

國際空間資訊發展新浪潮

徐百輝 國立臺灣大學土木工程學系助理教授／
臺灣地理資訊學會理事長

摘要

地球上任何與地理空間位置相關的資訊都可視為空間資訊，其應用範圍涵蓋了國家基礎建設、科學研究、及一般日常生活應用等。空間資訊科技主要涵蓋了測繪、地理資訊系統及資訊等相關領域的知識及技術，在各領域不斷地進步發展下，不僅空間資料的形態十分多元，所能提供的資訊服務及應用亦日趨廣泛。本文將從空間資料觀測、處理、分析及應用等觀點，說明目前國際上空間資訊的最新發展。空間資料觀測的主要發展趨勢是微型感測器的進步，以及整合物聯網提供了即時動態的巨量空間資料，這也直接促進了空間資料科學的發展，其中人工智慧或是機器學習的應用等可以說是目前最熱門的研究及應用話題。展望未來，跨領域整合仍是促進空間資訊科技發展的原動力。

關鍵詞：空間資訊、測繪技術、地理資訊系統、巨量空間資料、人工智慧

壹、前言

自古以來，地圖一直是人類用來指引方向的重要工具，傳統地圖的製作方式主要依賴測繪（Surveying and Mapping）技術將地表上各種事物或現象精確地記錄在紙圖上面；1960年代，地圖與電腦（Computer）的結合開啟了地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）的發展，隨後藉由與其他科學及技術之整合，如測量、地理、數學、統計、資料庫、及網路技術等，各種 GIS 軟體與系統相繼出現，其應用層面亦不斷地擴展，至今人手一隻智慧型手機即可以輕易達到導航的

目的。一般對地理資訊系統的定義是一個用來蒐集、儲存、管理、處理、分析、以及展示地理空間資料的資訊系統，也有許多人認為 GIS 僅是一個用來處理地理資料的軟體工具而已。事實上，隨著這幾年空間資訊科技的發展及實際應用上的需求，GIS 已經不再只是一個軟體工具或系統。著名的 GIS 學者 Michael Goodchild 認為 GIS 中的系統（System）可以進一步擴展為科學（Science），即 Geographic Information Science，或稱之為 GIScience（Goodchild 2009），其同時包含了地理資訊系統技術及更多相關的科學應用等，其應用層面涵蓋環境監測、都市規劃、科

學調查、資源管理、災害監測及管理、生態科學、人文社會等，而這些應用層面的廣大需求也間接促進了空間資訊相關技術的發展。

近年來，測繪技術的進步除了有效提昇空間資料的品質及準確性之外，也使得資料建置及蒐集更具即時性、豐富且多元化；另外地理資訊系統既然屬於資訊系統的一種，免不了會受到資訊技術（Information Technology, IT）發展的影響；而空間資訊服務（Services）則必須提供不同領域的應用需求。圖 1 所示為地理資訊系統、測量技術、資訊技術、及空間資訊服務之間的關聯圖，本文將這些相關的技術及方法通稱為「空間資訊科技」，從圖 1 中可以發現各種技術與方法之間的關係具有一定的複雜度且彼此牽連，某項技術的新興發展將可能牽動其他技術的改變。例如即時性的災害或環境監測服

務需使用到各式航遙測或物聯網（Internet of Things, IoT）技術，進而產生了空間巨量資料（Spatial Big Data），為了提升巨量資料分析的效能，可採用雲端（Cloud）及人工智慧（artificial intelligence, AI）技術進行空間的儲存、管理及分析等，此種整合不同領域最新技術之發展及應用正是促進目前空間資訊發展新浪潮的主要原因。本文無法描述各種新興技術對於空間資訊科技發展之影響，將僅就目前國際上較新的發展進行簡短介紹。

貳、空間資訊整體發展趨勢

根據美國「國家地理空間諮詢委員會」（National Geospatial Advisory Committee, NGAC）的觀察，有幾項整體發展趨勢正帶動新興空間技術的發展（National Geospatial Advisory Committee 2016）：

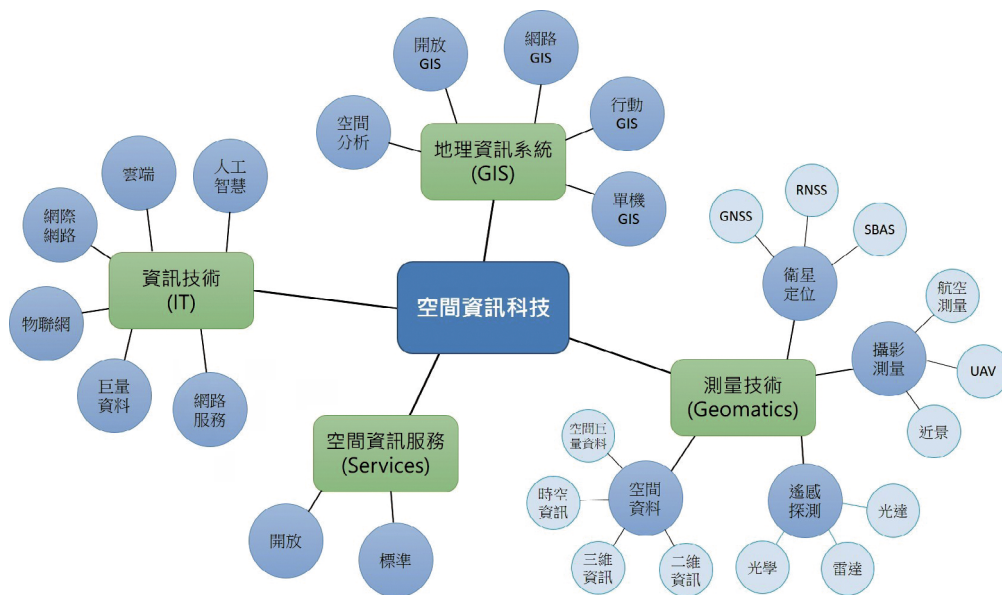


圖 1 不同領域新興技術之關聯性

資料來源：本文整理繪製

一、具互動性的即時時間－空間資料蒐集

獲取即時性的時空資料 (Spatial-Temporal Data) 並非新的需求或概念，但要能以互動方式隨時隨地獲取各種空間資訊，是目前各國正努力的目標。這將改變現行有關空間資訊的收集、繪製、以及分析模式的方式，也將改變空間資訊各相關領域間的關係及結構。

二、微型化 (miniaturization) 技術

小型且低成本的網路感測設備是促進物聯網能實際廣泛應用的主要原因，低成本讓我們可以根據應用需求蒐集到更多不同地點、不同時間、不同類型的資料，也可達成上述互動即時性時空資料的觀測。

三、空間資訊感測平臺技術的發展

除了小型低成本的感測器之外，專業測量儀器也朝向微型化、高機動性的特性發展，如體積更小、重量更輕的小衛星 (smallsats)、無人飛行系統 (unmanned aircraft systems, UAS)、測繪車等，這些專業測量技術的轉變有效地提升了空間資料觀測及收集的效率。

四、資料傳輸技術的擴展

無論是感測器的進步，或是互動即時性時空資料收集方式的發展，都將產生多元大量的空間資料，這對於資料儲存、傳輸及發佈等皆是極大的挑戰。因此新的網路及無線通訊技術將會扮演重要的角色。

五、較多的儲存空間及高速運算

面對巨量的空間資料，如何儲存及進行快速運算也將是未來的發展重點。其中高效能運算 (high performance computing) 及雲端計算 (cloud computing) 服務將會是重要的工作。

對應到上述各項整體發展趨勢，以下將說明當今國際上幾個空間資訊技術發展的最新狀況及相關應用。

參、測繪技術及空間資料蒐集方式的轉變

測繪技術可以說是獲取空間資料最主要的方法，常見的測量方法包含傳統地面測量、衛星定位測量 (Satellite Positioning)、航空攝影測量 (Photogrammetry)、衛星遙感探測 (Remote Sensing) 等，這些測繪技術最新的發展主要受惠於感測器微小化及資料傳輸效率的影響。

一、衛星定位測量

提到衛星定位技術，大多數人先想到的應該是美國的全球定位系統 (Global Positioning System, GPS)。1970 年代所發展的 GPS 主要是為了軍事用途，但也很快地就被應用到民生用途上，也引起其他各國相繼建立自己的衛星定位系統，包含俄羅斯的 GLONSS、歐盟的 Galileo 系統、中國的北斗系統 (BDS) 等；此外，尚有利用地球同步衛星提供衛星修正資料藉以提升定位精度的星基增強系統 (Satellite-Based Augmentation Systems, SBAS)、以及區域衛星導航系

統 (Regional Navigation Satellite System, RNSS) 等，這些系統通稱為全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS)。近幾年，GNSS 的發展在各種應用需求的驅動下正快速成長中，除了提供專業測繪技術所需的空間資訊之外，GNSS 作為一種具有低成本效益，且可即時提供空間位置的技術，其也已經成為其他新興技術或應用的重要基礎元素，如可記錄傳感器位置的物聯網，空間巨量資料、及智慧城市等應用。現今內建 GNSS 晶片的智慧型手機可以說是帶動整個空間資訊應用的最大功臣，其他諸如個人穿戴裝置、數位相機、汽車導航等應用亦扮演重要角色。根據歐洲全球導航衛星局 (European GNSS Agency) 的市場調查，在 2025 年前，全球 GNSS 晶片累計收益的主要應用領域為適地性服務 (Location-Based Service, LBS) (約占 43.4%) 及道路 (Road) 應用 (約占 50%)，此兩者合佔整體市場比

例超過 93%，如圖 2 所示 (European GNSS Agency, 2017)。其中適地性服務整合了衛星定位、網路通訊、以及移動地理資訊系統 (Mobile GIS) 等技術，是一種可以提供與地理空間位置相關的資訊服務 (Information Service)，也是目前許多網路地圖商用來建置導航資料庫及街圖的主要方式，而道路應用主要包含了汽車導航 (Navigation) 及自駕車 (Self-Driving Car) 的相關應用，也是目前相當熱門的空間資訊應用。

二、遙感探測

遙感探測是獲取空間資訊的主要方法之一，近年來地球觀測衛星 (Earth Observation Satellite) 的發展目標主要是獲取高空間或高光譜解析度的遙測影像，然而這些衛星的體積及重量通常較為龐大，設計及發射成本也十分昂貴，此外單一衛星的功

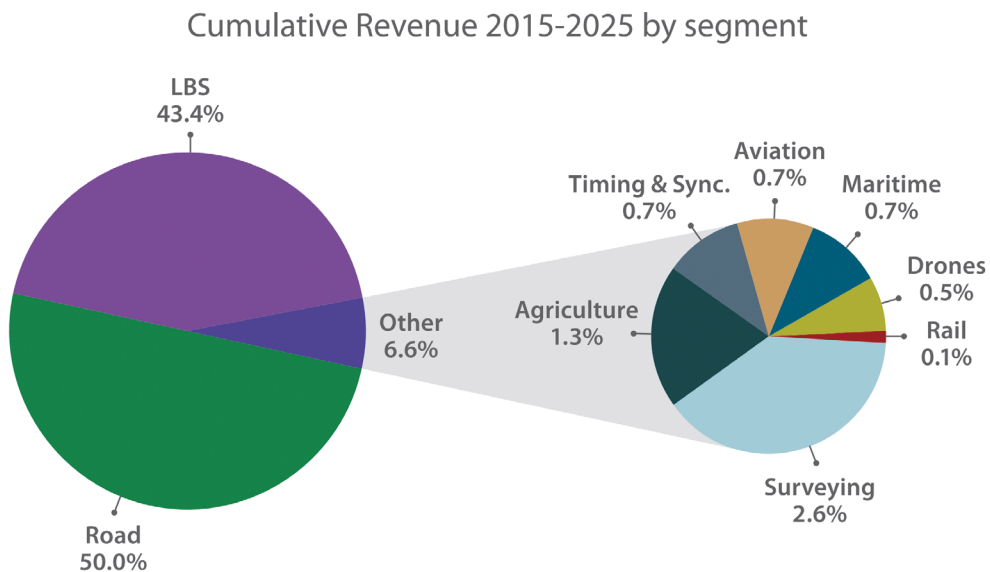


圖 2 2015-2025 不同 GNSS 應用於之累計收益比例

資料來源：European GNSS Agency 2017

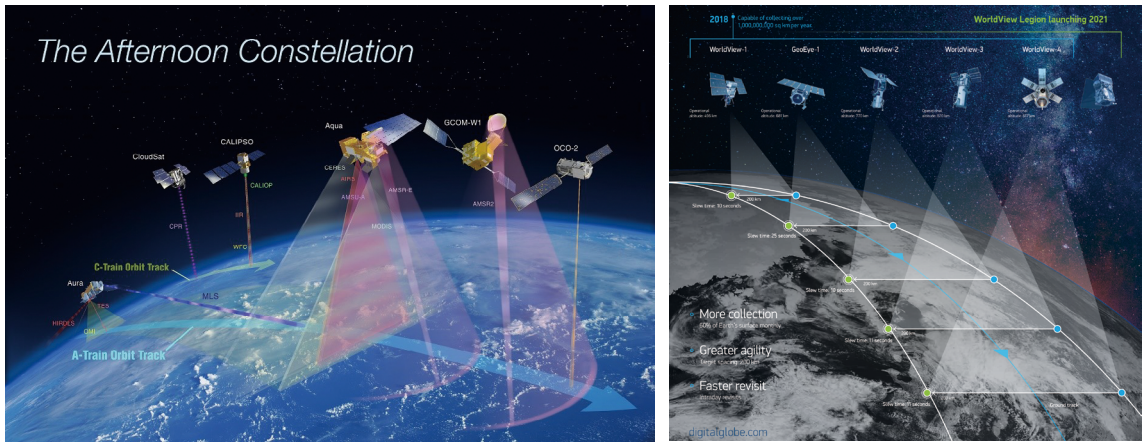


圖 3 衛星星系示意圖：(a) 美國 The Afternoon Constellation 星系；(b) 美國 Digital Global 星系
資料來源：(a) <https://atrain.nasa.gov> (b) <https://www.digitalglobe.com>

能及涵蓋範圍有限，這些都限制了衛星影像的應用範圍。為了增加多元感測影像的應用及增加覆蓋範圍，許多國家的太空中心或衛星公司將其所屬多顆衛星，或是跨單位合作的不同衛星編成集結成衛星星系 (Satellite Constellation)，以增加影像拍攝功能及擴大拍攝範圍。例如美國 NASA 的 The Afternoon Constellation 星系 (包含 A-Train 及 C-Train) 可在同一時間收集包含可見光、紅外光、光達、雷達、及微波等不同波譜範圍的衛星觀測資料，如圖 3 (a) 所示；另外如美國 Digital Global 的 WorldView-3 衛星每天可以拍攝的影像範圍大約為 68 萬平方公里，但其衛星星系每天可以獲取超過三百萬平方公里的範圍，如圖 3 (b) 所示。

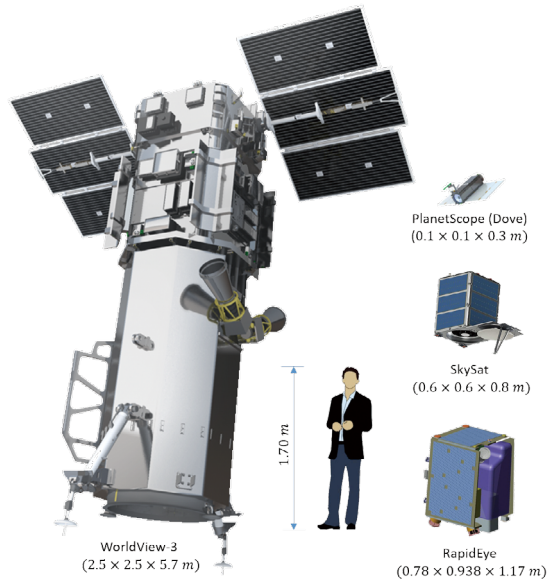


圖 4 不同衛星大小比較

資料來源：本文整理繪製

除了星系的發展之外，縮小衛星的體積也是各國積極發展的目標。一般將重量小於 500 公斤的衛星稱為小衛星 (SmallSats)，其下依據不同重量尚可區分為迷你衛星 (Mini-satellite, 100 至 500 公斤)、微衛星 (Micro-satellite, 10 至 100 公斤)、奈

衛星 (Nano-satellite, 1 至 10 公斤)、皮衛星 (Pico-satellite, 0.1 至 1 公斤) 及飛衛星 (Femto-satellite, 小於 0.1 公斤) 等 (Gao et al 2009)。圖 4 及表 1 列出各種小衛星的尺寸及規格差異。小衛星因為體積

小、成本低、可模組化設計、機動性高，以及可大量部署等，這些優點能有效增加星系的衛星數量，進一步提升衛星的觀測功能及拍攝範圍。根據歐洲 EuroConsult 的調查報告，在 2008 到 2017 年間，全世界一共發射了 1187 個小衛星，其中於 2017 年發射的小衛星有 330 顆，地球觀測衛星則佔了約 3/2。EuroConsult 亦對未來 10 年的發展進行預估，預計到 2027 年全球將有 7038 顆小衛星，其中應用於地球觀測的小衛星大約佔其中的 21%（約 1400 顆）（Euroconsult 2018）。可以預期地球觀測小衛星將來勢必在空間資訊應用中扮演一個重要的角色。

另一種具有明確設計規範的小衛星為立方衛星（CubeSat），其最小單元的標

準尺寸僅 10 立方公分，重量限制在 1.33 公斤內。三個單元以上組合在一起則稱為 3U+。2014 年，立方衛星被著名的「科學」（Science）期刊評為十大科學突破之一；至今立方衛星已經實際應用於對地觀測及科學研究上，以目前擁有全世界最多立方衛星的 Planet 公司為例，該公司目前擁有約 175 顆 PlanetScope（Dove）3U 立方衛星，可以每天拍攝全球的衛星影像，取像的時間解析度相當驚人。美國 NASA 的 TROPICS 計畫則規劃在三個不同軌道面部署多個立方衛星進行微波觀測，所測得有關降水結構及暴風強度等資訊可用於數值氣候預報（Numerical Weather Prediction, NWP）。

表 1 不同衛星的規格比較

衛星 規格	PlanetScope (Dove)	SkySat -1 to -13	RapidEye	WorldView-3
營運單位	Planet Labs	Planet Labs (Skybox Imaging)	Planet Labs (RapidEye AG)	Digital Global
衛星數量	120+	15	5	1
重量	~5 kg	~100 kg	~150 kg	2800 kg
感測器	MS	PAN, MS	MS	PAN, MS
多光譜波段數	3-4	4	5	8
空間解析度	MS : 2.7-4.9 m	PAN : ~0.8 m MS : ~1.0 m	MS : ~6.5 m	PAN : ~0.31 m MS : ~1.24 m
取像最大面積 (km ² /day)	200M+	400K	6.5M	680K

資料來源：本文自行整理

三、移動測繪系統

除了小衛星的發展之外，具高機動性的移動測繪系統（Mobile Mapping System, MMS）也是最近幾年來測繪領域積極突破的技術。移動測繪系統將各種感測器，如數位相機、光達、雷達等裝置在具有定位系統的移動平臺上，如各式車輛、無人機、船舶、或是可攜式個人裝備等，如圖 5 所示。MMS 除了能迅速且精準地獲取周遭的三維空間資

訊之外，對於人類無法到達進行測量的地方，MMS 更能發揮其機動性的優勢。MMS 的定位系統包含衛星定位系統（GNSS）及慣性測量單元（IMU），此定位系統能協助光達、數位相機或其他感測器所獲得之空間資料進行地理定位（geo-referencing）。MMS 能藉由光達或影像密匹配獲取大量具有三維坐標的點（又稱點雲），再結合影像資料後能建立虛擬的三維場景模型，如圖 6 所示。

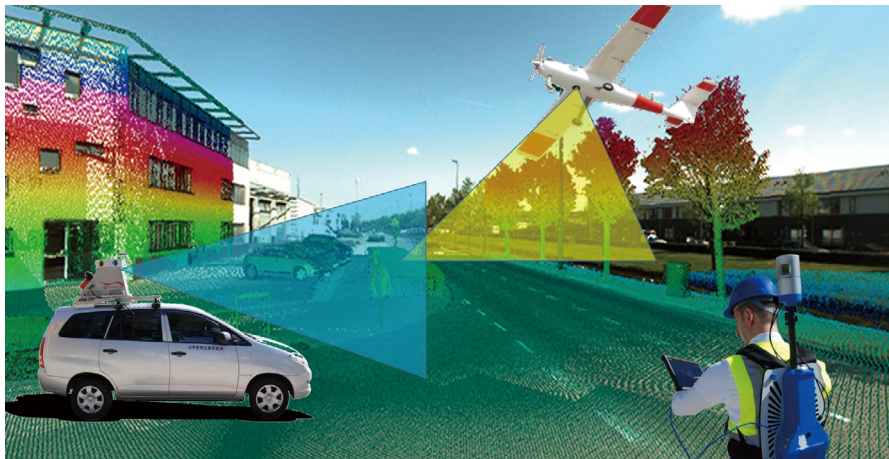


圖 5 各式移動式測繪平臺

資料來源：本文整理繪製，背景圖片 <<http://www.geocartspa.it>>

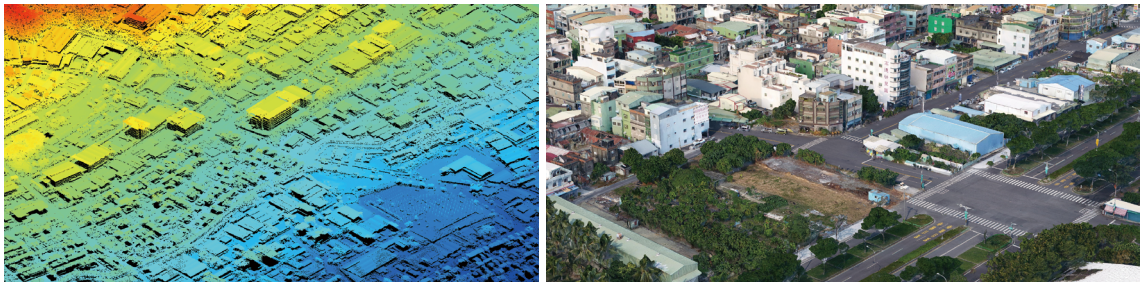


圖 6 三維點雲資料（左）及三維虛擬城市模型（右）

資料來源：本文整理繪製

四、協作製圖

空間資料除了來自專業測量人員的繪製之外，也可以透過社會大眾以協同合作的方式產生，此種協作製圖（Collaborative Mapping）的方式一般又稱為自發性地理資訊（Volunteered Geographic Information, VGI）（Goodchild 2007）。VGI 其實源自於 Web 2.0 的參與式網路概念，其由非專業製圖人員自願性地參與地理圖資的創建，且公開於網路上進行分享，因此也有人將 VGI 視為是地理資訊的群眾外包（Crowdsourced），著名的開放街圖（OpenStreetMap, OSM）即是一種經由大眾協同合作所產生的線上地圖，另外結合 Google Map 及 Wiki 精神的 WikiMapia 也是一種協作地圖。地理位置是協

作製圖中的要素之一，其主要來源為上述已經大眾化的 GNSS 技術，以及開放的遙測影像。

群眾的主觀及情感因素為影響協作製圖成果及品質的主要原因，此外協作製圖的涵蓋範圍及內容也並非全球均等，然而透過熱心大眾的貢獻，協作製圖可以提供專業製圖中未規劃的地圖內容，且資料收集時間及更新速度更為快速。現今協作製圖的成果已經成為許多商業及非商業應用的主要空間資料來源。

五、物聯網

物聯網（IoT）是一種能讓所有物體或裝置互相傳遞及交換訊息的一種網路，透過 IoT 可以方便地對散落在不同位置的物體或裝置

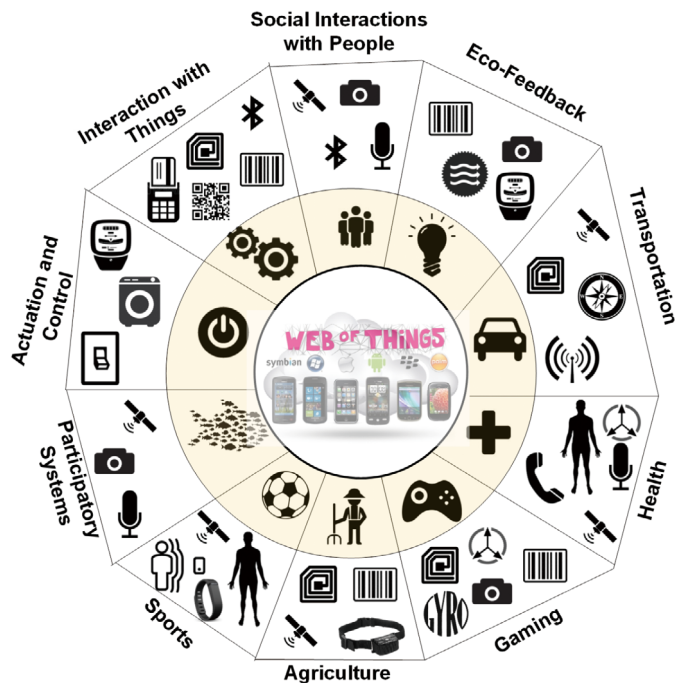


圖 7 以物聯網技術提供適地性服務之相關應用

資料來源：Kamilaris & Pitsillides 2016

進行集中管理、遙控、及監控等，也可以透過內嵌的感測器蒐集裝置附近的環境資料，如溫度、濕度、壓力、噪音、汙染物等。近年來，隨著室內外定位技術的進步，IoT 中的物體或裝置之地理位置也可以被精確地記錄下來，並連同其他感測資料一起進行空間分析，這便是 IoT 與 GIS 技術的結合運用，也是前述適地性服務 (LBS) 的另一種具體實現。圖 7 顯示了應用智慧型手機定位及物聯網技術提供適地性服務之相關應用 (Kamilaris and Pitsillides 2016)，其中 Web of Things (WoT) 為透過 Web 相關框架與標準進行訊息溝通的 IoT，可以發現整合空間資訊的 IoT 使其應用更佳豐富且多元化，而 IoT 蒐集空間資料的能力也符合美國 NGAC 所列空間資訊整體發展趨勢之一，即空間資料的蒐集正往具互動性即時時間 - 空間資料蒐集的趨勢前進。另有研究分析指出由 IoT 所獲取的大量空間資料將衍生出後續空間巨量資料分析的相關議題 (Kamilaris and Ostermann 2018)。

肆、空間資料分析方法的改變

上述測繪技術及空間資料蒐集方式的轉變使得空間資料的種類更加豐富及多元化，巨量的空間資料也促使相關的處理分析方法必須有所改變，以下說明空間資料型態的轉變及最新的空間資料處理方法。

一、空間資料型態的改變

隨著上述有關測繪技術及空間資料蒐集方式的轉變，空間資料的型態也有了以下的變化：

(一) 空間資料的維度改變

隨著空間資料蒐集方法的進步，空間資料已由傳統的二維平面資料轉為三維立體資料，若再加上時間序列觀測則衍生出所謂的四維時間—空間資料。

(二) 空間資料的爆炸性增長

空間資料的來源包含前述的 GNSS、衛星、無人機、測量車、智慧型手機、群眾外包、IoT、社群網路、相機等，空間資料不僅種類多元，資料量亦相當龐大，同時也有即時觀測的空間資料。這些剛好符合巨量資料的 3V 特性，即資料量 (Volume)、資料類型 (Variety)、以及資料生產與更新速度 (Velocity) 等。因此有人將具有 3V 特性的空間資料稱為空間巨量資料 (Spatial Big Data, SBD)。

(三) 空間資料的跨域特性

由於不同領域對於空間資料的需求，空間資料的種類也越來越多元化，對於跨領域空間資料如何進行整合及共享，標準的制定及語意操作將是未來努力的目標。

二、空間資料處理方法的轉變

與一般巨量資料相類似，空間巨量資料同樣面臨幾個問題，即資料儲存、資料分析以及資料展現等問題。在資料儲存方面，目前普遍採用雲端儲存方案；在資料分析方面，主要以「機器學習」(machine learning) 的方式解決；而巨量資料的視覺化則是另一個研究議題。

空間分析 (spatial analysis) 可以說是 GIS 的主要功能，其主要利用 GIS 中的幾何與位向 (Topology) 關係、以及屬性資料等分析事物的空間分布、相關性及異質性等，藉以進行事物的趨勢分析 (Trend Analysis)、熱點分析 (Hotspot Analysis)、空間內插 (Spatial Interpolation)、以及空間決策支援 (Spatial Decision Support) 等工作。進行空間分析之前需先根據問題決定欲採用的分析模式，這些模式大都具有固定的數學及統計原理，例如大部分的空間分析演算法都以 Waldo Tobler 的地理學第一定律 (Tobler's first law of geography, TFL) 為基礎：“Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things”，即空間距離越接近的事物具有較高的相關性。使用者通常需具有一定的知識背景才有辦法決定使用那些空間分析模式。此外，許多空間分析模式也無法直接應用於巨量空間資料。

人工智慧 (artificial intelligence, AI) 並非是一個全新的議題，但卻是最近這幾年發展最為迅速的技術，也被認為是未來科技發展的主要趨勢。AI 的基本概念主要是藉由電腦計算模仿人類思考的方式，進而模擬或預測人類的行為或能力，其好處是在某種程度上可以取代人類達到自動化的目的，甚至挖掘出人類未有的新知識，因此吸引各界紛紛投入心力進行相關研究。近年來 AI 技術也逐漸地應用於空間資訊的分析上，也有人將 AI 與空間資訊的結合稱為 geoAI。AI 所涵蓋的技術範疇及應用範圍非常廣，其中機器學習 (Machine Learning, ML) 演算法經常被用來進行資料的分析及預測，機器學習的基本概念就是從資料中學習 (Learn from Data)

出隱藏的規則或模式，進一步利用這些學習規則或模式進行模擬或預測，因此幾乎所有機器學習的應用背後都需要巨量資料的支撐，而這也符合目前空間資料巨量化的發展趨勢。

機器學習有很多不同的演算法，若將其運用在地理資訊系統上，則可以對空間資料進行分類 (Classification)、分群 (Clustering) 及預測 (Prediction) 等分析，相關具體應用如氣象人員可以看到氣候模式轉變對地球各區域的影響、醫衛專家可以了解疾病擴散的空間模式進而研擬對策、緊急應變人員可以用來設計災害應變計畫、零售商可以看到促銷最有效的方式、地點及競爭對手等。以下說明三個機器學習結合空間資訊分析的應用案例：

(一) 影像辨識與分類的應用：土地使用分類及車輛辨識

在空間資訊分析中，影像辨識與分類一直是遙測影像分析的重要工作。早期影像辨識與分類大都依賴統計分類法，常因統計模式的限制而無法獲得良好的分類成果。深度學習 (Deep Learning) 是機器學習方法中的一種，其利用神經網路的深層架構直接從巨量資料中學習資料內部的複雜結構，經常用來進行影像辨識及分析。深度學習利用多個處理層 (Multiple Processing Layers) 所組成的計算模型來學習具有多種抽象級別的資料表徵 (Data Representations)，因此具有比淺層神經網路更強大的學習能力 (LeCun et al. 2015)。圖 8 所示為利用深度學習進行影像辨識及分類的成果 (Audebert et al. 2017)，相對於傳統分類方法，深度學習方法通常具有自動化程度較高、辨識準確性較佳的優勢。

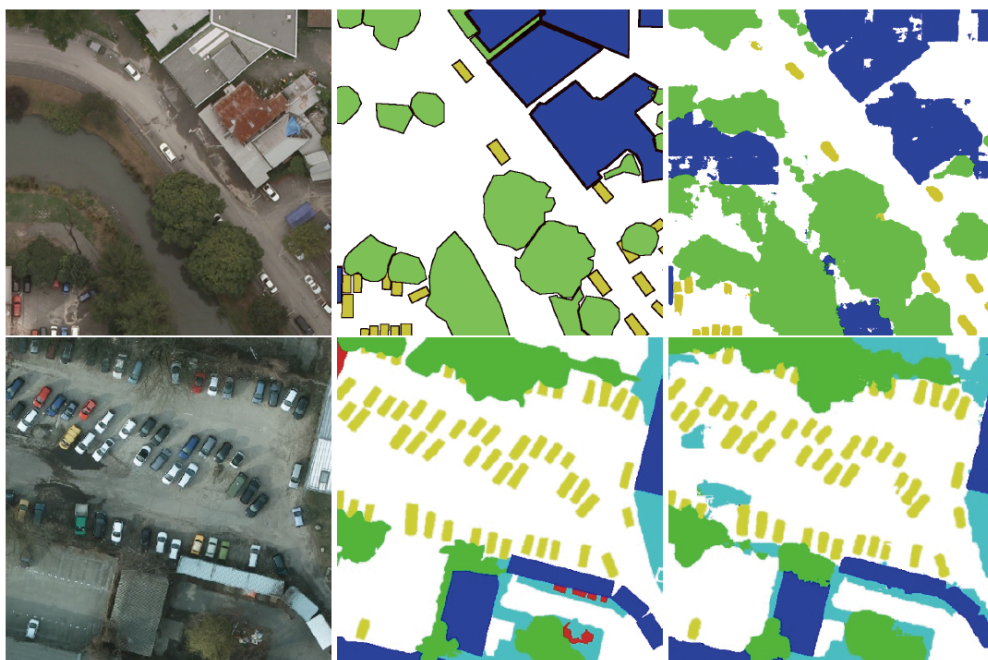


圖 8 以深度學習進行影像辨識及分類

資料來源：Audebert et al. 2017

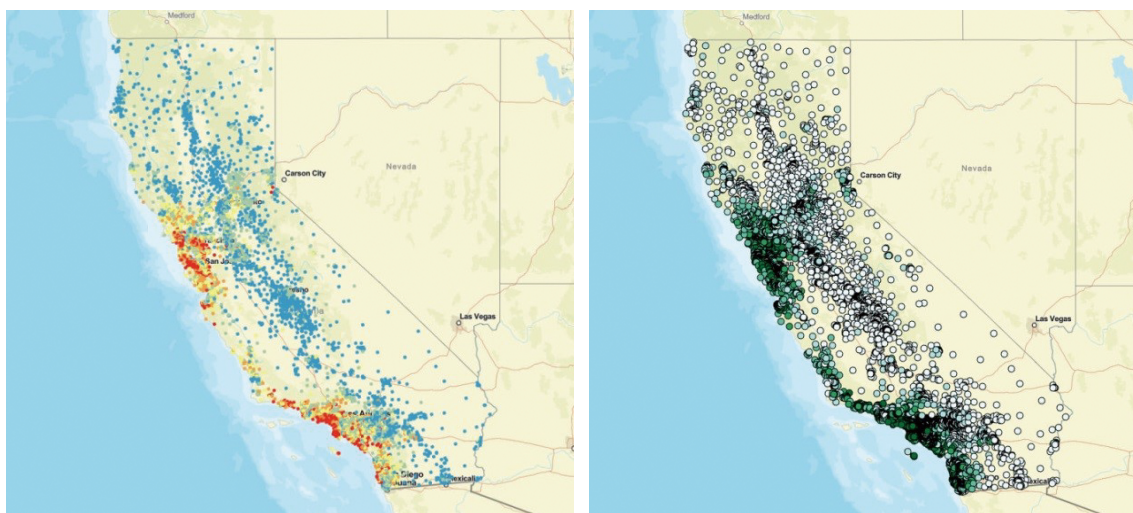


圖 9 利用機器學習對空間資料進行房價預測

資料來源：ArcGIS Blog

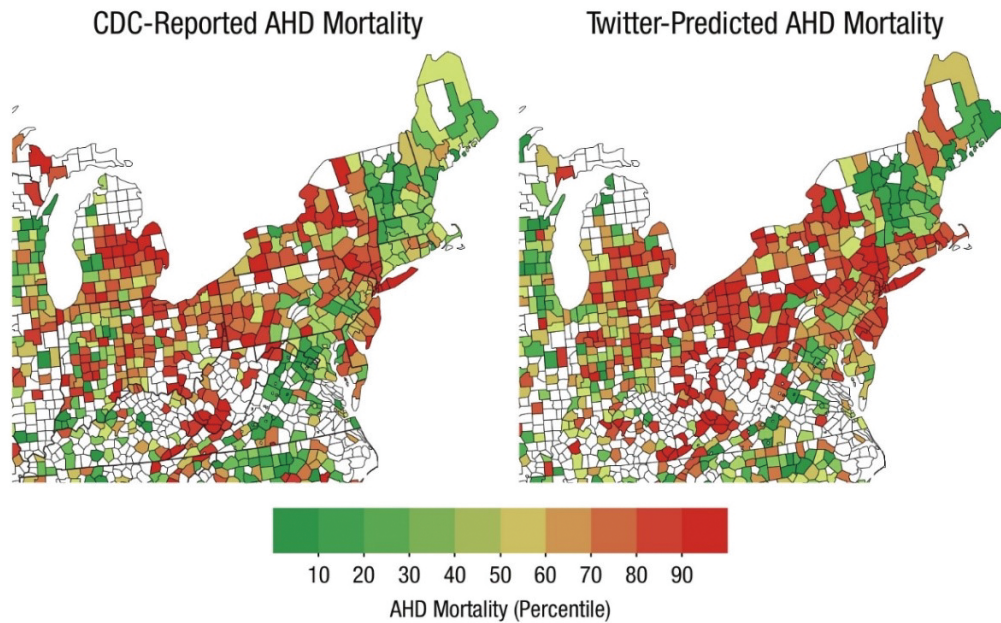


圖 10 美國AHD心臟病死亡率比較：美國CDC統計報告（左）及Twitter推文預測（右）

資料來源：Eichstaedt et al. 2015

（二）因子分析的應用：房價預測

一棟房子的價格跟其所在空間位置及周遭環境有很大的關係，傳統房價的預測大都建立在統計迴歸（Regression）模式上；ESRI 一位工程師應用機器學習演算法對洛杉磯的房價進行預測，結果如圖 9 所示，其在分析過程中同時考量非空間因子及空間因子對房價的影響，非空間因子如收入、屋齡、房間總數、人口等，而空間因子則主要考量周邊設施如學校、醫院、高爾夫球場等的空間距離。此範例所使用的預測模型為隨機森林演算法（Random Forest），其主要好處是所考量因子之間若具有高相關性，亦不會對預測結果產生影響。

（三）巨量空間資料處理的應用：疾病預測

一般認為肥胖、高血壓等生理特徵為導致心臟病的主因，事實上壓力、憂鬱等心理特徵（Psychological Characteristics）亦是導致心臟病的原因之一，然而心理特徵與心臟病之間的關係卻很難進行全面性的調查及分析。美國心理學家發現社群網路（如 Twitter）上的留言在一定程度上可以有效反映社區層級的心理特徵，於是他們分析了美國 1,347 個縣的 1.48 億條 Twitter 推文，並利用語言分析（如樂觀或悲觀言論）推斷社區的心理特徵，並與美國疾病管制局（CDC）所統計的心臟病死亡率進行關聯，結果發現兩者之間呈現相當高的一致性，如圖 10 所示

(Eichstaedt et al. 2015)。雖然此研究仍有一些尚待改善之處，如 Twitter 使用族群並不同於一般人口，以及缺乏時間維度的分析，但此案例仍顯示巨量資料在空間分析的重要性，以及透過機器學習建立疾病預測模型的可行性。

伍、未來展望

空間資訊科技涵蓋測繪技術、地理資訊系統及資訊技術等，在各相關技術不斷地進步發展下，不僅所產生的空間資訊十分多元，所能提供的服務及應用亦相當廣泛。本

文僅針對空間資料蒐集及空間資訊處理分析的最新發展趨勢做了短要說明，因篇幅有限尚有其他重要議題無法提及，如空間資料標準 (Standard)、開放空間資料 (Open Geospatial Data) 及相關服務技術等。

整體來看，空間資訊發展的新浪潮係建立在不同領域技術的整合以及各種不同科學應用的需求上。當現有技術無法滿足實際應用的需求時，就必須突破或尋求更新的技術，此技術可能是來自同領域的進步或是不同領域的最新發展。展望未來，跨領域整合及應用仍是促進空間資訊科技更進一步發展的原動力。

參考文獻

1. Audebert, N., Saux, B. L., & Lefèvre, S. 2017. Segment-before-Detect: Vehicle Detection and Classification through Semantic Segmentation of Aerial Images. *Remote Sensing* 9, no.4: 368.
2. Gao, S.; Clark, K.; Unwin, M.; Zackrisson, J.; Shiroma, W.A.; Akagi, J.M.; Maynard, K.; Garner, P.; Boccia, L.; Amendola, G.; Massa, G.; Underwood, C.; Brenchley, M.; Pointer, M. & Sweeting, M.N. 2009. Antennas for modern small satellites. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 51, no.4: 40–56.
3. Goodchild, M.F. 2007. Citizen as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal* 69. no.4: 211-221.
4. Goodchild, M.F. 2009. Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1: 1037-1043.
5. Eichstaedt, J. C., Schwartz, H. A., Kern, M. L., Park, G., Labarthe, D. R., Merchant, R. M., . . . Seligman, E. P. 2015. Psychological Language on Twitter Predicts County-Level Heart Disease Mortality. *Psychological Science* 26. no.2: 159-169.
6. Euroconsult. 2018. Prospects for the Small Satellite Market: Download the Extract. <<http://euroconsult-ec.com/research/smallsats-2018-extract.pdf>>
7. European GNSS Agency. 2017. *GNSS Market Report, 5th edn*. Publications Office of the European Union, Luxembourg
8. Kamilaris, A., & Pitsillides, A. 2016. Mobile Phone Computing and the Internet of Things: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal* 3. no.6: 885-898.
9. Kamilaris, A., & Ostermann, F. O. 2018. Geospatial Analysis and the Internet of Things. *International Journal of Geo-Information* 7. no.7: 269.
10. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. 2015. *Deep Learning*. *Nature* 521: 436-444.

11. Madry, S., Martinez, P., & Laufer, R. 2018. Innovative Design, Manufacturing and Testing of Small Satellites: Springer International Publishing AG.
12. National Geospatial Advisory Committee. 2016. Emerging Technologies and the Geospatial Landscape.<<https://www.fgdc.gov/ngac/meetings/dec-2016/ngac-paper-emerging-technologies-and-the.pdf>>
13. Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (Eds.). 2017. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems: Springer, Cham.



Public Governance Quarterly