

中華民國地籍測量學會期刊

國土測繪與空間資訊

Taiwan Journal of Geoinformatics

第四卷 第二期

中華民國一〇五年七月



VOLUME 4, NO. 2

Jul. 2016

Published by Chinese Society of Cadastral Survey &
National Land Surveying and Mapping Center



內政部國土測繪中心共同發行

中華民國地籍測量學會第 18 屆組織表

一、理監事會：

理 事 長：黃榮峰

副理事長：謝福來

常務理事：蕭輔導、崔國強、梁東海

理 事：洪本善、高書屏、吳宗寶、江澤欽、楊 名、周天穎、吳相忠、曾耀賢、蕭萬禧、
邱仲銘、王定平、梁崇智、紀聰吉、謝福勝、張元旭、江俊泓

常務監事：蘇惠璋

監 事：史天元、蕭正宏、容承明、白敏思

秘 書 長：鄭彩堂(兼任)

副秘書長：陳惠玲(兼任)

秘 書：黃錦桂(兼任)、陳鶴欽(兼任)

二、各種委員會：

(一)服務委員會：

主任委員：高書屏

委 員：王定平、王啟鋒、李建利、鄭宏達、盧金胡

總幹事：梁崇智

(二)編輯委員會：

主任委員：楊 名

委 員：史天元、林老生、洪本善、洪榮宏、楊明德、黃灝雄、趙鍵哲、饒瑞鈞

總編輯：陳國華

編 輯：陳鶴欽

幹 事：趙荃敏、林以珊

(三)研究發展委員會：

主任委員：洪本善

委 員：王宏仁、江日春、李旭志、林志清、吳宗寶、吳聲鴻、黃文華
駱旭琛、蕭萬禧、謝福勝

總幹事：陳世崇

幹 事：謝東發、董荔偉

(四)獎章委員會：

主任委員：蕭輔導

委 員：洪本善、張元旭、曾清涼、曾國鈞、謝福來

幹 事：由本會秘書處兼任

(五)教育訓練委員會：

主任委員：劉正倫

委 員：崔國強、李文聖、葉文凱

總幹事：蕭泰中

幹 事：謝正亮

(六)國際事務委員會：

主任委員：周天穎

委 員：李文聖、葉美伶、曾耀賢、盧鄂生、羅正方

總幹事：邱明全

幹 事：李佩珊、湯美華

學會地址：408台中市南屯區黎明路二段335巷28號

網 址：<http://www.cadastralsurvey.org.tw>

電子郵件：cscs.editor@gmail.com

結合智慧手機與 Kinect 之跌倒偵測監控平台開發

朱宏杰^{1*} 巫燁棋² 蔡光哲³

論文收件日期：105.02.16

論文修改日期：105.03.17

論文接受日期：105.03.31

摘 要

台灣慢慢已存在高齡化社會的現象，所以老年人口的照顧是一個值得研究的問題，而跌倒是老年人口普遍存在的問題，針對此問題，本研究考量以行動導向服務 (Location-based services) 進行老年人跌倒偵測與即時通報，滿足老年人照顧的需求。本研究主要著重於跌倒偵測監控平台之開發，以結合智慧型手機及 Kinect 等技術，由智慧型手機作為行動端跌倒偵測，考量手機內的三軸加速計提供的資訊即時偵測老人跌倒，也以定點裝置室內 Kinect 來偵測跌倒行為，透過 Kinect 偵測的骨架節點資訊，得到頭部速度與高度，來判斷是否跌倒，最後整合行動端與 Kinect 兩者跌倒偵測資訊確認是否真正跌倒，並可回傳老人跌倒影像、時間與空間位置至 Web GIS 跌倒偵測監控平台。

關鍵詞： Kinect、跌倒偵測、智慧型手機

¹ 助理教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

² 助理，國立成功大學測量及空間資訊學系

³ 博士生，國立成功大學測量及空間資訊學系。

* 通訊作者，TEL: (06)2757575#63827， E-mail: [honejaychu@gmail.com](mailto:honeyjaychu@gmail.com)。

Developing fall detection reporting system by an integration of smart phone and Kinect

Hone-Jay Chu^{1*}, Ye-Chi Wu², Gang-Je Tsai³

Abstract

Since the ageing society exists in Taiwan, the elderly population care is worth noticing. Obviously, falls in the elderly is a common problem. To deal with the problem, this study considers location-based service for fall detection and reporting of the aged.

This study integrated smart phone and Kinect to fall detection, and provided fall down information for senior care. This study applied a smart phone as the mobile platform and applied accelerometers to detect the fall down in the aged. Moreover, the Kinect was applied to detect the fall down in the room based on head velocity and height. Fixed and location-based sensors can be combined for obtaining the sufficient fall down information. Based on the images, location and time of fall detection, the results were demonstrated in the Web GIS, and were sent to relatives and care units.

Keywords: Kinect, Fall Detection, Smart Phone

¹ Assistant professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

² Assistant, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

³ PhD student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

* Corresponding Author, TEL: +886-6-2757575 ext. 63827, E-mail: honejaychu@gmail.com.

一、前言

由於台灣人口近年來持續老化，高年齡人口的關懷一直是重要的研究課題。現今社會中，大多數成年人長期在外工作，家中多數留下老人與小孩在家，一旦家中發生意外狀況時，可能無法在第一時間做出判斷與良好的急救措施將會錯過搶救的黃金時間。因此，本研究整合智慧手機與 Kinect 感測器，來達到第一時間的跌倒偵測與相關後續應用。高科技跌倒偵測技術之應用研究，如 Kinect 偵測跌倒(Mastorakis and Makris, 2014; Planinc and Kampel, 2013)、影像監控老人跌倒偵測(陳建霖, 2013)、雷射掃描辨識(洪榮裔, 2011)、熱像儀夜間跌倒偵測(蔡文耀, 2012)等，此外，慣性測量元件(Inertial Measurement Unit, IMU)具有的加速度計與陀螺儀求得三維的加速度以及姿態資訊，以提供跌倒偵測之應用。近來研究學者將智慧型手機綁在老人的腰上，使用手機內加速感測器(accelerometer)、陀螺儀(gyroscope)等來做跌倒偵測，所得到的加速度資料，配合使用者的整體運動狀態，經過處理分析後，偵測其是否跌倒之情形(He et al., 2012)。利用簡單設置之門檻值來監測老人是否跌倒，例如 Mathie et al.(2002)提出訊號強度向量(signal vector magnitude, SVM)以及傾角(tilt angle, TA)定義為 y 軸與重力向量的角度(He et al., 2012)作為跌倒行為偵測的指標，使用者將智慧型手機放置於大腿側邊的口袋即可偵測跌倒，將其三軸加速度感測器所測得訊號轉換作為偵測人體發生失速時的主要依據，並擷取 Z 軸數值以判斷人體傾倒程度，以及使用區域峰值的發生頻率作為輸入參數，接著進行分析、推論，進而分離出一般行走、運動和跌倒等狀況(賴弘毅, 2013)。把手機安裝於腰部位置進行感測，模擬跌倒動作時，所得到的 SVM 變化量，做為跌倒判斷門檻值，並利用此門檻值設定至手機上驗證其跌倒判斷準確率。根據實驗結果顯示，依照不同身型受測者所設定的 SVM 門檻值判斷跌倒，其成功率平均可達 85%以上(謝欣哲, 2013)。當手機放置於上衣口袋、褲子前口袋與褲子後口袋時，透過此方式能有效準確地偵測出各類跌倒，包括前趴跌倒、後躺跌倒、右側跌倒與左側跌倒等動作，皆不會誤判為跌倒(蘇明雄, 2012)，證明此方式能有效並準確的偵測跌倒且不會誤判。

微軟所提供的 Kinect 的主要設計用於在遊戲的互動環境，Kinect 裡頭包含紅外線發射器、RGB 彩色攝影機、紅外線 CMOS 攝影機(黃識夫, 2011)，能接收包括彩色影像資料、3D 深度影像資料、及聲音資料，藉由這些鏡頭來偵測出具有深度的影像。然而，Kinect 感應器捕獲的深度和顏色的圖像，並可處理高達每秒 30 幅圖像的速率，得到深度和顏色數據結果，包含上萬點的彩色點雲。Kinect 同時也提供人體骨架(陳宣勝, 2005)追蹤技術，依據微軟開發 Kinect for Windows SDK 來實現。Kinect SDK 可以從 Kinect 的深度資料，辨識出 Kinect 感測範圍的人體與三維空間位置，SDK 提供給應用程式使用的資料主要就是骨架和關節點空間位置座標；經由轉換，應用程式就能偵測人體移動以及姿態或姿勢辨識。劉星宏(2012)藉由 Kinect 擷取圖像進行偵測人體骨架，紀錄骨架移動位置，進行跌倒資料庫比對來分析人們是否跌倒，經過實驗的分析，可得到相當高的精準度。

本研究開發跌倒偵測監控平台，以智慧型手機作為行動端跌倒偵測與以 Kinect 作為室內定點端跌倒偵測，配合 Android 手機與網路平台的連結，透過 GPS、GIS 等技術，即時偵測跌倒情況，提供即時位置等相關資訊。

二、跌倒偵測監控平台開發

在全球逐漸邁向高齡化社會，照護成本日漸高漲的情況下，建立本系統為打造智慧健康城市之基石，本研究目標即在於應用生活情境，開發整合空間資訊之跌倒偵測監控平台，基於路網規劃平台，選定跌倒情境，設計並實作一跌倒偵測監控平台，透過平台的開發，可以有效監控是否處於跌倒相關的危急狀態，並適時規劃通報。圖 1 為跌倒偵測與通報概念圖，本研究整體流程包含(1)跌倒偵測技術開發、(2)定位與通報資料傳送。本文件依序將介紹平台系統架構、介紹本研究發展之行動跌倒偵測技術及 Kinect 跌倒偵測技術，最後展示監控平台之成果。

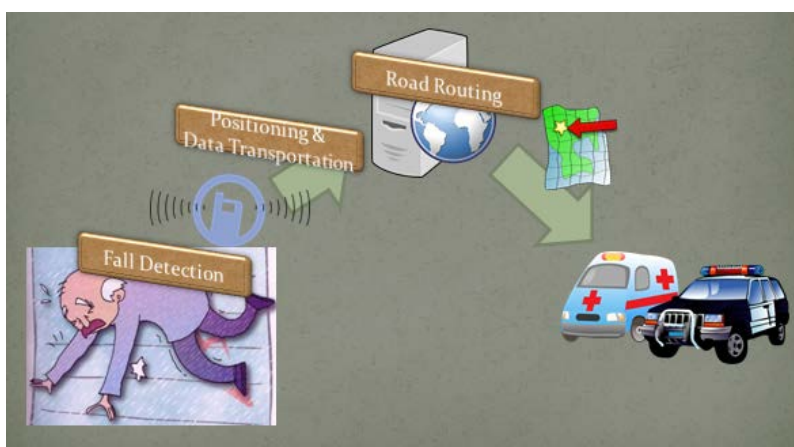


圖1 跌倒偵測監控平台開發概觀

(一)跌倒偵測監控平台架構

圖 2 為跌倒偵測監控平台架構圖。跌倒偵測監控平台在架構可分為跌倒偵測技術 (Fall Down Detection Techniques)與監控平台兩部分，跌倒偵測技術主要負責民眾日常生活的跌倒情境偵測，透過偵測技術，當民眾有跌倒、或疑似跌倒的情境發生時，本研究開發之技術(含行動跌倒偵測技術、Kinect 跌倒偵測技術)預計將會把相關影像、及定位資訊通報至跌倒監控平台。跌倒偵測平台將基於一網頁框架進行開發，對跌倒情境偵測端，此平台將提供跌倒通報 API，此 API 為一以 SOAP 通訊協定、編程碼可以呼叫之程式介面，前端的 Kinect 偵測技術與行動偵測技術皆可透過此介面將訊息通報至跌倒偵測監控平台。平台以網頁伺服器(web server)的方式將通報的跌倒偵測資訊放置在互聯網環境中，相關的救護或監控人員可以透過網頁瀏覽的方式確認通報資訊是否屬實，若確認後，需要進行救護行動，則可派遣照護人員前往救助。

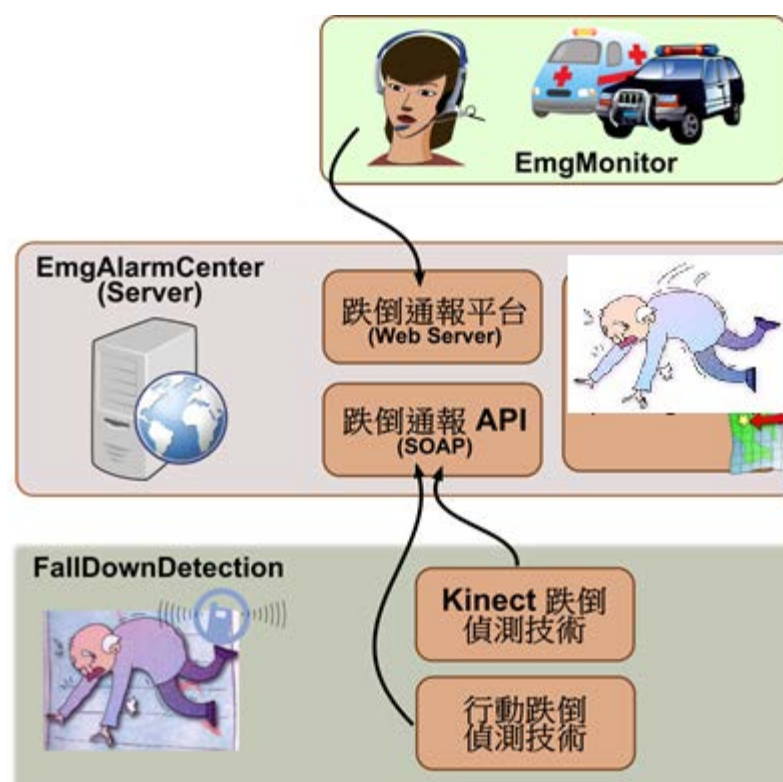


圖2 跌倒偵測監控平台系統架構圖

(二)行動端跌倒偵測技術

考慮到民眾行動監控設備的攜帶普及性與方便性，本研究發展以 Android 平台作為行動端的跌倒偵測技術開發。在行動端跌倒偵測技術開發，偵測流程如圖 3，概略來說包含三大部分：

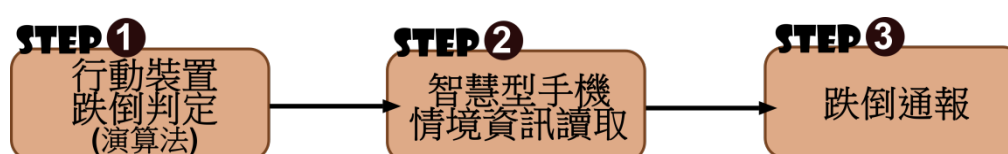


圖3 行動端跌倒偵測技術資料處理流程

首先，本研究整理現有研究，選定智慧型手機做為行動跌倒偵測技術開發平台，所開發之跌倒偵測演算法主要根據智慧型手機上搭載的三軸加速計做為行動數據感應基礎進行開發，進行重力加速度的偵測，如圖 4(a)，在智慧型手機上所搭載 xyz 三軸方向之加速計，藉著手機三軸加速計數值的變化，即可以逆推手機狀態。圖 4(b)為透過程式的撰寫，紀錄手機內三軸加速計數值，所得到的測試數據曲線圖。此測試先將手機平放於桌面，然後再拿起，曲線圖中分別標 Static(靜置平放)與 Take-up(拿起)之三軸加速計數據變化，可以發現依據狀態的不同，將產生三軸加速計之數值相對變化。



資料來源：ADC：IEK(2009/10)

圖4 (a)手機三軸加速計感應器配置(加速度軸方向為手機右側為 X 軸正向、前端為 Y 軸正向、正面為 Z 軸正向)

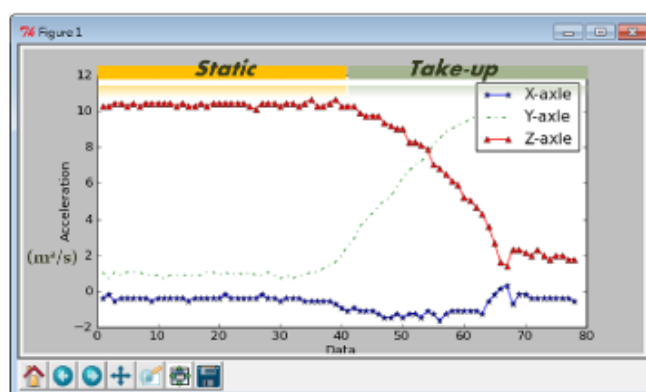


圖4 (b) 數據測試曲線圖

本研究開發之行動跌倒偵測演算法的構想即為監控使用者所配戴的智慧型手機三軸加速計變化值，藉以進行使用者是否可能處於跌倒狀態的判定。參考(He et al., 2012) SVM 與 TA 公式如下：

Signal Vector Magnitude:

$$SVM = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

Tilt Angle:

$$TA = \sin^{-1} \left(\frac{a_y^2}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (2)$$

依據參考文獻 (He et al., 2012)，演算法公式，式(1)與式(2)中， a_x 、 a_y 、 a_z 分別為三軸加速度值，SVM 為智慧型手機三軸加速計的總量(單位: m/s^2)，用以量測智慧型裝置震動程度，並以 TA 偵測智慧型手機的姿態與傾斜角度(單位: °)。基於以上，若使用者將智慧型手機攜帶於腰間或者手持貼近腰間的狀態，當 $SVM > 2.5g \text{ m/s}^2$ 、

TA<40°的數值下，可有效判定使用者處於跌倒狀態(He et al., 2012)，因此本研究以此作為行動端跌倒偵測之依據。

本案依此設定開發行動端跌倒偵測 APP 如圖 5 所示，開啟 APP 後，於畫面可以看到智慧型手機三軸加速計之量測數值。使用者可以開啟連結跌倒資訊整合平台之 web service。如此一來，智慧型手機便會持續監控配戴者的手機裝置三軸加速計量測數據，當跌倒偵測演算法透過三軸加速計數值計算 SVM 及 TA 指標超過門檻值，行動 APP 便會抓取配戴者所處地理位置資訊(ex: GPS)，將之通報至跌倒偵測資訊監控平台。

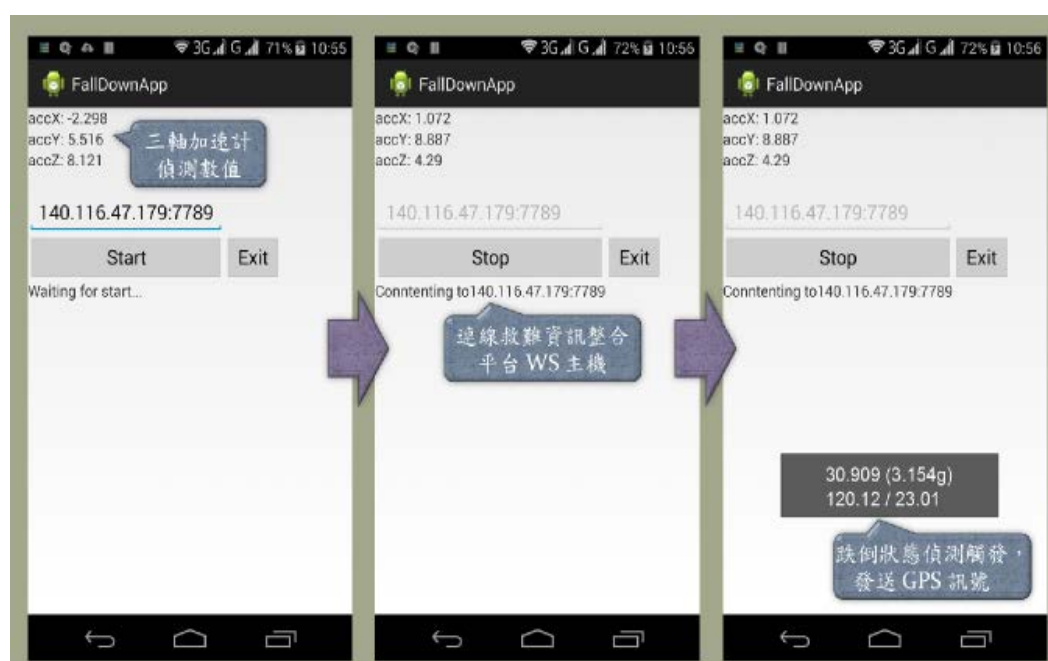


圖5 行動端跌倒偵測之 APP 開發

(三)Kinect 跌倒偵測技術

本系統利用微軟公司所開發之 Kinect 感測器作為固定端偵測器材，進行相關系統開發。基於人體偵測技術的成熟發展下，本系統採用 Kinect 系統中的人體骨架偵測，將此技術應用於跌倒偵測的領域，希冀能夠提高整體系統的偵測精度，提升老齡人口的照顧品質，並降低其所需要的人力成本。在偵測跌倒情況產生時，將會截取事發當時所發生的影像，利於後續應用與判斷的。本系統的使用環境以單一空間且無大量障礙物為前提，將感測器置放於最佳位置，持續觀察單一人體的各項物理數值，如：頭部高度、頭部速度及加速度等，在依據其變化做出決策判斷，以下將詳細介紹系統架構與開發成果。Kinect 感測器有三個鏡頭，由左而右分別為紅外線發射器、彩色攝影機和紅外線攝影機，資料的輸出可分為彩色影像和深度資訊兩類，藉由資料的處理及套疊將前述兩者資料進行整合以建立彩色點雲資料。Kinect SDK 為電腦視覺領域中，最早商業化且成熟的套件之一，其主要貢獻在於基於彩色影像串流(Color stream)及深度影像串流(Depth stream)，經由擷取分析後，產生人體骨架

的串流(Skeleton stream)。在此串流中，單一影格包含多個人體骨架，而單一骨架中又以多個不同節點(Node)組成，藉由各節點的位置資訊，我們可計算出位置相關屬性以作為判別的參數，如頭部高度、頭部速度、頭部加速度等。本研究中軟體以C#語言進行開發，而系統流程如圖 6 所示。利用彩色影像串流與深度影像串流將產製的人體骨架串流進行進一步的分析，透過資訊來偵測是否有跌倒事故的發生，而在發生的當下，將影像傳輸至監控平台以供後續判斷與應用。

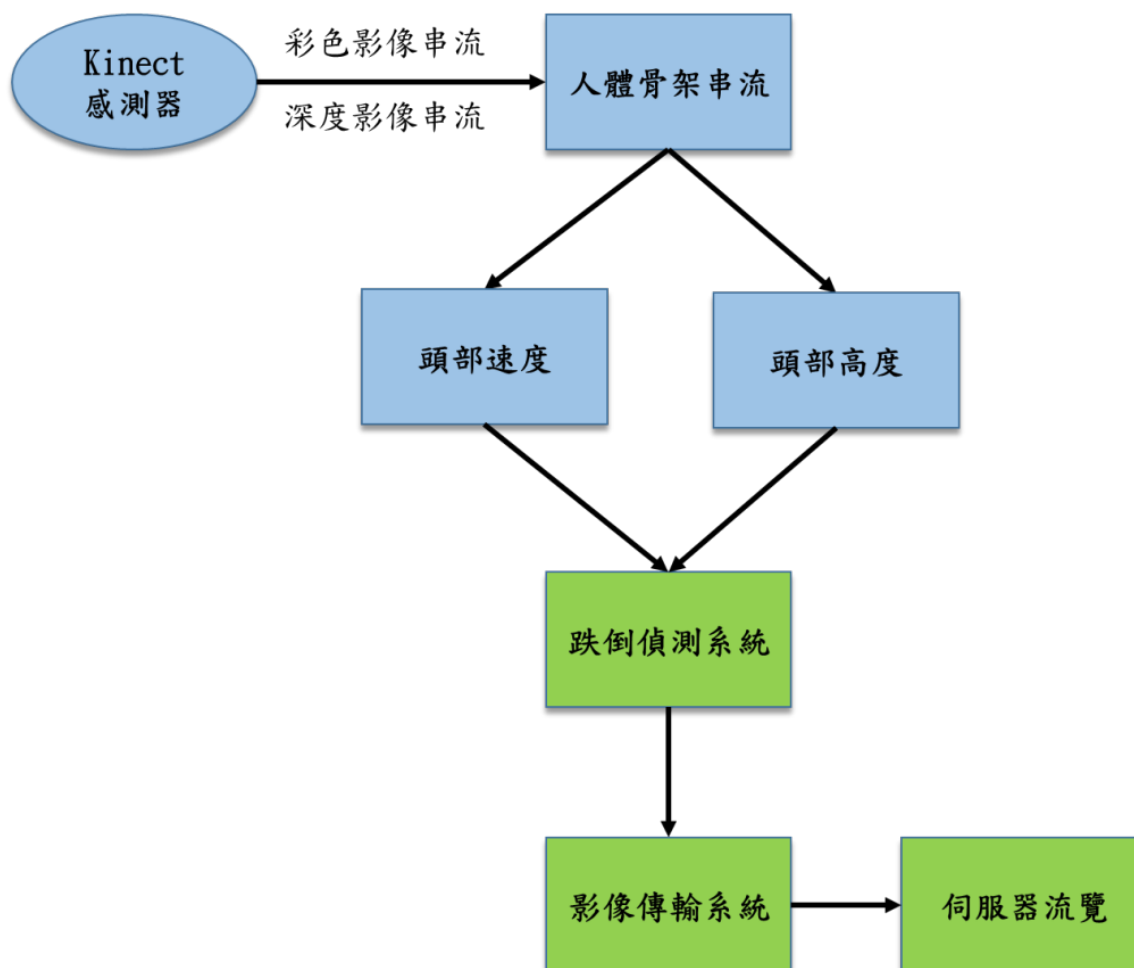


圖6 Kinect 跌倒偵測系統架構與流程

在 Kinect 感測器驅動與套件的處理上採用微軟公司所開發的 SDK 函示庫對影像與深度資料串流進行處理，在跌倒結果的判斷上，則分析人體骨架的串流利用撰寫風險值預測函式來進行預測。而系統額外儲存彩色影像串流，提供後續流覽與判斷事發當時的情況。圖 7(a)為系統範例腳本中，驅動 Kinect 硬體的程式碼，在資料串流中，包含彩色影像串流、深度資料串流與骨架資料串流，提供跌倒偵測系統進行資料的分析，也將各個資料串流即時展示與視窗上。而圖 7(b)為骨架串流資料處理的腳本之一，此範例腳本中將展示人體的骨架資料於彩色影像串流上，並且透過骨架中的節點位置資訊，計算人體頭部高度與速度，利用此兩項資訊來進行危險指數的計算，當頭部速度大於門檻值(400 mm/s)與頭部高度小於門檻值(50 cm)時，設定危險指數隨時間計數器線性遞增。

```

private void InitialStream()
{
    this._myKinect.ColorStream.Enable(); //要求Kinect感應器產生RGB資料串流
    //註冊ColorFrameReady事件與Kinect_ColorFrameReady事件處理函式
    this._myKinect.ColorFrameReady += Kinect_ColorFrameReady;
    this._myKinect.DepthFrameReady += Kinect_DeepFrameReady; //處理深度影像函數
    this._myKinect.DepthStream.Enable();
    this._myKinect.SkeletonStream.Enable();
    this._myKinect.SkeletonFrameReady += Kinect_SkeletonFrameReady;
    this._myKinect.Start(); //啟動Kinect感應器硬體
}

```

圖7 (a)軟體開發範例腳本

```

private void Kinect_SkeletonFrameReady(object sender, SkeletonFrameReadyEventArgs e)
{
    Skeleton[] skeletons; //骨架陣列
    System.Windows.Media.Brush brush = System.Windows.Media.Brushes.Blue;
    //screen_capture();
    using (SkeletonFrame frameData = e.OpenSkeletonFrame()) //取得傳遞的影格資料
    {
        if (frameData == null) //如果影格資料不存在,直接離開事件處理函式
        {
            return;
        }
        //更新座標
        headOutput.Children.Clear();
        //averOutput.Children.Clear();
        headYOutput.Children.Clear();
        riskOutput.Children.Clear();
        //將影格資料複製到骨架陣列
        StickFigure.Children.Clear();
        skeletons = new Skeleton[frameData.SkeletonArrayLength];
        frameData.CopySkeletonDataTo(skeletons);
        headmax.Content = "頭部速度\n最大為" + headOut.max + "mm/s\n現在數值為" + (int)human.head.speed + "mm/s";
        headYmax.Content = "頭部高度\n最大為" + headYOut.max + "M\n現在數值為" + (int)((human.head.y - feet)*100) + "CM";
        riskMax.Content = "危險指數\n最大為" + riskOut.max + "\n現在數值為" + val;
    }
}

```

圖7 (b) 軟體開發範例腳本

三、研究成果

(一)行動端跌倒偵測成果

三種測試情境(情境一)手搖 hand-shock、(情境二)散步 walk-around、(情境三)行走至床邊、躺下、起身 walking-lie_down-getup 等,收集測試監控數據並製作資料圖表。圖 8 中,橫軸依時序資料排列,縱軸則依據監控數據所計算之 SVM 值進行曲線圖繪製。其中,我們可以看到在情境一中,SVM 在還沒進行劇烈搖動前都保持約 10 m/s^2 的數值(接近 $1g$)。在手機搖晃的瞬間,則 SVM 劇烈在 $5\sim 35 \text{ m/s}^2$ 的數值震盪,在搖晃過後則又回到 10 m/s^2 的數值。由此測試數據可以概略了解 SVM 在量測震動狀態所代表的物理意義(圖 8)。在情境二中,我們配戴跌倒偵測 APP 在室內以常態走動,可以發現在走動的過程中 SVM 數值皆在 $10\sim 15 \text{ m/s}^2$ 間震盪,即使

在情境測試的後期加快腳步已接近快走的方式活動，SVM 仍僅約在 14 m/s^2 的數值、難以突破 15 m/s^2 ，此測試概略展示了一般活動情境時，SVM 的數值預期。在情境三中，我們走到床邊、然後以躺下的方式在床上休息片刻後再起身。可以看到圖表數據的數值變化曲線圖，在躺下與起身的動作各偵測到較大的 SVM 數值，其中因為一坐下的動作較類似跌倒，可以看到 SVM 數值之測試來到約 25 m/s^2 ，起身的動作則較為緩和，僅有約 15 m/s^2 的峰值被偵測到。圖 9 為情境三之 SVM 及 TA 指標數據同步比較圖，可以看到在 SVM 指標數據的部分，快速躺下的模擬情境 SVM 指標所偵測到之峰值恰好越過了 SVM 門檻值設定的 $2.5g$ ，同時在 TA 指標上，因為身體狀態的改變(直立改為平躺)，TA 角度從接近 90° 下降至 20° 左右，直到起身後，TA 角度才又再度回到 90° 。由以上測試數據可以發現，本案所開發之行動跌倒偵測 APP 同時考慮配戴者的震動情況與身體是否處於平躺狀態，藉以來判斷配戴者是否處於跌倒狀態的可能性，因此在情境三，快速躺下的瞬間被判定為跌倒狀態而傳送跌倒訊息。

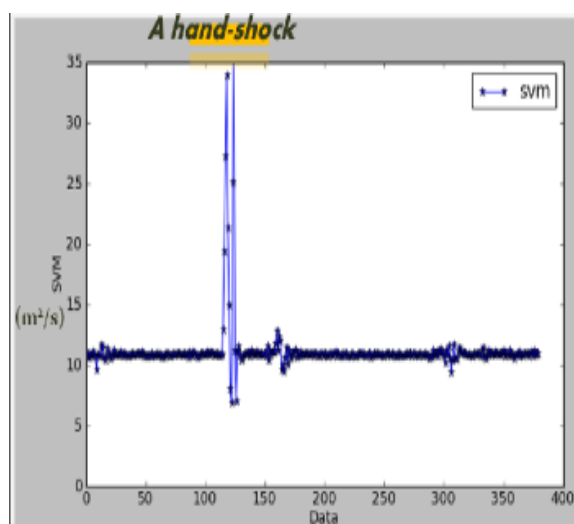


圖8 行動端跌倒偵測數據測試情境 (a)手搖 hand-shock

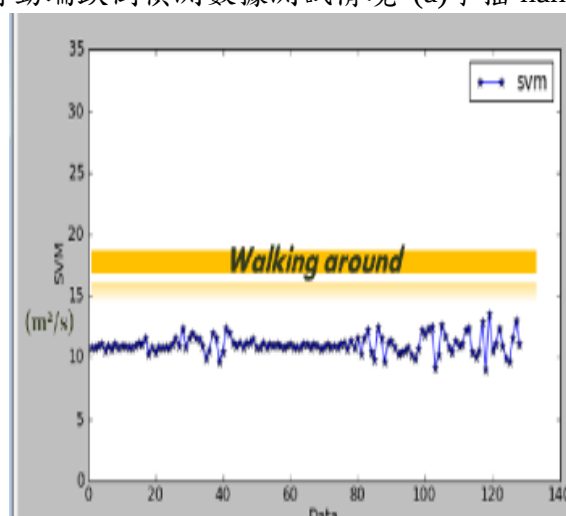


圖8 行動端跌倒偵測數據測試情境 (b)散步 walk-around

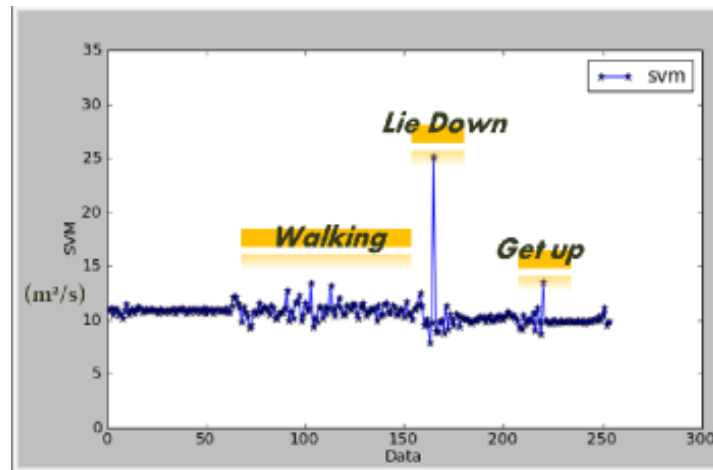


圖8 行動端跌倒偵測數據測試情境 (c)行走至床邊再躺下



圖9 模擬情境三之 SVM 及 TA 數據

(二)Kinect 跌倒偵測結果展示

透過 C#程式語言的開發與 Kinect SDK 的輔助下，我們將整體成果結合在同一視窗畫面上，如圖 10 所示。圖 10a 上方列有三個資料串流的折線圖，即時展示人體骨架資料與危險指數的計算。折線圖中，橫軸皆為時間序列，左邊第一個折線圖為人體頭部的移動速度(縱軸單位為每秒毫米)，而中間為頭部高度(縱軸單位為 cm，坐標軸最大值為 2 公尺)，最右邊為利用此兩項資訊所計算的危險指數。當頭部速度過快(400mm/s)與頭部高度小於 50 cm，利用隨時間線性累加的方式來計算出危險指數。在偵測跌倒時視窗介面，圖中危險指數在超過警戒值的情況下，會產生紅色折線來警示(圖 10b)，下方為彩色影像與深度影像，人體骨架偵測也展示於深度影像上，並且在同時間將影像傳輸至主要伺服器。

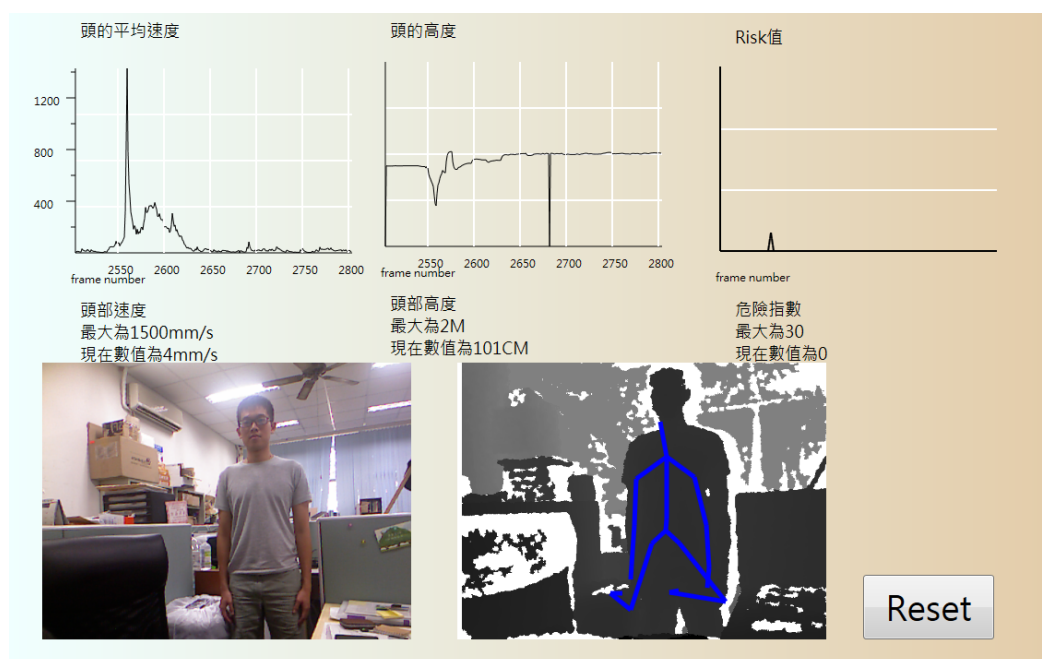


圖10 Kinect 跌倒偵測與危險指數(a)

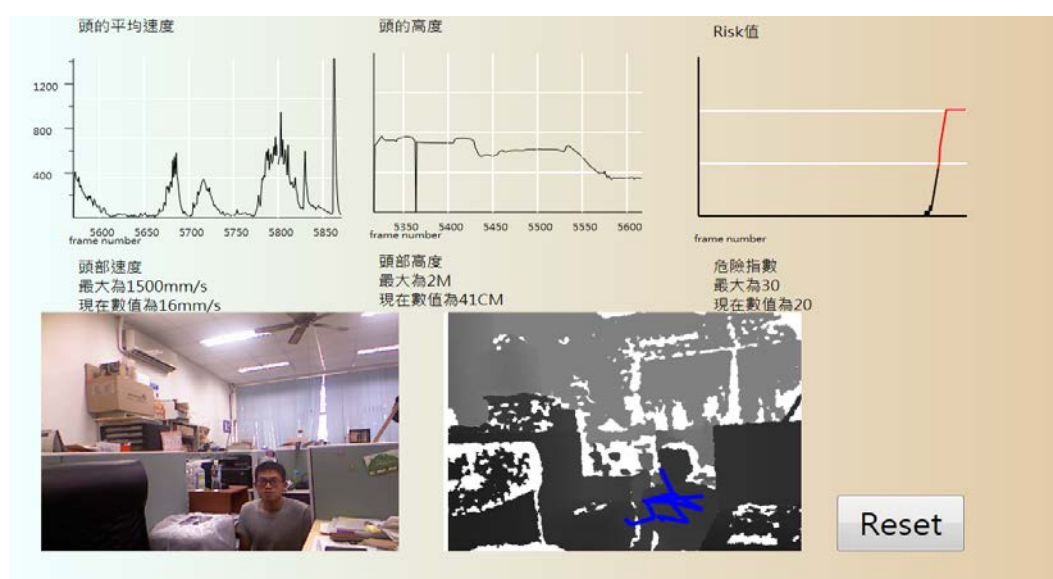


圖10 Kinect 跌倒偵測與危險指數(b)

(三)跌倒偵測系統整合測試成果

在情境四(真跌倒)中，利用兩套跌倒偵測系統進行模擬與測試，受驗者手持手機在房間內遊走，並配合 Kinect 跌倒偵測系統，對其人體骨架偵測，在跌倒事件發生時，可在第一時間進行偵測。如圖 11 左側為 Kinect 跌倒偵測系統在第一時間內偵測到有跌倒意外發生，並將一連串의影像上傳到主機端，透過網頁的方式讓另一名監測者可以即時瀏覽。而圖 11 右側則為手機跌倒偵測系統介面，透過三軸加速度計的偵測，判斷當下是否有劇烈晃動產生，同時在發生跌倒的當下，也立即傳送手機的座標於主機端上。圖 12 左側為監控平台網頁版本的影像流覽，影像來源為 Kinect，讓使用者可以第一時間了解意外發生的情形，透過影像流覽的方式更加確

認事故的緣由與當下情況。同時也將影像建置為串流動畫，方便使用者觀看。而圖 12 右側為手機端傳送回來的 GPS 定位成果與事發當下偵測系統所感測到的數值分析，此項訊息不僅可以提供案發現場的經緯度座標資訊，更可以幫助救護規劃。

情境五部分(假跌倒)，將展示將兩種系統相輔相成的成果。在手機偵測方面，所面臨的挑戰為快速的坐下移動，若可以搭配 Kinect 偵測系統的輔助將可以減少誤判情況的產生，同時 Kinect 偵測系統有時也會有骨架偵測錯誤的情況，整合兩種系統將可以大幅提升偵測精確度。此情境設定於，使用者在 Kinect 偵測的環境下，快速的坐在椅子上，雖然手機有偵測到劇烈晃動並且發送訊號，但是在 Kinect 偵測系統並沒有成立，透過此項機制可以判斷狀態為手機誤判，如圖 13 為情境五當下 Kinect 系統介面，在此圖中，可發現到並沒有跌倒事故的產生。在平台上，兩系統所偵測的資訊並不一致，因此可以判斷此次為行動端手機誤判狀況。



圖 11 模擬測試情境四，Kinect 與手機應用程式跌倒偵測系統



圖 12 模擬測試情境四，網頁版跌倒偵測監控平台

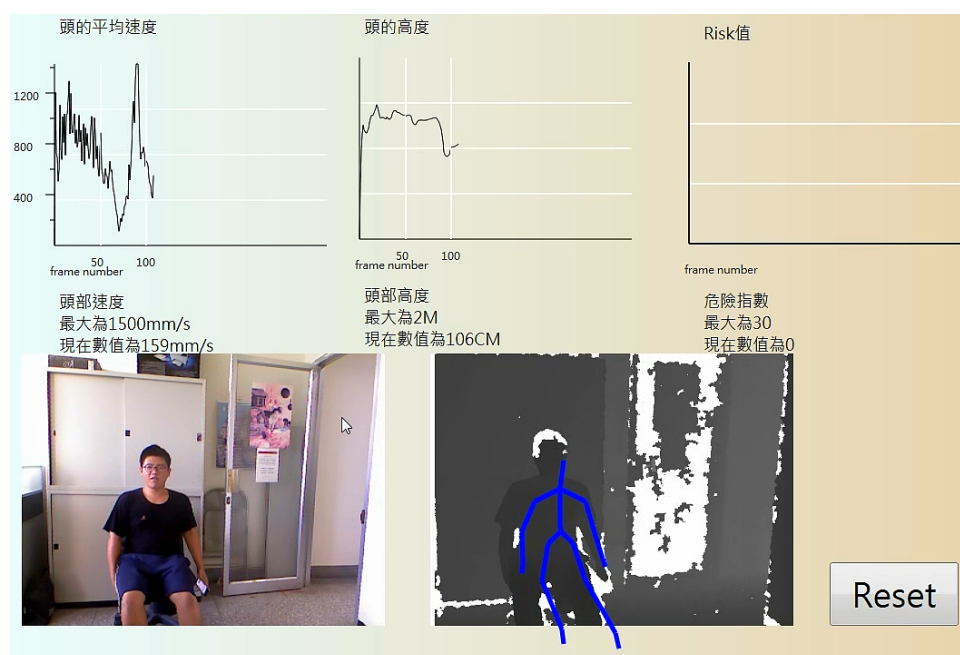


圖13 模擬測試情境五，Kinect 跌倒偵測系統

四、 結論與建議

本研究以結合智慧型手機及 Kinect 等技術，考量 Web GIS，提供即時跌倒偵測資訊，由智慧型手機作為行動端主要跌倒偵測，以智慧型手機上的三軸加速計提供的資訊即時偵測老人跌倒，也以定點裝置室內 Kinect 來偵測跌倒行為，最後整合兩者資訊確認是否跌倒，回傳相關資訊如老人跌倒時間、空間位置至 Web GIS。使用智慧手機偵測跌倒事件的準確率往往受到使用者使用手機的習慣不同而容易誤判，若單純使用 Kinect 分析人類動作又容易受到拍攝角度與遮蔽的影響，本研究透過平台及時蒐集資料，結合智慧手機與 Kinect 的資訊，透過相同時間點作為連結，在手機端發現跌倒事件時，配合 Kinect 系統偵測的影像及相關數據，經兩系統交叉驗證是否跌倒，故經由此平台，同時查核兩系統以減少誤判來提升跌倒偵測的效能。

為了進一步量化系統效益，未來將比較僅由單一系統的跌倒偵測成功率及整合後判定的成功率，但此需要大量的實驗資料，與足夠的有效樣本數，期待未來與相關單位進行合作。

致 謝

本研究承蒙科技部經費補助(103-2119-M-006-010-)，並感謝江凱偉教授提供想法及討論，以及士韋、世昕提供程式等相關協助。

參考文獻

- 洪榮裔，2011，《植基於雷射人體掃描辨識技術之跌倒偵測系統》，國立臺灣師範大學應用電子科技學系碩士論文。
- 陳宣勝，2005，《使用星狀骨架作人類動作自動辨識》，國立交通大學資訊科學與

工程研究所碩士論文。

陳建霖，2013，《智慧型影像監控老人跌倒偵測》，國立臺北大學資通科技產業碩士專班碩士論文。

黃識夫，2011，《應用 Kinect 之人體多姿態辨識》，國立中央大學電機工程研究所碩士論文。

劉星宏，2012，《利用 kinect 做室內跌倒事件之偵測》，國立中央大學資訊工程學系碩士在職專班碩士論文。

賴弘毅，2013，《應用高階模糊派翠網路與智慧型手機於跌倒偵測研究》，國立臺北大學資訊工程研究所碩士論文。

蔡文耀，2012，《使用熱像儀做夜間跌倒偵測》，國立中央大學資訊工程研究所碩士論文。

謝欣哲，2013，《應用行動裝置於跌倒偵測之研究》，中華科技大學機電光工程研究所在職專班碩士論文。

蘇明雄，2012，《基於有限狀態機之智慧型手機跌倒偵測機制》，大同大學資訊工程研究所碩士論文。

He, Y., Y. Li, and S. D. Bao, 2012, Fall Detection by Built-In Tri-Accelerometer of Smartphone, *Proceedings of the IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI 2012)*, Hong Kong and Shenzhen, China: Processes in IEEE, pp.184-187.

Mastorakis, G. and D. Makris, 2014, Fall detection system using Kinect's infrared sensor, *Journal of Real-Time Image Processing*, 9(4), pp.635-646.

Mathie, M.J., N.H. Lovell, A.C.F. Coster, and B.G. Celler, 2002, Determining Activity Using a Triaxial Accelerometer, *Proceedings of the Engineering in Medicine and Biology, 2002. 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference*, Houston, TX, USA: Processes in 2nd Joint EMBS-BMES Conference, 3, pp.2481-2482.

Planinc, R., and M. Kampel, 2013, Introducing the use of depth data for fall detection, *Personal and Ubiquitous Computing*, 17(6), pp.1063-1072.

用智慧型行動裝置進行步長估計與步伐偵測之研究

甯方璽¹ 吳東旂^{2*}

論文收件日期：105.01.27

論文修改日期：105.05.09

論文接受日期：105.05.11

摘 要

隨著智慧型行動裝置及導航定位科技的快速發展，導航定位已成為目前日常生活上不可或缺的工具，室外的導航定位可以利用全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)導航訊號進行，但是室內定位部分由於訊號遮蔽，導致無法接收 GNSS 訊號進行導航定位，因此室內定位的各類方式應運而生，如藍芽、無線射頻技術(Radio Frequency IDentification, RFID)、iBeacon 等。使用行動裝置之微機電系統(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)獲取陀螺儀與加速度儀資訊，不藉由其他額外之訊號進行室內導航為最經濟之方式，然步長估計與步伐偵測為影響此種導航方式精度好壞之重要因素。因此本研究使用濾波進行加速度數據前處理並透過改良式的 Wolf method 偵測步伐，步長估計則加入腿長因素進行推求。經由本研究成果顯示使用 Savitzky-Golay Filter 有助於提升步伐偵測的準確性，且引入腿長做為步長估計參數進行最小二乘複迴歸分析可以提升步長估計約 3%。

關鍵字：室內定位、步伐偵測、步長估計、Savitzky-Golay Filter

¹ 副教授，國立政治大學地政學系。

² 碩士，國立政治大學地政學系，

* 通訊作者，TEL: +886-2- 29393091 #270621，E-mail: 130257027@nccu.edu.tw。

The Study of Using Smart Mobile Device for Step Length Estimation and Step Detection

Fang-Shii Ning¹ Dong-Chi Wu^{2*}

Abstract

The widespread adoption of mobile device has improved the accuracy of navigation and location. Since nowadays Global Navigation Satellite System (GNSS) is easier to be installed in the mobile device to locate and navigate in the outdoors. Signals of GNSS are obstructed indoors so navigation and positioning would be a hard task to be executed indoors. Hence, methods of indoor positioning appear as the instruments of Bluetooth, RFID, iBeacon etc. Every method of indoor positioning has its respective cost to affect the selection of indoor positioning technique. In this study, use data of gyroscope and accelerometer from Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) and detect footsteps by using filter to smooth the signal, and then estimate the step length by the ordinary least square. Our results show that using the Savitzky-Golay Filter to detect footsteps can improve 3% in the accuracy rate of step detection and apply leg length as parameter in step length estimation can get the closer result with real step length.

Keywords : Indoor Navigation, Step Detection, Step Length Estimation, Savitzky-Golay Filter

¹ Associate Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University.

² Master, Department of Land Economics, National Chengchi University.

* Corresponding Author, TEL: +886-2- 29393091 #270621 · E-mail: 130257027@nccu.edu.tw

一、前言

現今戶外導航定位作業因全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)發展完善，使我們可以更快速有效率的獲取坐標資訊，因此全球導航衛星系統已成為目前日常生活不可或缺的工具；然而室內定位因衛星訊號受到阻隔，所以僅能透過無線射頻技術(Radio Frequency Identification, RFID)、Wireless 定位、藍芽定位等來實現(彭威然，2014)。然而室內定位方式之選擇將導致設備成本上的顯著差異。以一般民眾而言，在需要進行室內定位的空間自行安裝數個 Wireless 基地台或在數個角落安裝 iBeacon 都需要設備成本，使得室內定位變成一個高負擔的定位技術。因此若能有效降低室內定位的成本，將可讓室內定位技術的使用門檻大幅降低。

在智慧型行動裝置普及的年代，人手一機，智慧型行動裝置不斷推陳出新，功能也更加多元，為了支援更多的應用程式，微機電系統(Micro Electro Mechanical System, MEMS)早已成為智慧型行動裝置的必要配備，舉凡多種的遊戲體驗、海拔高度預測與地圖定位定向功能，皆須使用到行動裝置中的微機電系統，微機電系統的應用可以說是日漸廣泛。在各種不同的室內定位方式下，成本的差異導致室內定位的使用門檻不同，Wireless 室內定位至少需要安裝三個訊號發射站才能讓行動裝置利用接收訊號強度指標(Received Signal Strength Indication, RSSI)訊號完成定位，藍芽室內定位也同樣需要放置訊號站，而使用 iBeacon 做為校正方式的室內定位也需於室內空間安裝數個 iBeacon 才能透過藍芽訊號進行坐標校正，若沒有足夠的資金，一般的使用者較難以自行完善以上室內定位方法的必要工具。

行人航位推算法(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)為成本較為低廉之室內定位方法，僅須透過行動裝置內建微機電系統(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)之陀螺儀與加速度儀數據進行計算，即可獲得坐標資訊。其最主要誤差來源為距離與角度誤差，此兩樣誤差之累積導致行人航位推算坐標誤差量隨著時間而增加，因此若能有效降低距離與角度之誤差，將可大幅提升行人航位推算之準確度。本研究著重於降低距離誤差量，行人航位推算中距離誤差的來源為步伐偵測的不準確與步長估計之誤差，因此本研究針對上述兩項距離誤差來源進行改進，以減少室內定位誤差。

二、研究架構與理論基礎

本研究透過獲取行動裝置微機電系統中之陀螺儀與加速度儀數據，並以行人航位推算方法進行室內定位之坐標計算。為使步伐偵測更為準確，實驗針對加速度儀數據使用 Savitzky-Golay 濾波(Schafer, 2011)與 Fast Fourier Transform 平滑化後，偵測加速度波峰峰值，找尋計算坐標之時間點。陀螺儀數據累計加總後，於步伐偵測中所得到的時間點進行坐標推算。步長估計則以腿長佔身高比例與行走頻率做為自變數於複迴歸分析中，以獲得較準確之步長估值。

(一) 研究架構

本研究分為兩部份進行，第一部份為步伐偵測研究，使用 Fast Fourier Transform 與 Savitzky-Golay Filter 進行訊號前處理，並透過改良式的 Wolf method 進行步伐偵測，最終比較兩種訊號處理後的地步偵測結果。第二部份為步長估計研究，步長估計使用簡易最小二乘方法進行複迴歸分析，並增加腿長參數進行迴歸以提升步長估計準確率。

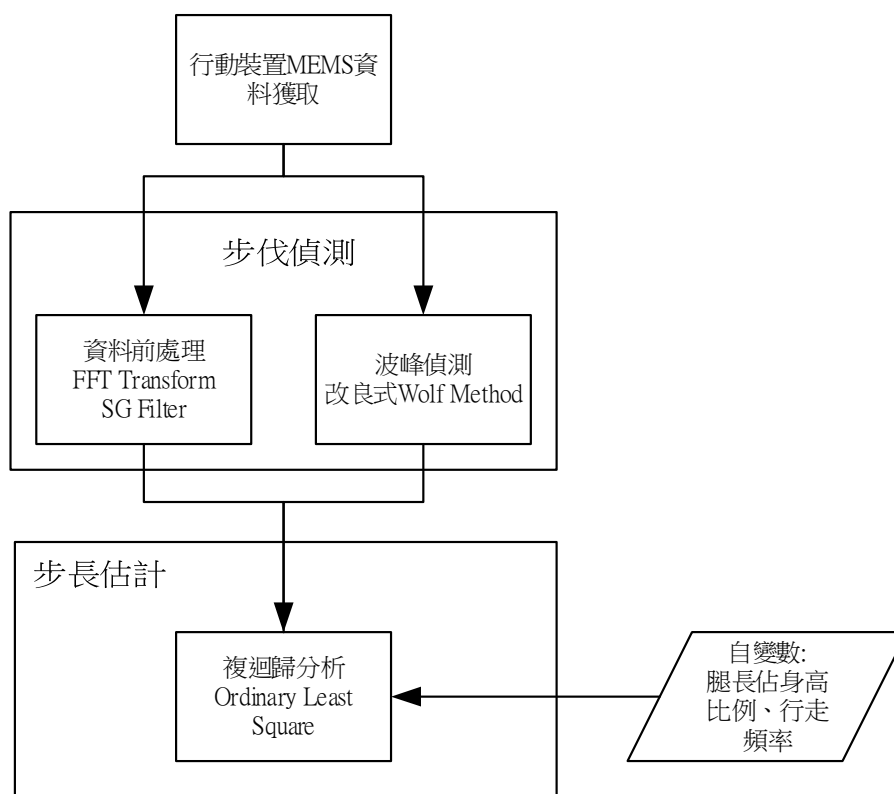


圖1 研究架構

(二) 理論基礎

1. 步伐偵測

進行步伐偵測前需要先針對加速度訊號做前處理，將訊號中之雜訊濾除，研究中針對智慧型行動裝置加速度儀之 z 軸加速度量進行處理，主因為一般使用者使用智慧型行動裝置時基本以螢幕朝上方向使用，因此在行走過程中， z 軸方向之加速度變化會較為明顯且規律。本研究使用訊號處理較為常見之 Fast Fourier Transform 與 SG Filter(Savitzky-Golay Filter)進行雜訊濾除。SG Filter 的優點在於去除雜訊的過程中能夠同時確保數據的形狀，維持波型寬度(Schafer, 2011)，因此在加速度訊號的平滑化中，並不會使波數與原始數據不同，適合用於偵測步伐加速度訊號。

SG Filter 是基於最小二乘原理的濾波，在圖 2 中輸入數據 $x[n]$ 以實心圓●表示， $\times$ 代表脈衝響應的樣本，也可視為權重常數，用來估計基於最小二乘的輸出數據，也就是圖中的空心圓○。

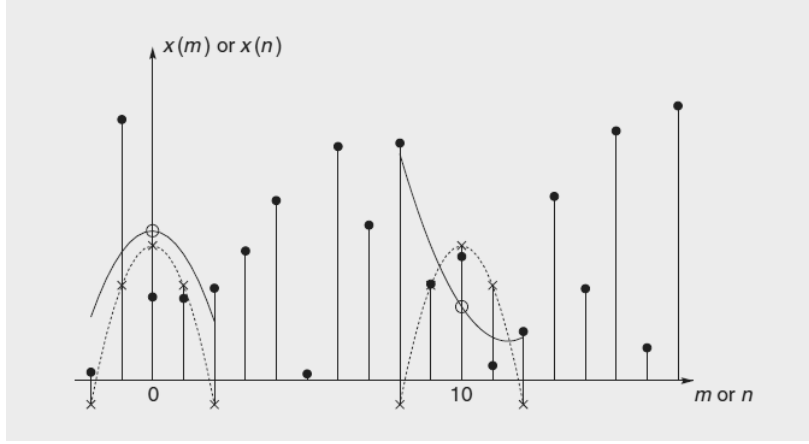


圖2 透過二階多項式擬合的最小二乘平滑(Schafer, 2011)

基於最小二乘原理可以透過式(1)擬合輸入的數據：

$$p(n) = \sum_{n=-M}^M a_k n^k \quad (1)$$

透過最小二乘計算出的殘差 ε_N 為式(2)：

$$\varepsilon_N = \sum_{n=-M}^M (p(n) - x[n])^2 = \sum_{n=-M}^M (\sum_{k=0}^N a_k n^k - x[n])^2 \quad (2)$$

M 可以視作估計區間的一半值，圖 2 的估計區間為 $2M+1$ ，而左邊的實線圓弧即為 $M=2$ 、 $N=2$ 時的擬合結果，而擬合的順序則是以 $2M+1$ 為一個估計區間，擬合結束後，整個區間往右移動一格，即估計區間的中心點由 $n=0$ 移動到 $n=1$ ，再重新進行一次多項式擬合，依此原理即可對所有的輸入數據進行擬合。在 $n=0$ 時的擬合結果 $y[0]$ 為式(3)：

$$y[0] = p(0) = a_0 \quad (3)$$

由式(3)可以發現只需要獲得多項式的常數項就可以完成擬合。Savitzky 與 Golay 發現在計算 a_0 的過程中，相當於對原始輸入數據做有限脈衝響應(Finite impulse response, FIR)濾波，也就是說可以透過卷積理論(convolution theorem)來完成，也可以說是對輸入數據進行加權平均。式(4)中 $h[m]$ 即為脈衝響應的值，用來做為權重。因此擬合結果 $y[n]$ 可以表示為式(4)：

$$y[n] = \sum_{m=-M}^M h[m]x[n-m] = \sum_{m=n-M}^{n+M} h[n-m]x[m] \quad (4)$$

而在最小二乘原理下，當 $\varepsilon_N = \min$ ， ε_N 對每個參數的偏微分都應該為零，如式(5)：

$$\frac{\partial \varepsilon_N}{\partial a_i} = \sum_{n=-M}^M 2n^i (p(n) - x[n]) = \sum_{n=-M}^M 2n^i (\sum_{k=0}^N a_k n^k - x[n]) = 0 \quad (5)$$

因此，

$$a_k n^k = x[n] \quad (6)$$

整理過後可以得到式(7)：

$$\sum_{k=0}^N (\sum_{n=-M}^M n^{i+k}) a^k = \sum_{n=-M}^M n^i x[n], i = 0, 1, \dots, N \quad (7)$$

根據估計的區間可以假設一個行列分別為 $2M+1$ 與 $N+1$ 的設計矩陣 A ，如式(9)：

$$a_{n,i} = n^i, -M \leq n \leq M, 0 \leq i \leq N \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{-M,0} & a_{-M+1,0} & \cdots & a_{0,0} & \cdots & a_{M,0} \\ a_{-M,1} & a_{-M+1,1} & \cdots & a_{0,1} & \cdots & a_{M,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{-M,N} & a_{-M+1,N} & \cdots & a_{0,N} & \cdots & a_{M,N} \end{bmatrix} \quad (9)$$

另外設一個輔助矩陣 B ， $B = A^T A$ ，經簡單計算後可得式(10)：

$$b_{i,k} = \sum_{n=-M}^M a_{i,n} a_{k,n} = \sum_{n=-M}^M n^{i+k} = b_{k,i} \quad (10)$$

將輸入數據定義為矩陣 x ，待求係數定義為矩陣 a ：

$$x = \begin{bmatrix} x[-M] \\ \vdots \\ x[M] \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a[0] \\ \vdots \\ a[N] \end{bmatrix} \quad (11)$$

根據 $B = A^T A$ 可以推導求得矩陣 a ，求出 a 矩陣後即可知道擬合參數，得到 SG Filter 的平滑化結果。

$$Ba = A^T A a = A^T x \quad (12)$$

$$a = (A^T A)^{-1} A^T x = Hx \quad (13)$$

步伐偵測使用改良式 Wolf method 為偵測方法，原始的 Wolf method 透過滑動視窗偵測加速度數據之振幅，依此做為判斷步伐之依據，且 Wolf method 與其它步伐偵測方式相比下，其錯誤率最低(Marschollek et al., 2008)，因此本研究以 Wolf method 為基礎進行改良做為步伐偵測方法，改良式的 Wolf method(圖 3)將偵測加速度數據振幅改為針對加速度數據波峰進行偵測。行人行走模式不固定的情況下將導致振幅變化劇烈，因此若使用原始 Wolf method 偵測步伐，振幅變化較小的步伐將視為雜訊而不予計算，從而產生步伐偵測誤差。

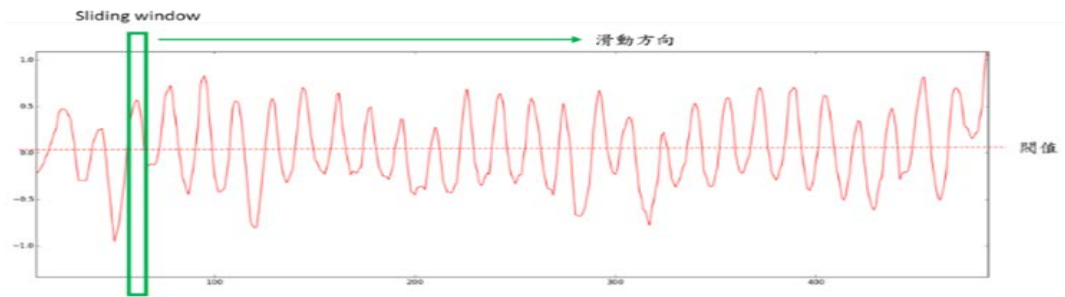


圖3 滑動視窗波峰偵測

根據上述，本研究之步伐演算法整理如下：

步驟一.建立尺寸為七筆資料大小之滑動視窗。

步驟二.設定閾值為 0.0005m/s^2 。

步驟三.視窗開始於產生的波型中滑動，尋找峰值。

步驟四.若尋找到峰值則與閾值比較，若小於閾值則判定為雜訊，大於閾值則判斷為

一步。

步驟五.視窗繼續滑動並重複步驟一至步驟四。

使用此方法的優點在於行走模式固定的情況下，所產生的波型也會大致固定，因此使用滑動視窗來偵測波峰能準確的判斷出行走的步伐，即使在行走頻率不同的情況下造成加速度值的差異，也僅會影響峰值的大小，只要峰值大於閾值，一樣可以判斷為一步。

2. 步長估計

步長估計以複迴歸分析方法完成，而一般用於步長估計模型之自變數較為常用的為身高與行走頻率。Valérie Renaudin et.al(2012)基於最小二乘原理進行複迴歸分析，求得步長估計模型。其複迴歸分析之自變數為身高、身高與行走頻率之積。Kroger, Tuomo et.al(2010)亦使用了身高與行走頻率做為計算估計模型之自變數。Shin, SH et.al(2007)則是透過行走頻率與加速度變異量求取步長估計模型。然而為了實驗腿長是否為影響步長之因素，本研究基於 Valérie Renaudin 之估計模型進行兩組實驗，差異在於自變數不同，一為身高、身高與行走頻率之積另一則為腿長佔身高比例、身高與行走頻率之積。因此透過最小二乘原理將式(14)寫成矩陣行式後可得到矩陣 A、X、L：

$$\text{StepLength} = a \cdot \text{Height} \cdot f_{\text{step}} + b \cdot \text{Height} + c \quad (14)$$

$$A = \begin{bmatrix} \text{Height}_1 \cdot f_{\text{step}1} & \text{Height}_1 & 1 \\ \text{Height}_1 \cdot f_{\text{step}2} & \text{Height}_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{Height}_n \cdot f_{\text{step}n} & \text{Height}_n & 1 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} \text{StepLength}_1 \\ \text{StepLength}_2 \\ \vdots \\ \text{StepLength}_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

依照最小二乘法原理 $V^T P V = \min$ ，V 為各個樣本與迴歸模型成果之差量，P 則為各變數之權重，於本研究中各變數為等權。推導後可求得矩陣 N^{-1} 、W：

$$N^{-1} = (A^T P A)^{-1} \quad (16)$$

$$W = A^T P L \quad (17)$$

$$X = N^{-1} W = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (18)$$

根據計算出之複迴歸係數 a、b、c，再另收集實驗樣本外之樣本數據帶入所得之複迴歸分析結果，進行模型驗證分析。複迴歸分析之統計推論可分為兩部分討論：複迴歸方程式的配合度、個別迴歸參數之檢定。

(1) 迴歸方程式之配合度

利用複迴歸方程式決定模式與量測數據有多大的符合性？最主要用的判別標準即是決定係數（Coefficient of determination）， R^2 。因此配合度或解釋能力可透過判定係數 R^2 衡量，用以檢定複迴歸方程式是否可接受。然而 R^2 在樣本數小或自變數個數增加時，會使自由度變小，產生高估的狀況。意即在複迴歸模型中若不斷增加

與模型無關的解釋變數時， R^2 會提高，如此會誤導且不能代表迴歸模型的解釋能力(林惠玲、陳正倉，2002)。

(2) 迴歸方程式有無解釋能力之檢定：F 檢定

複迴歸分析可以利用 F 檢定來檢定迴歸方程式所有自變數對依變數是否有聯合解釋的能力，意即檢定該迴歸方程式是否可被接受。虛無假設 H_0 為迴歸方程式無解釋能力，對立假設 H_1 為迴歸方程式有解釋能力。

三、實驗及成果分析

依據前述研究架構與理論基礎所提出各階段室內定位研究步驟，實驗成果共分為兩部分進行分析比較。第一部分為針對加速度訊號進行兩種濾波平滑化後進行步伐偵測之成果。第二部分為步長估計，以簡易最小二乘方法擬合出三維平面做為估計之參考依據，並同時比較將身高自變數改為腿長自變數後得到之估計成果。

(一) 步伐偵測

本實驗總共分兩部分，第一部分為短步數步伐偵測實驗，實驗場為政治大學綜合院館六樓之直線走廊，每位實驗者手持行動裝置行走十步同時獲取行走中之加速度資訊(如表 1)。第二部分則為長步數步伐偵測實驗，實驗場設於政治大學河堤籃球場，每位實驗者手持行動裝置沿籃球場邊線行走一周獲取加速度資訊(如表 2)。透過兩種濾波針對加速度訊號進行雜訊濾除後之步伐偵測成果如下：

表 1 綜合院館步伐偵測結果

實驗場一：綜院六樓走廊					
實驗者	真實步數	SG Filter		FFT Filter	
		偵測步數	步伐差	偵測步數	步伐差
1	10	11	1	12	2
2	10	10	0	11	1
3	10	10	0	12	2
4	10	11	1	13	3
5	10	9	-1	10	0
6	10	8	-2	11	1
7	10	9	-1	12	2
8	10	11	1	8	-2
9	10	10	0	11	1
10	10	11	1	12	2
11	10	11	1	14	4
12	10	8	-2	10	0
13	10	9	-1	14	4
14	10	10	0	12	2
15	10	9	-1	12	2
平均誤差量		0.866		1.866	
誤差率		8.666%		18.666%	

由表 1 中可以看出透過 SG Filter 平滑化過後的加速度訊號所偵測到的步伐數，在十步中平均誤差量只有 0.866 步，然而在 FFT Filter 的步伐偵測中，每十步平均會

產生 1.866 步的誤差，因此可以得知以 SG Filter 做加速度平滑化後的步伐偵測結果較 FFT Filter 要佳。

表 2 河堤籃球場步伐偵測結果

實驗場二 政治大學河堤籃球場					
實驗者	真實步伐	SG Filter		FFT Filter	
		偵測步伐	步伐差	偵測步伐	步伐差
1	129	129	0	132	3
2	129	128	-1	135	6
3	134	135	1	148	14
4	135	137	2	141	6
5	129	129	1	136	8
6	127	130	3	134	7
7	129	131	2	152	23
平均誤差量		1.0		9.0	
誤差率		1.1%		7.35%	

由表 2 中可以得知，在 SG Filter 平滑化後的步伐偵測結果，平均誤差量為 1 步，而 FFT Filter 則有 9 步，且誤差率 SG Filter 的成果同樣較 FFT Filter 為佳，因此可以證實，在行走狀態下，步伐偵測的結果並不受行走步伐影響。之所以產生這種結果，是由於在行走過程中，每個人的行走頻率固定，且行動裝置加速度值獲取之每一筆數據互相獨立，並不會受前一筆加速度量影響，因此即使行走步伐增加，獲取之加速度數據所繪製的波型仍然會固定，因此在波峰偵測上並不會因為行走步伐的增加而導致偵測錯誤率增加。相反的，由於行走步伐增加，但在步伐差相近的情況下，誤差率的分母變大，反而得到誤差率變小的結果，如表 3。

表 3 濾波平滑化成果比較

	綜合院館走廊(10 步)	河堤籃球場(129~135 步)
SG Filter 誤差率	8.666%	1.1%
FFT Filter 誤差率	18.666%	7.35%

而兩濾波在步伐偵測之表現差異，可以透過濾波結果圖（如圖 4 及 5）中得知其因。圖 4 為 SG Filter 之濾波結果，圖 5 為 FFT Filter 濾波結果，兩段資料皆是截取 z 軸加速度最前端之資料。行動裝置開始執行應用程式但尚未開始行走時，手部產生之晃動會產生微小加速度量，然而在 FFT Filter 中將這些微小加速度量判斷為行走特徵，因此步伐偵測錯誤量大，而在 SG Filter 中則形成較為平滑之波型，因此儘管存在波峰但並不會超過設定之門檻，不判斷為行走特徵，因此最終步伐偵測結果較為準確。

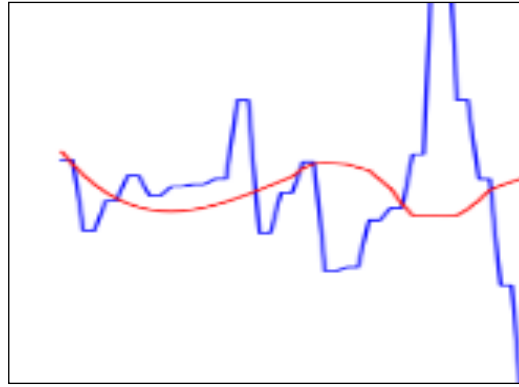


圖4 SG Filter 結果

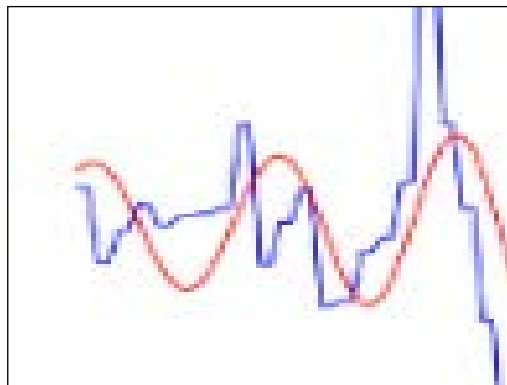


圖5 FFT Filter 結果

(二) 步長估計

步長估計的實驗樣本共 64 人，男女比例各半，身高範圍 145cm 至 186cm，每人以正常行走速度與快步走方式行走兩次，因此最終可以獲得 128 筆步長估計實驗所需資料。實驗場設於政治大學綜合院館六樓之直線走廊，分別收集身高、腿長、行走時間與行走距離各項參數，並依據最小二乘法擬合三維平面，求得方程式系數作為估計模型，其成果如下：

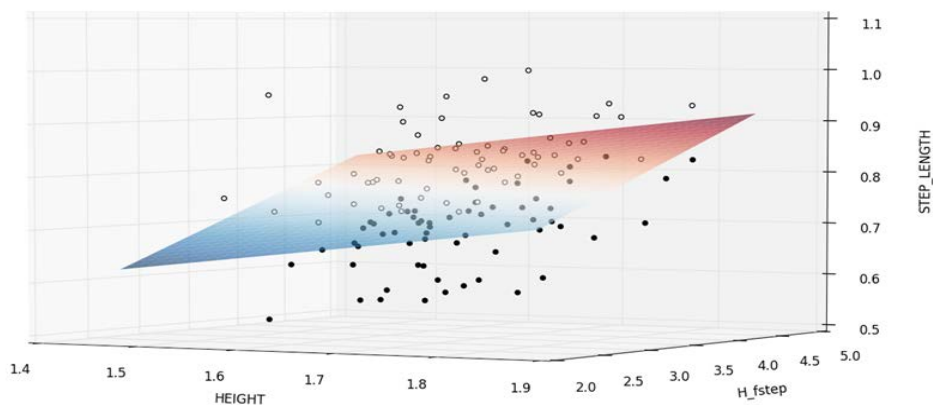


圖6 最小二乘擬合(自變數：HEIGHT、H_fstep)

依據式 14，以身高(HEIGHT)、身高與行走頻率之積(H_fstep)做為自變數，步長(STEP_LENGTH)做為依變數。圖 6 中白色點代表位於擬合平面之上的點，意即殘差為正；而黑色點則代表位於擬合平面之下的點，殘差為負，步長擬合結果各統計量如表 4：

表 4 最小二乘法迴歸結果(自變數：HEIGHT、H_fstep)

Ordinary Least Square (HEIGHT, H_fstep)			
Dep. Variable :	STEP_LENGTH	R^2 :	0.191
Model :	OLS	Adj. R^2 :	0.178
Method :	Least Squares	F-statistic :	14.79
Date :	Thu, 03Dec 2015		
Time :	20 : 55 : 50		
No. Observation :	128		
Df Residuals :	125		
Df Model :	2		
Covariance Type :	Nonrobust		

在信心水準 95%下，以 F 檢定查表結果顯示 $F > F_{2,125,0.05}$ ，因此該迴歸方程式之自變數對依變數有解釋能力，然而 R^2 與 adjusted R^2 極小，表示儘管該迴歸模型具有聯合解釋能力，但模型的配合度低。歸咎原因為步長估計實驗資料的收集樣本差異極大，並且沒有規律。且在各篇文獻中，步長估計的公式除了最基礎的原型外，都會另外乘上一個人因子 K 值，才能使得預測結果較為準確。從圖 7 中來看，在步長估計的殘差約為 0.5~1.1 公尺。

由上述資料使用身高、身高與行走頻率乘數做為自變數經過複迴歸分析計算出來之殘差為隨機分布如圖 7 所示，證實本研究使用方法符合線性迴歸方程式的假設及統計特性。

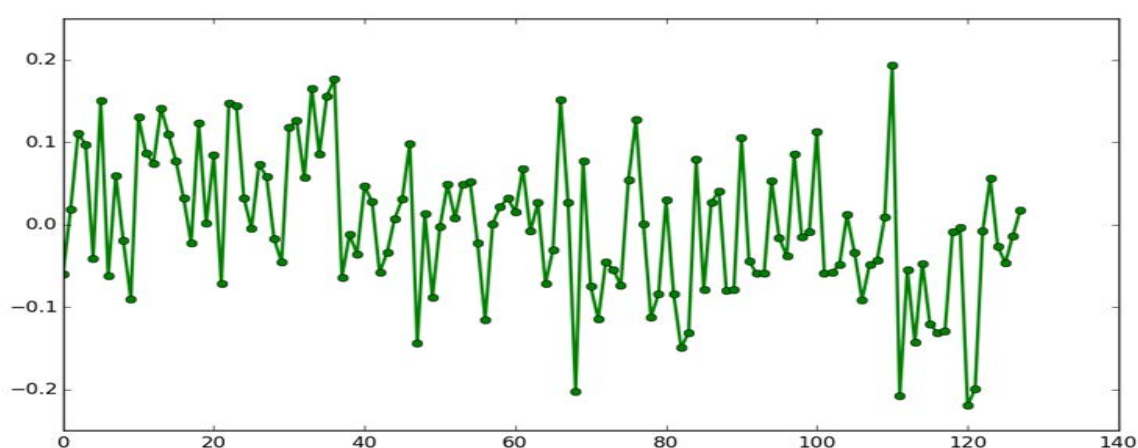


圖7 最小二乘殘差分布

本研究除了使用身高、身高與行走頻率乘數做為自變數之實驗得出以上成果外，另將複迴歸模型之自變數更改為腿長佔身高的比例、身高與行走頻率的積得出以下結果做為比較組，如圖 8 所示：

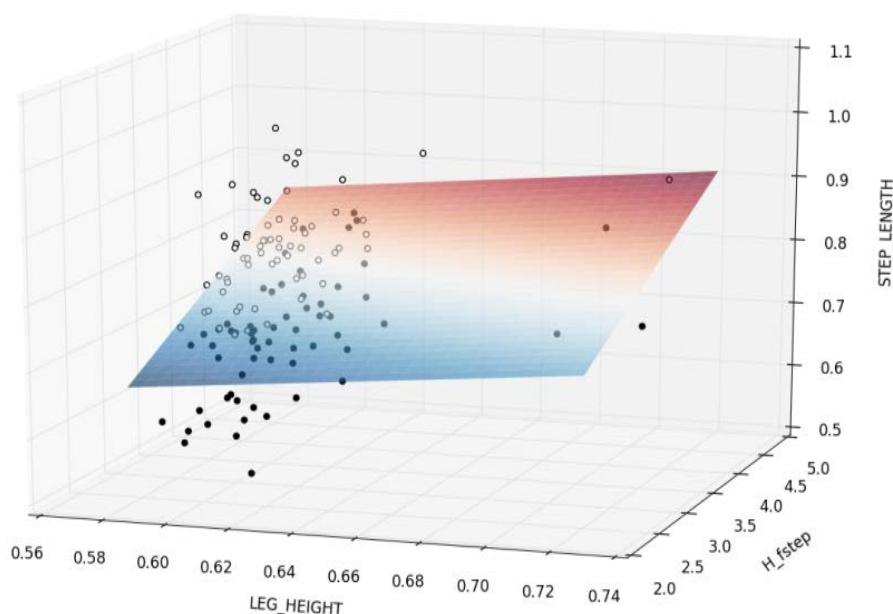


圖8 最小二乘擬合結果(自變數：LEG_HEIGHT、H_fstep)

相較於圖 6，點位的分布在身高佔腿長比例的自變數中較為密集，因為人體結構上腿長佔身高的比例在不同樣本上的結果差異較小。且在表 5 結果顯示，比較組模型的兩個自變數仍然有聯合解釋的能力，可以用來推估步長。

表 5 最小二乘迴歸結果(自變數：LEG_HEIGHT、H_fstep)

Ordinary Least Square (LEG_HEIGHT , H_fstep)			
Dep. Variable :	STEP_LENGTH	R^2 :	0.166
Model :	OLS	Adj. R^2 :	0.153
Method :	Least Squares	F-statistic :	12.47
Date :	Mon,07Dec 2015		
Time :	19 : 15 : 28		
No. Observation :	128		
Df Residuals :	125		
Df Model :	2		
Covariance Type :	Nonrobust		

透過兩組求得之迴歸係數，將資料代入模型進行步長估計，經由式(19)可計算得出步長估計的準確率：

$$\text{準確率} = 1 - \frac{(\text{估計步長} - \text{真實步長})}{\text{真實步長}} \quad (19)$$

為比較上述兩模型估計步長的準確度，於完成複迴歸模型分析後另收集 12 筆實驗資料，包含行走時間、行走距離、身高、腿長，根據這些資料計算得到行走頻率後代入兩模型進行準確度比較，結果如表 6：

表 6 模型預測準確率成果表

	實驗一		實驗二	
自變數	身高、身高與行走頻率乘數		腿長、身高與行走頻率乘數	
	誤差值(單位:m)	準確率(單位:%)	誤差值(單位:m)	準確率(單位:%)
	0.043	94.15	-0.003	99.63
	0.072	89.56	-0.032	95.37
	0.186	69.49	-0.153	74.88
	0.088	87.37	-0.053	92.42
	0.131	77.31	-0.118	79.56
	0.038	94.87	0.052	92.97
	0.034	95.13	-0.023	96.74
	0.101	84.39	-0.098	84.76
	0.025	96.57	0.006	99.06
	0.068	90.28	-0.026	96.22
	0.064	89.94	-0.088	86.20
	0.040	94.12	-0.025	96.30
平均	0.074	88.60	-0.048	91.18

由表 6 可以得知，以身高佔腿長比例做為自變數的複迴歸分析結果，在步長預測準確度成果可達 91.18%，而 Valérie Renaudin(2012)以身高與行走頻率為自變數之步長估計模型，其預測準確率則為 88.6%。

根據上述結果可以發現，加入腿長概念之複迴歸分析模型結果，儘管在少數實驗樣本之估計值準確率較低，但以整體結果而言，在步長估計成果上可以稍微提升其估計準確度，藉此降低 PDR 在距離上的誤差。

四、結 論

透過以上實驗成果分析，可以得知使用 Savitzky-Golay Filter 對加速度訊號濾除雜訊可以得到較佳之步伐偵測成果，在短步數與長步數實驗上都優於 Fast Fourier Transform，在 10 步內的誤差量平均為 0.866 步，129~135 步中的誤差量平均為 1 步。步長估計中，以 Valérie Renaudin 模型之估計結果，其準確率約為 88.6%，透過加入腿長因子作為複迴歸分析中心的自變數，並以實驗樣本外之數據進行估計準確率計算，新的複迴歸模型得到的估計準確率約可達 91.18%。因此證實腿長對於步長有一定的影響量，加入腿長做為複迴歸分析之自變數可提升步長估計之準確率。因此，透過本研究之實驗，可以降低 PDR 計算坐標中之距離誤差，提升室內定位之準確度，使一般大眾可以較低使用成本實現室內定位之目標。

參考文獻

- 彭威然，2014，《使用手機加速度計和陀螺儀之室內定位》，淡江大學資訊工程學系資訊網路與通訊碩士班學位論文。
- 林惠玲、陳正倉，2002，《應用統計學》，四版修訂版，雙葉書廊有限公司:台北。
- Kroger, T., Y. Chen, L. Pei, T. Tenhunen, H. Kuusniemi, R. Chen and W. Chen, 2010, Method of pedestrian dead reckoning using speed recognition, *Proceedings of the Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS), 2010: Finland(Kirkkonummi)*.
- Marschollek, M., M. Goevercin, K.-H. Wolf, B. Song, M. Gietzelt, R. Haux, and E.Steinhausen-Thiessen, 2008, A performance comparison of accelerometry-based step detection algorithms on a large, non-laboratory sample of healthy and mobility-impaired persons, *Proceedings of the 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Canada (Vancouver, BC)*.
- Renaudin, V., M. Susi, , and G. Lachapelle, , 2012, Step length estimation using handheld inertial sensors, *Sensors*, 12(7), pp. 8507-8525.
- Schafer, R. W., 2011, What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes], *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(4), pp.111-117.
- Shin, S. H., C. G. Park, J. W. Kim, H. S. Hong, and J. M. Lee, 2007, Adaptive step length estimation algorithm using low-cost MEMS inertial sensors, *Proceedings of the 2007 Sensors Applications Symposium, America (San Diego, CA)*.

利用衛星測地資料分析花東縱谷北段之地殼變形

張午龍^{1*} 劉亭妤² 張中白³

論文收件日期：105.03.29

論文修改日期：105.05.01

論文接受日期：105.05.11

摘 要

臺灣東部為歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，地震發生頻繁，但近 20 年來花東縱谷北段僅有少數規模大於五的地震，因此此段的縱谷斷層被視為震間鎖定狀態，和南段的淺部潛移深部發震行為不同。透過觀測縱谷北段的地表變形有助於瞭解兩板塊間現今的碰撞及運動方式，並可提供地震潛勢分析的依據。本研究結合全球衛星定位系統(GPS)及永久散射體差分干涉(PSInSAR)兩種衛星測地資料，分析 2004 年至 2010 年間縱谷北段的三維地表變形。結果顯示此區的水平速度大致以 20-25 mm/yr 朝向西北，並呈現由南往北順時針變小的情形。垂直運動上，海岸山脈在 23.4°N 以北呈現最大 10 mm/yr 的下沉，推測此運動可能和菲律賓海板塊在此處外海向北隱沒至歐亞板塊或是東部外海一西傾斷層的震間滑移有關。此外，應變率分析與地震觀測指出：(1)中央山脈東側發生的正斷層地震應與此處接近東西向伸張的地表變形有關；(2)縱谷北段有快速的應變能累積，加上近 20 年僅發生過兩個地震矩規模大於五的地震，顯示此區可能有較高的地震潛勢。

關鍵字：永久散射體差分干涉、全球衛星定位系統、花東縱谷

¹ 副教授，國立中央大學地球科學系。

² 碩士，國立中央大學地球科學系。

³ 教授，國立中央大學太空及遙測研究中心。

* 通訊作者，TEL: (03)4258081，E-mail: wuchang@ncu.edu.tw。

Analysis of Crustal Deformation Along the Northern Longitudinal Valley from Satellite Geodesy

Wu-Lung Chang^{1*}, Ting-Yu Liu², Chung-Pai Chang³

Abstract

While frequent earthquakes have occurred in eastern Taiwan due to the interactions between the Philippine Sea and Eurasian plates, the northern portion of the Longitudinal Valley (LV) has experienced few $M > 5$ earthquakes in the past 20 years and is considered locked interseismically, different from the southern portion where near-surface fault creep and deep seismicity have been observed. Therefore surface deformation near the northern LV fault is worth investigating for evaluating earthquake potential of eastern Taiwan. Considering the data advantages of three-component GPS (Global Positioning System) and high-spatial-sampling PSInSAR (Persistent Scatterer InSAR), we apply a velocity interpolation method to intergrate both geodetic observations for analyzing the interseismic ground deformation of the northern LV area. Our results reveal a decrease of horizontal ground motion to the north from 25 mm/yr to < 10 mm/yr, and a clockwise rotation near the northern end of LV. The vertical velocities show subsidence in most of the study area with rates up to 10 mm/yr, which may relate to a postulation that the northern Coastal Range is subducting to the north under the Eurasian plate. In addition, geodetic strain-rate field and earthquake focal mechanism point out that (1) the occurrence of normal-faulting earthquakes in the eastern Central Range is consistent with the observed extensional strain field; (2) while the northern LV has large magnitude of strain-rate, no observation of fault creep and relative low rate of large ($M > 5$) earthquakes in the past 20 years may imply high earthquake potential in the area.

Key Words: Global Positioning System, Longitudinal Valley, Persistent Scatterer InSAR

¹ Associate Professor, Department of Earth Sciences, National Central University.

² Master, Department of Earth Sciences, National Central University.

³ Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University.

* Corresponding Author, TEL: +886-3-4258081, E-mail: wuchang@ncu.edu.tw.

一、前言

花東縱谷位於臺灣東部，為歐亞板塊和菲律賓海板塊的縫合帶，分隔中央山脈與海岸山脈，全長約 150 公里，並形成了縱谷斷層系統。觀測資料顯示花東縱谷是台灣地表變形最快速，也是地震發生最頻繁的區域之一(e.g., Yu and Kuo, 2001; Champenois et al., 2012)。近年較大的地震事件包括了 1951 年 10 月至 12 月發生的花蓮台東地震序列($M_s=5.8\sim7.3$)、2005 年 4 月 30 日發生於花蓮市區地下 10 公里的地震($M_L=5.6$)、2013 年 10 月 31 日的瑞穗地震($M_w=6.2$)、和 2014 年 5 月 21 日發生的鳳林地震($M_w=5.4$)等。其中瑞穗地震的發震構造為向西傾斜之逆斷層，可能屬於中央山脈斷層系統(Chuang et al., 2014; Lee et al., 2014)，而相鄰之鳳林地震也可能屬於同樣系統。Kuochen et al. (2004)透過地震震源機制(focal mechanism)發現臺灣東部雖以逆斷層地震為主，但在約 23.5°N 以北的縱谷北區卻出現淺層的正斷層及走向滑移斷層地震，這個結果顯示現今縱谷南北段地殼所受到之應力型態有所不同。除此之外，Ching et al. (2011)利用精密水準測量觀測全台之垂直地表運動，顯示縱谷南部為抬升，但在約北緯 23.4° 以北的區域則轉為下陷。野外觀察亦顯示縱谷南段有快速的地表潛移(creeping)，顯示縱谷南段的縮短應變是以潛移釋放為主(e.g., Champenois et al., 2012)，但北段的野外資料並無觀察到潛移，顯示北縱谷斷層可能處於鎖定狀態。

近 20 年來衛星測地資料被廣泛應用於研究花東縱谷的地表變形以及斷層的活動性。舉例而言，Yu and Kuo (2001)使用長期 GPS 觀測資料探討花東縱谷區域的地表運動，得知臺灣地區的東西地殼縮短量約 43% 分布於縱谷及海岸山脈地區，並測得跨縱谷斷層的相對水平運動具有左移及壓縮分量，且在垂直斷層方向上由南段的 30-40 mm/yr 降至北段的 5 mm/yr。此外，他們提出縱谷南段的變形主要由縱谷斷層及鹿野斷層所吸收，但在北段則大多分散到數個切過海岸山脈的東北走向的逆斷層上。Hsu et al. (2009)使用間震期(1993-1999 年)相對澎湖白沙站(S01R)之 GPS 水平速度場，顯示位於縱谷斷層東側的測站水平運動為 26-68 mm/yr 往北偏西 50 度，而斷層西側之測站速度場則降至 18-35 mm/yr 往北偏西 70 度，造成最大約 30 mm/yr 的速度值差(約為板塊聚合速率 82 mm/yr 的三分之一)，這反映出東臺灣之應變主要可能累積於縱谷斷層。

在 InSAR 方面，Hsu and Bürgmann(2006)選用 1993-1999 ERS(European Remote Sensing)的衛星影像，利用雷達差分干涉 DInSAR 技術(Differential InSAR)分析整個縱谷區域，結果顯示縱谷北段之地表為由南而北抬升、下陷再抬升的轉變，最大差距約有 35 mm/yr。Peyret et al. (2011)改用永久散射體差分干涉 PSInSAR 技術(Persistent Scatterer InSAR)處理相同的 ERS 影像，結果顯示米崙台地東西兩側約有 5 mm/yr 速度差異，且由西到東亦有漸變的情形，另外在瑞穗鄉(23°N - 23.5°N)也觀察到潛移運動。

除了 ERS 衛星，此區尚有其他如歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)的 Envisat 衛星及日本宇宙航空研究開發機構(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)的 ALOS (Advanced Land Observing Satellite)衛星所拍攝的影像。Yen et al.

(2011)利用 PSInSAR 及 Small Baseline 技術處理 1995-2001 的 ERS 與 2004-2008 的 Envisat 影像來分析花蓮地區的地表運動，顯示中央山脈與米崙台地相對於花蓮市均為抬升，而海岸山脈北端相對於花東縱谷則為下沉。Champenois et al. (2012)使用解析度較高的 ALOS 影像分析 2007-2010 縱谷南段的地表運動，除了發現縱谷及鹿野斷層現今活動的地表證據外，也顯示縱谷斷層的地表潛移(creep)由瑞穗向南延伸至卑南山，且奇美與玉里斷層及縱谷西側均無地表潛移。

在觀測地表變形的技術上，連續 GPS 可提供測站每天的三分量坐標值，對測站位置隨時間的變化具有高解析能力，而 InSAR 則可在空間上測得高密度的單分量(衛星視角方向)位移觀測結果。因此結合這兩種資料可同時獲得空間解析度佳的三維速度場，對研究區域地表運動行為提供了重要資訊。本研究使用 2000 年至 2013 年間的 GPS 連續觀測資料，以及用 PSInSAR 技術處理的 Envisat 衛星於 2004-2008 與 ALOS 衛星於 2007-2010 年所擷取的影像(圖 1)，分析位於新城鄉往南延伸至玉里鎮之花東縱谷北段與鄰近的海岸山脈與中央山脈之現今地表變形，並藉由應變率場及地震震源機制探討此區地殼的應力分布狀態，做為地震潛勢評估的依據。

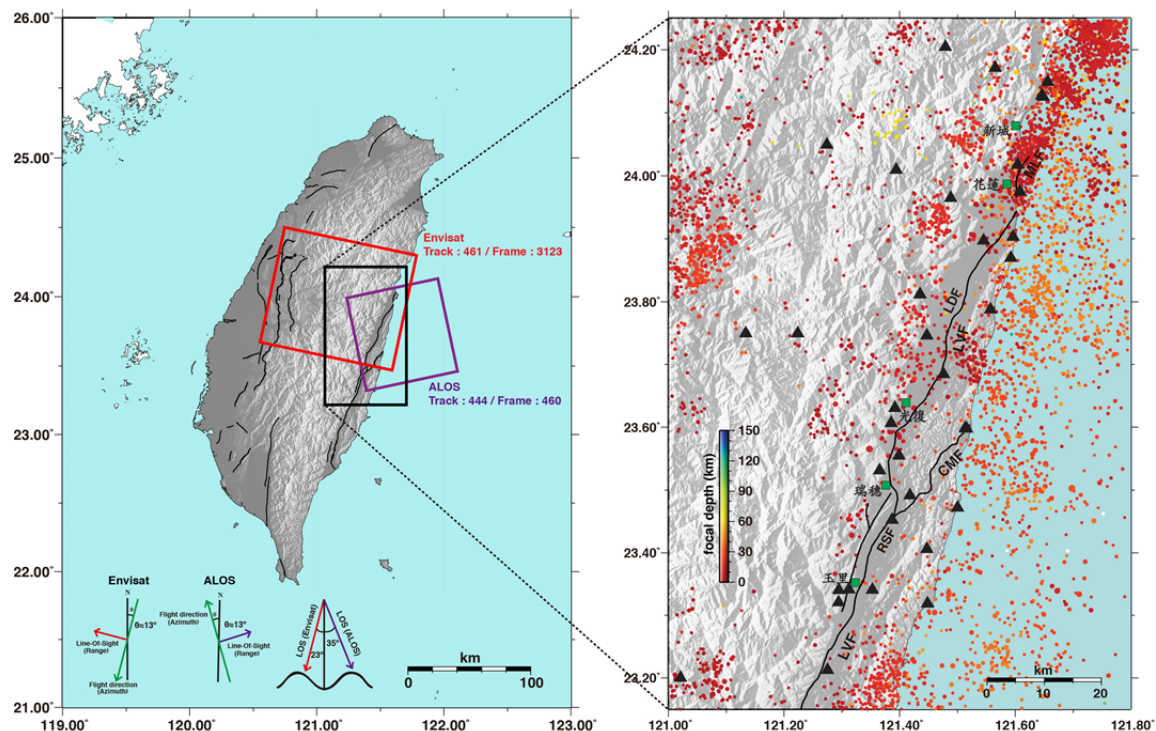


圖1 左圖中黑框為本文研究區域，紅框與紫框分別為 Envisat 與 ALOS 衛星影像範圍。右圖中藍色三角形為 GPS 連續測站，黑色線段為地調所公佈之地表活動斷層位置，由北而南分別為：MLF，米崙斷層；LDF，嶺頂斷層；CMF，奇美斷層；RSF，瑞穗斷層；LVF，縱谷斷層。不同顏色的點代表 2000-2013 年間區域內不同深度的地震($M \geq 3$ ，中央氣象局地震目錄)。

二、區域地體構造簡述

本研究區域位於東臺灣北部(圖 1)，其中主要的地體構造單位包括西側位於歐亞板塊之中央山脈，東側位於菲律賓海板塊的海岸山脈，以及座落於兩山脈間的板塊縫合帶花東縱谷。此區北端另外還有兩個相對地勢較高的區域，分別為最北邊接近新城鄉的立霧溪沖積扇和位於花蓮市的米崙台地。

歐亞與菲律賓海板塊的聚合在臺灣東部造成多條北北東-南南西走向的活動斷層，分別為位於米崙台地的米崙斷層、介於花東縱谷與海岸山脈邊界的縱谷斷層以及海岸山脈上的奇美斷層，多為帶左移分量的逆斷層(圖 1)。以下簡介這些主要斷層的特性。

(一)米崙斷層(MLF)

中央地質調查所將米崙斷層分類為第一類活動斷層，位於花東縱谷北端、米崙台地西緣。陸地上全長約 8 公里，北起七星潭海岸、南至花蓮市美崙山西南側，方位由北北東逆時針轉為北北西走向。最近一次的歷史地震為 1951 年發生於花蓮外海的花蓮-台東地震序列，此事件造成米崙斷層地表有數十公分之錯動，由地表破裂情形確定此斷層為帶左移分量的逆斷層(Shyu et al., 2005)。另外根據海底地形及震測資料，指出米崙斷層由花蓮市持續向北延伸入海(何邦碩，1974)。

(二)奇美斷層(CMF)

位於海岸山脈中段，為帶左移的逆斷層，呈北偏東 40°-50°走向，長度約 30 公里，其最南端連接瑞穗斷層與池上斷層。徐鐵良(1956)於豐濱附近發現斷層截切更新世晚期的河階礫石層，尚未有全新世活動的證據，因此中央地質調查所將其列為第二類活動斷層。

(三)縱谷斷層北段

縱谷斷層(LVF)位於花東縱谷東側，由花蓮延伸至台東，總長 150 公里，以縱谷中部的瑞穗為界分成南段與北段。中央地質調查所定義為第一類活動斷層，依照區域及特性又可分為四段，由北而南是：嶺頂斷層、瑞穗斷層、玉里斷層及池上斷層。縱谷斷層北段大致沿著海岸山脈西緣發育，在此將介紹位於縱谷北段的嶺頂斷層和瑞穗斷層。

嶺頂斷層(LDF)位於縱谷斷層最北段，北起花蓮溪出海口的嶺頂岬向南延伸，經月眉到光復鄉東富村(陳文山等，2008)，為一帶左移分量的逆斷層，呈北北東走向，長度約 30 公里。由於地表上並未發現斷層的地形特徵，可能被山麓沖積扇與沖積平原掩蓋。立霧溪在縱谷北段形成大面積的沖積扇，跨越縱谷向東發育，根據地形特徵判斷縱谷北段在近期的抬升較不活躍(徐鐵良，1956)。

瑞穗斷層(RSF)起於光復鄉東富村，向南延伸至玉里鎮春日里(陳文山等，2008)，長約 33 公里，為具左移性質的逆斷層，呈東北走向。1951 年花蓮-台東地震序列於 11 月 25 日的地震事件，在瑞穗北方造成兩條平行的地表破裂，分別位於中央山脈與縱谷的交會處及海岸山脈西側，陳文山(2006)推測是由瑞穗斷層活動所造成。鄰

近斷層的最近一次較大地震為 2013 年 10 月 31 日的瑞穗地震(M_L 6.3)，但其發震構造可能為瑞穗斷層下方的中央山脈斷層(Shyu et al., 2006; Chuang et al., 2014)。瑞穗斷層與中央山脈斷層活動之相互關係仍有待持續研究。

三、衛星測地資料處理與分析

(一) PSInSAR 觀測資料

永久散射體差分干涉法 PSInSAR(Persistent Scatterer Interferometry SAR) 是先在一系列不同時間的合成孔徑雷達(SAR)影像中尋找固定存在並具有高訊噪比(SNR)的像素，稱為永久散射點(PS 點)，再將這些散射點的干涉訊號經由誤差修正與相位回復(unwrapping)，即可得到地表變形資訊。所選取的 PS 點需具備不隨時間改變的穩定雷達波散射的特性，如岩石、建築物、道路等堅硬物體或人造物體等。一般來說，PS 點位數量於城市區域每平方公里都可在數十個點以上，而郊區部分也可達到每平方公里內有多於一個的觀測點，資料密度多會超過 GPS 測站的分佈密度(e.g., Hooper et al., 2004)。

本研究使用的 SAR 影像資料為來自歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)的 Envisat 以及日本宇宙航空研究開發機構(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)的 ALOS (Advanced Land Observing Satellite)兩衛星。其中 11 幅 ENVISAT 影像，涵蓋時間為 2004/05/15-2008/06/28 (軌道編號 Track461/Frame3123)，並選用 2007 年 2 月 24 日為主影像(各影像對之間的空間基線長介於-528 至 309 公尺)；16 幅 ALOS 影像，涵蓋時間為 2007/01/12-2010/09/07 (軌道編號 Track444/Frame460)，選定主影像為 2009 年 10 月 20 日(基線長介於正負 1414 公尺間)。兩衛星資料所涵蓋的空間區域如圖 1 所示。

我們利用 StaMPS 版本 3.3b1 (Hooper et al., 2004)來處理 PSInSAR 資料，並以影像處理軟體 Doris 版本 4.02 進行差分干涉產生干涉圖，以及解相位軟體 SNAPHU 對差分干涉結果進行相位回復(unwrapping)。最後將回復解算後的像素資訊進行大氣效應、軌道殘差、地形殘差以及雜訊的估算及修正後，就可獲得地表變形資訊。干涉處理之詳細流程及所使用的參數請參閱劉亭好(2015)。

由於 InSAR 技術僅能測量地表在衛星視角(line-of-sight, or LOS)方向上的位移量，且 Envisat 與 ALOS 兩組衛星影像獲取的視角不同，因此兩者所測得的地表運動需加以投影後才能進行比較。本研究採用的 Envisat 影像為降軌(descending)模式所獲取，當時衛星由北向南運行且由東向西拍攝(LOS 與垂直夾角 23°)，因此 LOS 為正(遠離衛星)的地表運動是往西或向下的位移所貢獻，以向下分量為主。另一方面，ALOS 影像為升軌(ascending)模式所獲取，衛星由南向北運行且向東拍攝(LOS 與垂直夾角 35°)，所以 LOS 為正則代表往東或往下的位移，仍以向下分量為主。為了避免混淆，以下 PSInSAR 的地表運動表示皆以 LOS 方向為主。

圖 2 顯示 Envisat 於 2004 至 2008 年所測得的累積地表位移量變化，所有影像皆相對第一幅影像(2004 年 5 月 15 日)。此時間序列顯示縱谷北部的 LOS 位移持續增加，且縱谷斷層東側的奇美斷層附近(約 23.8°N 以南)及海岸山脈北端的花蓮地區

增加速率較快。圖 3 則為 ALOS 衛星於 2007 至 2010 年所測得的累積地表位移，結果顯示奇美斷層地區的 LOS 位移同樣有明顯的增加。縱谷斷層以西進入山區，反射訊號可能受到地形快速變化引起的大氣效應或植被濃密等因素，LOS 位移變化較不穩定，因此在以下的討論中，此區的地表運動主要以 GPS 測量值為主。

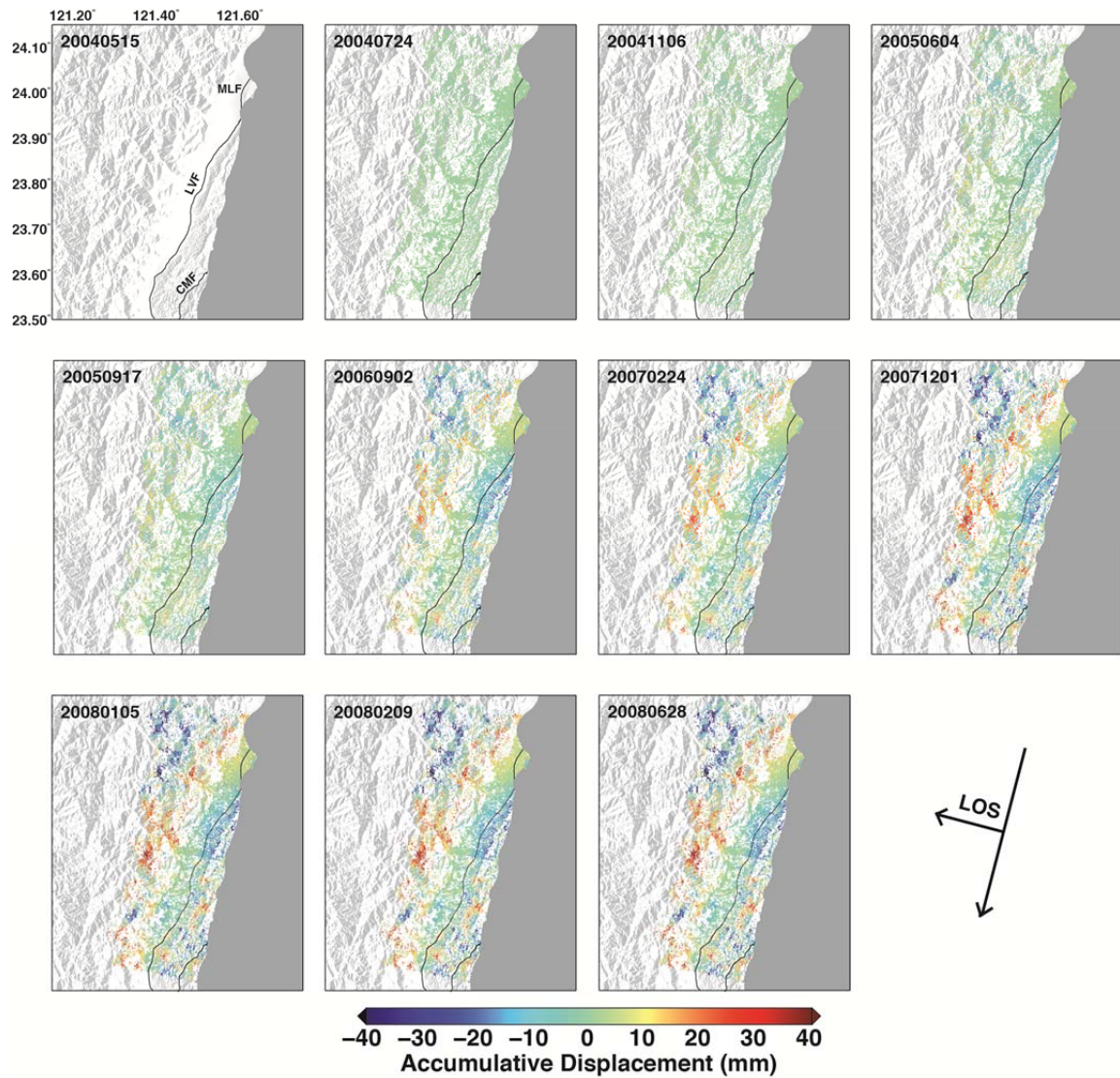


圖2 2004 至 2008 年 PSInSAR 累積地表位移量(Envisat 資料)。已扣除 DEM 誤差、大氣效應、軌道誤差以及殘差(劉亭妤, 2015)。主影像為 2007 年 2 月 24 日。所有地表位移皆相對於第一幅影像，暖色系代表相對抬升，冷色系代表相對下陷。

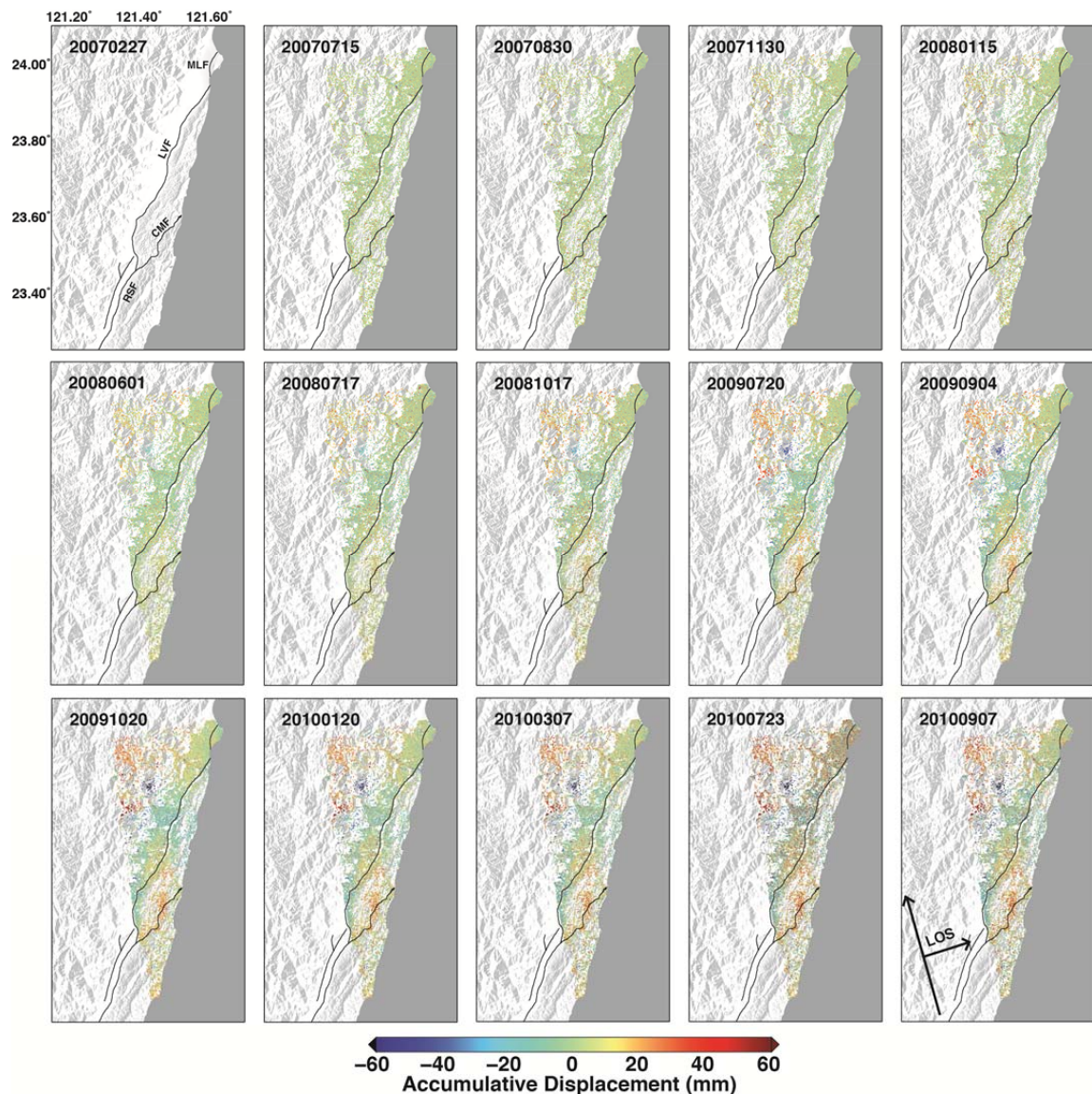


圖3 2007 至 2010 年 PSInSAR 累積地表位移量(ALOS 資料)。已扣除 DEM 誤差、大氣效應、軌道誤差以及殘差(劉亭好, 2015)。主影像為 2009 年 10 月 20 日。所有地表位移皆相對於第一幅影像, 暖色系代表相對抬升, 冷色系代表相對下陷。

(二) 連續 GPS 觀測資料

本研究區域內的 GPS 連續觀測站分別由中央氣象局、中央研究院地球科學研究所、國土測繪中心等單位所設置與維護(圖 1 與表 1)。我們利用 GAMIT 資料處理軟體以及邱紀瑜(2011)所建立的解算流程來求取 2000 至 2013 年間各站在 ITRF2008 框架下的每日三分量坐標及誤差, 並利用加權最小二乘法(weighted least-squares)擬合坐標值隨時間的線性變化, 此時間序列的斜率即當做測站平均速度的估算值。過程中我們採用 Nikolaidis (2002)提出的方法來計算並移除年週期及半年短週期訊號、時間序列的不連續(如同震位移或儀器更換等)、以及非線性地表活動(如震後變形)等效應, 並利用加權均方根(weighted root-mean-square, WRMS)求取速度之誤差。圖 4 以東華大學測站 NDHU 的三維坐標時間序列及其擬合曲線為例。

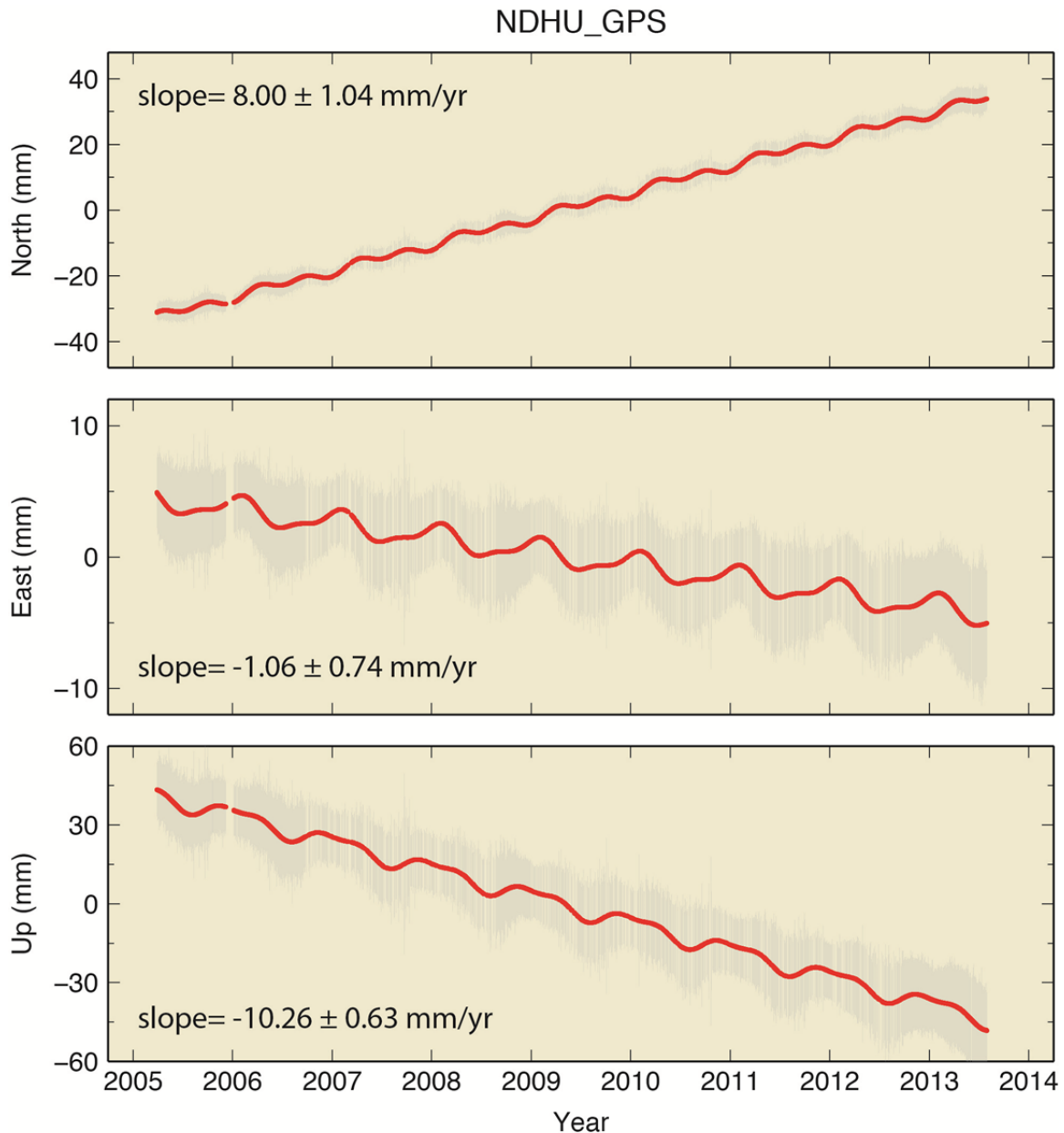


圖4 東華大學 GPS 站(NDHU)相對於 ITRF2008 的坐標三分量時間序列擬合成果。由上至下分別為南北(向北為正)、東西(向東為正)、以及垂直(向上為正)分量。擬合之斜率即為測站相對於 ITRF2008 的三分量速率值。

為顯示台灣地表運動與地體構造活動間的關連，學界普遍使用穩定歐亞大陸邊緣當作 GPS 速度場框架，且選擇位於澎湖白沙的長期 GPS 觀測站 S01R 為此座標之參考原點。圖 5 及表 1 為研究區域內各 GPS 站相對 S01R 的平均速度場及其標準偏差，可看出縱谷及海岸山脈在水平方向以 20~40 mm/yr 向西北運動，與前人研究結果相近(e.g., Yu and Kuo, 2001)，主要顯示了東部的菲律賓海板塊向西北碰撞歐亞板塊的地體運動。而在鉛直方向多為下沉運動，速率最高為 10 mm/yr，與 Ching et al. (2011)利用精密水準觀測所顯示的縱谷北段下降相同。我們將在後文討論縱谷北段下沉與南段上升的差異。

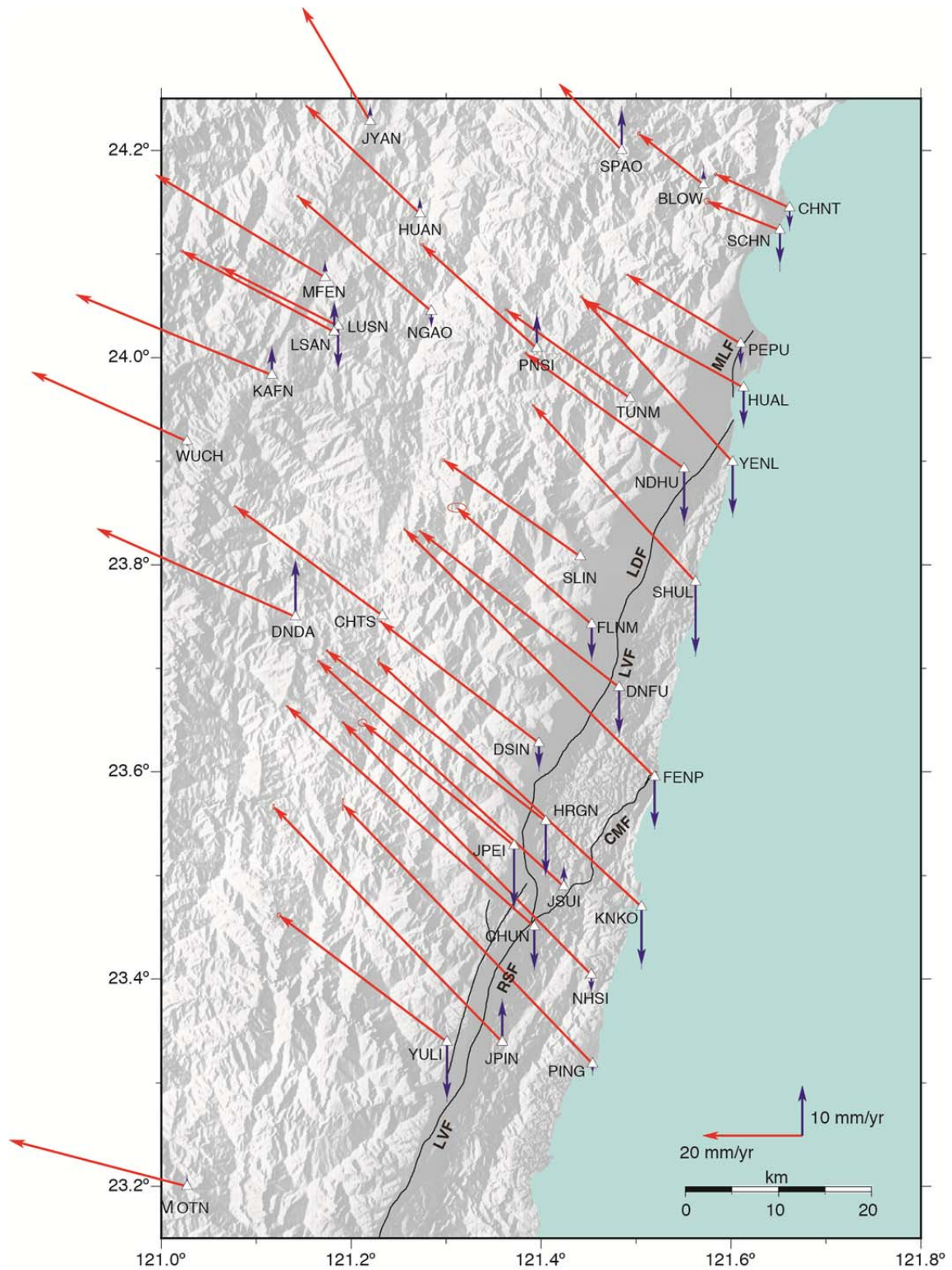


圖5 各 GPS 測站相對於澎湖白沙站 S01R 之三維平均水平速度場(2000-2013 年)。紅色與藍色箭頭分別代表水平與垂直速率值。

表1 本研究使用的 GPS 連續測站名稱、位置、觀測時間及三分量平均速度和標準差

站名	單位	經度	緯度	V_E (mm/yr)	σ_E (mm/yr)	V_N (mm/yr)	σ_N (mm/yr)	V_U (mm/yr)	σ_U (mm/yr)	起始時間	結束時間
BLOW	CWB	121.57	24.17	18.14	0.59	-4.62	0.79	0.93	0.45	2005.85	2013.58
CHNT	CWB	121.66	24.15	16.49	0.80	-8.80	1.25	-5.99	0.54	2003.00	2013.58
CHTS	IES	121.23	23.75	0.56	1.01	7.75	1.14	1.40	0.59	2006.26	2013.49
CHUN	CWB	121.39	23.45	-18.71	0.76	29.32	1.12	-8.80	0.59	2006.05	2013.58
DCHU	CWB	121.28	23.21	-17.98	0.79	28.70	0.90	2.41	0.56	2005.85	2013.58
DNDA	IES	121.14	23.75	-8.47	0.81	4.15	0.91	10.79	0.54	2006.26	2013.49
DNFU	CWB	121.48	23.69	-9.83	0.89	16.74	1.04	-9.91	0.57	2007.01	2013.58
DSIN	CWB	121.40	23.63	-2.87	1.13	10.07	0.82	-10.33	0.67	2006.33	2013.58
FENP	CWB	121.52	23.60	-19.96	0.97	34.85	1.09	-9.59	0.66	2006.17	2013.58
FLNM	MOI	121.45	23.75	0.96	1.18	11.13	1.73	-9.07	0.89	2000.00	2013.58
FONB	CWB	121.52	23.60	-20.29	0.72	39.40	0.63	-19.28	0.45	2005.00	2007.08
GUFU	MOI	121.39	23.60	-3.00	0.66	13.75	0.65	-18.93	0.59	2005.94	2007.08
HRGN	CWB	121.41	23.56	-12.68	0.85	19.55	1.02	-13.82	0.73	2006.63	2013.58
HUAL	CWB	121.61	23.98	1.43	1.68	3.90	1.50	-7.83	1.21	2000.00	2013.58
JPEI	IES	121.37	23.53	-1.20	1.03	12.16	1.16	-12.62	0.78	2002.06	2013.58
JPIN	IES	121.36	23.34	-15.16	1.05	33.01	0.96	6.70	0.79	2001.97	2013.58
JSUI	CWB	121.42	23.49	-18.20	0.77	31.91	1.72	-1.97	0.66	2003.36	2013.58
JULI	MOI	121.32	23.34	-0.28	0.63	14.73	0.58	-22.25	0.49	2005.00	2007.08
KNKO	IES	121.51	23.47	-21.65	0.82	36.03	0.93	-11.43	0.63	2002.30	2013.58
MOTN	IES	121.03	23.20	-5.37	1.20	-4.90	0.97	-2.02	0.71	2002.29	2013.58

CWB: 中央氣象局；CAT: 加州理工學院；MOI: 國土測繪中心；IES: 中央研究院地球科學研究所

V_E 、 V_N 、 V_U ：分別為向東、向北、向上的速度分量(相對 S01R)

σ_E 、 σ_N 、 σ_U ：分別為向東、向北、向上速度分量的一個標準差(one standard deviation)

表1(續) 本研究使用的 GPS 連續測站名稱、位置、觀測時間及三分量平均速度和標準差

站名	單位	經度	緯度	V_E (mm/yr)	σ_E (mm/yr)	V_N (mm/yr)	σ_N (mm/yr)	V_U (mm/yr)	σ_U (mm/yr)	起始時間	結束時間
NDHU	CWB	121.55	23.90	-1.06	0.74	8.00	1.04	-10.26	0.63	2005.24	2013.58
NGAO	IES	121.28	24.05	3.87	0.90	8.08	1.17	-2.76	0.64	2006.30	2013.21
NHSI	CWB	121.45	23.41	-18.07	0.77	36.00	1.09	-5.53	0.67	2005.66	2013.58
PEPU	CWB	121.61	24.02	8.65	0.76	-1.08	0.85	-4.00	0.55	2001.83	2013.58
PING	IES	121.45	23.32	-19.18	1.06	37.11	0.81	-3.16	0.60	2002.06	2013.58
PNSI	IES	121.40	24.01	8.63	1.16	5.07	1.44	4.25	0.66	2006.40	2013.49
S058	IES	121.45	23.32	-29.33	0.97	42.24	1.04	-3.29	0.61	2000.00	2002.96
SCHN	IES	121.65	24.13	13.21	0.79	-6.38	1.01	-3.75	0.65	2008.80	2013.58
SHUL	CWB	121.56	23.79	-1.67	0.67	21.17	0.92	-14.06	0.60	2005.50	2013.58
SICH	MOI	121.65	24.13	15.14	0.56	-5.23	0.59	-9.47	0.48	2005.94	2007.08
SLIN	MOI	121.44	23.81	1.19	1.19	7.81	1.23	-5.30	0.59	2001.83	2013.58
SOFN	MOI	121.60	23.87	0.23	0.50	17.99	0.49	-22.14	0.44	2005.94	2007.08
SPAO	CWB	121.48	24.21	18.82	0.83	-0.83	0.93	7.87	0.54	2004.27	2013.58
TUNM	CWB	121.49	23.97	3.95	1.06	5.12	0.76	2.23	0.57	2001.83	2013.58
WARO	MOI	121.44	23.81	1.81	0.67	9.62	0.69	-8.37	0.52	2005.94	2007.08
YENL	CWB	121.60	23.90	0.43	0.97	16.39	1.54	-12.33	0.63	2003.00	2013.58
YUL1	CWB	121.30	23.32	-1.76	0.60	10.95	0.91	-13.59	0.43	2010.97	2013.58
YULI	CWB	121.30	23.34	-3.35	0.91	12.89	0.88	-12.04	0.59	2001.97	2010.92

CWB: 中央氣象局；MOI: 國土測繪中心；IES: 中央研究院地球科學研究所

V_E 、 V_N 、 V_U ：分別為向東、向北、向上的速度分量(相對 S01R)

σ_E 、 σ_N 、 σ_U ：分別為向東、向北、向上速度分量的一個標準差(one standard deviation)

(三) 合成地表平均速度場

為估算 PSInSAR 觀測之地表運動，我們將相位解算後各 PS 點之累積位移除以 SAR 影像的時間間隔，即可得到該時間內地表於 LOS 方向之平均速度場。由於 PSInSAR 與 GPS 觀測值並非在同一參考坐標系統中，為了比較及整合這兩種速度場，需選擇一運動相對穩定的共同參考原點。考慮山區的 PS 點有相對噪訊較多的反射訊號(圖 2 及圖 3)，我們選擇了位於縱谷的東華大學站 NDHU 做為 GPS 與 InSAR 速度場的共同參考原點(圖 4)。由於 NDHU 位於縱谷斷層西側，相對此點的速度場也可反映菲律賓海板塊在北縱谷區相對於歐亞板塊的運動。

圖 6 為 GPS 與 PSInSAR 所測得相對 NDHU 的平均速度場。其中 GPS 水平分量顯示縱谷斷層以東的海岸山脈平均以 25~30 mm/yr 之速度往西北移動，而以西的花東縱谷則低於 5 mm/yr，代表地殼於跨越縱谷斷層吸收了約 20 mm/yr 的水平變形量。另外，速度場在~23.7°N 以北轉為 10 mm/yr 向北，通過縱谷斷層最北端的花蓮市(~24°N)則再轉為向東南方以 10~20 mm/yr 的速度移動。Chen et al. (2014)利用移動(campaign-mode) GPS 資料及塊體模型(block modeling)分析縱谷最北端的地表變形，提出因海岸山脈向西北運動時擠壓縱谷而使花蓮市米崙台地附近出現順時針旋轉並伴隨往東逃逸的地體運動，與本文圖 6 中顯示的速度場模式一致。另外，Chen et al. (2014)認為此碰撞擠壓可能同時造成米崙台地及其鄰近區域的抬升，也與圖 6 中縱谷在約 23.5°N 以北多為下沉但到了最北端則又轉為抬升的 GPS 垂直運動模式吻合。

為了對 PSInSAR 與 GPS 觀測進行一致解釋，我們應用下式將 GPS 三分量速度場合成至衛星之 LOS 方向上：

$$GPS_{LOS} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \cos \alpha & -\sin \theta \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} GPS_U \\ GPS_E \\ GPS_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 α 為衛星飛行軌跡方向之方位角(方位角為由北方順時針旋轉之角度)， θ 為 LOS 方向與地表垂直法線之夾角。本研究使用的兩種衛星 Envisat 與 ALOS 其角度分別為：Envisat， $\alpha=-167^\circ$ 、 $\theta=23^\circ$ ；ALOS， $\alpha=-12^\circ$ 、 $\theta=35^\circ$ 。圖 6 中的三角形顏色表示合成後各 GPS 測站的 LOS 速度值，結果顯示 GPS 與 PSInSAR 所測之地表運動大多一致，差距約在 5 mm/yr，唯有少數地區如縱谷中間的光復站(GUFU，圖 6a)與奇美斷層以南(圖 6b)有較明顯的不同。這主要是由於 GUFU 站的 GPS 觀測時間僅有 1 年多(2005.94-2007.08)，且有兩段約 1 至 2 個月長的資料空缺，造成時間序列不完整，以致該站的 GPS 平均速度計算較不準確。另外，劉亭妤(2015)顯示 ALOS 的速度觀測在奇美斷層以南的海岸山脈有較大的誤差(一標準差可達>8 mm/yr)，可能是造成圖 6b 中此區 PSInSAR 與 GPS 觀測差異較大的原因。

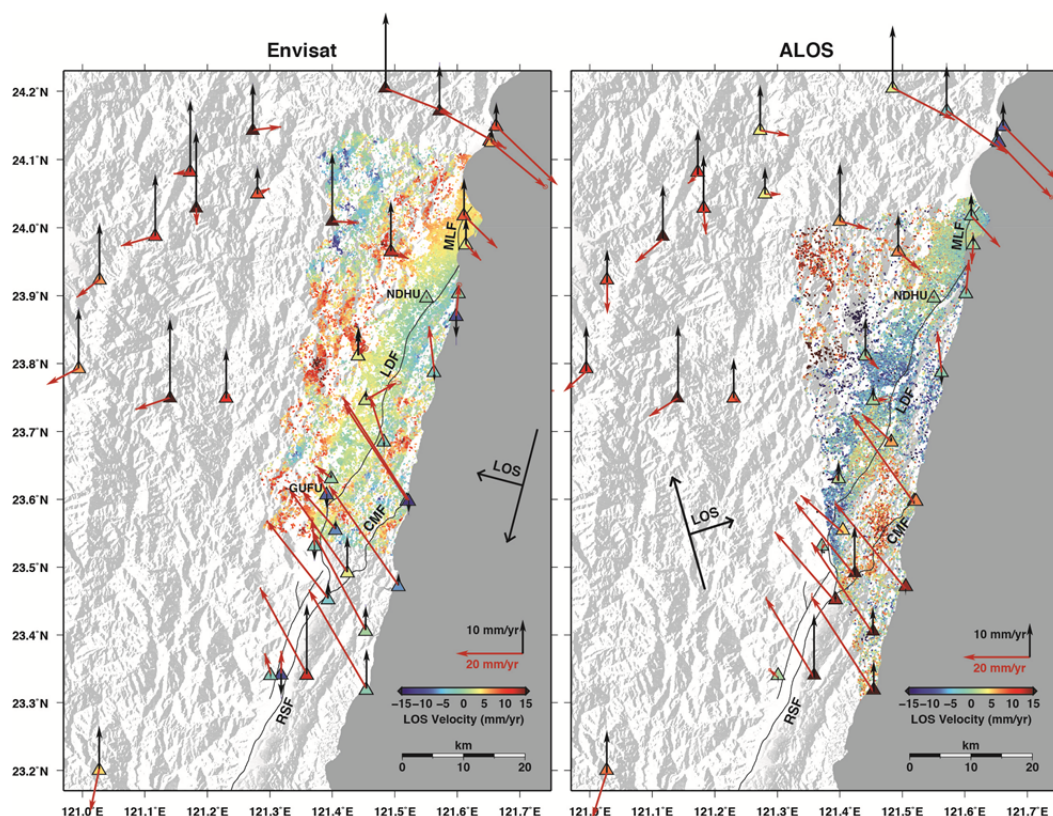


圖6 GPS 與 PSInSAR 所觀測之地表運動場，左圖與右圖分別為 Envisat 與 ALOS 觀測時段，背景顏色代表 PSInSAR 所測之地表 LOS 速率。紅色與黑色箭頭分別代表各 GPS 站相對東華大學站 NDHU 之水平與垂直速度，三角形的顏色則表示各站之 LOS 速率值。暖色系代表於 LOS 方向接近衛星，冷色系代表遠離衛星。

四、討 論

(一) 結合 GPS 與 InSAR 資料估算地表三維速度場

由於 SAR 衛星的俯角方向接近垂直($\sim 60^\circ$ ，圖 1)，其觀測對地表垂直位移變化較為敏感，因此在缺少水平運動的約制下，正值的 LOS 速率常被解釋為地表抬升(朝衛星運動)，反之則為下沉(遠離衛星運動)，但水平運動仍對 LOS 速率有一定程度的影響。舉例而言，圖 6 中花蓮地區雖在 Envisat 與 ALOS 觀測時段有不同的運動模式：前者 LOS 速率在為正而後者接近負值，但 GPS 觀測均顯示抬升。這是因為該區朝東南的水平速度對向西北西拍攝的 Envisat 提供接近衛星的正值 LOS 速率(與抬升相同)，反之對向東北東拍攝的 ALOS 提供了遠離衛星的負向 LOS 運動(與下沉相同)。類似情形也出現在西北向速度較高的海岸山脈地區($\sim 23.7^\circ\text{N}$)。

為了同時獲取 GPS 三分量與 InSAR 高空間取樣率的觀測優勢(區域中有 38 個 GPS 測站，相對於 Envisat 及 ALOS 分別可得到 55332 和 95819 個測點數)，本研究嘗試結合這兩種資料來提高地表三維速度場的空間取樣分布。Wang and Wright (2012)和 Walters et al. (2014)曾提出先將研究區域分成多個三角形網格，並假設速度

場沿經度、緯度呈線性變化，則網格內的任一觀測點(GPS 或 InSAR)的速度 v 與該網格之三節點的速度 v_1, v_2, v_3 間的關係式可表示為：

$$v(x, y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(x_1, y_1) \\ v_2(x_2, y_2) \\ v_3(x_3, y_3) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 N_i 為觀測點 (x, y) 和第 i 個節點 (x_i, y_i) 間的形狀函數(shape function)：

$$N_i = a_i + b_i x + c_i y, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

例如對於節點 1，

$$a_1 = (x_2 y_3 - x_3 y_2) / \Delta, \quad b_1 = (y_2 - y_3) / \Delta, \quad c_1 = (x_3 - x_2) / \Delta, \quad (4)$$

Δ 為該三角網格之面積。

根據以上的網格內差法，Wang and Wright (2012) 以下列公式來計算各節點的三分量速度場：

$$\begin{bmatrix} W_{sar} G_{sar} \\ W_{gps} G_{gps} \\ k^2 \nabla^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{sar} d_{sar} \\ W_{gps} d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 m_{vel} 包含各節點之三分量速度； G_{sar} 與 G_{gps} 分別為與 InSAR 和 GPS 相關的格林函數，其中包含觀測點與節點的形狀函數以及將三分量速度合成至 LOS 方向的函數； d_{sar} 與 d_{gps} 分別為 InSAR 及 GPS 觀測點的速度值； k^2 為控制各節點速度平滑(smoothing)程度的參數，以平衡高速度平滑度與低擬合誤差； ∇^2 為拉普拉斯運算子(Laplacian operator)； W_{sar} 與 W_{gps} 則分別為由 PSInSAR 及 GPS 速度標準差建立的對角權重矩陣(diagonal weighting matrix)，在此取權重值為標準差的倒數。

若將(5)式改寫為 $G_w m = d_w$ ，則各節點之三分量速度預測值即可由加權最小二乘解(weighted least-squares solution)來表示：

$$\hat{m}_{vel} = (G_w^T G_w)^{-1} G_w^T d_w. \quad (6)$$

經過不同測試，並考慮研究區域內測地資料之空間分布情形，我們採用隨測站密度而變的網格間距(0.06°至 0.12°不等)。計算時，先選用與 Envisat 及 ALOS 觀測時間段相同之 GPS 時間序列進行速度計算，再將各站結果分別與 Envisat 和 ALOS 之 LOS 速度場結合，估算研究區域內相對於東華大學站(NDHU)的三維速度場。

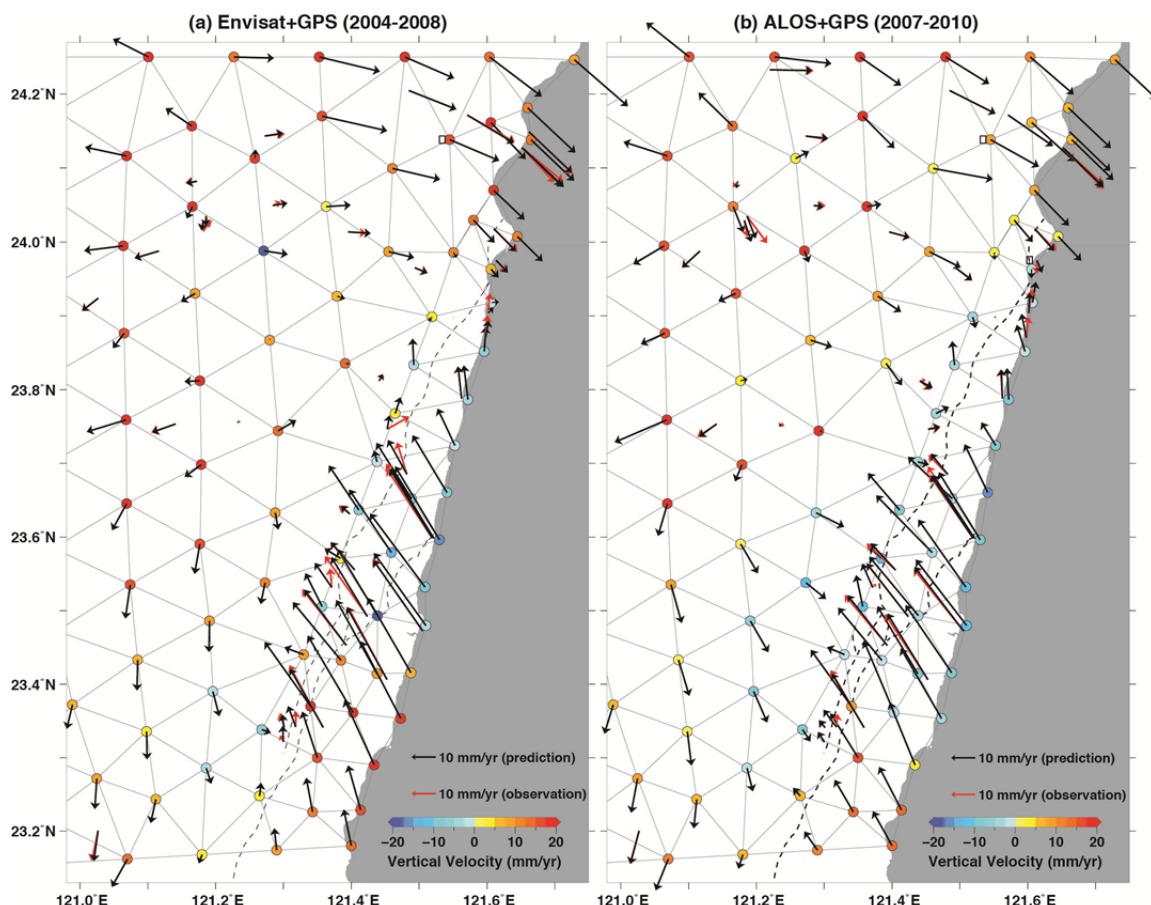


圖7 使用(a) 2004-2008 年 GPS 與 Envisat 及(b) 2007-2010 年 GPS 與 ALOS 觀測資料所估算的節點三分量速度場。圓圈上的箭頭與填色分別代表節點之水平與垂直速度，而不在圓圈上的紅色與黑色箭頭則分別為 GPS 站之觀測與估算水平速度。

圖 7 顯示以上的結果。為了量化節點速度預測值的可信度，我們計算各觀測值 d_{obs}^i (包括 GPS 與 InSAR) 與預測值 d_{pre}^i 間的方均根 (root mean square, RMS) 殘差為判斷依據：

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{obs}^i - d_{pre}^i)^2}{n}}, \quad (7)$$

其中 n 為總資料數量。結果顯示 2004-2008 資料 (GPS 與 Envisat) 之擬合 RMS 為 2.5 mm/yr，2007-2010 (GPS 與 ALOS) 則約為 5 mm/yr。其中 ALOS 因具有較多不穩定的山區反射點資料，因此較高的 RMS 值反映其擬合程度較差。

由於此估算方法以觀測資料的誤差做為擬合權重，而 GPS 的水平速度誤差比垂直向小 (見表 1)，因此在節點水平速度預測上受到 GPS 觀測值的影響較大。圖 7 顯示於縱谷及其以東等 GPS 測站分布較密集地區的節點水平運動與 GPS 觀測速度場 (圖 6) 相近，大致以 20-25 mm/yr 向西北然後順時針轉為 10 mm/yr，再於 24°N 約花蓮市以北轉為 5-10 mm/yr 朝東南，與前文所述一致。相對而言，缺乏 GPS 觀測約

制的縱谷以西及中央山脈地區，其水平向運動場較為多變，但大致在 23.6°N 以南為東南向且與縱谷以東產生左移帶壓縮的相對運動，反映了此區以跨縱谷斷層的斜向板塊擠壓為主。

在垂直地表運動的估算上，由於 SAR 衛星觀測視角方向接近地表法線，因此資料點較多的 PSInSAR 觀測提供了主要的資訊。圖 7 顯示縱谷及其以東之海岸山脈區域在 23.4°N~24°N 多呈現 5-10 mm/yr 下陷，但在以南及以北則有 10-15mm/yr 抬升。另外，中央山脈區域的垂直運動於兩時間段皆以 15-20 mm/yr 的抬升為主。Ching et al. (2011)分析 2000 年至 2008 年全臺灣共 1843 個精密水準測量點與 199 個 GPS 連續測站資料，指出橫跨臺灣的垂直速度場呈現鐘形變化，即中央山脈及雪山山脈抬升，而西部麓山帶和東部下陷；並觀察到北端的花東縱谷為下陷而南端為抬升，其轉換帶位於 23.4°N-23.5°N 處，與我們估算的垂直速度場變化一致。

為了解釋縱谷北段垂直地表運動的機制，Wu et al. (2009, 2014)根據台灣的地震分布與地殼速度構造，提出縱谷斷層東側的菲律賓海板塊除了與西側的歐亞板塊碰撞外，並在縱谷北段以西北西方向隱沒到北台灣之下，因此約 23.7°N 以北的海岸山脈可能是正在隱沒中的菲律賓海板塊的一部份。由這個模型可推論海岸山脈北段的下沉運動可能是因為板塊隱沒的結果，相反的南段則因板塊擠壓而以抬升為主。另一方面，Huang et al. (2010)使用彈性及黏彈性(viscoelastic)斷層塊體滑移模型來擬合臺灣東部海階定年(Hsieh et al., 2004)所得之全新世垂直速度場與 1992-1999 的 GPS 速度場，結果顯示縱谷斷層北段需完全鎖定至 20 公里深，而東部外海約 30 km 處一西傾斷層的北段則應有 35-55 mm/yr 的全新世震間滑移量，並提出縱谷北段的下陷運動可能與此外海斷層(offshore fault)的震間滑移有關。此外，Chemenda et al. (2001)與 Bos et al. (2003)分別利用沙箱模型與測地及地震觀測也提出這個西傾外海斷層的存在，並認為是菲律賓海板塊開始向朝西北隱沒至歐亞板塊下的證據。

(二) 地表應變率場與地震震源機制

地殼受到應力變形作用時會產生應變能(strain energy)，其大小與應變平方成正比(e.g., Chou and Pagano, 1992)，因此地表應變率(strain rate)和地殼的能量累積速率有密切關係，並可藉由此來評估地震發生潛勢(e.g., Ward, 1998)。由於應變率為速度的空間梯度，因此我們以圖 7b 中 ALOS 與 GPS 觀測內插所得的速度場為例，並使用應變轉換公式來計算圖中各三角網格主應變率的大小及方向：

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2}(\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2) + \frac{1}{2}(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2)\cos[2(\alpha - \beta)], \quad (8)$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 為兩測點(在此為網格節點)間基線(baseline)的應變率， α 為基線的方位角， $\dot{\epsilon}_1$ 及 $\dot{\epsilon}_2$ 為最大及最小主應變率， β 則為最大主應變軸的方位角。由於圖 7b 中各網格的三節點速度可提供三條基線的應變率，因此由(8)式可解出該網格對應的平均主應變場 $\dot{\epsilon}_1$ 、 $\dot{\epsilon}_2$ 、及 β 。

圖 8a 表示研究區域的主應變率大小方向以及應變率強度，其中後者為應變率張量的第二不變量(second invariant, $\sqrt{\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + 2\epsilon_{12}^2}$)，可視為面應變與剪應變的總

和效應(e.g., Kreemer et al., 2003)；而圖 8b 則顯示 1995-2009 規模大於三的地震震央及震源機制解(Wu et al., 2014)。若假設地殼為均向(isotropic)材料，則地表主應變與主應力方向應一致。Chang et al. (2003)比較臺灣地區 GPS 觀測及第四紀斷層滑移方向所得的應變率場與井孔崩落(borehole breakouts) 及地震震源機制解所得的應力方向，也認為兩者有一致的空間分布形態。此外，Hsu et al. (2009)利用 1999 集集地震前的 GPS 速度場與地震 P 波初動反演來比較地表主應變與不同深度應力的方向，結果顯示地表至地殼底部的大地應力方向應無顯著變化。根據以上的研究，我們假設縱谷地區測地資料所得的主應變方向應可對照解釋震源機制解所示的應力型態。

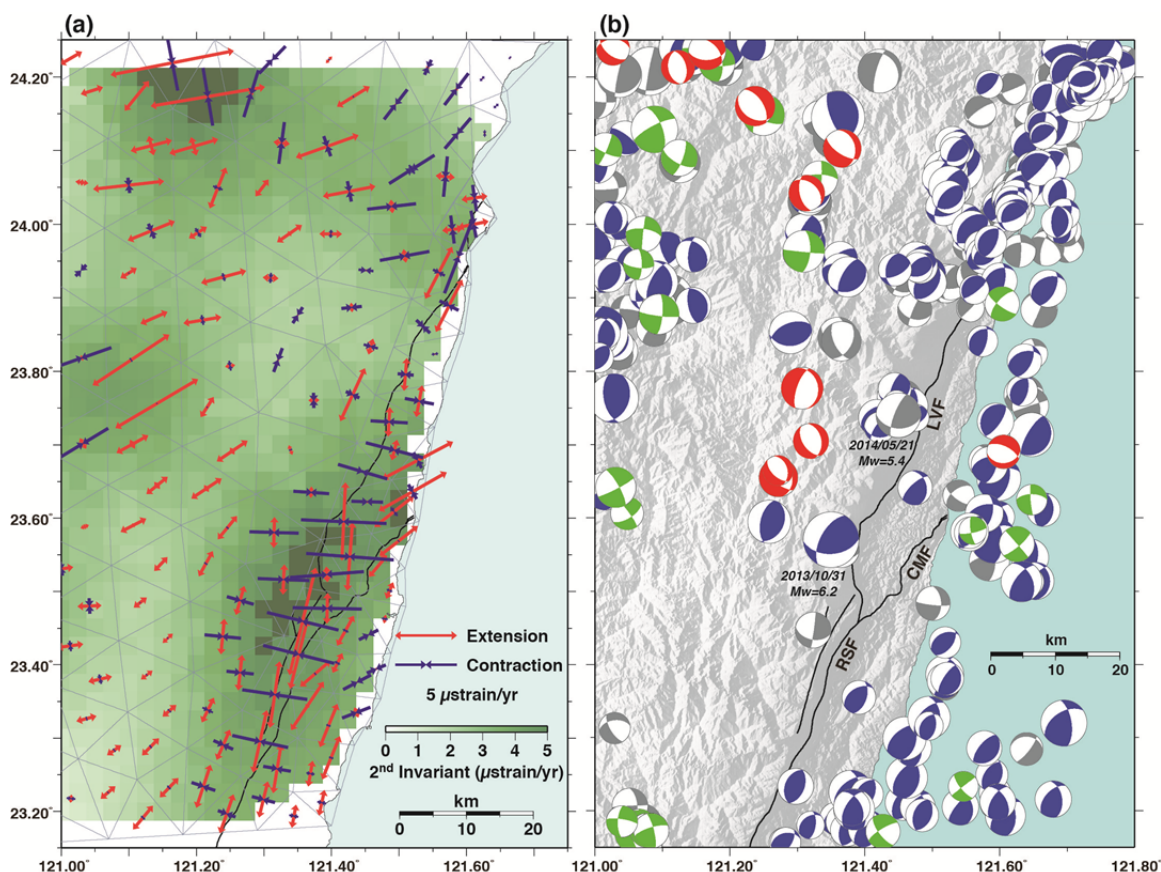


圖8 (a) 由圖 7b 的節點水平速度所估算的最大(紅色箭頭)與最小(藍色箭頭)主應變率場。背景顏色為應變率強度或應變率張量的第二不變量，可視為面應變及剪應變的總和效應。(b) 1995-2009 年間規模大於三以及兩個 2009 年後發生於北縱谷區規模大於五的地震的震源機制解(BATS 地震目錄)。紅、藍、綠色海灘球分別代表正、逆、走向滑移斷層地震，而灰色則為其它混合類型的地震(Frohlich, 2001)。

圖中可見 23.6°N 以北的中央山脈主要為接近西北—東南向伸張(extension)的地表變形，這與此區發生的正斷層地震的應力機制相符合。Bos et al. (2003)分析台灣地區 1990-1995 的 GPS 速度場，指出此處有西北—東南向伸張的主應變率，並解釋可能和中央山脈東部由北向南傳遞的地殼崛起(exhumation)有關。Wu et al. (2004)則發現 1999 集集震後到 2002 年間在中央山脈東側開始出現許多正斷層地震，認為這可能由集集主震時車籠埔斷層上盤的向西運動所造成。本研究顯示此區於

2004-2010 年間仍持續著相似的地表伸張應變方向，因此推測應與地殼崛起機制較為相關。除此之外，在 $23.3^{\circ}\sim 23.7^{\circ}\text{N}$ 之間的縱谷地區有明顯($>5\times 10^{-6}\text{ yr}^{-1}$)且大小相近的伸張與縮短(contraction)主應變率，符合觀測到的走向滑移兼逆衝的震源機制，顯示此區主要受到菲律賓海板塊朝西北與歐亞板塊斜向碰撞的應力作用。值得一提的是，雖然測地資料指出此區有高的應變率強度(圖 8b 中較深的背景顏色)，但因缺乏地表潛移證據，顯示此區斷層應處於震間鎖定狀態。加上近 20 年來僅發生過兩個規模大於五的地震，最大的為 2013 年 10 月 31 日 $M_w=6.4$ 的瑞穗地震(Lee et al., 2014)，推論此區相對較快的地殼應變能累積可能對應較高的地震潛勢。

五、結 論

為探討花東縱谷北段的地殼變形及其與現今板塊構造活動的關連，本研究分別使用 GPS 觀測資料(2000-2013)及永久散射體雷達差分干涉技術(PSInSAR)所處理的 Envisat (2004-2008)與 ALOS (2007-2010)衛星影像來獲取研究區域內的地表運動。考慮 GPS 三分量觀測與 PSInSAR 高空間解析度的優點，我們利用三角網格的線性內插方法來結合這兩種資料並估算三維速度場，以提升三維地表運動資訊。結果顯示相對於縱谷北端(GPS 站 NDHU)，縱谷及海岸山脈大致以 20-25 mm/yr 朝西北運動並向北逐漸遞減，在花蓮以北則轉為 5-10 mm/yr 朝東南。垂直運動上海岸山脈在 $23.4^{\circ}\text{N}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 呈現 5-10 mm/yr 下沉，推測此運動可能與菲律賓海板塊向下隱沒至歐亞板塊有關。此外，測地資料顯示 $23.3^{\circ}\sim 23.7^{\circ}\text{N}$ 的縱谷地區接近震間鎖定並有較大的應變率強度($>5\times 10^{-6}\text{ yr}^{-1}$)，加上過去 20 年內此區僅有兩個規模大於五的地震，推論此較快的應變能累積可能對應較高的地震潛勢。

致 謝

感謝兩位審稿委員的寶貴意見，讓本文內容更趨完整。中央氣象局地震測報中心、中央研究院地球科學研究所、內政部國土測繪中心提供的連續 GPS 觀測資料，中央氣象局與台灣寬頻地震網(BATS)提供的地震資料，以及中央氣象局(計畫編號 MOTC-CWB-103-E-02)與行政院科技部(計畫編號 103-2116-M-008-015-)提供研究經費補助，在此一併致謝。

參考文獻

- 何邦碩，1974，花蓮近海海域地球物理初步測勘，《海洋彙刊》，第 12 期，頁 39-47。
- 邱紀瑜，2011，《利用 GPS 觀測資料探討台北地區之地殼變形》，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 徐鐵良，1956，台灣東部海岸山脈地質，《臺灣省地質調查所彙刊第八號》，頁 39-63。
- 劉亭妤，2015，《利用測地資料分析花東縱谷北段之地殼變形》，國立中央大學地球科學系碩士論文。
- 陳文山，2006，地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫—槽溝開挖與古地震研究

- 計畫(總報告)－「一、槽溝開挖與古地震研究」，《經濟部中央地質調查所報告第 94-08 總號》，頁 93-96；頁 103-125。
- 陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權宥、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生、盧詩丁，2008，從古地震研究與 GPS 資料探討縱谷斷層的分段意義，《經濟部中央地質調查所特刊》，第 20 號，頁 165-191。
- Bos, A. G., W. Spakman, and M. C. J. Nyst, 2003, Surface deformation and tectonic setting of Taiwan inferred from a GPS velocity field, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (J. Geophys. Res.)*, 108(B10), doi:10.1029/2002JB002336.
- Champenois, J., B. Fruneau, E. Pathier, B. Deffontaines, K. C. Lin, and J. C. Hu, 2012, Monitoring of active tectonic deformations in the Longitudinal Valley (Eastern Taiwan) using Persistent Scatterer InSAR method with ALOS PALSAR data, *Earth and Planetary Science Letters (Earth Planet. Sci. Lett.)*, 337, pp.144-155.
- Chang, C. P., T. Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J. C. Lee, and S. B. Yu, 2003, Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214(1), pp.115-127.
- Chemenda, A. I., R. K. Yang, J. F. Stephan, E. A. Konstantinovskaya, and G. M. Ivanov, 2001, New results from physical modeling of arc-continent collision in Taiwan: Evolutionary model, *Tectonophysics*, 333(1), pp.159-178.
- Chen, C. Y., J. C. Lee, Y. G. Chen, and R. F. Chen, 2014, Campaigned GPS on present-day crustal deformation in northernmost Longitudinal Valley preliminary results, Hualien Taiwan, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences (Terr. Atmos. Ocean. Sci., TAO)*, 25(3), 337-357.
- Chou, P. C. and N. J. Pagano, 1992, *Elasticity: tensor, dyadic, and engineering approaches*, 1st edition, New York: Dover Publications, New York.
- Ching, K. E., M. L. Hsieh, K. M. Johnson, K. H. Chen, R. J. Rau, and M. Yang, 2011, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000-2008, *Journal of Geophysical Research*, 116(B8), pp.B08406.
- Chuang, R. Y., K. M. Johnson, Y.-T. Kuo, Y.-M. Wu, C.-H. Chang, and L.-C. Kuo, 2014, Active back thrust in the eastern Taiwan suture revealed by the 2013 Rueisuei earthquake: Evidence for a doubly vergent orogenic wedge?, *Geophysical Research Letters*, 41(10), pp.3464-3470.
- Frohlich, C., 2001, Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanisms, *Geophysical Journal International (Geophys. J. Int.)*, 144(2), pp.300-308.
- Hooper, A., H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical research letters (Geophys. Res. Lett.)*, 31(23), pp.L23611.

- Hsieh, M. L., P. M. Liew, and M. Y. Hsu, 2004, Holocene tectonic uplift on the Hua-tung coast, eastern Taiwan, *Quaternary International (Quat. Int.)*, 115-116(2004), pp.47-70.
- Hsu, L. and R. Bürgmann, 2006, Surface creep along the Longitudinal Valley fault, Taiwan from InSAR measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 33(6), pp.L06312.
- Hsu, Y. J., S. B. Yu, M. Simons, L. C. Kuo, and H. Y. Chen, 2009, Intraseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, 479(1), pp.4-18.
- Huang, W. J., K. M. Johnson, J. I. Fukuda, and S. B. Yu, 2010, Insights into active tectonics of eastern Taiwan from analyses of geodetic and geologic data, *J. Geophys. Res.*, 115(B3), pp.B03413.
- Kreemer, C., W. E. Holt, and A. J. Haines, 2003, An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation, *Geophys. J. Int.*, 154(1), pp.8-34.
- Kuo Chen, H., Y. M. Vu, C. H. Chang, J. C. Hu, and W. S. Chen, 2004, Relocation of eastern Taiwan earthquakes and tectonic implications, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 15(4), pp.647-666.
- Lee, S. J., H. H. Huang, J. B. H. Shyu, T. Y. Yeh, and T. C. Lin, 2014, Numerical earthquake model of the 31 October 2013 Ruisui, Taiwan, earthquake: Source rupture process and seismic wave propagation, *Journal of Asian Earth Sciences (J. Asian Earth Sci.)*, 96, pp.374-385.
- Nikolaidis, R., 2002, *Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System*, Ph.D. dissertation, Department of Earth Sciences, University of California: San Diego.
- Peyret, M., S. Dominguez, R. Cattin, J. Champenois, M. Leroy, and A. Zajac, 2011, Present-day interseismic surface deformation along the Longitudinal Valley, eastern Taiwan, from a PS-InSAR analysis of the ERS satellite archives, *J. Geophys. Res.*, 116(B3), pp.B03402.
- Shyu, J. B. H., K. Sieh, Y. G. Chen, and C. S. Liu, 2005, Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 110(B8), pp. B08402.
- Shyu, J. B. H., K. Sieh, Y.-G. Chen, and L.-H. Chung, 2006, Geomorphic analysis of the Central Range fault, the second major active structure of the Longitudinal Valley suture, eastern Taiwan, *Geological Society of America Bulletin (Geol. Soc. Am. Bull.)*, 118(11-12), pp.1447-1462
- Walters, R. J., B. Parsons, and T. J. Wright, 2014, Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of Eastern Anatolia, *J. Geophys. Res.*, 119(6), pp.5215-5234.

- Wang, H. and T. J. Wright, 2012, Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet, *Geophys. Res. Lett.*, 39(7), pp. L07303.
- Ward, S. N., 1998, On the consistency of earthquake moment rates, geological fault data, and space geodetic strain: the United States, *Geophys. J. Int.*, 134(1), pp.172-186.
- Wu, F. T., C. S. Chang, and Y. M. Wu, 2004, Precisely relocated hypocenters, focal mechanisms and active orogeny in central Taiwan, in J. Malpas eds., *Aspects of the Tectonic Evolution of China*, London: Process in Geological Society, Special Publications 226, pp.333-353.
- Wu, F. T., W.-T. Liang, J.-C. Lee, H. Benz, and A. Villasenor, 2009, A model for the termination of the Ryukyu subduction zone against Taiwan: A junction of collision, subduction/separation, and subduction boundaries, *J. Geophys. Res.*, 114(B7), pp. B07404.
- Wu, F. T., H. Kuo-Chen, and K.D. McIntosh, 2014, Subsurface imaging, TAIGER experiments and tectonic models of Taiwan, *J. Asian Earth Sci.*, 90, pp.173-208.
- Yen, J. Y., C. H. Lu, C. P. Chang, A. J. Hooper, Y. H. Chang, W. T. Liang, T. Y. Chang, M. S. Lin, and K. S. Chen, 2011, Investigating Active Deformation in the Northern Longitudinal Valley and City of Hualien in Eastern Taiwan Using Persistent Scatterer and Small-Baseline SAR Interferometry, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 22(3), pp. 291-304.
- Yu, S. B., and L. C. Kuo, 2001, Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333(1), pp.199-217.

以螞蟻演算法解決同時收送的物流路徑規劃問題

呂學展^{1*} 楊雅雯²

論文收件日期：105.04.17

論文修改日期：105.05.18

論文接受日期：105.05.22

摘 要

近年來，由於網路技術的進步與行動裝置的普及，人們可以隨時隨地的透過網路商店瀏覽與購買商品，同時，網路商店帶來的便利性造成了人們購物習慣的改變。這種購物習慣產生了大量的貨物需要藉由物流業者配送至人們手上，進而帶動了物流產業的發展，與物流相關的研究議題越來越受到重視。其中物流路徑規劃問題是相關議題中的重點之一，雖然過去的研究已經探討許多經典的路徑規劃問題，但卻沒有考慮到物流路徑規劃中的實際限制，使得這些長期探討的問題卻又無法直接應用到現實的物流路徑規劃問題中。為了將研究更貼近生活，規劃中需要考慮車子容量、來自客戶的各種需求、與現實中的道路情形等。在此篇研究中，我們基於螞蟻演算法，提出改良式物流路徑規畫方案，套用在更貼近現實的同時考慮收送之物流規劃問題中，以減少貨車總行駛成本。接著比對以貨物之間距離為導向的規劃，和以平均貨車行駛距離為導向的規劃，哪一種螞蟻演算法概念較為合適。為了提出完整的實驗評估，我們從嘉里大榮貨運取得真實物流資料，先針對這兩種概念進行參數調整，接著根據此實驗結果，進行探索機率的參數調整，調整完畢後進行測試，比較這兩種方法之間是否會因為貨物數量的多寡和貨車容量的大小而有所不同，實驗結果顯示，我們所提出的改良式螞蟻演算法解決方案，確實能夠降低物流中的總行駛成本。

關鍵字：物流、空間定位服務、資料探勘、路徑規劃

¹ 助理教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

² 碩士，國立成功大學測量及空間資訊學系。

* 通訊作者，TEL: (06)2757575#63830，E-mail:luhc@mail.ncku.edu.tw。

Ant Colony Optimization Solutions for Logistic Route Planning with Pick-up and Delivery

Eric Hsueh-Chan Lu^{1*} Ya-Wen Yang²

Abstract

Recently, with the development of wireless communication and popularity of mobile smart devices, there are something different in our life. People normally buy things online, because it is very convenient to buy anything anytime anywhere. The change of consuming behaviors produce raising economic profit and there are a lot of products need to be transported by logistic companies. Meanwhile, the researches on logistics have attracted attention. Among these researches, one popular topic is logistic route planning. Although researchers have studied this issue for a long term, considering the limitation of logistic in reality, this solution cannot directly solve real problem. In reality, we need to consider capacity of vehicle, requests from customers, etc. In this paper, we want to know classical Ant Colony Optimization (ACO) is it can efficiently improve routing result. To compare with it, we use a concept of modified ACO in VRP. We use this concept and apply it to logistic problem. After experiment, we find that modified concept is not suitable in logistic routing problem.

Key words: Data Mining, Location-Based Service, Logistic, Route Planning

¹ Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

² Master Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

* Corresponding Author, TEL: +886-6-275-7575#63830, E-mail: luhc@mail.ncku.edu.tw.

一、前言

近年來，網路商店的興盛造成人們消費習慣的改變，同時帶動了物流業的成長，無時無刻在全台各地都有大量的貨物被配送至指定的顧客手上。台灣超商龍頭統一超商，在把資金投入統一速達黑貓宅急便後，業績便連年成長，如圖 1 所示，且近五年皆維持兩位數的營收成長比例。台灣中華郵政的營收顯示，物流業務的營收已經超過了傳統郵務服務的營收。以上數據顯示物流已經是未來的發展趨勢。因此，物流相關的研究也獲得業界和學術界大量的關注，對消費者來講，網路購物的消費習慣是建立在物流系統所帶來的便利性，從數據可以得知，利用網路購物的人們是逐年增加，這代表物流業者需要維持配送的品質，才能應付配送需求量的增加。對於物流業者來講，如何維持配送品質並保持低成本的配送目標是業者關注的重點，而配送品質就代表必須滿足顧客的需求。對應以上現實所需要面對的問題，研究上稱為物流路徑規劃問題。

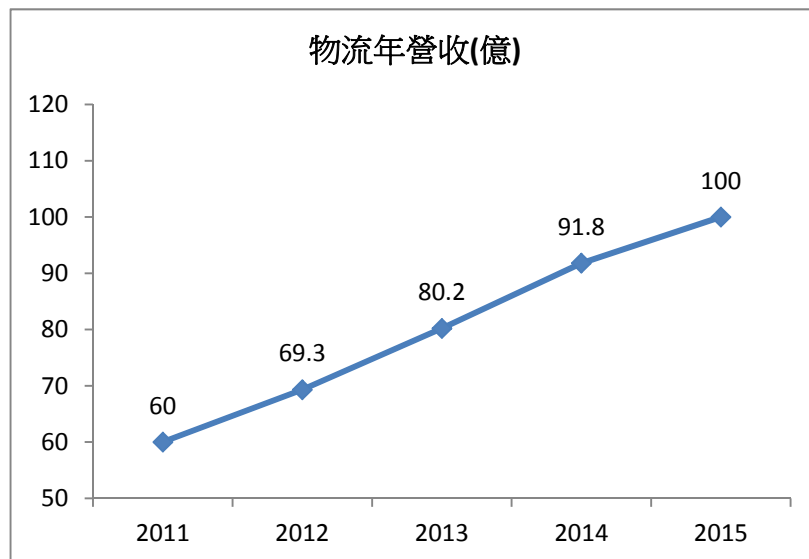


圖1 統一速達黑貓宅急便年營收 (參考網址：
<http://www.appledaily.com.tw/appledaily/article/finance/20150429/36519727/>、
<http://www.chinatimes.com/newspapers/20160310000052-260202>)

物流路徑規劃問題最早源自於售貨員旅遊問題 (Traveling Salesman Problem, TSP)，TSP 是最基本的多目的路徑規劃問題，此問題要求以一趟路徑，拜訪完所有目的地後，返回起點的拜訪結果為最短路徑。但在物流議題中，需要配送的貨物數量往往超出貨車所能裝載的限制，造成無法以一趟完成所有顧客拜訪的需求，而 TSP 並沒有將貨車容量、貨物大小納入規劃限制裡，所以衍伸出另一個路徑規劃問題為車輛路徑規劃問題 (Vehicle Routing Problem, VRP)。相較於 TSP，VRP 更貼近物流業的需求，此問題的目標是在給定車輛空間限制的前提下，找到一個拜訪路徑集合，能達到所有路徑的總行駛距離最小。關於 VRP 求解的方法，分為精確演算法 (Exact Algorithm) 和啟發式演算法 (Heuristic Algorithm)，由於精確演算法無法處理貨物數量龐大的情形，所以研究上多採用啟發式演算法解 VRP，同時，啟發式演

算法也常使用進化演算法進行改良，像是模擬退火演算法（Simulated Annealing）、基因演算法（Genetic Algorithm）、以及螞蟻演算法（Ant Colony Optimization）等。

雖然 VRP 考慮到車輛空間限制，但卻只著重於如何配送貨物至顧客手中。對於現代生活忙碌的人們並不符合真實情況，物流業者除了要提供更便利的配送服務外，到府收件也是人們所需要的服務之一，因此產生了需要同時處理不同顧客需求的議題，稱之為考量收貨的車輛路徑規劃問題(Vehicle Routing Problem with Backhaul, VRPB)。VRPB 雖然考慮顧客會有不同的物流需求，但在這個問題中有一項限制，所有的收貨需求必須在所有的配送需求都完成拜訪之後才能進行。這一項限制降低了物流處理的難度，而目前物流業大多採用此類型的處理方式，將收送貨分開處理，並限制收送時段，但這樣子的規劃限制不只是降低了貨車空間的使用效率，也沒有以顧客的考量為優先，未來在收送需求增加的情況下，要能妥善利用時間以及貨車空間才是今後所應該關注的重點。

基於以上理由，我們採用了螞蟻演算法解決物流路徑規劃問題，提出一個能同時處理配送和寄件貨物的演算法，目標是讓總行駛距離越小越好。由於螞蟻演算法是使用追蹤費洛蒙的方式產生路徑，所以透過計算出初始解，可以產生路網上初始的費洛蒙。螞蟻演算法能透過多次迭代進而找到更好的解，但規劃路徑時若是螞蟻過度追蹤費洛蒙會導致陷入區域最佳解的困境，為了避免這個情況發生，另外有探索的方式可以增加解的多樣性。每一組解是由一條或多條路徑組成，能將所有的配送及寄件貨物規劃完畢。最後為了提升解的品質，在產生一組解後我們另外將規劃結果重新排序，嘗試組合出一個更好的路徑。根據來自大榮物流的半真實物流資料，經過實驗證明，我們基於螞蟻演算法所提出的演算法能產生品質優良的規劃路徑結果。

接下來在第二章中我們首先介紹有關於物流問題的相關文獻。第三章會詳加描述研究問題以及定義問題中數據的表示方法。在第四章中清楚解釋我們如何以我們所提出的演算法解決物流問題，首先以系統架構的方式了解方法流程，接著再逐項解釋演算法中應用到的公式概念。在第五章我們透過實驗調整演算法中需要的參數，另外在多種情況下，比較我們所提出的演算法以及典型的螞蟻演算法之間的差異。最後在第六章針對我們的研究做總結和未來計畫。

二、相關文獻

在這一章節中，我們將介紹路徑規劃的相關研究，這些研究依照先後發表的順序分為三種，分別為售貨員旅遊問題（Traveling Salesman Problem, TSP）、車輛路徑規劃問題（Vehicle Routing Problem, VRP）以及考量收貨的車輛路徑規劃問題（Vehicle Routing Problem with Backhaul, VRPB）。

（一）售貨員旅遊問題（Traveling Salesman Problem, TSP）

售貨員旅遊問題(Traveling Salesman Problem, TSP)是最基本的路徑規劃問題，該問題是在解決銷售員到各地拜訪客戶，如何在只拜訪一次客戶的限制下，拜訪完

所有客戶並返回起始位置，最小化拜訪順序所建構的銷售員總移動距離（Karl Menger, 1932）。TSP 已經被證實為 NP-hard 問題，此類型的問題在有限的時間內無法得出最佳解，所以許多研究使用迭代演算法解決 TSP。Greedy Sub Tour Mutation（GSTM）為迭代演算法的一種，此方法採用基因演算法去做改善，以最小化行駛距離為目標進行路徑規劃（Albayraka and Allahverdi, 2011）。Combinatorial Artificial Bee Colony（ABC）是基於 GSTM 的迭代演算法，在此演算法中 GSTM 被使用在搜尋鄰近點（Karaboga and Gorkemli, 2011）。然而在現實生活中，道路狀況通常都是非對稱的，所以考慮到上述情形可使用隨機演算法解決 Asymmetric TSP（ATSP）問題，當有 n 個客戶時時間複雜度為 $O(\log n / \log \log n)$ （Asadpour et al., 2010）。為了更有效率地解決 ATSP 問題，透過結合迭代演算法、改良後的基因演算法和一些優化策略，能更進一步改善效率（Xing et al., 2008）。在 TSP 問題中藉由將顧客分割為多個群集，能在各個群集中找到滿足拜訪一次的條件的最短路徑，進而快速找到近似最佳解（Lysgaard, 2015）。可惜，TSP 卻無法直接應用在物流規劃問題中，主要的原因是 TSP 的限制中並未考慮到配送載具的容量限制，使得 TSP 問題所規劃出來的路徑，不一定能夠滿足實際的載具容量限制。

（二）車輛路徑規劃問題（Vehicle Routing Problem，VRP）

車輛路徑規劃問題（Vehicle Routing Problem，VRP）是排程問題中的一種類型，相較於 TSP 更類似物流路徑規劃問題。VRP 的目的是在車子容量限制下，希望找出一組能夠拜訪所有顧客的路徑集合。大部分的研究都採用多種迭代型演算法解決 VRP。在 Descent 方法中最佳的演算法有模擬退火法以及禁忌搜尋法（Osman, 1993）。基於現實應用的 VRP，能藉由改良基因演算法計算出最短路徑（Tunjongsirigul and Pongchairerks, 2010）。另外有更多的研究試圖設計出更有效率的方法，像是啟發式演算法和基於貪婪（Greedy）的演算策略，因為迭代演算法需要使用較長的時間才能找出適合的解，透過螞蟻演算法將 Semi-Greedy 的概念應用的狀態轉移規則中，能提升效率（Chen et al., 2012）。但考慮到現實物流中可能出現多倉庫的情形，藉由兩階段和一階段的方法能解決此問題，且經實驗證明一階段的演算法計算結果優於兩階段的方法（Lim and Wang, 2005）。模糊模擬搭配混和式基因演算法能有效率地解決 VRP 問題（Li-xia, 2009）。雖然 VRP 已經考慮物流問題中的載具容量限制，但卻只考慮單方向的配送貨物至顧客手中，在實際應用中，從顧客取件協助配送對於物流公司來講，也是必須提供的服務。因此，物流路徑規劃應用應該考量如何在物流路徑上，同時處理兩種不同類型的物流需求。

（三）考量收貨的車輛路徑規劃問題（Vehicle Routing Problem with Backhaul，VRPB）

考量收貨的車輛路徑規劃問題（Vehicle Routing Problem with Backhaul，VRPB）延伸自 VRP 問題，同時更進一步考慮有寄件需求的顧客。在給定一個集貨中心、多台有負載限制的車輛以及一組已知需求的顧客集合，VRPB 是將各台車輛規劃成

先配送後取件的運送順序。在 VRPB 問題中能透過 Space Filling Curve Heuristics 推導出初始解 (Geotschalckx and Blecha, 1989)。再使用一個三階段的方法, 就能更有效率地解決有車輛容量限制的物流問題 (Min et al., 1992)。為了簡化 VRPB 問題, 接著產生了一種方法 VRP with Clustered Backhauls (VRPCB), 在這個問題中將取件需求的顧客做群集, 限制所有取件需求必須在所有貨物配送完成後才能進行, 藉由使用 Multi-Start 的方法來平行計算, 能避免最終找到的解落入區域極值 (Belloso et al., 2015)。為了減緩群集顧客造成的限制, Split VRPCB (SVRPCB) 對 VRPCB 進行部分切割, 透過整數線性方程和 Adaptive Guidance 的複合型啟發式方法解決 SVRPCB (Battarra et al., 2015)。延伸 VRPCB, 將三維的裝載容量問題整合進路徑規劃中, 形成了一個不一樣的議題 VRPCB with 3D Loading Constraints (3L-VRPCB) (Bortfeldt et al., 2015)。但是大多研究都不允許在配送完成之前收件, 這種情況我們稱作 First-Delivery-Last-Pick-up (FDLP)。我們認為如果在配送過程中, 同一地點若同時有寄件需求時應該同時處理, 總行駛距離應該會減少。因此, 一個好的物流規劃系統應該將同時配送且收件的需求合併, 有利於改善整體規劃效率。

三、問題描述

為了清楚解釋我們的研究目標, 我們先定義在研究中會用到的符號, 以及在這個問題中會用到的定義。表 1 中彙整了此研究中所使用的符號。

表1 符號定義

符號	描述
g, G	貨物、貨物集合
w	倉庫
s, d, vol	起點座標、終點座標、貨物大小
G_L	物流路網圖
$v, cap(v)$	貨車、貨車容量
ED, δ	尤拉距離、行駛距離
φ	規劃路徑

定義 1. 貨物 (Goods):

每一個貨物 g 有一個起點座標 $s(g)$ 、目的地座標 $d(g)$ 、和體積大小 $vol(g)$ 。從起終點座標可以得知該顧客需求, 貨物起點座標為倉庫的貨物, 代表需要被配送至顧客手上, 若起點座標為顧客的貨物, 代表顧客要交寄物品。一個貨物的大小可以是重量、形狀等等。需要配送的貨物以 $G^{del} = \{g^d_1, g^d_2, \dots, g^d_x\}$ 表示, x 為配送貨數量, 需要收貨的貨物以 $G^{pic} = \{g^p_1, g^p_2, \dots, g^p_y\}$ 表示, y 為需要收貨數量。

定義 2. 倉庫 (Warehouse):

倉庫 w 代表著配送中心, 也就是集中貨物的地方, 所有需配送的貨物皆從倉庫出發, 收件完的貨物必收回倉庫做集中。倉庫的位置為一組經緯度座標。

定義 3. 物流路網圖 (Logistic Graph) :

$G_L = (V, E)$, V, E 代表路網圖中的節點集合 (Vertices) 和邊集合 (Edges), V 是由倉庫座標和配送貨物終點和收貨起點組成, $V = \{ w, d(g^{del}_1), \dots, d(g^{del}_x), s(g^{pic}_1), \dots, s(g^{pic}_y) \}$, x 代表配送貨數量, y 代表收貨數量。 E 由任兩個節點形成, 每一條邊皆以尤拉距離來表示距離。

定義 4. 車輛 (Vehicle) :

車輛 v 為運送貨物的裝置, 車輛有各自的負載限制 $cap(v)$ 。車輛上所裝載的貨物總重為 G , G 需要滿足此限制如公式 (1)。

$$\sum_{g \in G} vol(g) \leq cap(v) \quad (1)$$

定義 5. 物流路徑 (Logistic Route) :

路徑為規劃結果, 每台車輛 v 有一條路徑 $\varphi = \langle w, g_1, g_2, \dots, g_m, w \rangle$, 此路徑代表從倉庫出發, 返回倉庫, 中間是配送 (收) 貨物的順序。規劃結果起終點必為倉庫 w , 不可產生起終點並非倉庫 w 的路徑, 例如: $\varphi = \langle g_1, w, g_2, w \rangle$ 。

定義 6. 合法路徑 (Valid Route) :

由於有車容量限制, 所以當產生一條路徑時, 必須確保此路徑為合法的, 合法的條件有以下兩點: (1) 行駛路徑各個節點上的貨物總重不可超出車容量限制; (2) 所有車輛必須從倉庫出發, 最終返回倉庫。

定義 7. 行駛成本 (Routing Cost) :

有一條路徑 $\varphi = \langle w, g_1, g_2, \dots, g_m, w \rangle$, 則此路徑的成本 $\delta(\varphi)$ 為將各段行駛路徑作加總, 如公式 (2), 其中 $ED(p, q)$ 代表 p, q 之間的尤拉距離。如圖 2 所示, 當路徑為 $\langle w, g_3, g_6, w \rangle$ 時, 此路徑成本為 $30 + 20 + 44 = 95$ 。

$$\delta(\varphi) = ED(w, g_1) + \sum_{i=1}^{m-1} ED(g_i, g_{i+1}) + ED(g_m, w) \quad (2)$$

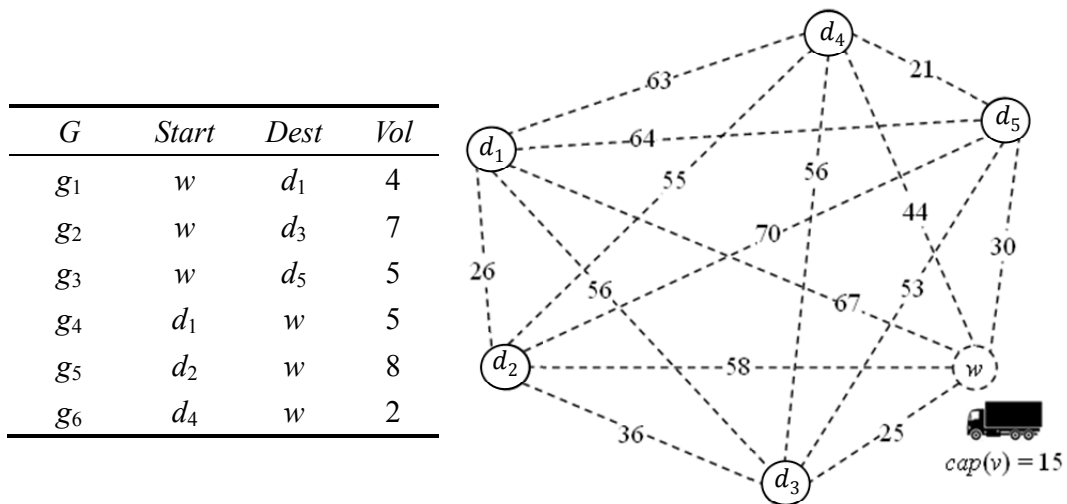


圖 2 舉例說明

根據以上定義，我們基於物流路網圖 G_L 、配送貨集合 G^{del} 、收貨集合 G^{pic} 以及車輛 v 做路徑規劃，我們的研究將規劃出一條或多條可行的路徑 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ ，能滿足所有貨物 $g \in (G^{del} \cup G^{pic})$ 都規劃完畢，目標是盡可能的降低規劃出來的總路徑成本 $\sum_{1 \leq i \leq m} \delta(\varphi_i)$ ，此研究中的成本為總行駛路徑長。以圖 2 為例，不同規劃結果會有不同路徑成本，若車輛 v 首先在倉庫 w 裝貨物 g_1 和 g_3 ，出發時先前往 d_5 配送 g_3 ，接著前往 d_1 同時配送 g_1 和收貨 g_4 ，再到 d_2 收貨 g_5 ，最後返回倉庫 w 。此條路徑 $\varphi_1 = \langle w, g_3, g_1, g_4, g_5, w \rangle$ 成本為 $30 + 64 + 0 + 26 + 58 = 178$ 。完成這條路徑後，剩下了配送貨 g_2 和收貨 g_6 ，接著第二趟路徑車輛 v 在倉庫 w 裝貨物 g_2 ，出發時先前往 d_3 配送 g_2 ，接著前往 d_4 收貨 g_6 ，最後返回倉庫 w 。此條路徑 $\varphi_2 = \langle w, g_2, g_6, w \rangle$ 成本為 $25 + 56 + 44 = 125$ 。所有貨物處理完後總耗費成本為 $178 + 125 = 303$ 。另外一組規劃路徑解為 $\varphi_1 = \langle w, g_2, g_6, g_1, g_4, w \rangle$ 、 $\varphi_2 = \langle w, g_3, g_5, w \rangle$ ，但此組解總成本為 369，相較於第一組解成本較高。

四、方 法

在本章節中，我們將介紹所提出的物流路徑規劃方法。由於物流路徑規劃問題是一個 NP-Hard 的問題，如何在可接受的時間內，找出近似最佳路徑解就成為本研究的首要目標。在進化迭代為概念的演算法類型中，螞蟻演算法（Ant Colony Optimization, ACO）是經常被使用在 NP-Hard 問題中的一種經典演算法，基於費洛蒙的正向回饋和探索策略，能快速地發現良好的解決方案以及避免過早收斂造成陷入區域解（Dorigo, 1996），其靈感來自螞蟻覓食中發現路徑的行為，在找尋食物的過程中，螞蟻會透過分泌費洛蒙來記錄行走路徑，較晚出發的螞蟻則會追隨先前留存於路徑上的費洛蒙。在發現食物時，因為費洛蒙會逐漸蒸發，所以螞蟻行走的路徑會逐漸固定下來，最後形成一條通往食物的最短路徑。ACO 流程圖如圖 3 基本螞蟻演算法所示，為了讓較晚出發的螞蟻有費洛蒙可以追隨，一開始需要產生初始解作為初始費洛蒙，接著在規劃階段中有"追隨（Exploitation）"和"探索（Exploration）"兩種策略作規劃，這兩種策略影響了走訪的規劃順序，策略的細節會在接下來的第三小節指派階段中作描述。一個完整的規劃階段能產生一組路徑解，為了效率上的考量，會重複規劃階段、產生多組路徑解，再從這些解與現有的最佳解中以最好的路徑解更新路網上的費洛蒙殘留量。重覆以上規劃、比較、更新的流程直到規劃結束，最後將最佳解輸出。

在以最小化總行駛距離為目標的物流問題中，ACO 能以距離作為依據規劃螞蟻行經路徑，因此螞蟻演算法適合於解決物流路徑規劃問題。在過去的研究中，雖然已經有基於 ACO 的 VRP 方法與應用，但是此研究只針對單純配送貨物的物流路徑規劃問題，由於現代人的生活繁忙，除了網路購物所產生的配送需求之外，到府收件也是使用者需要的實用服務之一。因此基於 ACO，我們設計全新的演算法，應用於同時處理配送和收件需求的物流路徑規劃問題上，我們認為演算法必須考量以下幾個議題：（1）有別於單純配送的物流問題，同時考慮收送的物流路徑規劃，需要額外考慮取貨時，貨車是否有足夠空間裝載，否則將有可能產生不合法的物流路徑。

(2) 過去有 ACO 的研究中，使用車輛目前的總行駛距離，作為導引螞蟻走向的根據 (Chen et al., 2012)，卻忽略了路網的拓樸結構，本研究使用節點間的距離作為導引依據，跳脫區域極值的問題，提升物流路徑規劃品質。(3) 為了能快速改善規劃結果，在產生階段性的規劃結果後，加上一個新的階段，在這個階段中利用區域搜尋中的 NEH 重新排序的概念，加速規劃的效率，改良前後架構比較圖如圖 3。為了評估改良後的 ACO 是否適合物流問題，我們在 ACO 架構不變的情況下，使用不同的導引概念作比較。

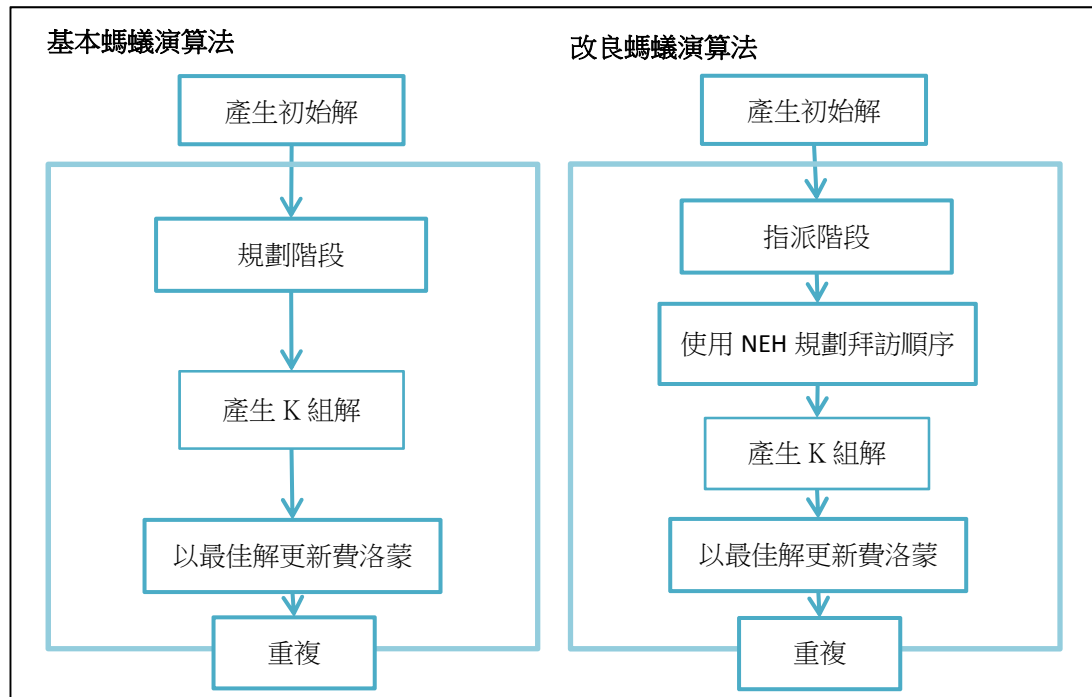


圖3 螞蟻演算法架構流程圖

(一) 系統架構

圖 4 為本研究之系統架構圖，物流環境包含一個物流路網圖 G_L 、需要配送或取件的貨物集合、以及具有負載限制的載運車輛。在 ACO 架構中，我們考慮到基於初始解越好，能夠越快找到近似解的原則，一開始先利用 GRASP 方法產生初始解，並且以初始解產生路網中的初始費洛蒙；接著以螞蟻演算法進行迭代式搜尋，迭代是指基於上一代找到的最佳解，尋找更好的解。每一代會產生 k 組解，每一組解在指派階段時，會根據路網圖上的費洛蒙和距離因素，將所有貨物指派給車輛，規劃出一組由多條路徑組成的解，接著利用 NEH 優化方法重新排列物流路徑，每一代的最後將目前的最佳解組合更新路網圖上的費洛蒙。因為每一代是根據路網圖上的費洛蒙做規劃，所以上一代結束後所更新的費洛蒙將會影響下一代的搜尋。在經過多代的進化迭代後，路網圖上的費洛蒙將會穩定，穩定後較能產生品質好的規劃結果，最後在完成使用者所指定的迭代次數後，便能夠產生一組行駛距離最短的物流路徑。

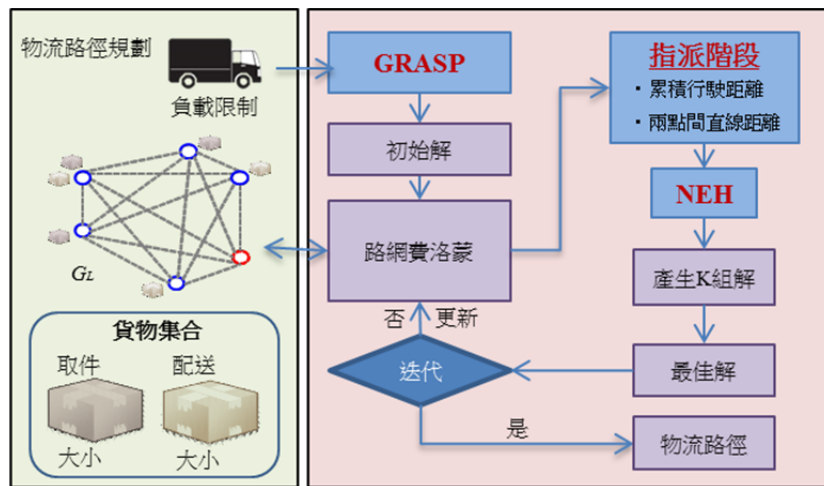
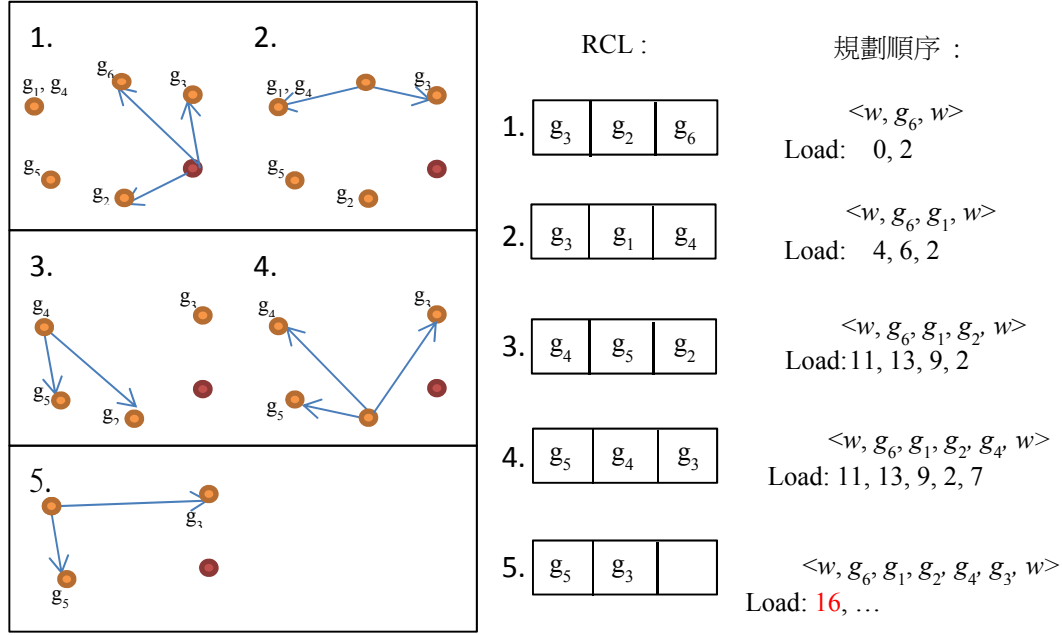


圖4 系統架構

(二) 初始解 GRASP

在螞蟻演算法的迭代過程中，是以物流路網圖上的費洛蒙將作為接下來規劃的依據，而初始費洛蒙的好壞將會影響接下來的規劃路徑品質與演算效率，因此在演算法的一開始，我們採用 Greedy Randomizes Adaptive Search Procedure (GRASP) 產生一條或多條物流路徑組成的一組規劃結果，此初始規劃結果被稱為初始解，並以此規劃結果初始化路網圖上的費洛蒙分布。GRASP 是結合了貪婪和隨機的概念，從倉庫開始，將前 k 個距離最近且尚未加入規劃的收送貨物位放入 Restricted Candidate List (RCL) 序列中作為候選規劃點，接著從 RCL 中隨機挑選一個貨物，加入路徑中，經由反覆挑選最後規劃出拜訪順序。特別一提的是搜尋過程中，GRASP 必須檢查產生出來的物流路徑是否符合車輛容量限制，避免產生不合法的路徑。GRASP 流程如圖 5 所示，假設 RCL 大小為 3，我們利用圖 2 所獲得的資訊進行規劃，1 號圖中離倉庫最近的 3 個點為 g_2, g_3, g_6 ，將這三件貨物加入 RCL 中，接著隨機取出一點 g_6 加入規劃中，產生一條路徑 $\langle w, g_6, w \rangle$ ，在產生一條路徑時必須檢查此條路徑是否合法，這條路徑中 g_6 為需要取件的貨物，所以在 w 時車子的負重 (Load) 為 0，接著前往 g_6 取件，完成取件後 Load 為 2。檢查車子負重時，需要從起點檢查到終點前一點中，各點處理完貨物後總重是否會超出車輛負載限制，如公式 (1) 所示。在 2 號圖中，離 g_6 最近的貨物為 g_1, g_3, g_4 ，加入 RCL 後隨機取出 g_1 加入規劃中，產生 $\langle w, g_6, g_1, w \rangle$ ，經過檢查，路徑上各點的車子載重為 4, 6, 2，都沒有超出負載限制，所以此路徑為合法路徑。在移動到 g_1 後，在 3 號圖中，離 g_1 最近的貨物為 g_2, g_4, g_5 ，加入 RCL 後隨機從中取出 g_2 加入規劃中，產生 $\langle w, g_6, g_1, g_2, w \rangle$ ，經過檢查，路徑上各點車子載重為 11, 13, 9, 2，在沒有超過負載限制下為合法路徑。在 4 號圖中，離目前所在的 g_2 最近的三件貨為 g_3, g_4, g_5 ，加入 RCL 後隨機從中取出 g_4 加入規劃，產生 $\langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$ ，檢查後各點車子載重為 11, 13, 9, 2, 7，此路徑為合法路徑。接著移動到 g_4 ，在 5 號圖中，離 g_4 最近的貨物為 g_3, g_5 ，加入 RCL 後隨機從中取出 g_3 加入規劃，產生路徑 $\langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, g_3, w \rangle$ ，但在檢查各點的車子載重時，發現在起點出發時的總載重為 $4 + 7 + 5 = 16$ ，若將 g_3 加入規

劃，則在起點時就會超出車子的負載限制。當找到不合法的路徑時，就由上一階段找到的合法路徑作為第一條路徑，則第一條路徑 $\varphi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$ 。在圖 5 中我們可以知道目前剩下 g_3, g_5 尚未被規劃，接著重複整個流程後我們會再得到第二條路徑 $\varphi_2 = \langle w, g_5, g_3, w \rangle$ 。最終 GRASP 產生一組由 $\varphi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle, \varphi_2 = \langle w, g_5, g_3, w \rangle$ 組成的初始解。由於螞蟻演算法的每次迭代，皆會利用新的解更新路網費洛蒙，因此我們將初始解如何更新網路費洛蒙留到後面章節一起說明。



$$\varphi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$$

圖 5 GRASP 流程

(三) 指派階段

物流路網圖中，任兩點之間的費洛蒙多寡將會影響指派的結果，當有兩件貨物在規劃過程中常被規劃為相鄰的順序時，代表這兩件貨物相鄰時，能組合出行駛距離較短的物流路徑，而這兩點間的費洛蒙也會越來越多，更加容易形成路徑中固定的組合，指派階段將會根據路網圖上的費洛蒙，找出較好的相鄰順序組成的一條或多條路徑。在此階段中，有兩種策略來決定哪一件貨物將被指派給哪一台車，透過"追隨 (Exploitation)"和"探索 (Exploration)"兩種機制來決定指派結果，接著計算出剩餘貨物 g_{next} 與當前貨物 g_{curr} 之間的費洛蒙 $pher$ 除以距離 μ 所得到的值，來決定指派結果。

1. 追隨：

在此策略中，會找出現行路網圖中費洛蒙乘以距離 μ 的最佳組合如公式 (3)，最佳代表此組合是經常被挑選到，所以累積的費洛蒙多，或是 μ 較大也容易為最佳組合，但追隨過去較佳的路徑，有容易陷入區域極值的問題。第 k 台車根據路網圖，計算 v_k 與各個尚未處理的貨物 g_{next} 的費洛蒙值乘以 μ ，找出值最大的 k 與 g_{next} ，將

g_{next} 指派給第 k 台車做規劃。我們考慮了兩種不同距離的螞蟻演算法，分別為 ACO_{TRD} 和 ACO_{ED} ，前者為車輛總行駛距離取倒數 μ_{TRD} 如公式 (4)，後者為兩貨物之間的尤拉距離取倒數 μ_{ED} 如公式 (5)， μ_{TRD} 試圖以平均車輛間的貨物負載來平衡各趟的行駛距離， μ_{ED} 則是傾向規劃較近的貨物以減少行駛距離。

$$(k, n) = \max[pher(v_k, g_{next})^\alpha * \mu(k, n)^\beta] \quad (3)$$

$$\mu_{TRD}(k, n) = \frac{1}{V_{duration}} \quad (4)$$

$$\mu_{ED}(k, n) = \frac{1}{ED(v_k, g_{next})} \quad (5)$$

2.探索：

探索是為了發掘不同的規劃組合，透過機率的算法讓不同的組合也有機會被挑選，規劃時要遵照費洛蒙以及 μ 所佔的數量如公式 (6)，若是使用隨機挑選的方式，會造成沒有目標的搜索，形成沒有效率的規劃。依照計算 v_k 與剩餘貨物 g_{next} 在路網圖上的費洛蒙乘上 μ 的各種組合，各自在所有情況中佔的比例多寡，決定此組合被探索到的機率， v_k 與 g_{next} 之間的費洛蒙越多以及 μ 越大，此組合也越容易被探索，此策略有機會探索出不同指派結果，其中 $pher$ 為兩貨物之間道路上的費洛蒙， α 為費洛蒙的影響力係數， β 為 μ 的影響力係數。

$$p_{g_{next}}^k = \frac{pher(v_k, g_{next})^\alpha * \mu(k, n)^\beta}{\sum_{k \in V} (pher(v_k, g_{next})^\alpha * \mu(k, n)^\beta)} \quad (6)$$

(四) NEH

由於螞蟻演算法是根據費洛蒙與距離規劃路徑，當目前規劃出來的解較差時，會造成費洛蒙累積在錯誤的路段上，如此一來會持續規劃出較差的解。NEH (Nawaz, Ensore, Ham) 是一種在排序問題中經常被使用且有效率的啟發式演算法 (Nawaz *et al.*, 1983)。NEH 可以將規劃結果重新排列組合，找到較好的解，將費洛蒙添加在較好的組合上，藉由改變路網圖上的費洛蒙累積情況進而改善規劃結果。NEH 方法如下：

- 1.取出指派完成的前兩件貨物，在合理情況下完成最小化行駛距離的排列順序。
- 2.接著取出下一件貨品並加入排序，找出較短行駛距離。
- 3.重複步驟 2.，直到所有的貨品排列完成。

在圖 6 中，我們使用圖 5 中的 $\phi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$ 假設為指派階段中產生的其中一條路徑，講解 NEH 的流程，步驟 1 在 a.圖中，首先將 g_6, g_1 取出，經過排列組成新的路徑，分別為 $\phi_a = \langle w, g_6, g_1, w \rangle$ 和 $\phi_b = \langle w, g_1, g_6, w \rangle$ ，由於兩條路徑在各點的車輛負重都沒有超出車輛限制，所以都為合法路徑，且 ϕ_a, ϕ_b 的行駛距離相

同，所以我們選擇第一種組合 φ_a 作為路徑。接著進行步驟 2，在 b.圖中將下一件貨物 g_2 取出，加入步驟 1 找出的路徑 $\langle w, g_6, g_1, w \rangle$ 中，經由排序，找出 $\varphi_a = \langle w, g_2, g_6, g_1, w \rangle$, $\varphi_b = \langle w, g_6, g_2, g_1, w \rangle$, $\varphi_c = \langle w, g_6, g_1, g_2, w \rangle$ 三種組合，在 $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ 都合法的情況下，選擇行駛距離最短的 φ_c 作為路徑。反覆進行步驟 2，在 c.圖中取出下一件貨物 g_4 ，加入上一步驟找出的路徑 $\langle w, g_6, g_1, g_2, w \rangle$ 做排序，經過排序，找出 $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c, \varphi_d$ 四種組合，但經過檢查， φ_a, φ_b 在行駛到 g_4 的時候，會因為 g_1, g_2 尚未配送完成，導致 g_4 在收上車時，因為空間不足而超出車輛負載限制，形成不合法的路徑，所以只能從合法的 φ_c, φ_d 中選擇行駛距離較短的 φ_c 作為路徑。在所有貨物皆重新排序後，將 φ_1 更新為 $\langle w, g_6, g_1, g_4, g_2, w \rangle$ 結束 NEH。相較於指派階段產生的路徑 $\langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$ 行駛距離為 $44 + 63 + 64 + 64 + 67 = 302$ ，經過 NEH 重新排序後的行駛距離只剩下 188，大幅降低了成本。

a. 步驟 1 $\varphi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$ $\varphi_a = \langle w, g_6, g_1, w \rangle \quad 44+63+67=\underline{174} \quad \varphi_b = \langle w, g_1, g_6, w \rangle \quad 67+63+44=174$ Load: 4, 6, 2 Load: 4, 0, 2 $\varphi = \langle w, g_6, g_1, w \rangle$	
b. 步驟 2 $\varphi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$ $\varphi_a = \langle w, g_2, g_6, g_1, w \rangle \quad 25+56+63+67=221 \quad \varphi_b = \langle w, g_6, g_2, g_1, w \rangle \quad 44+56+56+67=223$ Load: 11, 4, 6, 2 Load: 11, 13, 6, 2 $\varphi_c = \langle w, g_6, g_1, g_2, w \rangle \quad 44+63+56+25=\underline{188}$ Load: 11, 13, 9, 2 $\varphi = \langle w, g_6, g_1, g_2, w \rangle$	
c. 步驟 2 $\varphi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle$ $\varphi_a = \langle w, g_4, g_6, g_1, g_2, w \rangle \quad X \quad \varphi_b = \langle w, g_6, g_4, g_1, g_2, w \rangle \quad X$ Load: 11, 16 Load: 11, 13, 18 $\varphi_c = \langle w, g_6, g_1, g_4, g_2, w \rangle \quad 44+63+0+56+25=\underline{188}$ Load: 11, 13, 9, 14, 7 $\varphi_d = \langle w, g_6, g_1, g_2, g_4, w \rangle \quad 44+63+64+64+67=302$ Load: 11, 13, 9, 2, 7 $\varphi_1 = \langle w, g_6, g_1, g_4, g_2, w \rangle$	

圖6 NEH 舉例說明

(五) 費洛蒙更新

在使用 GRASP 產生初始解以及每回合中產生解後，都會以目前找到的最佳解更新費洛蒙，計算路網上的各個路段上需要蒸發以及添加多少的費洛蒙，當此路段為最佳解中的組合時，會添加新的費洛蒙到此路段上，添加的量為此組路徑的總距離倒數。當總路徑距離越長，添加的費洛蒙就越少，不好的解留在路網圖上的費洛

蒙較少，隨著時間過去，會慢慢蒸發掉，在逐漸蒸發過程中也不容易引導產生較差的解。費洛蒙更新如公式（7），路網圖上各路段 g_i 到 g_j 間所有的費洛蒙在回合結束後，乘上 $(1 - \rho)$ 後剩下部分費洛蒙，剩餘的費洛蒙會再添加新的費洛蒙，添加的數量如公式（8），當 g_i, g_j 為此組解中相鄰的組合時，在 g_i 到 g_j 路段上添加此組解的總行駛距離倒數，反之為 0。其中 ρ 代表費洛蒙的蒸發係數，預設值為 0.1， $v_{duration}$ 代表此組解的總行駛距離。

$$pher_k(g_i, g_j) = (1 - \rho) * pher(g_i, g_j) + \sum_{k=1}^m \Delta pher_k(g_i, g_j) \quad (7)$$

$$\Delta pher_k(g_i, g_j) = \begin{cases} 1/v_{duration}, & \text{if } g_i, g_j \text{ in the tour done by vehicle } k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

五、實驗結果

在這一段中，我們將比較兩種以不同距離作為規劃條件的螞蟻演算法。演算法執行以及數據處理的部分皆是在 Eclipse 平台上自行開發，數據是使用現實物流配送的資料，以及部分模擬收貨的資訊。所有的實驗在 Win7 系統環境中計算 CPU 為 Intel i5 3.3GHz、記憶體為 8G、java JDK 版本 1.8。

（一）實驗設定

我們獲取大榮物流某日位於苗栗的配送資訊，當日共有 1192 筆記錄，每一筆記錄代表了一件貨物訂單，訂單中包括貨物 id、顧客姓名、顧客地址。所有地址我們透過 Google API 轉換成一組經緯度。然而，由於目前物流規劃以配送為主，這些數據中並沒有紀錄收貨的資訊，也沒有記錄貨物的大小以及貨車的負載限制。因此，我們使用一個物流模擬模型，利用已知的現實數據產生寄件資訊。表 2 是在這個物流模擬模型中主要的參數設定， n_G 為當日需要處理的貨物數量， r_D 代表這些貨物的配送貨物和寄件貨物比例。在這個物流模擬模型中，當日要處理 $n_G * r_D$ 件配送貨物（預設為 $150 * 0.7 = 105$ ）和 $n_G * (1 - r_D)$ 件寄件貨物，配送貨物會從大榮物流中的資料中隨機挑選，而寄件貨物的顧客位置會在配送的範圍內隨機產生。每一件貨物的大小 v_{avg} 預設為 5，車輛負載限制 cap 設為 250。在螞蟻演算法中，預設每一回合有 20 隻螞蟻、 α 和 β 為 1.0。為了評估物流規劃路徑的品質，在各項實驗中，我們以車輛的總行駛距離作為評估的標準。

表2 模擬物流資訊

參數	描述	預設值
n_G	貨物總數	150
r_D	收送比例	3:7
v_{avg}	平均貨物重	5
cap	車容量限制	250

(二) 不同距離需要的影響係數

β 是用來控制距離影響力的係數，在這個研究中螞蟻演算法有兩種，第一種 ACO_{TRD} 是根據車輛目前的行駛距離做搜尋（公式 4），另一種 ACO_{ED} 是根據兩貨物之間的距離做搜尋（公式 5），由於距離公式不同，所以我們認為規劃時，要把會影響到指派方法（公式 3）的影響係數 β ，在使用不同距離公式時做調整。如圖 7 所示， ACO_{ED} 找出來解相比 ACO_{TRD} 較好。當 β 增加時， ACO_{TRD} 所找出來的解會越來越差。從圖上我們可以知道，強調行駛距離對於規劃路徑並沒有幫助，隨著影響係數變大，反而解的品質越差。不強調或過分強調兩貨物之間的距離也會造成規劃品質下降，而在 $\beta = 2.5$ 時 ACO_{ED} 能找到品質較好的解，因此將接下來實驗中的 β 參數調整為 2.5。

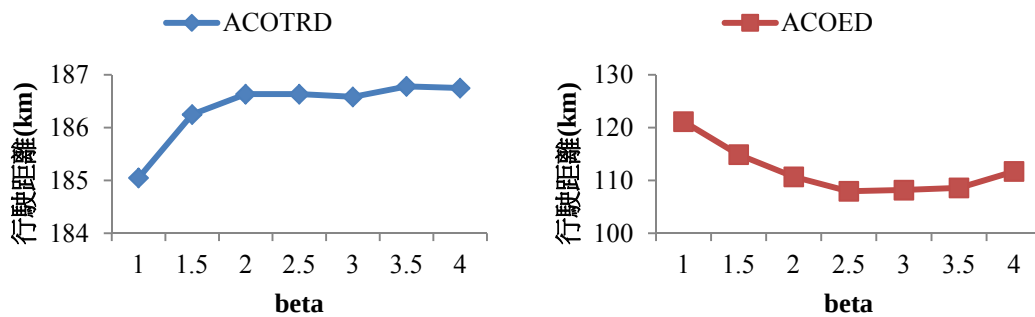


圖7 實驗（一）

(三) 探索機率

在這一個實驗中，我們要分析在不同探索機率時，兩種方法的規劃品質。從前一項實驗可以得知，兩種方法在 β 實驗中各自的最佳解相差約 60%，概念上我們知道探索機率的意義在於創造更多不同組合的可能性，所以當規劃結果不理想時，希望可以藉著調整探索機率，試著找到更好品質的解。從圖 8 可以觀察到， ACO_{TRD} 在探索機率為 0.65 到 1.0 中找到的解品質差不多。 ACO_{ED} 隨著探索機率的上升，解的品質卻逐漸下降。除此之外，探索機率的上升也造成執行時間的上升，因為過多的探索，需要耗費較多的時間計算挑選貨物的機率，而在探索機率為 0.05 時能找到較好的解，因此接下來的實驗中，探索機率設定為 0.05。

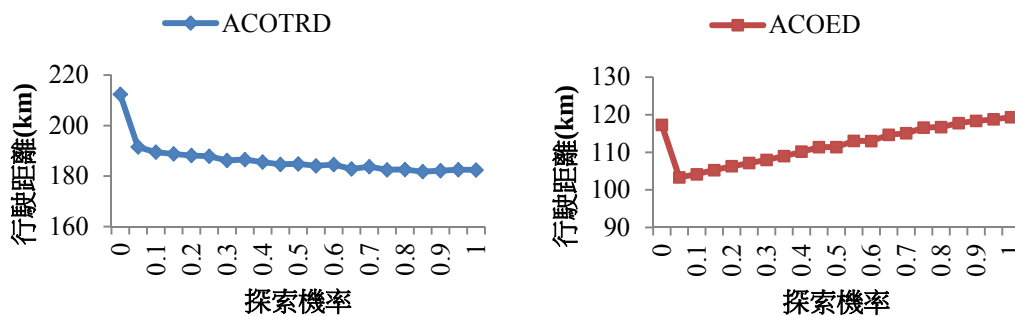


圖8 實驗（二）

(四) 貨物數量對規劃結果的影響

這一個實驗中，我們要觀察兩種方法在其他參數不變的情況下，當貨物數量從 150 漸增到 270 的時候，執行結果與執行速度上的變化，了解貨物數量是否會影響兩種方法之間的規劃結果。如圖 9 顯示，路徑與執行時間都會隨著貨物增加而上升。因為當貨物增加時，路徑長和路徑數量都會增加，所以總行駛距離會上升。雖然兩種方法的執行時間差不多，但當貨物數量越多時， ACO_{TRD} 的品質越差，相比貨物少時，效果相差一倍多，所以當貨物數量增多時，行駛距離對於規劃並沒有什麼幫助。

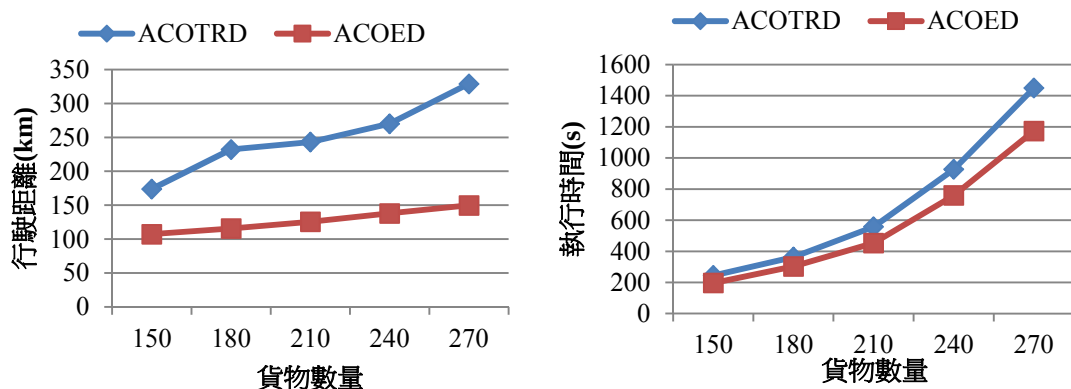


圖9 實驗 (三)

(五) 貨車容量對規劃結果的影響

這一個實驗中，我們改變車輛的容量限制，當貨車空間變大，代表單一趟次可以運送的貨物增加，透過 NEH 重新規劃順序後，較容易找到品質好的解，實驗測試車容量從 250 加大到 450。如圖 10 所示，當車容量上升時兩種方法的路徑總行駛距離都有下降，因為較大的負載空間可以在一條路徑中處理較多的貨物，路徑減少的情況下總行駛距離也會下降。雖然 ACO_{TRD} 在車輛負載變大時改善效果較明顯，但總體來看， ACO_{ED} 的規劃結果相較於 ACO_{TRD} 較好，平均改善 37.5% 的總行駛距離。

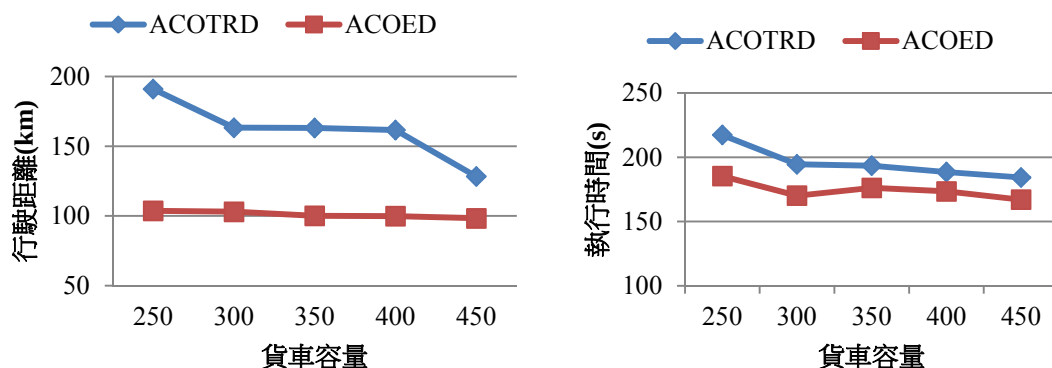


圖10 實驗 (四)

（六）貨物分布對規劃結果的影響

在這一個實驗中，我們要測試這兩種方法在不同範圍區域下的規劃效果，分別為苗栗區、銅鑼區和後龍區，苗栗區範圍約 14 平方公里，銅鑼區範圍約 156 平方公里，後龍區範圍約 233 平方公里。從圖 11 可以看到，在三個區域中 ACO_{ED} 都比 ACO_{TRD} 要好上許多，苗栗區相差 47%，銅鑼區相差 72%，而後龍區則是相差 90% 之多，那是因為當規劃的範圍越大時，貨物分布越廣，貨物彼此之間的距離上升，當規劃順序不好時，總行駛距離增加的越多。

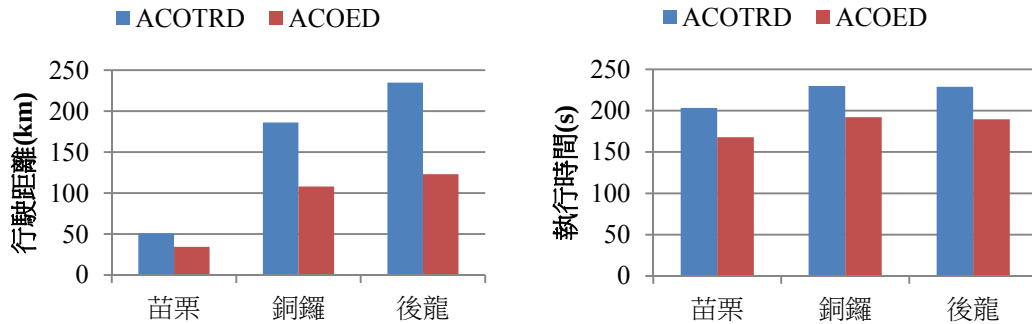


圖11 實驗（五）

六、總結與未來計畫

在這一篇研究中，為了讓物流路徑規劃更貼近生活，在考量現實物流限制的前提下，我們提出一個能夠同時處理收貨和寄件需求的改良式螞蟻演算法，相比一般的螞蟻演算法更找到更高品質的物流規劃路徑，讓行駛距離更短。在此演算法中，我們首先採用 GRASP 產生初始解用來更新路網圖上的費洛蒙，接著使用探索和追隨機制，讓多隻螞蟻根據費洛蒙將貨物指派給車輛，找到較佳的解。在多隻螞蟻規劃完畢後，我們使用 NEH 演算法重新排序螞蟻們找出來的解。最後在每一代結束時，以現有的最佳解更新路網圖上的費洛蒙。

為了比較兩種方法在物流規劃的表現，我們使用從大榮物流取得的配送資料，透過模擬產生寄件資料，進行幾項實驗。各項實驗皆顯示使用兩顧客之間的距離作為依據的方法皆優於使用行駛距離做判斷的方法。未來我們將針對螞蟻演算法應用於現實物流限制繼續做改善，為了因應現實的狀況，將加入時間限制的考量、各個時段的交通狀況等等，規劃目標也會根據限制的增加做調整，期望能透過策略上的改進讓規劃更有效率。

參考文獻

Albayraka, M., and N. Allahverdi, 2011, Development A New Mutation Operator to Solve the Traveling Salesman Problem by Aid of Genetic Algorithms, *Expert Systems with Applications*, 38 (3), pp. 1313-1320.

- Asadpour, A., M. Goemans, A. Madry, S. O. Gharan, and A. Saberi, 2010, An $O(\log n / \log \log n)$ -Approximation Algorithm for the Asymmetric Traveling Salesman Problem, In SODA, pp. 379-389.
- Belloso, J., A. A. Juan, J. Faulin, and A. Serrano, 2015, Using Multi-Start Biased Randomization of Heuristics to Solve The Vehicle Routing Problem with Clustered Backhauls, *Lecture Notes in Management Science*, 7, pp. 15-20.
- Bortfeldt, B., T. Hahn, D. Mannela, and L. Monch, 2015, Hybrid Algorithms for The Vehicle Routing Problem with Clustered Backhauls and 3D Loading Constraints, *European Journal of Operational Research*, 243 (1) , pp. 82-96.
- Chen, R. M., F.-R. Hsieh, and D. S. Wu, 2012, Heuristics based Ant Colony Optimization for Vehicle Routing Problem, in ICIEA, pp. 1039-1043.
- Dorigo, M., 1992, Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26 (1) , pp.29-41.
- Goetschalckx, M., and C. J. Blecha, 1989, The Vehicle Routing Problem with Backhauls, *European Journal of Operational Research*, 42 (1) , pp. 39-51.
- Jarvis, R. A., 1973, On The Identification of The Convex Hull of A Finite Set of Points in The Plane, *Information Processing Letters*, 2, pp. 18-21.
- Karaboga, D., and B. Gorkemli, 2011, A Combinatorial Artificial Bee Colony Algorithm for Traveling Salesman Problem, *Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)* .
- KERRY TJ Logistics, <http://www.kerrytj.com/en/default.aspx>. (Last Checked 2016/06/14)
- Lai, M., M. Battarra, M. D. Francesco, and P. Zuddas, 2015, An Adaptive Guidance Meta-Heuristic for The Vehicle Routing Problem with Splits and Clustered Backhauls, *Journal of the Operational Research Society*, 66 (7) , pp. 1222-1235.
- Lim, A., and F. Wang, 2005, Multi-Depot Vehicle Routing Problem A One-Stage Approach, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2 (4) , pp.397-402.
- Li-xia, R., 2009, Algorithm Study of Multiple-Depot Vehicle Routing Problem based on Fuzzy Simulation, in ICIMA, pp.184-187.
- Lysgaard, J., 2015, A New Sparse Transformation and Exact Algorithm for The Clustered Traveling Salesman Problem, in VEROLOG.
- Menger, K., 1932, Das Botenproblem, *Ergebnisse Eines Mathematischen Kolloquiums*, 2, pp. 11-12.
- Min, H., J. Current, and D. Schilling, 1992, The Multiple Depot Vehicle Routing Problem with Backhauling, *Journal of Business Logistics*, 13 (1) , pp.280-282.

- Nawaz, M., E. E. Enscore, and I. Ham, 1983, A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem, *Omega*, 11 (1) , pp. 91-95.
- Osman, H., 1993, Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem, *Journal Annals of Operations Research - Special issue on Tabu search*, 41 (1-4) , pp. 421-451.
- Tunjongsirigul, B., and P. Pongchairerks, 2010, A Genetic Algorithm for a Vehicle Routing Problem on a Real Application of Bakery Delivery, *Electronic Computer Technology*, pp.214-217.
- Xing, L.N., Y. W. Chen, K. W. Yang, F. Hou, X. S. Shen, and H. P. Cai, 2008, A Hybrid Approach Combining An Improved Genetic Algorithm and Optimization Strategies for The Asymmetric Traveling Salesman Problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21 (8) , pp. 1370-1380.

投稿須知

所有稿件以未曾在國內、外以任何形式刊載為限，且稿件內容不得有侵犯他人著作權或商業宣傳行為，否則由作者自行負法律之責任。文體以中文或英文撰寫為原則，並附中文及英文摘要。稿件須加註標點、分段及編列頁碼。內容編排以下列順序為原則：（一）封面：包括中文及英文之論文名稱、作者姓名、作者所屬單位、聯絡地址、電話、傳真、電子郵件住址；（二）中、英文摘要及關鍵詞等；（三）內文；（四）註釋；（五）謝誌；（六）參考文獻；及（七）附錄與圖表。審查通過後，無法直接由電腦列印之圖、表，應另附完稿之圖、表（不超過A4紙張），以利編排。圖或照片應以黑白為原則，如需彩色印刷請作者自行負擔費用。內文所引用之文獻須列於參考文獻，參考文獻請以姓氏筆劃多寡，依序以中文列出，之後再依英文姓氏之英文字母，依序以英文列出。各項格式書寫方式，請參考下列說明：

各項格式說明如下：

壹、文書檔案採 A4 直式橫寫書格式，版面邊界分別為上（2.54cm）、下（2.54cm）、左（3cm）、右（2.8cm），字體以標楷體及英文 Times New Roman 等兩種字體排版。

貳、首頁（Title page），應包含下列內容：

一、標題（Article Title）：包括中、英文篇章名。

二、作者（Author's Name）：

1. 包括中、英文作者姓名。
2. 分別以中、英文註腳載明作者的職稱、單位。若作者有數人，則以阿拉伯數字 1，2，3…個別標示。
3. 須標示通訊作者（加註*），註明連繫電話、E-mail，英文電話請以國際電話方式書寫。

三、摘要（Abstract）：包括中、英文摘要。

四、關鍵字（Keywords）：包括中文、英文關鍵字，分別列於中、英文摘要之下。

參、正文（Manuscript）

一、稿件標題章節編號層次及順序

中文請按「一，（一），1，（1），a」順序排列；英文則按「1，1.1，1.1.1…」順序排列。

二、引述用例

（一）直接引述：

中文請用單引號「」；英文請用雙引號“ ”，並以括弧標示引述文獻頁次。

（二）引述中復有引述，或特殊引用時：

中文單引號「」在外，雙引號『』在內。英文雙引號“ ”在外，單引號‘ ’在內。

三、文獻引述用例

(一) 文中註明引述文獻

1. 請以（作者，年份）方式表示。
2. 若有數篇文章以分號（；）區隔；中英文文獻分開，並各自以引述文獻之出版年份先後依序排列。
3. 若同一作者，有數篇文章同時引述，則以（作者，年份 1、年份 2）；若同一作者有同一年發表文章同時引述，則以（年份 a, b）表示。
4. 若一篇文章有 2 位作者，請全部列出。中文為（作者 A 與作者 B，年份）；英文為（作者 A and 作者 B, 年份）
5. 若一篇文章有 3 位以上作者（含 3 位），中文請用（第一位作者等，年份）；英文請（第一位作者 *et al.*, 年份）用。
6. 英文期刊第一作者姓在前，名在後，第二作者之後，名在前，姓在後。

(二) 文中已有作者姓名時

1. 請以作者（年份）方式表示
2. 若有數篇文章同時引述，則以作者 A（年份）、作者 B（年份）...表示
3. 若有必要加註說明時，請用註腳，內文註腳號碼使用上標

四、圖版、插圖及表用例

1. 圖名請置於圖之正下方，並以圖 1、圖 2.....方式表示。
2. 表名請置於表格之正上方，並以表 1、表 2.....方式表示。
3. 若引用他人圖表需註明資料來源。

五、公式寫法用例

以(1)、(2)、(3)…依序編號。例： $\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L$ (1)

肆、參考文獻(References)

- 一、專書：作者，年份，《書名》，版次，出版地：出版者。
- 二、期刊論文：作者，年份，篇名，《期刊名》，卷期數，頁碼。
- 三、研討會論文：作者，出版年，論文名稱，《研討會名稱》。
- 四、博碩士論文：作者，年份，《論文名稱》，學校科系名稱(碩/博士論文)。
- 五、網路等電子化資料：作者（單位），年份，篇名，網站名稱，網址。
- 六、技術報告或研究報告：作者，年份，《報告名稱》，研究單位。

中華民國地籍測量學會「國土測繪與空間資訊」 期刊論文審查辦法

中華民國 101 年 09 月 25 日第 16 屆第 6 次理監事聯席會議通過

第一條 為規範「國土測繪與空間資訊」期刊論文審查辦法(以下簡稱本辦法)，得依本會編輯委員會組織簡則第二條規定訂定之。

第二條 來稿經登記後由總編輯就來稿性質，邀請相關專長之編輯委員推薦審查委員。編輯委員會負責對審查委員及投稿作者保持雙向匿名方式審查，審查作業程序如附圖。

第三條 審查委員應於接到論文後三週內審查完畢，並將論文審查表(如附表)，連同論文寄回編輯委員會，審查意見表中須明確勾選其中一項：

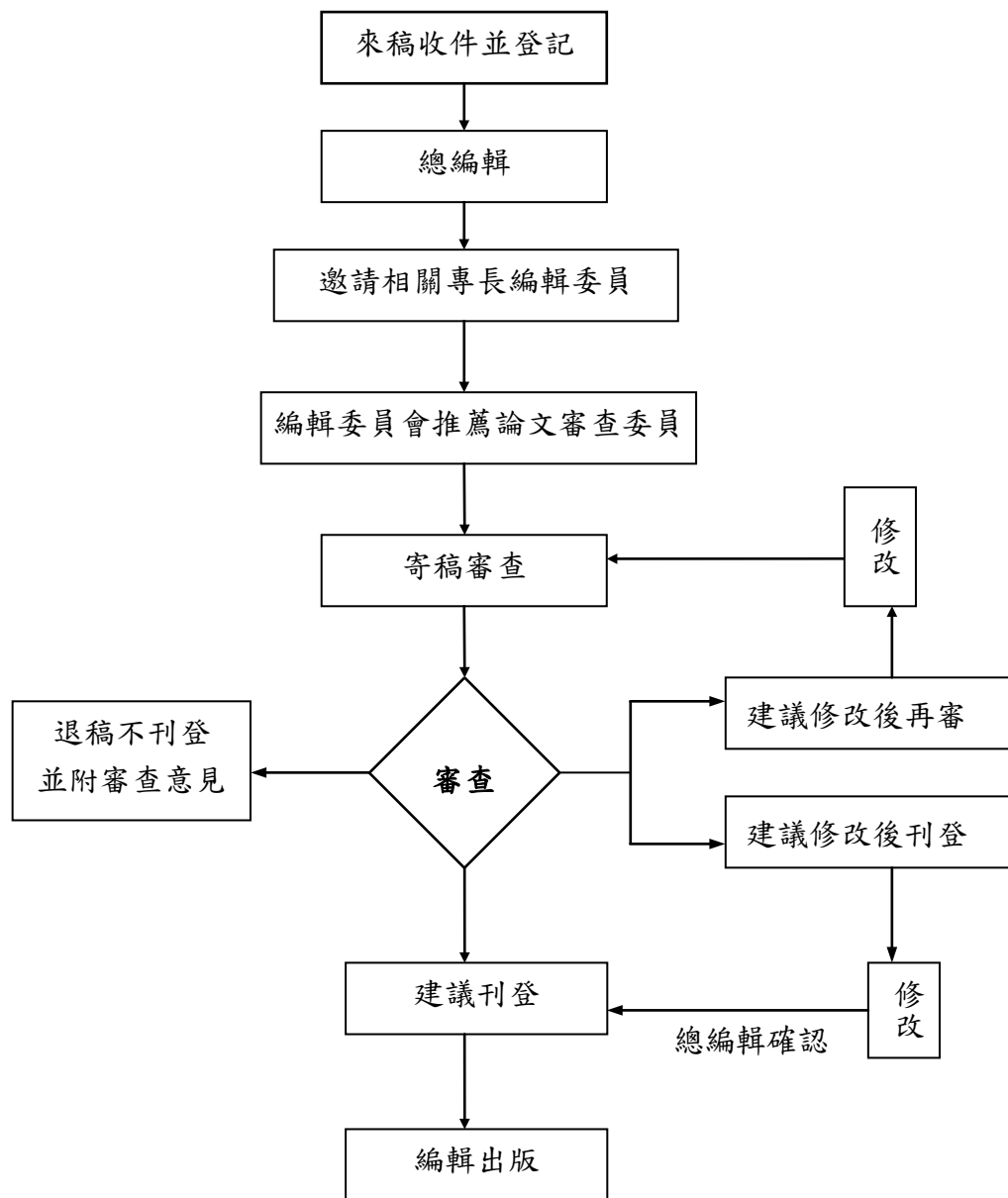
1. 刊登。
2. 修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
3. 修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
4. 不適刊登(應列明審查意見)。

第四條 審查結果處理方式：

處理 方式 第一位審查委員意見 第二位 審查委員意見	刊登	修改後刊登	修改後再審	不適刊登
刊登	刊登	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後刊登	寄回修改	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	不適刊登
不適刊登	第三位審查	第三位審查	不適刊登	不適刊登

附註：再審以一次為限。

第五條 本辦法經理監事會通過後實施，修改時亦同。



論文審查流程圖

國土測繪與空間資訊期刊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

編輯委員會

主任委員 楊 名 國立成功大學測量及空間資訊學系

編輯委員 (依姓氏筆劃順序排列)

史天元 國立交通大學土木工程學系

林老生 國立政治大學地政學系

洪本善 逢甲大學土地管理學系

洪榮宏 國立成功大學測量及空間資訊學系

楊明德 國立中興大學土木工程學系

黃灝雄 國立政治大學地政學系

趙鍵哲 國立台灣大學土木工程學系

饒瑞鈞 國立成功大學地球科學系

總 編 輯 陳國華 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

編 輯 陳鶴欽 內政部國土測繪中心

幹 事

趙荃敏 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

林以珊 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

發 行 人 黃榮峰

劉正倫

出 版 所 中華民國地籍測量學會

內政部國土測繪中心

國土測繪與空間資訊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

第四卷第二期

民國一〇五年七月

Vol. 4, No. 2

July 2016

目 錄

CONTENTS

結合智慧手機與 Kinect 之跌倒偵測監控平台開發

朱宏杰、巫燁棋、蔡光哲.....87

Developing fall detection reporting system by an integration of smart phone and Kinect

Hone-Jay Chu, Ye-Chi Wu, Gang-Je Tsai

用智慧型行動裝置進行步長估計與步伐偵測之研究

甯方璽、吳東旂.....103

The Study of Using Smart Mobile Device for Step Length Estimation and Step Detection

Fang-Shii Ning, Dong-Chi Wu

利用衛星測地資料分析花東縱谷北段之地殼變形

張午龍、劉亭妤、張中白.....117

Analysis of Crustal Deformation Along the Northern Longitudinal Valley from Satellite Geodesy

Wu-Lung Chang, Ting-Yu Liu, Chung-Pai Chang

以螞蟻演算法解決同時收送的物流路徑規劃問題

呂學展、楊雅雯.....139

Ant Colony Optimization Solutions for Logistic Route Planning with Pick-up and Delivery

Eric Hsueh-Chan Lu, Ya-Wen Yang