

學術論著

遙測估算建物形變及其影響因素評估—以臺北市為例 Remote-Sensing Based Estimation of Building Deformation and Evaluation of Affecting Factors – A Case Study of Taipei City

林士淵* 藍振維** 胡植慶***

Shih-Yuan Lin*, Chen-Wei Lan**, Jyr-Ching Hu***

摘要

為了城市中人民生命及財產的安全，實施長期的建物及基礎設施監測是一項基本工作。本研究基於合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像，利用長時間序列之高解析度 COSMO-SkyMed 影像，配合永久散射體合成孔徑雷達差分干涉(PS-InSAR)技術，得到2011年5月至2013年7月臺北市內之建物及地表變形成果，再進一步從中萃建物之變形。接著，為得知建物變形與週遭環境因素的關係，本研究使用邏輯斯迴歸(Logistic Regression)，評估人為及自然環境因子與建物形變之關係。迴歸成果指出，建物的下陷確實會與鄰近之人為因素(如：施工捷運路線、興建建物)及自然環境因素(如：土壤液化潛勢)有顯著關係。

關鍵詞：建物形變、合成孔徑雷達、永久散射體合成孔徑雷達差分干涉、邏輯斯迴歸

ABSTRACT

For the safety of people's lives and property in cities, the implementation of routine and long-term health monitoring of buildings and infrastructure is a basic task. Considering the characteristics of large range of space and time coverage of Synthetic Aperture Radar (SAR) images, together with the capability to estimate displacement based on the interferometric SAR (InSAR) processing, we used time-series high-resolution COSMO-SkyMed SAR images, combined with Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) analysis, to obtain displacement occurred in Taipei City from May 2011 to July 2013. From which the deformation of the building was further extracted. Next, in order to understand the relationship between building deformation and surrounding environmental factors, we employed Logistic Regression to evaluate the relationship between building deformation and man-made and natural environmental factors. The results indicated that buildings were significantly affected by nearby man-made factors (such as construction of metro routes, elevated roads, building construction sites) and natural environmental factors (such as soil liquefaction), increasing the probability of building deformation.

Key words: Building deformation, Synthetic Aperture Radar (SAR), Persistent Scatterer Interferometric SAR (PS-InSAR), Logistic Regression

(本文於2021年2月22日收稿，2021年8月16日審查通過，實際出版日期2023年6月)

* 國立政治大學地政學系副教授，通訊作者。

Associate Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University, Taipei, Taiwan. Corresponding Author.
E-mail: syl@nccu.edu.tw

** 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心副研究員。

Assistant Researcher, Disaster Prevention Technology Research Center, Neihu, Taiwan. SINOTECH Engineering Consultants, INC. E-mail: cwlan@sinotech.org.tw

*** 國立臺灣大學地質科學系教授。

Professor, Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan. E-mail: jchu@ntu.edu.tw

一、研究背景與動機

結構物，如：房屋、鐵路、橋樑、公路等，皆是人們日常使用之設施，與人民具有密切的關聯性。隨著城市地區人口數量的增加，公、私部門興建越來越多的建築物與基礎設施來滿足人民日常所需。然而，在使用這些設施的同時，建築物時常因為自然災害、人為活動、屋齡年久等其他因素，導致結構的形變及損壞，可能會對民眾構成生命與經濟損失之威脅。另外，若從房屋屋齡來看，根據內政部不動產交易平台(2018)，截至民國107年第二季之統計，臺北市屋齡平均年齡為33.92年，其中屋齡40年以上的房屋佔總臺北市房屋數量的33.57%，顯示臺灣的建物年齡普遍偏高，此時若再因為地震、強降雨、颱風等事件，或是大型基礎建設興建、地表結構物負重、地下隧道挖掘等人為活動，便有可能造成地表變動，間接造成建物形變，甚至是直接對建物造成破壞，皆提高建物倒塌之潛在風險(Hu et al., 2004; Abidin et al., 2011; Xu et al., 2012)。據此，針對建物及環境施行長時間的觀測，並了解那些自然及人為因素會對建物造成影響，實屬維護居住安全重要之基礎工作。

以臺北市為例，根據前人研究，已知臺北盆地內的地形呈現動態變動，范凱婷(2012)利用雷達資料觀測出1993年至2008年間，臺北盆地內之地勢呈現先抬升後沉降的變動；林銘軒(2012)則是透過2009年的水準測量報告，指出臺北地區已無下陷趨勢。但是2010-2012年，臺北盆地內之地表再次呈現下降，而在2013-2014年，盆地內水準點則顯示地表是上升的趨勢(經濟部水利署，2018)。至於地形變動的原因，王怡方(2013)、王淳璟(2015)與張彥汝(2015)指出，盆地內之地表下陷主要是受到山腳斷層活動影響，吳珮瑾(2017)則說明此現象與大型交通工程有關，如：捷運之興建。基於前述之地表變形動態，以及臺北市區內建物密度高、人口密度高，且仍有眾多建設中的基礎設施等現況，本研究選擇臺北市作為研究區域，對現有建物進行長時期的監測。

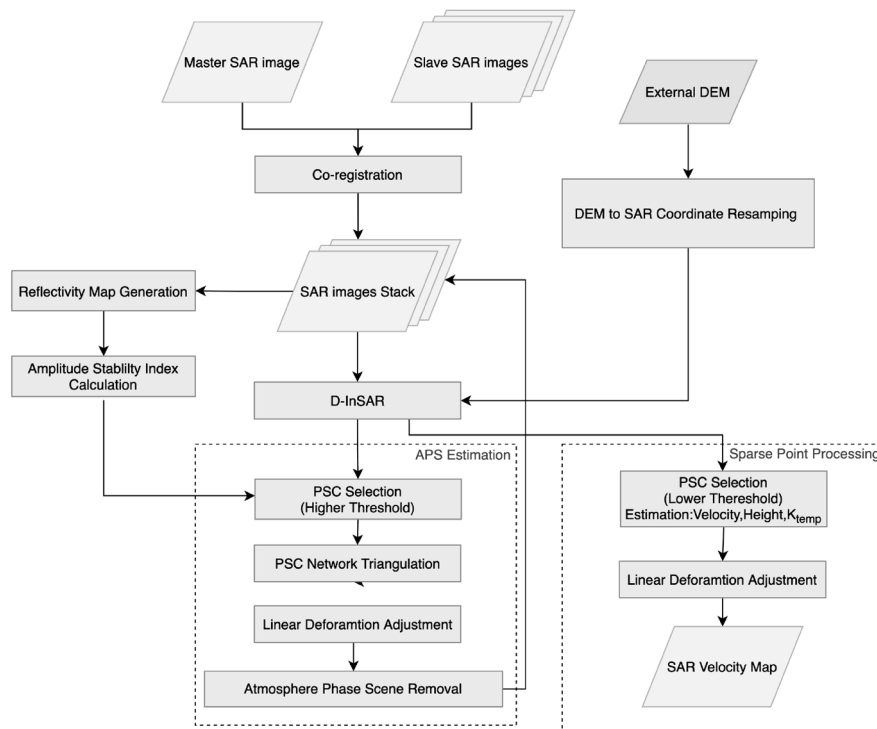
傳統觀測結構物的變形方法如加速度儀(Kim et al., 2007)、全球定位系統(Wrona et al., 2014)、全測站(Psimoulis & Stiros, 2013)、光纖感測器(Hoult et al., 2009)等，雖具有高量測精度，但卻因為成本考量或是技術限制，較無法用來進行大範圍且長時序的監測。相對於前述技術，衛載遙測雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像，因不受日照、天候影響，並可沿軌道重複繞行至同一地區蒐集資料，因此可累積各地區大面積的長時期影像，再隨著近年來高空間解析度SAR感測器的成功發射與運行，如TerraSAR-X、COSMO-SkyMed等，更能詳盡記錄地表及建物的時序資訊(Sansosti et al., 2014)。有了長時期的雷達影像後，利用時間序列合成孔徑差分干涉技術(Time Series Differential Interferometric SAR, TS D-InSAR)，最終能獲取公分等級之地表變形量與變形速度(Xue et al., 2020；謝嘉聲，2007)。

為獲得臺北市內高涵蓋度的建物變形資訊，本研究使用3公尺解析度之COSMO-SkyMed雷達影像作為影像來源。在分析方法的選擇上，由於永久散射體雷達干涉(Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)方法除了可以求得時間序列變形量以及整體變形速度，亦可在求解過程中加入建物熱膨脹效應係數(Perissin & Rocca, 2006)，能夠更準確的反演建物變形，因此本研究使用PS-InSAR方法估算臺北市的建物形變速度。獲得臺北市內之建物變形後，則繼續進一步分析建物下沉與周圍環境的相關性，為達此目標，我們蒐集與建物形變相關的自然及人為環境因素，搭配建物屬性資料，透過邏輯斯迴歸方法(Logistic regression)，找出與建物下沉現象相關之環境因素，並分析其影響程度。

值得一提的是，過去文獻常探討環境因子對於不動產買賣價格之影響(林祖嘉、林素菁，1993；洪得洋、林祖嘉，1999；楊宗憲、蘇倬慧，2011；李春長等，2012；李春長等，2020)，且與民眾之住宅需求高度相關(朱芳妮，2017)，本文透過遙感探測技術與邏輯斯迴歸方法，可了解環境因子與建物實質穩定狀況的關係，據此，可作為未來分析環境因子、建物穩定程度、不動產買賣價格、住宅需求之間關聯的依據。

二、干涉雷達技術偵測建物形變

合成孔徑雷達是一種主動式的遙測系統，透過感測器發出之雷達訊號，接觸至物體後，紀錄其回波之相位及強度，藉此了解所接觸物體之特徵。若進一步將多張雷達影像進行干涉處理，可獲得地表的高程甚至是形變資訊(Rosen, 2000)。衛載SAR影像之優勢在可以於各種天氣條件下接收訊號，並可以提供大範圍的空間覆蓋，一次觀測多棟結構物及地面，當累積足夠數量之影像，經由時間序列分析，便可估算過往變形過程，在精度上也能與一般的監測工具相比較。為獲取長時序高精度之地表時間序列變形，首先提出PS-InSAR方法的是Ferretti et al.(2001)所提出運用永久散射體(Permanent Scatterers)的干涉雷達演算法，基於多幅同地區不同時間之雷達影像，可萃取出永久散射體點，解算地表變形，整體詳細處理步驟如圖一所示，並簡要說明如下。



圖一 PS-InSAR處理流程圖

(資料來源：改繪自periZ(2009))

當蒐集到N張SAR影像後，考量適當的時間及空間基線，選取其中一張為主影像，剩餘影像皆與主影像進行干涉處理，可得N-1張雷達干涉圖。每一張干涉圖皆使用參考數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)進行差分干涉雷達(D-InSAR)處理，以消除地形誤差。接來的處理程序包含大氣誤差的估算以及形變速度的計算，分別呈現在圖一中的APS Estimation以及 Sparse Point Processing兩個流程方框中，兩項工作都需要從D-InSAR成果中選取PS點，Ferretti et al.(2001)使用基於強度資訊的門檻值方法來選取PS點，命名為振幅離差指數(Amplitude Dispersion Index, ADI)：

$$D_A \equiv \frac{\sigma_A}{\mu_A} \dots\dots\dots (1)$$

σ_A 為時間序列中強度之標準差， μ_A 為時間序列中強度之平均值。DA值即代表相位穩定度的量測，代表較高的信號雜訊比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)，其優點在於可以快速地計算且不會喪失空間解析度，每個像元都可以透過此方法計算出一個DA值，當小於門檻值時，便將該點選擇為PS點。找出PS點後，利用Delaunay不規則三角網建立起每個PS點之間的關係(Mora et al., 2003)，可得相鄰PS點之相位差 $\delta\phi_{int}$ ，該相位差之值可以以下式(2)表示：

$$\delta\phi_{int} = \delta\phi_{mov} + \delta\phi_{errortopo} + \delta\phi_{atm} + \delta\phi_{noise} \dots\dots\dots (2)$$

其中， $\delta\phi_{mov}$ 為地表雷達視距(Line of Sight, LOS)方向之變形量造成之相位(欲萃取之相位)， $\delta\phi_{errortopo}$ 為點位高程誤差之相位(必須移除之誤差)， $\delta\phi_{atm}$ 為大氣效應誤差之相位(必須移除之誤差)， $\delta\phi_{noise}$ 為時間、空間不相關及熱膨脹效應所造成之相位(必須移除之誤差)。於APS Estimation程序中利用選取之PS點，透過空間低通及時間高通濾波，分離出每幅影像之大氣相位後，將大氣相位從各幅干涉圖中移除，接著再進入Sparse Point Processing程序，在誤差移除後的D-InSAR成果中重新選取PS點，解算獲得精度較高之形變速度。

若是觀測的對象在長時間序列中擁有季節性的變形趨勢，以至於以上的模型無法適當反演出PS點的形變速度，可在式(2)中加入熱膨脹效應的衡量。Perissin and Rocca(2006)即發現季節性的變形趨勢與都市區內的建物高度存在高相關性，並提出用線性方程式描述建物高度與溫度之間的關係：

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \dots\dots\dots (3)$$

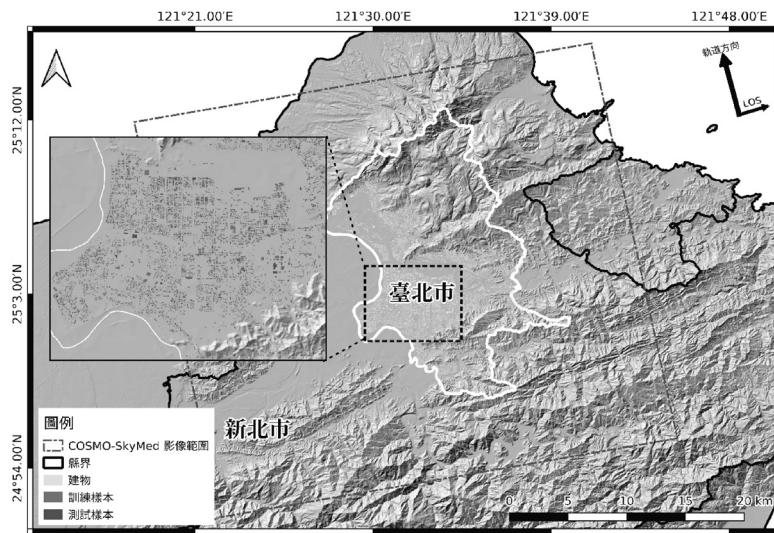
其中 ΔT 為溫度變化量， ΔL 為長度變化量， α 為熱膨脹係數，為物體長度，通常為建物高度。式(3)意指 ΔT 會造成 ΔL 的物體長度 L_0 改變。於相位解算中，以熱膨脹係數 $K_{temp}(rad/^\circ C)$ 表示式(3)中之 αL_0 ，以 $K_{temp} \Delta T$ 形式加入平差計算，求解系統之未知數，準確消除PS點因建物高度所造成的熱膨脹效應。由於本研究之觀測區域包含大量建築物，本研究參考Gernhardt et al.(2010)與 Monserrat et al.(2011)之處理方法，亦在PS-InSAR處理中加入此項修正，以獲得精確的變形量。

三、臺北市建物形變之估算

(一) 雷達影像資料選取

本研究使用COSMO-SkyMed雷達影像進行地表建物變形分析。COSMO-SkyMed為義大利航太中心(Italian Space Agency, ASI)及義大利國防部所資助的太空觀測計畫，於西元2007年開始陸續發射，目前總共有四顆衛星運行，進行觀測地球的任務。因應不同的需求，COSMO-SkyMed拍攝不同範圍與空間解析度的雷達影像，影像主要包括三個模式：小影像範圍(10公里*10公里)及高空間解析度(1公尺)的Spotlight模式、中等影像範圍(30/40公里*30/40公里)及空間解析度(3-15公尺)的StripMap模式、以及大範圍影像(100/200公里*100公里)但低空間解析度(30-100公尺)的ScanSAR模式。

本研究使用StripMap Himage模式的影像，影像解析度3公尺，拍攝範圍如圖二所示，時序雷達影像之年份涵蓋西元2011年至2013年，共29張影像。拍攝軌道為升軌(Ascending)，向右視方向紀錄地表回波資訊，衛星軌道方位角191.06度，入射角為26.61度，為HH偏極化影像。



圖二 COSMO-SkyMed影像範圍

註：臺北市內的建物以黃色多邊形呈現。另外，亦呈現邏輯斯迴歸所使用之訓練樣本與模型測試樣本在臺北市中心之分布情形。

(二) PS-InSAR處理流程與成果

本研究使用SARPROZ軟體執行PS-InSAR分析，在影像像對組成的部分，為了避免出現時間差距過大的像對，我們選擇時間範圍內靠近中間的2012年4月5日的COSMO-SkyMed影像作為主影像，其餘影像皆與主影像配對進行干涉處理，組成之28組像對如表一所列，可得知各個像對的時間基線與空間垂直基線。確認像對之後，便進入時間序列處理程序，包括前章所述之影像前處理、影像前地理對位、大氣相位改正(APS Estimation)及點位分析(Sparse Point Processing)等流程。

表一 使用影像時間及空間基線表

日期	空間基線(m)	時間基線(日)	日期	空間基線(m)	時間基線(日)
2011/05/18	393.634	-323	2012/04/05	0	0
2011/05/21	706.077	-320	2012/05/07	404.023	32
2011/06/10	-829.934	-300	2012/06/08	-27.262	64
2011/06/18	350.421	-292	2012/07/14	-338.700	100
2011/07/08	3.186	-272	2012/08/11	-317.541	128
2011/07/20	-557.128	-260	2012/09/08	-134.170	156
2011/08/05	270.641	-244	2012/09/12	-632.064	160
2011/09/06	159.121	-212	2012/12/29	-682.121	268
2011/10/08	114.331	-180	2013/01/02	57.448	272
2011/11/09	118.072	-148	2013/01/06	83.969	276
2011/12/27	-731.069	-100	2013/01/22	38.512	292
2012/01/12	994.267	-84	2013/02/19	-46.481	320
2012/02/13	-138.224	-52	2013/03/07	629.25718	336
2012/03/16	-114.459	-20	2013/07/13	-71.485	464
2012/03/17	-404.972	-19			

2011年至2013年間臺北市內的PS-InSAR變形速度圖如圖三，整體成果顯示並無太大變動，但仍可發現幾處局部的變化，例如：台北盆地周圍山區，在北投區溫泉及火山區域(參見圖三(a))，出現抬升現象；另外，較為明顯之區域性下沉形變之地區出現在內湖科技園區(參見圖三(b))，以及市區內信義路及南京東路兩條水平幹道區域(參見圖三(c))，其餘下沉區域則相對較為零星分布。

四、建物形變因素之評估

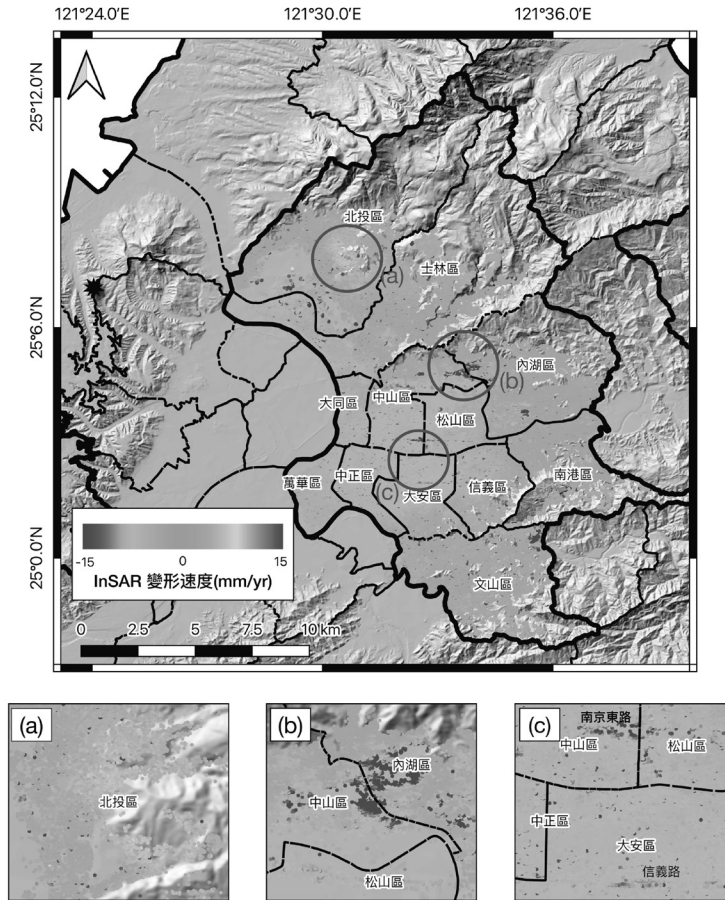
在前章呈現之臺北市形變地圖中，確實出現幾處局部形變區域，為了解形變發生的因素，接續採用邏輯斯迴歸分析，確立建物下沉及周遭環境因素之關係。

(一) 模型建立

為了解臺北市內建物變形與周圍環境因子之關係，本研究採用邏輯斯迴歸分析，萃取與建物沉陷有相關之因素。邏輯斯迴歸通常用來處理二元分類的問題，為一廣義線性模型，模型中自變數可為連續變數或類別變數，而依變數為二元形態，如「成功」或是「失敗」，透過機率統計歸納出區分類別的模式(林韋宏等，2003；Hosmer Jr et al., 2013)。邏輯斯迴歸使用的對數函數為Sigmoid函數，如下式(4)：

$$p = \frac{1}{1 + e^{-f(x)}} \dots \dots \dots (4)$$

其中 p 代表事件發生的條件機率。該式為一S形曲線函數，落於0至1之間，函數曲線對於



圖三 臺北市PS-InSAR分析產製之變形速度圖

點(0,0.5)對稱，當 $f(x)$ 靠近 ∞ 時， p 等於1，反之， $f(x)$ 當靠近 $-\infty$ 時， p 等於0。而一般的迴歸式可以式(5)表示：

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_j x_j \dots \dots \dots (5)$$

其中 x_1, x_2, \dots, x_j 為自變項， β_0 為迴歸模式截距， $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$ 為自變項對應的迴歸係數，並以最大似然估計估算自變項之參數值(Kleinbaum & Klein, 2010)。

本研究以PS-InSAR獲取之建物變形為依據，依建物下沉與否，建立二元依變數；自變數則蒐集各種可能導致建物或地表變形之人為因素及自然因素，以建物與各項因素之距離衡量影響範圍，建立迴歸模型。

(二) 建物形變及環境因素之蒐集與整理

由於PS-InSAR獲得之地表變形成果是以不規則分布的點位表示，為了以建物為空間單位進行迴歸計算，本研究合併臺北市建物公開資料及OpenStreetMap建物圖層(註1)，產製共含30,785棟建物之二維多邊形(註2)，接著將不規則分布之PS點所記錄的變形速度，以空間連結

(Spatial join)方式，找出與各棟建物在空間位置上重疊的PS點，將PS點之變形速度加入至各棟建物，作為屬性資料。若一棟建物內含有多個PS點時，則以平均值代表該棟建物之平均變形速度。至於表示建物下沉之形變速度門檻值，Meisina et al.(2008)、Hosmer Jr et al.(2013)、Bianchini et al.(2015)、Ciampalini et al.(2019)選擇 $\pm 1.5 - \pm 2.0$ mm/yr形變速度作為劃分地表穩定與否之依據。據此，本研究以-2.0 mm/yr作為門檻值區分建物下沉與否，建立二元依變數，形變量大於-2.0 mm/yr的建物，視為沒有發生下沉的建物，虛擬變數為0；反之，形變量小於-2.0 mm/yr的建物，則視為受到下沉影響的建物，給予虛擬變數為1。此為迴歸模型之依變數。

自變數的部分，本研究將建物沉陷的因素分為人為與自然環境因素，人為因素的部分包括各項交通基礎設施、建物興建；自然因素則選擇土壤液化潛勢、地形、溫泉及斷層等。此外，亦包含建物屬性作為自變數。上述環境因子皆使用虛擬變數(參見表二)，以下分別敘述各因素之選擇原因、資料蒐集及處理。

1. 交通基礎設施

臺北市中常見的大型基礎建設主要以交通建設為主，包括：捷運、橋樑、快速高架道路、國家高速公路、地下道、主要道路、鐵路及高鐵等。本研究使用之雷達影像涵蓋期間，適逢捷運信義線及松山線正在興建，為區分捷運建設對建物的影響，將捷運類別區分為興建中捷運線/站及已完工捷運線/站。本研究分別由政府開放資料及OpenStreetMap提供的空間圖徵，萃取出前述各基礎建設的地圖(參見圖四)，這些大型基礎建設本身對土地的負載量大，可能對周遭鄰近建物基地形成壓密現象(Ciampalini et al., 2019)，使得地底發生活動，提高土地下陷的機率。為獲取此項變數，首先計算每棟建物至各項最鄰近之交通基礎設施的距離，接著再依0-30、30-60、60-90公尺分成三個等級，創立三個對應之虛擬變數，視各建物距此設施之距離落於哪個級距，便給予該級距之虛擬變數值1，其餘二級距之變數給0。預測此項迴歸結果係數為正，亦即建物若是愈接近此類因子，會增加其下沉的機率。

2. 新建建物

建物在新建階段，常需要抽取地下水與地下開挖，會造成周遭地面的下降，故本研究也將此因素納入分析。本研究從臺北市政府公開資料找到歷年使用執照(臺北市政府資訊局，2020)，萃取與建物相關的屬性，例如：使用執照的發照日期、地上層數、地下層數、屋齡、建築面積、建物高度、戶數、構造種類、開工日期、竣工日期，從這些屬性中找出開工日期及竣工日期皆落在本研究所使用雷達影像時間範圍內之建造工地及其位置(其分布位置參見圖七)。為了解周圍建物是否於興建完畢後仍受影響，亦將完工一年之新建建物場域納入。計算每棟建物至最鄰近之各新建建物的距離後，依0-20、20-40、40-60公尺進行分級，並建立虛擬變數。預期建物新建會造成附近地表下陷，故預估此項迴歸結果係數為正，亦即在興建房屋周遭的現有建物，在建造階段會增加下陷的機率。

3. 土壤液化潛勢分區

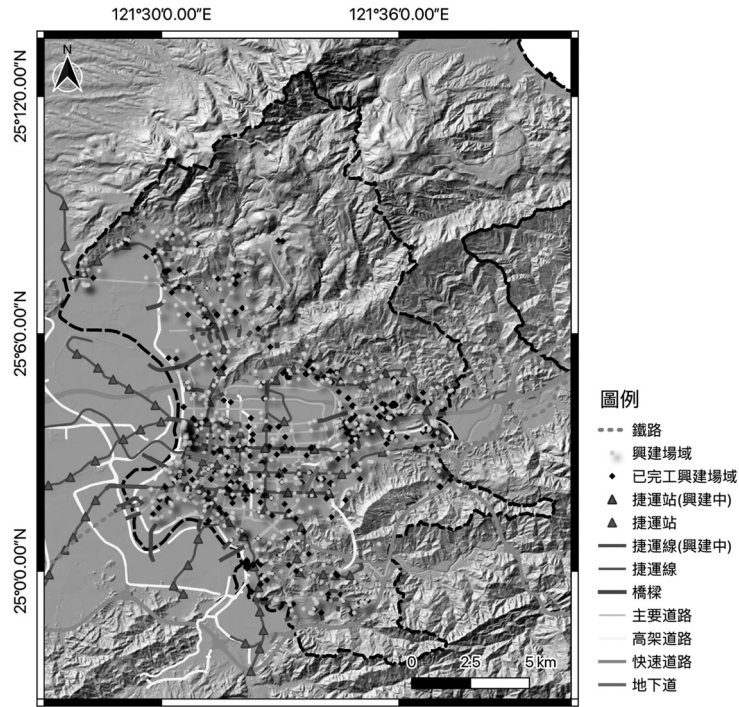
土壤液化發生時，地表的建築結構因為土壤失去承載能力，致使房屋下陷、傾斜、龜裂，及電線桿傾斜等災情。強烈震動過後，因震動增高的水壓逐漸消散，土壤顆粒逐漸沉降，造成進一步的地表沉陷，造成位於該地區之建物有下沉的風險。本研究從臺北市政府(2018)取得之臺北市土壤液化潛勢圖資料，分別為高潛勢、中潛勢及低潛勢三個類別，分布如圖五(a)，預估此項迴歸結果係數為正值，土壤液化潛勢高低與建物下沉有關係。

表二 迴歸模型所使用之變數說明

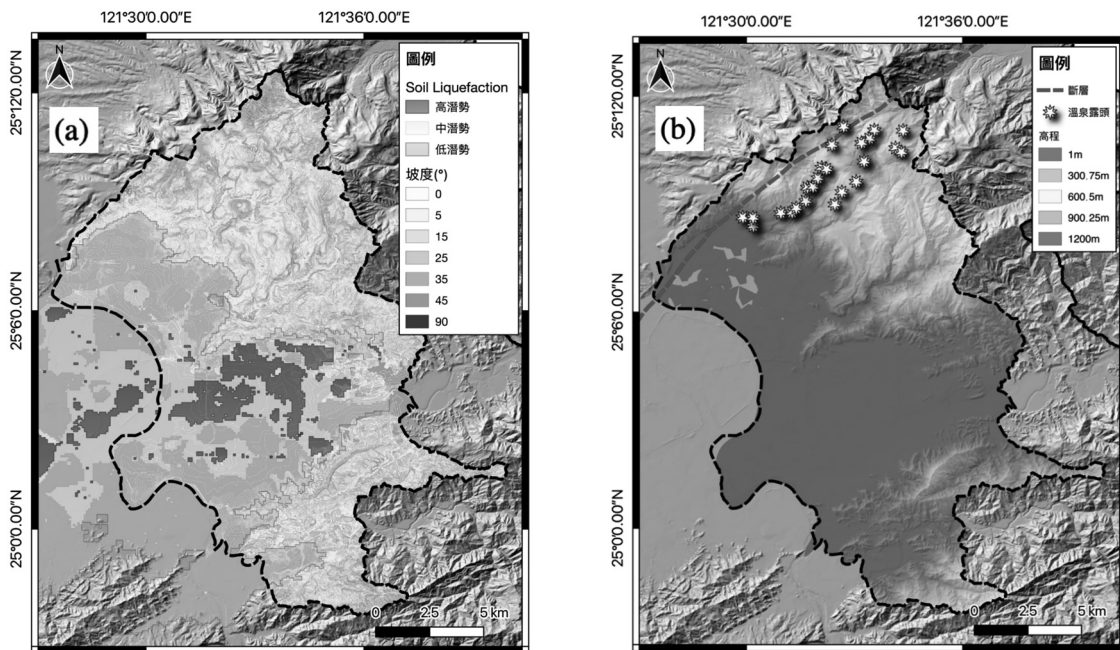
	變數名稱	變數類別	變數說明	預期符號
依變數	建物是否沉陷	(1) 下沉 (2) 無下沉	萃取建物之形變值，視其是否有下沉，若是，給予虛擬變數值1	N/A
自變數	交通基礎設施			
	捷運線	(1) 0-30 m (2) 30-60 m (3) 60-90 m	計算建物至各項最鄰近之交通基礎設施的距離，視其距離落於左欄所列之區間為何，給予虛擬變數值1	+
	捷運線(興建中)			+
	捷運站			+/-
	捷運站(興建中)			+
	高架道路			+
	主要道路			+
	鐵路			+/-
	快速道路			+
	地下道			+/-
	橋樑			+
	興建建地			
	興建場域	(1) 0-20 m (2) 20-40 m (3) 40-60 m	計算建物至各項最鄰近興建場域之距離，視其距離落於左欄所列之區間為何，給予虛擬變數值1	+
	已完工興建場域			+
	自然環境			
	高程	(1) 0-10 m (2) 10-20 m (3) 20-30 m (4) 30-40 m (5) 40-50 m	萃取建物所在位置之高程，視其位於左欄所列之區間為何，給予虛擬變數值1	+/-
	坡度	(1) 0°-5° (2) 5°-15° (3) 15°-25° (4) 25°-35° (5) 35°-45° (6) 45°-55°	萃取建物所在位置之坡度，視其位於左欄所列之區間為何，給予虛擬變數值1	+/-

表二 迴歸模型所使用之變數說明(續)

	變數名稱	變數類別	變數說明	預期符號	
自變數	土壤液化潛勢分區	(1) Low (2) Median (3) High	分析建物是否位於土壤液化潛勢區，若是，視其位於左欄所列之分區為何，給予虛擬變數值1	+	
	溫泉	(1) 0-200 m (2) 200-400 m (3) 400-600 m	計算建物至最鄰近之溫泉之距離，視其距離落於左欄所列之區間為何，給予虛擬變數值1	-	
	斷層	(1) 0-30 m (2) 30-60 m (3) 60-90 m	計算建物至最鄰近之斷層之距離，視其距離落於左欄所列之區間為何，給予虛擬變數值1	+	
	建物屬性				
	地上層數	連續變數	該棟建物之地上層數	+	
	地下層數		該棟建物之地下層數	-	
	屋齡		該棟建物屋齡	+	
	建造種類	(1) RC造 (2) 鋼骨RC造 (3) 鋼骨造 (4) 輕鋼架造 (5) 木造 (6) 加強磚造	讀取建物之建造種類，視其位於左欄所列之類別為何，給予虛擬變數值1	+/-	
	興建種類	(1) 改建 (2) 修建 (3) 新建	讀取建物之興建種類，視其位於左欄所列之類別為何，給予虛擬變數值1	+	



圖四 人為因素分布圖



圖五 自然環境因素分布圖(a)土壤液化潛勢分區圖及坡度圖 (b)溫泉露頭、斷層及高程圖

4. 溫泉

前人研究指出，過去大屯火山區地表具有向上抬升的趨勢(王淳璟，2015)。本研究從臺北市之公開資料中找到溫泉露頭之位置(如圖五(b))，計算建物與溫泉露頭之距離，因溫泉露頭區多位於山區，故將距離分級放寬，以0-200、200-400、400-600公尺進行分級，並建立虛擬變數。預期靠近溫泉之建物不會有下沉之現象，預估迴歸係數為負。

5. 斷層

前人研究指出，臺北盆地中的變形主要受到仍在活動的山腳斷層影響，而導致五股、蘆洲一帶有下列的發生(王淳璟，2015；范凱婷，2012)。山腳斷層也有經過臺北市內，故將斷層放入環境因子中(如圖五(b))，評估是否有下陷之疑慮。本類別斷層因子因有通過盆地平原區，故與一般環境因子之分級相同，以0-30、30-60、60-90公尺進行分級，並建立虛擬變數。預期斷層之迴歸係數為正。

6. 高程與坡度

於地層下陷潛勢評估因子中，坡度為一重要考慮因子(Tien Bui et al., 2018)。本研究採納與地形環境相關因素，透過全台20公尺地表高程模型萃取臺北市的坡度圖，並依照坡度0-5、5-15、15-25、25-35、35-45、45-55，分為六級，建立虛擬變數。此外，也納入高程資訊，並依照0-10公尺、10-20公尺、20-30公尺、30-40公尺、40-50公尺，分為五個級距後建立虛擬變數。坡度及高程分別繪於圖五(a)及圖五(b)。

7. 建物屬性

如同Yang et al.(2018)所觀測，隨著屋齡增加，建物下沉速度會隨之加劇，故本研究也從108年度使用執照(臺北市政府資訊局，2020)，萃取建物建造年份計算屋齡後，作為連續變數加入模型進行分析。除此之外，導致地表建物沉陷的壓密作用，也與地表所負載重量相關，故本研究也納入使用執照中地上層數、地下層數兩者，以連續變數型態放入自變數。使用執照內所紀錄之房屋構造及興建種類兩資料類型也放入迴歸模型中，以虛擬類別變數進行分析。其中，房屋構造包含RC造、鋼骨RC造、鋼骨造、輕鋼架造、加強磚造、木造及其他，本研究使用其他為參照組；興建種類則包含改建、修建、新建以及增建，本研究使用增建為參照組。

(三) 成果分析

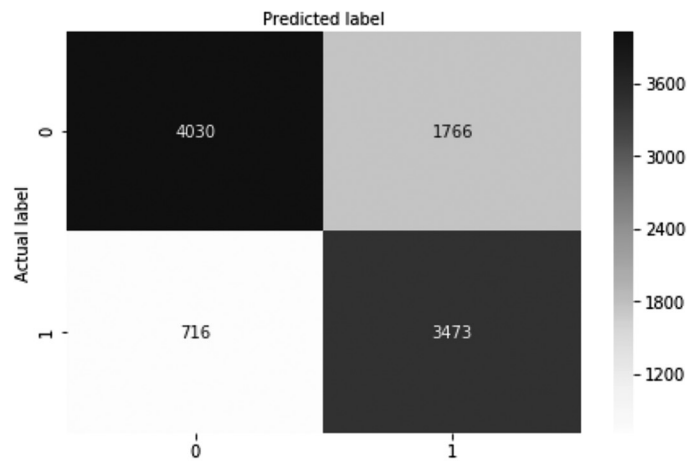
本研究共使用30,785棟建物來分析，下沉與非下沉建物各有11,389與19,396棟，為了能夠讓樣本在空間上均勻分布且符合隨機抽樣特性，再從兩類建物中，以行政區為空間單位個別隨機抽樣，提取70%作為訓練樣本，將剩下的30%資料作為測試樣本，再將各區之訓練與測試樣本整合起來，用於建立與驗證模型，訓練及測試樣本數如表三所列。在利用訓練樣本計算

表三 迴歸訓練及測試樣本分布

	訓練資料(In-sample)	測試資料(Out-sample)	合計
下沉建物	7,200	4,189	11,389
非下沉建物	13,600	5,796	19,396
合計	20,800	9,985	30,785

出各個自變數的迴歸係數後，即可使用式(5)求得測試樣本為下沉建物的機率，依此機率再進而決定該建物應區分在下沉或非下沉類別。由於這些測試樣本是否為下沉建物為已知，經比對後便可得知模型之判斷能力，一旦確認模型之判斷精度可靠，再分析各項自變數之迴歸係數，評估人為、自然環境因素，與建物條件對於建物下沉的影響。

於利用訓練樣本建置迴歸模型後，使用該模型估算測試樣本是否呈現下沉，據此，建立如圖六所示之混淆矩陣(Chen et al., 2018)，縱軸代表測試樣本之已知類別，橫軸為本研究模型預測之類別(0為非下陷建物、1為下陷建物)，由矩陣可知True Positive (TP)與True Negative (TN)的樣本數量分別為3473與4030，False Positive (FP)與False Negative (FN)則分別是1766與716，若透過準確率(Accuracy)的公式計算(Zhu et al., 2010)，亦即正確被檢索的結果(TP+TN)占所有樣本的比率，本模型的準確率為75%。本模型對於判別已知下沉的能力較強，而沒有下沉的建物被分類到有下沉類別的比例較高，推論其原因在於本模型所選因子與下沉建物之關係較強，導致分辨無下沉建物的能力較低，分辨下沉建物的能力較高。



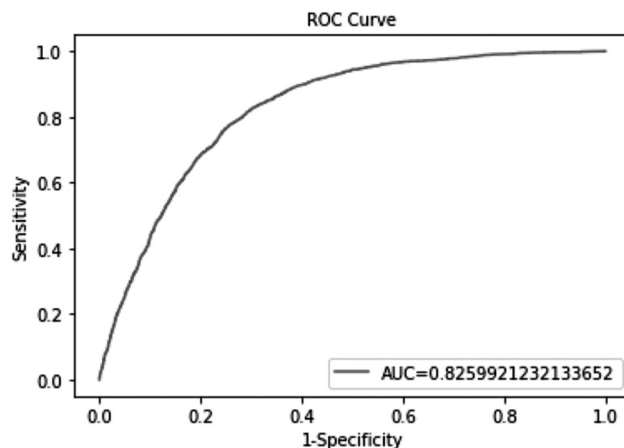
圖六 迴歸測試混淆矩陣

AUC (Area under ROC curve)為評估模型之另一常用指標，為ROC曲線下的面積。首先，ROC (Receiver Operating Characteristic)描述在使用所有可能的分界點(Cut-off Point)時，真實信號(敏感度)及錯誤訊號(1-特異度)的分布，以真實信號(敏感度)為縱軸，及錯誤訊號(1-特異度)為橫軸所畫出之曲線。敏感度(Sensitivity)及特異度(Specificity)可由混淆矩陣中計算求得，分別如式(6)與(7)所列：

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \dots\dots\dots (6)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \dots\dots\dots (7)$$

在獲得ROC曲線後，即可計算出ROC曲線下的面積，即為AUC。本研究建置之模型的ROC參見圖七，AUC為0.826。根據Zhu et al.(2010)所提出之評價標準，若AUC值大於0.8，則表示該模型為良好之模型，因此，可判定本研究建置之模型在分類建物有無下沉之能力良好，其迴歸係數可作為後續分析使用。



圖七 本模型ROC曲線及AUC值

邏輯斯迴歸成果各自變項係數如表四，人為環境及自然環境因子中皆有達到顯著水準且迴歸係數為正值之變數。人為環境因素中，主要道路、高架道路、興建中捷運線及興建場域(含已完工)，為本模型指出顯著與建物下沉相關之因子，其中以興建中捷運線影響最巨，如圖三中於臺北市中央區域兩條水平線型地表下陷區域，即是沿著松山線及信義線經過之區位；除了交通建設之外，靠近興建場域之建物也與下沉現象呈現顯著相關，由於工程建設之施作，若是對於地面下之開挖無可避免，不免會影響周遭建物之地基，導致周圍建物、地表下沉，此實證結果與前人所觀測出之現象吻合(Bozzano et al., 2018; Milillo et al., 2018)。至於已興建完成多年正在使用中之高架道路，亦呈現顯著，推測是因為高架橋樑導致之壓密作用(Ciampalini et al., 2019)所造成。其餘設施，如：鐵路、橋樑、地下道、快速道路等因素，並無顯著與建物下沉之相關性。

自然環境因素方面，迴歸結果顯示建物落於較低高程及坡地較緩之區域，與下沉較為相關，表示下沉建物仍多存在臺北市中心區域。土壤液化為最為顯著之類別，且落於高潛勢之地區擁有最高之迴歸係數，若未來發生地震災害，落在高潛勢且正遭受下沉變形之建物，應為首要關注之目標。

建物屬性方面，多呈現不顯著，但值得一提的是，地上層數、地下層數及屋齡等變數，皆屬顯著項，故可推測臺北市內建物，如地上層數越多、屋齡越大，與建物之下沉有較大之關係；反之，地下層數變數的迴歸係數為負值，表示地下層數越多，則有較大機率落於非下沉類別，應與地基更穩固有關。

表四 本研究模型估算之迴歸係數成果

類別	分項	係數	類別	分項	係數
Intercept		-1.414			
交通基礎設施					
捷運線	(1) 0-30 m	0.085	捷運線 (興建中)	(1) 0-30 m	1.184***
	(2) 30-60 m	0.017		(2) 30-60 m	0.790***
	(3) 60-90 m	0.130*		(3) 60-90 m	0.811***
捷運站	(1) 0-30 m	-0.189	捷運站 (興建中)	(1) 0-30 m	0.109
	(2) 30-60 m	-0.261**		(2) 30-60 m	-0.138
	(3) 60-90 m	-0.222**		(3) 60-90 m	-0.138
主要道路	(1) 0-30 m	0.272***	快速道路	(1) 0-30 m	-0.139
	(2) 30-60 m	0.394***		(2) 30-60 m	-0.499**
	(3) 60-90 m	0.516***		(3) 60-90 m	-0.233
高架道路	(1) 0-30 m	0.902***	橋樑	(1) 0-30 m	-1.274***
	(2) 30-60 m	0.590***		(2) 30-60 m	-1.110***
	(3) 60-90 m	0.433***		(3) 60-90 m	-1.325***
鐵路	(1) 0-30 m	0.058	地下道	(1) 0-30 m	0.308
	(2) 30-60 m	-0.327**		(2) 30-60 m	0.416*
	(3) 60-90 m	-0.429***		(3) 60-90 m	0.228
興建地					
興建場域	(1) 0-20 m	0.857***	已完工 興建場域	(1) 0-20 m	0.395***
	(2) 20-40 m	0.149		(2) 20-40 m	0.076
	(3) 40-60 m	0.371***		(3) 40-60 m	0.111
自然環境					
高程	(1) 0-10 m	1.211***	坡度	(1) 0-5°	-0.598**
	(2) 10-20 m	-0.471		(2) 5-15°	-0.713**
	(3) 20-30 m	-0.949***		(3) 15-25°	-0.369
	(4) 30-40 m	-0.874**		(4) 25-35°	-0.122
	(5) 40-50 m	-0.764**		(5) 35-45°	-0.065
溫泉	(1) 0-200 m	-0.263	斷層	(1) 0-30 m	-0.351
	(2) 200-400 m	-0.429		(2) 30-60 m	-0.227
	(3) 400-600 m	-0.271		(3) 60-90 m	-0.133
土壤液化 潛勢分區	(1) Low	0.378***			
	(2) Median	1.004***			
	(3) High	1.211***			
建物屬性					
建造種類	(1) RC造	-0.409**	興建種類	(1) 改建	-0.590**
	(2) 鋼骨RC造	-0.303		(2) 修建	-0.024
	(3) 鋼骨造	-0.340		(3) 新建	-0.564***
	(4) 輕鋼架造	-0.170	地上層數	0.091***	
	(5) 木造	-0.229	地下層數	-0.276***	
	(6) 加強磚造	0.223	屋齡	0.019***	
Likelihood ratio chi-square (df)				2229.94 (36)***	
Pseudo R ²				0.21	

註：標註***、**、*之係數，分別表示達到1%、5%與10%顯著水準之係數。

五、結論

基於大範圍觀測建物穩定度之必要，且評估建物下沉與城市中環境因素的關係，本研究利用SARPROZ軟體，分析涵蓋臺北市區2011年5月至2013年7月之COSMO-SkyMed雷達影像，進行PS-InSAR時間序列變形分析。基於高解析度雷達影像之優勢，獲得這個時間段內大範圍建物之變形量。

為了解建物下沉與環境因素的關係，本研究整理了人為及自然環境等因素，並使用邏輯斯迴歸進行評估。首先，由迴歸成果之各項精度指標得知，本研究建立之模型約有75%的準確率。了解模型可靠度後，再透過迴歸係數，得到以下幾項結論：

1. 下沉建物最主要與捷運線之興建為造成建物下沉最為顯著之因素之一，也因捷運路線與捷運站之分布較廣，其影響範圍較大。
2. 興建中建物外圍的三個距離級距，皆擁有正值且顯著之迴歸係數，代表建物的興建會使周遭建物發生下沉現象。對於完工一年內建物外圍20公尺內這項變數來說，得到正值且顯著的迴歸係數，可知建物在完工一年後周遭之建物還是會有下沉之可能風險。
3. 主要道路與高架道路均之迴歸係數為正且具有顯著性，符合繁忙交通及周遭載重造成周圍下沉之現象。
4. 雖然土壤液化主要為地震誘發的現象，但本研究發現位於高液化潛勢區內之建物與下沉有顯著之關係，據此，須於平時便注意位於高液化潛勢之建物。
5. 建物屬性方面，當建物樓上樓層越高、屋齡越大，皆有顯著增加建物下沉的機率。對於房屋構造與興建種類，則皆不具顯著性。

綜上所述，本研究成果顯示臺北市區內建物下沉現象與多項環境因素相關，不單是自然因素，也包括城市內人為建設。由於現今已有提供公開下載之衛載雷達影像，因此可持續對關注之區域進行地表與建物的形變分析，再透過本文所提之方法審視環境因子與形變之關係，可提供政府對於建設興建及災害管理之參考。此外，如同本文一開始所提，環境因素跟不動產價格、需求也互有關聯，因此在後續研究中，我們將基於本文之發現，進一步探討環境因子所連帶的建物安全，對不動產市場中的住宅需求與價格的意涵。

註 釋

- 註1：臺北市建物之公開資料來源網站包括<https://github.com/sheethub/tpe3d>以及<http://download.geofabrik.de/asia/taiwan.html>。
- 註2：由於可取得之公開的建物圖資並不完整，且圖資之細緻度不高，因此會出現實際上應為相鄰之獨棟建物，因棟距太近無法被完全分離，因此，此處的建物數量並不是準確的建物數量。

參考文獻

中文部分：

內政部營建署

2018 〈內政部不動產資訊平台網站〉 (<https://pip.moi.gov.tw/V3/Default.aspx>)。

Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior, R.O.C. (Taiwan)

2018 “*Real Estate Information Platform*,” (<https://pip.moi.gov.tw/V3/Default.aspx>).

王怡方

2013 《利用永久散射體差分干涉法監測 台北盆地與山腳斷層之地表變形研究》碩士論文，中國文化大學。

Wang, Y. F.

2013 *Monitoring Surface Deformation in Taipei Basin and Sanchiao Fault Using Persistent Scatterers InSAR Method*, Master's Dissertation, Chinese Culture University.

王淳璟

2015 《結合衛星雷達與 GPS 觀測資料分析北台灣地表變形》碩士論文，國立中央大學。

Wang, C. C.

2015 *Surface Deformation of Northern Taiwan through the Integration of PSInSAR and GPS data*, Master's Dissertation, National Central University.

朱芳妮

2017 〈邁向住宅需求資訊健全之路－住宅需求動向調查之現況與展望〉《住宅學報》26(1)：101-109。

Chu, F. N.

2017 “Towards the Integrity of Housing Demand Information: The Current Situation and Prospects for the Housing Demand Survey,” *Journal of Housing Studies*. 26(1): 101-109.

吳珮瑾

2017 《以持久性散射體雷達干涉分析抽取地下水引起之地表變形——以臺北盆地捷運工程為例》碩士論文，國立台灣大學。

Wu, P. C.

2017 *Surface Deformation Induced by Ground Water Pumping by PS-InSAR: Case Study on Construction of MRT in Taipei Basin*, Master's Dissertation, National Taiwan University.

李春長、俞錚、梁志民

2020 〈公佈降雨淹水模擬地圖對淹水區與其鄰近地區住宅價格之影響〉《住宅學報》29(1)：63-89。

Lee, C. C., Z. Yu & C. M. Liang

2020 “Impacts of the Announcement of the Rainfall-induced Flood Simulation Map on Flood Area and Neighborhood Housing Prices,” *Journal of Housing Studies*. 29(1): 63-89.

李春長、游淑滿、張維倫

2012 〈公共設施、環境品質與不動產景氣對住宅價格影響之研究—兼論不動產景氣之調節效果〉《住宅學報》21(1)：67-87。

Lee, C. C., S. M. You & W. L. Chang

2012 “The Influence of Public Facility, Environmental Quality, and Real Estate Business Cycle on the Housing Price-Real Estate Business Cycle as a Moderator,” *Journal of Housing Studies*. 21(1): 67-87.

林韋宏、彭建文、林子欽

2003 〈住宅屬性對空屋形成機率影響之研究—以台北市為例〉《住宅學報》12(2)：91-107。

Lin, W. H., C. W. Peng & T. C. Lin

2003 “Formation of Vacant Housing Units in Relation to Their Characteristics – The Case of Taipei City,” *Journal of Housing Studies*. 12(2): 91-107.

林祖嘉、林素菁

1993 〈台灣地區環境品質與公共設施對房價與房租影響之分析〉《住宅學報》1：21-45。

Lin, C. C. & S. J. Lin

1993 “An Analysis of the Effect of Environment Quality and Public Facilities on Housing Prices and Rents in Taiwan,” *Journal of Housing Studies*. 1: 21-45.

林銘軒

2012 《台北盆地水文地質架構及地層下陷之探討》碩士論文，國立台灣大學。

Lin, M. H.

2012 *The Research of Hydrogeologic Framework and Land Subsidence in Taipei Basin*, Master’s Dissertation, National Taiwan University.

洪得洋、林祖嘉

1999 〈臺北市捷運系統與道路寬度對房屋價格影響之研究〉《住宅學報》8：47-67。

Hong, D. Y. & C. C. Lin

2020 “A Study on the Impact of Subway System and Road Width on the Housing Prices of Taipei,” *Journal of Housing Studies*. 8: 47-67.

范凱婷

2012 《台北盆地及周圍山區之現今地表變形研究》碩士論文，國立中央大學。

Fan, K. T.

2012 *Study of Recent Surface Deformation in Taipei basin and Its Surrounding Mountains*, Master’s Dissertation, National Central University.

張彥汝

2015 《利用持久散射體差分干涉法研究臺北盆地地下水升降引起的地表變形》碩士論文，國立台灣大學。

Chang, Y. R.

2015 *Study of surface deformation induced from fluctuation of groundwater in Taipei basin by PSInSAR*, Master’s Dissertation, National Taiwan University.

楊宗憲、蘇倬慧

2011 〈迎毗設施與鄰避設施對住宅價格影響之研究〉《住宅學報》20(2)：61-80。

Yang, C. H. & S. H. Su

2011 “The Impacts of Housing Price in YIMBY and NIMBY Facilities,” *Journal of Housing Studies*. 20(2): 61-80.

經濟部水利署

2018 〈水利地理資訊服務平台網站〉 (<https://gic.wra.gov.tw/gis/>)。

Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, R.O.C. (Taiwan)

2018 “*Water Resource GIS*,” (<https://gic.wra.gov.tw/gis/>).

臺北市政府

2018 〈土壤液化潛勢查詢系統網站〉 (https://soil.taipei/Taipei/Main/pages/TPLiquid_97.GeoJSON)。

Taipei City Government, R.O.C. (Taiwan)

2018 “*Liquefaction Susceptibility Inquiry System*,” (https://soil.taipei/Taipei/Main/pages/TPLiquid_97.GeoJSON).

臺北市政府資訊局

2020 〈臺北市資料大平台網站〉 (<https://data.taipei/#/dataset/detail?id=c876ff02-af2e-4eb8-bd33-d444f5052733>)。

Department of Information Technology, Taipei City Government, R.O.C. (Taiwan)

2020 “*Data.Taipei*,” (<https://data.taipei/#/dataset/detail?id=c876ff02-af2e-4eb8-bd33-d444f5052733>).

謝嘉聲

2007 《以雷達干涉技術偵測地表變形之研究》博士論文，國立交通大學。

Hsieh, C. S.

2007 *Detecting terrain deformation with radar interferometry*, Ph. D. Dissertation, National Chiao Tung University.

英文部分：

Abidin, H. Z., H. Andreas, I. Gumilar, Y. Fukuda, Y. E. Pohan & T. Deguchi

2011 “Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development,” *Natural Hazards*. 59(3): 1753-1771.

Bianchini, S., F. Pratesi, T. Nolesini & N. Casagli

2015 “Building deformation assessment by means of persistent scatterer interferometry analysis on a landslide-affected area: the Volterra (Italy) case study,” *Remote sensing*. 7(4): 4678-4701.

Bozzano, F., C. Esposito, P. Mazzanti, M. Patti & S. Scancella

2018 “Imaging multi-age construction settlement behaviour by advanced SAR interferometry,” *Remote sensing*. 10(7): 1137.

- Chen, W., H. Li, E. Hou, S. Wang, G. Wang, M. Panahi, T. Li, T. Peng, C. Guo & C. Niu
2018 “GIS-based groundwater potential analysis using novel ensemble weights-of-evidence with logistic regression and functional tree models,” *Science of the Total Environment*. 634: 853-867.
- Ciampalini, A., L. Solari, R. Gianecchini, Y. Galanti & S. Moretti
2019 “Evaluation of subsidence induced by long-lasting buildings load using InSAR technique and geotechnical data: The case study of a Freight Terminal (Tuscany, Italy),” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 82: 101925.
- Ferretti, A., C. Prati & F. Rocca
2001 “Permanent scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 39(1): 8-20.
- Gernhardt, S., N. Adam, M. Eineder & R. Bamler
2010 “Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas,” *Annals of GIS*. 16(2): 103-111.
- Hosmer Jr, D. W., S. Lemeshow & R. X. Sturdivant
2013 *Applied logistic regression*. 398. John Wiley & Sons.
- Hoult, N., P. J. Bennett, I. Stoianov, P. Fidler, Č. Maksimović, C. Middleton, N. Graham & K. Soga
2009 “Wireless sensor networks: creating ‘smart infrastructure’,” Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering.
- Hu, R., Z. Yue, L. u. Wang & S. Wang
2004 “Review on current status and challenging issues of land subsidence in China,” *Engineering Geology*. 76(1-2): 65-77.
- Kim, S., S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser & M. Turon
2007 “Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks,” Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks.
- Kleinbaum, D. G. & M. Klein
2010 “Maximum likelihood techniques: An overview,” *Logistic regression*. 103-127.
- Meisina, C., F. Zucca, D. Notti, A. Colombo, A. Cucchi, G. Savio, C. Giannico & M. Bianchi
2008 “Geological interpretation of PSInSAR data at regional scale,” *Sensors*. 8(11): 7469-7492.
- Milillo, P., G. Giardina, M. J. DeJong, D. Perissin & G. Milillo
2018 “Multi-temporal InSAR structural damage assessment: The London crossrail case study,” *Remote sensing*. 10(2): 287.
- Montserrat, O., M. Crosetto, M. Cuevas & B. Crippa
2011 “The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 8(5): 864-868.
- Mora, O., J. J. Jordi & A. Broquetas
2003 “Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41(10): 2243-2253.

Perissin, D. & F. Rocca

- 2006 “High-accuracy urban DEM using permanent scatterers,” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 44(11): 3338-3347.

periZ

- 2009 “SARPROZ Manual,” (<https://www.sarproz.com/software-manual/>).

Psimoulis, P. A. & S. C. Stiros

- 2013 “Measuring deflections of a short-span railway bridge using a robotic total station,” *Journal of Bridge engineering*. 18(2): 182-185.

Rosen, P. A., S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez & R. M. Goldstein

- 2000 “Synthetic aperture radar interferometry,” *Proceedings of the IEEE*. 88(3): 333-382.

Sansosti, E., P. Berardino, M. Bonano, F. Calò, R. Castaldo, F. Casu, M. Manunta, M. Manzo, A. Pepe & S. Pepe

- 2014 “How second generation SAR systems are impacting the analysis of ground deformation,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 28:1-11.

Tien Bui, D., H. Shahabi, A. Shirzadi, K. Chapi, B. Pradhan, W. Chen, K. Khosravi, M. Panahi, B. Bin Ahmad & L. Saro

- 2018 “Land subsidence susceptibility mapping in south korea using machine learning algorithms,” *Sensors*. 18(8): 2464.

Wrona, M., G. Nykiel, M. Figurski & M. Szolucha

- 2014 “Multi-GNSS measurement system for Structural Health Monitoring applications,” *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE*.

Xu, Y.-S., L. Ma, Y.-J. Du & S.-L. Shen

- 2012 “Analysis of urbanisation-induced land subsidence in Shanghai,” *Natural Hazards*. 63(2): 1255-1267.

Xue, F., X. Lv, F. Dou & Y. Yun

- 2020 “A review of time-series interferometric SAR techniques: A tutorial for surface deformation analysis,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 8(1): 22-42.

Yang, Q., Y. Ke, D. Zhang, B. Chen, H. Gong, M. Lv, L. Zhu & X. Li

- 2018 “Multi-scale analysis of the relationship between land subsidence and buildings: A case study in an eastern Beijing Urban Area using the PS-InSAR technique,” *Remote sensing*. 10(7): 1006.

Zhu, W., N. Zeng & N. Wang

- 2010 “Sensitivity, specificity, accuracy, associated confidence interval and ROC analysis with practical SAS implementations,” *NESUG proceedings: health care and life sciences, Baltimore, Maryland*. 19: 67.