人機場(drone port)或充電站基礎設施，才能有效擴展無人機運送範圍的情況下，可能抵銷無人機的能源效率優勢 (Stolaroff 等人，2018 年)，此外還需考慮到目前已有使用綠色能源的傳統運具，且當未來商業大型無人機能實際投入商業應用時，其對照之陸路運輸之運具可能已為電動汽車，而非目前的傳統汽油或柴油汽車大不相

同，因此許多文獻顯示無人機是否有益於環境仍存在不確定性。

歐盟環境署於 2020 年出版「載貨無人機與環境」報告中表示(EEA, 2020)，從環保角度使用無人機進行送貨服務有其利弊，相較於許多傳統運具，如摩托車、汽車、貨卡車，在特定條件下，無人機運送有助於減少碳排放量，但仍需要考慮其他因素，如電池生命週期，未來無人機應使用太陽能或風能等再生能源。其他潛在的環境影響與風險，包括噪音污染、對城市環境的負面視覺、碰撞及貨物掉落造成的碎片及其處置(Nentwich 及 Horváth, 2018a) 等。

Park 等人(2018)以韓國為例評估使用無人機、燃油機車、電動機車，比較在城市(首爾)和農村(江原道)地區，以無人機外送披薩對環境的影響。其研究結果顯示，使用無人機平均每公里碳排為機車配送的 1/6，減少 PM_{2.5} 是機車配送的 1/2。此外在農村使用無人機運送的環境效益高於都市，可減少的碳排是城市地區的 13 倍，主要是由於農村地區配送距離較長，若使用再生能源驅動的無人機，將進一步提高無人機對環境的貢獻。

Goodchild 及 Toy(2018) 利用行駛里程 (vehicle-miles traveled, VMT) 標準，估計無人機與貨車運送模式碳排放量，由於無人機一次只能運送一個包裹，每次送達後須回程在進行下一趟運送，使得無人機平均行駛里程遠高於貨車，因此若無人機運送要具備碳排優勢，其應具備低電力需求、較短交付運送距離(收貨點靠近發貨點)、收貨者數量少等送貨條件，並建議利用無人機服務較近區域，傳統貨車運送到較遠區域之“混合”模式，可讓碳排放量最少。

Figliozi(2017) 以生命週期，計算無人機和傳統柴油貨車的二氧化碳排放量，其結論為：雖然無人機每單位距離碳排較低，但若將收貨者分群，貨車可沿路線配送，則無人機將喪失其相對優勢，因為無人機一次只能運送到一個地方，若須交付多個包裹，傳統方式仍較節能。

三、評估方法

3.1 評估項目

本研究採用 Figliozi (2017)，透過比較能源相對效率及碳排相對效率，評估無人機與郵務摩托車的環境的益差異。能源相對效率是指每公里運送距離所需能源 e (單位：千瓦/公里、公升/公里)的比例，而碳排相對效率，代表每公里運送產生的碳排放量 CO_2e (單位： CO_2e 公斤/公里)比例。

本研究碳排計算部分，是計算其二氧化碳當量(carbon dioxide

equivalent, CO₂e), CO₂e 是測量碳足跡的標準單位，概念是把不同的溫室氣體對於暖化的影響程度用同一種單位來表示，如此可將碳足跡不同的溫室氣體來源都以單一的單位來表示。本研究選用較能代表臺灣在地特性的環保署公告碳足跡資料庫係數為基準，計算每單位距離載重的碳排，如表 2 所示。

表 2 碳足跡計算係數彙整表

排放源	單位	排放係數(kgCO ₂ e)
車用汽油	公升 (L)	3.01
電力	度(kwh)	0.66

資料來源：環保署公告 2022 年碳足跡排放係數。

郵務摩托車(C)與無人機 i (UAVi)的能源相對效率及碳排相對效率為式(1)(2)。

$$\rho_{C,Ui}^{en} = e^C / e^{UAVi}, i=1,2,3... \text{-----}(1)$$

$$\rho_{C,Ui}^{em} = CO_{2e}^C / CO_{2e}^{UAVi}, i=1,2,3... \text{-----}(2)$$

本研究分析情境，每台無人機僅能載送一包裹，並於送達收貨人後，再空機折返進行下一趟運送，郵務車能一次載運全部需配送之包裹，沿途送貨完畢再折返。在動力來源部分，郵務車為摩托車且採傳統化石燃料，此假設是因為現階段由於偏鄉地區尚無完善充電站設置，因此中華郵政以電動摩托車配送之作法，當前仍以都市為優先，因此電動郵務車尚不納入本研究進行評估，另將評估兩種不同動力來源的無人機進行比較，其一使用鋰電池，另一使用化石燃料。

能源相對效率代表郵務車一趟完成運送 $\rho_{C,Ui}^{en}$ 數量所消耗的能源等於無人機往返 $\rho_{C,Ui}^{en}$ 趟次運送所消耗的能源。若能源相對效率上升，代表郵務車對燃油的需求減少，也因此載重能力亦是影響相對效率之重要因素，因此本研究另計算每單位載重所需燃料(e_w)及每單位載重之碳排(CO_{2ew})。評估項目彙整如表 3。

表 3 評估項目彙整表

評估項目	單位	郵務摩托車 (C)	編號 i 無人機 (Ui)	相對效率
每單位距離燃料	kWh/km L/km	e^C	e^{UAVi}	$\rho_{C,Ui}^{en}$
每單位距離碳排	kg CO ₂ e/km	CO _{2e} ^C	CO _{2e} ^{UAVi}	$\rho_{C,Ui}^{em}$

每單位載重燃料	Wh/km-kg L/km	e_w^c	e_w^{UAVi}	--
每單位載重碳排	kg CO ₂ /km- kg	CO _{2ew} ^c	CO _{2ew} ^{UAVi}	--

資料來源：本研究整理。

3.2 無人機及郵務摩托車樣本蒐集

本研究無人機樣本數據取自於 111 年參與運輸研究所整合示範計畫之 4 款無人機機型及驗證資料，分別編號為 A 至 D。在機型部分，D 號為多旋翼無人機，其於三款均為單旋翼直升機機種，值得注意的是 D 號空機重量遠高於其他機型，且總重(含電池重)遠高於其他三台，在能源使用部分，B 型使用汽油燃料，其他三台均使用電池，規格彙整如表 4。

通常較大的無人機具有較高載重能力，而起飛重量較高(酬載較多能源)的無人機具有更長的航程，但若分析表 3 各機型之載重、起飛重量及能源重量間的關係，發現前述兩者間皆不一定具線性關係，在不同機型間差異性大，使用汽油較具優勢，此如前章節所述，由於汽油之重量能量密度較高，使得其要達到同樣續航力時，所需之燃料量可較少，連帶降低總重。考量編號 A 與編號 C 機型及效能雷同，因此本研究挑選編號 B、C、D 作為後續案例分析對象。

表 4 四款無人機規格

單位：公斤

無人機編號	A	B	C	D
機型	單旋翼	單旋翼	單旋翼	多旋翼
動力來源	電池	汽油	電池	電池
空機重量	12.6	17	10.9	35
無人機重量 (空機+電池/汽油)	27.33	19.5	22.24	79.06
載重	5.1	7.59	7.64	16.25
起飛重量	32.4	27.1	29.9	95.31

資料來源：運輸研究所無人機整合示範計畫(II)。

在郵務摩托車部分，以中華郵政使用之野狼傳奇 RII 125 EFi，油箱容量為 12L，約可載運約 100 公斤包裹，平均油耗為 44.9km/L，其負載續航距離為 538.8 公里。

為了能確實比較電力與汽油間的能源效率，本研究根據經濟部能源局

的能源產品單位熱值表，一公升車用汽油的熱值約為 7800 大卡，而每度電的熱值為 860 大卡，經過換算一公升汽油的熱值相當於約 9.07 (=7800 大卡/860 大卡) 度的電。

郵務摩托車及三款無人機之載重、能源儲存容量及續航能力等樣本規格蒐整如表 5。

表 5 無人機與郵務摩托車樣本規格

分析項目 (計算單位)	郵務摩托車	無人機編號		
		B	C	D
載重(kg)	100	7.59	7.64	16.25
能源儲存容量 (Wh; L)	12 L (=108,840Wh)	3.6L (=32,652Wh)	3,256Wh	6837.6Wh
負載續航距離 (km)	538.8	150	48	12

資料來源：本研究蒐集。

依據表 2 碳足跡計算係數計算郵務摩托車及無人機每公里二氧化碳當量如式(3)-(4)。

$$3.01 \quad * \quad (\text{L/km}) \quad = \quad (\text{kgCO}_2\text{e/km}) \quad \text{-----}(3)$$

$$0.66 \quad * \quad (\text{kWh /km}) \quad = \quad (\text{kgCO}_2\text{e}) \quad \text{-----}(4)$$

無人機與郵務車相對效率計算結果如表 6 所示。若比較使用汽油燃料的郵務車及無人機 B 號顯示，郵務車具較佳燃油效率，B 號無人機每公里送貨所需的能源為郵務車 2.85 倍，亦可解釋為郵務車單趟送貨所需的能源，等同於無人機往返 2.85 次。且郵務車比起 B 號無人機具較高碳排效率，B 號無人機單趟運送碳排為郵務車的 6.33 倍。若同時比較三台無人機表現，C 號無人機之能源及碳排表現均優於 B 及 D，C 號無人機的碳排低於郵務車，每公里碳排僅有郵務車的 0.67 倍。

表 6 無人機與郵務摩托車相對效率表

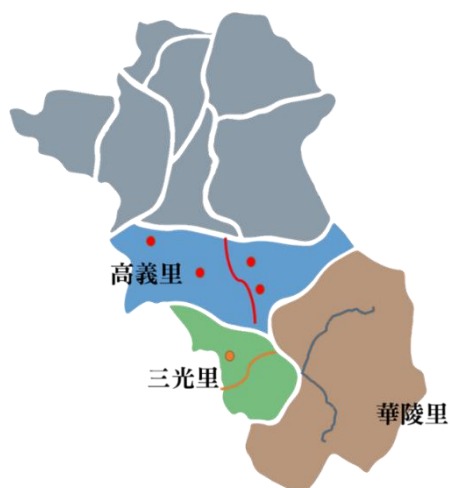
分析項目 (計算單位)	郵務摩托車	無人機編號			相對效率		
		B	C	D	B	C	D
每單位距離 所需燃料 (L/ km, Wh/km)	0.022 L (=200Wh)	0.024 L (=217.7Wh)	67.83	569.8	1.09	0.34	2.85
每單位距離 碳排 (kgCO ₂ e /km)	0.06	0.07	0.04	0.38	1.16	0.67	6.33
每單位載重 所需燃料 (Wh/km-kg)	2	28.68	8.88	35.06	--	--	--
每單位載重 碳排 (kgCO ₂ e /km-kg)	0.0006	0.027	0.005	0.023	--	--	--

資料來源：本研究估算。

3.3 配送地點

本研究以桃園市復興區中高義里、三光里及華陵里等三區域之郵件配送量進行配送案例分析，行政區域配置圖如圖 2 所示。經中華郵政蒐集該三區域自 111 年 3 月 14 日至 18 日期間平均郵件量統計資料，以 Google Earth 量測各地區之總面積，估算各地區之人口密度，整理如表 7。

表 7 顯示各區域往返里程部分，以華陵里最長，推論可能是由於該里的面積最廣，僅規劃兩個投遞路線。在包裹數量部分，以高義里最多，該里的人口密度最高，規劃的投遞路線也最多。三光里的往返里程及包裹數都最少。此外，此三區域平均包裹重量均落在 5 至 7 公斤之間，從本研究所列之 3 型無人機均具備酬載能力。



資料來源：本研究繪製。

圖 2 桃園市復興區行政區域配置圖

表 7 桃園市復興區郵件量統計資料 (111 年 3 月 14 日至 18 日)

投遞區域	包裹數(件)	平均包裹重(公斤)	包裹重 (公斤)	往 返 里 程 (公里)
高義里【總人口數：869(265 戶) 、面積：69.62 平方公里 、人口密度:12.48】				
台七線	4.6	6.65	30.6	5
蘇樂部落	2.2	5.18	11.4	10
高義蘭部落	4	5.5	22	4
內奎輝部落	2.6	6.69	17.4	2
雪霧鬧部落	3	5.86	17.6	2
加總	16.4	6.03	99	23
三光里【總人口數：798(239 戶)、面積：23.76 平方公里、人口密度: 33.58】				
三光部落	2.2	5.63	12.4	13
復華道路	3	5.8	17.4	5
加總	5.2	5.71	29.8	18
華陵里【總人口數：1384(525 戶)、面積：92.95 平方公里、人口密度: 14.88】				
光華道路	3.8	5.8	22.2	12
巴陵地區	4.2	6.14	25.8	15
加總	8	5.97	48	27

資料來源：本研究整理。

四、案例分析

4.1 案例分析結果

本章節比較郵務摩托車及無人機進行包裹運送環境效益評估之案例分析，分析結果如表 8。

首先比較在不同區域郵務摩托車及無人機的相對效率表現，結果顯示當往返里程越長如華陵里，郵務摩托車相對效率遠優於無人機，反之往返里程越短，亦代表收貨者越集中，則郵務摩托車優勢減弱，但仍優於無人機。若進一步比較不同無人機的表現，C 號無人機相對效率均優於 B 及 D 號。在里程最短的三光里，C 號無人機所需燃料低於郵務摩托車，但其碳排仍高於郵務摩托車。

由於無人機每趟只能載送一件貨物，完成所有送貨所需的里程數，遠高於可沿路送貨之郵務摩托車，此弱化無人機優勢，即使使用汽油的 B 號無人機亦無優勢，所需燃料為郵務車的近 3.5 倍。而郵務摩托車碳排低於無人機，除汽油能量密度高於電池外，研判是當前對摩托車能源效率之要求較嚴格所致。

表 8 相對效率分析結果

區域 (特徵)	分析 項目 (單位)	郵 務 摩 托 車	無人機編號			相對效率		
			B	C	D	B	C	D
高義里 (包裹 數量最 多)	所需燃料 (Wh)	4,600	15,717	4,897.3	41,139.6	3.42	1.06	8.94
	總 碳 排 (kgCO ₂ e)	1.52	5.21	3.23	27.15	3.43	2.13	17.86
華陵里 (往返 里程最 長)	所需燃料 (Wh)	5,400	23,672	7,366.3	61,880.3	4.38	1.36	11.46
	總 碳 排 (kgCO ₂ e)	1.79	7.85	4.86	40.84	4.39	2.72	22.84
三光里 (往返 里程最 短)	所需燃料 (Wh)	3,600	9,491	2,957.39	24,843.3	2.64	0.82	6.90
	總 碳 排 (kgCO ₂ e)	1.19	3.14	1.95	16.40	2.63	1.64	13.76

資料來源：本研究計算整理。

若進一步以每單位載重分析如表 9 所示，由於高義里包裹總重高達 99 公斤，使用郵務摩托車配送的優勢遠高於無人機，而包裹總重最低的三光里，而相對效率最佳的無人機 C，每單位載重所需燃料仍優於郵務摩托車。

然而值得注意的是，由於在本案例分析地點，其包裹平均重量僅 5 至 7 公斤，原設計具備高酬載的 D 號無人機，無法展現其優勢，反而使得能源效率及碳排表現相對其他機型更不理想。

表 9 每單位載重分析結果

區域 (包裹總重)	分析項目 (單位)	郵務摩托車	無人機編號		
			B	C	D
高義里 (99 公斤)	平均每單位載重 能源需求(Wh)	46.46	176.27	54.92	461.37
	平均每單位載重 碳排(kgCO ₂ e)	0.02	0.06	0.04	0.30
華陵里 (48 公斤)	平均每單位載重 能源需求(Wh)	112.50	489.38	152.48	586.42
	平均每單位載重 碳排(kgCO ₂ e)	0.04	1.5	0.85	1.19
三光里 (29.8 公斤)	平均每單位載重 能源需求(Wh)	120.81	344.89	107.46	246.76
	平均每單位載重 碳排(kgCO ₂ e)	0.04	0.11	0.78	0.92

資料來源：本研究計算整理。

4.2 無人機應用之條件

從上述可知無人機 C 相較於其他無人機能源及碳排效率較佳，但僅有在往返里程最短的區域，其能源需求才得以優於郵務摩托車，然而若未來考量導入無人機在物流運送服務，至少須達到目前郵務摩托車相同的表現，因此本研究進一步以無人機 C 要達到郵務摩托車的能源效率及碳排，至少所需的續航能力進行分析，如表 10。

以目前 C 號無人機之續航力為 48 公里進行比較分析，結果顯示在華陵里及高義里部分，應有機會達到與郵務摩托車相同能源效率，除透過目前電池技術突破，也可透過導入其他動力來源，如燃料電池。然而要達到

郵務摩托車相同的碳排水準，現有電池能量密度要提升 2 至 3 倍，但以現有鋰電池技術似乎較困難。

表 10 C 號無人機續航能力要求

區域	無人機航行距離(km)	達到相同能源效率所需續航能力(km)	達到相同碳排所需續航能力(km)
		C 號無人機=48	
華陵里	108.6	62.48	130.38
高義里	72.2	51.1	102.08
三光里	43.6	39.43	78.74

資料來源：本研究計算整理。

另在無人機商業應用的另一項關鍵考量為運送成本，本研究估算無人機 C 可能的物流費用，假設在不計入其他成本，僅以每單位距離載重所需電力估計物流服務費用之成本的條件下，在不同的運送距離(30-50 公里)及不同的包裹重量(10-25 公斤)，估算無人機 C 可能的物流費用，如表 11。

在距離最短及包裹最重的運送條件下，無人機每單位載重的運送能源需求約 85 瓦，若以 2020 年車用鋰離子電池組每瓦成本約 0.1 美元(=3.2 元)，汽油每公升約 30 元，無人機每單位運送能源成本遠高於郵務摩托車。

表 11 C 號無人機每單位載重之能源需求 單位：Wh

運送距離 (km)	包裹重 (kg)			
	10	15	20	25
30	203.49	135.66	101.745	81.396
40	271.32	180.88	135.66	108.528
45	305.235	203.49	152.6175	122.094
50	339.15	226.1	169.575	135.66

資料來源：本研究計算整理。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 本研究利用案例分析，分析三款無人機與現有中華郵政之郵務摩托車，在桃園復興區華陵里、高義里及三光里進行包裹運送，以能源消耗及二氧化碳排放量比較其環境效益，其結果顯示導入無人機要具備碳排優勢的條件，結果顯示無人機物流運送要具備能耗優勢，其應具備條件包括無人機的能源消耗應該再降低，且適合用於貨物交付距離較短之需求服務(運送往返里程較短)，此結果亦符合文獻之研究結論。
2. 本研究假設無人機每趟只能載送一件貨物，要完成所有運送之里程數，遠高於可沿路送貨之郵務摩托車，以目前無人機鋰電池的能量密度(約為 9-11g/Wh)，幾乎無法達到與汽油驅動郵務摩托車相同的能耗效率，因此只有當收件人數量較少的情況，無人機才具有優勢，又或許由於郵政公司為讓郵務士可沿路線配送，已經將郵路進行分群，此也是造成無人機喪失其相對優勢之原因。然而在碳排效率部分，由於鋰電池能量密度突破有其難度，其碳排幾乎不可能低於燃油摩托車。
3. 在估算無人機運送成本部分，本研究以僅考慮能源成本的前提下進行估算，若以目前鋰電池每瓦成本約 0.1 美元(=3.2 元)，汽油每公升約 30 元，若每趟僅能運送低酬載的郵件，無人機運送成本遠高於郵務摩托車。

5.2 建議

1. 以國內直升機型無人機使用氫燃料電池測試案例，氫燃料電池能量密度高達 26g/Wh，已是鋰電池的 2 倍以上，因此若要提高無人機運送的環境效益，應鼓勵研發更多元的無人機動力來源。
2. 受限於資料取得，本研究僅探討 3 種無人機機型，然而因為各機型特性不同，未來可納入更多機型進行探討。
3. 本研究假設無人機航程與摩托車相同，惟無人機飛行所需之單趟往返里程應該較低，所以在里程計算上有高估無人機總航程的可能性，建議可以實際地形模擬飛航路徑進行分析。
4. 由於無人機之優勢在於陸路無法到達或者難以到達的地區提供運送服務，因此未來研究可就不同的使用情境，例如人口密度高的都市、無郵路之區域，或需高酬載的區域進行分析。

參考文獻

1. Robillard, K., & Byers, A. (2013, December 2). Amazon drones: The obstacles.
2. Rosen, J. W. (2017, June 8). Blood from the sky: an ambitious medical drone delivery system hits Rwanda. MIT Technology Review website.
3. McFarland, M. (2017, February 21). UPS drivers may tag team deliveries with drones. CNNMoney website.
4. Drone Industry Insights (2017). Drone Energy Sources – Pushing the Boundaries of Electric Flight.
5. Stolaroff, Joshua; Samaras, Constantine; O'Neill, Emma; Lubers, Alia; Mitchell, Alexandra; Ceperley, Daniel (2018): Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. In: Nature Communications 9 (1), p. 409. Online available at <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02411-5.pdf>.
6. European Environment Agency (EEA) (2020). Delivery drones and the environment. Online available at <https://www.eea.europa.eu/publications/delivery-drones-and-the-environment>.
7. Nentwich, Michael; Hórvath, Delila Mercédesz (2018): Delivery drones from a technology assessment perspective. Overview report, No. 2018–01. Vienna: ITA. Online available at http://www.austriaca.at/0xc1aa5576_0x00377231.pdf,
8. Park, J., Kim, S., & Suh, K. (2018). A comparative analysis of the environmental benefits of drone-based delivery services in urban and rural areas. Sustainability, 10(3), 888.
9. Goodchild, A., & Toy, J. (2018). Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO2 emissions in the delivery service industry. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 61, 58-67.
10. Figliozzi, M. A. (2017). Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (Drones) CO2e emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 57, 251-261.
11. 環保署 (2022). 碳足跡排放係數. Online available at <https://data.gov.tw/dataset/28176>.