

應用手機信令軌跡資料推估通勤道路之時空地震災害風險

Estimation of Space-Time Traffic Corridor Earthquake Risk Exposure Based on Cellular Trajectory Data

陳彥儒^a張家浚^b張國楨^c

Yan-Ru Chen

Jia-Jun Chang

Kuo-Chen Chang

Abstract

Due to the special geographical location of Taiwan, hazards such as earthquakes and typhoons occur very frequently. According to statistics, from 1948 to 2019, typhoons occurred 3.6 times, and earthquakes occurred 0.5 times on average per year. Although there are fewer earthquakes than typhoons, the earthquake's average negative social and economic impacts are extremely severe. Being in such a vulnerable environment highlights the importance of disaster risk assessment. When assessing disaster risk, the space-time dynamic characteristics of risk are often ignored, and it is impossible to provide disaster prevention decisions on a more accurate space-time scale. In order to include space-time characteristics of population movement to risk assessment, Call Detail Record (CDR) data were used because it can obtain more samples of real population dynamics at a lower cost. In this study, traffic corridor data were analyzed at different time windows to observe space-time patterns, so that the static disaster risk assessments in the past can be improved.

The results of this research show that the corridor exposure and risk value both rose sharply from 06:00, until slowing down at 12:00. It rose again and reached the highest value near 17:00, and then gradually decreased to the early morning of the next day. Zhongzheng Road, Zhongshan Road, and National Freeway 10 were the main risk peak corridors. The space-time risk distribution of corridors was analyzed based on emerging hotspots. The two time windows, "03:00 - 08:00" and "11:00 - 17:00", showed higher risk hotspot intensity, but the former hotspot appeared later in the time trend, while the latter hotspot gradually intensified. The data mining results of the disaster risk space-time patterns can improve the risk perception in the mitigation phase, and assist in the preparation of simulation exercises in the preparedness phase. In addition,

^a 國立臺灣師範大學地理系碩士

Master, Department of Geography, National Taiwan Normal University

^b 國立臺灣師範大學地理系大學生

Undergraduate student, Department of Geography, National Taiwan Normal University

^c 國立臺灣師範大學地理系教授，通訊作者 (email: kcchang@ntnu.edu.tw)

Corresponding author, professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University

it can also plan the dispatchment of equipment and supplies on a more accurate space-time scale as well as improve transportation planning in order to enhance local capabilities when facing disasters.

Keywords: Call Detail Record (CDR), space-time analysis, earthquake disaster risk assessment

摘 要

臺灣由於地理位置的特殊性，地震、颱風等自然災害頻傳。統計自民國 47 年至 108 年為止，平均每年發生 3.6 次颱風，地震為 0.5 次。儘管地震發生次數較少，但平均每次所造成的社會經濟損失卻最為慘重。身處如此的環境之中，更是突顯了災害風險評估的重要性。在評估災害風險時，往往忽略了風險的時間動態特性，無法在更細緻的時空尺度上提供災害防救決策。風險評估其中一個很重要的元素是暴露度，人流適合作為道路上暴露度的指標，於災害風險評估時，動態的因素如人流是影響暴露度最主要的變數，所產出之時空風險地圖於平時便能提升該地居民的風險知覺，也可幫助救災人員於事前制定應變措施，而手機信令資料能夠以較低的成本取得真實的人口動態暴露數據。本研究藉由此數據在風險評估中加入人口移動的時空動態特性，研究區設定為高雄市內，切分不同的時間區段，藉此挖掘並觀察通勤道路的地震災害風險時空模式，改善以往假定靜態災害風險的不足。

研究成果顯示：道路暴露度與風險值皆由 06:00 急遽上升，12:00 稍趨緩，直到接近 17:00 時再度上升並達到最高值，隨後逐漸下降至隔日凌晨。空間分布則是以中正路、中山路、國道 10 號為主要風險高峰道路。道路的風險時空分布以新興熱點分析後得知，凌晨至通勤尖峰與中午至通勤尖峰這兩個時段呈現較高風險熱點強度，但時間趨勢上前者熱點較晚出現，後者熱點則是逐步增強。災害風險的時空模式探勘結果，能夠在減災階段上提升風險知覺；在整備階段，能夠協助兵棋推演腳本的擬定，並且以更細緻的時空尺度規劃設備物資的調度、以及交通的規劃，增強地方的災害應對能力。

關鍵詞：手機信令資料、時空分析、地震災害風險評估

前 言

（一）研究背景與動機

臺灣位處環太平洋火山地震帶上歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界處，四面環海且擁有豐沛的雨量，也因為地理位置的特殊性而造成地震、颱風等自然災害頻傳。內政部消防署（2019）的天然災害統計資料中統計了民國 47 年至 108 年重大自然災害的損失統計如表 1，以颱風災害發生次數最多總計發生了 226 次，平均每年發生 3.6 次，而平均每次造成傷亡失蹤、房屋倒塌的數量則是以地震災害遠遠高於其他災害種類。臺灣面對這些破壞力大且嚴重影響社會安全的天然災害，足以顯示了災害管理以及風險評估的重要性。然而，災害風險的計算時常忽略了社會環境動態的脆弱度條件，假定靜態的災害風險，對於災害發生前的減災與整備階段上，無法提供更準確的防救災決策、以及物資設備的調度安排，社會環境的安全性將大大降低。

表 1 民國 47 年至 108 年自然災害的損失統計

災害種類	發生次數	平均每次 傷亡失蹤人數	平均每次 房屋倒塌戶數	平均每年 發生次數	平均每年 傷亡失蹤人數	平均每年 房屋倒塌次數
颱風	226	82	1528	3.6	298	5570
水災	73	35	682	1.2	40	802
地震	28	559	5363	0.5	252	2421
其他	10	20	19	0.2	3	3

資料來源：內政部消防署（2019）。

（二）研究目的

由於假定靜態的災害風險結果並無法準確的衡量災害事件與動態社會條件的影響程度，且欲估計動態人口暴露度的手機信令資料存在時空稀疏特性，需要經過時間與空間上的插值計算，才能有效了解使用者的移動路徑與時間上的分佈情形，故本研究欲透過手機信令資料的時空內插以及地震境況之模擬，推估通勤道路之時空地震災害風險，並探討手機信令資料的應用能在時間與空間的尺度上為災害風險評估結果帶來何種效益。本研究欲達成之研究目的有以下三項：

1. 手機信令資料中使用者的移動路徑分布以及活動趨勢，量化並擷取目標時段的路徑分布數量，作為不同時段下暴露度的數據來源。
2. 地震衝擊資訊平台（Taiwan Earthquake Impact Research and Information Application Platform, TERIA）推估的地表震動分布，計算特定地震事件下道路的損壞機率，並建立災害風險時空分布。
3. 手機信令資料作為暴露度的數據來源，以時空尺度更細緻的災害風險結果，辨識道路風險的時空差異、以及變化模式，藉此增加防救災決策依據的有效程度。

文獻回顧

（一）手機信令資料的特性與應用

隨著物聯網的發展與資訊技術的進步，行動上網與行動裝置日趨普及，現今幾乎人人都有一臺手機，在資訊發達的背後，潛藏的是巨量的資料紀錄。其中手機信令換手所產生的手機信令資料（Call Detail Record, CDR），標註了有關使用者何時、何地進行通信所留下的大量訊息。行動裝置作為環境中無數個潛在的感測器，可以提供不同空間尺度與目標群體的資料分析，如：從全域尺度到區域尺度；從任意手機使用者到特定目標的手機使用者（Lane *et al.*, 2010）。因為 CDR 具有時空特性，其資訊尤其是在人類流動與社會網絡結構層面，構成了一種能夠更好了解城市環境與使用者動態軌跡的方式，也激發各式專業領域的研究發展（Steenbruggen *et al.*, 2015 ; Blondel *et al.*, 2015）。

手機信令資料所帶來的移動大數據應用潛力可以被分為兩類，第一類是挖掘個人的數據，以特定使用者的角度發展相關應用；第二類是挖掘整體的數據，了解人類行為來幫助都市空間的監測或是公

共服務的規劃。也因為手機信令數據提供了從微觀到宏觀的人類行為模式，將有助於理解災害下的社會反應、疾病傳播方式、交通的監控與規畫、以及都市的活動模式，研究結果的應用將能夠協助有效的決策（Cheng *et al.*, 2017；Shaw *et al.*, 2016）。目前已有許多基於手機信令數據的應用研究被發表：

1. 都市空間活動層面

Toole *et al.*（2012）使用 CDR 數據將都市空間進行監督式分類，了解都市中不同區域的人如何根據特定的土地用途以及時間而變化；Ahas *et al.*（2015）使用 CDR 數據測量都市活動的時間模式，並了解到不同都市都有各自的文化與特點，尤其都市與郊區的活動時間模式會存在明顯的差異；Xu *et al.*（2016）根據手機位置數據進行關聯規則分析，從使用者的活動空間特徵了解不同都市的空間活動模式。這些文章表明 CDR 作為人口分布的時空數據，配合不同的輔助資料與分析方法可以有效的理解人類與都市空間的活動模式。

2. 交通層面

Wang *et al.*（2010）從 CDR 中提取旅行資訊，並且以 Google Maps 的旅行時間做為輔助資訊與比較，根據旅行的時間推斷出使用者的交通方式；Iqbal *et al.*（2014）以 CDR 取代耗時且高成本的傳統家庭調查與流量計數據，相較於傳統的數據源，可以取得研究區域真實的交通情況，後續再進行 OD 矩陣的計算，可作為運輸計畫的依據；Alexander and González（2015）以 CDR 數據計算出每日平均的旅次，並計算汽車與非汽車運具的比例，探討了乘車共享服務與交通網絡壅塞的關係，結果顯示乘車共享的服務無法以理想的效率運行，對於交通壅塞程度造成一定程度的影響。這些文章表明相較傳統的旅次調查數據，CDR 是相對低成本、全面、且符合真實交通動態的數據，對於交通層面的分析達到相當大的助益。

3. 疾病與公共衛生層面

Nyhan *et al.*（2016）透過手機動態數據評估空氣污染對於人口的影響程度，以時空動態的角度探討結果，可以協助公共衛生政策進行更準確的環境改善；Tatem *et al.*（2014）在疾病傳播的背景下，透過手機信令資料分析人口一年中的流動模式，將病例數據與人口流動相互結合，從疾病擴散傳染的動態角度，協助疾病風險的控管。以手機信令資料協助理解人口的時空動態模式，確實值得在環境流行病學中加以考慮。

4. 災害防救層面

Wilson *et al.*（2016）透過 CDR 計算了 1200 萬個使用者的移動情形，用來識別與分析 2015 年 4 月 25 日於尼泊爾地震發生前後的人口遷移，透過分析 CDR 數據所產生的轉移矩陣，掌握受災的脆弱人口流動情況，從人口流出量的多寡也能初步識別出地區受地震災害破壞程度的高低；Cinnamon *et al.*（2016）也提到手機信令資料能夠於災前與災時提供風險地圖，在較短的時間內掌握人口動態資訊，有助於災害防救工作的執行。這些研究皆說明了 CDR 的分析能夠展現前所未有的資訊水平，可以有效協助災害管理各個工作階段的進行。

從以上的文獻當中可以理解到，CDR 的價值在於其數據可作為人口時空分布以及時空移動路徑的代表。而在 Shaw *et al.*（2008）的觀點中也提到時空移動路徑能夠提供有效的探索性分析，協助研究

人員觀察時空數據中隱藏的模式和時間趨勢。雖然 CDR 已經成功在不同的領域中展現其應用方式，但資料本身由於基地臺部屬的密集性、以及使用者與電信網絡換手的資訊頻率，造成 CDR 在空間上被記錄的位置隨著基地臺密集度降低而不精準，在時間上無法紀錄使用者每一筆連續的位置資訊，而這種時空稀疏特性（spatiotemporal sparsity），是分析資料前時要意識到的問題（Chen *et al.*, 2018）。在使用資料之前，也需要進行資料插補、清洗等前處理（王晉元，2019）。

（二）災害風險的概念與計算

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2012) 將與災害風險相關的名詞敘述如下，(1) 災害風險（disaster risk）：由危害事件與各種脆弱的社會條件相互作用下，導致不利於人、物、經濟、環境的影響；(2) 脆弱度（vulnerability）：在危害事件下，暴露在危害地區中的元素受到不利影響的趨勢；(3) 暴露度（exposure）：位處可能發生危害事件區域中的元素，如：人員、環境資源、基礎設施、文化資產等；(4) 危害（hazard）：現在或未來可能對脆弱與暴露元素產生不利影響的物理事件。風險的意涵不單只是描述物理的破壞性，其中更是牽涉到地區的脆弱度條件與暴露程度，所以要了解災害風險的本質，需要去瞭解社會與環境的互動，也就是從脆弱度（包含暴露度）開始著手（Field *et al.*, 2012）。

而脆弱度是一個抽象概念，為了瞭解一個地方的脆弱程度，或者是為了後續計算災害風險，有不同脆弱度的指標以及量化方式被提出。蕭煥章（2008）使用戶數、女性人口、總人口、身心障礙者、老幼年人口、不識字人口等指標作為社會面向的脆弱度，自然面向脆弱度採用淹水潛勢之數據，以自然區隔分類法（natural breaks method of classification）將脆弱度商數評分結果劃分為 5 個等級，用以評估水災之地方脆弱度；楊惠萱等（2014）將暴露量、減災整備、應變能力、復原能力等 4 個面向中再分為共計 12 個次類、24 個指標項目，以層級分析法（AHP）決定其權重值並評估天然災害之社會脆弱。洪鴻智、陳令韓（2012）從暴露、敏感性、調適與回應力等面向選取颱風洪災害的脆弱度指標。從這些文獻當中可以發現研究者面對不同的危害類型與研究議題會考量不同的脆弱度面相並選擇相對應的評估項目作為脆弱度指標，由此可知脆弱度所涵蓋的面相廣泛，但大致上可以從物理面、經濟面、環境面、社會面等面向分類（蘇昭郎等，2009），其概念如圖 1 呈現，各面向皆可以由正向與負向的脆弱性指標組成。

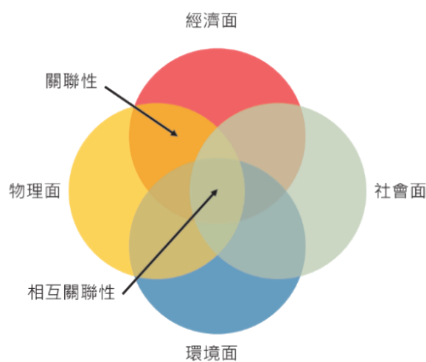


圖 1 脆弱度層面之概念圖

資料來源：蘇昭郎等（2009）。

在災害風險的評估中，通常會以 $\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability}$ 常規公式為基礎去計算。也因為脆弱度所描述的層面廣泛，由正向與負向的脆弱元素組成，故研究者依不同關注的議題與目的，在常規公式中，將隱含在脆弱度後的其他因素獨立出來在風險的公式中表示，使風險的計算結果能夠從關注重點的角度去詮釋。除常規公式之外，還有下列的風險計算方式被提出：

$$\text{Risk} = (\text{Hazard} \times \text{Vulnerability}) / \text{Capacity}$$

Nirupama (2012) 將社區認知 (Community Perception, CP) 加入常規公式中。

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \times \text{CP}$$

Robinson (2017) 以氣候變遷的條件下，將災害風險定義為災害損失或衝擊、危害度、暴露度、脆弱度和災害的特徵等相互作用的結果。科技部災害管理資訊研發應用平台，於氣候變遷與淹水災害的環境背景下，將氣候變遷導致之氣候特性變化衝擊作為危害指標，淹水潛勢資料的淹水深度作為脆弱度指標，人口密度作為暴露度指標，將數據標準化處理後，也是以下列公式為基礎，計算風險結果。

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Exposure} \times \text{Vulnerability}$$

綜合上述文獻對於災害風險的計算公式描述，災害風險可被視為由危害事件與各種正向與負向的社會條件（脆弱度、暴露度、容受力……等）相互作用下，導致不利於人、物、經濟、環境影響的可能性。其核心的概念仍圍繞著常規公式，而具體的計算因子或是指標該如何選擇，並沒有統一的答案，依照地區的不同、探討議題的不同、危害類型的不同，而有相對合適的方法進行災害風險評估作業。而現階段的災害風險計算公式中，其關注的議題大都鎖定在脆弱度指標的選擇，以及如何量化變數，鮮少考慮到這些變數在時間上變化的問題，造成目前評估災害風險缺少時間動態的考量，將其評估結果套用至所有的時間點上。

（三）災害管理

美國聯邦緊急事務管理總署 (Federal Emergency Management Agency) 以四個工作階段描述災害管理中的任務循環，如下圖 2。透過這個方式將災害管理概念化，有助於對防救災工作目標的理解 (Lindsay, 2012)，此四個階段分別為：

1. 減災 (Mitigation)，減災階段需要辨識危害與風險，透過結構性方式（如：修建堤防、房屋結構補強）、或者是非結構的方式（如：修訂法規、購買保險），減少災害事件所帶來的衝擊。
2. 整備 (Preparedness)，整備階段重點著重於相關人員在面對災害事件時，可以先行透過教育訓練、兵棋推演、盤點防救災物資等方式，增加應變災害的能力。
3. 應變 (Response)，應變階段為災害事件發生時，部署應變組織，並執行應變計劃，以保全生命財產為目標。
4. 復原 (Recovery)，復原階段目的在於修復損壞，將受災地區的基本服務恢復到原來的水準。



圖 2 災害管理四階段循環

從概念上來說，災害事件發生之前為減災與整備的工作階段，以宏觀的角度落實相關工作事項，在事前預防災害事件所帶來的衝擊；發生災害時進入應變階段，執行救災並保全災民生命安全；而災後則進入到復原階段，將受災地區回復至災前的水準。但實際上此四個工作階段在時間線上並沒有明確的分界點，各階段往往會有一定的時間重疊，時間重疊的長短及各階段執行時間的長短，基本上受到災害的種類與嚴重性所影響（Khan *et al.*, 2008）。

（四）地震災害衝擊與風險評估

地震災害相比風災、水災等，能夠造成更大的社經、人員損失，而地震災害的風險評估則是降低風險與提高社會安全的基本工具，也是執行防救災決策的第一步。Robinson（2017）對於評估地震災害與風險，指出此過程涉及(1)建立地表震動與頻率之模型；(2)定義暴露於地震災害下的元素數據；(3)由地震震動強度下建立的脆弱度損失函數。也提到此風險評估中，地表震動與頻率模型產出之結果分佈可以使用暴露度和脆弱度函數（危害下破壞狀態的機率）來計算損失或損失的分布。臺灣目前已有兩套地震災害風險評估系統結合了地動模型、暴露度和脆弱度函數，並開發為不同的分析模組，做為地震災害衝擊境況下救災決策、以及地震演練腳本的依據，(1)TERIA 提供之地動、液化、建物、人口、

道路、橋梁、供水、電力衝擊分析模組（國家災害防救科技中心，2016）；(2)臺灣地震損失評估系統（Taiwan Earthquake Loss Estimation System, TELES），提供地震災害潛勢分析、工程結構物損害評估、地震引發的二次災害、直接社會經濟損失等分析模組（國家地震工程研究中心，2016）。

目前已經有許多透過 TELES 與 TERIA 模擬與推估結果而進行的研究與防救災計畫，如黃凱昀（2016）以自行調查之時空人口數據配合 TELES 的模擬結果推估災損；何明錦等（2009）應用 TELES 推估結果作為地震災害潛勢指標，並將人口與社會經濟、土地使用、相關設施與人力資源等構面之資料作為脆弱度與暴露度因子，最後結合計算出地震災害風險指標；謝馨頤等（2016）以及陳人卿等（2018）進一步分析 TERIA 評估的地震衝擊結果，探討地震事件後可能引發的各項議題並指出區域性的防災弱點；各地方政府為因應災害防救法要求所擬定的地區災害防救計畫、以及各地區的地震災害兵棋推演規劃，目前多透過 TELES 的推估結果協助撰寫。TELES 與 TERIA 兩者分析的結果類似，但出發點略有差異，TELES 從災後的需求面出發，提供平時的物資整備，而 TERIA 則是從災後的供給面出發，提供災前的減災規劃與應變依據。從空間層面來說，兩者最大的差異在於分析結果統計單元的不同，TELES 以村里為單位，而 TERIA 則以 500*500 公尺的網格為單位（莊睦雄等，2017），可以得知 TERIA 能夠對於分析結果的地理分布產生較佳的效果。

TELES 與 TERIA 大部分的分析模組是由最大水平地表加速度（Peak Ground Accerlation, PGA）、最大水平地表速度（Peak Ground Velocity, PGV）、及永久地表位移量（Peak Ground Displacement, PGD）等地震潛勢，配合不同結構物之易損曲線去計算該地震事件下的損壞機率，人口衝擊或避難人數的推估則會以建築物的損壞機率以及人口數量配合計算。從風險的計算公式來說，可以理解為：

為某地震事件下的地表震動情形，可以為 PGA、PGV、或是 PGD。為某結構物之易損曲線。若有評估與人口相關的衝擊，並解考量了不同時段下不同空間的人口數量權重。以此方式的計算結果，描述的是在某地震事件下，特定結構物的損壞機率影響暴露人口的風險期望值。

（五）災害風險與手機信令資料的結合

對於社會安全以及公共衛生安全而言，自然災害、環境風險的對策與管理至關重要，而掌握人口流動性的特徵則是了解災後人口遷移模式與災時人口動態暴露度的關鍵因素，雖然暴露度與脆弱度的時空動態整合評估於災害風險管理中是重要的組成之一，但其動態特性在不同的研究當中經常被忽視，假定靜態的災害風險結果並不夠完善，應該考量動態特性來提高風險分析的質量。傳統分析動態人口流動性的方式是以家戶調查與人口普查的資訊為主，雖然可以從數據中得知流動性，但其數據可能涉及回憶偏差（Recall Bias）與樣本大小與成本過高等問題限制，再加上普查數據為特定時間點的人口狀態，對於災害風險管理與社會安全而言，取得連續性的人口資料才能有效掌握人口的流動性，政府的決策與評估才能更加準確（Aubrecht *et al.*, 2013；Wesolowski *et al.*, 2014）。

以準確評估人口遭受災害影響的風險為目的，有時空人口的研究與模型被提出，Renner *et al.*,（2018）在假定人口總量不變的原則下，以居住地-交通路網-目的地的人類活動模型，重新分配人口的時空分布，並將人口作為暴露度資訊評估自然災害風險；Smith *et al.*,（2016）按照不同年齡的人口活動特性建置動態模型，以兩個小時為區間計算人口暴露度，並與描述洪水發生機率的洪水地圖整合以評估洪水災害風險；黃凱昀（2016）以實地調查的方式蒐集時空人口分布特性，並將調查之成果使

用至臺灣地震損失評估系統 (TELES) 中，模擬人員的傷亡情形，相比 TELES 內建不同時段的人員傷亡結果，自行調查的人口數據能夠更好的顯示傷亡推估結果於時空的變異性。這三項研究皆以人為風險評估對象，並試圖解決以往靜態人口數據造成風險評估質量不佳的問題，雖然與以往靜態的風險結果相比，能發現風險的時空特性，但同時也說明了動態人口模型無法避免前提假設與結果的不確定性，而實地調查的方式則是受到時間成本與操作限制，難以進行大範圍的分析。相對的，分析與挖掘 CDR 數據，能有效的理解都市空間的活動模式，並能夠以相對低成本的方式取得較全面、且符合真實狀態的動態人口數據 (Steenbruggen *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2010)。

為了將手機信令資料作為動態人口特徵的暴露程度用於災害風險計算，首先會遇到的是 CDR 時空稀疏特性的問題，對於移動軌跡的處理方式，通常會以時空內插以及濾波的演算法補足資料先天上的缺陷，如：Lind and Batrashev (2017) 使用增強型卡爾曼濾波器 (Kalman filter) 校正並估計使用者位置，結果顯示估計前後停留狀態的 CDR 位置平均誤差大約減少 0.5 公里、移動狀態的 CDR 位置平均誤差大約減少 6.5 公里、整體的平均誤差大約減少 0.5 公里。為了在離散的時空位置數據中還原完整資訊，Yu and Kim (2006) 和 Yu *et al.* (2004) 以基於線性與非線性的內插法估計移動軌跡資料在時間上連續的位置，其中以多項式的曲線內插方式相比線性內插，對於車輛運動軌跡的還原表現更好。Long (2016) 除了線性內插的方法外，也使用了 Kinematic Path Interpolation、Constrained Random Walk、Bezier Curve、Catmull-Rom Curve 等方法，比較不同的軌跡數據（動物、自行車、颶風、運動員）內插結果的表現。不同的內插法各有自己的假設與考慮到因素，線性內插假設移動對象的速度在每個內插的時間區段內不變的，通常在大部分的情況下與原本的軌跡資料比較會產生較多的誤差，而非線性的內插法則是考量移動物體的速度與加速度特性，由 Long (2016) 的研究結果可以得知，Kinematic Path Interpolation、Catmull-Rom Curve 等方法，對人（自行車、運動員）進行插值較為合適。除此之外，王晉元 (2019) 透過判斷手機使用者的「停留」以及、「移動」兩種狀態，將手機信令資料的漂移與缺漏情形進行不同方式的資料清洗處理，停留狀態者，以單位面積內最大停留時間比例的位置作為停留的代表點；移動狀態者，將比對公路與軌道路線，校正並插補缺漏之資料。

由於手機數據的巨大潛力，Cinnamon *et al.* (2016) 提到在災害管理中使用手機信令資料的定位，如圖 3 所示，CDR 作為即時的動態人口暴露數據，能夠提供動態風險地圖，提供整備與應變階段使用，作為歷史的人口移動數據，亦能進一步協助應變階段對策的擬定。

災害風險中使用手機信令資料的意義在於加入人口的動態條件，改善以往假定靜態災害風險結果的不足。在災害風險的計算過程中，適當的推估手機信令資料在時間上的連續性後，能夠完整的了解手機使用者的移動軌跡。而此時空移動路徑將能進行有效的探索性分析，觀察到更多數據中隱藏的模式和時間趨勢 (Shaw *et al.*, 2008)，同時以相對低成本的方式取得較全面的數據。藉由此數據作為人口的動態暴露程度，可以進一步計算災害風險的時空分布，並挖掘時空數據，以更細緻的時間尺度之結果觀察風險的時空差異，並且時空風險評估之結果能夠協助災前減災與整備等階段之工作，提高災害風險評估的質量。

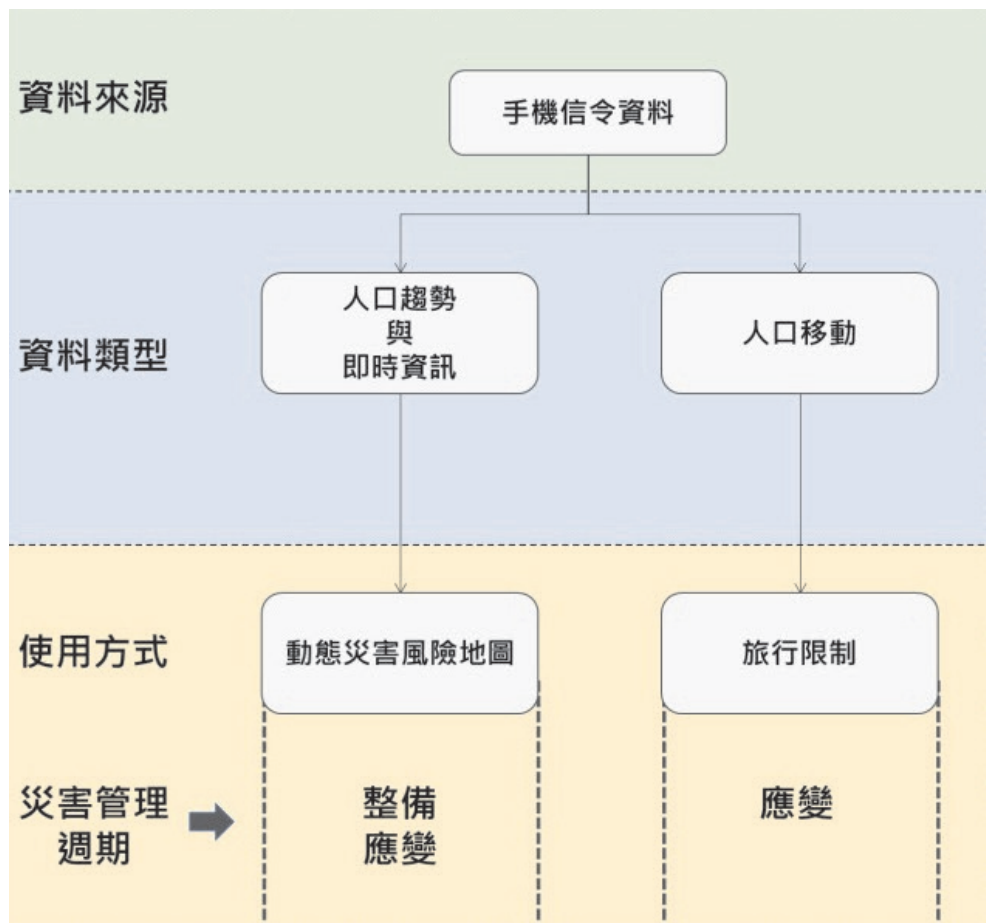


圖 3 手機信令資料於災害管理週期中的使用地圖

資料來源：參考自 Cinnamon *et al.* (2016)。

研究方法

(一) 研究資料蒐集

手機信令資料來源為 4G 基地臺，由中華電信提供，空間解析度為 50 公尺，時間解析度由使用者與電信網絡傳遞資訊頻率決定，如：使用手機上網、切換基地臺服務範圍、以及大約每小時手機向基地臺被動回傳之資料。資料量共計 5 天 (2018/06/04(一)、06/05(二)、06/06(三)、06/07(四)、06/08(五))。資料中記錄了唯一的使用者識別碼、記錄時間、以及經緯度資訊。資料形式大致如下表 2，記錄對象為行經正修科技大學、輔英科技大學、中山大學、高雄餐旅大學以及樹德科技大學等五個地點之手機使用者。經統計，06/04 至 06/08 分別有 107618、109865、110530、110293 與 110625 位使用者資料。資料分布與資料收集地點如圖 4 所示。

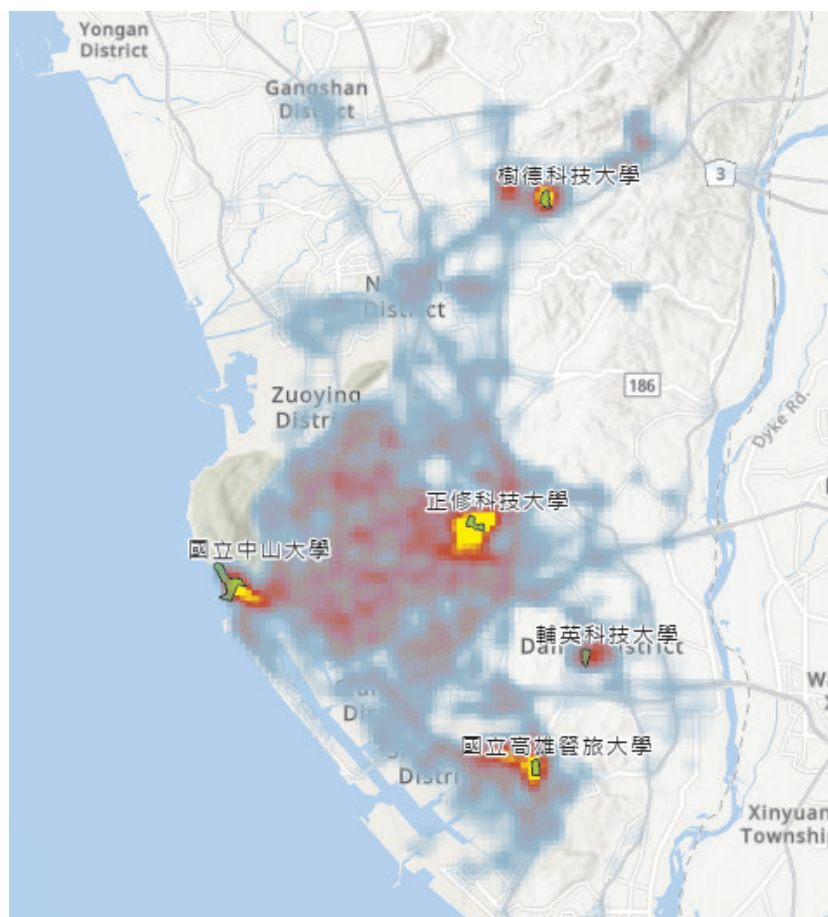


圖 4 手機信令資料分布與資料收集地點

表 2 手機信令資料形式

UserID	TimeStamp	Lat	Lng
05500952b6530ff124f5	2018-06-04 20:40:00	120.371166	22.56453652
05500952b6530ff124f5	2018-06-04 20:43:00	120.3750756	22.56229783
05500952b6530ff124f5	2018-06-04 20:46:00	120.373131	22.56363345

手機信令資料由於環境、設備、手機使用方式的差異，存在資料缺漏以及紀錄位置漂移的狀況。本研究所使用之資料已經由交通部運輸研究所（2019）進行前處理，依照手機使用者的「停留」與「移動」狀態，進行清洗與插補，流程如圖 5。前處理流程中，若信令資料記錄點位在前後 10 分鐘內，有超過 30% 的比例落在 5*5（250m*250m）的網格範圍中，即判斷該使用者為「停留」狀態，反之則為「移動」狀態。而移動狀態的使用者，若信令資料紀錄點位超過 40% 的比例落在重要公路與軌道系統範圍中，則以 5 分鐘為間隔，插補缺漏、以及漂移的數據至公路與軌道的線狀範圍中。

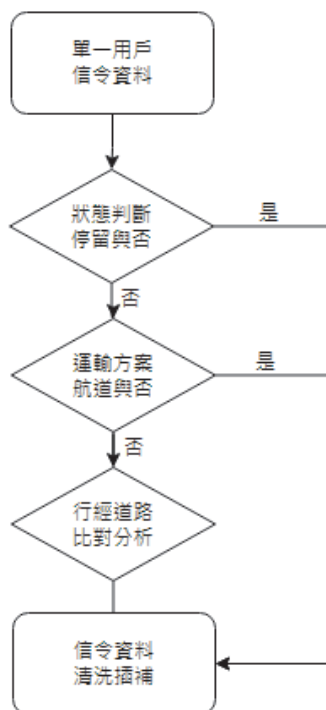


圖 5 手機信令資料前處理流程

資料來源：王晉元（2019）。

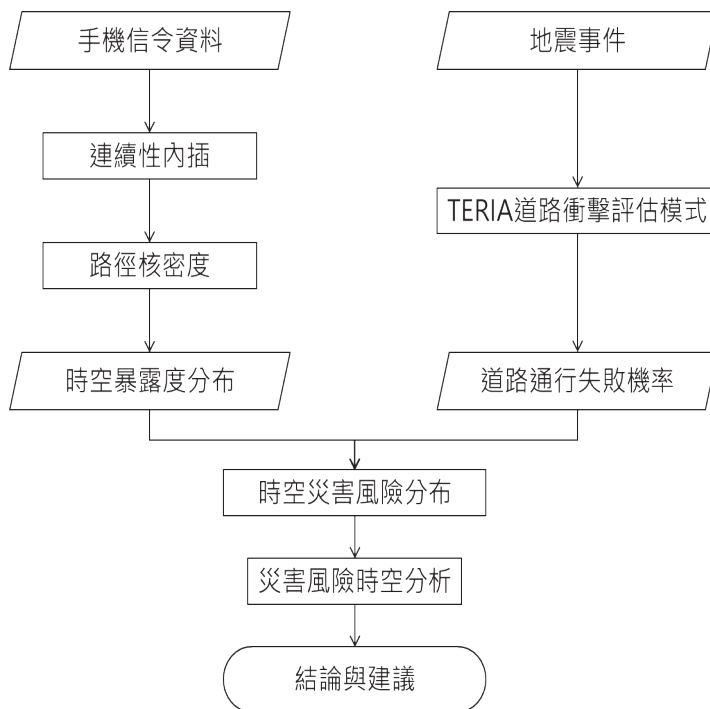


圖 6 研究方法分析步驟

(二) 研究流程

1. 手機使用者移動路徑連續性內插

由於手機信令資料的時空稀疏性，要得知某個時間點的未知位置，需要進行移動路徑的內插處理。得知使用者移動路徑上相同時間間隔的位置後，才能擷取完整目標時段的軌跡，進一步計算移動路徑密度，作為災害風險中的暴露度元素。參考 Long (2016) 使用 Catmull-Rom Curve 的內插方式，在估計自行車連續路徑時，與原始路徑相比，可以以最低的誤差將不連續的路徑還原，故本研究將以 Catmull-Rom Curve 之內插方式，將離散的手機信令位置數據以每 10 秒為頻率內插估計位置。

Catmull-Rom Curve 源自於 Catmull, E., and Rom, R. (1974)，用於計算機圖學領域，此曲線的特點在於，該方法直接使用數據點做為控制點插值，並且其曲線準確通過數據點，如圖 7 所示，在 Long (2016) 的研究結果也表明其運算效率較佳，計算也較為容易，對於對於手機信令的巨量資料運算也較為合適。此非線性內插法透過四個控制點 $z(t_{i-1})$, $z(t_i)$, $z(t_j)$, $z(t_{j+1})$ 估計物體的位置 $z(t_u)$ ， t_i, t_j 為前後兩個觀測值的時間順序， t_u 為欲估計位置的時間點，其中 $t_i < t_u < t_j$ ，其計算方式如下：

$$z(t_u) = \frac{t_j - t_u}{t_j - t_i} B1 + \frac{t_u - t_i}{t_j - t_i} B2 \quad (1)$$

式中：

$$B1 = \frac{t_{j+1} - t_u}{t_j - t_{i-1}} A1 + \frac{t_u - t_{i-1}}{t_j - t_{i-1}} A2$$

$$B2 = \frac{t_{j+1} - t_u}{t_{j+1} - t_{i-1}} A2 + \frac{t_u - t_i}{t_{j+1} - t_i} A3$$

$$A1 = \frac{t_i - t_u}{t_i - t_{i-1}} z(t_{i-1}) + \frac{t_u - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} z(t_i)$$

$$A2 = \frac{t_j - t_u}{t_j - t_i} z(t_i) + \frac{t_u - t_i}{t_j - t_i} z(t_j)$$

$$A3 = \frac{t_{j+1} - t_u}{t_{j+1} - t_j} z(t_j) + \frac{t_u - t_j}{t_{j+1} - t_j} z(t_{j+1})$$

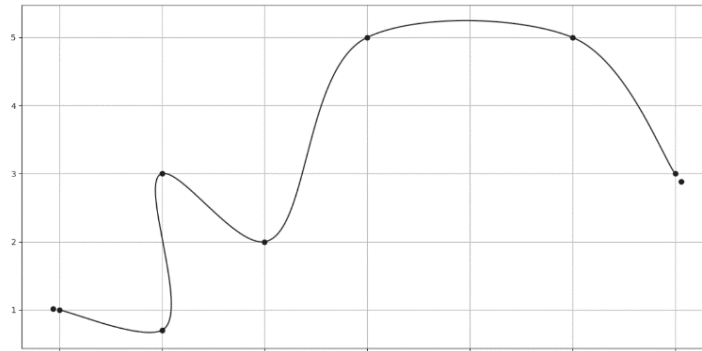


圖 7 Catmull-Rom Curve 插值示意圖

2. 路徑核密度

手機信令資料於道路上所形成的移動路徑不盡其數，其路徑由於資料的時空稀疏性，不全然整齊的分布於道路上，為了更好的觀察其路徑分布趨勢，並在空間上呈現數量，便於後續的災害風險計算，本研究透過核密度計算平滑的路徑密度，作為災害風險中的暴露度。

核密度之計算由 Rosenblatt (1956) 和 Parzen (1962) 提出，是一種非參數方法，透過核函數的疊加計算平滑分布的機率密度。其計算概念如圖 8，在本研究中以每條路徑為中心，設定搜尋半徑的大小建立一個平滑曲線的核表面，數值以路徑中心為最大，向平滑曲線的邊緣遞減至 0，最後加總網格中所有核表面的數值，以計算該網格之密度。計算網格(x, y)核密度之算式如下：

$$Density = \frac{1}{(radius)^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{3}{\pi} \left(1 - \left(\frac{dist_i}{radius} \right)^2 \right)^2 \right] \quad \text{For } dist_i < radius \quad (2)$$

式(2)中radius = 搜尋半徑。dist_i = 路徑線段i與網格位置 (x, y) 之間的距離。i = 1, 2, ..., n，為輸入之路徑線段，並且在Σ中dist_i必須小於radius。

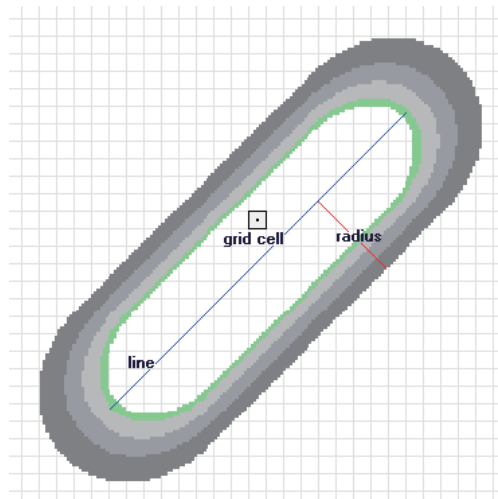


圖 8 路徑的核密度計算示意圖

資料來源：Esri (n.d.)。

3. TERIA 道路衝擊評估模式

參考 Robinson (2017) 對地震災害風險評估之敘述，以地表震動與頻率模型產出之結果以及暴露度和脆弱度函數（危害下破壞狀態的機率）來計算損失或損失的分布。本研究選擇以能夠產生較佳地理分布效果之 TERIA 地震衝擊資訊平台，並使用其道路衝擊分析模組。在輸入特定地震事件參數後，藉由在此地震震動強度下道路的脆弱度函數，計算高雄地區各道路通行失敗之機率。TERIA 道路衝擊評估模式採用 Federal Emergency Management Agency (2010) Hazus®- MH MR5 的道路分級以及易損曲線參數，如表 3。將道路分為二線道與四線道層級，這兩種道路分級皆有相對應不同損壞狀態下，PGD 中位數與變異數 β 的易損曲線參數。透下方算式(3)，在輸入特定地震事件下所產生的永久地表位移量（permanent ground deformation, PGD）之後，計算各路段超越不同損害狀況（輕微損害、中度損害、嚴重/完全損害）下的機率。將其積分繪製累計機率分布，如圖 9，即為道路易損曲線。

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \ln(m)}{\beta} \right)^2 \right] \quad 0 \leq x \leq \infty \quad (3)$$

式(3)中，在對數常態分布下，將 PGD 視為隨機變量 x ， β 為各路段不同損害狀況下 PGD 的變異數， m 為其中位數。

藉由式(3)計算出超越輕微損害($F1$)、中度損害($F2$)、嚴重/完全損害($F3$) 等不同損害狀況下之機率，TERIA 將各路段輕微損害、中度損害、嚴重/完全損害的狀態機率分別計算為 $ds1 = F1 - F2$ 、 $ds2 = F2 - F3$ 、 $ds3 = F3$ ，如圖 3-6 所示，並定義道路通行失敗機率為超越中度損害之機率，即為 $F2 = ds2 + ds3$ 。

表 3 Hazus®-MHMR5 道路分級以及易損曲線參數

道路分級	損壞狀態	PGD 之中位數（英吋）	變異數 β
四線道以上	輕微損害	12	0.7
	中度損害	24	0.7
	嚴重損壞	60	0.7
兩線道	輕微損害	6	0.7
	中度損害	12	0.7
	嚴重損壞	24	0.7

資料來源：劉淑燕等（2014）。

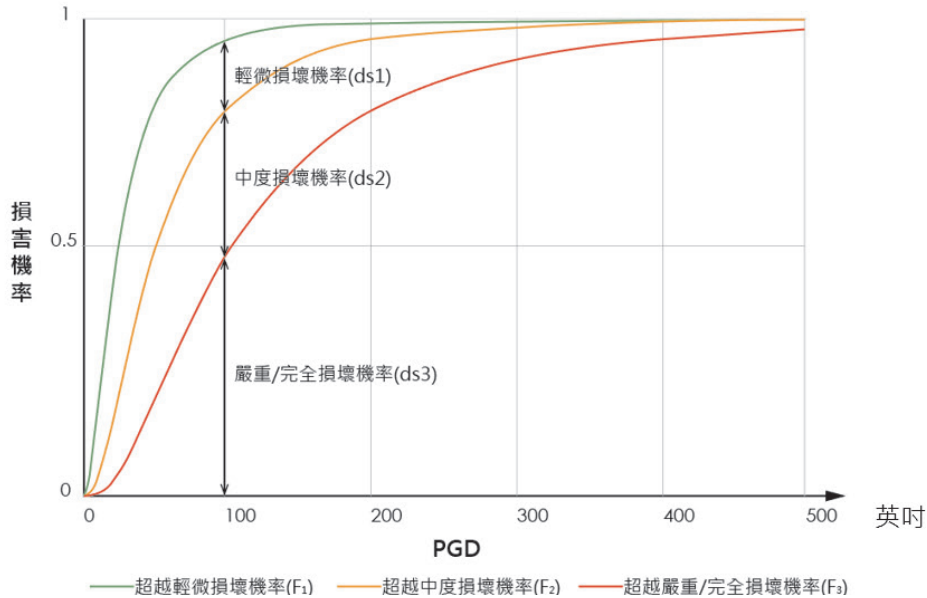


圖 9 易損曲線示意圖

資料來源：劉淑燕等（2014）。

4. 災害風險計算

接續第三項 TERIA 道路衝擊評估模式，本研究將以 0206 高雄美濃地震事件作為計算地表震動強度之輸入值，推估此地震災害事件下高雄地區道路通行失敗之機率。道路通行失敗機率於災害風險（Risk）中作為危害（Hazard，地表震動強度）及脆弱度（Vulnerability，道路易損曲線）交互影響下之結果，並將手機使用者的移動路徑核密度視為通勤道路的暴露度（Exposure），透過下方概念算式(4)計算之乘積作為災害風險之期望值。

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \times \text{Exposure} \quad (4)$$

式(4)中 Hazard 與 Vulnerability 為 0206 高雄美濃地震事件下，地表震動造成道路通行失敗之機率。Exposure 為手機信令資料內插過後的使用者移動路徑密度。

本研究中通勤道路的暴露度為隨著時間而改變的風險計算因子，故風險的計算結果將呈現不同目標分析時段下的風險分布。透過此結果評估高雄地區於 0206 高雄美濃地震之震動強度下，道路通行失敗在不同的時段，對於手機使用者之影響程度。

5. 新興熱點分析

新興熱點分析是一種檢測時空熱點與時空變化的數據探勘方法，在時空災害風險數據中，能分析風險特徵如何隨著時間而變化。本研究使用 Esri ArcGIS 軟體中的 Emerging Hot Spot analysis tool 進行新興熱點的統計分析。此分析工具需要先將時空數據建立成 NetCDF 格式的時空立方體（Space time cube），如圖 10，描述空間維度（xy 軸）以及時間維度（z 軸）的數據結構。接著透過 Getis-Ord Gi* (Getis and Ord, 1992) 計算時空立方體中每一個 Bin 的時空的冷熱點結果。最後，以 Mann-Kendall 檢定法

(Mann, 1945; Kendall, 1975) 檢驗時空立方體中，每個 Bin 由 Getis-Ord G_i^* 所計算出的 z 值與 p 值，在垂直時間序列上的時間趨勢，藉此分析時空熱點強度的時間變化。依照熱點及時間趨勢個別計算出的 z 值與 p 值，可以將其分類成冷點與熱點各 8 種模式，如表 4 所示，示意圖如圖 11。

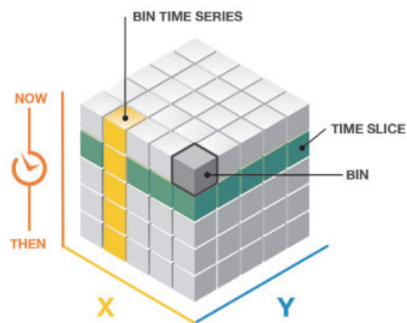


圖 10 時空立方體 (Space time cube)

資料來源：Esri (n.d.)。

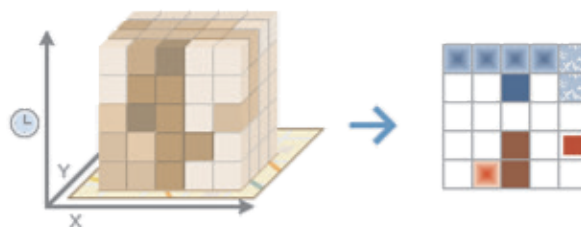


圖 11 新興熱點分析圖示

資料來源：Esri (n.d.)。

表 4 新興熱點模式

模式	定義
新興	時間序列中，最後一個時段才出現冷點（熱點）
連續	時間序列中，在最後幾個時段才出現連續的冷點（熱點）
加劇	時間序列中，至少有 90% 的時間都是冷點（熱點），並且冷點（熱點）在持續增強
持久	在該時段的时间序列中，至少有 90% 的时间都是冷點（熱點），但並沒有時間上遍高或變低的趨勢
減弱	與加劇模式相反，冷點（熱點）的強度在時間上是持續下降的
零星	時間序列上反覆出現冷點（熱點），但沒有出現過熱點（冷點）
振盪	時間序列上反覆出現冷點（熱點），有時會出現熱點（冷點）
歷史	至少 90% 的時間序列中都是重要的冷點（熱點），但是在最後的幾個時間上不是

資料來源：Esri (n.d.)。

結果與討論

（一）使用者移動路徑分布與活動趨勢

本節從五天（2018/06/04(一)、06/05(二)、06/06(三)、06/07(四)、06/08(五)）的手機信令資料中，透過使用者的連續位置內插結果了解人的移動路徑分布與整體活動變化趨勢，並進行相關性分析，了解週一至週五之資料是否具有相同的活動趨勢，再計算出使用者移動路徑分布密度，觀察時間與空間的變化，作為後續災害風險中的暴露度來源。

1. 使用者連續位置內插

參考 Catmull-Rom Curve 的內插方式，本研究將離散的手機信令位置數據以每 10 秒為頻率內插估計位置。除了減少手機使用者在移動過程產生的誤差之外，另一個目的是為了能夠統一擷取特定時間區段內所有手機使用者在時間上齊頭且齊尾之完整路徑，若缺少此步驟處理，於後續分析計算時將會缺漏該時段內起始與結束之部分路徑。如圖所 12 示，在擷取 07:00 至 08:00 時間區段中的信令資料時，由於紀錄資料的時間點並不總是剛好為 07:00 與 08:00，因此計算路徑時將會缺漏開頭與結尾兩個紅色虛線的路徑。

計算五天手機信令資料內插前後之總體使用者每小時總活動距離，如圖 13 所示，由於經過連續位置內插處理，可以明顯看出內插後的活動距離高於內插前，平均每個統計時段內插前後的活動距離相差約為 298029 公里。

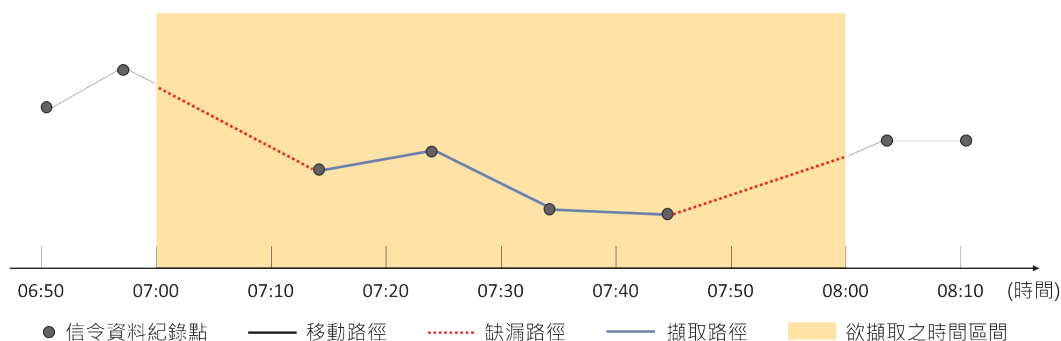


圖 12 內插前後的路徑擷取示意

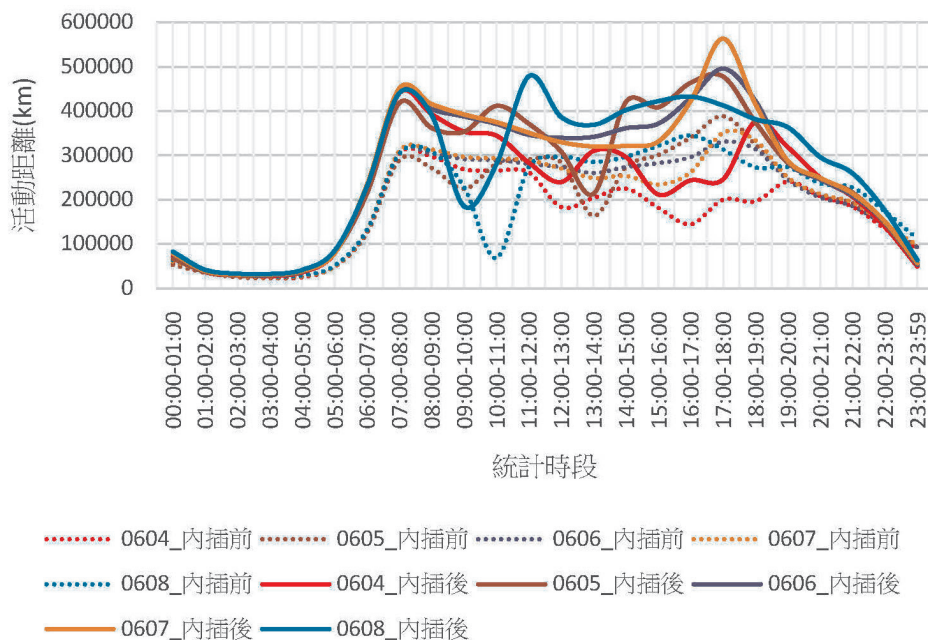


圖 13 路徑內插前後活動總距離變化趨勢

2. 週一至週五活動趨勢分析

圖 14 以及圖 15 為手機使用者每一個小時的總活動距離與活動時間，07:00 以前以及 19:00 之後的兩個時段在活動距離與活動時間的趨勢基本上為一致，分別為上班尖峰之前的活動變化以及下班尖峰之後的活動變化。而 07:00 至 19:00 之間的時段，從週一到週五的變化趨勢卻不盡相同。

為了瞭解本研究所使用之資料於平日的活動趨勢變化是否具有相關性，本研究將 07:00 至 19:00 每一個小時區段的活動距離、活動時間，分別進行 Pearson 相關性分析，試圖找出相似的活動趨勢作為平日的代表。表 5 為活動距離相關性分析，從表中可以得知 06/05、06/06、06/07 三日彼此具有顯著的正相關，活動距離變化趨勢相似，比較圖 13 後可以發現這三日雖然相關，但是 06/05 在 13:00-14:00 的時段有比較明顯的下降。表 6 為活動時間相關性分析，從表中可得知 06/05、06/06、06/07 三日的活動時間也具有顯著的正相關，活動時間變化趨勢相似，比較圖 15 後則發現，三日彼此雖然相關，但 06/05 在 17:00-18:00 下班尖峰的時段所花費的活動時間較少。除此之外，06/06 與 06/04 的活動時間趨勢也為顯著的正相關，活動時間變化趨勢也差異不大。

將週一至週五活動距離與活動時間的相關性分析完後，可以得知只有週二、三、四的趨勢變化相互具有顯著的相關性，週五與其他日皆無顯著相關，而週一只與週三有顯著相關。雖然手機信令資料都是平日之數據，但週一與週五的活動趨勢與週二、三、四產生相關性不高的現象可能是因為手機信令資料的紀錄對性是行經正修科技大學、輔英科技大學、中山大學、高雄餐旅大學以及樹德科技大學等五個地點之手機使用者，其中記錄到學生的比例可能相對較高，週一與週五的通勤流動為跨縣市居多，活動趨勢有一定的程度上受到學校排課、學生選課、返鄉、回校等原因影響，或者此不相關的現象是人口活動既有的慣性、週期性現象，本研究因缺乏更多時間的信令資料樣本，因此尚無法以長期的趨勢討論其發生之原因。為了在後續風險計算中提取足以代表「平日」人口活動模式，06/05(二)、06/06(三)、06/07(四)三日的手機信令資料較適合在本研究中使用，以使用者移動路徑密度之平均值作為後續災害風險推估的暴露度因子。

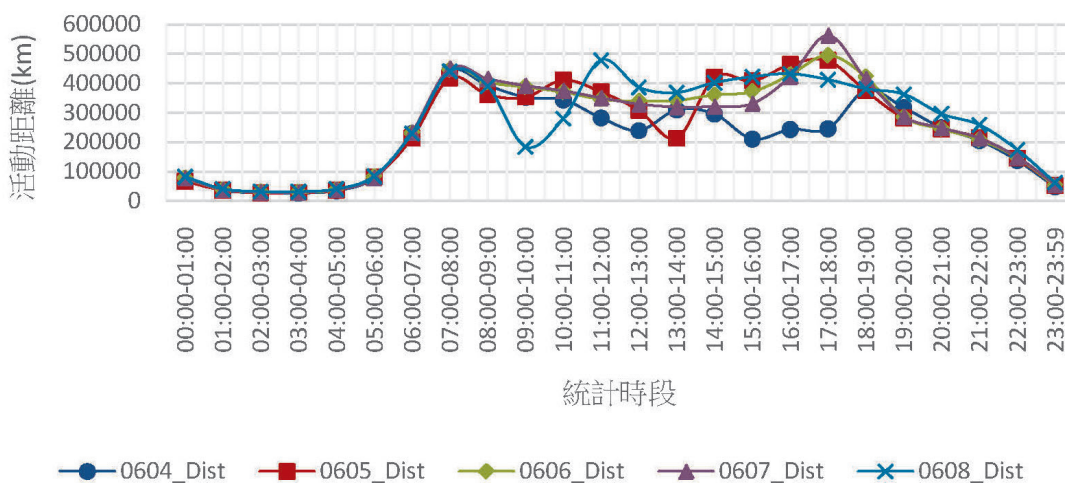


圖 14 總體手機使用者每小時總活動距離變化趨勢

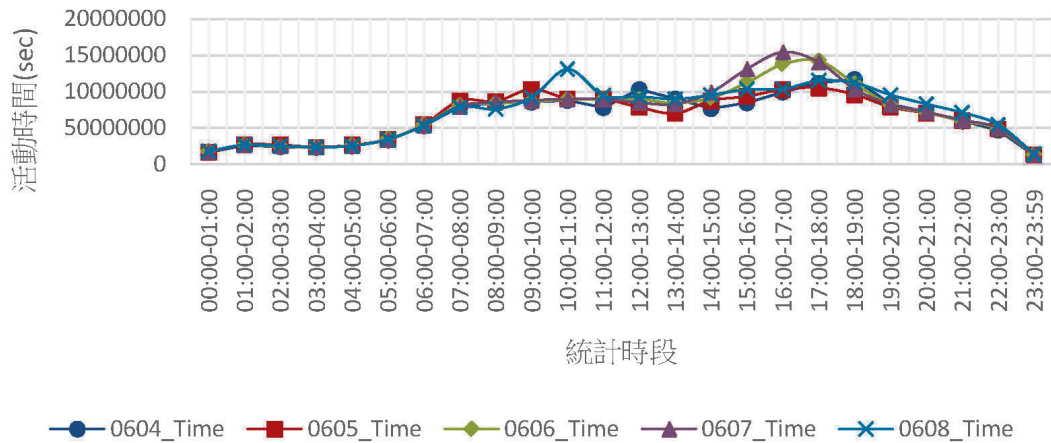


圖 15 總體手機使用者每小時總活動時間變化趨勢

表 5 週一至週五活動距離相關性分析

		Dist_0604	Dist_0605	Dist_0606	Dist_0607	Dist_0608
Dist_0604	皮爾森 (Pearson) 相關性	1	-.125	.198	.183	-.264
	顯著性 (雙尾)		.699	.537	.569	.407
Dist_0605	皮爾森 (Pearson) 相關性	-.125	1	.669*	.595*	.234
	顯著性 (雙尾)	.699		.017	.041	.464
Dist_0606	皮爾森 (Pearson) 相關性	.198	.669*	1	.959**	.144
	顯著性 (雙尾)	.537	.017		.000	.655
Dist_0607	皮爾森 (Pearson) 相關性	.183	.595*	.959**	1	.082
	顯著性 (雙尾)	.569	.041	.000		.800
Dist_0608	皮爾森 (Pearson) 相關性	-.264	.234	.144	.082	1
	顯著性 (雙尾)	.407	.464	.655	.800	

*. 相關性在 0.05 層級上顯著 (雙尾)。

**. 相關性在 0.01 層級上顯著 (雙尾)。

表 6 週一至週五活動時間相關性分析

		Time_0604	Time_0605	Time_0606	Time_0607	Time_0608
Time_0604	皮爾森 (Pearson) 相關性	1	.298	.641*	.429	.466
	顯著性 (雙尾)		.348	.025	.164	.127
Time_0605	皮爾森 (Pearson) 相關性	.298	1	.668*	.659*	.402
	顯著性 (雙尾)	.348		.017	.020	.195
Time_0606	皮爾森 (Pearson) 相關性	.641*	.668*	1	.955**	.512
	顯著性 (雙尾)	.025	.017		.000	.089
Time_0607	皮爾森 (Pearson) 相關性	.429	.659*	.955**	1	.436
	顯著性 (雙尾)	.164	.020	.000		.157

		Time_0604	Time_0605	Time_0606	Time_0607	Time_0608
Time_0608	皮爾森 (Pearson) 相關性	.466	.402	.512	.436	1
	顯著性 (雙尾)	.127	.195	.089	.157	

*. 相關性在 0.05 層級上顯著 (雙尾)。

**. 相關性在 0.01 層級上顯著 (雙尾)。

3. 使用者移動路徑平均密度

由於基地臺的布建方式與空間上各式障礙物的條件，手機信令資料所記錄的空間位置無可避免帶有誤差，因此為了在空間上適度的呈現內插處理過後的路徑資料，以及量化路徑數量便於後續的災害風險計算，本研究以每一個小時為區間，利用核密度計算 06/05、06/06、06/07 之路徑核密度，其密度計算結果為機率密度的概念，並作為災害風險中的暴露度。參考交通大學運輸與物流管理學系王晉元教授研究室對於信令資料實地驗證後的結果，在進行資料位置漂移清洗與插補時，飄移範圍設定為 250 公尺，因此在核密度估計中，將搜尋半徑取整數，設為 150 公尺，計算後的網格大小與手機信令資料的空間解析度相同，為 50*50 公尺。

整體來看，使用者移動之主要道路位於四個區域周邊以及四條道路。區域分別為中山大學、正修科技大學、樹德科技大學、高雄餐旅大學周邊，道路分別是國道 10 號、鳳仁路、中正路、國道 1 號。從時間上觀察，大約從 06:00 開始道路活躍程度開始上升，並從 00:00 開始活躍度銳減。密度數值最高的時段為 17:00-18:00，位於正修科技大學與高雄長庚醫院周邊，尤其以大埤路、澄清路、青年路二段為主要高峰道路，初步判斷數值高之原因為該區域有正修科技大學、高雄長庚醫院、文山高中、以及沿街商業等土地利用，再加上大埤路、澄清路為主要幹道，因此除了 17:00-17:59 的時段之外，幾乎所有的時段也都是高密度之道路。

(二) TERIA 道路損壞機率推估與時空風險分布

接續上一節 06/05、06/06、06/07 三日的手機使用者移動路徑平均密度，得知暴露度的分布情形，本節以 TERIA 進行地震事件模擬，計算道路的易損程度與道路風險之期望值，藉此了解特定地震之地表震動強度下，道路通行失敗對於不同時段手機使用者之影響程度，後續再藉由時空的資料探勘，探索風險熱點的變化情形。

1. TERIA 情境設定與計算結果

本研究以 0206 高雄美濃地震事件作為 TERIA 平台中計算地表震動強度之輸入值，其地震事件輸入資訊為 (1) 芮氏規模：6.6；(2) 震央：北緯 22.93 度、東經 120.54 度；(3) 震源深度：14.6 公里。TERIA 模擬出的永久地表位移量（如圖 16 永久地表位移量分布），模擬結果為 500*500 公尺解析度之網格，描述在地震期間地表位移量，單位為公分。對應模擬結果個別的空間單元，依照道路類別之易損曲線，即可計算各路段超越不同損害狀況（輕微損害、中度損害、嚴重 / 完全損害）下的機率，並參考 TERIA 之設定，道路通行失敗機率定義為超越中度損害之機率。

道路通行失敗機率結果如下圖 17 道路通行失敗機率分布，是以 PGD 網格為基礎計算出的道路路段通行失敗機率，在本研究中視為靜待的存在，不會跟通勤道路的暴露度一樣隨著時間變化，其意涵

為在特定的地表震動事件下，地表位移量對於不同道路類別所造成通行失敗的可能性，在風險評估中作為脆弱度的計算。高道路通行失敗機率的空間分布大致上沿著中正路、中山路、國道 10 號週邊延伸，以及陽明棒球場西南側國道 1 號周邊、與小港機場北側區域。圖 18 則為平均成果密度圖。

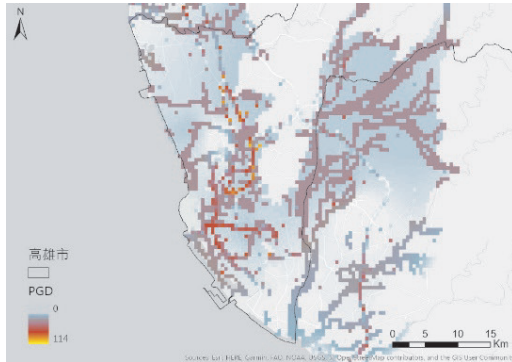


圖 16 永久地表位移量分布

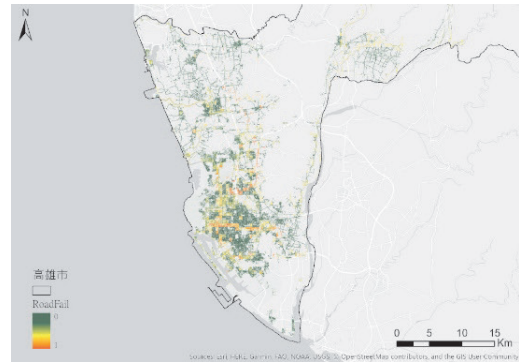


圖 17 道路通行失敗機率分布

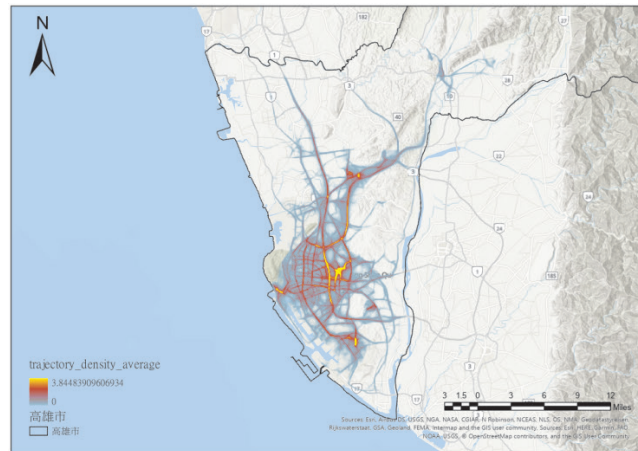


圖 18 平均密度成果圖

2. 時空災害風險分布

TERIA 推估之道路通行失敗機率於災害風險中作為危害（地表震動強度）及脆弱度（道路易損曲線）交互影響下之結果，並將前一節 06/05、06/06、06/07 三日手機信令資料平均之使用者移動路徑密度視為通勤道路的暴露度，計算兩者之乘積作為風險之期望值，以評估高雄地區於 0206 高雄美濃地震之震動強度下，道路通行失敗對於手機使用者之影響程度。

由於研究過程中不同方法所計算出的空間解析度都不相同，所以需要先經過解析度的整合。道路通行失敗機率是由 500 公尺網格解析度的 PGD 為基礎計算出來的 Polyline，將其轉換為與通勤道路暴露度相同的 50 公尺網格去計算風險，有過度放大空間細節的疑慮，參考到參考交通大學運輸與物流管理學系王晉元教授研究室的手機信令資料前處理，250 公尺正好是資料可能產生的偏移量，故本研究將道路通行失敗機率從線（polyline）轉換為 250 公尺解析度之網格，網格之數值取道路通行失敗機率

最大值，目的是希望風險計算出來的結果可以表達最嚴重的可能性。而暴露度從 50 公尺網格解析度放大為 250 公尺，採取網格數值平均之計算方式放大大解析度，從而以相同空間解析度的網格資料加以計算最終風險分布，如圖 19。

表 7 解析度整合前後對照表

	解析度整合前		解析度整合後	
	資料形式	空間解析度	資料格式	空間解析度
道路通行失敗機率	向量 (Polyline)	-	網格	250 公尺
通勤道路暴露度	網格	50 公尺	網格	250 公尺

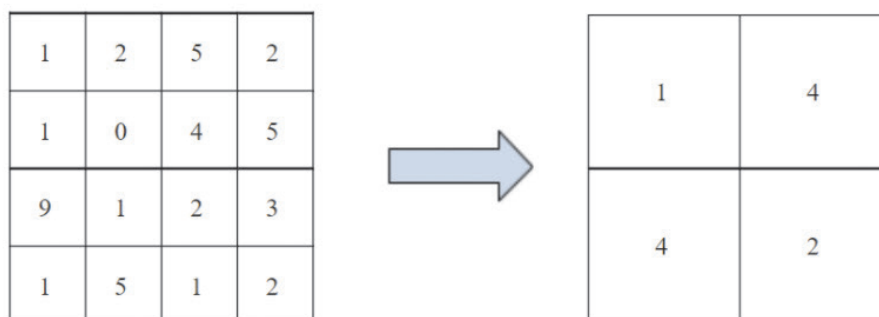
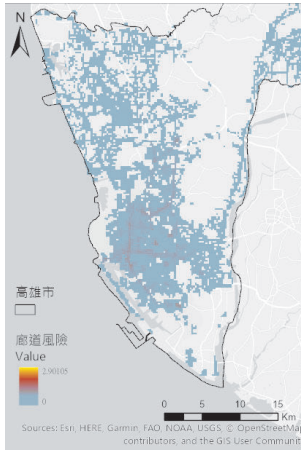
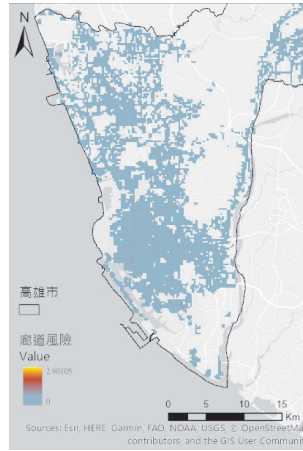


圖 19 網格平均採樣示意圖

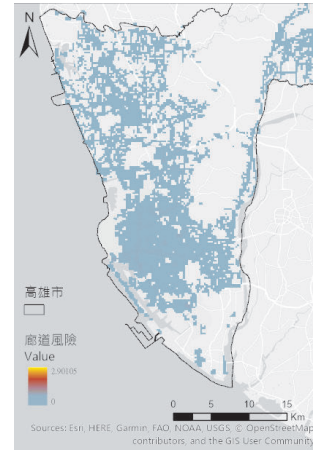
計算結果以每小時為區間呈現 24 個時段的風險分布，從整體觀察，道路風險高值沿著中正路、中山路、國道 10 號分布，另外近陽明棒球場西南側之國道 1 號區域、高雄長庚醫院北側大埤路區域，也有高風險的分布。從時間上檢視，大約從 06:00 開始道路風險開始上升，直到 17:00 之後逐漸下降。17:00-18:00 的時段為風險記錄到最高值的時段，位於國道 10 號以及陽明球場西南側國道 1 號區域、高雄長庚醫院北側大埤路區域。目前的結果僅能以直覺觀察風險的時空變化，透過該區域的都市發展、土地利用等背景知識與輔助資料加以概述。若要對其時空分布結果更客觀的分析，則需要透過時空資料探勘的方式，分析出潛藏的時空趨勢與模式。結果如圖 20 所示。



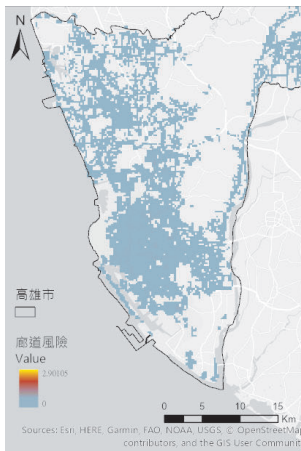
(a) 00:00-01:00



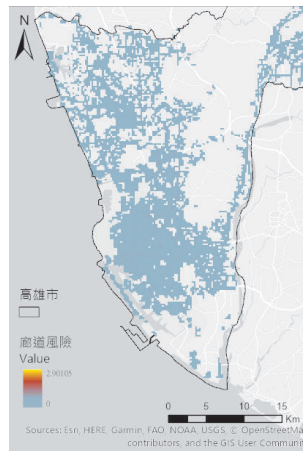
(b) 01:00-02:00



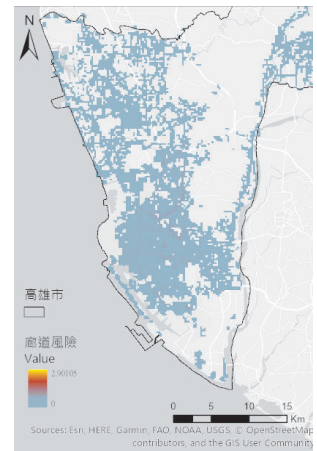
(c) 02:00-03:00



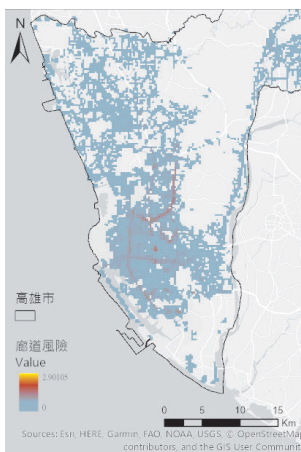
(d) 03:00-04:00



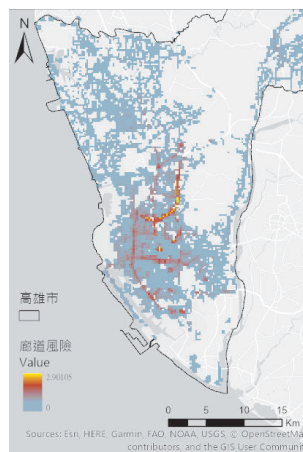
(e) 04:00-05:00



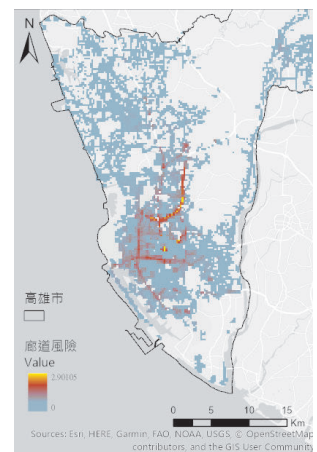
(f) 05:00-06:00



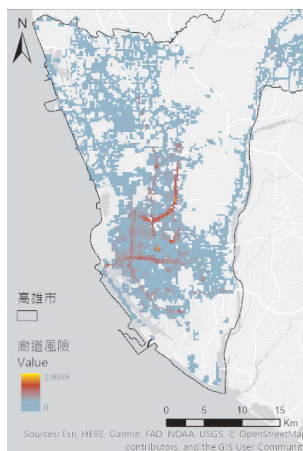
(g) 06:00-07:00



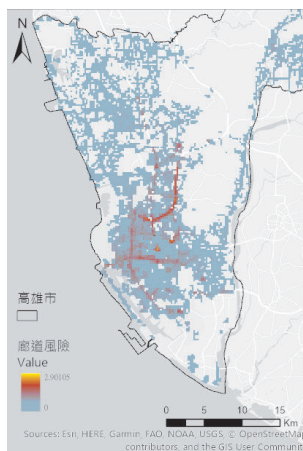
(h) 07:00-08:00



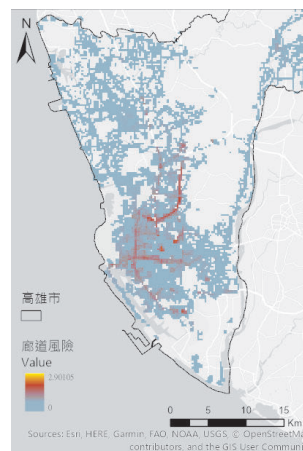
(i) 08:00-09:00



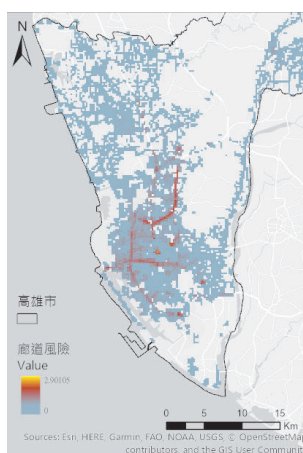
(j) 09:00-10:00



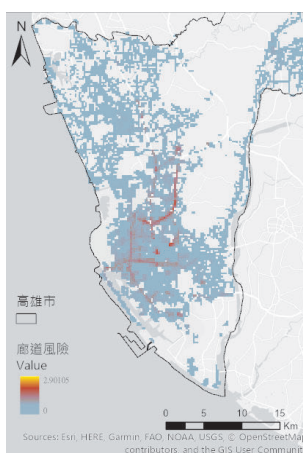
(k) 10:00-11:00



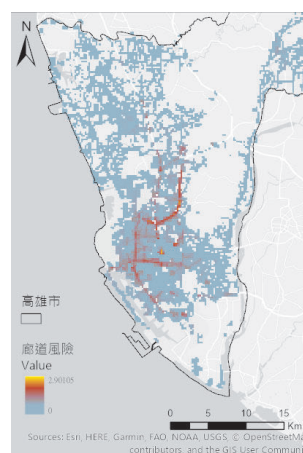
(l) 11:00-12:00



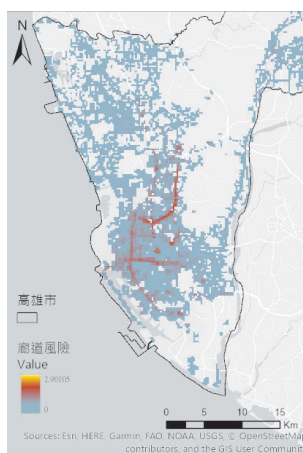
(m) 12:00-13:00



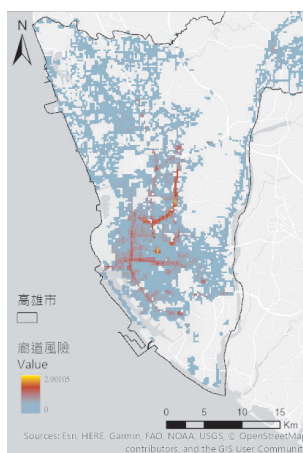
(n) 13:00-14:00



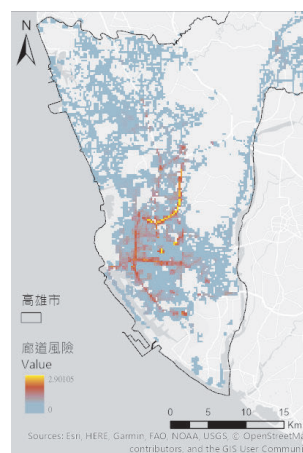
(o) 14:00-15:00



(p) 15:00-16:00



(q) 16:00-17:00



(r) 17:00-18:00

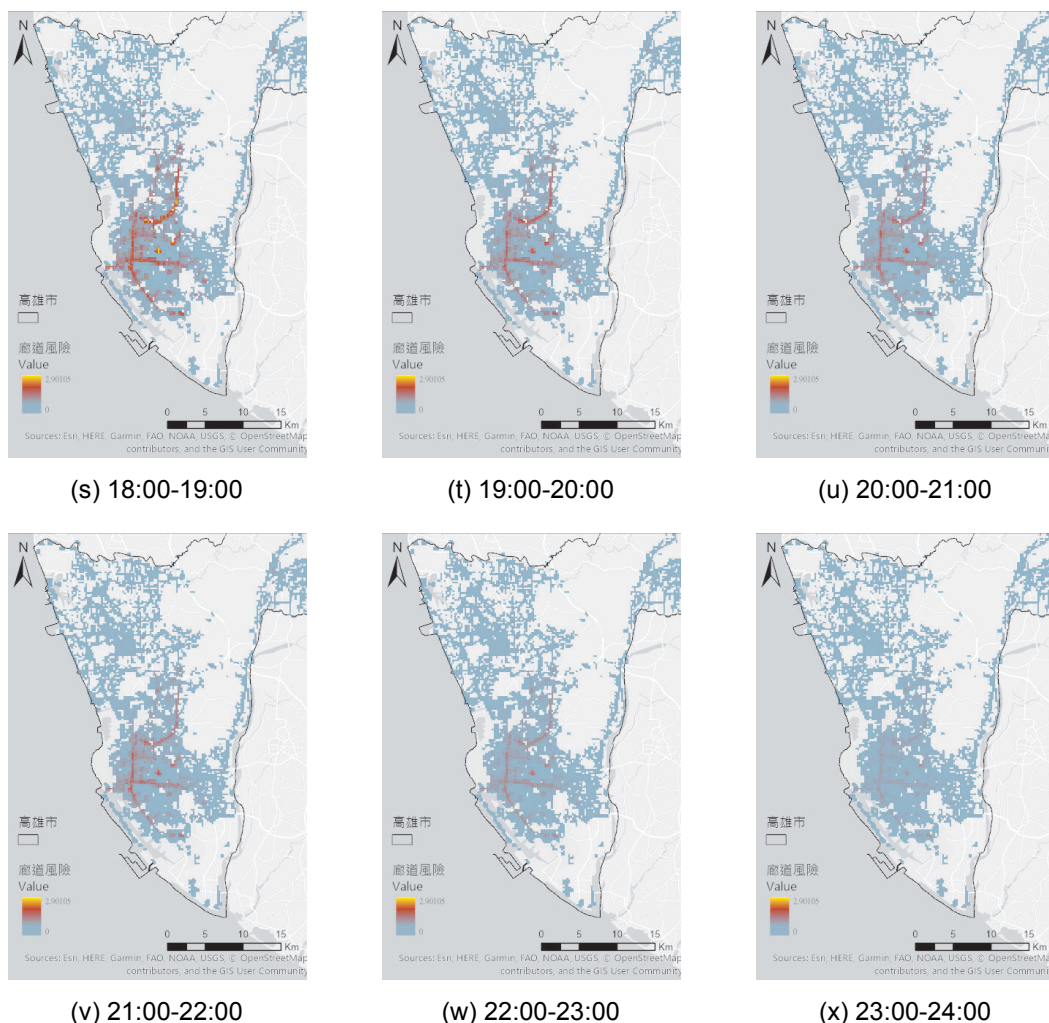


圖 20 平均每小時通勤廊道風險分布

(三) 災害風險時空分析

接續上節計算出風險的時空分布後，已經可以初步觀察出高風險的分布情形，以及風險高低變化的時間趨勢，但其結果尚缺客觀的分析，故本節以新興熱點分析進行時空數據探勘，透過空間上的熱點分布以及時間上熱點變化的趨勢，探索風險熱點在不同時段的變化情形。其分析結果相較於傳統的風險評估，更著重於風險的動態變化模式，在做為防救災決策依據時，能夠從風險的時空強度給予不同角度的理解。

1. 分析時段設定

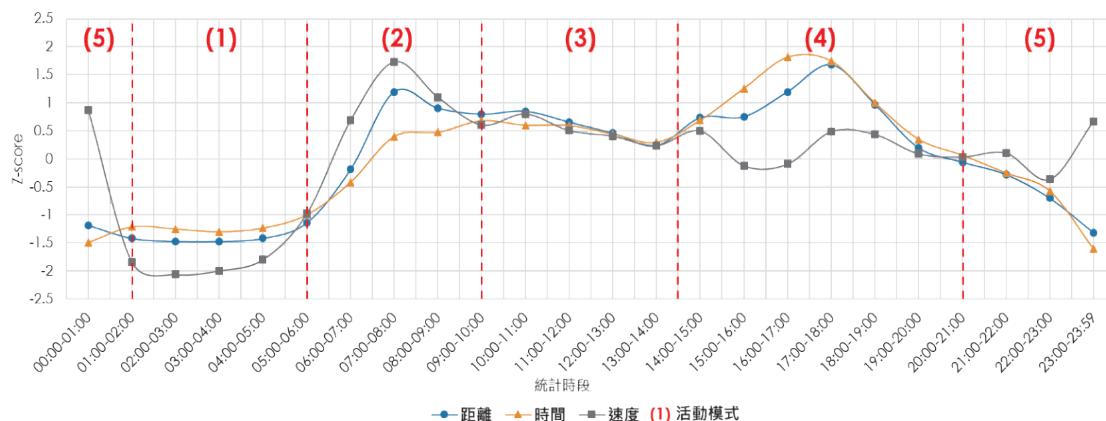
在進行新興熱點分析之前，本研究藉由 06/05、06/06、06/07 三日平均的手機使用者活動距離與時間統計，先行了解使用者的活動趨勢，找出相同活動模式的時間區段，再以跨越不同活動模式的方式

劃分目標分析時段，藉此在新興熱點分析中觀察活動模式所屬時段之間的風險動態變化情形。

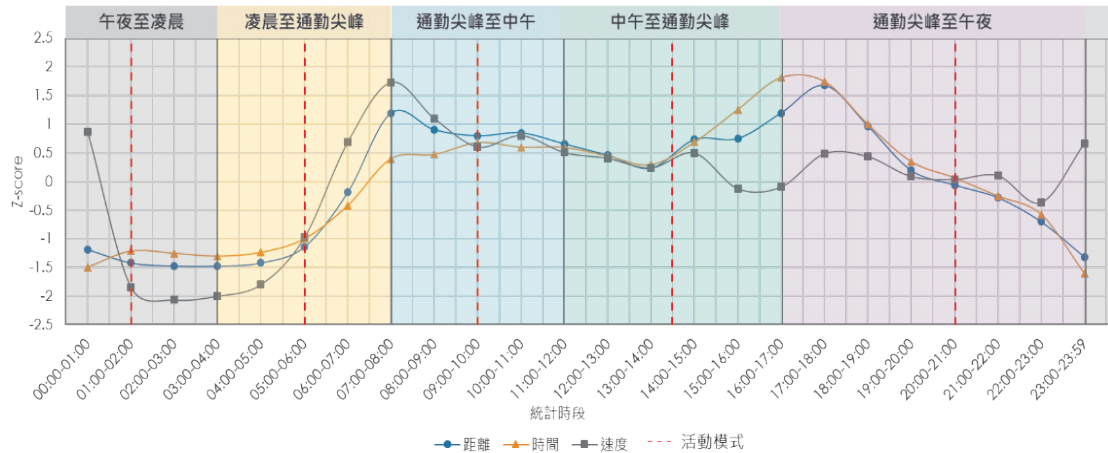
由於手機使用者之平均活動距離、平均活動時間、平均移動速度，皆為不同單位，為了比較各個統計項目數值隨著時間的變化，已進行標準化處理。從結果中觀察到使用者活動時間與距離隨著時間變化的情形，經時間、距離、速度等數值的高低比較觀察，並找出以下幾種活動模式（詳見圖 21(a)）：

- (1) 01:00-06:00 時段，該時段的活動量為一天當中的最低點，活動速度緩慢，表示手機使用者在較長的時間內有少量距離的移動，除了少數使用者在此時段進行實際的移動之外，該現象發生之原因基於對手機信令資料的理解，此時大部分的移動現象應為資料位置的飄移。
- (2) 05:00-10:00 時段，該時段的活動量為一天當中的第一個波峰，此時段活動距離大於活動時間，移動速度快。表示相比一整天的活動，手機使用者在較少的時間內大量移動，活動的形式應為上班通勤。
- (3) 09:00-15:00 時段，維持高度活動量，活動距離與時間並無明顯的增減趨勢。
- (4) 14:00-21:00 時段，是一天中活動量的第二個波峰，此時段活動時間大於活動距離，均移動速度較慢，活動的形式應為下班通勤，而此尖峰的波長大於上班通勤，表示此時段相較上班通勤時段，手機使用者花費較多的時間、並且在較長的時間區段內，以較慢的速度大量移動。
- (5) 20:00-02:00 時段，整體活動量下降至最低點，可能是因為通勤道路上的流量減少，使活動的速度在接近午夜時有上升的現象。

透過上述 5 個時段的觀察與相同活動模式的分類，如圖 21(b)，本研究以跨越這些時段的方式，劃分圖中有底色色塊新興熱點的目標分析時段，將 03:00-08:00 定義為凌晨至通勤尖峰時段、07:00-12:00 為通勤尖峰至中午時段、11:00-17:00 為中午至通勤尖峰時段、16:00-00:00 為通勤尖峰至午夜時段、23:00-04:00 為午夜至凌晨時段。



(a)相同活動模式之時段



(b)跨越不同活動模式之時段

圖 21 手機使用者活動趨勢統計

2. 新興熱點分析

由於新興熱點分析至少需要 10 個時間樣本，以作為時間趨勢的判定，本研究以 30 分鐘為時間區段計算通勤道路之風險，每個目標分析時段將至少會有 10 個時間樣本。本研究計算熱點的輸入參數選擇，Neighborhood distance 經過 100m、250m、500m、800m、1600m 的嘗試，Neighborhood time step intervals 經過 60 分鐘、90 分鐘、120 分鐘的嘗試，透過 try-and-error 的方式決定將 Neighborhood distance 設定為 250 公尺，Neighborhood time step intervals 為 2，即 60 分鐘。也就是風險熱點的產出是比較平面空間維度環域 250 公尺、垂直時間維度 60 分鐘的時空範圍內，相對於整個時空立方體是否有集中冷熱點。本研究分析所產出之結果有七種熱點模式：

- (i) 新熱點，代表在該時段的時間序列中，最後一個時間才出現風險熱點。
- (ii) 連續熱點，代表在該時段的時間序列中，在最後幾個時間才出現連續的風險熱點。
- (iii) 加劇熱點，代表在該時段的時間序列中，至少有 90% 的時間都是風險熱點，並且熱點在持續增強。
- (iv) 持久熱點，代表在該時段的時間序列中，至少有 90% 的時間都是風險熱點，但並沒有時間上遍高或變低的趨勢。
- (v) 減弱熱點，與加劇熱點相反，其風險熱點的強度在時間上是持續下降。
- (vi) 零星熱點，代表時間序列上只有反覆出現風險熱點，但沒有出現過冷點。
- (vii) 歷史熱點，代表至少 90% 的時間序列中都是重要的風險熱點，但是在最後的幾個時間上不是。

圖 22 為風險新興熱點分析結果，分為(a)03:00-08:00 凌晨至通勤尖峰時段、(b)07:00-12:00 通勤尖峰至中午時段、(c)11:00-17:00 中午至通勤尖峰時段、(d)16:00-00:00 通勤尖峰至午夜時段、(e) 23:00-04:00 午夜至凌晨時段等四個目標分析時段之結果。

(1) 凌晨至通勤尖峰時段

如圖 22(a)，風險熱點大致分布在國道 1 號、國道 10 號、捷運紅線與橘線沿線、民族路（臺

1)、經武路、維新路、澄清湖周邊，呈現連續熱點的模式，也就是風險熱點是在時間序列上的後期出現。對照圖 21，雖然活動趨勢在 05:00 之後持續上升，但直到大約 07:00 之後才形成風險熱點，表示在此分析時段內，最需要被注意到的是 07:00 至 08:00 之間的風險分布。

(2) 通勤尖峰至中午時段

如圖 22(b)，此時段風險熱點大致分布於國道 1 號、國道 10 號、鹽埕區。凌晨至通勤尖峰時段出現的連續熱點分布，在此時段大都已不是風險熱點，僅剩國道 1 號、國道 10 號，但其風險熱點模式為減弱熱點，表示在時間趨勢上，熱點強度是逐漸變弱。對照圖 17，雖然時間趨勢呈現逐漸變弱的趨勢，與國道 1 號、國道 10 號的減弱熱點模式相符，但從空間上觀察，鹽埕區卻出現連續熱點，代表此處在接近中午的時候反而突然出現風險熱點。初步判斷，此現象可能是因為鹽埕區的空間使用偏於觀光性質，再加上鄰近中山大學，與學生的行為方式密且相關，導致在接近中午的時候出現道路流量，增加暴露程度。

(3) 中午至通勤尖峰時段

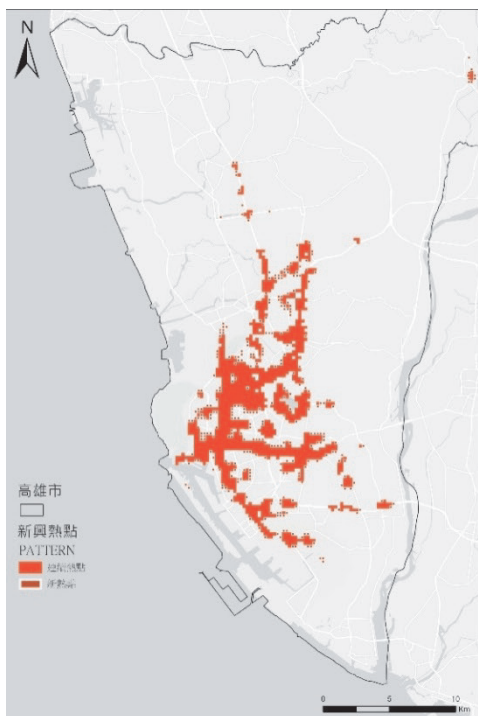
如圖 22(c)，此時段風險熱點分布與凌晨至通勤尖峰大致相同，較大的差異在於兩個時段熱點強度的時間變化，凌晨至通勤尖峰呈現的是連續熱點，風險熱點於時間序列的後期出現，而中午至通勤尖峰時段呈現的是加劇熱點，風險熱點是隨著時間逐漸增強。另外西子灣捷運站、高雄餐旅大學西側、輔英科技大學周邊，這三個區域的風險熱點模式是持久熱點，表示這三個區域並沒有和其他道路一樣，熱點強度隨著時間而增強，而是從中午到通勤尖峰都一直保持著高強度的風險熱點。由於這三處的共同特性為鄰近學校，且位於市區邊緣，故推測有可能是學生之活動造成其風險熱點模式不同。

(4) 通勤尖峰至午夜時段

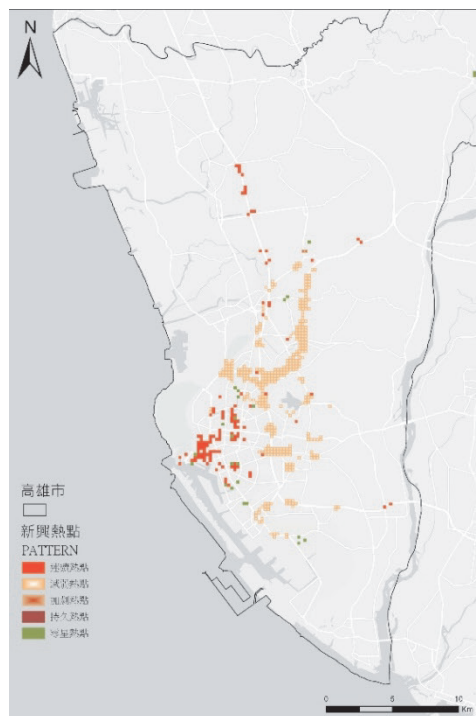
如圖 22(d)，時段相較其他目標分析時段，風險熱點的分布面積已經減少許多，也較集中在國道 10 號、捷運紅線、捷運橘線沿線。這三處道路所呈現的風險熱點模式是以歷史熱點包覆減弱熱點，表示隨著下班通勤過後，風險熱點強度逐漸變弱，並且大部分的風險在接近午夜時已不是顯著的熱點。並無出現風險熱點強度時間趨勢差異較大的模式分布。

(5) 午夜至凌晨時段

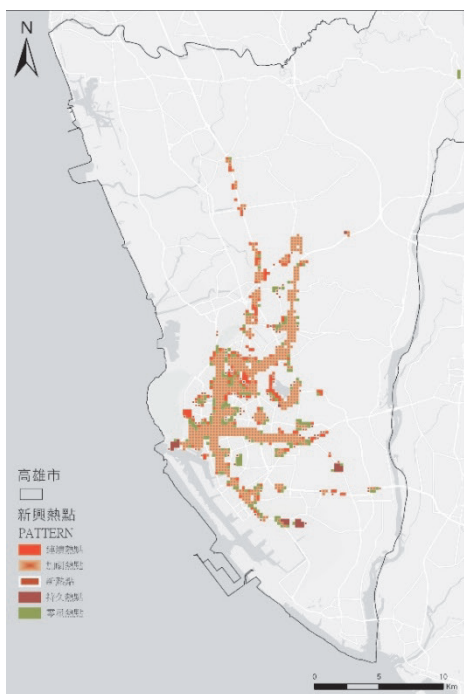
如圖 22(e)，此時段風險熱點分布較零碎，主要是沿著國道 10 號、捷運紅線、以及捷運橘線沿線分布。該三處皆呈現減弱熱點的模式，表示風險熱點隨時間逐漸減弱至凌晨 04:00。



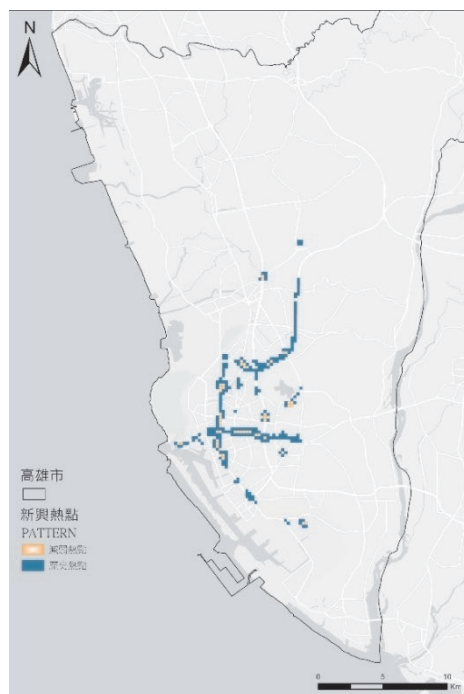
(a) 凌晨至通勤尖峰時段



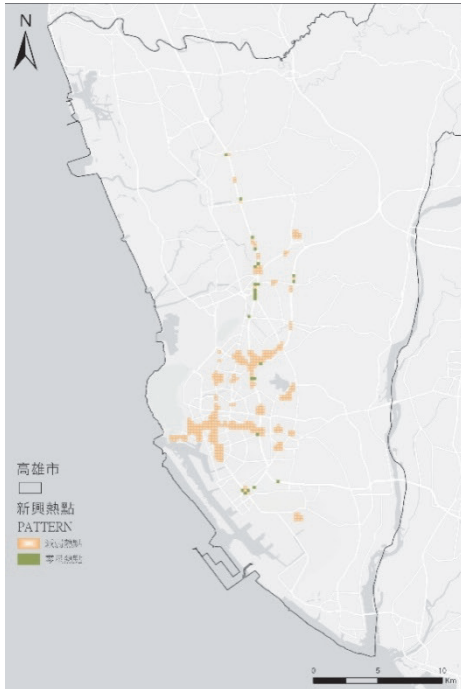
(b) 通勤尖峰至中午時段



(c) 中午至通勤尖峰時段



(d) 通勤尖峰至午夜時段



(e) 午夜至凌晨時段

圖 22 道路風險之新興熱點分析結果

經過以上目標分析時段結果的觀察，本研究從風險熱點模式的使用、以及相同時段下不同風險熱點模式分布等兩個角度，討論通勤道路風險熱點時空分析之價值：

(1) 風險熱點模式的使用

傳統風險地圖幾乎都是呈現靜態的風險分布，而新興熱點分析並不是單純的呈現各個時段的風險分布，是以風險熱點分布與強度的時間趨勢加以分類風險熱點模式，能夠在單一分析結果的圖面上顯示時間維度的風險動態性。回顧至災害防救法與地區災害防救計畫等內容，此動態性風險的結果作為減災工作階段的一個部分，可以在防災宣導的層面上向民眾傳達更仔細、更豐富的資訊，提升風險知覺。在整備的工作階段上，能夠以風險熱點模式的分布為依據，從時空尺度更細緻的方式決定物資與設備的調度、以及運輸路徑的選擇。除此之外，兵棋推演也能考量到風險時空分布的真實性來擬定演練情境與腳本的擬定，藉此增加地方的應變能力。

(2) 相同時段下不同風險熱點模式分布

在相同的目標分析時段中，可能會出不同的風險熱點模式，在這種情況下，熱點強度時間趨勢差異較大的分布區域需要特別被注意到。如通勤尖峰至中午時段，大部分區域呈現減弱熱點，而鹽埕區周邊則是出現連續熱點；中午至通勤尖峰時段，西子灣捷運站、高雄餐旅大學西側、輔英科技大學周邊，這三個區域的風險熱點模式呈現持久熱點，並沒有與大部分區域一樣呈現加劇熱點。回應至上一段風險熱點模式的使用，在減災的工作階段上，鹽埕區於通勤尖峰至中午時段，

能夠向民眾傳達在大部分風險熱點強度逐漸下降的同時，該區域可能在接近中午的時候反而形成風險熱點。而西子灣捷運站、高雄餐旅大學西側、輔英科技大學周邊於中午至通勤尖峰時段，則能夠向民眾傳達此三處區域一貫的維持險熱點強度，藉此在防災宣導上提升民眾的風險知覺。在整備階段中，也能透過風險熱點的差異，特別注意到這些地區的救災需求與運輸路線的選擇方式。

結論與建議

（一）結論

臺灣在頻繁面對破壞力大且嚴重影響社會安全的地震災害的環境下，足以顯示了災害管理以及風險評估的重要性，而了解人口動態則能夠掌握風險的時間特徵，從而提高風險的準確度以及防救災決策的質量。本研究著重於災害事前的減災整備規劃，究透過描述真實人口動態的特性的手機信令資料作為災害風險的暴露度因子，應用於的震通勤道路的風險推估，從更細緻的時空尺度上評估風險，並且了解風險的時空變化模式。

研究結論可以歸納為以下幾點：

1. 週一至週五的手機信令資料中，每日的活動變化趨勢只有週二、三、四具有顯著相關，故以三日之資料作為通勤道路暴露度之數據來源，藉由時空內插的方式補足該資料的時空稀疏性，擷取任意目標分析時段之路徑，透過核密度呈現其分布數量。計算結果顯示，道路暴露度從 06:00 開始急遽上升，12:00 稍趨緩，直到接近 17:00 時再度上升並達到最高值，隨後逐漸下降至隔日凌晨，高暴露度之道路大致上分布於中山大學、正修科技大學、樹德科技大學、高雄餐旅大學周邊，以及臺 17 線、國道 1 號、國道 10 號、縣道 183 號沿線。
2. 本研究透過 TERIA 所推估之地震災害事件下道路損壞機率，於作為地震危害與道路脆弱度相互影響下的結果，藉由此結果以及道路暴露度之乘積，建立時空災害風險分布。此災害風險與道路暴露度的時間趨勢相同，高風險分布主要位於國道 10 號以及陽明球場西南側國道 1 號區域、高雄長庚醫院北側大埤路區域。若要對其時空分布模式做更客觀的探討，則需要以新興熱點分析探索其熱點的分布與時間趨勢。
3. 透過新興熱點分析，可以從不同的目標分析時段中明確的指出不同的風險熱點模式，如：新興風險熱點、加劇風險熱點、減弱風險熱點…等。相比傳統的風險計算結果，更著重於時間與空間維度上的風險動態變化趨勢，可以從變化趨勢的角度去理解道路的動態暴露度如何影響風險熱點的形成。對於災害管理階段中的減災及整備階段，能夠增強民眾的風險知覺以及協助兵棋推演撰寫更符合真實情境的腳本，提供防救災決策在時空尺度上更細緻的參考依據。
4. 本研究透過手機信令資料將時間維度的意義帶入災害風險計算，初探時空數據探勘與災防領域結合所產生之效益與貢獻。以往由於人口動態數據取得困難，忽略了災害風險中社會環境的動態條件，造成評估災害風險時僅能在有限的時空尺度之下進行災害管理決策。透過手機信令資料，能夠將空間尺度最多放大至 50 公尺，時間尺度可細緻到秒，再加上數據探勘的技術並配合對於社會環境背景的了解，從時序資料中挖掘時空模式，增加對於動態風險的認知，藉此改善以往假定靜態災害風

險的不足。除此之外，也說明了未來在大數據興盛的趨勢中，還有許多資料探勘技術應用在不同領域的可能性與突破，將能使公共政策的擬定與時俱進。

(二) 後續研究方向與建議

本研究透過手機信令資料與 TERIA 所建立的時空風險評估，其結果之解讀為假設在相同之地震震動強度事件發生於不同的時段，人口移動暴露度的動態特性將會如何影響風險的形成，故建議後續研究可以考量地震事件發生後衍生的風險與衝擊，探討救災道路如何選擇、人員如何疏散等議題。

此外，本研究使用之手機信令資料，由於只有平日五天的數據限制，並且記錄對象為經過特定五個地點的手機使用者，尚無法依靠長期的數據找出完整區域平日的人口活動模式，因此本研究所使用之數據可能受到環境或事件的干擾而使人口活動模式不符合常態預期。在能夠取得更多時間手機信令資料的前提下，建議後續研究掌握人口平日、假日、或者其他週期性的變化，應可建構時間軸上的風險分布曲線，以時間動態的角度進行更有效的風險評估，亦能代替 TERIA 既有地震衝擊評估模組中不同時段的人口權重參數，比較評估的前後差異。

手機信令資料描述了接近真實的人口動態，資料在使用上具有極高的隱私敏感性問題，且該資料存在目的源於電信商之收費需求，因此在臺灣鮮少出現使用該資料的研究與應用。考量手機信令資料對於國家安全、防救災領域上具有極高的應用價值，建議此資料除了可以刪除使用者的個人資訊之外，亦能從調整空間解析度的方式保護個人隱私，並且有限度地開放產學界申請使用，使該資料的應用與分析方式能夠延伸發展。

手機信令資料的應用與發展方式，除了本研究新興熱點之時空數據探勘之外，也許可以結合更多資料探勘技術還有各式的輔助資料，從不同角度挖掘數據的意義，增加應用的廣度，以及詮釋風險的深度。

引用文獻

王晉元 (2019):《應用旅次特性大數據精進公共運輸服務計畫 (編號: 107-IEB016)》。臺北市: 交通運輸研究所。

【Wang, J.Y. (2019). *Using the Big Data of Trip Characteristics to Improve Public Transport Service Plan (No. 107-IEB016)*. Taipei City: Institute of Transportation and Communications.】

內政部消防署 (2019): 天然災害統計。

<https://www.nfa.gov.tw/cht/index.php?code=list&ids=233>。(2019/12/25 瀏覽)

【National Fire Agency, Ministry of the Interior (2019). *Natural Hazard Statistics*.

<https://www.nfa.gov.tw/cht/index.php?code=list&ids=233>. (accessed 2019/12/25).】

何明錦、洪鴻智、陳建忠、陳令韡、簡長毅、陳素櫻、王暉堯 (2009):〈綜合性地震脆弱度與風險評估: 以新竹市為例〉,《建築學報》, 70_S: 111-126。

【He, M.J., Hong, H.Z., Chen, J.Z., Chen, L.J., Jian, C.Y., Chen, S.Y., and Wang, H.Y. (2009). Comprehensive earthquake vulnerability and risk assessment: The image of Hsinchu City. *Journal of*

Architecture, 70_S: 111-126.】

洪鴻智、陳令韡(2012):〈颱風災害之整合性脆弱度評估—大甲溪流域之應用〉,《地理學報》,65:79-96。

【Hong, H.Z., and Chen, L.W. (2012). Integrated vulnerability assessment of Taiwan flood disaster: Application in the Dajia River basin. *Chinese Journal of Geography*, 65: 79-96.】

國家地震工程研究中心(2016):《臺灣地震損失評估系統(TELES)使用手冊》。

【National Earthquake Engineering Research Center (2016). *Taiwan Earthquake Loss Assessment System (TELES) User Manual*.】

國家災害防救科技中心(2016):《地震衝擊資訊平台(TERIA)使用資料與模式說明手冊》。

【National Disaster Prevention and Rescue Science and Technology Center (2016). *Earthquake Shock Information Platform (TERIA) Using Data and Model Instruction Manual*.】

莊睦雄、楊礎毓、林文苑(2017):〈TELES與TERIA地震分析在防救災決策之研析—以宜蘭縣災害防救演練為例〉,《設計學年刊》,5。

【Zhuang, M.X., Yang, C.Y., and Lin, W.Y. (2017). Research and analysis of TELES and TERIA earthquake analysis in disaster prevention and relief decisions: Taking Yilan county disaster prevention and rescue drill as an example. *Design Academy Yearly*, 5.】

陳人卿、吳昱龍、劉晏余、吳秉儒、林佳瑩(2018):〈地震引致臺北都會區重要設施衝擊情境分析—以大阪北部地震反思臺灣地震災害〉,《臺灣災害管理研討會》,54-64。

【Chen, R.Q., Wu, Y.L., Liu, Y.Y., Wu, B.R., and Lin, J.Y. (2018). Analysis of impact scenarios on important facilities in Taipei metropolitan area caused by earthquakes: Reflecting on Taiwan's earthquake disaster with the earthquake in northern Osaka. *Taiwan Disaster Management Seminar*, 54-64.】

黃凱昀(2016):《地震災害之人口暴露度時空特性研究—以臺南市國華友愛商圈為例》。臺南市:國立成功大學都市計劃學系碩士論文。

【Huang, K.Y. (2016). *Study on the spatiotemporal characteristics of population exposure to earthquake disasters: Taking the Guohua friendship business district of Tainan city as an example*. Tainan City: Master's Thesis, Department of Urban Planning, National Cheng Kung University.】

楊惠萱、陳怡臻、李欣輯(2014):〈天然災害社會脆弱度指標之建立及評估:以鄉鎮層級為例〉,《災害防救科技與管理學刊》,3(2):71-93。

【Yang, H.X., Chen, Y.Z., and Li, X.J. (2014). Establishment and evaluation of social vulnerability indicators for natural disasters: Taking the township level as an example. *Journal of Disaster Prevention and Rescue Technology and Management*, 3(2): 71-93.】

劉淑燕、吳佳容、李沁妍、鄧敏政、李洋寧、李中生、柯孝勳、簡賢文(2014):《大臺北地區大規模地震衝擊情境分析報告II:道路系統、水電設施、重要設施、情境綜整。NCDR 102-T15》。

【Liu, S.Y., Wu, J.R., Li, Q.Y., Deng, M.Z., Li, Y.N., Li, Z.S., Ke, X.X., and Jian, X.W. (2014). *Scenario Analysis Report of Large-scale Earthquake Impact in Greater Taipei Area II: Comprehensive Integration of Road Systems, Hydropower Facilities, Important Facilities, and Scenarios*. NCDR 102-T15.】

蕭煥章 (2008)：〈鄉鎮市區水災脆弱度評估模式之研究〉，《華岡地理學報》，21：1-18。

【Xiao, H.Z. (2008). A study on the assessment model of flood vulnerability in townships and urban areas. *Huagang Geographical Journal*, 21: 1-18.】

謝馨頤、康玉萱、洪文孝、吳佳容、劉淑燕 (2016)：〈地震網格建置與衝擊分析應用——以新城斷層為例〉，《2016 臺灣災害管理學會十週年年會》，10-1-10-14。

【Xie, X.Y., Kang, Y.X., Hong, W.X., Wu, J.R., and Liu, S.Y. (2016). Earthquake grid construction and impact analysis application: taking Xincheng fault as an example. *2016 Taiwan Disaster Management Society 10th Anniversary Annual Meeting*, 10-1-10-14.】

蘇昭郎、黃詩倩、陳禹銘 (2009)：〈災害風險評估研究之探討〉，《災害防救電子報》，48：1-10。

【Su, Z.L., Huang, S.Q., and Chen, Y.M. (2009). Discussion on disaster risk assessment research. *Disaster Prevention and Rescue Newsletter*, 48: 1-10.】

Ahas, R., Aasa, A., Yuan, Y., Raubal, M., Smoreda, Z., Liu, Y., Ziemlicki, C., Tiru, M., and Zook, M. (2015). Everyday space-time geographies: using mobile phone-based sensor data to monitor urban activity in Harbin, Paris, and Tallinn. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(11): 2017-2039.

Alexander, L.P., and González, M.C. (2015). Assessing the impact of real-time ridesharing on urban traffic using mobile phone data. *Proc. UrbComp*, 2015: 1-9.

Aubrecht, C., Fuchs, S., and Neuhold, C. (2013). Spatio-temporal aspects and dimensions in integrated disaster risk management. *Natural Hazards*, 68(3): 1205-1216.

Blondel, V. D., Decuyper, A., and Krings, G. (2015). A survey of results on mobile phone datasets analysis. *EPJ data science*, 4(1): 10.

Catmull, E., and Rom, R. (1974). A class of local interpolating splines. In *Computer Aided Geometric Design* (pp. 317-326). academic Press.

Chen, G., Hoteit, S., Viana, A. C., Fiore, M., and Sarraute, C. (2018). Enriching sparse mobility information in Call Detail Records. *Computer Communications*, 122: 44-58.

Cheng, X., Fang, L.Y., Hong, X.M., and Yang, L.Q. (2017). Exploiting mobile big data: Sources, features, and applications. *IEEE Network*, 31(1): 1500295NM.

Cinnamon, J., Jones, S. K., and Adger, W. N. (2016). Evidence and future potential of mobile phone data for disease disaster management. *Geoforum*, 75: 253-264.

Esri (n.d.). How kernel density works. *Tool Reference*.

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-kernel-density-works.htm>.

(Retrieved 2019/10/18)

Federal Emergency Management Agency (2010). *Hazus[®] MH MR5 Technical Manuals and User's Manuals*. Washington, D.C.

Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., and Dahe, Q. (Eds.). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of The Intergovernmental Panel*

- on *Climate Change*. Cambridge University Press.
- Iqbal, M.S., Choudhury, C.F., Wang, P., and González, M.C. (2014). Development of origin–destination matrices using mobile phone call data. *Transportation Research Part C*, 40(2014): 63–74.
- Khan, H., Vasilescu, L. G., and Khan, A. (2008). Disaster management cycle-a theoretical approach. *Journal of Management and Marketing*, 6(1): 43–50.
- Lane, N.D., Miluzzo, E., Lu, H., Peebles, D., Choudhury, T., and Campbell, A.T. (2010). A survey of mobile phone sensing. *IEEE Communications Magazines*, 48(9): 140–150.
- Lind, A., Hadachi, A., and Batrashev, O. (2017). *A new approach for mobile positioning using the CDR data of cellular networks*. In 2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS) (pp. 315–320). IEEE.
- Lindsay, B. R. (2012). *Federal Emergency Management: A Brief Introduction*. Congressional Research Service, Library of Congress.
- Long, J. A. (2016). Kinematic interpolation of movement data. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(5): 854–868.
- Nirupama, N. (2012). Risk and vulnerability assessment: a comprehensive approach. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 3(2): 103–114.
- Nyhan, M., Grauwin, S., Britter, R., Misstear, B., McNabola, A., Laden, F., Barrett, S.R.H., and Ratti, C. (2016). “Exposure Track”—The Impact of Mobile-Device-Based Mobility Patterns on Quantifying Population Exposure to Air Pollution. *Environ. Sci. Technol*, 50(17): 9671–9681.
- Parzen, E. (1962). On estimation of a probability density and mode. *Ann. Math. Stat.*, 33: 1065–1076.
- Renner, K., Schneiderbauer, S., Pruß, F., Kofler, C., Martin, D., and Cockings, S. (2018). Spatio-temporal population modelling as improved exposure information for risk assessments tested in the Autonomous Province of Bolzano. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27: 470–479.
- Robinson, L. (2017). *Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment, Special Topic: Earthquake Hazard and Risk Assessment*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).
- Rosenblatt, M. (1956). A central limit theorem and a strong mixing condition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 42(1): 43.
- Shaw, S. L., Tsou, M. H., and Ye, X. (2016). Human dynamics in the mobile and big data era. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(9): 1687–1693.
- Shaw, S. L., Yu, H., and Bombom, L. S. (2008). A space-time GIS approach to exploring large individual-based spatiotemporal datasets. *Transactions in GIS*, 12(4): 425–441.
- Smith, A., Martin, D., and Cockings, S. (2016). Spatio-temporal population modelling for enhanced assessment of urban exposure to flood risk. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 9(2): 145–163.
- Steenbruggen, J., Tranos, E., and Nijkamp, P. (2015). Data from mobile phone operators: A tool for smarter cities? *Telecommunications Policy*, 39(3–4): 335–346.

- Tatem, A.J., Huang, Z., Narib, C., Kumar, U., Kandula, D., Pindolia, D.K., ... and Lourenço, C. (2014). Integrating rapid risk mapping and mobile phone call record data for strategic malaria elimination planning. *Malaria journal*, 13(1): 52.
- Toole, J.L., Ulm, M., González, M.C., and Bauer, D. (2012). *Inferring land use from mobile phone activity*. Proceedings of the ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing, 1-8.
- Wang, H.Y., Calabrese, F., Lorenzo, G.D., and Ratti, C. (2010). Transportation mode inference from anonymized and aggregated mobile phone call detail records. *Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*, 19-22.
- Wesolowski A, Stresman G, and Eagle, N. (2014). Quantifying travel behavior for infectious disease research: a comparison of data from surveys and mobile phones. *Sci Rep*, 14(4): 5678.
- Wilson, R., zu Erbach-Schoenberg, E., Albert, M., Power, D., Tudge, S., Gonzalez, M., Guthrie, S., Chamberlain, H., Brooks, C., Hughes, C., Pitonakova, L., Buckee, C., Lu, X., Wetter, E., Tatem, A., and Bengtsson, L. (2016). Rapid and near realtime assessments of population displacement using mobile phone data following disasters: The 2015 Nepal Earthquake. *PLOS Currents Disasters*.
- Xu, Y., Shaw, S.L., Zhao, Z.L., Yin, L., Lu, F., Chen, J., Fang, Z.X., and Li, Q.Q. (2016). Another tale of two cities: Understanding human activity space using actively tracked cellphone location data. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(2): 489-502
- Yu, B., and Kim, S. H. (2006). Interpolating and using most likely trajectories in moving-objects databases. In *International Conference on Database and Expert Systems Applications* (pp. 718-727). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Yu, B., Kim, S. H., Bailey, T., and Gamboa, R. (2004). Curve-based representation of moving object trajectories. In *Proceedings. International Database Engineering and Applications Symposium*, 2004. IDEAS'04. (pp. 419-425). IEEE.

投稿日期：110 年 04 月 30 日

修正日期：110 年 10 月 24 日

接受日期：110 年 12 月 29 日

