

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

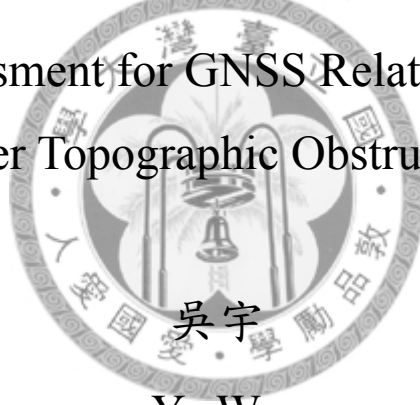
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

地形遮蔽效應下 GNSS 相對定位品質評估

Quality Assessment for GNSS Relative Positioning  
under Topographic Obstruction



吳宇

Yu Wu

指導教授：韓仁毓教授

Advisor: Jen-Yu Han

中華民國 100 年 7 月

July 2011

國立臺灣大學（碩）博士學位論文  
口試委員會審定書

地形遮蔽效應下 GNSS 相對定位品質評估  
Quality Assessment for GNSS Relative Positioning  
Under Topographic Obstruction

本論文係吳宇君（R98521114）在國立臺灣大學土木工程學系碩(博)士班完成之碩（博）士學位論文，於民國 100 年 07 月 18 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

韓 仁 毓

（指導教授）

趙 鍵 哲

林 老 生

葉 大 綱

系主任

呂 良 正

韓 仁 毓

趙 鍵 哲

林 老 生

葉 大 綱

呂 良 正

（簽名）

## 誌謝

完成這篇論文，首先要感謝我的指導教授韓仁毓老師，老師在課堂上脈絡分明的教學使我對測量知識有了更深一層的認識，也成為我整篇論文的理論基礎；在每週的 meeting 中老師更是細心地指導我研究方向及作研究的方法，解決了許多我在研究上遭遇的困難，而老師對於論文品質要求之嚴謹更使我鞭策自己要更努力完成這份論文。另外要感謝組上的趙鍵哲教授和徐百輝教授，不論是修課或是專題討論課程上對我論文的建議都讓我獲益良多。同時也要感謝我的口試委員趙鍵哲教授、林老生教授、葉大綱教授，三位老師對於研究的大方向及細部都有鉅細靡遺的建議，使我的論文更趨完備。

同班六年又同為 GPS 組的柔柔，不論是修課或是研究上都與我同甘苦共患難，測量、討論課業、聊天、吃飯、打牌都少不了妳，感謝妳在漫長求學路上的幫助。感謝李博涵學長提供的許多研究資料讓我的論文更加順利。感謝柔柔、君芸學姐、稚開、宏原的情義相挺，在大太陽下陪我在荒郊野外作了一整天 GPS 測量，沒有你們就沒有我最重要的實測數據。感謝 GPS 組的大家：君芸學姐、小樂學姐、煒哲學長、柔柔、怡萱、怡潔在 group meeting 時給我論文的建議，有你們我才能即時改正自己看不見的缺失。感謝珍祥學姐指導我的英文寫作，感謝徐維學長不時關心我的研究進度，感謝子龍學長、志丞學長、彭念學長、子毅學長、嘉玳學姐對我論文的指導，感謝同屆稚開、家輝、琇蔓、晟福、庭誼的協助和陪伴，還有新進的學弟妹唯碩、建邑、佳頤，謝謝你們接手計畫讓我能在研究的最後階段專心撰寫論文。最後還要感謝我的父母和弟弟，不論我壓力多大心情多差回到家總是能感到溫暖，謝謝你們支持我度過這麼多年的求學生涯！

吳宇 2011/08/15

## 摘要

隨著測量科技的進步，高品質的數值地形模型產製技術日益成熟，若能取得施測地區的高品質數值地形資料，在實施全球衛星導航系統定位前便能有效分析施測地區的地形遮蔽條件，進而獲得可靠的定位品質預估，對於節省測量外業人力與時間成本將產生實質幫助。本研究將針對衛星相對定位任務建立完整的地形效應分析模式，並透過實地試驗驗證本方法之應用效能與可靠度，分析結果顯示以數值地形資料進行相對定位可視衛星數量的分析成果較平坦地表的分析成果準確率提升約 40%，表示地形遮蔽效應為影響衛星可視性分析之重要因素。此外在後續延伸應用中進行地區相對主站的基線精度分析、最佳主站位置分析及網形加密等分析，透過本研究分析方法，在考慮地形遮蔽效應下，前述應用皆能獲得可靠的分析成果，顯示此品質評估技術對各項衛星定位測量及其應用分析工作均能產生具體助益。

關鍵字：全球衛星導航系統、相對定位、數值地形模型、可視性分析



## Abstract

As the spatial information technology advances, one could easily have access to high quality digital terrain data (e.g., digital surface model, digital elevation model, etc.). This advance also makes possible an accurate analysis for the topographic effects in the Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning task. In this study, an integrated approach for analyzing the impact of topographic obstruction on GNSS relative positioning has been established and verified by numerical validations. Results from case studies reveals that, by incorporating terrain data in an analysis, the rate of successfully predicted number of satellites has been improved by 40%. It illustrates that the topographic effect should be an essential consideration in a satellite surveying. Additionally, the proposed methodology was also applied successfully to three related tasks, including baseline accuracy assessment, base station location optimization, and GPS network desifcation. Consequently, the reliability for a satellite surveying and its related applications can now be significantly improved by incorporating the proposed approach.

Keywords: Digital Surface Model, Global Navigation Satellite System, Relative Positioning, Visibility Analysis

# 目錄

目錄 .....	III
圖目錄 .....	V
表目錄 .....	VI
第一章、前言 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 動機與目的 .....	2
1.3 論文架構 .....	3
第二章、地形遮蔽效應與可視性分析 .....	4
2.1 數值地形模型 .....	4
2.2 台灣 DSM 發展現況 .....	5
2.3 地形遮蔽效應相關研究 .....	6
2.4 可視性分析及自適應非等間隔取樣法 .....	11
第三章、衛星軌道計算及坐標轉換 .....	13
3.1 衛星軌道簡介 .....	13
3.2 衛星軌道計算 .....	14
3.3 衛星及數值地形模型坐標轉換 .....	17
第四章、GNSS 定位原理及品質評估 .....	22
4.1 單點定位原理 .....	22
4.2 單點定位品質評估 .....	23
4.3 相對定位原理 .....	24
4.3.1 地面一次差 .....	25
4.3.2 二次差 .....	25
4.4 相對定位品質評估 .....	26
4.4.1 一次差品質評估 .....	26
4.4.2 二次差品質評估 .....	27
4.5 區域相對精度(Local Accuracies) .....	27
第五章、數值分析 .....	30
5.1 數值驗證—單點定位及相對定位品質估計 .....	31
5.2 數值驗證—相對定位衛星軌道及主站坐標誤差分析 .....	34
5.3 數值驗證—地形對衛星可視數量及基線精度之影響 .....	35
5.4 延伸應用—選定主站後，分析地區相對主站的基線精度 .....	39
5.5 延伸應用—最佳主站位置分析 .....	41
5.6 延伸應用—網形加密 .....	43
第六章、結論與建議 .....	49
6.1 結論 .....	49
6.2 未來工作與建議 .....	50

參考文獻 .....	51
------------	----



## 圖目錄

圖 1.1、Trimble Planning Version 2.80 設定接收器位置介面 .....	2
圖 2.1、遮罩角 10 度(上)及 40 度(下)時, GPS(藍線)及 Compass(紅線)系統在北京、 新加坡及雪梨的衛星可視數量分析。(Chen et al., 2009).....	7
圖 2.2、單點可視域圖, 黑色代表 B、灰色代表 S、白色代表 C (Xavier & Costa, 2007) .....	8
圖 2.3、航測+LiDAR DSM(左)及 LiDAR DSM(右)(Taylor et al., 2007).....	9
圖 2.4、三維城市模型(Zhang et al., 2008).....	10
圖 2.5、平坦地表的天空可視圖(左)及使用三維城市模型分析所得之天空可視圖 (右)(Zhang et al., 2008) .....	10
圖 2.6、最大可視仰角 .....	11
圖 2.7、非等間隔取樣法圖示(Han & Li, 2010) .....	12
圖 3.1、克卜勒元素與軌道平面 .....	15
圖 3.2、克卜勒元素與慣性坐標系 .....	15
圖 3.3、衛星軌道坐標系 .....	16
圖 3.4、坐標轉換流程 .....	18
圖 4.1、單點定位模型 .....	23
圖 4.2、相對定位模型 .....	25
圖 5.1、衛星分布天空可視圖 .....	32
圖 5.2、衛星軌道誤差 0~1 m(左)、主站位置誤差 0~1m(右)之基線精度.....	34
圖 5.3、主站位置誤差 0~1m、衛星軌道誤差 2.5、5、7.5、10、100cm 基線精度 .....	34
圖 5.4、測區地圖(左)及 2 公尺解析度 DSM(右) .....	35
圖 5.5、測區實地照片：點 1(左)、點 2(中)、點 3(右) .....	36
圖 5.6、單點定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量(上)及 PDOP(下)比較 .....	37
圖 5.7、相對定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量(上)及基線精度(下)比較 .....	38
圖 5.8、主站品質效益指標分析流程 .....	41
圖 5.9、Case 1 主站品質效益指標(左)、白色格點代表精度前 10%之主站位置(右) .....	42
圖 5.10、Case 2 主站品質效益指標(左)、白色格點代表精度前 10%之主站位置(右) .....	42
圖 5.11、適合設置主站之位置與交通路線圖套疊.....	43
圖 5.12、以高精度 GPS 基線進行網形加密流程 .....	45
圖 5.13、原始網形控制點位置 .....	46
圖 5.14、以 GPS 基線進行網形加密 case 1(紅虛線)、case 2(白實線).....	47



## 表目錄

表 2.1、數值地形模型分類 .....	4
表 2.2 網格及 TIN 數值地形模型特性(Dalyot, 2006) .....	5
表 2.3、使用不同地表模型的可視衛星數量(Taylor et al., 2007).....	9
表 5.1、衛星軌道資料品質(IGS Products Table, 2009).....	30
表 5.2、台灣衛星控制點經緯度坐標精度(內政部地政司衛星測量中心網站, 2006) .....	31
表 5.3、台灣衛星控制點轉換至 ECEF 坐標精度.....	31
表 5.4、衛星及接收器模擬坐標及時鐘誤差 .....	32
表 5.5、單點定位定位結果 .....	33
表 5.6、一次差定位結果 .....	33
表 5.7、二次差定位結果 .....	33
表 5.8、測區中三點的天空可視圖 .....	36
表 5.9、單點定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量比較.....	37
表 5.10、單點定位於平坦地表及考慮 DSM 之 PDOP 比較.....	37
表 5.11、相對定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量比較.....	38
表 5.12、相對定位於平坦地表及考慮 DSM 基線精度比較.....	38
表 5.13、相對定位基線精度變化 .....	40
表 5.14、現有網形及 GPS 觀測基線精度 .....	47
表 5.15、原始網形(二等衛星控制點)及加密後基線精度.....	48
表 5.16、原始網形( $\sigma_x$ 、 $\sigma_z = 0.1\text{ m}$ 、 $\sigma_y = 0.15\text{ m}$ )及加密後基線精度.....	48

# 第一章、前言

## 1.1 研究背景

傳統上測量主要是使用儀器觀測地面各個物體間的距離、角度，進而決定物體空間位置的一種技術。而隨著近幾年科學技術的進步，測量不再只是利用地面上的儀器量度各物體間的空間資訊，1957 年第一顆人造衛星發射升空後，人造衛星技術於這五十幾年間在氣象、通訊、資源探勘、導航等方面有極廣泛的應用。

全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)具有良好的定位及定時精度，且較不受天氣影響，因此被廣泛的應用在大地測量上。而目前運作中的 GNSS 系統包含美國的 GPS(Global Positioning System)系統、俄羅斯的 GLONASS(Global Navigation Satellite System)系統、歐洲的 Galileo 系統以及中國的 Compass/BeiDou 系統，其中 GPS 為 GNSS 中較早發展且最成熟的系統，涵蓋範圍包含全球且 24 小時皆可觀測，該系統利用 GPS 衛星發射電波信號，地球上任何沒有被遮蔽的地點皆可接收到 4 顆以上的衛星訊號，因此 GPS 接收器可以在任何時間設置在地表上任一可對空通視的地點接收衛星訊號，計算接收器位置之絕對坐標(Leick, 2004)。

GNSS 的基本原理為藉由衛星與接收器之間的距離觀測量來定義接收器坐標，一般而言 GNSS 定位需要有四個距離觀測量才能進行衛星定位，而距離觀測量的多寡及衛星網形分佈將直接影響到 GNSS 定位的品質。由於 GNSS 為藉由衛星與接收器之間的距離觀測量來定義接收器坐標，因此各個測站之間無須通視，解決了傳統測量上的一大困難，使得點位的佈設得以更加靈活。然而雖然各個測站間無須通視，但因為 GNSS 的距離觀測須仰賴衛星與接收器間的電波信號傳遞，因此接收器及衛星必須保持通視，山脈、建築、或是其他物體的遮蔽或是多路徑效應將使定位精度下降，因此山頂或是廣闊的平原較適合做為接收器的設置位置，但山頂或廣闊的平原在都市中不易尋得，故在進行 GNSS 定位品質預估時，研究

環境及地表因素對衛星訊號傳遞的影響是一項相當重要的課題。

## 1.2 動機與目的

常見的 GNSS 計畫軟體在判斷衛星和接收器之間是否通視時，沒有考慮地形的影響，僅假設地表是一個平面，或是以簡化的方式設定遮罩角粗略的模擬接收器附近的遮蔽，例如 Trimble Planning 僅以一遮罩角模擬遮蔽(圖 1.1)。

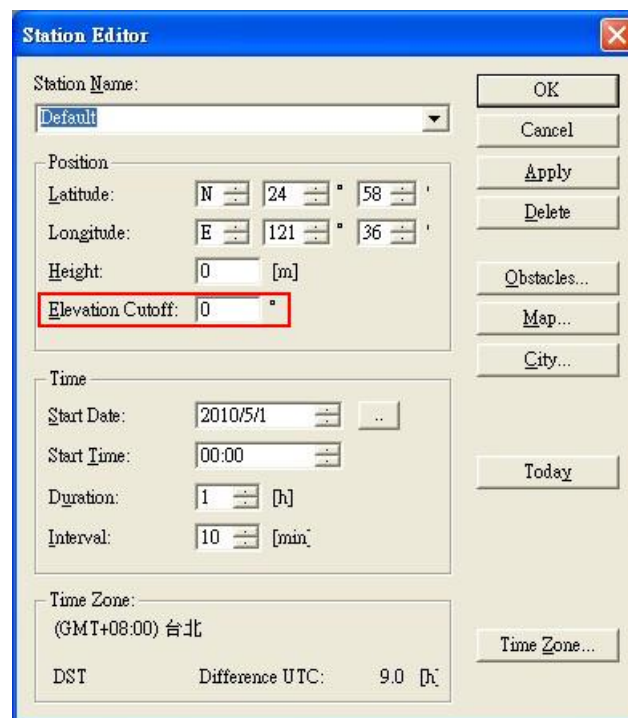


圖 1.1、Trimble Planning Version 2.80 設定接收器位置介面

另一方面，由於近年來空間資訊科技的進步，高品質的數值地形資料可以較容易的取得，因此數值地形資料也應該用於衛星可視分析中，以得到接收器附近更真實的遮蔽情形，近期的研究中越來越多人在研究地形對單點定位品質的影響(Beesley, 2003; Taylor et al., 2007; Xavier & Costa, 2007; Zhang et al., 2008; Chen et al., 2009)，但在進行單點定位時，其定位精度受到衛星軌道誤差、時鐘誤差、及訊號傳播誤差等因素影響，雖然可透過一些解算模型來減弱這些誤差的影響，但並無法完全剔除誤差之影響。因此在精度要求較高的任務或應用中，便不適用單點定位的模式，必須利用相對定位消除觀測量的系統性誤差，求得品質更好的

接收器坐標。

而在相對定位的模型中包含多個衛星及多個接收器，形式更為複雜，例如衛星的軌道變動、時鐘誤差或是訊號傳遞誤差對每個接收器都將造成不同程度的影響，在採用相對定位的模型時，決定哪些影響應該被考慮在品質評估中，是單點定位推展到相對定位將面臨的問題，因此本研究將分析地形遮蔽效應對相對定位品質的影響，並進行數值分析及討論。

### 1.3 論文架構

本論文分為七章，第一章前言，介紹 GNSS 背景及研究動機與目的。第二章地形遮蔽效應，首先簡介數值地形模型以及目前台灣發展現況，接著介紹相關研究及地形遮蔽效應下所採用的分析方法。第三章衛星軌道計算及坐標轉換，說明衛星軌道原理及計算衛星軌道坐標，並介紹衛星軌道坐標與數值地形模型坐標間轉換的方法，並將 ECEF 坐標轉換至地方坐標系。第四章 GNSS 定位原理及品質評估，介紹單點定位及一次差、二次差的原裡及品質評估，並介紹區域相對精度 (local accuracies) 的計算方法。第五章數值分析，以數值分析驗證數學模式的正確性以及進行衛星可視性的應用。第六章總結本論文的研究成果及對後續工作提出建議。

## 第二章、地形遮蔽效應與可視性分析

進行地形可視性分析時，需採用數值地形模型，而數值地形模型依其包含的地貌及儲存方式分為幾種不同的類型，本章節中將簡介數值地形模型的分類以及台灣目前的發展現況，並介紹地形遮蔽效應對 GNSS 衛星可視性影響的相關研究，最後介紹地形遮蔽效應下採用的可視性分析方法。

### 2.1 數值地形模型

數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)一詞首由美國麻省理工學院土木工程系在 1950 年代末期電子計算機剛萌芽的時代，為傳統公路設計之斷面及土方改以計算機計算時之需要而創。指的是表示地表高程面的一個數值模型，目前在土木工程界仍廣泛使用此名詞(王蜀嘉、曾義星，2003)。

而考慮地形遮蔽效應可以採用不同的數值地形模型進行分析，數值地形模型可由實地測量、航測像對、RADAR、LiDAR等技術產製。而根據各個模型所包含地貌不同，其分類如表2.1所示：

表 2.1、數值地形模型分類

數值地形模型	定義
Digital Terrain Model (DTM)	數值地形模型的總稱。
Digital Elevation Model (DEM)	僅包含地表高程資訊的地形模型。
Digital Surface Model (DSM)	包含所有地表上的地貌，例如建物、植被等。

其中因為DSM包含最多地貌細節，因此最適合用來進行可視分析。而目前數值地形模型通常以不規則三角網(Triangular Irregular Network, TIN)或網格(Grid)形式儲存，其特性如表2.2。

表 2.2 網格及 TIN 數值地形模型特性(Dalyot, 2006)

Grid	TIN
<ul style="list-style-type: none"> <li>• simple storage</li> <li>• compatible with satellite data</li> <li>• good surface analysis</li> <li>• slower to compute</li> <li>• possibility of redundant data points</li> <li>• uniform pixel size</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fewer points needed for the same accuracy</li> <li>• resolution adapts to terrain</li> <li>• no surface analysis</li> <li>• initial construction is time consuming</li> <li>• some operations do not have efficient algorithms</li> </ul>

由於網格數值地形模型的資料結構簡單、較適合作地形分析，雖然需要較長的運算時間但可藉由減少取樣點提升運算效率，加上網格資料較容易取得，因此本研究以網格 DSM 進行地形遮蔽效應之分析。

## 2.2 台灣 DSM 發展現況

台灣地區舊有網格間距為 40 公尺之 DEM(Digital Elevation Model)資料為行政院農委會林務局農林航空測量所於民國 80 年代所測製，採用航測方式以傳統解析立體測圖儀掃描量測而得。但由於 40 公尺解析度之 DEM 已逐漸不敷使用，並且缺乏 DSM 資料，因此內政部於 93 年至 95 年執行「高精度及高解析度數值地形模型建置計畫」(王蜀嘉、曾義星，2003)，完成台灣地區 5 公尺解析度 DEM 及 DSM，其精度可表示為

$$\sigma = a + b + c \times t \quad (2.1)$$

其中  $\sigma$  代表 DSM 或 DEM 之中誤差、 $a$  代表立體模型內對定義明確的點的高程量測中誤差、 $b$  代表受地形坡度影響而有的高程量測中誤差、 $c$  為無單位的比例係數，表示估計植被與建物下地表高程時，其估計的誤差是與植被與建物成正比的一個係數、 $t$  代表測點周圍平均植被與建物高。例如目前農林航空測量以 1/17000 航測像片所產製的 DSM 為例，其係數  $a = 0.7$  m，在平地時  $b = 0$  m、丘陵地  $b =$

0.2 m、山地  $b = 0.9$  m、陡峭山地  $b = 2.0$  m，而在無建物無植被區  $c = 0$ 、密林區或密建物區  $c = 0.07$ 、中密度林區或中密度建物區  $c = 0.1$ 、低密度林區或低密度建物區  $c = 0.15$ (王蜀嘉、曾義星, 2003; 內政部地政司衛星測量中心網站, 2006)。

而為延續「高精度及高解析度數值地形模型建置計畫」辦理成果，內政部續研訂「高精度及高解析度數值地形模型後續計畫」，計畫期程 95 年度起至 98 年度止，工作項目包括(內政部地形圖資料庫網站)：

- (1)制定規範，訂定維護、更新、管理機制及修測數值地形模型資料。
- (2)發展影像高精度正射糾正相關技術及系統。
- (3)發展空載光達測繪技術。
- (4)引進及發展透水光達測繪技術。
- (5)發展地面三維雷射測量技術。
- (6)辦理航遙測空標及自然、人工地物特徵點資料庫建置。
- (7)發展 3D 城市模型相關技術。

隨著科技及技術的精進，解析度更高、精度更好的 DSM 也將越來越容易取得，若能在 GNSS 實地測量前，取得施測地區的 DSM 資料，便能有效分析施測地區的相對定位精度，節省施測的人力及時間，得到更好的施測成果。

## 2.3 地形遮蔽效應相關研究

目前已有許多研究地形遮蔽效應影響 GNSS 定位的相關文獻，而不同的研究採用不同的分析方法及數值地形模型也將於本節中介紹。

Chen et al. (2009)的研究中，利用設定遮罩角的方式比較 GPS 和 BeiDou-2/COMPASS 在單點定位時的衛星可視數量和 DOP 值。但設定遮罩角僅能粗略的模擬衛星接收器被地形影響的情況，這份研究中在相同的地點設定了兩種不同的遮罩角進行分析(圖 2.1)，以 10 度的遮罩角模擬空曠的平原，40 度的遮

單角模擬都市中的場景，然而若要更貼近真實的情況，則應該考慮真實的地表狀況，以該地區的實際地形資料進行分析。

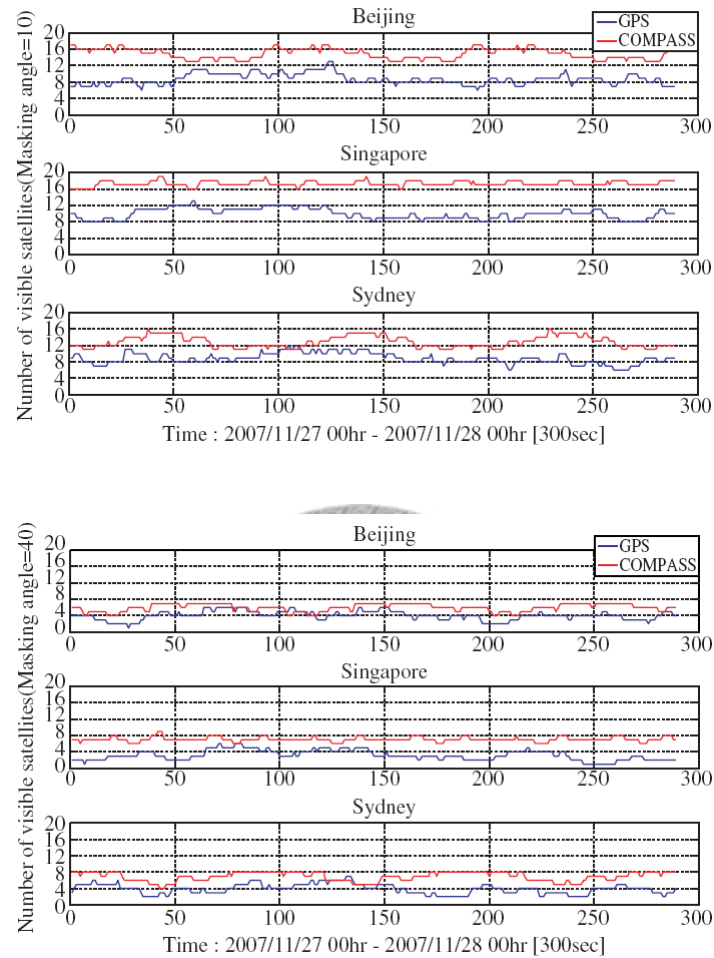


圖 2.1、遮罩角 10 度(上)及 40 度(下)時，GPS(藍線)及 Compass(紅線)系統在北京、新加坡及雪梨的衛星可視數量分析。(Chen et al., 2009)

Beesley (2003)使用由 LiDAR 資料及航空攝影測量像片產生的數值地形及 GIS 內嵌模型分析 GPS 在美國南卡羅來納大學(University of South Carolina)中的 PDOP，並利用式(2.2)及式(2.3)計算天空可視範圍百分比。研究結果得到天空可視範圍及 PDOP 的關係如式(2.4)，代表天空可視範圍減少 1%時 PDOP 增加 0.175，因此如果有建物及植物模型可以計算天空可視圖，就可以有效的預估實地測量的 PDOP 值。



$$Aw = [\theta_{Az} \times \pi \times ((90 - El_{\max}) / 90)^2] / 360 \quad (2.2)$$

$$As = (\sum Aw / \pi) \times 100 \quad (2.3)$$

$$\exp(PDOP) = 12.949 - (0.175 \times As) \quad (2.4)$$

其中  $Aw$  代表天空可視圖中每個方位角取樣角度的面積、 $\theta_{Az}$  代表方位角取樣角度、 $El_{\max}$  代表最大可視仰角、 $As$  代表可視面積佔天空可視圖的百分比、 $\exp(PDOP)$  代表 PDOP 期望值。

Xavier & Costa (2007) 用採用 30 弧秒的 DEM 資料配合建物及植物資訊，模擬接收器的衛星訊號遮蔽。該研究中將可視性分為 C (clear)、S (shadowed by trees) 或 B (blocked by buildings or terrain) 三種情況進行分析。第一步先採用 DEM 資料分析單點方位角 360 度的可視域，將可視域分為 C 和 B，第二步加入建物的 3D 角點坐標，更新上一步的可視域圖，最後再加入植物的高度及寬度資訊，重新分析可視域圖中 C 的部分，如果有被遮蔽則改為 S，模擬成果如圖 2.2 所示。

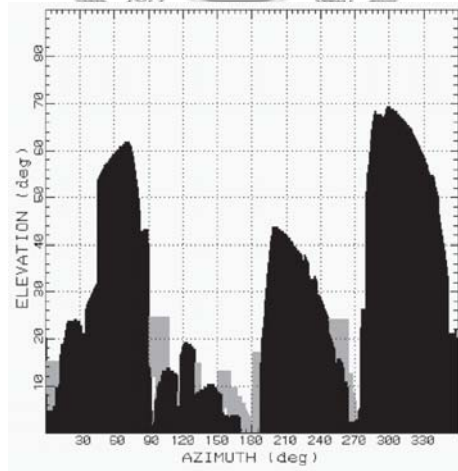


圖 2.2、單點可視域圖，黑色代表 B、灰色代表 S、白色代表 C (Xavier & Costa, 2007)

Taylor et al. (2007) 用 1 公尺的 LiDAR DSM、5 公尺的 RADAR DSM 及航空攝影測量萃取的建物邊緣線來進行衛星可視性分析實驗。實驗中結合 1 公尺的 LiDAR DSM 與航測所萃取的建物邊緣線製作模型(圖 2.3 左)，與 1 公尺的

LiDAR DSM(圖 2.3 右)和 5 公尺的 RADAR DSM 進行比較。實驗結果如表 2.3，實際接收到的衛星為 160 顆衛星，而使用 5 公尺的 RADAR DSM 預測的正確率僅 39%，使用 1 公尺的 LiDAR DSM 預測的正確率為 90%，使用 LiDAR 及航測邊緣線結合預測的正確率為 90%。檢查預測衛星數量使用 LiDAR DSM 有沒有加入航測所萃取的建物邊緣線影響僅一顆衛星，差異如圖 2.3 紅線，加入邊緣線後的屋簷遮蔽了一顆衛星的可視性。由此實驗結果可知在進行衛星可視性分析時應採用較高解析度的 DSM 在進行 LOS(line-of-sight)分析時能有較好的成果，而加入航測邊緣線的影響則較不明顯。

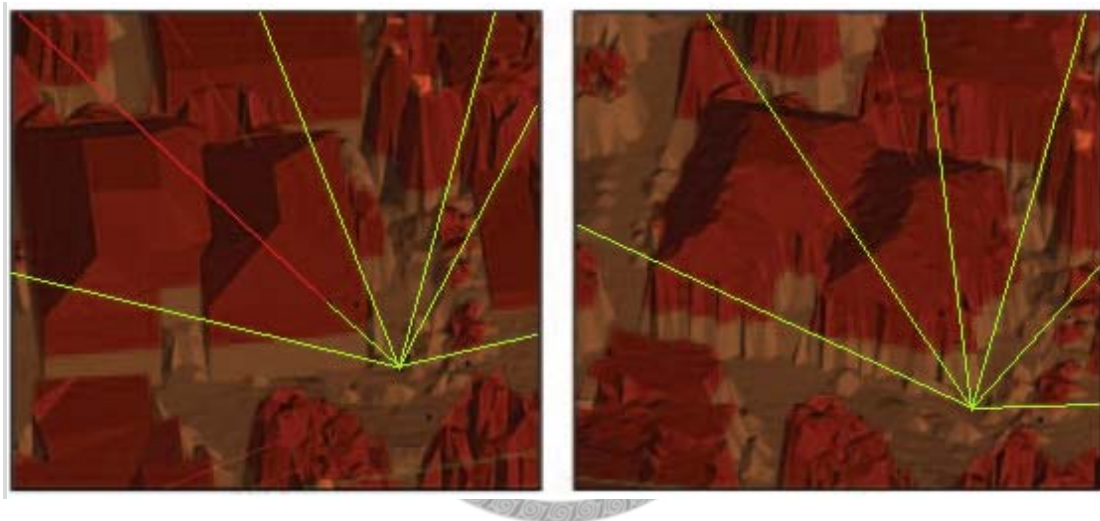


圖 2.3、航測+LiDAR DSM(左)及 LiDAR DSM(右)(Taylor et al., 2007)

表 2.3、使用不同地表模型的可視衛星數量(Taylor et al., 2007)

Type of DSMs	Number of satellites modelled correctly
5m radar DSM	63/160 satellites (39%)
1m LiDAR DSM first pulse return	145/160 satellites (90%)
1m LiDAR + photogrammetry	144/160 satellites (90%)

Zhang et al. (2008)使用航測像片、LiDAR 資料、建物樓高等資訊數化三維城市模型如圖 2.4，並以該模型進行衛星可視性分析，分析所得的天空可視範圍如

圖 5，考慮都市內建物遮蔽後對天空可視範圍影響很大，顯示在複雜的地形時更應考慮地形遮蔽效應的影響。

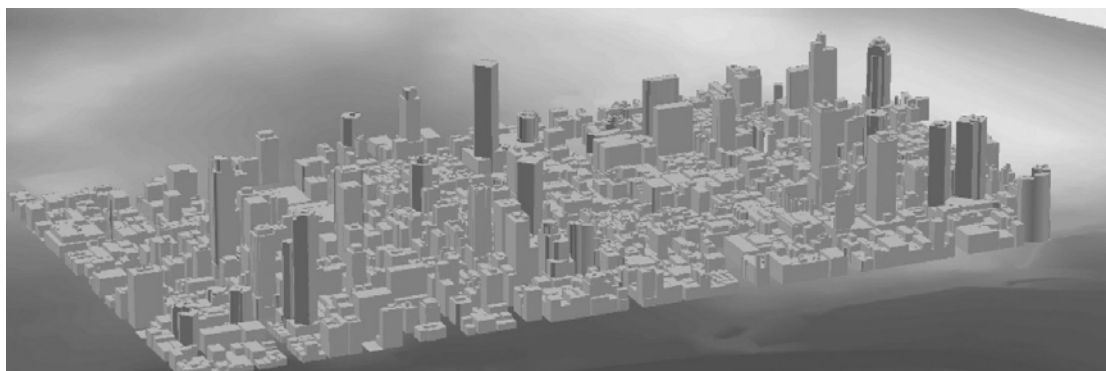


圖 2.4、三維城市模型(Zhang et al., 2008)

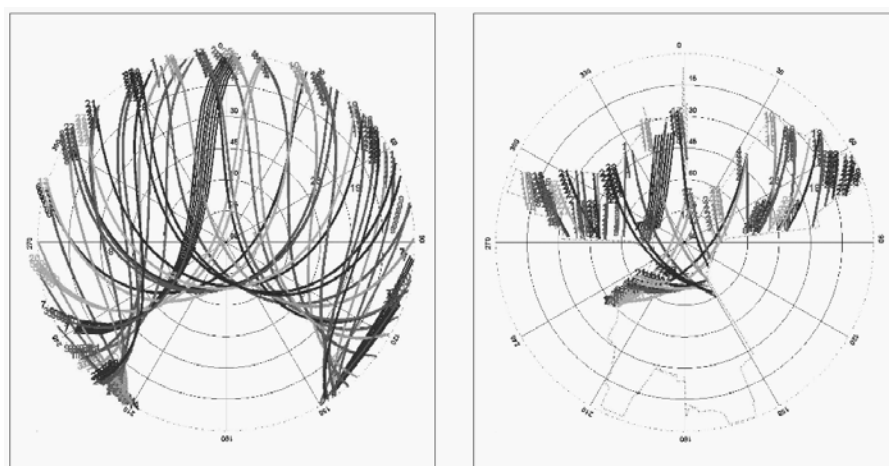
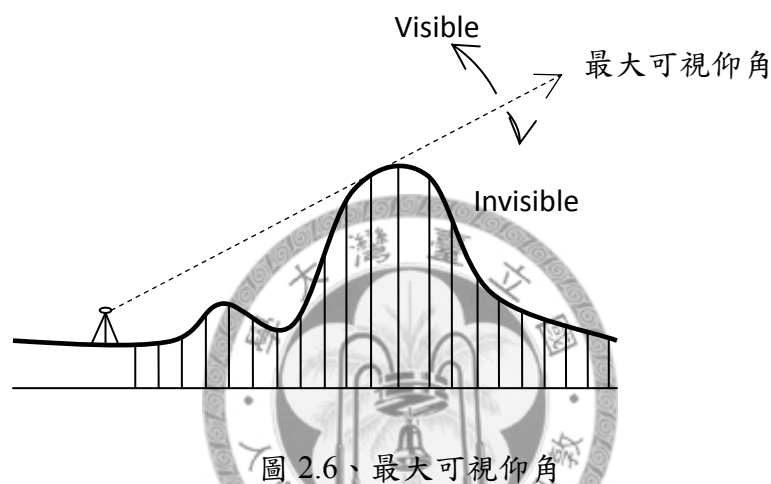


圖 2.5、平坦地表的天空可視圖(左)及使用三維城市模型分析所得之天空可視圖(右)(Zhang et al., 2008)

過去受限於高品質的數值地形模型取得不易，因此相關研究較不常見，但隨著近年數值地形模型的普及，為此項研究提供相當好的分析資料，但若要滿足更高精度的任務或應用，則應該採用相對定位的模型，但目前尚未有研究針對此方面探討，因此本研究將分析地形遮蔽效應對相對定位品質的影響，並進行數值分析及討論。

## 2.4 可視性分析及自適應非等間隔取樣法

可視性分析又稱為LOS(line-of-sight)分析，而LOS分析的概念為判斷衛星和接收器間有沒有被遮蔽物阻擋，實際操作首先從接收儀為原點，將地形模型在每個方向切出剖面。在各個剖面上等間距取樣，計算剖面所有取樣點與接收儀的角度，以最大的角度做為該方向的最大可視仰角(圖2.6)，算出各個方向的最大可視仰角後即可計算衛星的可視性。



但在實際應用時，此方法會因為取樣點過多而造成計算效率減低，尤其當數值地形資料相當龐大時。因此需要一個更適當的方法來進行可視性分析，本研究採用Han & Li (2010)提出自適應非等間隔取樣法，在合理的精度範圍內有效減少運算時間。

自適應非等間隔取樣法在合理的精度範圍內有效減少運算時間，該方法之示意圖如圖 2.7，取樣間隔  $d_s$  可由 4 個參數決定：斜率  $S_{h1,h2}$ 、取樣點的仰角  $\angle El_A$ 、從接收器起算的距離  $d$ 、容許視角誤差  $\angle \theta$ 。

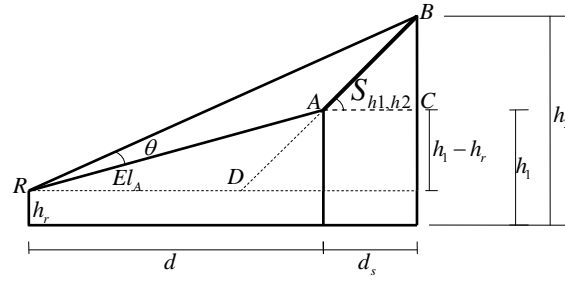


圖 2.7、非等間隔取樣法圖示(Han & Li, 2010)

經過幾何計算後可得取樣間隔的式子如式(2.5)：

$$d_s = \frac{d \times \sin \angle \theta \times \cos S_{h1.h2}}{\sin(S_{h1.h2} - \angle El_A - \angle \theta) \times \cos El_A} \quad (2.5)$$

取樣間隔取決於地形複雜度( $S_{h1.h2}$ 、 $\angle El_A$ )、衛星軌道取樣時間( $\angle \theta$ )、及接收器與取樣點距離( $d$ )。當地形較複雜、衛星軌道取樣時間較短或是距離接收器越近，取樣間隔就要越短。



## 第三章、衛星軌道計算及坐標轉換

為分析衛星可視性，必須先計算衛星的位置，計算出衛星位置後，衛星的可視性即可以 LOS 分析定義出來。在這個章節中將簡介衛星軌道原理，並描述計算衛星軌道的方法，以及坐標轉換的方式。

### 3.1 衛星軌道簡介

以大地測量為應用目的來研究人造衛星的軌道運動時，由於對衛星而言最大的力量為地球引力，因此一般假設人造衛星圍繞地球滿足下列條件(曾清涼、儲慶美，1999)：

- (1) 在宇宙間僅考慮人造衛星與地球間的運動，忽略其他天體的引力作用。
- (2) 將人造衛星及地球視為質點，即質量位在人造衛星及地球之中心。

衛星被發射至預定高度後，便開始圍繞地球運行。依上述兩個條件假設地球及衛星為均質球體，且忽略其他擾動力的理想狀況下，衛星的運動滿足牛頓萬有引力定律(Leick, 2004)：

$$F = \frac{GMm}{r^2} \quad (3.1)$$

其中 F 代表衛星與地球的引力、G 為萬有引力常數、M 為地球質量、m 為衛星質量、r 為衛星與地球質心距離，而因為衛星的質量相對於地球可忽略，故引力加速度可表示為

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{r} \quad (3.2)$$

其中  $\ddot{\mathbf{r}}$  代表引力加速度， $\mathbf{r}$  代表地球質心到衛星質心的向量。引力加速度決定衛星圍繞地球的基本定律，而衛星在地球重力場中無擾動力的運動稱為克卜勒運動，遵循克卜勒定律：

克卜勒第一定律：衛星運行的軌道為一橢圓，且地球位於橢圓的一個焦點上。

克卜勒第二定律：地心到衛星質心的向量  $\mathbf{r}$  在相同的時間內掃過相同的面積。


$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} \sqrt{GMa(1-e^2)} \quad (3.3)$$

其中  $A$  代表  $\mathbf{r}$  掃過的面積， $t$  代表時間， $a$ 、 $e$  代表軌道長半徑及離心率。

克卜勒第三定律：衛星運動周期的平方與軌道長半徑的三次方之比為一常量。

$$n = \sqrt{\frac{GM}{a^3}} \quad (3.4)$$

其中  $n$  代表平均角速度：


$$n = \frac{2\pi}{T} \quad (3.5)$$

其中  $T$  代表衛星軌道周期，將式(3.5)代入式(3.4)整理後可得

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{(2\pi)^2} \quad (3.6)$$

故當軌道長半徑確定時，衛星平均角速度及衛星周期即可確定。

衛星軌道計算時，位於衛星軌道坐標系，故必須先將衛星軌道坐標系轉換至慣性坐標系。而一般衛星定位時主要是以 ECEF(Earth-Centered, Earth-Fixed)坐標系為主，因此必須將衛星坐標再從慣性坐標系轉換至 ECEF 坐標系，以利後續應用。

### 3.2 衛星軌道計算

衛星運行的軌道可由克卜勒六元素(Keplerian orbit elements)定義，分別為

(1)  $a$ ：軌道長半徑(semi-major axis)。

- (2)  $e$ ：軌道離心率(eccentricity)。
- (3)  $\Omega$ ：昇交點赤經(right ascension of the ascending node)，地球赤道平面上昇交點與春分點之夾角。
- (4)  $I$ ：軌道面傾角(orbital inclination)，地球赤道面與衛星軌道面之夾角。
- (5)  $\omega$ ：近地點變角(argument of perigee)，軌道平面上昇交點與近地點之夾角。
- (6)  $\nu$ ：真近點角(true anomaly)，軌道平面上衛星與近地點之夾角。

而克卜勒六元素以圖形表示於軌道平面與慣性坐標系如圖 3.1 及圖 3.2。

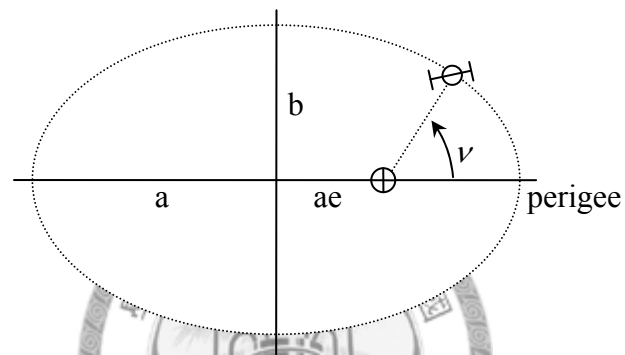


圖 3.1、克卜勒元素與軌道平面

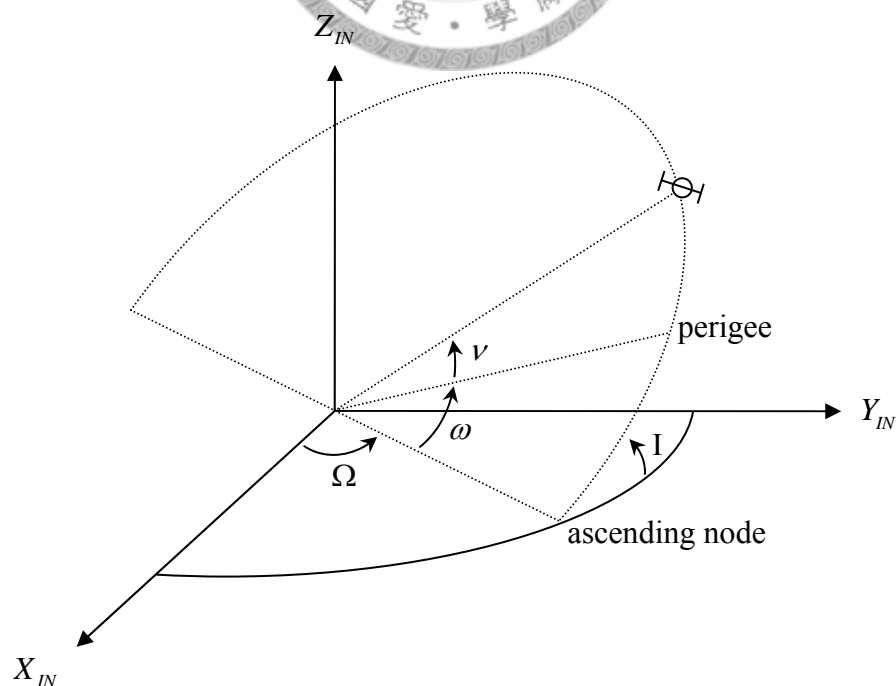


圖 3.2、克卜勒元素與慣性坐標系



衛星在軌道平面上的位置可由圖 3.3 表示，其中虛線弧線為衛星軌道，實線弧線為以軌道長半徑為半徑的圓弧，而衛星位於衛星軌道坐標系的坐標可由式 (3.7) 計算。

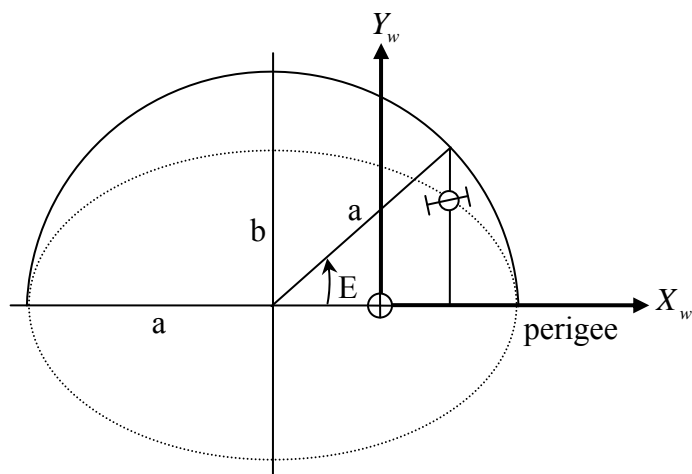


圖 3.3、衛星軌道坐標系

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos E - ae \\ a\sqrt{1-e^2} \sin E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

式中  $X_w$ 、 $Y_w$ 、 $Z_w$  為衛星軌道坐標系坐標， $E$  為偏心近角點(eccentric anomaly)，由式(3.8)解算：

$$M = M_0 + n(t - t_0) = E - e \sin E \quad (3.8)$$

其中  $M$  代表平近角點(mean anomaly)， $n$  代表平均角速度， $t$  代表  $M$  之時刻， $t_0$  代表  $M_0$  之時刻。但由於式(3.8)無法以解析解解得  $E$ ，因此必須以數值解解算，其解算過程如下：

1.  $E_0 = M$
2.  $E_{n+1} = E_n - \frac{E_n - e \sin E_n - M}{1 - e \cos E_n} \quad \text{for } n = 0 \sim \text{until } |E_{n+1} - E_n| < \varepsilon$

$\varepsilon$  為預設之門檻值

$$3. \quad E = E_{n+1}$$

解得  $E$  後即可計算衛星軌道系中的衛星坐標，而衛星軌道坐標系可由三個旋轉矩陣轉換至慣性坐標系，如式(3.9)：

$$\begin{bmatrix} X_{IN} \\ Y_{IN} \\ Z_{IN} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_z(-\Omega) \mathbf{R}_x(-I) \mathbf{R}_z(-\omega) \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

其中

$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

最後將慣性坐標系轉換至 ECEF 坐標系，由於慣性坐標系與 ECEF 坐標系差了一個隨時間變換的旋轉角 GST(Greenwich Sidereal Time)，故求得 GST 角後即可以式(3.12)將衛星的慣性坐標轉換為 ECEF 坐標。

$$\begin{bmatrix} x_{ECEF} \\ y_{ECEF} \\ z_{ECEF} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_z(GST) \begin{bmatrix} X_{IN} \\ Y_{IN} \\ Z_{IN} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

### 3.3 衛星及數值地形模型坐標轉換

因取得的 DSM 資料平面坐標為 TM(Transverse Mercator)二度分帶 TWD97 坐標，高程坐標為橢球高，為將 DSM 與衛星資料一起分析，必須把 DSM 資料轉為 ECEF 坐標系。得到 ECEF 坐標後，為分析衛星可視性，則必須再將 ECEF

坐標轉換為地方圓球坐標系(方位角、仰角、距離)，轉換流程如圖 3.4。

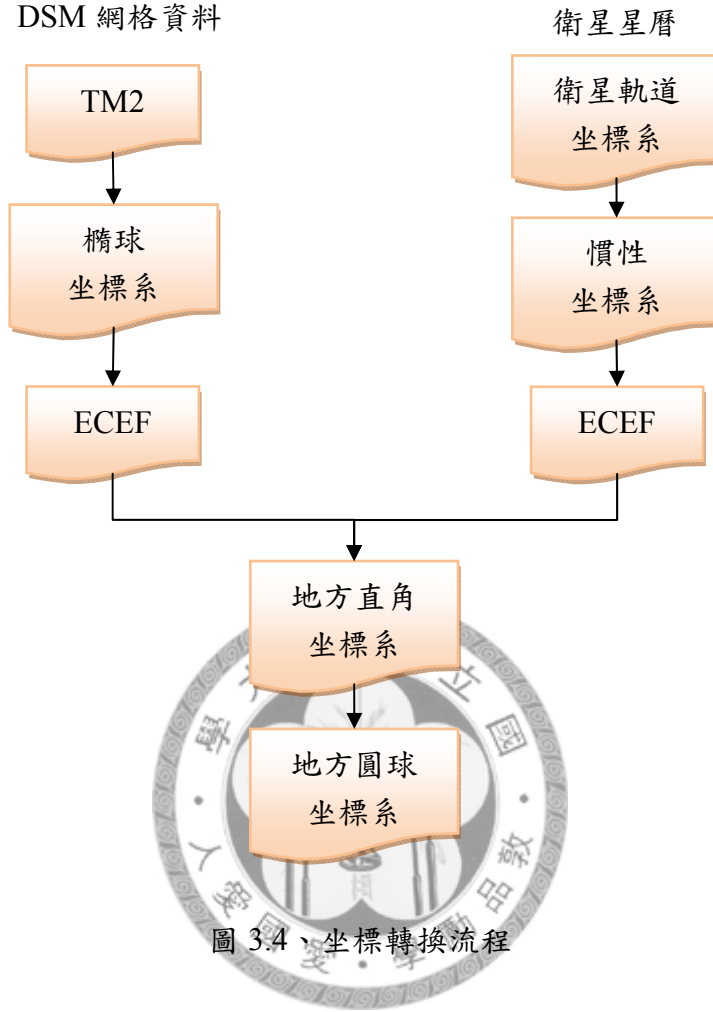


圖 3.4、坐標轉換流程

衛星軌道的坐標轉換已於3.2節中介紹，接著介紹DSM中TM二度分帶坐標轉換至ECEF坐標，首先須先將TM二度分帶坐標轉換至橢球坐標系，其轉換方式如下(POSC, 2000)：

$$\varphi = \varphi_1 - \frac{v_1 \tan \varphi_1}{\rho_1} \left[ \frac{D^2}{2} - (5 + 3T_1 + 10C_1 - 4C_1^2 - 9e'^2) \frac{D^4}{24} + (61 + 90T_1 + 298C_1 + 45T_1^2 - 252e'^2 - 3C_1^2) \frac{D^6}{720} \right] \quad (3.13)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \left[ \frac{D - (1 + 2T_1 + C_1) \frac{D^3}{6}}{+ (5 - 2C_1 + 28T_1 - 3C_1^2 + 8e'^2 + 24T_1^2) \frac{D^5}{120}} \right] \cdot \frac{1}{\cos \varphi_1} \quad (3.14)$$

其中

$$v_1 = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi_1}} \quad (3.15)$$

$$\rho_1 = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi_1)^{3/2}} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \varphi_1 = & \mu_1 + (3e_1/2 - 27e_1^3/32) \sin 2\mu_1 \\ & + (21e_1^2/16 - 55e_1^4/32) \sin 4\mu_1 \\ & + (151e_1^3/96) \sin 6\mu_1 \\ & + (1097e_1^4/512) \sin 6\mu_1 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$e_1 = \frac{1 - (1-e^2)^{1/2}}{1 + (1-e^2)^{1/2}} \quad (3.18)$$

$$\mu_1 = \frac{M_1}{a \cdot (1-e^2/4 - 3e^2/64 - 5e^6/256)} \quad (3.19)$$

$$M_1 = M_0 + (N - FN)/k_0 \quad (3.20)$$

$$T_1 = \tan^2 \varphi_1 \quad (3.21)$$

$$C_1 = e'^2 \cos^2 \varphi_1 \quad (3.22)$$

$$e'^2 = \frac{e^2}{1-e^2} \quad (3.23)$$

$$D = \frac{E - FE}{v_1 k_0} \quad (3.24)$$

a、e 代表地球橢球長半徑及離心率， $\lambda_0$ 、 $k_0$  代表投影之中央經線經度及尺度比，FN、FE 代表原點平移的距離。此公式經由 Lee (2009) 測試正反轉換之誤差小於 0.1 公釐。

將 TM 二度分帶坐標轉換至橢球坐標系後，即可利用式(3.25)將橢球坐標系

轉換至 ECEF 坐標系：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + he) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N + he) \cos \varphi \sin \lambda \\ [N(1 - e^2) + he] \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

其中  $N$  代表卯酉圈曲率半徑、 $he$  代表橢球高。

將 DSM 及衛星坐標都轉換為 ECEF 坐標後，為分析衛星可視性必須再將 ECEF 坐標轉換至地方圓球坐標系，而在轉換至地方圓球坐標系前須先轉換至地方直角坐標系：

$$\begin{bmatrix} -n \\ e \\ u \end{bmatrix} = \mathbf{R}_y(90 - \varphi_{O_L}) \mathbf{R}_z(\lambda_{O_L}) \begin{bmatrix} x - x_{O_L} \\ y - y_{O_L} \\ z - z_{O_L} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

其中

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

式中  $O_L$  代表地方直角坐標系原點。ECEF 坐標系轉換至地方直角坐標系後，即可用式(3.28)轉換至地方圓球坐標系(Leick, 2004)。

$$\begin{bmatrix} Az \\ El \\ Sr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{e}{n}\right) \\ \arctan\left(\frac{u}{\sqrt{e^2 + n^2}}\right) \\ \sqrt{e^2 + n^2 + u^2} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

其中  $Az$  代表方位角、 $El$  代表仰角、 $Sr$  代表距離。計算得圓球坐標系後，即可利用 LOS 分析，以方位角及仰角判斷衛星可視性。實際計算流程為計算以接收器為原點每個方位的最大遮蔽仰角，並計算衛星的方位角及仰角，最後判斷衛星所

在方位的地形最大遮蔽仰角，若衛星仰角大於地形的最大遮蔽仰角則為可視衛星，反之則為不可視衛星，利用此方法即可正確判斷衛星可視性。



## 第四章、GNSS 定位原理及品質評估

本章節中將介紹單點定位及相對定位(一次差、二次差)的原理及定位品質評估，並介紹區域相對精度的估計方式，最後介紹地形遮蔽效應影響下本研究所採用的分析方法。

### 4.1 單點定位原理

單點定位為最基本的 GNSS 定位，其定位的基本概念為觀測衛星與接收器的距離，利用已知的多個衛星坐標定義一未知坐標的地面點。為解算地面點的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三個未知數，至少須觀測三個衛星與接收器之間的距離觀測量。但因為衛星測距時衛星傳播的訊號是以衛星時鐘為基準，而接收器在接收到訊號後是以接收器時鐘為基準換算距離，因此若衛星時鐘及接收器時鐘不同步，便會產生時鐘誤差。而時鐘誤差通常被視為未知參數，因此至少必須同時觀測四個衛星與接收器間的距離觀測量才能列出四條觀測方程式，以求解地面點的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐標及時鐘誤差。單點定位的以載波相位為觀測量的觀測方程式為(Leick, 2004)：

$$p_r^{si} = \varphi_r^{si} \lambda = \|\mathbf{x}^{si} - \mathbf{x}_r\| + c\delta t_r^{si} + \varepsilon_{atm} - N_r^{si} \lambda \quad (4.1)$$

其中  $i=1 \sim n$  顆衛星、 $\varphi_r^{si}$  代表小數周波值、 $\lambda$  代表載波波長、 $\mathbf{x}^{si}$  代表衛星坐標向量、 $\mathbf{x}_r$  代表接收器坐標向量、 $c$  代表訊號傳播速度、 $\delta t_r^{si}$  代表時鐘誤差、 $\varepsilon_{atm}$  代表大氣傳播誤差、 $N_r^{si}$  代表整數周波值。

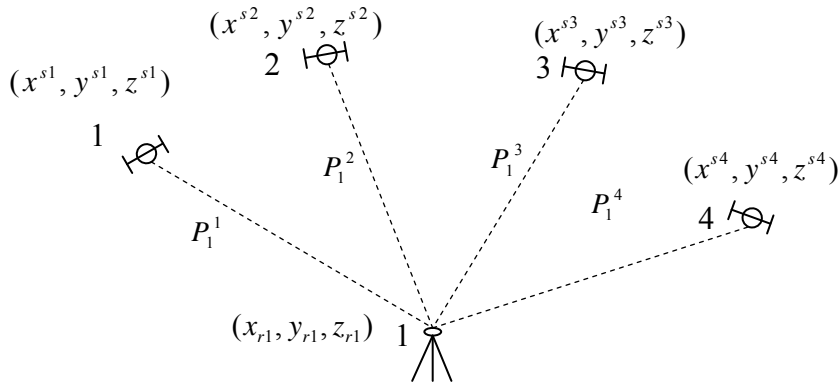


圖 4.1、單點定位模型

## 4.2 單點定位品質評估

將單點定位的觀測方程式線性化後以最小二乘法求解：

$$\mathbf{A}(\bar{\mathbf{l}} + \mathbf{v}) + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{d} \quad (4.2)$$

其中

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \bar{\mathbf{l}}} \bar{\mathbf{l}} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}^T & \mathbf{x}^{s1T} & \mathbf{x}^{s2T} & \dots \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \Delta} \Delta = \begin{bmatrix} d\mathbf{x}_{r1} \\ dc\delta t \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

式中  $\bar{\mathbf{l}}$  代表虛擬觀測量，分別為原始觀測量  $\mathbf{p}$  及衛星座標； $\mathbf{v}$  為虛擬觀測量的殘差； $\mathbf{A}$  為虛擬觀測量的係數矩陣； $\Delta$  代表未知參數，為待測站坐標改正數及訊號傳播速度乘以時鐘誤差； $\mathbf{B}$  為未知參數的係數矩陣； $\mathbf{d}$  為常數向量。利用最小二乘法，未知參數的品質可由餘因子矩陣計算：

$$\mathbf{Q}_{\Delta\Delta} = (\mathbf{B}^T (\mathbf{A} \mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{l}}\bar{\mathbf{l}}} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{Q}_{\Delta\Delta}^{-1})^{-1} \quad (4.5)$$

其中  $\mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{l}}\bar{\mathbf{l}}}$  為虛擬觀測量的餘因子矩陣， $\mathbf{Q}_{\Delta\Delta}$  為未知參數的餘因子矩陣。而由於大部分的應用中皆採用地方直角坐標系統，因此以式(4.6)將 ECEF 的餘因子矩陣轉



換至地方直角坐標系：

$$\mathbf{Q}_{enu} = \mathbf{T} \mathbf{Q}_{\Delta\Delta} \mathbf{T}^T = \begin{bmatrix} q_n & q_{ne} & q_{nu} & q_{nt} \\ & q_e & q_{eu} & q_{et} \\ & & q_u & q_{ut} \\ \text{sym} & & & q_t \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

其中  $\mathbf{T}$  為將 ECEF 坐標轉換至地方直角坐標系的轉換矩陣，而評估衛星定位精度採用精度稀釋因子(Dilution of Precision, DOP)，其定義如下：

$$\begin{cases} \text{VDOP} = \sqrt{q_u} \\ \text{HDOP} = \sqrt{q_n + q_e} \\ \text{PDOP} = \sqrt{q_n + q_e + q_u} = \sqrt{q_x + q_y + q_z} \\ \text{GDOP} = \sqrt{q_n + q_e + q_u + q_t \cdot c^2} \end{cases} \quad (4.7)$$

其中 VDOP 為高程精度因子、HDOP 為平面精度因子、PDOP 為三維點位精度因子、GDOP 為三維點位及時間精度因子。

### 4.3 相對定位原理

在進行單點定位時，定位精度會受到衛星軌道誤差、時鐘誤差、及訊號傳播誤差等因素影響。因此若要滿足大地測量或是精密工程測量的精度需求，即必須利用相對定位來消除這些誤差，以獲得更高精度的接收器坐標(Leick, 2004)。

相對定位的基本原理是利用兩部 GNSS 接收器，一部設置於已知坐標的控制點上，稱為主站；另一部稱為待測站或移動站，設置於待測坐標的點位上，同步觀測同一顆 GNSS 衛星，兩部接收器在同步觀測相同衛星的情況下，衛星的軌道誤差、時鐘誤差會較為一致，若主站與移動站的距離較短，電離層及對流層的折射情況也會較為類似。因此利用觀測量的不同組合進行差分，便可有效的消除或減弱上述誤差的影響，以提高待測站的定位精度。而目前較常應用的差分方式為一次差及二次差，分別於以下小節中介紹。

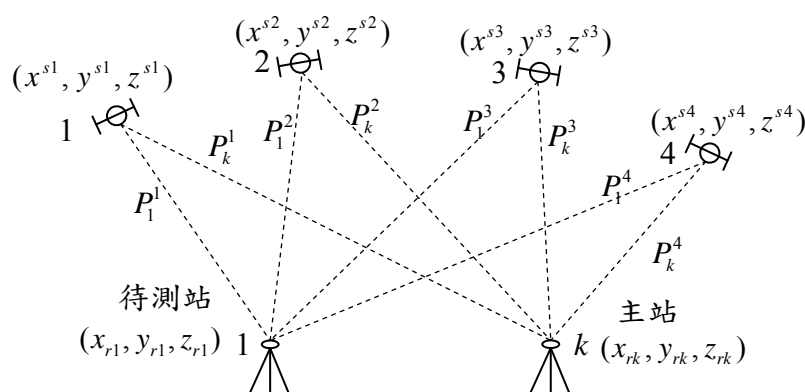


圖 4.2、相對定位模型

### 4.3.1 地面一次差

地面一次差(Single Difference Between Receivers)為基線端點兩部接收器同時對同一顆衛星進行觀測，所觀測得的觀測量差分而得。由於衛星時鐘誤差對兩部接收器造成的效應幾乎相同，因此經差分後可消除衛星時鐘誤差，又大氣傳播誤差以及衛星軌道誤差對兩個同步觀測的觀測量具有高度相關性，尤其當基線較短時這些誤差對兩台接收器造成的影響會更為一致，因此差分後可消除大部分的誤差。地面一次差的觀測方程式可表示為：

$$\Delta p = \Delta \varphi \lambda = \Delta \left\| \mathbf{x}^s - \mathbf{x}_r \right\| + c \Delta \delta t_r - \Delta N \lambda \quad (4.8)$$

地面一次差模型的優點在於可以消除衛星時鐘誤差，並且可以明顯減弱衛星軌道誤差、大氣折射誤差的影響。

### 4.3.2 二次差

基線兩端的兩部接收器同時觀測兩顆衛星，將一次差的觀測量進行差分，可消除接收器時鐘誤差。且當基線較短時，可忽略大氣折射誤差，則二次差(Double Difference)的觀測方程式可寫為：

$$\nabla \Delta p = \nabla \Delta \varphi \lambda = \nabla \Delta \left\| \mathbf{x}^s - \mathbf{x}_r \right\| - \nabla \Delta N \lambda \quad (4.9)$$

一次差模型中消除及減弱的誤差在二次差模型中同樣被消除及減弱。此外二次差模型可同時消除衛星及接收器時鐘誤差，以及基於衛星和接收器的誤差，使計算結果更可靠。

## 4.4 相對定位品質評估

### 4.4.1 一次差品質評估

假設有  $n$  顆衛星，可以組成  $n$  條一次差觀測方程式：

$$\begin{cases} \Delta p1 = p_{r1}^{s1} - p_{rk}^{s1} = \Delta \left\| \mathbf{x}^{s1} - \mathbf{x}_r \right\| + c\Delta \delta t_{r1,rk} - \Delta N \lambda \\ \Delta p2 = p_{r1}^{s2} - p_{rk}^{s2} = \Delta \left\| \mathbf{x}^{s2} - \mathbf{x}_r \right\| + c\Delta \delta t_{r1,rk} - \Delta N \lambda \\ \vdots \\ \Delta pn = p_{r1}^{sn} - p_{rk}^{sn} = \Delta \left\| \mathbf{x}^{sn} - \mathbf{x}_r \right\| + c\Delta \delta t_{r1,rk} - \Delta N \lambda \end{cases} \quad (4.10)$$

式中  $\mathbf{x}_r$  代表主站接收器坐標。線性化後以最小二乘法求解：

$$\mathbf{A}(\mathbf{I} + \mathbf{v}) + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{d} \quad (4.11)$$

其中

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \Delta \mathbf{p}}{\partial \mathbf{l}} \quad \bar{\mathbf{l}} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{p}^T & \mathbf{x}^{s1T} & \mathbf{x}^{s2T} & \dots \end{bmatrix}^T \quad (4.12)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \Delta \mathbf{p}}{\partial \Delta} \quad \Delta = \begin{bmatrix} d\mathbf{x}_{r1} \\ d\mathbf{x}_{rk} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

未知參數的品質可表示為：

$$\Sigma_{\Delta\Delta} = (\mathbf{B}^T (\mathbf{A} \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{B} + \Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}}^{-1})^{-1} \quad (4.14)$$

$$\Sigma_{baseline} = \mathbf{J} \Sigma_{\Delta\Delta} \mathbf{J}^T \quad (4.15)$$

其中

$$\mathbf{J} = [\mathbf{I} \quad -\mathbf{I}] \quad (4.16)$$

#### 4.4.2 二次差品質評估

假設四顆衛星，可以組成三個獨立的二次差觀測方程式：

$$\begin{cases} \nabla \Delta p1 = \Delta p1 - \Delta p2 = \nabla \Delta \|\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_r\| - \nabla \Delta N \lambda \\ \nabla \Delta p2 = \Delta p3 - \Delta p4 = \nabla \Delta \|\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_r\| - \nabla \Delta N \lambda \\ \nabla \Delta p3 = \Delta p3 - \Delta p2 = \nabla \Delta \|\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_r\| - \nabla \Delta N \lambda \end{cases} \quad (4.17)$$

線性化後以最小二乘法求解：

$$\mathbf{A}(\bar{\mathbf{l}} + \mathbf{v}) + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{d} \quad (4.18)$$

其中

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \nabla \Delta \mathbf{p}}{\partial \bar{\mathbf{l}}} \quad \bar{\mathbf{l}} = [\nabla \Delta \mathbf{p}^T \quad \mathbf{x}^{s1T} \quad \mathbf{x}^{s2T} \quad \dots]^T \quad (4.19)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \nabla \Delta \mathbf{p}}{\partial \Delta} \quad \Delta = \begin{bmatrix} d\mathbf{x}_{r1} \\ d\mathbf{x}_{rk} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

未知參數的品質可表示為：

$$\Sigma_{\Delta\Delta} = (\mathbf{B}^T (\mathbf{A} \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}\bar{\mathbf{l}}} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{B} + \Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}}^{-1})^{-1} \quad (4.21)$$

$$\Sigma_{baseline} = \mathbf{J} \Sigma_{\Delta\Delta} \mathbf{J}^T \quad (4.22)$$

### 4.5 區域相對精度(Local Accuracies)

前面幾節的相對定位品質評估方法中已獲得兩點間全球直角坐標系的變方

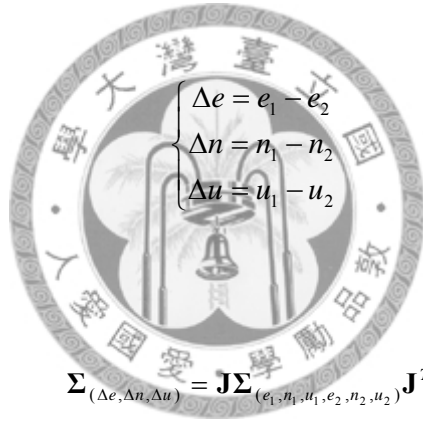
協變方矩陣，因此可利用 Soler & Smith (2010)提出計算兩點間區域相對定位精度的方法來求得基線的區域相對精度。首先介紹全球直角坐標系統(x, y, z)轉換至地方直角坐標系統(e, n, u)的式子：

$$\begin{Bmatrix} e_1 \\ n_1 \\ u_1 \end{Bmatrix} = \mathbf{R}_1 \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} e_2 \\ n_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \mathbf{R}_2 \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{Bmatrix} \quad (4.23)$$

其中 R 為轉換全球直角坐標系統及地方直角坐標系統的旋轉矩陣，假設兩點間全球直角坐標系的變方協變方矩陣已知如下：

$$\Sigma_{\Delta\Delta} = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

兩點間的向量表示為：



$$\begin{cases} \Delta e = e_1 - e_2 \\ \Delta n = n_1 - n_2 \\ \Delta u = u_1 - u_2 \end{cases} \quad (4.25)$$

則兩點間的向量精度：

$$\Sigma_{(\Delta e, \Delta n, \Delta u)} = \mathbf{J} \Sigma_{(e_1, n_1, u_1, e_2, n_2, u_2)} \mathbf{J}^T \quad (4.26)$$

其中

$$\mathbf{J} = \frac{\partial(\Delta e, \Delta n, \Delta u)}{\partial(e_1, n_1, u_1, e_2, n_2, u_2)} = [\mathbf{I} \quad -\mathbf{I}] \quad (4.27)$$

$\Sigma_{(e_1, n_1, u_1, e_2, n_2, u_2)}$  可經由誤差傳播計算推得：

$$\Sigma_{(e_1, n_1, u_1, e_2, n_2, u_2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \Sigma_{11} \mathbf{R}_1^T & \mathbf{R}_1 \Sigma_{12} \mathbf{R}_2^T \\ \mathbf{R}_2 \Sigma_{21} \mathbf{R}_1^T & \mathbf{R}_2 \Sigma_{22} \mathbf{R}_2^T \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

整理後可得兩點間向量精度公式：

$$\Sigma_{(\Delta e, \Delta n, \Delta u)} = \mathbf{R}_1 \Sigma_{11} \mathbf{R}_1^T - \mathbf{R}_1 \Sigma_{12} \mathbf{R}_2^T - \mathbf{R}_2 \Sigma_{21} \mathbf{R}_1^T + \mathbf{R}_2 \Sigma_{22} \mathbf{R}_2^T \quad (4.29)$$

此方法以兩點的坐標精度及相關性推至兩點間的基線精度，由於前面幾節的相對定位品質評估方法中已獲得兩點間完整的變方協變方矩陣，因此可正確推得基線精度。



## 第五章、數值分析

本章共設計了兩部分的數值分析，第一部分驗證數學模式的正確性：5.1 節測試各種誤差對單點定位及相對定位的影響；5.2 節測試衛星軌道及主站位置誤差對二次差的影響；5.3 節測試地形對相對定位可視衛星數量及基線精度的影響並與實地測量資料比較。第二部分則是方法的延伸應用：5.4 節計算選定主站位置後，區域內各點相對定位之精度；5.5 節找出地區中適合擺放主站的位置；5.6 節將 GPS 觀測量加入現有的網形中以提升網形精度。

由於在進行數值分析時需要模擬誤差，故在進行分析前先介紹模擬誤差的量級。首先表 5.1 為 IGS 提供之衛星軌道資料品質，軌道精度從 2.5 至 100 公分，故本研究將模擬此範圍之軌道誤差進行測試。

表 5.1、衛星軌道資料品質(IGS Products Table, 2009)

GPS Orbits	Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits ~100 cm Sat clocks ~5 ns	real time	--	daily
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits ~5 cm Sat. clocks ~3 ns	real time	4 times daily	15 min
Ultra-Rapid (observed half)	orbits ~3 cm Sat clocks ~150 ps	3 - 9 hours	4 times daily	15 min
Rapid	orbits ~2.5 cm Sat clocks ~75 ps	17 - 41 hours	daily	Orbits 15 min Sat clocks 5 min
Final	orbits ~2.5 cm Sat clocks ~75 ps	12 - 18 days	Weekly	Orbits 15 min Sat clocks 5 min

而主站位置誤差則由內政部衛星測量中心所公布之衛星控制點經緯度坐標精度如表 5.2，由於衛星定位時通常採用 ECEF 坐標系統，為方便分析故將表 5.2

中之控制點精度以式(3.25)之轉換模式誤差傳播計算 ECEF 坐標系下之標準誤差如表 5.3。

表 5.2、台灣衛星控制點經緯度坐標精度(內政部地政司衛星測量中心網站，2006)

	經度標準誤差	緯度標準誤差	高程標準誤差
一等衛星控制點	±0.6 cm	±0.3 cm	±2.0 cm
二等衛星控制點	±1.1 cm	±1.1 cm	±2.7 cm

表 5.3、台灣衛星控制點轉換至 ECEF 坐標精度

	x 標準誤差	y 標準誤差	z 標準誤差
一等衛星控制點	±1.0 cm	±1.6 cm	±1.0 cm
二等衛星控制點	±1.6 cm	±2.2 cm	±1.5 cm

最後須模擬大氣折射效應及測距隨機誤差。電離層效應改正後誤差為 0~25 公尺，而對流層效應改正後誤差為 0.02~0.03 公尺，故假設大氣折射效應誤差為 10 公尺。測距隨機誤差包括載波相位觀測誤差、天線相位中心誤差、以及大氣層隨機誤差，假設為 0.1 公尺。本研究將採用上述之誤差進行數值分析，驗證數學模式的正確性及進行實例應用。

### 5.1 數值驗證—單點定位及相對定位品質估計

此分析測試各種誤差對單點定位及相對定位的影響，假設測距系統誤差 10 公尺、隨機誤差 10 公分、衛星軌道隨機誤差 1 公尺，分別計算單點定位、一次差、二次差的接收器坐標及基線長，重複實驗 100 次後計算 RMSE，並與標準差比較。

模擬四顆衛星和兩部接收器坐標及時鐘誤差如表 5.4，衛星分布如圖 5.1。已知衛星及接收器 k 坐標，觀測四顆衛星和兩部接收器間八段距離觀測量，解算接收器 1 坐標及時鐘誤差。



表 5.4、衛星及接收器模擬坐標及時鐘誤差

	x(m)	y(m)	z(m)	時鐘誤差(ns)
Sat1	-22394827.000	-12734409.000	6505734.000	2
Sat2	-13487821.000	13249200.000	18669639.000	7
Sat3	18656545.000	-4535434.000	18367940.000	5
Sat4	-23476578.000	4764521.000	11496420.000	1
Receiver 1(待測站)	3001000.000	4001000.000	3314000.000	2
Receiver k(主站)	3000000.000	4000000.000	3316000.000	8

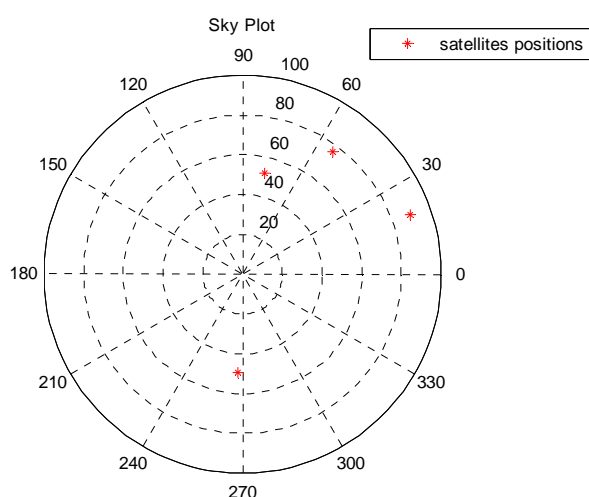


圖 5.1、衛星分布天空可視圖

分析結果如表 5.5 至表 5.7。相對定位中觀測量差分將系統誤差消除，因此從定位成果中的 RMSE 來看，相對定位的定位成果(表 5.6 及表 5.7)較單點定位(表 5.7)好。又因為單點定位的品質估計中沒有考慮系統誤差所造成的影響，因此所估計的定位品質低估了誤差造成的影響，計算所得之 RMSE 與預估的點位精度成果不符。而一次差(表 5.6)和二次差(表 5.7)因為是使用相同的觀測量，因此所得之計算結果相同，又因為一次差和二次差在數學模式中已消除系統誤差，故所得之 RMSE 與標準差相符。

表 5.5、單點定位定位結果

	模擬數值	單點定位結果	RMSE	標準差
$x_{r1}(m)$	3001000.000	3000995.416	7.748	5.935
$y_{r1}(m)$	4001000.000	4000992.915	12.329	9.557
$z_{r1}(m)$	3314000.000	3314016.670	25.696	18.570
$c\delta t_{r1}^{s1}(m)$	0.000			
$c\delta t_{r1}^{s2}(m)$	-1.500	19.349	-	11.624
$c\delta t_{r1}^{s3}(m)$	-0.900			
$c\delta t_{r1}^{s4}(m)$	0.300			

表 5.6、一次差定位結果

	模擬數值	一次差結果	RMSE	標準差
$dx(m)$	1000.000	999.927	0.883	0.840
$dy(m)$	1000.000	999.911	1.417	1.352
$dz(m)$	-2000.000	-1999.781	2.721	2.627
$c\delta t_{r1,rk}(m)$	-1.800	-1.656	1.716	1.644

表 5.7、二次差定位結果

	模擬數值	二次差結果	RMSE	標準差
$dx(m)$	1000.000	999.927	0.883	0.840
$dy(m)$	1000.000	999.911	1.417	1.352
$dz(m)$	-2000.000	-1999.781	2.721	2.627

## 5.2 數值驗證—相對定位衛星軌道及主站坐標誤差分析

由於相對定位有一個接收器必須作為主站，因此主站位置誤差也應該被考慮進精度評估中。另外衛星軌道誤差在相對定位的差分中是否如其他系統誤差被消除、或是留下多少誤差也是此分析所要探討的部分。模擬數據同 5.1 節，以二次差進行定位，測試衛星軌道及主站坐標誤差對相對定位精度的影響。

此數值分析分別測試單獨加入衛星軌道誤差及主站位置誤差，以及將兩種誤差同時加入解算之成果，分析結果如圖 5.2 及圖 5.3。其中橫軸代表加入誤差的大小，縱軸代表基線誤差，折線代表模擬定位之誤差，直線代表預估之誤差，從圖中可看出折線與直線之行為一致代表預估精度之方式沒有錯誤。而僅加入主站位置誤差因為數值問題無法解算預估精度。

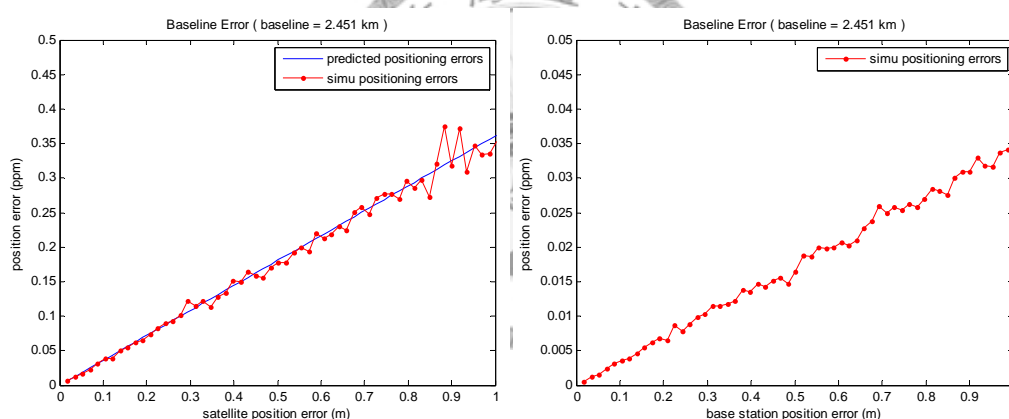


圖 5.2、衛星軌道誤差 0~1 m(左)、主站位置誤差 0~1m(右)之基線精度

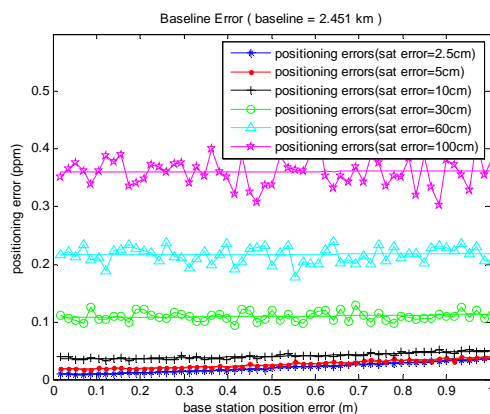


圖 5.3、主站位置誤差 0~1m、衛星軌道誤差 2.5、5、7.5、10、100cm 基線精度

由圖 5.2 中看出基線誤差與衛星軌道誤差、主站位置誤差成正比，而以量級來看衛星軌道誤差的影響約為主站位置誤差的十倍。圖 5.3 中同時加入主站位置誤差及衛星軌道誤差，可看出在有衛星軌道誤差下，主站位置誤差的影響較小，因此衛星軌道誤差也需被考慮模型中。

### 5.3 數值驗證—地形對衛星可視數量及基線精度之影響

此分析目的為測試地形對相對定位衛星可視數量及基線精度影響，並與實測資料進行比較。分析資料為 2 公尺及 5 公尺解析度之光達 DSM，測區位於台北市文山區貓空地區，實測日期為 2010 年 5 月 1 日，分別選擇其中三點(圖 5.4)進行衛星可視數量分析及基線精度分析，測區角點 TWD97 坐標：左下角(307800, 2762900)，右上角(310900, 2765700)；測點 TWD97 坐標：點 1(308804.573, 2763672.069)、點 2(309725.675, 2763948.112)、點 3(309222.506, 2764760.647)。圖 5.5 為測點實地照片，表 5.8 為測點的天空可視範圍圖。假設衛星軌道誤差 1 公尺、測距隨機誤差 0.1 公尺。



圖5.4、測區地圖(左)及2公尺解析度DSM(右)；



圖 5.5、測區實地照片：點 1(左)、點 2(中)、點 3(右)

表 5.8、測區中三點的天空可視圖

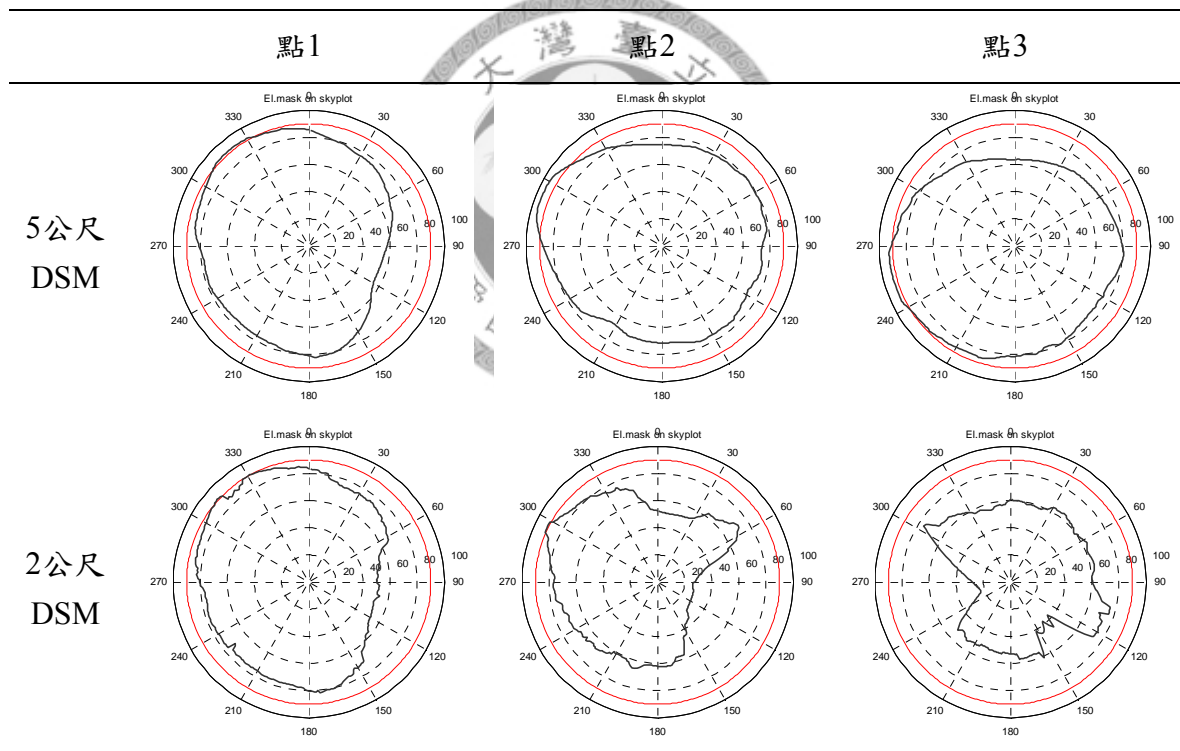


圖5.6、表5.9及表5.10為單點定位之成果，圖5.7、表5.11及表5.12為相對定位之成果，其中藍線代表不考慮地形變化之分析成果，黑線紅線分別代表5公尺DSM之及2公尺DSM之分析成果，綠線為實地測量數據。



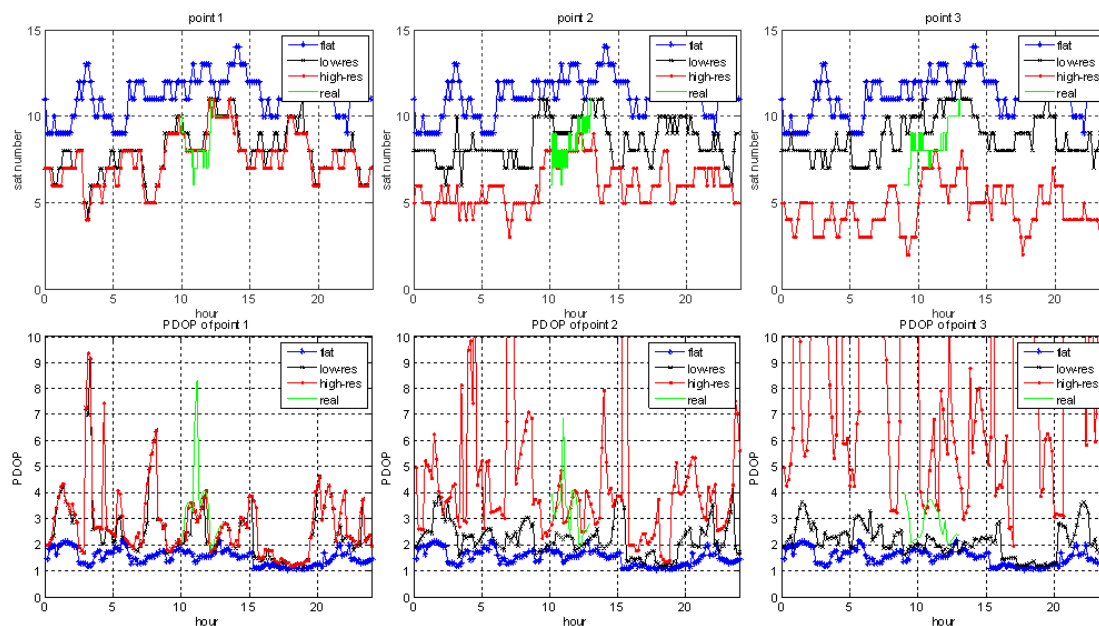


圖 5.6、單點定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量(上)及 PDOP(下)比較

表 5.9、單點定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量比較

	點 1	點 2	點 3	平均
平坦地表	140.24%	141.25%	142.98%	141.49%
5 m DSM	107.93%	113.00%	120.56%	113.83%
實地測量	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
2 m DSM	104.05%	93.71%	64.26%	87.34%

表 5.10、單點定位於平坦地表及考慮 DSM 之 PDOP 比較

	點 1	點 2	點 3	平均
平坦地表	1.665	1.657	1.645	1.656
5 m DSM	2.540	2.146	1.935	2.207
實地測量	3.495	3.330	2.793	3.206
2 m DSM	2.785	3.493	5.163	3.814

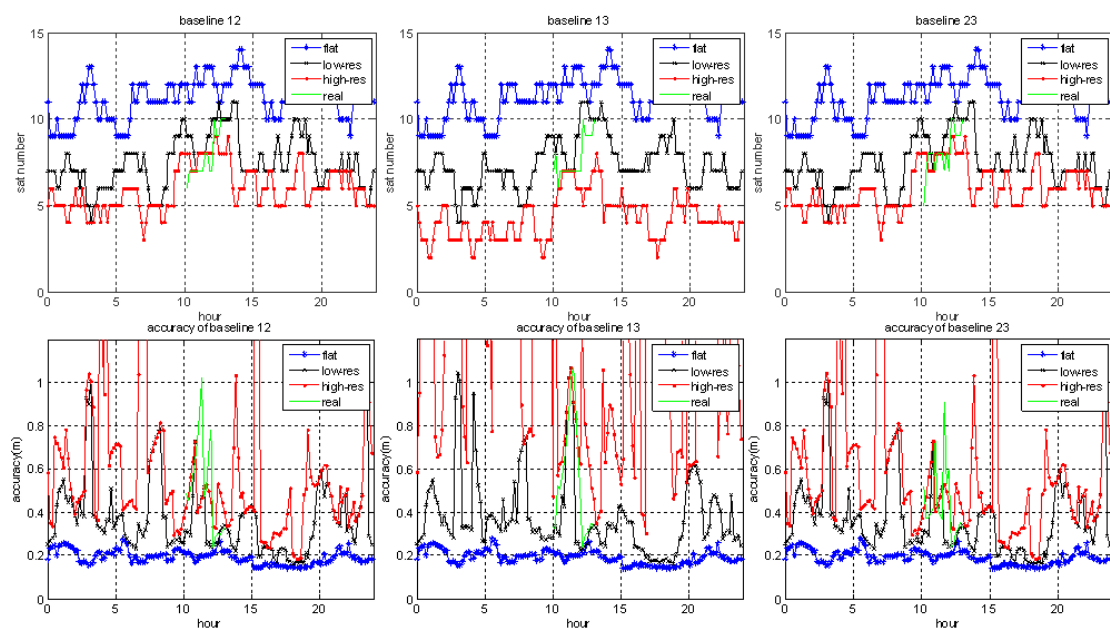


圖 5.7、相對定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量(上)及基線精度(下)比較

表 5.11、相對定位於平坦地表及考慮 DSM 可視衛星數量比較

	基線 12	基線 13	基線 23	平均
平坦地表	151.75%	155.78%	148.63%	152.05%
5m DSM	113.99%	116.33%	111.64%	113.99%
實地測量	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
2 m DSM	100.00%	80.95%	97.95%	92.97%

表 5.12、相對定位於平坦地表及考慮 DSM 基線精度比較

	基線 12	基線 13	基線 23	平均
平坦地表	0.209	0.209	0.209	0.209
5 m DSM	0.358	0.444	0.358	0.387
實地測量	0.526	0.551	0.434	0.504
2 m DSM	0.480	1.169	0.480	0.709

圖5.6及圖5.7為分析成果，以2公尺及5公尺解析度DSM分析所得之成果不同原因推測為兩個DSM資料的產製時間不同，地形地貌可能有所改變。另外5公尺

DSM的解析度較差，所包含的地貌特徵較少，因此分析所得的可視衛星數量較實地觀測多，而2公尺DSM因地貌較細緻複雜，且部分樹葉或其他遮蔽可能不會完全阻擋GPS訊號，但於分析時卻把這些視為完全遮蔽，因此分析所得的可視衛星數量較實地觀測少。因此在此案例中可視衛星數量及精度大致落於5公尺DSM及2公尺DSM的分析結果之間，且與不考慮地形變化的分析成果有明顯落差，顯示在進行衛星定位分析時考慮地形的重要性。

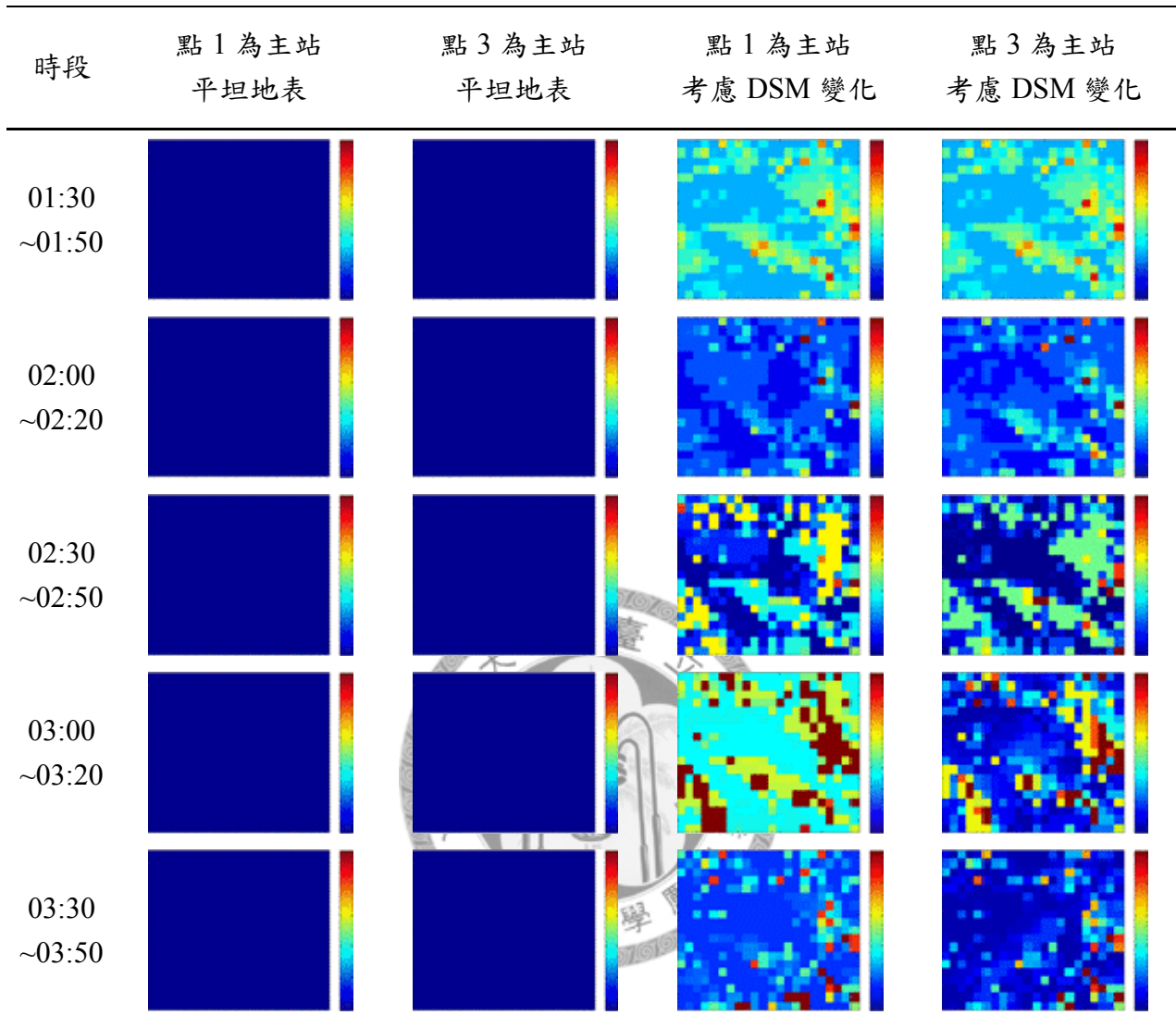
另外於單點定位時平坦地表的可視衛星數量(表5.9)為實際觀測的141.49%，而於相對定位(表5.11)中則為152.20%，顯示地形遮蔽效應在相對定位中影響更為明顯，因此在進行相對定位的精度分析時更應該考慮地形遮蔽效應。

#### 5.4 延伸應用—選定主站後，分析地區相對主站的基線精度

於5公尺解析度DSM中分別選定點1和點3做為主站，分析整個地區的區域相對精度。DSM取樣間隔為100公尺，衛星取樣間隔10分鐘，將30分鐘內所有可用來進行相對定位的觀測量加入平差模式中，計算相對定位基線精度，分析地形變化對相對定位基線精度影響。假設衛星軌道誤差1公尺、主站位置誤差0.01公尺、測距隨機誤差0.1公尺。表5.13為分析結果，顯示精度範圍為0.15公尺至0.4公尺。



表 5.13、相對定位基線精度變化



由分析結果中第二、三欄(點 1、3 為主站、平坦地表)中可看出不考慮 DSM 變化則不同時段衛星網形對基線精度的影響甚小，且選擇不同主站分析得到相同成果。而表格中最後兩欄為地形效應對相對定位精度的影響，分析結果較符合實際情況。由圖形結果可歸納出影響相對定位基線精度的因素分別為主站位置、衛星網形以及地形遮蔽效應，分析結果中僅考慮衛星網形變化及選定不同主站對於基線精度影響並不顯著，地形遮蔽效應為影響基線精度最為重要的因素。

### 5.5 延伸應用－最佳主站位置分析

此分析為在考慮地形效應下，分析地區內哪些位置較適合作為主站位置，可作為設置衛星控制站之參考。分析方法為計算一段時間內所有點當主站時其他點相對主站的精度，將分析所得之精度平均後，即可代表該點作為主站時此地區的精度指標。另外調變不同誤差量，觀察不同誤差對主站選擇的影響情形，此為接續 5.4 節之分析，流程圖如圖 5.8。

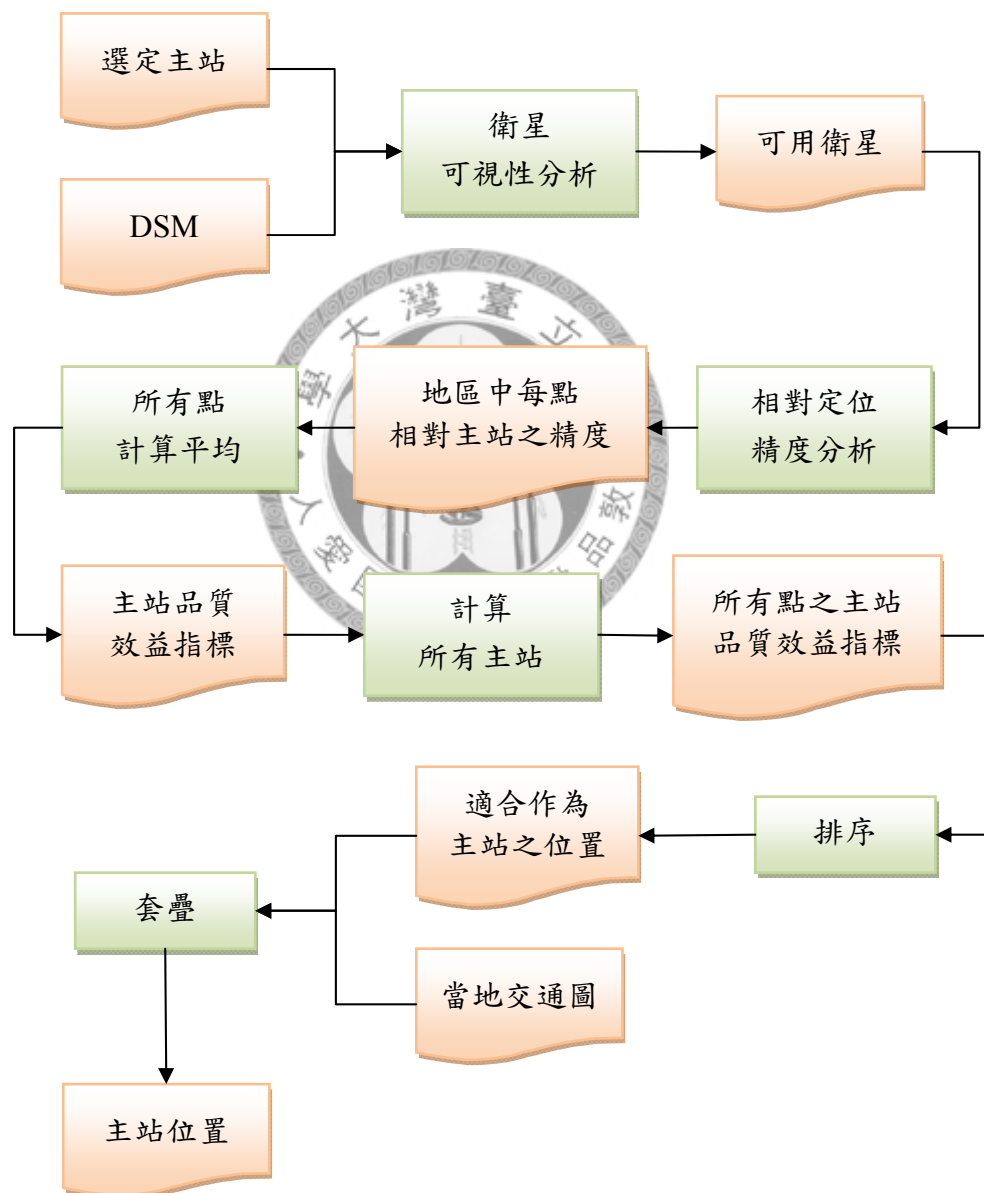


圖 5.8、主站品質效益指標分析流程

在本數值分析中分別分析以下兩種情況：

Case 1：衛星軌道誤差 1 m、主站誤差 0.01 m、測距誤差 10 m

Case 2：衛星軌道誤差 0.025 m、主站誤差 0.01 m、測距誤差 10 m

測試不同誤差量是否會對主站選擇產生影響，分析結果分別如圖 5.9 及圖 5.10。

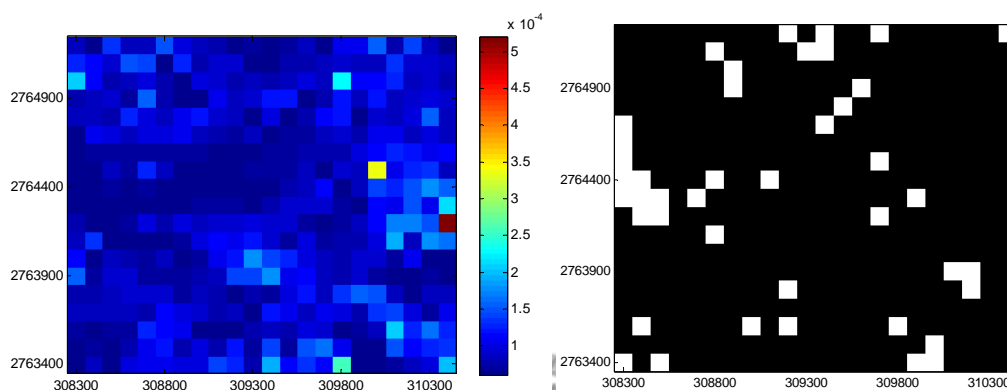


圖 5.9、Case 1 主站品質效益指標(左)、白色格點代表精度前 10%之主站位置(右)

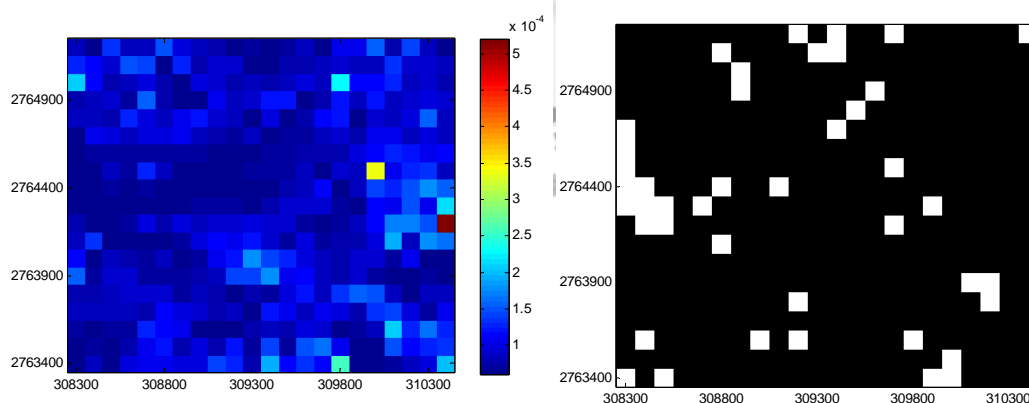


圖 5.10、Case 2 主站品質效益指標(左)、白色格點代表精度前 10%之主站位置(右)

得到地區中主站品質效益指標後，將分析所得精度計算較好的前 10%作為適合設定為主站之位置，圖 5.9(右)及圖 5.10(右)白色部分即為較適合設置主站之位置，配合當地交通路線圖，即可找出能夠架設衛星控制站之位置，可作為設置衛星控制站之參考(圖 5.11)。而調變不同的誤差量，對基線精度影響僅一平移，不影響適合作為主站之位置。

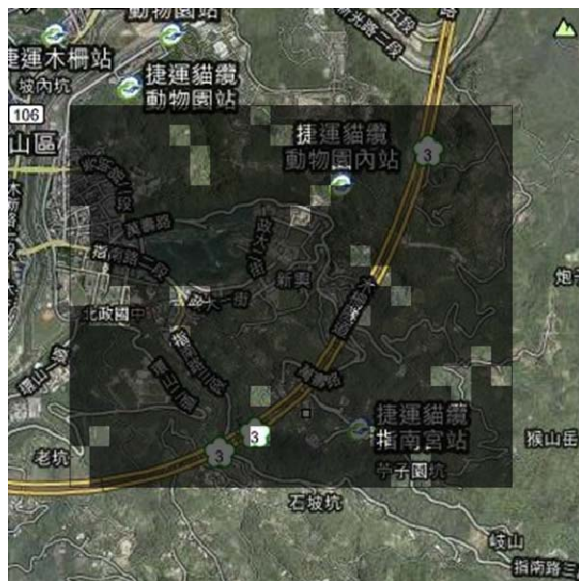


圖 5.11、適合設置主站之位置與交通路線圖套疊

## 5.6 延伸應用—網形加密

Kao and Bethel (1994)的研究中以網形中兩點間的基線精度來評估網形精度，當原始網形的精度未達門檻時，以 GPS 觀測補強網形精度。而由於 GPS 觀測時兩點間不需通視，因此網形中基線精度較差的部分即使不能通視也可以 GPS 觀測進行補強，而此研究結果中指出在選定適當的 GPS 距離觀測量加入平差模型後，可有效改善網形中的基線精度。

計算網形中每點坐標的觀測方程式可寫為

$$p: \Delta \mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i \quad (5.1)$$

式中  $\mathbf{x}$  為點位的坐標向量， $i, j = 1 \sim n$  且  $i \neq j$ ，以最小二乘法求解

$$\mathbf{A}(\bar{\mathbf{I}} + \mathbf{v}) + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{d} \quad (5.2)$$

其中

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{l}} \quad \bar{\mathbf{l}} = [\Delta \mathbf{x}_{ij}] \quad \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \Delta} \quad \Delta = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

利用最小自乘法，未知參數的品質可表示為：

$$\Sigma_{\Delta\Delta} = (\mathbf{B}^T (\mathbf{A} \Sigma_{\Pi\Pi} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{B} + \Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}}^{-1})^{-1} \quad (5.4)$$

其中  $\Sigma_{\Pi\Pi}$  為 GPS 觀測之基線向量精度， $\Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$  為原網形控制點之坐標精度。加密後之基線精度便可由  $\Sigma_{\Delta\Delta}$  中各點坐標精度推得。加密詳細流程如圖 5.12。



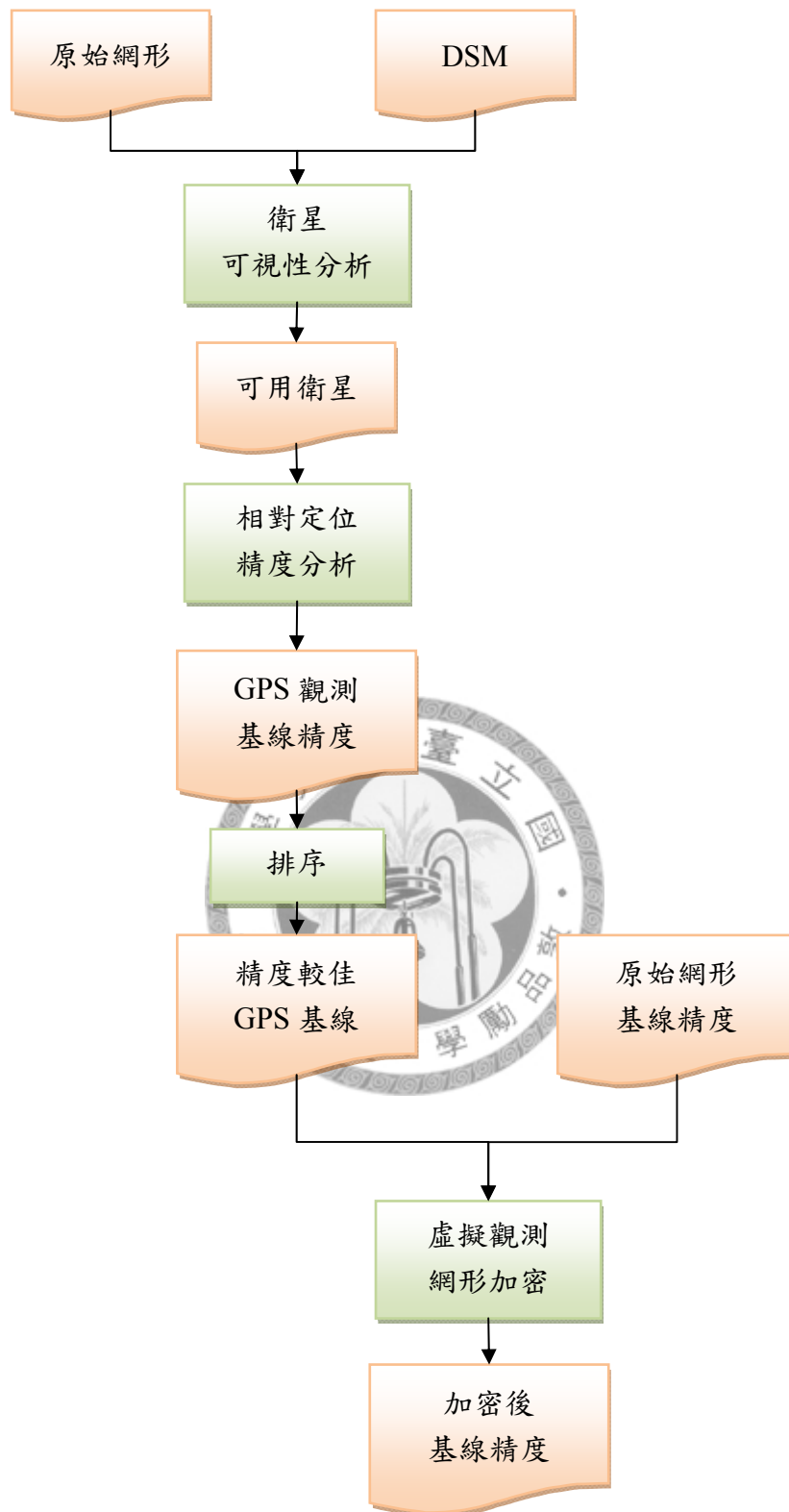


圖 5.12、以高精度 GPS 基線進行網形加密流程

此數值分析計算在地形遮蔽效應下，GPS 觀測對網形中基線精度的提升。控制點位置如圖 5.13，原始網形之控制點精度採用內政部二等衛星控制點，計算原

始基線精度及加入 GPS 觀測後的基線精度。

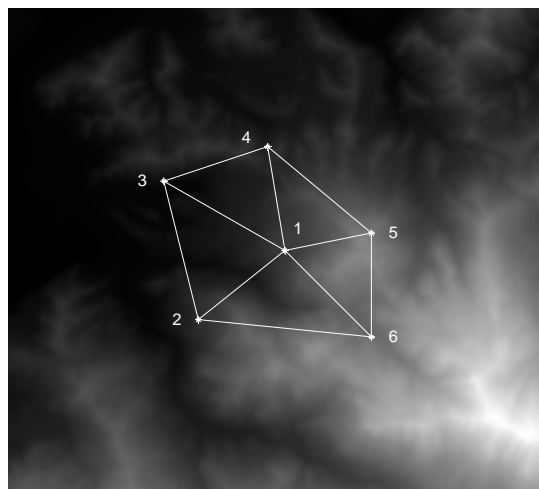


圖 5.13、原始網形控制點位置

首先計算原始網形基線精度及 GPS 定位下考慮地形及平坦地表下的所有基線精度，結果如表 5.14。顯示在考慮地形的情況下，可以得到每條基線有不同的基線精度，而考量人力及時間成本即可選擇精度較高的基線進行加密。但若不考慮地形，則所有基線精度皆相同，便無法找出精度較好的基線進行加密。

表 5.15 為加密結果，分別為 case 1：選擇精度較好的 5 條基線加密，case 2：在無法得知基線精度的情況下隨機選擇基線 14、26、34、45、56 加密(圖 5.14)，結果顯示 GPS 觀測雖然基線精度低於原始網形，但以重複觀測的概念，仍然可以增進網形之精度，且在選擇精度較好的基線加密時，網形中的基線精度能有所提升。

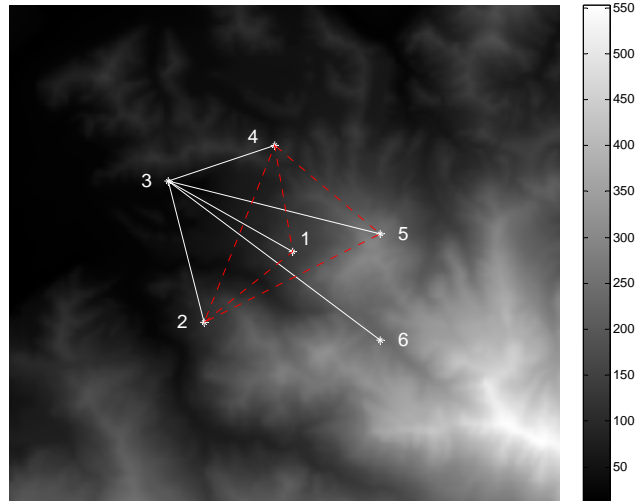


圖 5.14、以 GPS 基線進行網形加密 case 1(紅虛線)、case 2(白實線)

表 5.14、現有網形及 GPS 觀測基線精度

基線	現有網形精度		GPS 向量精度 考慮地形		GPS 向量精度 平坦地表	
	絕對精度(m)	ppm	絕對精度(m)	ppm	絕對精度(m)	ppm
12	0.044	68.563	0.131	204.360	0.129	258.642
13	0.044	54.126	0.235	289.881	0.129	201.965
14	0.044	72.007	0.135	221.140	0.129	212.602
15	0.044	83.360	0.131	248.464	0.129	169.807
16	0.044	61.377	0.149	208.108	0.129	150.332
23	0.044	53.076	0.235	284.256	0.129	156.825
24	0.044	40.776	0.135	125.228	0.129	120.071
25	0.044	38.916	0.131	115.995	0.129	105.944
26	0.044	43.332	0.149	146.924	0.129	128.679
34	0.044	69.270	0.220	347.270	0.129	204.473
35	0.044	34.934	0.220	175.136	0.129	107.394
36	0.044	29.019	0.246	162.150	0.129	86.213
45	0.044	54.813	0.134	166.516	0.129	192.779
46	0.044	34.786	0.154	122.012	0.129	103.209
56	0.044	73.162	0.149	248.065	0.129	161.652
平均	0.044	54.101	0.170	204.367	0.129	157.372



表 5.15、原始網形(二等衛星控制點)及加密後基線精度

	原始網形		考慮地形(case 1)		考慮地形(case 2)	
	絕對精度(m)	ppm	絕對精度(m)	ppm	絕對精度(m)	ppm
平均	0.044	54.101	0.042	51.199	0.043	53.141

由於採用內政部二等衛星控制點時，控制點精度在 x、y、z 方向各為 2 公分左右，雖然選擇較好的基線進行加密仍有效益，但優勢並不明顯。因此另外模擬當網形中之控制點精度 x、y、z 分別為 0.1 公尺、0.15 公尺、0.1 公尺的情況進行加密，分析結果如表 5.16，結果顯示採用精度較高的 5 條基線加密時得到的網形精度較隨機選 5 條基線加密得到的網形精度好 1.1 公分，顯示選擇精度較高的基線加密確實可以得到較佳成果。

表 5.16、原始網形( $\sigma_x = 0.1\text{ m}$ 、 $\sigma_y = 0.15\text{ m}$ )及加密後基線精度

	原始網形		考慮地形(case 1)		考慮地形(case 2)	
	絕對精度(m)	ppm	絕對精度(m)	ppm	絕對精度(m)	ppm
平均	0.292	359.035	0.187	219.680	0.198	245.610

## 第六章、結論與建議

### 6.1 結論

本研究針對衛星相對定位任務建立完整的地形效應分析模式，在數值分析中首先分析單點定位和相對定位的差異，在定位成果方面，相對定位可消除系統誤差，定位成果較單點定位佳。在預估定位精度方面，單點定位的標準差沒有考慮系統誤差所造成的影響，因此低估了定位的誤差，相對定位因為消除了測距路徑中的系統誤差，精度評估較為合理。此外在相對定位中各種誤差對各個接收器有不同程度的影響，本研究測試了主站位置誤差及衛星軌道誤差對定位精度的影響，結果顯示主站位置誤差對基線精度影響較小，衛星軌道誤差是較需考慮的因素。

在實地測試中將預測衛星數量與接收器實際觀測到的衛星數量進行比較，結果顯示實際衛星可視數量及基線精度與考慮 DSM 變化的分析較為相近，且與不考慮地形變化的分析相差甚遠，顯示本分析方法確實可提升相對定位品質評估之正確性，對於需要高精度之衛星定位任務有實質性的幫助。而在後續延伸應用中，本研究採用 DSM 及衛星星曆資料分析，可在確定主站位置後，計算區域內各點的基線精度；另外可計算主站品質效益指標，找出區域內適合作為衛星控制點的位置；最後在網形加密的分析中，考慮地形遮蔽效應能選擇較好的基線進行加密，節省人力及時間，並達到較好的加密成果。

地形遮蔽效應對相對定位品質產生的影響較單點定位更加複雜且顯著，且在短時間的 GNSS 相對定位測量中(例如即時性動態測量 Real-Time Kinematic, RTK)衛星分布無法在短時間內即時達到最佳網形，因此在進行短時間 GNSS 測量時分析地形效應的影響更為重要。而在靜態測量中，雖然可藉由長時間設站改善衛星分布不佳的情況，但在高遮蔽地形中定位精度不佳仍無法由靜態測量的方式解決，故分析地形遮蔽影響具有實質效益。

透過本研究分析方法，在考慮地形遮蔽效應下，前述應用皆能獲得可靠的分析成果，顯示此品質評估技術對各項衛星定位測量及其應用分析工作均能產生具體助益。

## 6.2 未來工作與建議

GPS 為目前發展最為完備的系統，因此本研究主要以 GPS 作為數值分析對象，但本研究所採用之數學模式在本質上適用於各個 GNSS 系統，故若能取得其他 GNSS 系統之軌道參數，則可依同樣的數學模式進行精度分析，得到更完整的分析結果。

此外，目前網形加密的分析中，僅考慮基線精度的因素，若能同時考量加密基線的精度及分佈，則可以達到最佳化的加密成果。而除了加密現有網形外，亦可分析現有網形強度，找出現有網形強度較弱的部分，搭配本研究之基線精度分析，找出適合增設控制點之位置。



## 參考文獻

- Beesley, B. J. (2003). Sky ViewshedModelling for GPS Use in the Urban Environment. *Proceedings of the Twenty-Third Annual ESRI User Conference*: San Diego, California.
- Chen, H. C., Huang, Y. S., Chiang, K. W., Yang, M., and Rau, R. J. (2009). The Performance Comparison between GPS and BeiDou-2/Compass: a Perspective from Asia. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 32(5): 679-689.
- Dalyot (2006). Intro-DTM. Retrieved June 17, 2011 from <http://www.technion.ac.il/~dalyot/docs/Intro-DTM.pdf>.
- Han, J. Y., and Li, P. H. (2010). Utilizing 3-D topographical information for the quality assessment of a satellite surveying. *Applied Geomatics*, 2(1): 21-32.
- IGS Products Table (2009). IGS Products. Retrieved August 18, 2010 from <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
- Kao, S. P., and Bethel J. S. (1994). Using GPS to Improving Existing Classical Network. *Journal of Surveying Engineering*, 120(2): 77-91.
- Lee, P. H. (2009). Utilizing Digital Surface Model for Evaluating the Quality of a Satellite Surveying. Master thesis, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 105 p.
- Leick, A. (2004). GPS Satellite Surveying. Wiley, New York.
- POSC (2000). Projections and Projected Coordinate Systems. Retrieved May 4, 2009 from [http://www.posc.org/Epicentre.2\\_2/DataModel/ExamplesofUsage/eu\\_cs34h.ht](http://www.posc.org/Epicentre.2_2/DataModel/ExamplesofUsage/eu_cs34h.ht)

ml.

Soler, T., and Smith, D. (2010). Rigorous Estimation of Local Accuracies. *Journal of Surveying Engineering*, 136(3): 120-125.

Taylor, G., Li, J., Kidner, D., Brunsdon, C., and Ware, M. (2007). Modelling and prediction of GPS availability with digital photogrammetry and LiDAR. *International Journal of Geographical Information Science*, 2(1): 1-20.

Xavier, P., and Costa, E. (2007). Simulation of the Effects of Different Urban Environments on Land Mobile Satellite Systems Using Digital Elevation Models and Building Databases. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(5-2): 2850-2858.

Zhang, K., Liu, G. J., Wu, F., Densley, L., and Retscher, G. (2008). An Investigation of the Signal Performance of the Current and Future GNSS in Typical Urban Canyons in Australia Using a High Fidelity 3D Urban Model. *Location Based Services and TelecartographyII: From Sensor Fusion to Ubiquitous LBS*, Springer, Heidelberg, pp. 407-420.

王蜀嘉、曾義星(2003)。高精度及高解析度數值地形模型測製規範工作報告。網址：<http://www.land.moi.gov.tw/docuploadfile/8-pw.pdf> (2011/04/22)

內政部地形圖資料庫網站。數值地形模型計畫。網址：[http://bmap.nlsc.gov.tw/bmap/ch/index.php?option=com\\_content&view=article&id=109&Itemid=114](http://bmap.nlsc.gov.tw/bmap/ch/index.php?option=com_content&view=article&id=109&Itemid=114) (2011/04/22)

內政部地政司衛星測量中心網站(2006)。衛星控制點設置。網址：[http://www.moidlassc.gov.tw/satellite/Satellite/Satellite\\_06.htm](http://www.moidlassc.gov.tw/satellite/Satellite/Satellite_06.htm) (2011/04/22)

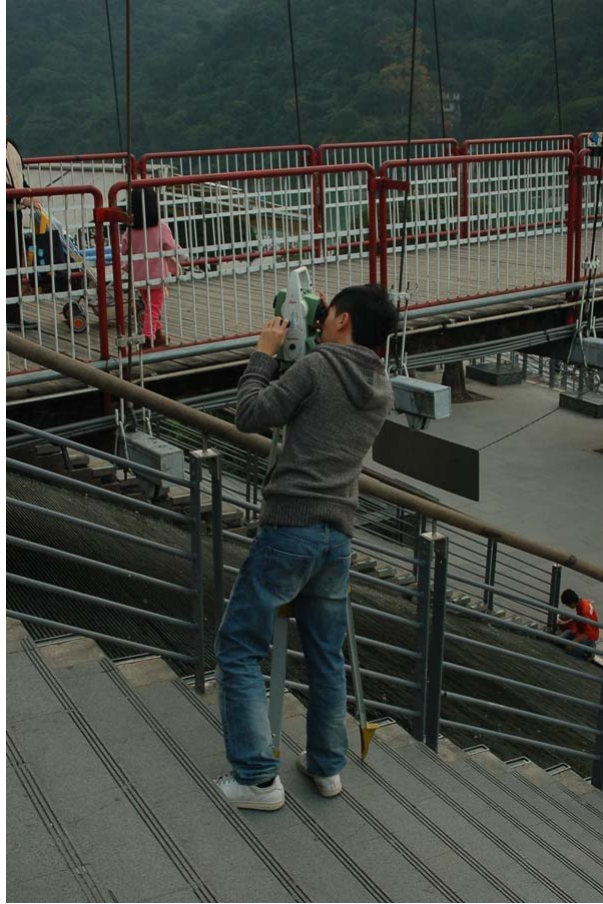
內政部地政司衛星測量中心網站(2006)。數值地形模型常見問題釋疑。網址：

[http://www.gps.moi.gov.tw/satellite/DTM/DTM\\_03.htm](http://www.gps.moi.gov.tw/satellite/DTM/DTM_03.htm) (2011/04/22)

曾清涼、儲慶美(1999)。GPS 衛星測量原理與應用。國立成功大學衛星資訊研究中心，台北市。



## 作者簡歷



姓名： 吳宇

學歷： 國立台灣大學土木工程研究所測量組

國立政治大學地政學系土地測量與資訊組

台北市立建國高級中學

E-mail： r98521114@ntu.edu.tw