

100 年度臺灣本島近岸船載重力測量 作業

期末報告修正本

計畫主持人：黃金維 教授

國立交通大學 土木工程學系

共同主持人：陳國華 副教授

國立台北大學 不動產與城鄉環境學系

委託單位：內政部國土測繪中心

執行單位：國立交通大學 土木工程學系

中興測量有限公司

中華民國 100 年 12 月 27 日

摘要

本案蒐集臺灣本島及周遭的重力資料，包括陸地重力資料、船測重力資料、空載重力資料以及衛星測高重力。針對近岸的海上重力資料不足的部分，本年度完成了臺灣西南沿海近岸的重力測量，利用交叉點評估精度，可達 1.33mgal。本案另一工作項目為在西南沿岸選擇 20 點水準點做 GPS 的連續 24 小時觀測，利用得到的橢球高與現有的正高資料，可用來檢核大地起伏精度。用蒐集的重力資料計算新的臺灣區域大地起伏模型，在各條檢核線上的精度皆優於 10 公分。針對臺灣西南沿海的檢核線來看，加入本案船載重力後的大地起伏模型精度提升了 2.4 公分，可看出本組重力資料的貢獻。

關鍵字：船測重力、大地水準面、大地起伏檢核

Abstract

Various gravity data around Taiwan were collected in this project, including land gravity data, marine gravity data, airborne gravity data and altimetry-derived gravity data. To fill the deficiency of near shore gravity data, a shipborne gravimetry using small vessel was accomplished at the east-west sea of Taiwan. The high accuracy of the shipborne gravity data reached the level of 1.33 mgal by crossover analysis. The other target of this project was to do the GPS survey on the 20 leveling points along the shore, these GPS/leveling points was applied to validate the geoid model. Using all these dataset above to compute the new Taiwan geoid model

showed that the accuracy of it is better than 10 cm on each testing route. After adding the shipborne gravity data at the east-west sea of Taiwan the accuracy of the new geoid model were improved as good as 2.4 cm, which apparently was contributed from the integration with our new shipborne gravimetry.

Keywords : shipborne gravimetry 、 geoid 、 geoid model validation

目錄

圖目錄.....	IV
表目錄.....	VII
第一章 前言.....	1
1-1 計畫緣由.....	1
1-2 計畫目的.....	4
1-3 辦理之工作項目.....	4
第二章 重力資料蒐集.....	6
2-1 陸測重力資料.....	6
2-2 船測重力資料.....	9
2-3 空載重力資料.....	13
2-4 測高衛星重力資料.....	19
第三章 近岸船載重力測量.....	22
3-1 作業範圍.....	23
3-2 陸上基站規劃.....	25
3-3 船隻 GPS 動態定位處理方法.....	29
3-4 船載重力資料處理方法.....	34
3-5 船測重力測量成果及精度分析.....	38
3-6 重力資料整合.....	45

第四章 陸上 24 小時 GPS 測量	50
4-1 點位規劃.....	50
4-2 GPS 測量外業流程	52
4-3 陸上 GPS 外業觀測資料處理流程.....	54
4-4 陸上 GPS 觀測資料計算方法.....	56
4-5 已知點檢核.....	62
4-6 閉合差分析.....	64
第五章 大地起伏計算	66
5-1 大地起伏計算方法.....	66
5-2 大地起伏模型精度驗證方法.....	71
5-3 大地起伏成果及精度驗證.....	72
第六章 繳交項目	78
第七章 結論與建議.....	80
7-1 結論	80
7-3 未來規劃.....	82
參考文獻.....	83
附錄 1 船測交叉點資訊	87
附錄 2 陸上 24 小時 GPS 觀測時段表.....	89
附錄 3 陸上 24 小時 GPS 觀測閉合差分析表.....	91

附錄 4 投稿文章	98
附錄 5 規格標採購評選委員所提意見及其辦理情形	101
附錄 6 期末報告初稿審查意見及修正辦理情形	102

圖目錄

圖 1-1 工作進度甘梯圖	5
圖 2-1 (A)陸測重力點位分布圖(1980~2003)，(B)陸測重力點位分布圖 (2004~2006).....	7
圖 2-2 100 花東及山區重力施測點位.....	8
圖 2-5 各離島海域船載重力資料分布圖	11
圖 2-6 船載重力資料分布圖(HSU ET AL., 1998)	12
圖 2-7 空載重力資料分布(a) Campaign 1；(b) Campaign 2；(c) Campaign 3	16
圖 2-8 平差處理後的空載重力網格 (a) Campaign 1 (b) Campaign 2(c) Campaign 3	19
圖 2-9 測高海洋重力異常	21
圖 3-1 船測重力處理流程圖	22
圖 3-2 近岸船載施測範圍	24
圖 3-3 岸基控制點樁標規格示意圖	26
圖 3-4 岸基控制點埋設規格示意圖	26
圖 3-5 岸基控制點重力觀測	28
圖 3-6 重力資料與 GPS 資料時間差	35
圖 3-7 船載重力實測點與內插點示意圖	39
圖 3-8 近岸船載測量重力異常.....	42

圖 3-9 交叉點重力異常差值 (平差前)	43
圖 3-10 交叉點重力異常差值 (平差後)	44
圖 3-11 平差前後交叉點差異直方圖	45
圖 3-12 自由空間重力異常網格	48
圖 3-13 布格重力異常網格	49
圖 4-1 24 小時 GPS 觀測點位分布圖	52
圖 4-2 GPS 外業測量	54
圖 4-3 GPS 外業觀測資料處理流程圖	56
圖 4-4 BERNESE 軟體計算流程圖	58
圖 4-5 已知點分布圖	63
圖 5-1 三種不同頻率的大地起伏，其中 N_{ref} 、 N_{res} 和 N_{rtm} 分別表示低 頻、中頻與高頻的大地起伏。	67
圖 5-2 剩餘地型模型示意圖	68
圖 5-3 大地起伏及橢球高 H+N 之幾何關係	72
圖 5-4 臺灣新大地起伏網格	73
圖 5-5 大地起伏模型檢核線分布	74
圖 5-6 TWGEOID 與 TWGEOID100 差異分布	76
圖 5-7 在新增檢核點上加入船測重力前後之大地起伏模型與幾何法 大地起伏差異	77

圖 7-1 NGDC 在臺灣南部海域的分布 81

表目錄

表 2-1	陸測重力資料一覽.....	8
表 2-2	各離島海域船載重力交叉點差異量統計 (unit: mgal)	10
表 2-3	各離島海域船載重力經平差後交叉點差異量統計 (unit: mgal)	10
表 2-4	船測重力資料一覽	12
表 2-5	空載重力資料一覽	19
表 3-1	岸基控制點一覽表	25
表 3-2	引測重力點位一覽表	27
表 3-3	船載重力測量交叉點差異分析成果 (單位：mgal)	41
表 4-1	24 小時 GPS 規劃點位一覽表	51
表 4-2	24 小時陸上 GPS 測量成果表	60
表 4-3	24 小時 GPS 靜態解 RMS 精度分析.....	61
表 4-4	已知點坐標較差表	64
表 5-1	大地起伏精度評估 (單位: m)	75
表 5-2	Twgeoid 與 Twgeoid100 差異統計分析 (單位：cm)	76

第一章 前言

1-1 計畫緣由

目前臺灣本島西部平原地區已廣布重力點，但沿岸與海洋交接處重力資料尚屬缺乏，且衛星測高資料近岸雜訊多，致近岸附近大地水準面模型精度無法提升，本案係為加強本島近岸船載重力測量，以強化此區帶之大地水準面模型精度。

由於船隻需於近岸潮間帶作業，潮位的高低影響船隻行駛安全。本案測量作業牽涉船載重力測量資料、船隻 GPS 動態測量資料等資料組合分析化算至大地水準面模型，採用之學理技術與資料搜集方法都將影響化算成果之正確性與精度。

本計畫為 4 年期計畫，100 年度為第 1 年，主要辦理臺灣本島西南近岸海域，101、102、103 年度預定繼續辦理臺灣本島西北、東北、東南近岸海域之近岸船載重力測量作業。

近年來我國在物理大地測量方面有諸多研究及應用，內政部於民國 86 年擬定「國家基本測量控制點建立及應用計畫」，並奉行政院核定自民國 88 年度起至 91 年度止，分四年在臺灣本島施測 2065 個一等水準點，並於一等水準點上加測 GPS 定位及重力測量後，臺灣本島陸地上之重力值觀測及重力成果建置已具初步之基礎。為求強化臺灣地區重力點之分布密度，內政部另於民國 93 年委託學術界辦理「空

載重力測量工作」，以求快速有效的補強山區之重力測量成果；同年度亦委託民間測量公司辦理臺灣地區「一、二等重力測量工作」，在現有均勻分布之 GPS 衛星控制點之架構上，施測約 4500 點之高精度地面重力值，並藉此完成我國重力控制網之布設工作。

由於海洋重力測量資料，可提供做為國家高精度基本測量、海洋資源開發、海面與海底工程設計和施工、船艦精密導航，以及海底地殼活動和海洋潮汐之研究等運用，故海洋重力測量所提供之數據，是極為重要且珍貴之大地觀測資料。因此，內政部於 95 年及 97 年各推行了航高 5000 英尺的低航高空載重力測量工作，範圍分別為臺灣東部海面及西部的海面包括東沙群島，皆委託交通大學完成。

在應用方面，國土測繪中心委託交通大學辦理臺灣本島與離島高程連測計畫，宗旨為將臺灣本島之高程系統 TWVD2001（由基隆平均海水面起算）與各離島之高程系統（由當地平均海水面）連結，計畫所包括之區域為小琉球、綠島、蘭嶼以及澎湖，共為三年期的計畫，已於民國 99 年完工。

除了上面所提的高程連結之外，利用高精度、高密度且分布均勻的重力資料，可以計算出良好的大地起伏，也可有許多應用，例如目前全球各國皆致力於高程現代化的推行，利用 GPS 取代傳統的水準測量。此外大地起伏對於光達以及防災應用上也是非常重要。現今大

地起伏的計算方法已發展得十分成熟，國內外亦有為數眾多的學術論文做相關探討，現今的階段，大地起伏的精度高低最主要乃是取決於重力資料的精度，以及分布的密度。而世界各先進國家無不傾力於增加重力資料的密度。

以亞洲各國舉例，馬來西亞的 MyGEOID 計畫，利用高密度空載重力測量補足境內重力缺乏的地區，以求得良好的大地起伏。日本利用直昇機搭載重力儀，測得日本北陸的能登半島淺水區域的重力並同時分析地理結構。南韓亦有完整空載重力資料，並與美國國家大地測量局(NGS)就空載重力保持合作往來的關係。此外，美國為了獲取更多且分布均勻的重力資料，更推行了大範圍的空載重力測量，以期獲得更佳的大地起伏模型，再搭配衛星定位技術可獲得精度 2cm 以內的高程基準面，名為 GRAV-D 計畫，預估於 2022 年完成。

與其他國家相比，對於重力資料的完整性以及相關的應用，我國雖處於領先位置，但對於臺灣環海周圍的近岸重力，卻缺乏整體規劃的高密度測量資料，雖然有低航高空載資料的輔助，但與船載重力相比，若船隻的航速以 10 節計算，飛機的時速快了將近 20 倍，亦即若用同樣的濾波器寬度來處理資料，船測資料的空間解析度可優於空載 20 倍的水準。有如此高空間解析度的資料，除了應用在大地起伏計算上，亦可研究相應的地理構造，無論在實際應用或是科學研究上，

皆能貢獻相當成果。

1-2 計畫目的

本計畫之主要目的為完成台臺灣西南海域近岸的船載重力測量，補足過去此地區重力資料不足或精度不好的情形，並將近岸船測資料加入大地起伏計算。其中一工作項目為在臺南西南沿海地區的 20 點水準點進行高精度的 GPS 的 24 小時測量，將所求得之橢球高減去已知的正高值可得實測的大地起伏值，利用這 20 點實測大地起伏的資料加以判斷本案的船測資料對於大地起伏的貢獻。

1-3 辦理之工作項目

本案應辦理之工作項目如下：

1. 擬定作業計畫書及船載重力航程規劃圖
2. 蒐集國內重力測量成果資料並分析
3. 陸上相對重力儀測量
4. 船載重力測量資料蒐集及分析
5. 陸上 GPS 連測外業
6. 第二期成果繳交
7. 精算大地水準面模式
8. 檢核大地水準面模式精度
9. 測量成果資料彙整

10. 期末報告

本團隊辦理至今共完成上述 10 項項目，其內容詳述於之後章節，

各項目執行天數及進度整理於圖 1-1：

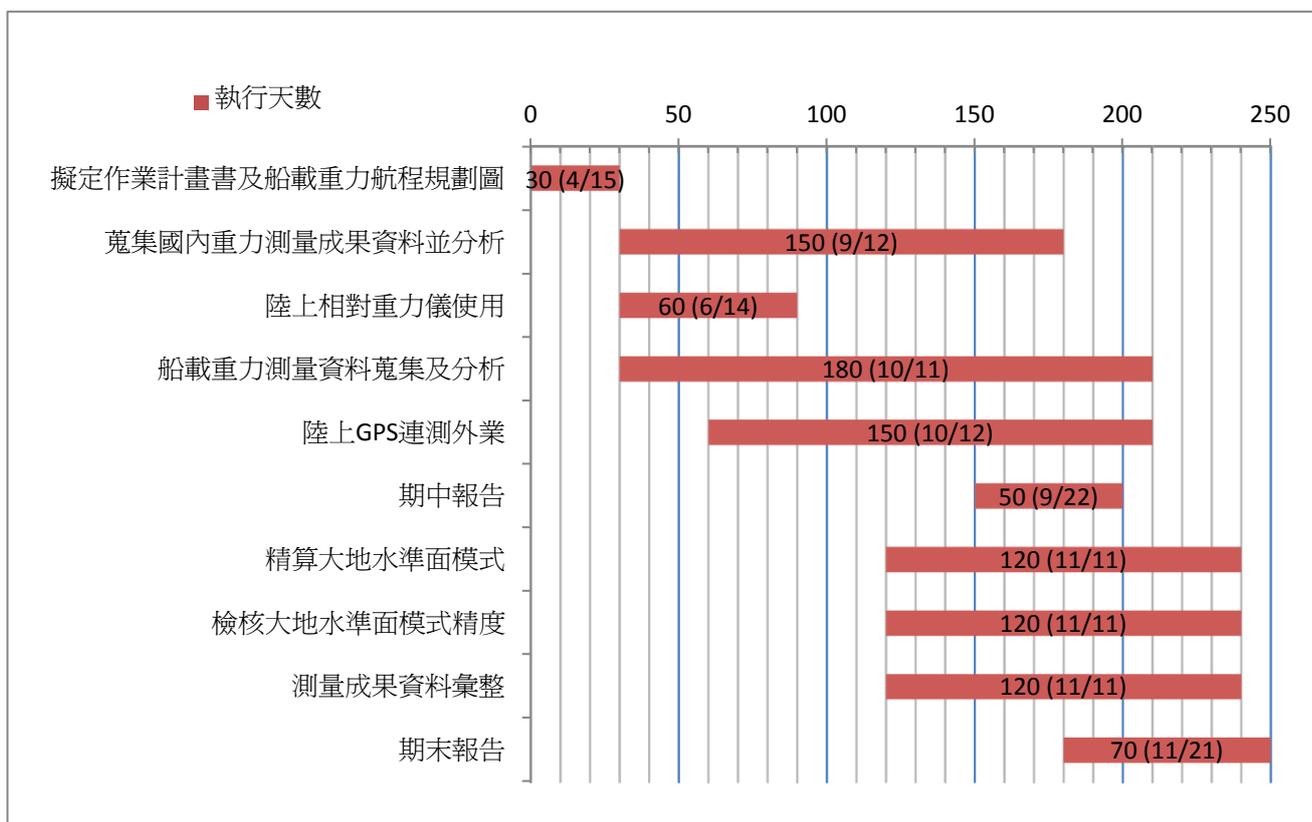


圖 1-1 工作進度甘梯圖

第二章 重力資料蒐集

本章節內容旨在說明本團隊收集的各組重力資料，就其年代、分布及精度指標做一敘述，內容涵蓋陸地重力測量、船載重力測量、空載重力測量以及測高重力。

2-1 陸測重力資料

現有的陸測重力點為臺灣近 20 年來(1980~2003)，經歷中央研究院(Yen et al., 1990; Yen et al., 1995)、中國測量學會(黃金維等人,1998)、內政部(黃金維, 2001、陳春盛, 2003)等單位所蒐集共 3641 點重力觀測值，重力資料的分布如圖 2-1 (a)所示。重力測量主要是沿著水準點及三角點進行測量，施測範圍大部分是在平地，由於山區施測困難，因而只有少部分的資料位於山區，使用儀器為 LCR-G 形重力儀(LCR,1997)。由於有些重力資料過於老舊，因此除了將所有資料整合化算至相同參考橢球體 GRS80 及坐標系 TWD97 (Hwang and Wang (2002))，並進行嚴密的環境系統誤差改正及網形平差。

內政部委託中興測量於 2004~2006 年間所辦理的臺灣一、二等重力測量，其中包括 655 個一等重力點，3690 個二等重力點，並加上 11 點已知重力點做平差約制，本組資料共 4356 點重力觀測值，重力資料的分布如圖 2-1 (b) 所示。使用的儀器為 L&R Graviton EG 和 Scintrex CG-5 重力儀。重力觀測點大多於平坦地區觀測，重力異常

範圍皆約由-60 至 320mgal 進行變化，網形平差後的平均精度約為 $\pm 0.039\text{mgal}$ 。

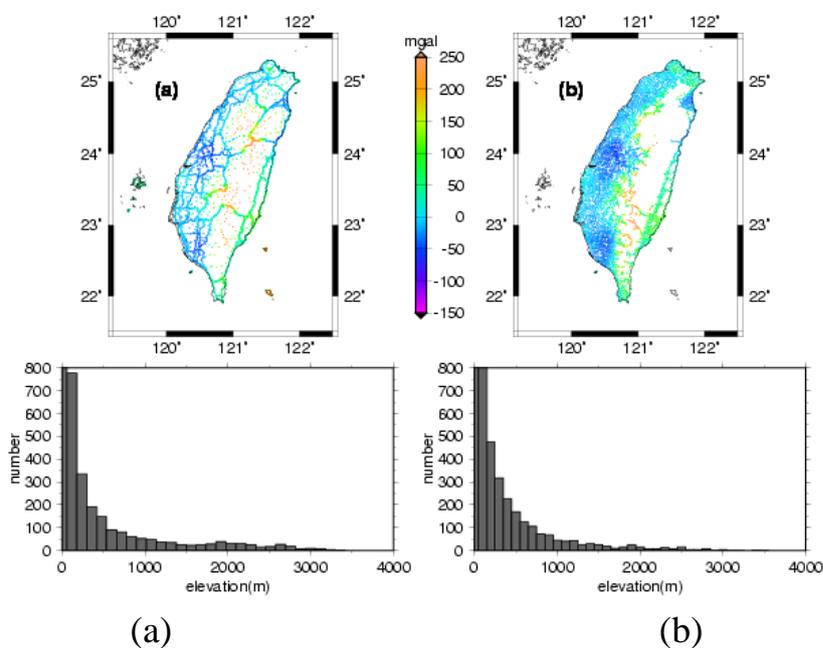


圖 2-1 (a)陸測重力點位分布圖(1980~2003)， (b)陸測重力點位分布圖(2004~2006)

依契約書規定，本案亦需加入 100 年度花東及山區重力測量工作成果，此組資料為內政部國土測繪中心委託中興測量有限公司完成，施測點位分布如下圖 2-2，包含 6 個絕對重力點，7 個一等重力點，及 258 個二等重力點。本組資料亦經過平差處理後納入大地起伏計算，網形平差後的平均精度約為 $\pm 0.042\text{mgal}$ 。

本節各組資料整理於表 2-1，就其施測時間、儀器、數量及精度做一說明。

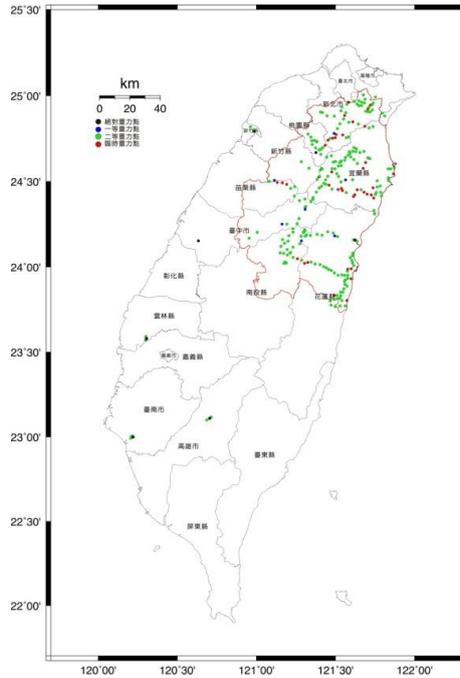


圖 2-2 100 花東及山區重力施測點位

表 2-1 陸測重力資料一覽

時間	儀器	重力資料數量	平均精度 (mGal)	參考文獻	來源
1980~1987	LCR-G	603	N/A	Yen et al. (1990); Yen et al. (1995)	中央研究院地球科學研究所
1. 1986~1988 2. 1997~1999	LCR-G	1. 276 2. 747	N/A	(黃金維等, 1998)	中國測量工程學會
2000~2001	LCR-G	1020	0.070	(黃金維, 2001)	內政部, 一等一級水準點重力資料
2001~2003	LCR-G	1092	0.070	(陳春盛, 2003)	內政部, 一等二級水

					準點重力 資料
2004~2006	Graviton EG / CG-5	4356	0.039		內政部，臺 灣一、二等 重力點重 力資料
2011	Graviton EG	271	0.042		內政部， 100 年度 花東及山 區重力

2-2 船測重力資料

1. 各離島海域船載重力測量

本組資料來自 95、96、97 年度臺灣本島與離島高程連測計畫案，由內政部國土測繪中心提供，資料範圍為本島沿岸如基隆及離島沿岸如澎湖、小琉球、綠島及蘭嶼進行各離島海域船測重力測量，如圖 2-5 所示，儀器為 L&R Air-Sea II (L&R, 2003)，並使用單窗寬度約 120-150 秒之高斯濾波器處理，再將各條航線轉彎處的資料拿掉，以及去掉與已知重力網格相比差異量明顯過大的部分資料之後（原因有 GPS 斷訊、測船的劇烈傾斜、船上電力不穩導致重力儀電腦關機），保留有交叉點可供平差的處理的測線，並使用交叉點之重力異常值差異量來評估船測重力整體精度。測線範圍以各連測點為圓心半徑 50

公里內，南北航線在 0~20 公里內以 2' 為間距，20~50 公里及東西航線以 4' 為間距；總共南北向航線共 89 條，東西向航線共 31 條；航速為每小時 10 海里為原則，每秒觀測一筆資料(1Hz)。

表 2-2 進一步的顯示所有各離島海域測區重力觀測量的統計資訊。經過平差改正後可修正每一條航線所測得之船測重力值，將修正後之重力值重新作交叉點分析，得到的結果如表 2-3 所示。

表 2-2 各離島海域船載重力交叉點差異量統計 (unit: mgal)

Location	Max	Min	Mean	Std
基隆	38.120	-78.060	7.715	16.293
澎湖	48.400	-19.710	24.617	10.640
小琉球	36.910	-33.860	-2.133	11.050
綠島	169.450	-50.180	34.115	51.902
蘭嶼	178.710	-79.060	19.571	56.075

表 2-3 各離島海域船載重力經平差後交叉點差異量統計 (unit: mgal)

Location	Max	Min	Mean	Std
基隆	2.358	-6.121	0.000	1.895
澎湖	2.737	-2.734	0.000	0.882
小琉球	4.7453	-4.281	0.000	1.944
綠島	2.050	-2.152	0.000	0.653
蘭嶼	3.292	-5.327	0.000	1.593

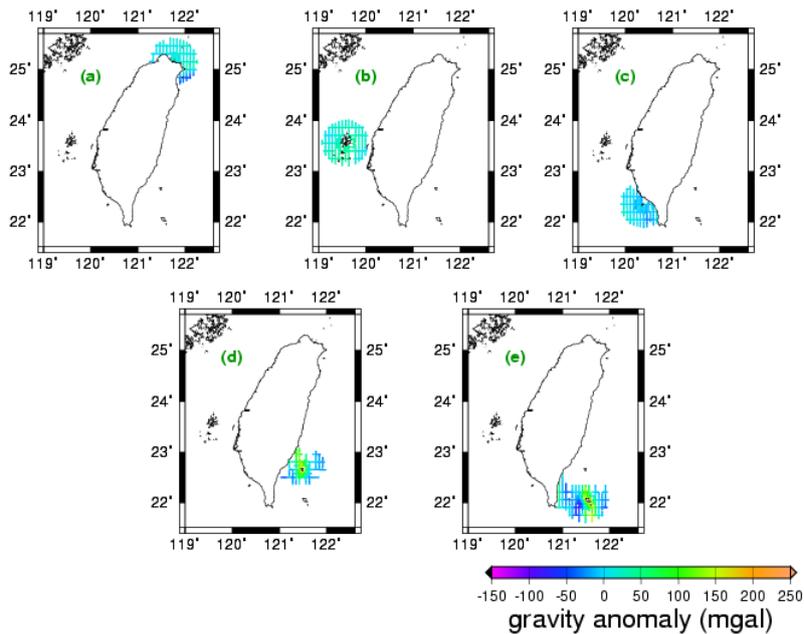


圖 2-5 各離島海域船載重力資料分布圖

2. 臺灣環海船載重力測量

中央大學於 1996 年使用 R/VI' Atalante KSS30 船載重力儀所蒐集之重力資料 (Hsu et al., 1998) 及 National Geophysical Data Center(NGDC)所下載之船測重力資料，如圖 2-6 所示，經篩選後共約四千多點。經交叉點精度分析後，R/VI' Atalante KSS30 資料的交叉點差值的標準偏差為 2.6 mgal，全部船測資料則為 11.2 mgal。

本節各船測資料整理於表 2-4，就其施測時間、儀器、濾波罩窗半徑、精度做一說明。

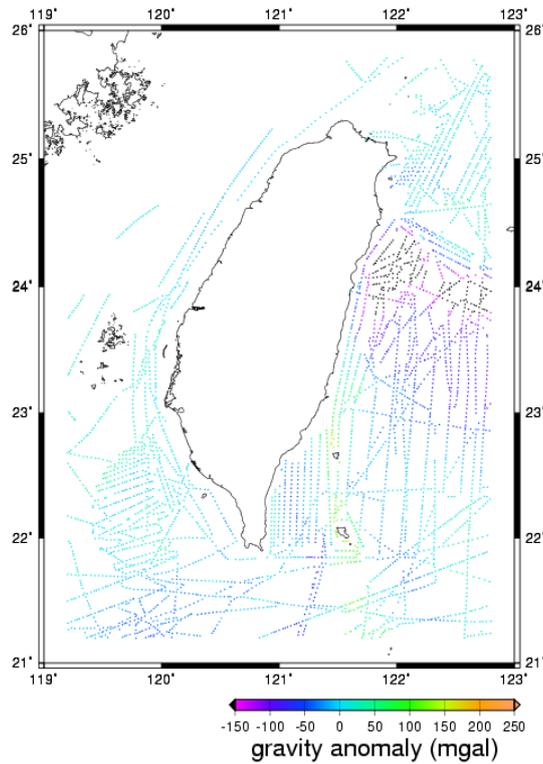


圖 2-6 船載重力資料分布圖(Hsu et al., 1998)

表 2-4 船測重力資料一覽

船測重力資料	時間	儀器	重力資料數量	濾波罩窗半徑	交叉點分析精度 (mGal)	參考文獻	備註
臺灣環海	1996 之前	R/VI' Atalante KSS30	4084	N/A	11.2	Hsu et al. (1998)	本組資料包含 NGDC 重力資料
基隆近岸	2006	L&R S130	1760	120~150 seconds	1.895	95 年度臺灣本島與離島高程基準連測計畫	內政部國土測繪中心

小琉球 近岸	2006	L&R S130	1923	120~150 seconds	1.944	95 年度 臺灣本 島與離 島高程 基準連 測計畫	內政部 國土測 繪中心
綠島近 岸	2007~ 2008	L&R S130	1737	120~150 seconds	0.653	96 年度 臺灣本 島與離 島高程 基準連 測計畫	內政部 國土測 繪中心
蘭嶼近 岸	2008~ 2009	ZLS Dynamic Gravimeter	1939	120~150 seconds	1.593	96 年度 臺灣本 島與離 島高程 基準連 測計畫	內政部 國土測 繪中心
澎湖近 岸	2010	ZLS Dynamic Gravimeter	1906	120~150 seconds	0.882	97 年度 臺灣本 島與離 島高程 基準連 測計畫	內政部 國土測 繪中心

2-3 空載重力資料

臺灣本島為地勢狹長且崎嶇複雜的地形，四周環海，且境內超過 70% 為高山或丘陵所覆蓋，尤以中央山脈超過三千多公尺之地勢為最，自由空間重力異常最高可達 450mgal，臺灣東部海域地形構造較為複

雜且為斷層帶交接處，自由空間重力異常驟降至-250mgal，為臺灣附近重力變化較大的區域，此外還有黑潮經過此區域。臺灣海峽為典型的淺水區域，船測重力資料較為稀少，過去皆以測高重力為主要的重力資料來源，然而此區域的地形較淺，海潮、濕對流層參數無法精確估計(Hwang and Hsu, 2008)，測高波容易受到複雜地形及近岸陸地的干擾導致測距精度不佳(Deng, 2003)。受限於此地理環境，重力測量工作難以在山區、部分海域及海陸交接處實行，導致重力資料分布不均，因而內政部於 2004~2009 年辦理 3 次空載重力測量工作計畫，分別為(a) Campaign 1 (island-wide over Taiwan): average altitude is 5156m，(b) Campaign 2 (Kuroshio Current): average altitude is 1620m，(c) Campaign 3 (Taiwan Strait and South China Sea): average altitude is 1620m，如圖 2-7 所示，並由交通大學執行之。

Campaign 1 已於 2005 年 5 月結案(黃金維，2005)。計畫從 2004 的 7 月 6 日第一次施測起，至 2005 年 3 月 21 日為止，共進行了 43 個測量工作天，總時數將近 200 小時，儀器為 L&R Air-Sea II (LCR, 2003)。施測航線圖如圖 2-7(a)，南北向航線共 64 條、航線間隔 4.5 公里；東西向航線共 22 條、航線間隔 20 公里；東北-西南向航線共 10 條、航線間隔 5 公里；西北-東南向航線共 6 條、航線間隔 30 公里。測量之航高為 16000 英尺，即約 5156 公尺；航速為每小時 160 海里，約每小時 306 公里。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 306

km/hr，約每 85 公尺測得一筆重力值，並使用罩窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

Campaign 2 主要的測量區域為臺灣東部海域，該海域有地球重要的洋流「黑潮」經過，藉由空載重力測量的方式，取得黑潮流域的重力資料，則有助決定黑潮區域之大地水準面，且若能結合衛星測高資料，則可用於決定黑潮之平均海流與季節、跨年變化，並可作為臺灣本島及離島高程基準連測之重要數據。自 2006 年 3 月 6 日第一次施測起，至 2008 年 8 月初為止，因內政部所提供之飛機故障維修、重力儀儀器調度及天候影響等因素，經展期三次，始完成約 30 個空載外業測量工作天，飛行總時數約 130 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。施測航線圖如圖 2-7(b)，南北向航線共 36 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 7 條、航線間隔 60 公里。考慮到地形起伏、施測精度、施測時間、飛航安全等因素，飛行航高定為 1620 公尺(5000 英尺)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公尺能測得一筆重力值，並使用罩窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

Campaign 3 測量區域為臺灣西部海域與東沙群島，除了可補足西部沿岸的重力資料，其成果對於臺灣西部海域大陸棚的研究亦有所貢獻。外業測量工作時程始於 2008 年 12 月 9 日至 2009 年 9 月 13 止，

共 27 個工作天，飛行總時數約 115 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。規劃之航線圖如圖 2-7(c)，南北向航線共 54 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 15 條、航線間隔 25 公里。飛行航高定為 1620 公尺(5000 英呎)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公尺能測得一筆重力值並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

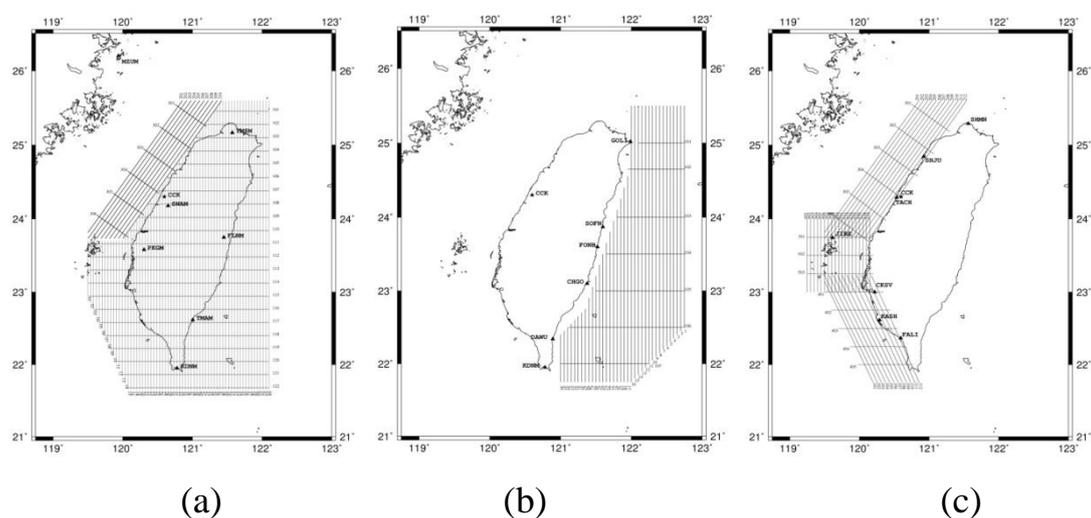


圖 2-7 空載重力資料分布(a) Campaign 1 ；(b) Campaign 2 ；
(c) Campaign 3

與船測資料相比，因空載重力資料並非如船測資料為貼在海水面上進行，實際應用時尚須進行向下延續的動作，故對於諸多系統誤差，如 *Evotv* 效應所造成的誤差、重力儀的漂移誤差、重力基準誤差、重力參考場的不一致等(Wessel and Watts, 1988)需再特別處理。為了減少測量時產生的系統誤差，發展交叉點平差法模式化每條航線重力異

常的偏差值(bias)及漂移值(shift)，雖然成功吸收了部分的系統誤差，然而沿著測線的重力訊號依然存在著帶狀的系統誤差(如圖 2-8)，造成的原因可能是交叉點太少導致多餘觀測量不足，使得無法非常有效的估計系統誤差。以 Campaign 1 其中一條測線為例，然後將一測高重力網格向上延續至空載資料的高度並內插出相對於空載重力位置的重力異常。向上延續的公式如下：

$$G(u, v)|_{z=h} = e^{-2\pi f_r} G(u, v)|_{z=0} \quad (2-19)$$

其中 $f_r = \sqrt{u^2 + v^2}$ 為徑向頻率(radial frequency)， $G(u, v)|_{z=h}$ 和 $G(u, v)|_{z=0}$ 分別為重力在 h 高度及海水面上的傅立葉變換，為了修正此偏移量，假設其誤差來源皆由儀器漂移、基站、基準偏移所造成，再假設空載重力系統誤差為時間的二次多項式，公式如下：

$$\delta g = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 \quad (2-20)$$

其中 d_0 為常差(bias)， t 為自某一參考時刻起算之時間。然後利用最小二乘法求解後，再以平差後的差值來改正原有的空載重力。利用(2-20)式擬合空載重力和測高重力的差值，經平差後，獲得 d_0 、 d_1 及 d_2 等係數分別為 3.347、-0.215 及 0.017，且空載重力和測高重力差值的平均值和標準差從平差前的 4.368 和 2.795mgal 降到平差後的 0.000 和 2.048mgal。

為了後續的重力整合，本研究使用向下延續方法(downward

continuation) 搭配去除回復法將空載重力異常資料約化至海平面上 (Hsiao and Hwang, 2011)，向下延續法的公式如下：

$$G(u, v) \Big|_{z=0} = e^{2\pi h f_r} S_G(f_r) G(u, v) \Big|_{z=h} \quad (2-21)$$

其中 $S_G(f_r)$ ：高斯濾波

為了使空載重力異常向下延續至海平面後仍然可以得到穩定的結果，先移除透過參考重力場求得之長波長重力分量及透過地形資料求得之短波長重力分量而得到殘餘重力異常，再將此殘餘重力異常透過公式(2-21)向下延續至海平面，再將海平面之長短波長之重力分量回復之。地形重力效應是使用 Gaussian quadrature 逐點計算其重力效應 (Hwang et al., 2003)。Hsiao and Hwang (2011)認為地形重力效應的考量於向下延續的應用中，只有在地勢變化較大的區域才有明顯的效果，海面上之空載重力應用此法進行向下延續反而有可能會使結果變差，因此本研究只有橫跨臺灣中央山脈的 Campaign 1 在其向下延續時才有考慮地形重力效應，然而，測區幾乎在海平面上的 Campaign 2 及 Campaign 3 在其向下延續時則並沒有考慮地形重力效應。

本節各組資料整理於表 2-5，就其施測時間、儀器、單窗濾波半徑及精度做一說明。

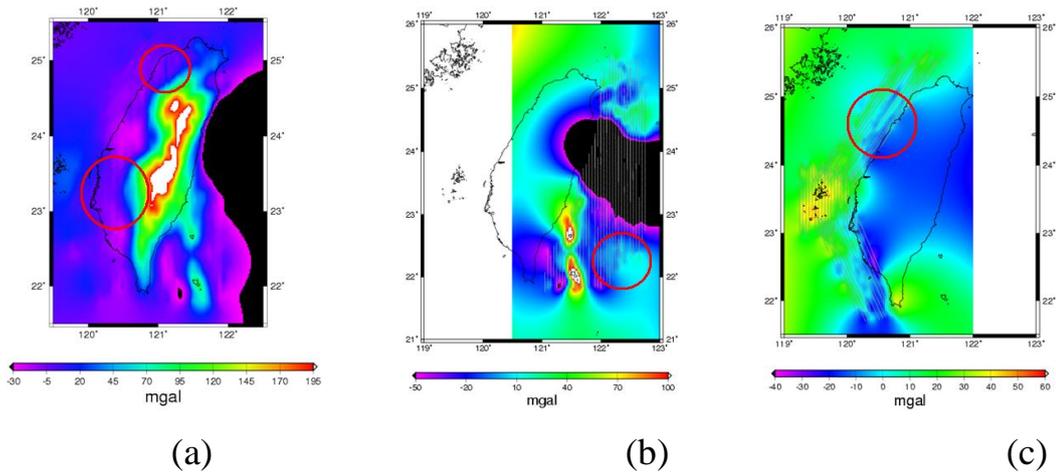


圖 2-8 平差處理後的空載重力網格 (a) Campaign 1 (b) Campaign 2(c)

Campaign 3

表 2-5 空載重力資料一覽

時間	儀器	濾波罩窗半徑	交叉點分析精度 (mGal)	來源	備註
2004~2005	L&R S130	150~180 seconds	2.792	空載重力測量工作	航高:5156 公尺
2006~2008	L&R S130	150~180 seconds	2.675	臺灣東部海域空載重力測量工作	航高:1620 公尺
2008~2009	L&R S130	150~180 seconds	2.573	西部及東沙海域空載重力測量工作	航高:1620 公尺

2-4 測高衛星重力資料

為了填補海上及沿岸船載重力資料之不足，本章發展多測高數據反演臺灣附近測高海洋重力異常模型，並比較幾種不同波形重定技術，

試圖找出此區域最理想之 retracker 來改善沿岸因波形不佳導致測距精度不良的情形。測高數據分為重複週期與非重複週期數據兩類，重複週期資料包括 Geosat/ERM、ERS-1/35d(1.5-year mean)、ERS-2/35d(2-year mean)和 T/P(5.6-year mean)，並將其週期資料進行平均以減少其噪聲誤差及時變效應，處理細節詳見(Hwang et al., 2006)，而非重複週期資料則為 retracked-Geosat/GM 和 retracked-ERS-1/GM 測高數據。為了決定臺灣附近最理想的波形重定演算法，比較 sub-waveform threshold (Yang et al., 2011)、threshold and beta-5 等波形重定演算法，並採用 Yang et al.(2011)所提出的延軌跡海水面高差異的標準偏差(Standard deviations of differenced SSHs)當作選取指標來評估此研究區最理想的 retracker，以門檻值為 0.2 的 sub-waveform threshold retracker (Yang et al., 2011)為臺灣附近最理想之波形重定演算法。

本案使用 inverse Vening Meinesz formula (IVM) formula (Hwang, 1998) 搭配去除回復法(remove-compute-restore procedure)來進行 2'×2' 測高海洋重力異常的計算，以 NCTUA 表示(如圖 2-9)。使用的參考重力場為 EGM08 展開至 2160 階。重力反演的程序是先將 10HZ retraced-Geosat/GM 及 20HZ retraced-ERS-1/GM 之測高觀測數據進行多項式擬合成 2Hz 資料來提高單點精度及計算的效率，取樣的細節

可參考 Hwang et al. (2006)，並將所有沿軌跡之海水面高做大地梯度計算，再將其組成南北、東西垂線偏差分量來進行測高海洋重力異常的反演。使用 Hsu et al. (1998) 所收集的船測重力資料來進行精度評估，結果顯示 NCTUA 的精度與 Sandwell V18.1 (Sandwell and Smith, 2009)及 DNSC08 (Anderson et al., 2009) 全球重力異常網格精度相當。

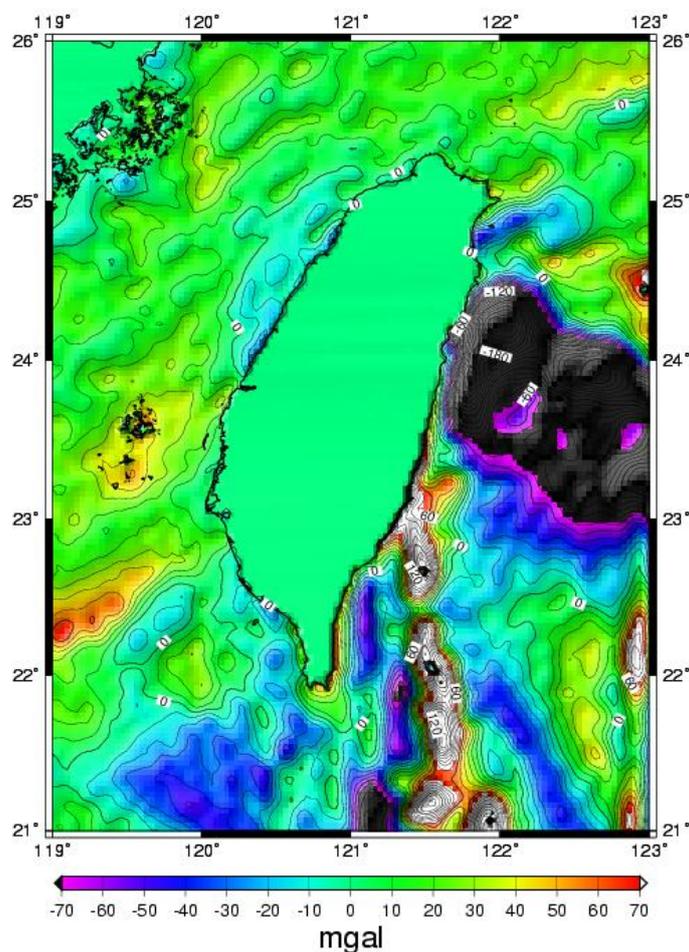


圖 2-9 測高海洋重力異常

第三章 近岸船載重力測量

船測重力的處理流程為處理 GPS 動態資料，求得各時刻的船隻位置，搭配同時刻的重力儀輸出值，可將重力值對應至相應的空間位置。而 GPS 的各項處理，包括取得三維方向的加速度可應用在重力資料的各改正項，例如 *Eiövös* 改正或傾斜改正。最後利用主副測線交叉點的差異分析，可評估本組船測資料之精度，再利用一平差模式可吸收其餘包括重力儀零點飄移的誤差，最後可將此組資料加進大地起伏計算，流程如圖 3-1 所示。

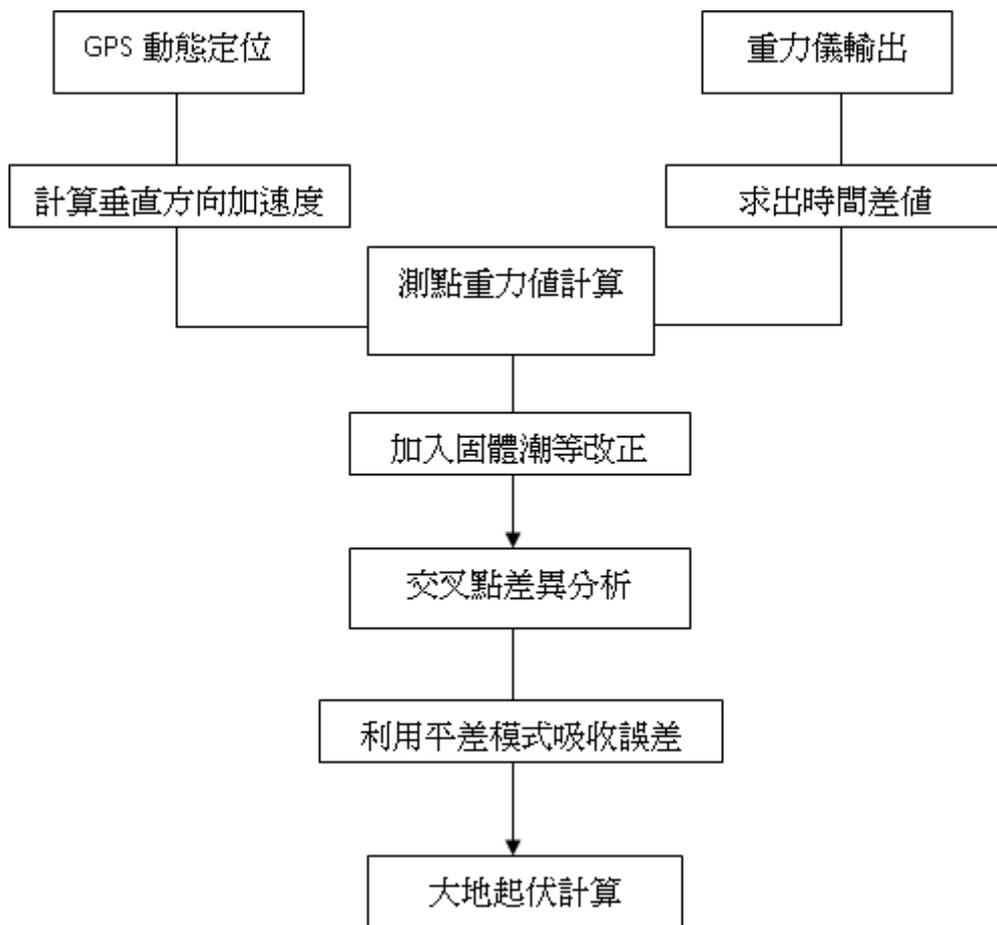


圖 3-1 船測重力處理流程圖

本章內容為敘述本案的近岸船載重力測量工作，並針對各項處理流程做一詳細說明。

3-1 作業範圍

如下圖 3-2，本案作業範圍原為臺灣西南近岸 12 海里(約 19.6 km)，涵蓋範圍為北起約外傘頂洲、南迄約佳樂水，但在計畫執行期間在鵝鑾鼻南方施測時，遭遇到不可抗拒之因素，其主因為臺灣鵝鑾鼻南方海域為黑潮洋流必經之路，受東部海底地形陡峻影響使海底洋流形成湧升至海面之現象，天氣雖適合出海作業，但湧浪之浪高已使船隻恐有安全上疑慮，其施測之數據亦超出規範無法使用，故已無法航行在此區域施測。為了顧及執行本案之作業人員、儀器設備與船隻的行駛安全，在函請貴中心同意後，將因湧升流而無法量測之測線里程為 188 公里，另外增加布袋外海替代測線 267 公里，船隻也從原先的泰勝 168 號變更為南一號。

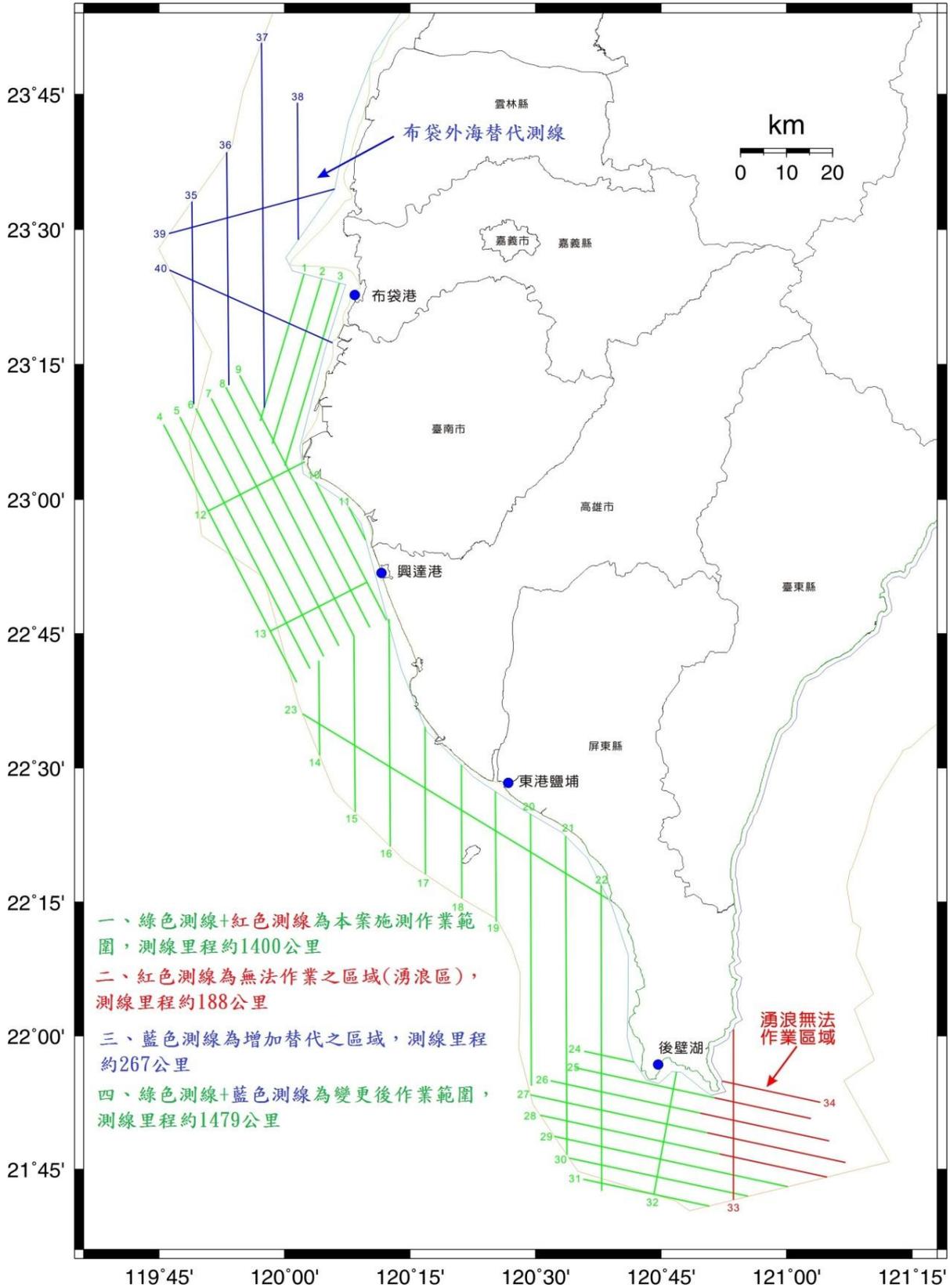


圖 3-2 近岸船載施測範圍

3-2 陸上基站規劃

陸上重力基點測定

本年度計畫船隻原預定由 4 個港口出發，依地理位置由北至南分別為嘉義布袋港、高雄興達港、屏東東港及屏東後壁湖漁港，後因使用船隻更替，於是增加臺南將軍漁港，於出海港口將各設置一基準點，作為岸基 GPS 主站與重力基準點；除岸基 GPS 主站外，船載重力作業時，將併同內政部國土測繪中心 e-GPS 主站共同作為岸基主站，擬使用 TASI (臺西)、CHYI (東石)、CKSV (成大測量)、KASH (高雄港)、FALI (枋寮) 及 KDNM (墾丁) 等共 6 站 (由北至南)。各站布設點位參照表 3-1 所示。

表 3-1 岸基控制點一覽表

序號	地點	點號	重力副點點號	備註
1	布袋港	GS01	GS01A	
2	興達港	GS02	GS02A	
3	東港	GS03	GS03A、GS03B	
4	後壁湖漁港	GS04	GS04A	
5	將軍漁港	GS05	GS05B	GPS 連續站

設置的 5 個岸基控制點中，GS05 為直接引用 GPS 連續追蹤站資料，且地點為建築物之屋頂，故未埋設固定標石，其餘 4 點均於現地埋設固定標誌，其樁標規格如圖 3-3。

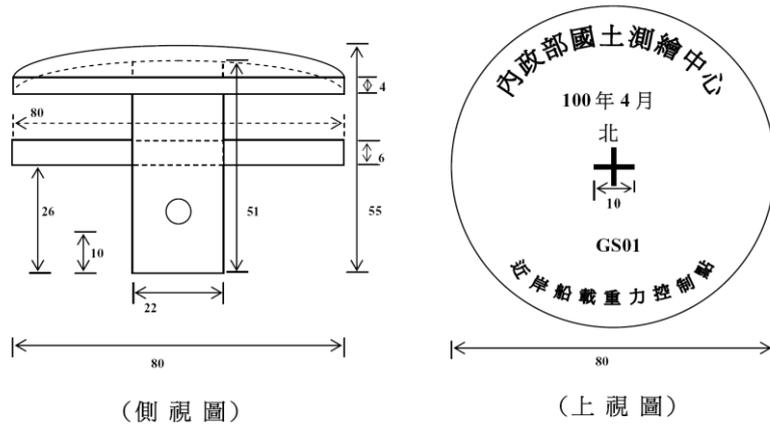


圖 3-3 岸基控制點樁標規格示意圖

而岸基控制點埋設方式參照而三等衛星控制點埋設方式，採鋼標鑽孔式方法埋設，其埋設規格如圖 3-4。

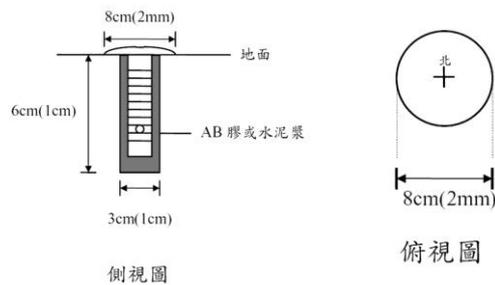


圖 3-4 岸基控制點埋設規格示意圖

此外，岸基 GPS 主站將由現有已知重力點以相對重力方式引測重力值，使用 Graviton-EG 相對重力儀施測，分別自附近一等水準點

引測其重力值，引測及施測點位參照表 3-2，其中 GS05 因位於屋頂未施測重力。

表 3-2 引測重力點位一覽表

序號	地點	引測點號	施測點號	備註
1	布袋港	G061	GS01、GS01A	
2	興達港	G093	GS02、GS02A	
3	東港	G123	GS03、GS03A、GS03B	
4	後壁湖漁港	Q013	GS04、GS04A	
5	將軍漁港	G075	GS05B	GS05 未施測

(一) 使用之相對重力儀

本案使用之相對重力測量儀係利用美國 LaCoste & Romberg Graviton-EG 相對重力儀，為一高精度之精密儀器，其規格如下。

重複性：在完美狀態下：0.001 mgal；在野外實際量測時：0.003 mgal。

溫度範圍：0°to +45°C（極寒選項下可至-40°C）。

絕對漂移率（每月）：<1.0 mgal。

固體潮改正與氣壓改正：即時修正。

水平方式：自動水平（最高可至 13°傾斜）。

水平感應器：固體陶製品。

電池：野外使用在 25°C 時超過 8 小時；9 安培小時 AmpHr 膠體電池。

尺寸大小：21.5×22×31cm。

(二) 陸上重力測量方法 (重力基點化算)

採用 LaCoste& Romberg Gravition-EG 相對重力儀，重力測量觀測點位與點位之間應採往、返觀測，每個點位重力值以每 5 至 10 秒觀測 1 次，連續觀測至少 3 分鐘得 1 筆平均觀測值，以此法觀測得 2 筆平均觀測值

每筆平均值觀測結束時間與下一筆平均值觀測開始時間至少需間隔 1 分鐘以上。

每測站 2 次重力讀數之最大較差不得大於 0.05mgal。

前後 2 站施測時間間隔以不超過 2 小時為原則。

儀器面板上 RMS Error 值，如其值大於 0.1mgal，應注意環境雜訊

(Noise) 是否過大導致觀測量差值亦過大。



圖 3-5 岸基控制點重力觀測

3-3 船隻 GPS 動態定位處理方法

船載重力測量本身精度受 GPS 定位精度影響甚大，且若船隻動態定位若算得精確，其船測重力值的空間位置亦將更精確。本案之船載 GPS 動態定位資料以 TRACK 軟體進行解算，TRACK 為美國麻省理工學院(M.I.T.)發展的 GPS 動態定位計算模組，為架構於 GAMIT 軟體(亦由 M.I.T.所設計)之下的一個演算模組，TRACK 應用卡爾曼濾波(Kalman Filter, KF)進行動態資料之解算，KF 主要的原理為結合現在時刻的觀測量以及前一時刻對現在時刻的預測值，以整合推估現在時刻未知數的最佳估計值，並遞迴更新估計值的變方矩陣，直至最終筆觀測資料，其基本方程式詳述如式 3-1~式 3-5。

假設目前的計算時刻為 k ，根據推估模型，可以經由 $(k-1)$ 時刻的未知數估計成果預測得到 k 時刻的未知數推估值如(3-1)式：

$$X(k|k-1) = A \cdot X(k-1|k-1) + B \cdot U(k) \quad (3-1)$$

其中， $X(k|k-1)$ 即是經由 $(k-1)$ 時刻的估計結果預測得到的 k 時刻未知數推估值， $X(k-1|k-1)$ 則是 $(k-1)$ 時刻的未知數最佳估計結果， $U(k)$ 為狀態控制矩陣， A 、 B 分別為對應的係數矩陣。對應於 $X(k|k-1)$ 的變方矩陣 P 可以表示如(3-2)式

$$P(k|k-1) = A \cdot P(k-1|k-1)A^T + Q \quad (3-2)$$

其中， $P(k|k-1)$ 即是對應於 $X(k|k-1)$ 估計結果的變方矩陣， $P(k-1|k-1)$

則為 $X(k-1|k-1)$ 的變方矩陣， Q 為狀態控制(或稱預測約制)的變方矩陣，一般稱(3-1)、(3-2)式為 KF 於 k 時刻的預測形式。

接下來，運用 k 時刻的實際量測值，並結合(3-1)、(3-2)式的預測估值，即可以得到 k 時刻的最佳估計量 $X(k|k)$ 如(3-3)式：

$$X(k|k) = X(k|k-1) + G(k) \cdot (Z(k) - H \cdot X(k|k-1)) \quad (3-3)$$

其中， Z 為觀測量矩陣， H 為 $X(k|k-1)$ 的係數矩陣， G 為 KF 的增益矩陣(Kalman Gain)，其表示式如下：

$$G(k) = \frac{P(k|k-1)H^T}{(H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R)} \quad (3-4)$$

其中， R 為觀測量的變方矩陣。

式(3-3)即為 KF 在 k 時刻的最佳估值，而其對應的變方矩陣 $P(k|k)$ 如下：

$$P(k|k) = (I - G(k) \cdot H)P(k|k-1) \quad (3-5)$$

其中 I 為單位矩陣，當進入 $k+1$ 時刻時， $P(k|k)$ 即相當於(3-2)式的 $P(k-1|k-1)$ ，依序如此遞迴計算至最後一個時刻，並得到最終的點位估算坐標及其對應的變方矩陣，即可獲得對應的精度(即標準差)估值。

本案應用 TRACK 計算模組以相對差分定位方式進行船載 GPS 資料之計算，其動態定位解算的成功率(或可稱為整數週波未定值 Ambiguity 的求解成功率)與基站的數量以及相對基線的長度有關。基

線越長，其受距離長度影響的誤差就越顯著。基線越長，其受距離長度影響的誤差即越顯著，而為有效消除電離層的訊號延遲誤差，本研究以雙頻 L3 觀測量進行相對差分定位。TRACK 亦能分別求解 L1 與 L2 的整數週波未定值，對於超過百公里的相對定位基線，TRACK 另可選擇使用 Melbourne-Wubena wide lane 模組進行 L1-L2 之整數週波未定值求解。本案選擇使用 TRACK 的”relative-rank”演算法，並應用 Chi-squared 統計檢定方式訂定最佳的 L1 及 L2 整數週波未定值之接受門檻，再與次佳解進行比較，藉由統計測試過程決定最終的最佳解。Chi-squared 的統計測試將由以下二種指標決定：(1) LC 線性組合的解；(2) MW-WL average value 寬巷平均值之解。

TRACK 軟體的操作介面為 Linux 系統，其透過 command file 之設定與規劃，包括使用者輸入觀測檔、下載之精密星曆、天線盤型號、基準站坐標、以及對流層附加參數之選定…等，進行一系列的自動化處理。

TRACK 採用的大氣參數(條件)，乃是採用標準大氣參數應用於標準氣象改正模式之中，標準大氣參數設定為 溫度 25°C，壓力 1013.25 Mbar，濕度 50 %。而標準大氣模式未改正完善的部分，將由對流層修正模式之附加參數吸收。

Dodson(1996)研究指出，利用地面氣象資料(如壓力、溫度、濕度…

等)代入初始的標準對流層折射誤差修正模式，如 Modified Hopfield、Saastmoinan...等，先進行對流層折射誤差的初步修正，而後選擇適當的歸算函數(Mapping Function)，配合附加適當數量的對流層附加參數(本計畫案每 1 小時附加 1 個)吸收殘留的對流層誤差，這些附加的參數併同待求解的參數(如點位坐標、速度及整週波未定值...等)一起解算，可有效修正對流層折射的誤差量，提昇 GPS 高程測量的定位精度，本計畫使用標準的 Modified Hopfield 改正模式(Goad and Goodman, 1974)，並引用附加對流層改正參數(每個測站每 1 小時附加 1 個改正參數)修正對流層折射之影響量，Modified Hopfield 改正模式如下：

$$\Delta \mathcal{G} = N_i^{Trop} \cdot \sum_{k=1}^9 \left(\frac{\alpha_{k,i}}{k} \cdot r_i^k \right) \cdot 10^{-6}, \quad i = 0 \sim 1 \quad (3-6)$$

其中， $\Delta \mathcal{G}$ 為對流層誤差修正量， N_i^{Trop} 、 $\alpha_{k,i}$ 、 r_i^k 分別為 Modified Hopfield Model 之使用參數。

因此，對觀測站 k 與衛星 i 而言，對流層折射延遲效應之修正量 $\Delta \mathcal{G}_k^i$ 可表示成如下形式：

$$\Delta \mathcal{G}_{k,z=z_k^i}^i = f_{apr}(z_k^i) \cdot \Delta \mathcal{G}_{apr,k,z=0} + f(z_k^i) \cdot \Delta \mathcal{G}_{k,z=0}(t) \quad (3-7)$$

$\Delta \mathcal{G}_{apr,k,z=0}$ ：為初始模式於測站 k 天頂方向之修正量，如果使用標準的大氣資料(如標準氣壓、平均溫度、濕度等)，而未有實際之氣象資料，則此修正量與時間無關，僅與測站的高程有關。

z_k^i : 為衛星 i 於測站 k 之天頂距。

f_{apr} : 為初始模式的數學模式(Saastamoinen Model 或 Modified Hopfield Model)。

$\Delta g_{k,z=0}(t)$: 為測站 k 在天頂方向 Mapping Function 的附加參數，其與時間有關。

$f(z_k^i)$: 為 Mapping Function 的數學函數式(例如： $\frac{1}{\cos(z)}$)。

GPS 動態定位精度分析

本案計算所有船行航次的 GPS 動態資料，每個時刻均以 4 支 GPS 天線盤(分別位於船首、船兩側以及船尾)進行資料蒐集，取樣頻率 1Hz。解算時以連續航線為計算單位，以獲得每連續航線的 GPS 動態橢球高資訊及其精度值，並輸出估計天頂方向的對流層附加參數值與訊號延遲誤差量，並藉此延遲誤差判斷 TRACK 動態解算成果之合理性。

對流層延遲誤差由空氣中的乾延遲量與溼延遲量共同組成，乾延遲量由乾燥的氣體所引起，其在天頂方向造成的延遲量約為 2.3 m，約占對流層總延遲量的 90%，乾空氣之密度會隨其表面壓力的改變而變化，由於其變化較為平緩穩定，故可藉由量測大氣的溫度、溼度、壓力將此乾延遲量予以模式化並求解；而溼延遲量則與大氣的水氣分壓有關，由於水氣會隨著時間與空間高度之改變而變化，因此不易利

用數學模式予以準確估計，在溼度較高的地區，溼延遲量可高達 35 cm，故若求解得的對流層總延遲量介於 2~3 m 之間、平面定位精度介於 2~4 cm、高程定位精度介於 5~10 cm 之間，即可視該計算成果為合理的結果。

本案利用 TRACK 軟體進行船載 GPS 動態資料之計算，並以(3-5)式計算估計成果的變方值，得到精度的平均值分別為：南北(N)、東西(E)以及橢球高(h)方向分別介於 $\pm 1.1\sim 3.1$ cm、 $\pm 1.3\sim 3.4$ cm 以及 $\pm 3.5\sim 9.8$ cm 之間，可謂達到 cm 等級之精度，因船行軌跡之不可重現性，其評估依據來只能來自軟體內部輸出的精度指標，上述精度滿足一般平面及高程的定位精度範圍，預計能有效提供後續近岸大地起伏模式解算的依據。

3-4 船載重力資料處理方法

重力資料與 GPS 資料時間會有不同步的問題，利用一簡單的 correlation 就可以求出兩項資料的時間的差值(Olesen, 2003)。

$$z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \cdot s_2(t + \tau) dt, \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, (n-1) \cdot \Delta T \quad (3-8)$$

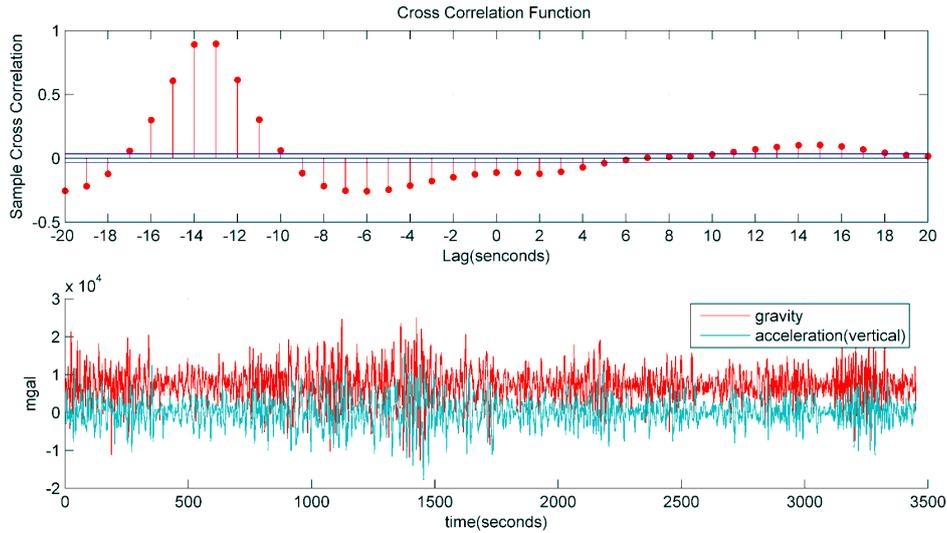


圖 3-6 重力資料與 GPS 資料時間差

測點重力值計算

本團隊過去利用空載重力約化的方法約化船載重力，已可達約 2mgal 之精度，再利用一個良好的潮位模型可將觀測量約化至平均海水面上，可有效提供後續大地起伏之計算。相應之計算公式如下：

$$g_u = g_0 + f_u - f_0 - \dot{v}_u + \left[2w \cos \phi + \frac{v_e}{R_N} \right] v_e + \frac{v_n^2}{R_M} \quad (3-9)$$

其中，

g_0 ：由岸邊重力基點推得之絕對重力值

g_u ：欲得之重力值

f_u ：重力儀觀測值

f_0 ：重力儀之靜態觀測值

\dot{v}_u ：船分的鉛垂方向加速度

v_e, v_n ：船之東西、南北速度分量

R_N, R_M : 卯酉、子午圈曲率半徑

w : 地球自轉角速度

ϕ : 船所在緯度

式(3-7)中的 $\left[2w \cos \phi + \frac{v_e}{R_N} \right] v_e + \frac{v_n^2}{R_M}$ 便為 *Etövös* 改正。

然而因為船隻航行時的不穩定，重力儀無法始終保持在水平位置，所以應將重力儀量得之值加上一傾斜改正量(off-level correction or tilt correction)，運動姿態感應資料可用於傾斜改正，如下式(Olesen, 2003)：

$$\delta g_{\text{tilt}} = (1 - \cos \phi_x \cos \phi_y) f_z + \sin \phi_x f_x + \sin \phi_y \cos \phi_x f_y \quad (3-10)$$

$$\phi_x = \frac{f_x - q_x}{g}; \quad \phi_y = \frac{f_y - q_y}{g} \quad (3-11)$$

式中 f 項為重力儀內建之加速度儀所量得之加速度（為運動姿態感應資料）， q 項為 GPS 觀測量推求之各方向加速度。

由於船測重力是在海上施測，海面上除了因為風浪而產生瞬間海水位之外，還會受到日月的引力而產生長週期的影響。日月潮位引力為海潮之驅動力，除引起海水起伏外，對地表一點產生兩種重力變化，皆須在船測重力計算時加以考慮：(1) 由引力產生之重力變化 (2) 由地球變形而產生之重力變化，首先，任一點所受地球表面上月球潮位 (tidal potential) 為 (只考慮球諧 2, 3 階)：

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{GM_m r^2}{R_m^3} (3\cos^2 \psi_m - 1) + \frac{1}{2} \frac{GM_m r^3}{R_m^4} (5\cos^2 \psi_m - 3\cos \psi_m) \quad (3-12)$$

所受太陽之潮位為（因較遠，只考慮 2 階）

$$W_s = \frac{1}{2} \frac{GM_s r^2}{R_s^3} (3\cos^2 \psi_s - 1) \quad (3-13)$$

其中：

GM_m ：牛頓萬有引力常數乘月球質量（4902.778 km^3/s^2 ）

GM_s ：牛頓萬有引力常數乘太陽質量（ $1.327124399 \times 10^{11} km^3/s^2$ ）

r ：該點與地心之距

R_m ：地心與月球中心之距

R_s ：地心與太陽中心之距

ψ_m ：該點與月球在地心之夾角

ψ_s ：該點與太陽在地心之夾角

因直接引力造成之重力變化為：

$$g_t^1 = -\frac{\partial(W_m + W_s)}{\partial r} = -\frac{GM_m r}{R_m^3} (3\cos^2 \psi_m - 1) - \frac{3}{2} \frac{GM_m r^2}{R_m^4} (5\cos^2 \psi_m - 3\cos \psi_m) - \frac{GM_s r}{R_s^3} (3\cos^2 \psi_s - 1) \quad (3-14)$$

按 Moritz and Mueller（1987），此引力造成地表變形而再次引起重力

變化，其大小為：

$$g_t^2 = \left(h - \frac{3}{2} k \right) g_t^1 \quad (3-15)$$

其中 h ， k 為 Love number。因 $h=0.6$ ， $k=0.3$ ，故總重力變化為：

$$g_t = g_t^1 + g_t^2 = \left(1 + h - \frac{3}{2}k\right)g_t^1 = 1.15g_t^1 \quad (3-16)$$

本案自行設計另一套程式計算 (3-16) 式之 g_t 值。所需之日、月坐標及 ψ_m, ψ_s 均由 JPL 之 DE200 星曆嚴密計算而得，較之一般之簡易公式，如 Dehlinger，較為準確，該程式適用時間為 1990-2020 年。 g_t 之最大值約為 0.3 mgal。

加上海潮改正及固體潮改正之後，所得之重力異常如下，公式中潮高需代入一潮位模型，考慮臺灣的地理位置，NAO.99jb model 為最適：

$$\Delta g_F = g - g_t + 0.2566h - \gamma_0 \quad (3-17)$$

式中， g 為測點的重力值；

g_t 為固體潮改正；

h 為潮高(代入 NAO.99jb 模式所得)；

γ_0 為重力測點位置所對應之正常重力值。

3-5 船測重力測量成果及精度分析

評估船載、空載重力精度常用的方法之一為交叉點分析。其原理為，當船行駛過同一地點，所測得之兩重力值應相同。反之，其差異大小則反應誤差之大小。船載重力與航測一般，按某一設計之航線觀測，兩航線（幾近直線）可形成一交叉點。

假設在第 q 條航線上，第 r 點的觀測量為 g_r^q ，由於測量儀器本身的系統誤差、觀測時的天候、環境等因素，故觀測量在每條航線上存在著此誤差量，包括偏差值(bias)與漂移值(drift)，偏差值可來自每天的作業記錄的人為誤差或是儀器本身尚未穩定就開始觀測，而飄移值則是來自重力儀本身的零點飄移。則觀測量 g_r^q 可如下表示

$$g_r^q = g_r^q + \delta g_r^q \quad (3-18)$$

其中 δg_r^q 為因 bias 和 drift 所引起的誤差，我們可將 δg_r^q 表示為

$$\delta g_r^q = a^q + b^q t_r^q \quad (3-19)$$

其中 a^q, b^q 分別為第 q 條航線上的 bias 和 drift， t_r^q 為第 r 點上的觀測時間減去航線起點起算之時間。利用此數學模式，則我們可決定兩航線 K, L 的交叉點的交叉點 P 差值為

$$\begin{aligned} x_p^{kl} &= \delta g_p^k - \delta g_p^l \\ &= a^k - a^l + b^k t_p^k - b^l t_p^l \end{aligned} \quad (3-20)$$

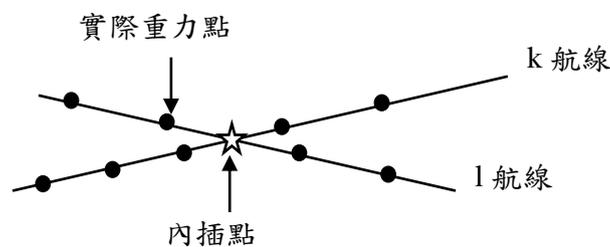


圖 3-7 船載重力實測點與內插點示意圖

由於兩航線的交叉點往往不會就是實際重力點，故比較時應先將

重力值內插至兩航線的內插點上，如圖 3-7 所示。根據(3-20)式可組成觀測方程式，對單一觀測量，吾人得

$$v_p^{kl} + x_p^{kl} = a^k + b^k t_p^k - a^l - b^l t_p^l \quad (3-21)$$

$$k = 1, 2, \dots, i; l = 1, 2, \dots, m; p = 1, 2, \dots, n$$

其中 $i+m, n$ 分別為航線數及交叉點數。(3-21)可寫為矩陣形式

$$V + L = AX \quad (3-22)$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} a^1 \\ b^1 \\ a^2 \\ b^2 \\ \vdots \\ a^i \\ b^i \\ a^j \\ b^j \\ \vdots \\ a^m \\ b^m \end{bmatrix}$$

第 k 與 l 條航線在設計矩陣中的列向量為

$$A_p^{ij} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 \dots 0 & 1 & t^i \dots 0 \dots & \dots 0 \dots -1 & -t^j & 0 \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

解得 X 矩陣後，將誤差扣除而得改正後重力 g_r^q ，利用此模式可吸收包括包括偏差值(bias)與漂移值(drift)的誤差量。

本案的船測重力精度可利用主副測線交叉點差異分析，共有 41

個主副測線交叉點可供精度評估，平差前後成果如下表 3-3，表中顯示本案船載重力測量精度可達 1.33 mgal，如第二章所述及國際上相關資料來看，同樣是利用移動型載具進行的重力測量，空載的精度約在 2~3mgal，船載重力的精度在 3mgal 以內，可見本案的 1.33mgal 的交叉點差異的 RMS 值已到一定水平。

測量成果如圖 3-8，平差前後交叉點重力異常差異值分布如圖 3-9 及 3-10，平差前後的交叉點差異直方圖如圖 3-11。各交叉點的相關資料列於附錄 1。

表 3-3 船載重力測量交叉點差異分析成果（單位：mgal）

	Max	Min	Mean	Std	RMS
平差前	13.437	-7.784	1.589	3.125	5.309
平差後	4.334	-5.269	0.001	1.320	1.336

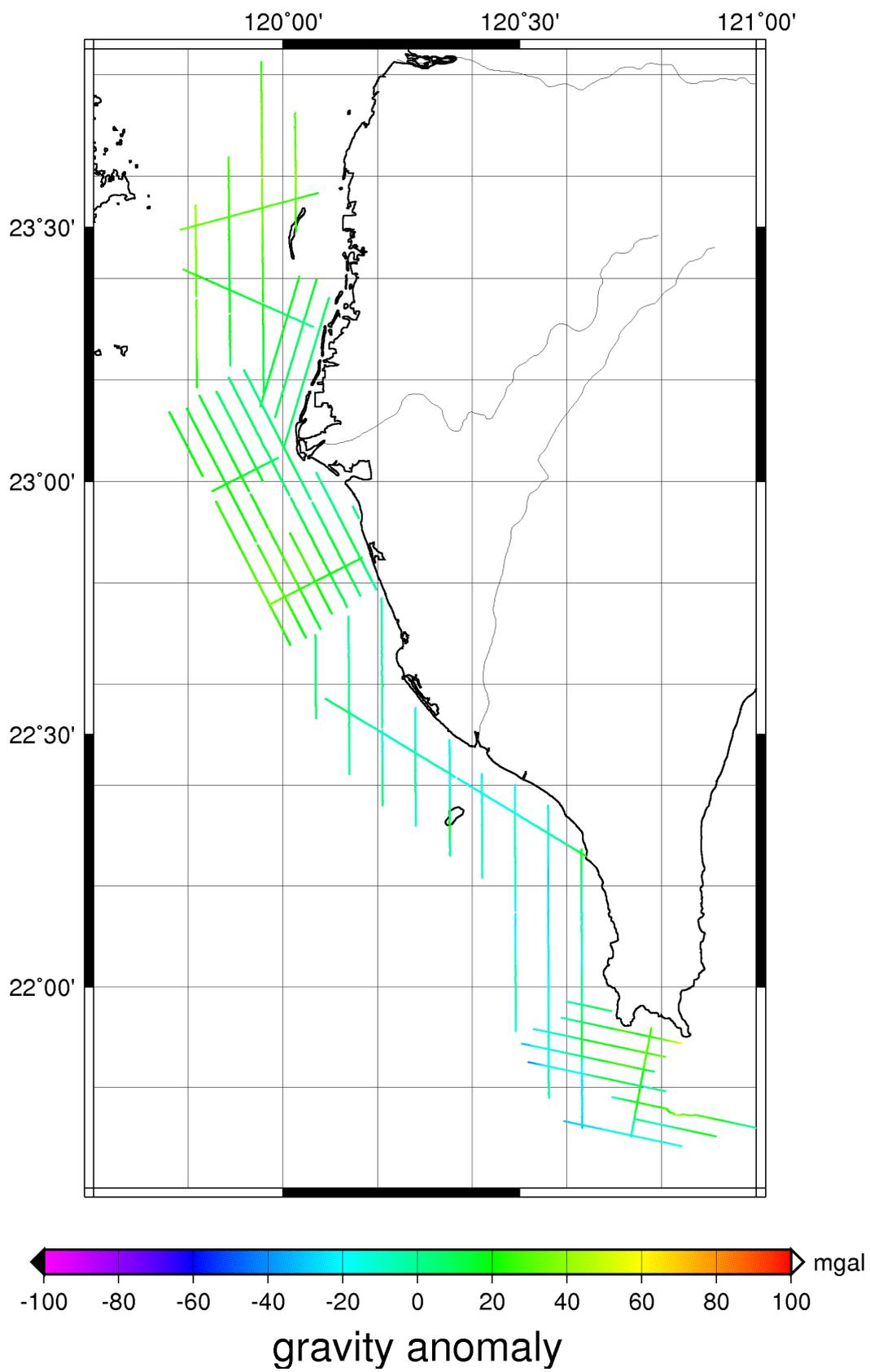


圖 3-8 近岸船載測量重力異常

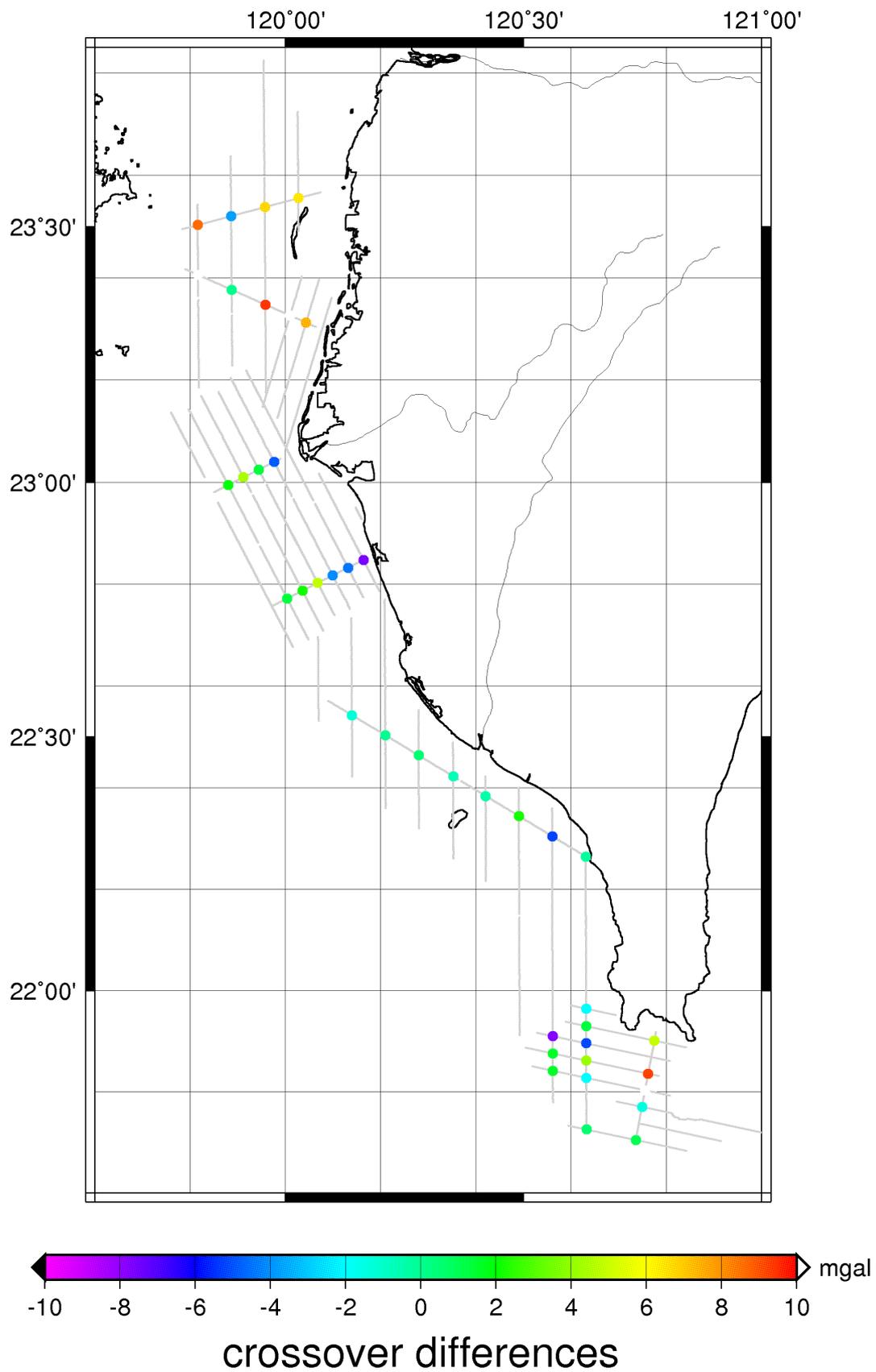


圖 3-9 交叉點重力異常差值 (平差前)

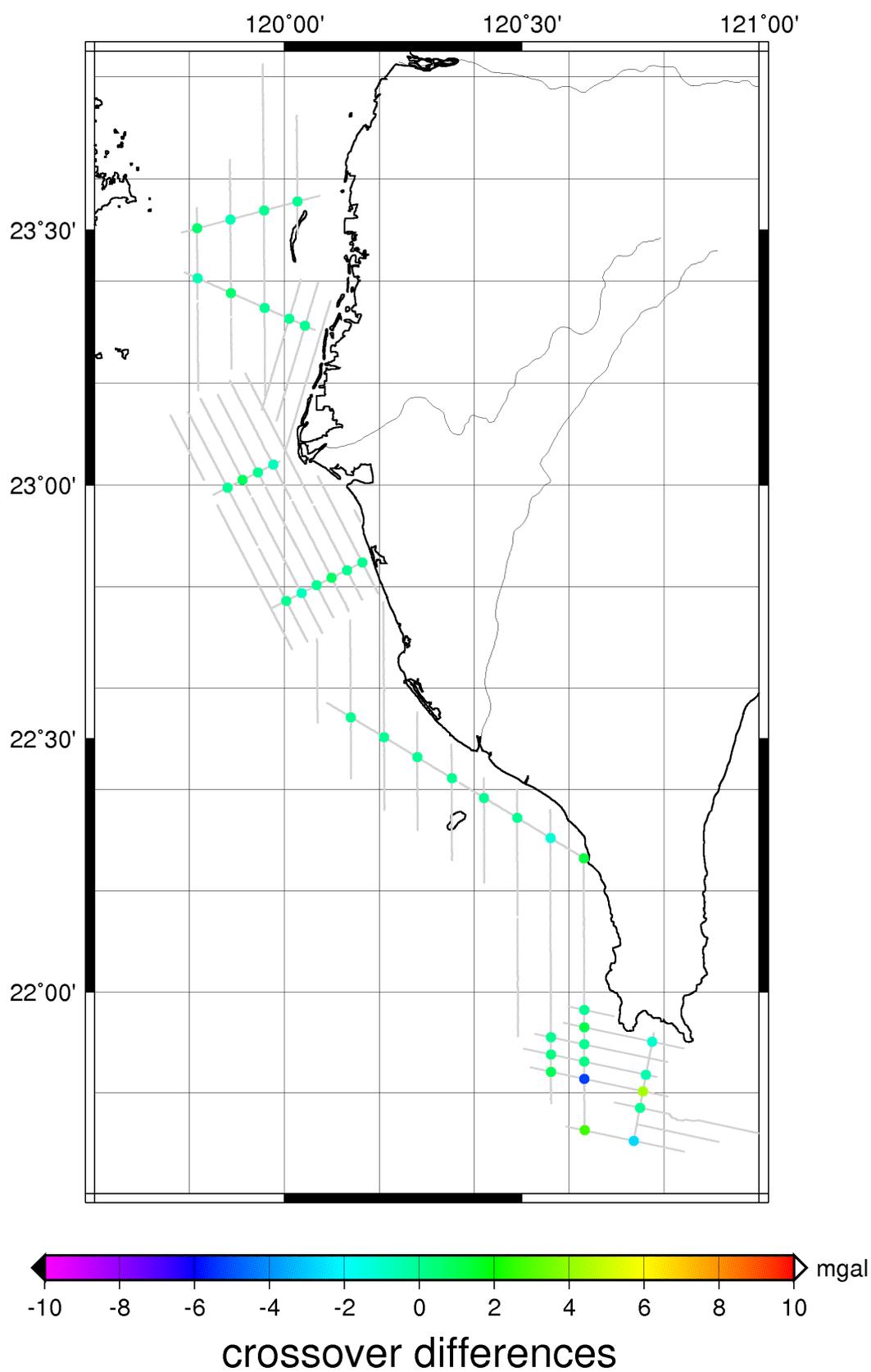


圖 3-10 交叉點重力異常差值 (平差後)

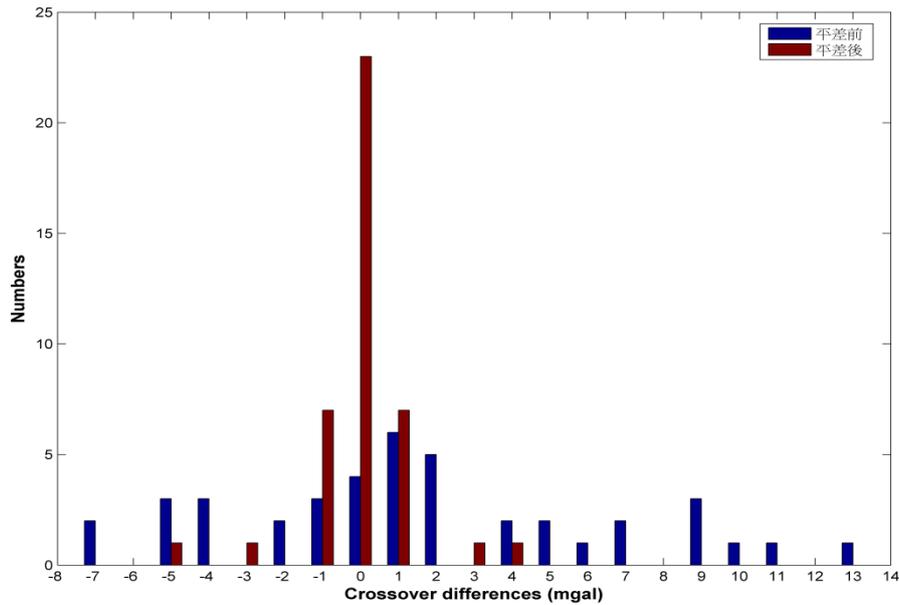


圖 3-11 平差前後交叉點差異直方圖

3-6 重力資料整合

將第二章所蒐集之重力資料加上本案完成之近岸船載重力測量資料，做一重力資料整合，並產生一自由空間重力異常及布格重力異常網格，如圖 3-12 及圖 3-13。做重力資料整合前，我們應該先將含有粗差的資料刪除，且考慮到最小二乘配置法本身的限制，若資料分布幾何密度不一，在分布太密的地方可能會造成計算上的困難，我們可以用 GMT 軟體內的 blockmedian 功能，選擇每 2' x 2' 對粗差做一剔除的動作。

本次採用的自由空間網格異常模型計算程式之主要程式為 collocg.exe，利用 EGM08 之球諧係數（展開至 2160 階）產生重力異常協變方函數（covariance function），利用最小二乘配置法建立自由

空間重力異常網格如下圖 3-12。利用最小二乘配置法時，針對各項不同的重力資料應該給定不同權值，本案所蒐集的新、舊重力資料共有四類：陸測重力資料、船測重力資料、空載重力資料、及測高重力，依照第二章所述之精度，吾人可以得知陸測資料精度最高，其次為船測之空載重力資料，最後是測高資料，這也符合一般的認知。在給定權值的原則乃是利用各項重力資料的精度的倒數作為權值，陸測精度高於空載、船載及測高一級，且考量空載資料尚須經過向下延續，利用過去的經驗吾人在最小二乘配置時，針對陸測、船測、空載、測高重力四項資料給定的權值依序為：1/0.1、1/1、1/3、1/5。

從圖 3-12 可看到台中一帶的自由空間重力異常值較低，而山區明顯較大，花蓮外海也明顯較低，蘭嶼和綠島重力異常值則較高，這些現象均與臺灣地體構造相符。大致而言，重力異常變化與地形呈現高相關，在地形變化較大之地區，重力梯度亦較大，如中央山脈；相反的，地形變化緩和的區域，重力梯度較小，如西部平原，臺灣海峽等地方。

將自由空間重力異常網格扣除地形效應 (terrain effect) 可得布格重力異常網格。地形效應計算公式如下 (Hwang,2007)：

$$A_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial s}\right)_{s=h_p} = G\rho \iint_{x,y} f(x,y) dx dy$$

其中

$$f(x, y) = \frac{1}{[(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (h-h_p)^2]^{3/2}} - \frac{1}{[(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + h_p^2]^{3/2}}$$

式中 G 是萬有引力常數， ρ 是地質密度，此二量皆為常數。

h_P 為計算點 P 的高程

h 為積分範圍內任意點的高程

(x_p, y_p) 為計算點 P 的平面坐標

(x, y) 為積分範圍內任意點的平面坐標

如圖 3-13，在臺灣東部，布格異常通常為正值，因為板塊碰撞帶（菲律賓板塊與歐亞板塊）底下存在高密度的岩層，而和平海盆底下沉積很厚的沉澱物使得經緯度約 24.2°N and 121.8°E 處顯示較低的布格異常。

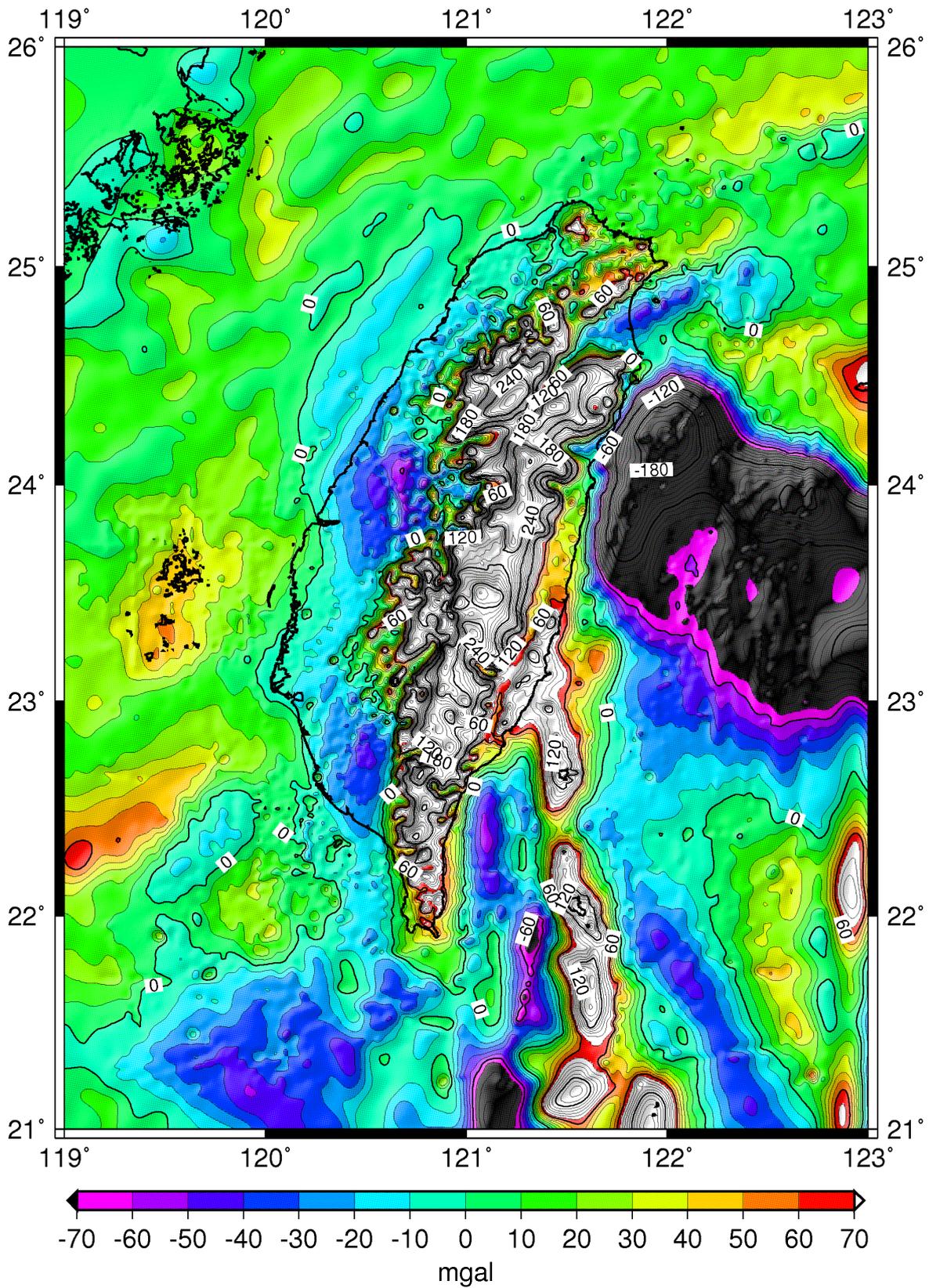


圖 3-12 自由空間重力異常網格

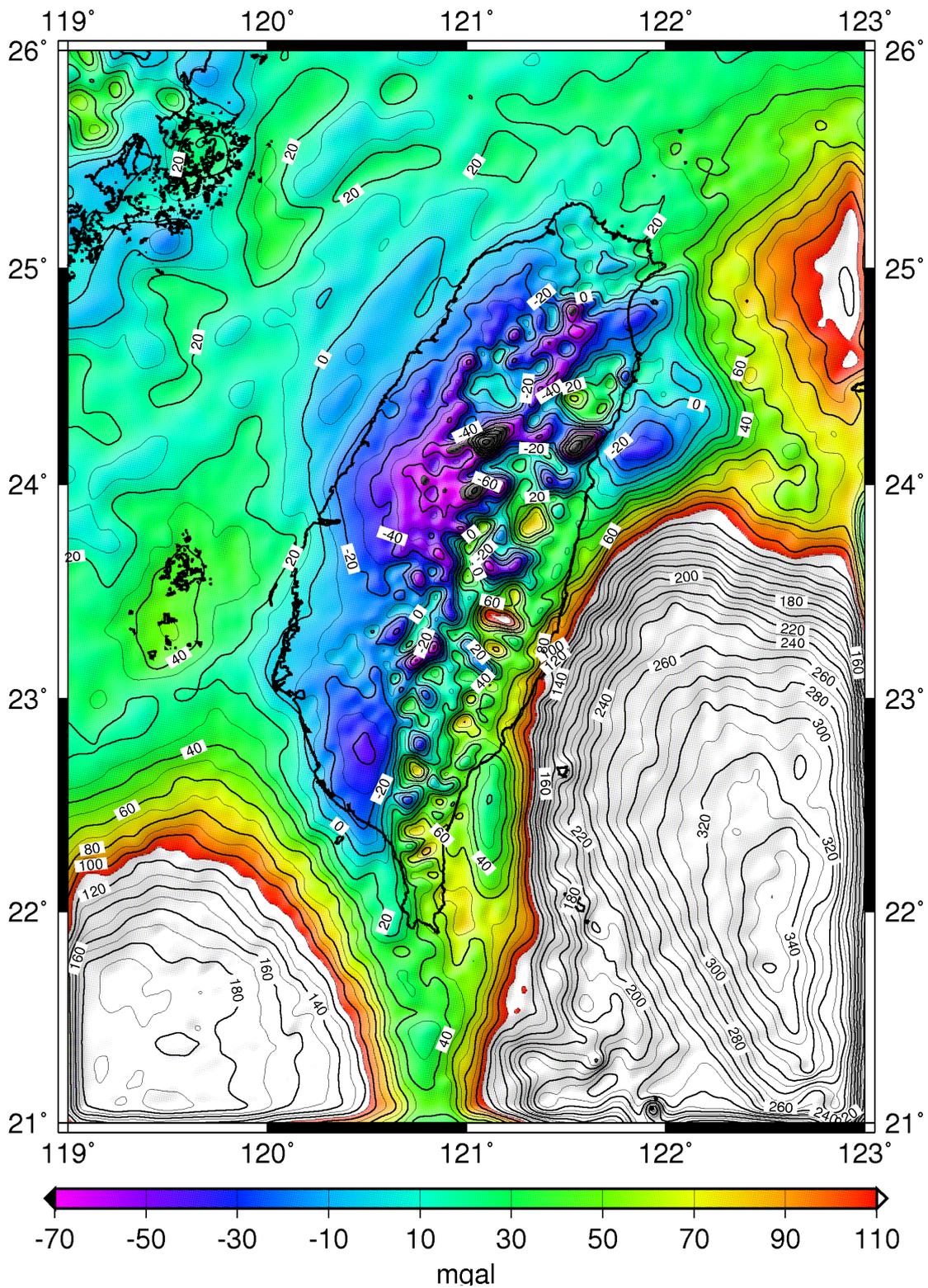


圖 3-13 布格重力異常網格

第四章 陸上 24 小時 GPS 測量

4-1 點位規劃

中興測量公司與國土測繪中心，曾篩選 38 點對空通視良好的一等一級水準點，進行 24 小時的 GPS 觀測並利用 Bernese 5.0 軟體處理解算，加上其公釐等級的水準正高精度，故這 38 個點具有高精度的大地起伏值，非常適合用於檢核大地起伏精度。此 38 個檢核點分為四段路線，依序分布於臺灣北部、東部、中部、南部四處，依序為第一段的北部濱海路線，分布在新北市北部，由埤島社區沿台 2 線由新北市往東至宜蘭縣橋板湖；第二段為台 9 線花東路段，分布在花蓮縣，由吉安新站開始，沿台 9 線往南至富里節點；第三段為中橫路段，分布在南投縣、花蓮縣，由草屯節點開始，沿台 14 線、台 8 線往東至大禹嶺節點；第四段為南橫路段，分布在臺南市、高雄市，由臺南節點開始，沿台 20 線往東至高雄縣。

本案項目亦包括陸上 24 小時 GPS 測量，目地為檢核大地起伏精度，其分布位置恰適合評估本案船測重力之貢獻。24 小時 GPS 測量以本年度範圍中省道臺 17 線與臺 26 線上一等水準點，若該點有遮蔽時，可改選擇該水準點前後點號之水準點進行觀測，或於該點位附近 50m 內選擇一空曠地設立臨時點，辦理 GPS 觀測，並作水準測量，將水準高差視為橢球高差，加以修正。

目前規劃選擇之點位共計 20 個（如表 4-1、圖 4-1），北起嘉義縣布袋鎮，南至屏東縣恆春鎮，點位間相對距離約 10km 左右，其中 1221、G070、G076、G099、G106、G113 及 G129 等 7 點（圖 4-1 中紅色字體點位），因原點位位置有遮蔽，故改設副點進行 GPS 觀測，而 GPS 施測方法如後概述。

表 4-1 24 小時 GPS 規劃點位一覽表

序號	點名	點號	序號	點名	點號
1	東安莊	G061	11	新園節點	X203
2	三聖堂	G070	12	佳冬分駐所	G129
3	篤厚橋	G076	13	水底寮節點	X209
4	溪埔	G081	14	南勢湖橋	1214
5	明和公園	G087	15	海濱橋	1221
6	尚禮街公園	G093	16	藍子	Q003
7	彌陀	G099	17	保力社區	Q008
8	中油	G106	18	遊客中心	Q014
9	獅甲國中	G113	19	鵝鑾鼻	Q019
10	中鋼鋁業	G117	20	興海	Q023

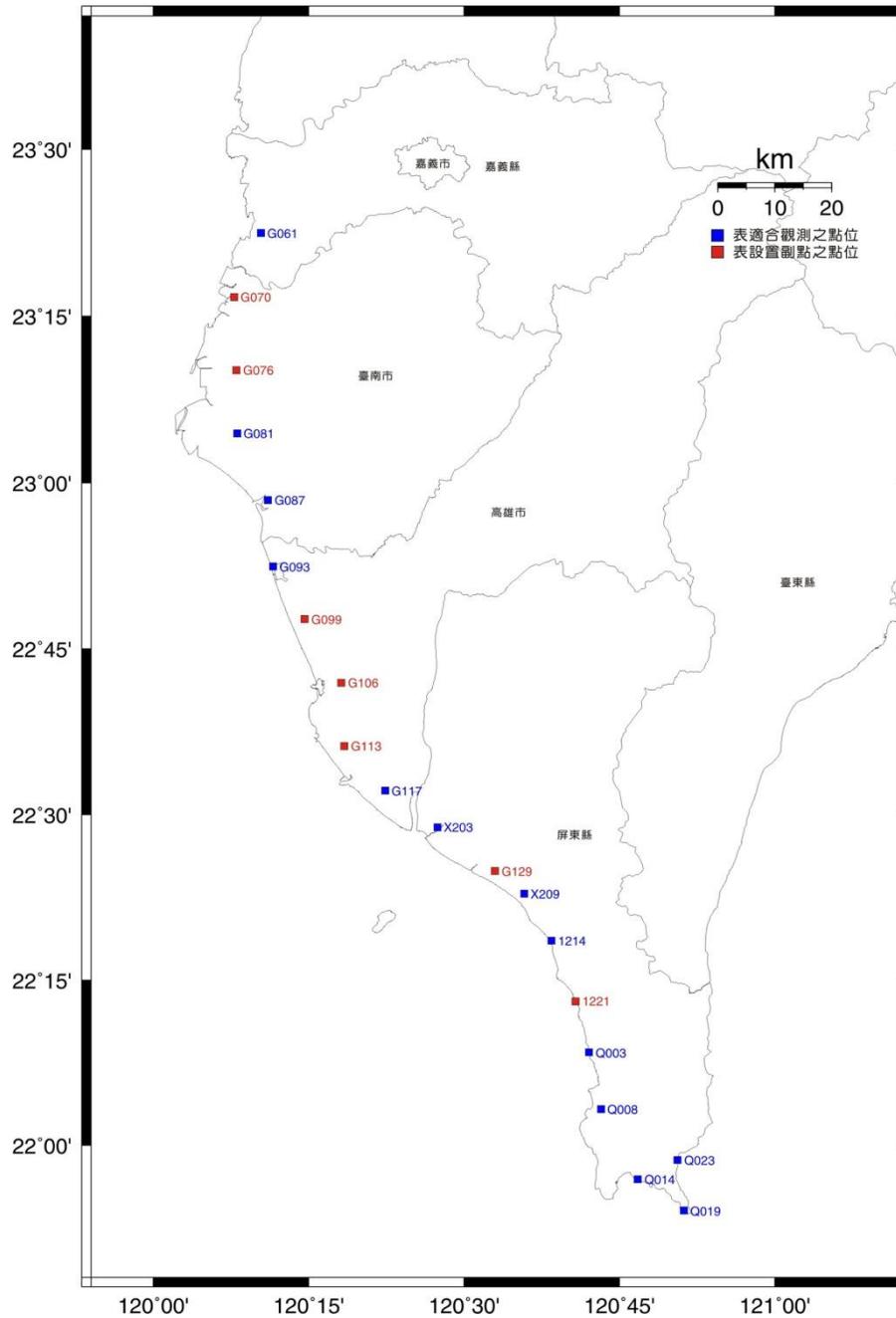


圖 4-1 24 小時 GPS 觀測點位分布圖

4-2 GPS 測量外業流程

GPS 測量外業作業流程如下：

1. 於測站架設天線，並確實定心、定平。
2. 依指北針調整天線方位，使天線特定標誌指向北方。並量測

天線高度且記錄之。

3. 確實接妥天線與接收儀之電纜及電源電纜。電池正、負極應注意正確接法，以免短路，損及電池或接收儀。
4. 打開接收儀電源，按儀器正常操作程序開機，檢查接收功能及記憶體空間是否足夠。
5. 按計畫觀測時段表內規劃之時段，輸入點號、天線高、時段代號、資料記錄速率，最少接收衛星個數等參數，開始觀測並填寫觀測紀錄表。
6. 以數位相機拍攝 3 張觀測作業情形相片，其中一張拍攝天線高量測情況，應可辨識讀數，一張須可見標石號碼，另一張應儘可能同時可見接收儀、點位標石及週遭環境。
7. 觀測時段結束後關機，並重新量測天線高度，前後兩次天線高之差不應大於 3mm，取平均值做為最後天線高。若前後差值超過 3mm，應查明原因，提出處理意見填寫於觀測紀錄表備註欄。注意光學基座對心是否偏移，若有則估計其偏移量及方向，記載於觀測紀錄表備註欄。

GPS 外業測量自 2011 年 4 月 25 日~4 月 30 日，共計 6 天，採用 Trimble 5700（搭配 Zephyr Geodetic 天線盤）4~9 部觀測（圖 4-2），其實際觀測時段表列於附錄一。



圖 4-2 GPS 外業測量

4-3 陸上 GPS 外業觀測資料處理流程

GPS 測量成果的品質，取決於資料處理過程是否完善，故野外觀測蒐集的資料，應先逐日逐時段處理，求解各基線分量後，再結合全部所觀測基線的資料，進行整體網形平差的成果與分析。而在執行本次計畫時，對於觀測資料的解算，採用 Bernese 軟體，對於資料處理的過程需十分嚴密而謹慎，圖 4-3 為處理外業觀測資料的作業流程，而詳細說明分述如後：

1. 對照計畫觀測時段表及觀測紀錄表，確保觀測點位正確，並檢核觀測相片是否相符。
2. 核對下載檔名與儀器儲存檔名是否相同，若否則研判是否儲存錯誤或是下載錯誤。
3. 檢核點號、天線高、觀測時間是否正確，若否則加以註記並於後續進行修正。
4. 確定觀測資料量是否足夠，單點定位是否成功，否則須修正後續觀測計畫進行重測。
5. 使用商用軟體 GPSurvey 進行基線試算，確保整個外業觀測成功，若判定觀測失敗，則將觀測失敗的點位配合修正後續觀測計畫進行重測。
6. 資料於各階段均進行備份，並確認觀測無誤後製作實際觀測時段表。接著化算天線高 Rinex（接收儀標準交換格式，Receiver Independent Exchange format）所定義的天線參考點（Antenna Reference Point, ARP）位置。
7. 為配合 Bernese 軟體計算使用，將原始的觀測資料轉換為 Rinex 檔，並檢核檔頭是否有誤，若有錯誤則加以進行修正。
8. 修正 ARP 高度於 Rinex 觀測資料檔檔頭，以使 Rinex 格式檔能為 Bernese 軟體應用計算。

9. 檢核無誤的資料進行同步觀測時間的檢查，避免單站資料雖具有 24 小時觀測量，但同步觀測時間卻不足的問題產生。

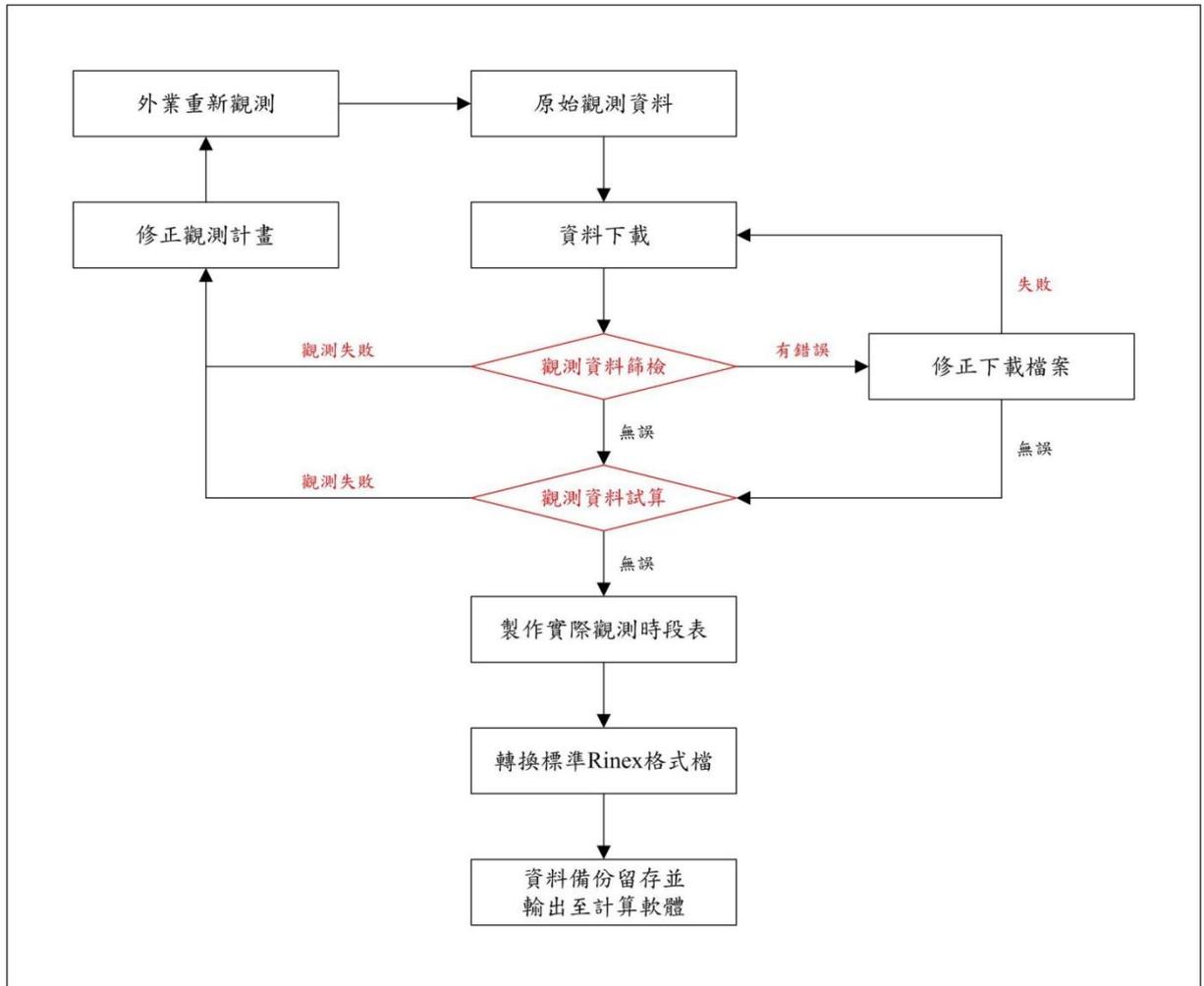


圖 4-3 GPS 外業觀測資料處理流程圖

4-4 陸上 GPS 觀測資料計算方法

外業觀測資料經由初步篩檢後，接著使用 Bernese 軟體進行計算，其計算流程如圖 4-4，而處理過程則分述如後。

1. 相關資料蒐集階段：

衛星的軌道誤差雖可經由相位觀測量二次差降低其影響，但仍可能有

殘餘誤差的存在，而採用的解決方式乃是使用精密軌道（星曆）逕行消除之。因此採用的星曆為 IGS（International GPS Service）提供之精密星曆，以取代接收儀接收的廣播星曆。

為配合 Bernese 軟體計算使用，須至瑞士伯恩大學天文研究所的伺服器下載最新的參數，其包含下列四個參數檔案；

- (1) 地球每天的自轉參數檔案（C04_****.erp；****表西元年）。
- (2) 各種不同 GPS 天線盤的相位中心偏移量以及相位中心變化量（Phas_igs.01）。
- (3) 標示著每一顆衛星的健康狀態（Sat_****.crx；****表西元年）。
- (4) 標示著每一顆衛星的重量、天線盤傾角等相關資訊檔（Satellit.ttt）。

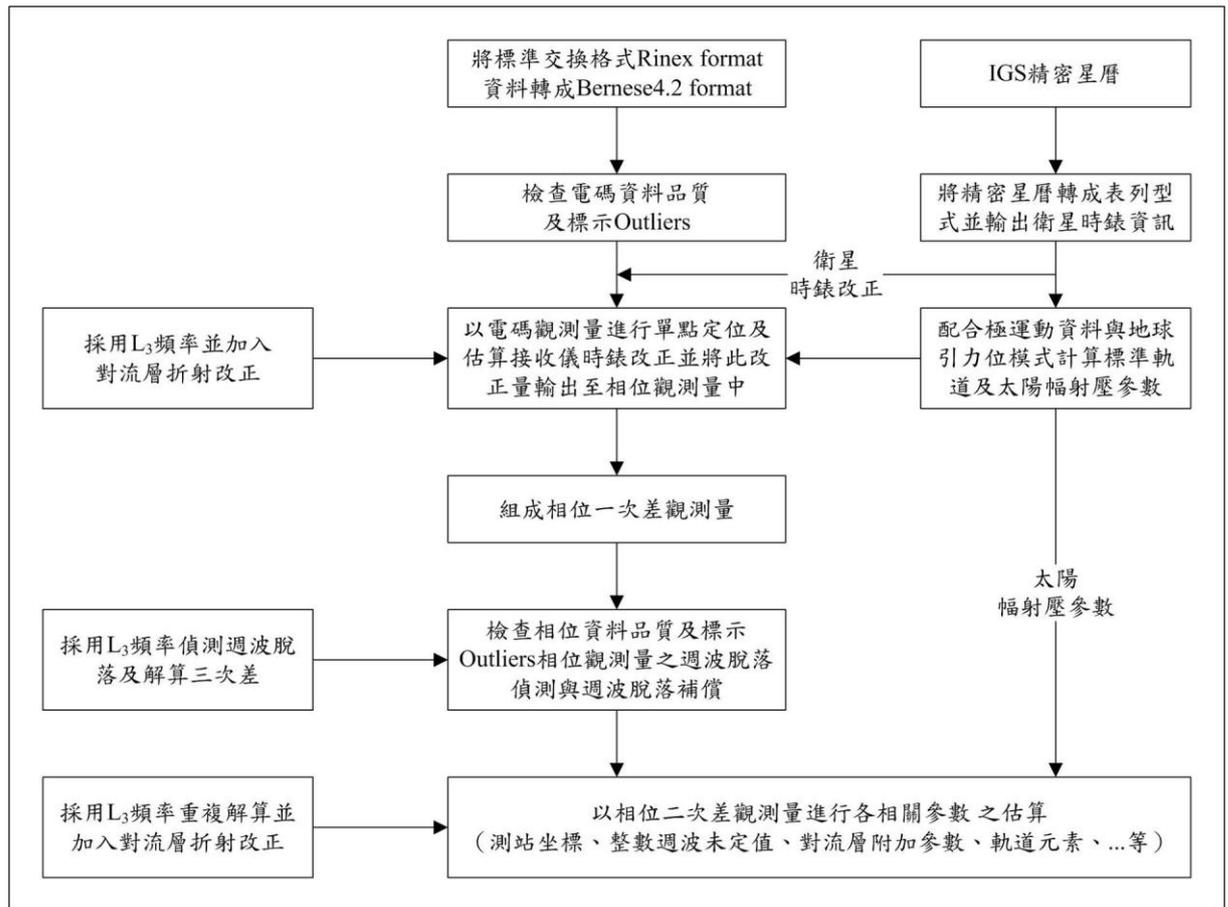


圖 4-4 Bernese 軟體計算流程圖

2. 資料前處理階段 (Yang et al., 2001) :

(1) 將標準轉換格式 (Rinex) 之觀測資料轉成 Bernese 格式。

自精密星曆中萃取出各衛星之時錶修正量，以供後續處理之用。

(2) 將精密星曆轉成表列型式，再組成 Bernese 格式之軌道。其中

組軌道之原則：利用每天之精密星曆，組成 24 小時之軌道，包

括 6 個克卜勒軌道元素和 2 個 ROCK4/42 模式之太陽輻射參數，

作為資料修編與後處理之用。

(3) 進行電碼資料之檢查，剔除錯誤觀測量。

(4) 利用電碼資料進行單點定位，計算測站導航坐標及接收儀時

間誤差量，並將時間修正於載波相位資料中，使接收儀之時間能準確至 10^{-6} - 10^{-7} 秒。

- (5) 組成獨立的基線網一次差觀測量，即將所有測站依最短距離 (shortest) 之原則，組成線性獨立的一次差觀測量。
- (6) 利用精密星曆與衛星時錶資料進行資料之修編、週波脫落之補正 (cycle slip editing)、時錶差修正、標示錯誤的觀測量或不能使用之觀測量。對於週波脫落之處理，採自動偵測與補償方式。

3. 資料後處理階段：

- (1) 軌道部分：採用 IGS 精密星曆，所有軌道參數視為已知，固定之而不加以求解。
- (2) 極運動改正：採用 IERS (International Earth Rotation Service) 公布值 (C04_****.erp；****表西元年)，將 UTC 與 UT1 之差值加以修正之，並將坐標值由瞬間之極坐標系修正至 J2000 平均極 (CIO) 坐標系上。
- (3) 引力位模式：採用 GEM-T3 (8×8)，其中； $C_{21} = -0.17 \times 10^{-9}$ ， $S_{21} = 1.19 \times 10^{-9}$ ， $GM = 398600.4415 \text{ km}^3 / \text{s}^2$ ，日、月引力及地球固體潮 (solidearthtide) 也加以考慮。
- (4) 對流層折射改正：採用 Hopfield 模式 (Hopfield, 1971)，以海平面標準氣象資料，溫度 18°C ，相對溼度 50%，大氣壓力

1013.25mbar，推求各測站的對流層改正起始值，並引用大氣資料進行對流層折射影響量的改正參數。以各測站每 2 小時增加 1 個參數之方式，加以吸收殘留的對流層折射誤差。

計算時採用仰角 10 度以上的觀測資料，此乃為避免在低仰角觀測時伴隨的較大雜訊（noise and multipath）所造成之影響。

整數週波未定值求解過程，乃先利用實數解求得一精確之坐標（或利用以前計算過之坐標值），然後採用 QIF(Quasi Ionosphere-Free) 方法，求得 L_1 和 L_2 的整數週波未定值，再組成無電離層（ionosphere free）效應觀測量 L_3 ，並將解得 L_1 和 L_2 的整數週波未定值代入無電離層效應之觀測方程式中，開始求解其餘各未知參數。

最後此 20 點之解算成果列於表 4-2，利用各點每小時解一筆之靜態解，每點共有 24 筆靜態觀測解，列出各點之靜態解 RMS 分析精度，列於表 4-3。

表 4-2 24 小時陸上 GPS 測量成果表

地名	點號	緯度(dd:mm:ss)				經度(dd:mm:ss)				橢球高(m)	正高(m)
		N	mm	ss		E	mm	ss			
南勢湖橋	1214	N	22	18	35.16637	E	120	38	26.62592	33.483	11.106
尚禮街公園	G093	N	22	52	26.34136	E	120	11	32.97682	21.944	1.849
遊客中心	Q014	N	21	56	55.67536	E	120	46	47.08155	42.602	20.416
鵝鑾鼻	Q019	N	21	54	4.92184	E	120	51	13.21327	58.622	36.327
篤厚橋	G076A	N	23	10	7.55760	E	120	8	2.27838	22.741	3.008
溪埔	G081	N	23	4	26.77326	E	120	8	5.86108	22.946	3.266
明和公園	G087	N	22	58	25.50544	E	120	11	3.97795	21.955	1.964

東安莊	G061	N	23	22	29.13381	E	120	10	23.45371	21.140	1.466
彌陀	G099A	N	22	47	40.43291	E	120	14	36.64597	23.732	3.564
中油	G106A	N	22	41	55.22596	E	120	18	8.65911	36.096	15.748
獅甲國中	G113A	N	22	36	12.00171	E	120	18	24.79885	22.838	2.537
中鋼鋁業	G117	N	22	32	10.74232	E	120	22	23.53127	28.021	7.489
三聖堂	G070A	N	23	16	42.99779	E	120	7	47.37269	20.318	0.734
籃子	Q003	N	22	8	27.26315	E	120	42	4.80961	44.946	22.619
保力社區	Q008	N	22	3	18.50636	E	120	43	13.70113	28.318	6.177
佳冬分駐所	G129A	N	22	24	52.59643	E	120	32	59.59233	25.285	3.787
海濱橋	1221A	N	22	13	6.07765	E	120	40	45.53091	29.616	7.201
興海	Q023	N	21	58	40.50659	E	120	50	37.38262	35.064	12.550
新園節點	X203	N	22	28	52.06186	E	120	27	24.97911	24.814	3.924
水底寮節點	X209	N	22	22	50.24336	E	120	35	47.81719	30.545	8.572

表 4-3 24 小時 GPS 靜態解 RMS 精度分析

地名	點號	X	Y	Z
布袋港	GS01	0.0013	0.0020	0.0011
興達港	GS02	0.0016	0.0026	0.0014
東港	GS03	0.0015	0.0023	0.0013
後壁湖漁港	GS04	0.0016	0.0026	0.0013
籃子	Q003	0.0007	0.0011	0.0006
保力社區	Q008	0.0006	0.0009	0.0005
佳冬分駐所	G129A	0.0008	0.0013	0.0007
海濱橋	1221A	0.0007	0.0012	0.0006
興海	Q023	0.0006	0.0009	0.0005
新園節點	X203	0.0007	0.0011	0.0006
水底寮節點	X209	0.0007	0.0011	0.0006
篤厚橋	G076A	0.0006	0.0010	0.0005
溪埔	G081	0.0006	0.0010	0.0006
明和公園	G087	0.0007	0.0012	0.0006
東安莊	G061	0.0006	0.0011	0.0006
彌陀	G099A	0.0008	0.0012	0.0006

中油	G106A	0.0008	0.0014	0.0007
獅甲國中	G113A	0.0008	0.0013	0.0007
中鋼鋁業	G117	0.0009	0.0014	0.0007
三聖堂	G070A	0.0005	0.0009	0.0005
南勢湖橋	1214	0.0008	0.0013	0.0007
尙禮街公園	G093	0.0008	0.0014	0.0007
遊客中心	Q014	0.0007	0.0011	0.0006
鵝鑾鼻	Q019	0.0006	0.0010	0.0005

4-5 已知點檢核

本案中解算 GPS 資料所使用之已知點，包含內政部國土測繪中心 e- GPS 主站 TASI (臺西)、CHYI (東石)、CKSV (成大測量)、KASH (高雄港)、FALI (枋寮) 及 KDNM (墾丁) 等共 6 站 (由北至南參照圖 4-5)。

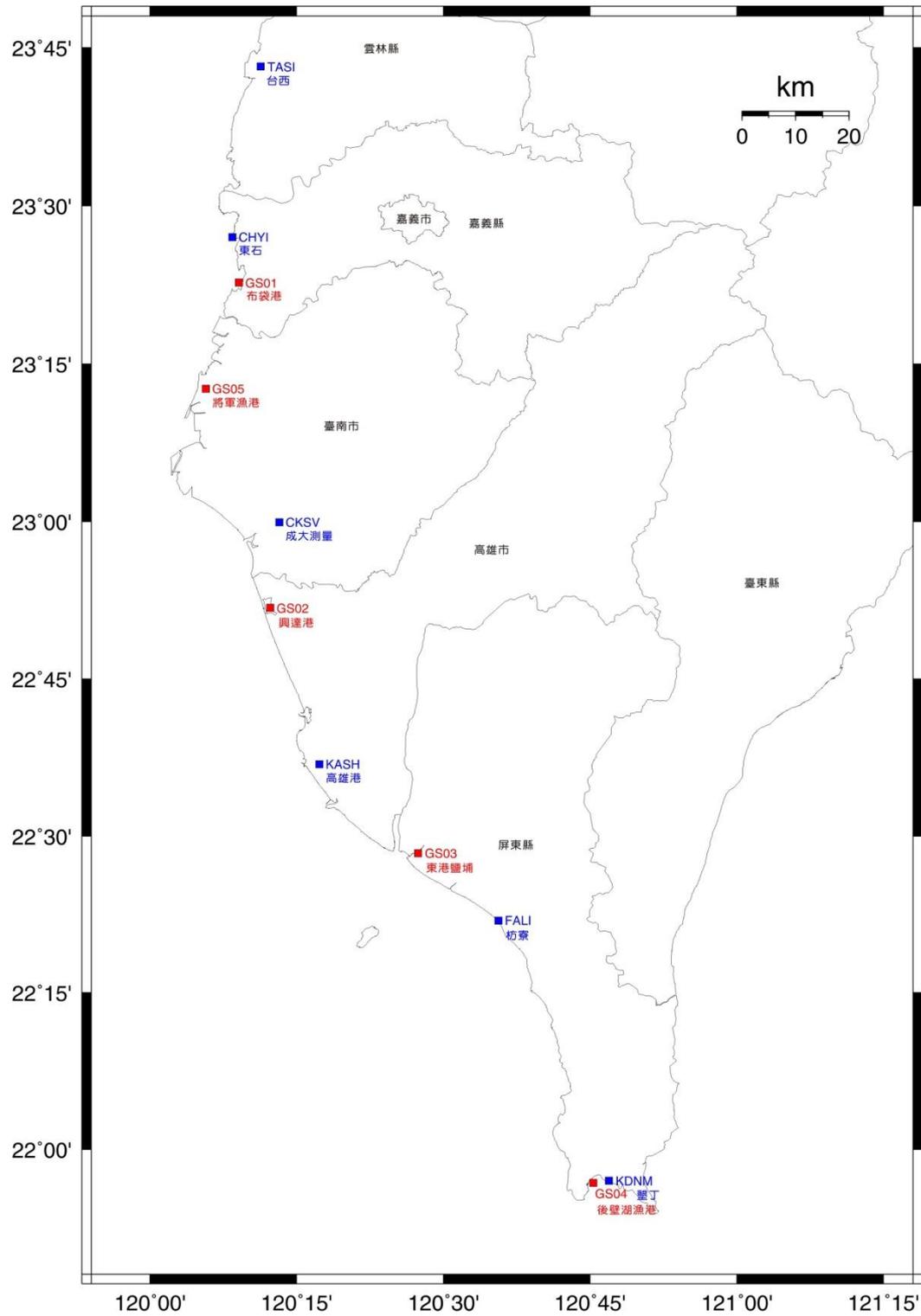


圖 4-5 已知點分布圖

前述 6 個已知點，於 24 小時 GPS 觀測時合併加入計算，並以 KASH 為約制點進行最小約制平差計算 (採用 TWD97 2010.0)，並檢

核其餘 5 個點位坐標，其結果如表 4-4。

表 4-4 已知點坐標較差表

序號	點名	點號	縱坐標差 (m)	橫坐標差 (m)	橢球高差 (m)	備註
1	東石	CHYI	0.028	0.067	-0.040	
2	成大測量	CKSV	0.026	0.049	-0.023	
3	枋寮	FALI	0.034	-0.012	-0.026	
4	高雄港	KASH	0.000	0.000	0.000	約制點
5	墾丁	KDNM	0.044	0.001	-0.029	
6	台西	TASI	0.030	0.070	-0.017	

4-6 閉合差分析

接著將最小約制平差成果進行閉合差分析，進行此項分析的目的亦是確保所計算的基線品質。理論上；環線內各坐標分量的三維閉合差應等於零，如不等於零，則純為基線計算處理所致。因此；環狀閉合差的大小可作為基線處理精度檢查的標準。

而本次計畫閉合差分析的標準，若參照合約規範及衛星控制點的閉合差要求，則其規定如下，閉合差分析成果列於附錄 2，皆滿足下列要求：

1. 閉合圈中之基線源自不同觀測時段數：不得小於 3。
2. 閉合圈中獨立觀測之基線數：不得小於 2。
3. 閉合圈總邊長：不得大於 500 km。
4. X、Y、Z 各坐標分量之閉合差不得大於 2cm。

第五章 大地起伏計算

5-1 大地起伏計算方法

大地起伏計算的方法可分為 Stokes 積分法與最小二乘配置法 (Least Squares Collocation, LSC)。Stokes 積分的優點為可利用快速傅立葉(Fast Fourier Transform, FFT)計算之，可節省大量計算時間；LSC 的優點則是可結合各種不同型態與精度的重力值來計算大地起伏值。基於本案蒐集了包括陸測、船測、空載與測高等不同型態的重力值，LSC 是比較適合用於臺灣大地起伏的計算方法。LSC 的詳細理論可參考 Mortiz(1980)。在 LSC 計算裡，最重要的就是各個量之間協變方函數的決定。本案結合 EGM2008(展開至 2160 階)參考場係數誤差與 Tscherning-Rapp(1974)誤差模型計算協變方函數。LSC 方法在國際上已經發展的非常成熟，世界上第一個達到 cm 級大地起伏計算精度的結果即採用 LSC 法(Denker and Wenzel, 1987)。隨後 Sevilla (1997), Hwang (1997), Tscherning et al (2001)也用 LSC 得到許多高精度的大地起伏結果。

本研究使用整合之後的重力資料，用去除回覆法 (remove-computation-restore)計算大地起伏，依去除回覆法的原理，可將大地起伏 N 分為參考場大地起伏 N_{ref} 、殘餘大地起伏 N_{res} 與剩餘地形模型(residual terrain model, RTM)大地起伏 N_{rtm} 。如圖 5-1 所示， N_{ref} 、

N_{res} 和 N_{rtm} 分別表示低頻、中頻與高頻的大地起伏 (Low, Intermediate and High Frequency Geoid)。利用參考場與剩餘地形模型分別來表達大地起伏長、短波長部分，可使 LSC 方法在計算殘餘大地起伏時更精確。

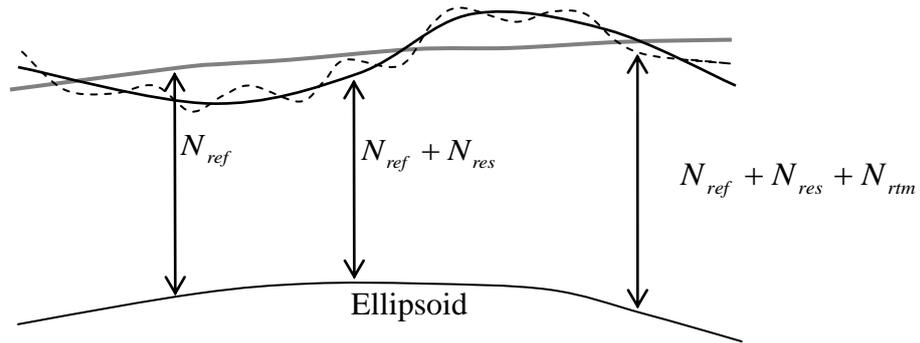


圖 5-1 三種不同頻率的大地起伏，其中 N_{ref} 、 N_{res} 和 N_{rtm} 分別表示低頻、中頻與高頻的大地起伏。

故大地起伏 N 可表示為

$$N = N_{ref} + N_{res} + N_{rtm} \quad (5-1)$$

同理，重力異常 Δg 亦可分成參考場重力異常 Δg_{ref} 、殘餘重力異常 Δg_{res}

與剩餘地形模型重力異常 Δg_{rtm}

$$\Delta g = \Delta g_{ref} + \Delta g_{res} + \Delta g_{rtm} \quad (5-2)$$

Δg_{ref} 與 N_{ref} 的計算公式為球諧係數展開式 (Spherical Harmonic Expansion)，如下所示 (Heiskanen and Moritz, 1967)：

$$\Delta g_{ref} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=2}^N (n-1) \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \quad (5-3)$$

$$N_{ref} = R \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \quad (5-4)$$

其中 R 是地球半徑、G 為萬有引力常數、M 是地球質量、 \bar{C}_{nm} 與 \bar{S}_{nm} 是完全正規化之地球引力位球諧係數 (fully normalized spherical harmonic coefficients)、 \bar{P}_{nm} 是完全正規化之 Legendre 函數、n 與 m 是階數 (degree) 及次數 (order)。

在剩餘地形模型的計算方面，如圖 5-2 所示，乃計算真實地形面 (True Elevation Surface) 與平均地形面 (Mean Elevation Surface) 之間對計算點 P 的效應。在地形變化平緩的地方，此效應量不大，但在地形變化劇烈的地方，此效應量非常明顯。在計算上，真實地形面乃應用內政部公佈之臺灣區 9 秒 DEM 模型，平均地形面為應用 6 分的 DEM 模型。

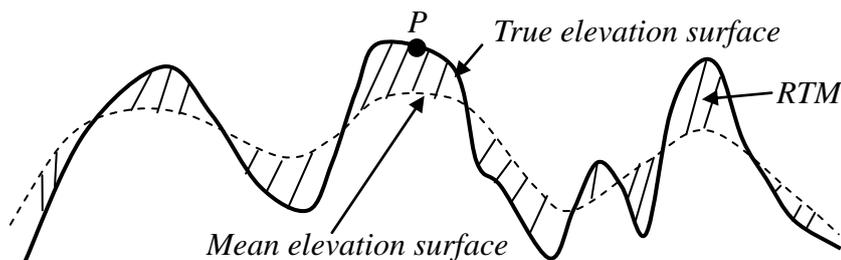


圖 5-2 剩餘地形模型示意圖，即真實地形與平均地形間的部分(斜線區域)。

剩餘地形模型重力異常 Δg_{rm} 與大地起伏 N_{rim} 的計算公式為 (Forsberg, 1984)：

$$\Delta g_{rm}(x_p, y_p) = 2\pi G \rho (\bar{h} - \bar{h}_r) - c(x_p, y_p), \quad (5-5)$$

和

$$N_{rim}(x_p, y_p) = \frac{G}{\gamma} \int_E \frac{\rho(x, y)(h(x, y) - h_r(x, y))}{\sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}} d_x d_y \quad (5-6)$$

其中 $c(x_p, y_p)$: 計算點 P 的地形改正量。

(x, y) : 為積分範圍內之任意點平面坐標

\bar{h} : DEM 高度。

\bar{h}_r : 參考 DEM 高度。

ρ : 地質密度 (採 2.67 g/cm^3)。

$c(x_p, y_p)$ 與 N_{rim} 可用 FFT 計算。

利用 LSC 公式，搭配全球參考場係數誤差與 Tscherning-Rapp 誤

差模型可計算殘餘大地起伏 N_{res} ，公式如下所示：

$$N_{res} = \left(C_{n\Delta g^0} \right) \left(C_{\Delta g^0} + D_{\Delta g}^0 \right)^{-1} \left(\Delta g_{res}^0 \right) \quad (5-7)$$

其中 Δg_{res}^0 : 高度 0 公尺的殘餘重力異常。

$C_{\Delta g^0}$: 地面重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^0}$: 大地起伏與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$D_{\Delta g}^0$: 地面重力異常的雜訊。

若將空載重力加入計算，則公式變為：

$$N_{res} = \begin{pmatrix} C_{n\Delta g^0} & C_{n\Delta g^{5000}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\Delta g^0} + D_{\Delta g}^0 & C_{\Delta g^0 \Delta g^{5000}} \\ C_{\Delta g^{5000} \Delta g^0} & C_{\Delta g^{5000}} + D_{\Delta g}^{5000} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta g_{res}^0 \\ \Delta g_{res}^{ag} \end{pmatrix} \quad (5-8)$$

其中

Δg_{res}^0 : 高度 0 公尺的殘餘重力異常。

Δg_{res}^{ag} : 空中殘餘重力異常。

$C_{\Delta g^0}$: 地面重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^{ag}}$: 空中重力異常與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^0 \Delta g^{ag}}$ ：地面重力異常與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^{ag} \Delta g^0}$ ：空中重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^0}$ ：大地起伏與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^{ag}}$ ：大地起伏與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$D_{\Delta g}^0$ ：地面重力異常的雜訊。

$D_{\Delta g}^{ag}$ ：空中重力異常的雜訊。

空載重力在應用時，亦可向下延續(downward continuation)至地表面，與地面重力值結合，用(5-7)式計算殘餘大地起伏值，向下延續的方法包括 FFT 和 LSC 等(Hwang et al., 2007；蕭宇伸, 2007)。此外，若測高資料格式為水準面梯度(geoid gradient)，計算時必須與格式為重力異常的重力資料分開，公式為：

$$N_{res} = \begin{pmatrix} C_{n\Delta g^0} & C_{ne} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\Delta g^0} + D_{\Delta g^0} & C_{\Delta g^0 e} \\ C_{e\Delta g^0} & C_e + D_e \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta g_{res}^0 \\ e_{res} \end{pmatrix} \quad (5-9)$$

其中

Δg_{res}^0 ：高度 0 公尺的殘餘重力異常。

e_{res} ：殘餘水準面梯度。

$C_{\Delta g^0}$ ：地面重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

C_e ：水準面梯度與水準面梯度之間的協變方矩陣。

$C_{e\Delta g^0}$ ：水準面梯度與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^0 e}$ ：地面重力異常與水準面梯度之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^0}$ ：大地起伏與地面重力異常之間的協變方矩陣。

C_{ne} ：大地起伏與水準面梯度之間的協變方矩陣。

D_e ：水準面梯度的雜訊。

$D_{\Delta g}^0$ ：地面重力異常的雜訊。

將計算得的 N_{res} ，加上 N_{ref} 和 N_{rim} ，最後得到一 quasi-geoid，將 quasi-geoid 經過一改正公式改正，可得到真正的 geoid，改正公式為：

$$N_{geoid} \approx N_{quasi-geoid} - \frac{2\pi G\rho}{\gamma} H^2 \quad (5-10)$$

其中

G：萬有引力常數

ρ ：地層密度

H：正高

5-2 大地起伏模型精度驗證方法

重力法大地起伏模型是透過 GPS/水準資料進行檢核，即在水準點上進行 GPS 觀測得到橢球高 h ，並與水準點上已有正高 H 相減，即得該水準點上之大地起伏(幾何法大地起伏值/或稱之為觀測大地起伏值)。

幾何法大地起伏之單點精度甚高，因此重力法大地起伏模型可與其比較來評估模型精度。由於平均海水面與大地水準面通常存有一常差，如圖 5-3 所示，以及長波長大地起伏模式不完善，較準確的評估方式為比較兩水準點間的觀測值與重力大地起伏差值，利用其差值的標準偏差來評估大地起伏精度。

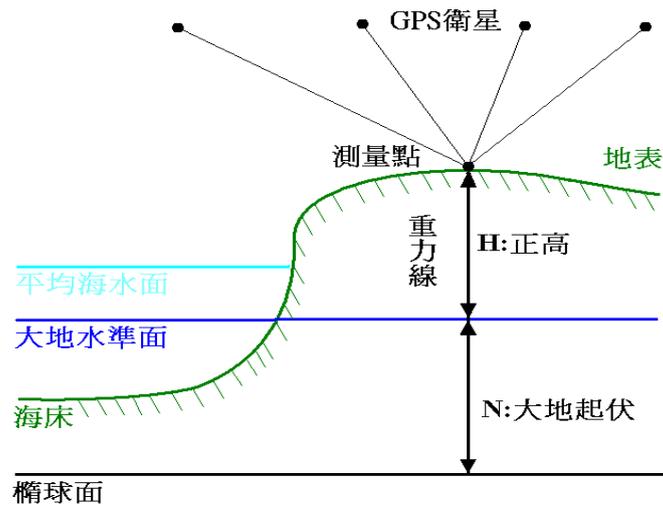


圖 5-3 大地起伏及橢球高 $H+N$ 之幾何關係

5-3 大地起伏成果及精度驗證

利用所蒐集到的所有重力資料，加上本案近岸船測重力，利用 5-1 節所述之方法所計算出的大地起伏如圖 5-4。

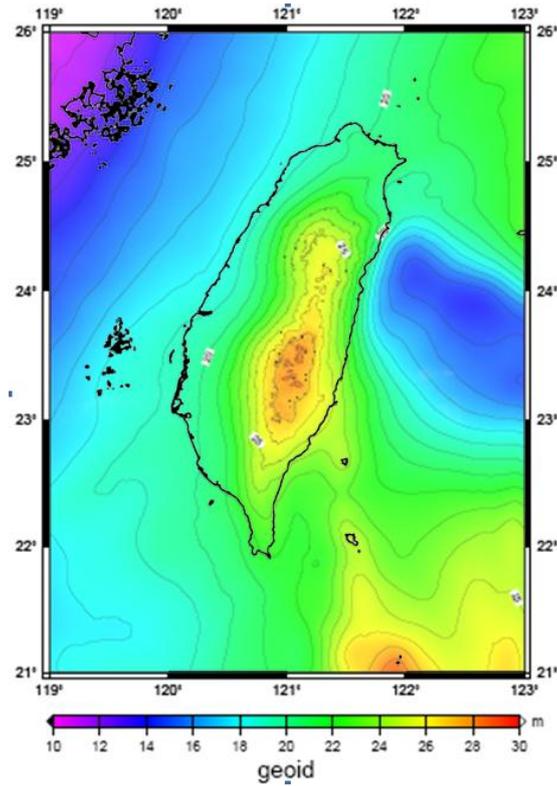


圖 5-4 臺灣新大地起伏網格

以現有之 4 條檢核線加上本案工作項目中所挑選的 24 小時 GPS 測量成果，可得到 5 條路線，共 58 點檢核點來評估大地起伏模型精度，位置如圖 5-5。北部地區之檢核線共有 9 點，為圖上圓形之藍色點；中部地區之檢核線共有 10 點，為圖上正方形之藍色點；東部地區之檢核線共有 10 點，為圖上正五邊形之藍色點；南部地區之檢核線共有 9 點，為圖上三角形之藍色點。

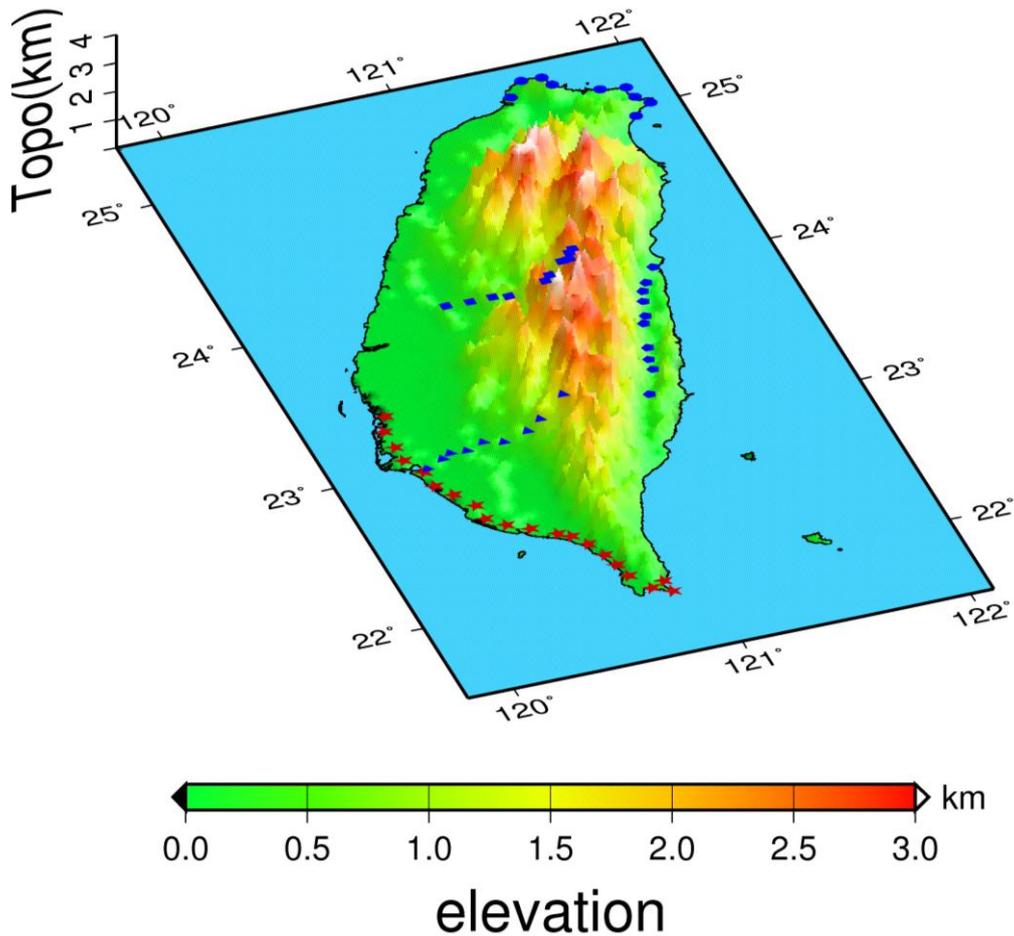


圖 5-5 大地起伏模型檢核線分布 (藍色點為現存檢核線，紅色點為本案工作項目之 24 小時 GPS 測量點位)

加上本案船測重力測量測量成果與 100 年度花東山區重力前後的大地起伏精度分析如表 5-1，表中 Twgeoid 為未加入本案船測重力與花東山區重力資料前的大地起伏模型，Twgeoid100 為加入上述資料後的大地起伏模型。兩模型皆為交大團隊於本年度製作，唯一的差別只有花東山區重力與本案船測重力是否加入的差別。

由表 5-1 我們可以看到，中部的檢核線的標準差值由 8.7 公分提升到 7.1 公分，可判斷是加入花東及山區重力資料的影響；南部的檢

核線標準差由 5.9 變為 6.3 公分，雖然精度變差但仍在誤差範圍之內，最有效可以看出本案船測重力貢獻的方式可由新增的 20 個檢核點上看出，其標準差從未加入船測重力前的 8.9 公分提升為加入船測重力後的 6.5 公分。

表 5-1 大地起伏精度評估 (單位: m)

路線/圖示	model	Max	Min	Mean	Std dev
北部 	Twgeoid	-0.117	-0.226	-0.194	0.026
	Twgeoid100	-0.117	-0.226	-0.194	0.026
東部 	Twgeoid	-0.119	-0.391	-0.248	0.079
	Twgeoid100	-0.119	-0.391	-0.248	0.079
中部 	Twgeoid	-0.020	-0.289	-0.131	0.087
	Twgeoid100	-0.020	-0.261	-0.113	0.071
南部 	Twgeoid	-0.232	-0.398	-0.325	0.059
	Twgeoid100	-0.232	-0.389	-0.306	0.063
新增 20 點 	Twgeoid	-0.039	-0.369	-0.188	0.089
	Twgeoid100	-0.107	-0.366	-0.215	0.065

Twgeoid 與 Twgeoid100 的差異分布如下圖 5-6，從圖 5-6 可見由於計算半徑的限制，新加入的重力資料能影響的範圍有限，若影響的範圍恰好不在檢核線上，則此組資料能否提升大地起伏則是未知數，

這也是為何本案還要進行西南沿海 20 點 GPS 連測的主要原因，為的就是能在船測範圍內多增加檢核點；兩模式差異統計資料如表 5-2。

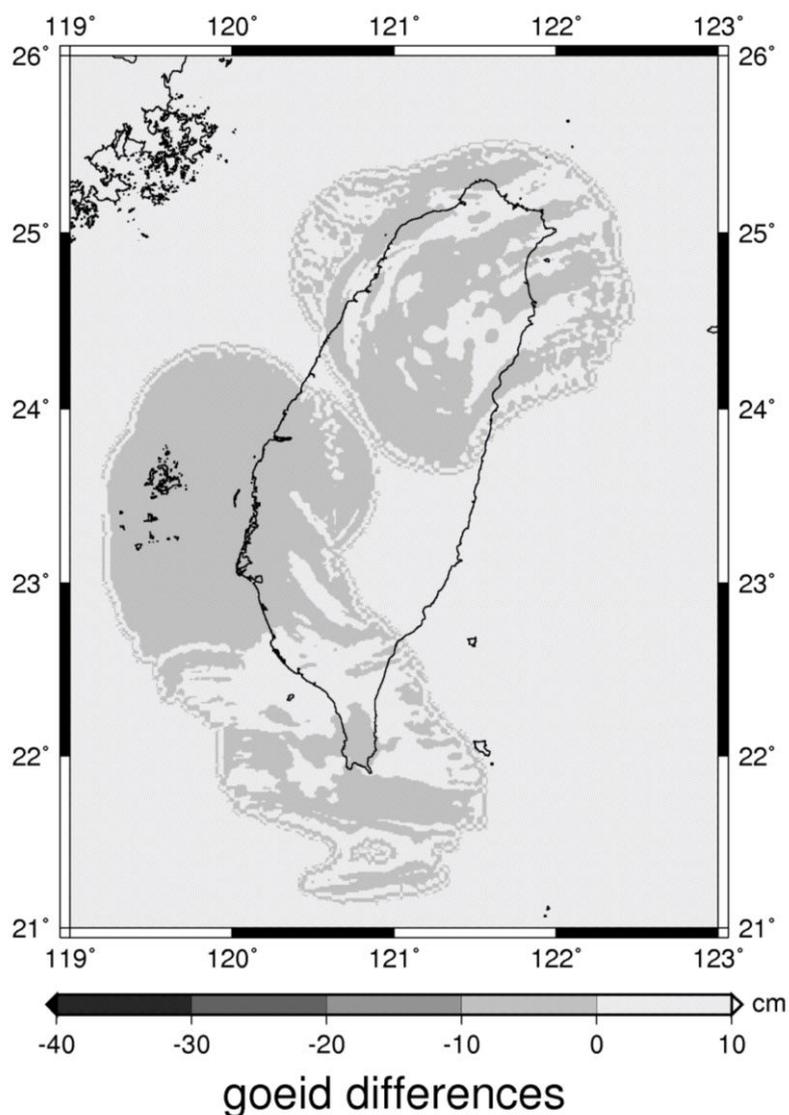


圖 5-6 Twgeoid 與 Twgeoid100 差異分布

表 5-2 Twgeoid 與 Twgeoid100 差異統計分析（單位：cm）

Max	Min	Mean	Std.
16.6	-20.6	-0.42	2.36

為了更清楚的表現出前後兩大地起伏模式在新增的檢核點上的

差異並評估本案船測重力貢獻，圖 5-7 表示在這新增的 20 個檢核點（表 4-2）上，加入本案船測成果前後的大地起伏值與幾何法大地起伏的差值。

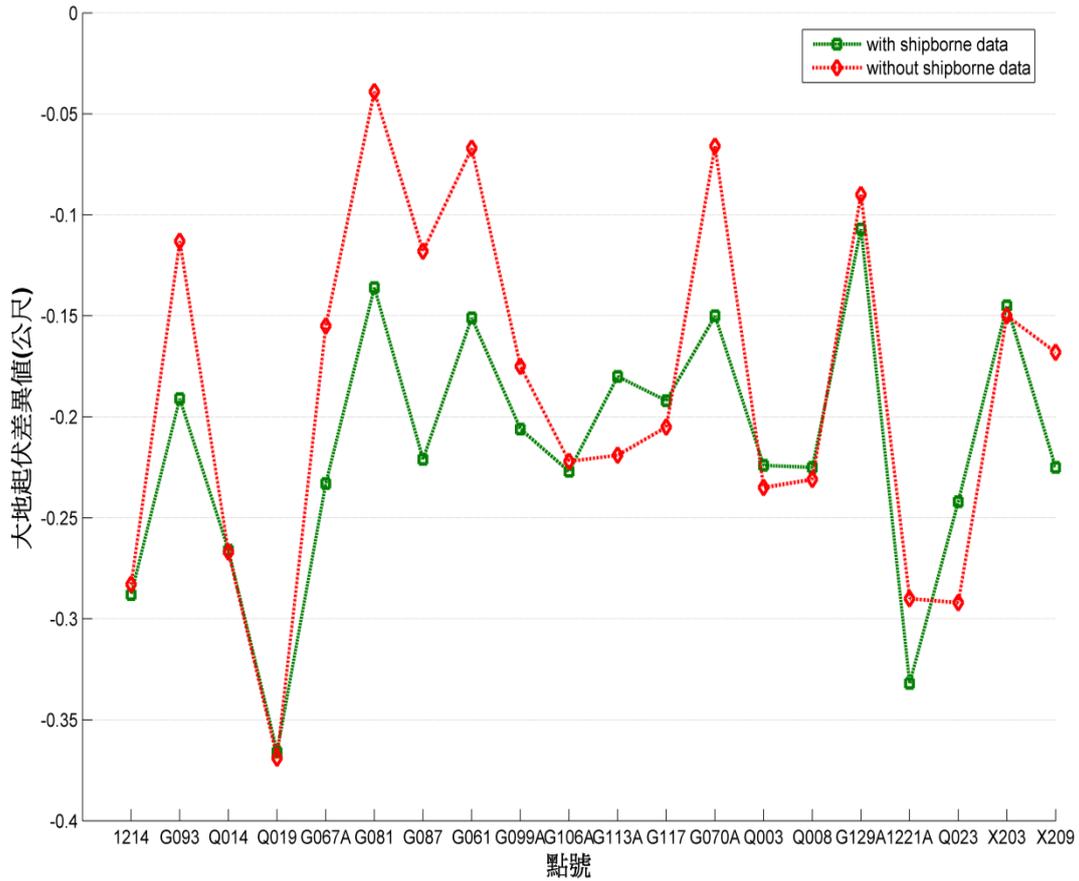


圖 5-7 在新增檢核點上加入船測重力前後之大地起伏模型與幾何法大地起伏差異（紅色為加入前，綠色為加入後）

第六章 繳交項目

本案已完成合約交付之所有事項，以下為各項成果整理。

(1) 船載重力測量觀測及數據分析

近岸的船載重力測量於本年度 6 月 14 日完成，測線範圍函請貴中心同意之後變更過一次。利用 TRACK 軟體進行船載 GPS 動態資料之計算，得到南北(N)、東西(E)以及橢球高(h)方向的平均精度分別介於 $\pm 1.1\sim 3.1$ cm、 $\pm 1.3\sim 3.4$ cm 以及 $\pm 3.5\sim 9.8$ cm 之間，皆可達到 cm 等級之精度；船測重力成果利用交叉點分析觀測數據，共有 41 個交叉點可供評估，平差處理後精度可達 1.33mgal。

(2) 重力資料蒐集

蒐集臺灣已有的陸測重力、船測重力空載及衛星測高重力資料，就其觀測時間、數量、精度等做一整理，並加入 100 年度花東山區重力測量值。利用最小二乘配置法整合臺灣所有重力資料，依照合約內容計算整合後之空間重力異常模型及布格重力異常模型。

(3) 大地水準面模式計算

將整合後的重力資料納入大地起伏網格計算，由於臺灣有許多的重力資料，需考慮不同精度的影響給定不同權值，陸測重力精度最高則給定最高權值，反之測高重力權值最低，利用最小二乘配置法計算，精算出 1' 解析度的大地起伏模式。

(4) 陸上 GPS 測量成果

完成陸上 20 點 24 小時的 GPS 觀測，利用已知點坐標較差（縱坐標差由 2.6 公分~4.4 公分；橫坐標差由-1.2 公分~7.0 公分；橢球高差由-4.0 公分~-1.7 公分）、靜態觀測解之各點 RMS 值分析檢核精度(X、Y、Z 方向之 RMS 皆小於 2mm)，並照合約規範利用閉合差分析確保所計算的基線品質，閉合差分析成果列於附錄 2。

(5) 大地水準面模式精度檢核

利用現存之檢核線並將本案所做之 24 小時 GPS 觀測數據搭配水準資料之 20 個點位（西南部）一同納入，分析各點位實測大地起伏值與內插至大地起伏模型所得的值的差異，用以評估精度。其中加入了本案船載重力成果之後，在新增的西南部檢核線上可看出，精度由原先的 8.9 公分提升至 6.5 公分；從中部檢核線可看出加入 100 年度花東山區重力之後，精度由 8.7 公分提升至 7.1 公分。

第七章 結論與建議

7-1 結論

臺灣有許多不同種類重力資料，針對陸地重力測量共有 6 組(詳述在 2-1 節)，其中由中央研究院(Yen et al., 1990; Yen et al., 1995)完成的 603 點重力資料，雖然年代久遠且當時的坐標精度未如現在精確，但由於其分布涵蓋臺灣山區，仍是不可或缺的觀測量。本年度加上花東山區 100 年度的重力測量資料，所求得的大地起伏模型在山區精度有所提升，未來若加入預計進行的山區重力測量，可望能取代過去舊有的資料，以確保有更佳品質的重力資料。

針對海上重力的部分，本年度的船載重力測量有效補足過去西南沿海 20 公里內資料不足的情形，交叉點分析顯示本組資料精度達 1.33mgal，無論和過去臺灣的資料相比，或是與國際上普遍的認知來看，皆是有相當不錯的水準。

利用觀測法與重力法大地起伏的差值，用來評估大地起伏模式的精度，結果顯示本年度無論是花東山區的重力資料，或西南沿岸的近岸船載重力，接對於大地起伏有正向的提升，在往後的年度計畫中，可望能達到相同貢獻。

7-2 建議

本案船測重力範圍因為遇上湧浪區以致無法施測，故而中間變更測線範圍，本團隊建議在該處可利用美國 NGDC 資料庫(National Geophysical Data Center)取出在鵝鑾鼻附近舊有的船測資料（如圖 7-1），由於其資料年代較為久遠，且施測船隻過大無法離岸太近，因此資料品質及貢獻程度不會有本案已完成的船測工作的水準，但對於資料不足的部分仍會有其幫助。

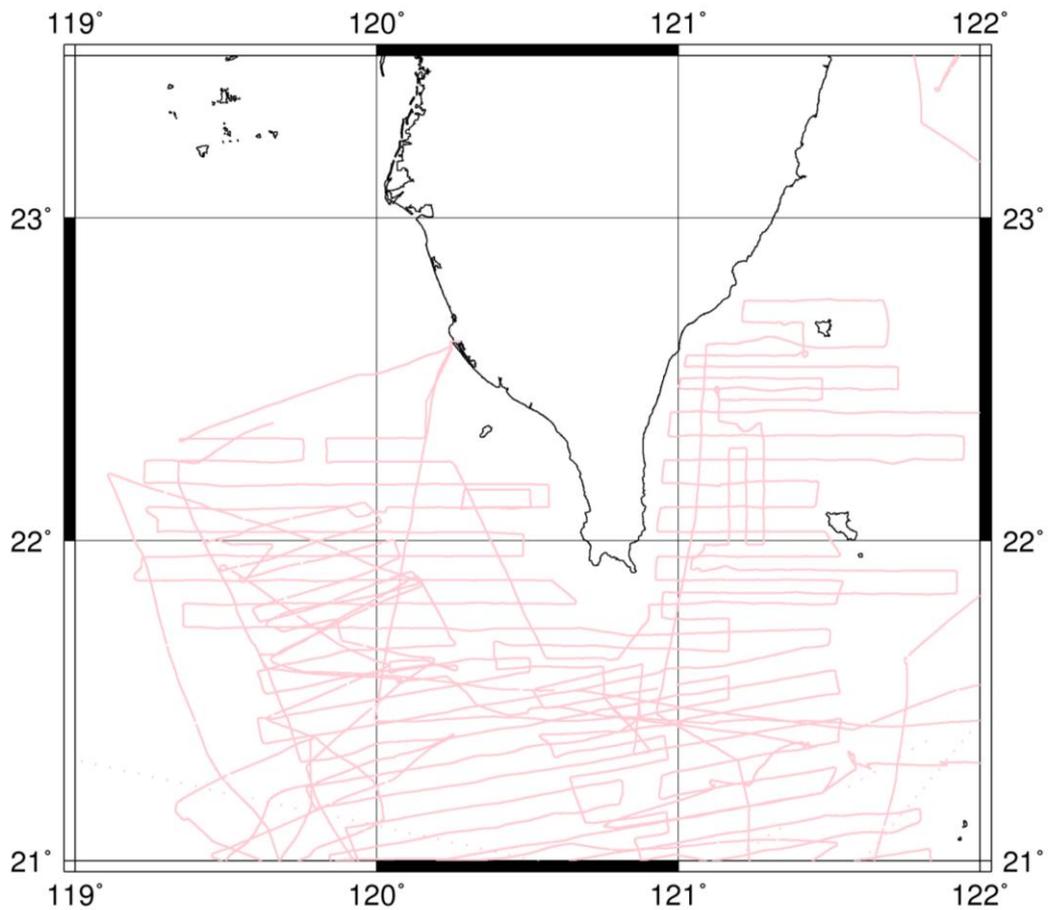


圖 7-1 NGDC 在臺灣南部海域的分布

7-3 未來規劃

未來仍有為期 3 年的近岸船測重力計畫，施測範圍依序為臺灣西北、東北及東南沿海，本團隊有了承辦本年度經驗，對未來 3 年的施測方式亦有初步規劃，以 101 年為例在此提出：

1. 若天氣允許，四月下旬便可開始施測，可避免遇上計畫執行期間遇上六月後便有可能來襲的颱風。
2. 施測船隻以 CT-2 等級為原則，視當地狀況調整。
3. 臺灣西北部沿岸水深較淺，因此該用何種船隻施測應先去各有可能停靠的碼頭做一調查，詳細瞭解當地施測狀況。
4. 船隻在碼頭的停靠點應事先選定並與當地居民協調，周圍 200 公尺內最好有電源供應，以利重力儀待機保持溫度。
5. 在透空且點位不易變動等原則下，24 小時 GPS 測量選點以靠沿岸為原則。

此外，當施測到臺灣東部海域時，可納入內政部曾委託臺大海洋所徐春田教授之船載重力測量案之資料，然此組資料量為數不少且當初的計畫案並非專為重力施測，是否該重新加以整理或只做評估精度的動作，待該年度做重力資料蒐集時再行決定並呈報貴中心。

參考文獻

- 內政部國土測繪中心，「臺灣本島與離島高程連測計畫 95 年度連測作業期末報告」，2007。
- 內政部國土測繪中心，「臺灣本島與離島高程連測計畫 96 年度連測作業期末報告」，2010。
- 內政部國土測繪中心，「臺灣本島與離島高程連測計畫 97 年度連測作業期末報告」，2010。
- 陳春盛，「一等二級水準點上實施重力測量工作報告書」，內政部，2003。
- 黃金維、郭重言、儲慶美、甯方璽，臺灣重力網平差及重力資料整合，測量工程，第 40 卷，第三期，第 71-82 頁，1998。
- 黃金維，「一等級水準點上實施重力測量工作報告書」，內政部，2001。
- 黃金維，「空載重力測量工作報告書」，內政部，2005。
- 黃金維，臺灣地區大地起伏模式精度評估報告書，內政部，2003。
- 黃金維、王成機，臺灣自由空間重力異常網格，測量工程，第 44 卷，第二期，第 1-22 頁，2002。
- 蕭宇伸，利用空載，地面重力與測高資料計算臺灣大地起伏：研究向上/向下延續與地形效應計算，交通大學土木系博士論文，2007。

- Alberts B., Klees R., A comparison of methods for the inversion of airborne gravity data, 2004, *J Geodesy*, 78: 55-65.
- Childers, V., McAdoo, A.D.C., Brozena, J.M., Laxon, S.W., 2001. New gravity data in the Arctic Ocean: comparison of airborne and ERS gravity. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 106, 8871-8866.
- Denker H, Wenzel HG (1987) Local geoid determination and comparison with GPS results, *B. Geod.*, 61, pp. 349-366.
- Deng X., Improvement of Geodetic Parameter Estimation in Coastal Regions from Satellite Radar Altimetry, PhD. dissertation, Curtin University of Technology, Australia, 2003.
- Foster, J.H., Carter, G.S., Merrifield, M.A., Ship-based measurement of sea surface topography, 2009, *Geophysical Research Letters*, VOL. 36, L11905.
- Harlan, R., Eötvös corrections for airborne gravimetry, *J. geophysics, Res.*, 73, pp. 4675-4679, 1968.
- Heiskanen WA, Moritz H (1967) *Physical Geodesy*, W.H. Fredman and company ,San Francisco and London.
- Hsu, SK., CS Liu, CT. Shyu, SY. Liu, JC. Sibuet, S. Lallemand, C. Wang and D. Reed., *New Gravity and Magnetic Anomaly Maps in the Taiwan-Luzon Region and their Preliminary Interpretation*, TAO 9, pp.509-532, 1998.
- Hwang C (1997) Analysis of some systematic errors affecting altimeter-derived sea surface gradient with application to geoid determination over Taiwan, *J. Geod.*, 71, pp. 113-130.
- Hwang, C and Wang CG (2002) New gravity anomaly grid of Taiwan, *Journal of Surveying Engineering*, 44 (2), pp. 1-22. (in Chinese)
- Hwang C, Hsiao YS, Lin T.L. (2003a). A digital elevation model of Taiwan and accuracy assessment, *Cadastre Survey*, 22 (2), pp.1-19. (in Chinese)

- Hwang, C., Hsiao, Y.S., Shih, H.C., Data reduction in scalar airborne gravimetry: Theory, software and case study in Taiwan, 2006, *Computers & Geosciences*, 32, 1573-1584.
- Hwang, C., Hsiao, Y.S., Shih, H.C., Yang, M., Chen, K.H., Forsberg, R., Olesen, A.V., Geodetic and geophysical results from Taiwan airborne gravity survey: Data reduction and accuracy assessment, 2007, *Journal of Geophysical Research*, VOL.112, B04407.
- Hwang C, Hung WC, Liu CH (2008) Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan High Speed Rail operation. in press, *Natural Hazards*.
- Kuroishi Y, Ando H , Fukuda Y, (2002) A new hybrid geoid model for Japan, *GSIGEO2000, Journal of Geodesy*, vol. 76 pp. 428-436.
- Kuroishi Y, Keller W (2005) Wavelet approach to improvement of gravity field-geoid modeling for Japan. *J Geophys. Res.* 110 (B3): Art. No. B03402.
- LCR, 2003. L&R Model "S" Air-Sea Dynamic Gravity Meter System II, Lacoste & Romberg.
- Pope, A. J., The statistics of residuals and detection of outliers, Tech. Rep.NOS65 NGS1, Rockville, 1976.
- Smith DA, Milbert DG (1999) The GEOID96 high-resolution geoid height model for the United States, *Journal of Geodesy*, vol.73, pp. 219-236.
- Seeber G (2003) *Satellite Geodesy*, 2nd ed. De Gruyter, Berlin.
- Sevilla M (1997) A high-resolution gravimetric geoid in the Strait of Gibraltar, *J. Geod.*, 71, pp. 402-410.
- Torge, W., *Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin, 2001.
- Tscherning, C.C. and R.H. Rapp (1974). Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and the deflections of the vertical implied by anomaly Degree-variance models, *Reports of the*

Department of Geodetic Science, 208, Ohio State University,
Columbus.

附錄 1 船測交叉點資訊

經度	緯度	南北航線	東西航線	重力異常差值
		重力異常(mGal)	重力異常(mGal)	(mGal)
120.0099	23.32567	15.87	15.87	0
119.8798	22.99384	22.37	22.43	-0.06
120.0035	22.77187	30.45	30.41	0.04
120.1399	22.54214	0.29	0.29	0
120.2799	22.46325	-7.59	-7.59	0
120.3524	22.42201	-11.96	-11.96	0
120.4206	22.383	-16.41	-16.41	0
120.0432	23.31199	10.5	10.5	0
120.4905	22.34367	-18.47	-18.47	-0.01
120.5615	21.90943	-10.02	-10.03	0.01
120.5616	21.87545	-10.65	-10.92	0.28
120.5618	21.84133	-9.13	-10.07	0.94
120.5602	22.3041	-6.6	-5.38	-1.22
120.6316	21.96387	0.84	0.84	0
120.6316	21.92955	8.09	6.97	1.12
120.6317	21.89553	15.52	15.53	-0.01
120.6319	21.86144	8.34	8.08	0.26
120.6318	21.82737	-19.69	-14.42	-5.27
120.632	21.72507	-26.71	-29.39	2.68
120.6307	22.26361	15.78	14.56	1.22
120.7745	21.90074	22.18	23.29	-1.11
120.7617	21.83536	19.88	20.42	-0.54
120.7553	21.8026	9.84	5.51	4.33
120.7487	21.76985	13.91	13.91	-0.01
120.736	21.70424	-17.8	-15.11	-2.69
120.0271	23.5554	33.63	33.63	0
119.9567	23.53774	34.78	34.76	0.02
119.9579	23.34721	22.12	22.13	-0.01
119.8861	23.52033	35.08	35.67	-0.59

119.8872	23.37643	26.58	25.99	0.59
119.8157	23.50287	37.71	37.13	0.58
119.8166	23.40534	31.82	32.39	-0.57
120.21	22.50276	-10.73	-10.73	0
120.1637	22.8474	17.44	17.44	0
119.9764	23.03977	12.93	13.67	-0.74
120.0993	22.81719	22.68	21.94	0.74
119.9439	23.02439	17.92	17.92	0
120.1313	22.83202	19.88	19.88	0
120.0678	22.80234	22.27	22.27	0
119.9118	23.0093	21.42	20.63	0.79
120.0356	22.78716	26.22	27.01	-0.8

附錄 2 陸上 24 小時 GPS 觀測時段表

24 小時 GPS 實際觀測時段表

時段	2011115A	日期	2011.04.25	觀測時間	00:00~24:00	
組別	點名	點號	接收儀型式	天線盤型式	斜距 (m)	垂距 (m)
1	興海	Q023	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.638	1.638
2	新園節點	X203	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.664	1.664
3	海濱橋	1221	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.567	1.567
4	水底寮節點	X209	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.759	1.760
5	藍子	Q003	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.493	1.492
6	佳冬分駐所	G129	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.804	1.805
7	保力社區	Q008	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.511	1.510
時段	2011117A	日期	2011.04.27	觀測時間	00:00~24:00	
組別	點名	點號	接收儀型式	天線盤型式	斜距 (m)	垂距 (m)
1	明和公園	G087	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.687	1.687
2	東安莊	G061	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.675	1.675
3	中鋼鋁業	G117	Trimble 5700	Zephyr	1.715	1.715

				Geodetic		
4	篤厚橋	G76A	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.626	1.626
5	溪埔	G081	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.694	1.694
6	彌陀	G99A	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.692	1.692
7	三聖堂	G70A	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.585	1.585
8	獅甲國中	G113	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.769	1.770
9	中油	G106	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.154	1.150
時段	2011119A	日期	2011.04.29	觀測時間	00:00~24:00	
組別	點名	點號	接收儀型式	天線盤型式	斜距 (m)	垂距 (m)
1	尚禮街公園	G093	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.632	1.632
2	南勢湖橋	1214	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.699	1.699
3	遊客中心	Q014	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.594	1.594
4	鵝鑾鼻	Q019	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.514	1.513

附錄 3 陸上 24 小時 GPS 觀測閉合差分分析表

閉合差分分析成果表

序號	閉合圈(組成點號)			閉合圈(組成基線)						閉合圈總 邊長(km)	dX(cm) 標準:2cm	dY(cm) 標準:2cm	dZ(cm) 標準:2cm	dX(ppm) 標準:2.5ppm	dY(ppm) 標準:2.5ppm	dZ(ppm) 標準:2.5ppm
				基線名稱	時段代碼	基線名稱	時段代碼	基線名稱	時段代碼							
1	KASH	CHYI	FALI	00000034.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000429A	00000025.SSF	1000427A	264.562	-0.2	0.8	0.1	-0.008	0.030	0.004
2	KASH	CHYI	TASI	00000034.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000429A	00000026.SSF	1000427A	246.991	0.0	0.8	-0.4	0.000	0.032	-0.016
3	KASH	CHYI	CKSV	00000034.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000429A	00000027.SSF	1000427A	187.700	-0.1	0.9	0.0	-0.005	0.048	0.000
4	KASH	CHYI	KDNM	00000034.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000429A	00000030.SSF	1000427A	362.215	0.3	0.4	-0.5	0.008	0.011	-0.014
5	KASH	CHYI	FALI	00000034.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000427A	00000012.SSF	1000429A	264.562	0.2	0.0	-0.8	0.008	0.000	-0.030
6	KASH	CHYI	TASI	00000034.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000427A	00000013.SSF	1000429A	246.991	0.0	0.0	-0.4	0.000	0.000	-0.016
7	KASH	CHYI	CKSV	00000034.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000427A	00000014.SSF	1000429A	187.700	0.1	-0.1	-0.8	0.005	-0.005	-0.043
8	KASH	CHYI	KDNM	00000034.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000427A	00000017.SSF	1000429A	362.215	-0.3	0.4	-0.2	-0.008	0.011	-0.006
9	KASH	TASI	CHYI	00000035.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000026.SSF	1000427A	246.991	0.5	0.2	-0.1	0.020	0.008	-0.004
10	KASH	TASI	FALI	00000035.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000429A	00000031.SSF	1000427A	320.384	0.2	0.5	0.4	0.006	0.016	0.012
11	KASH	TASI	CKSV	00000035.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000429A	00000036.SSF	1000427A	245.981	0.3	0.6	0.3	0.012	0.024	0.012
12	KASH	TASI	KDNM	00000035.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000429A	00000039.SSF	1000427A	417.726	0.7	0.1	-0.2	0.017	0.002	-0.005
13	KASH	TASI	CHYI	00000035.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	246.991	0.2	0.3	0.0	0.008	0.012	0.000
14	KASH	TASI	FALI	00000035.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000427A	00000012.SSF	1000429A	320.384	0.4	0.0	-0.6	0.012	0.000	-0.019

15	KASH	TASI	CKSV	00000035.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000427A	00000014.SSF	1000429A	245.981	0.4	-0.1	-0.5	0.016	-0.004	-0.020
16	KASH	TASI	KDNM	00000035.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000427A	00000017.SSF	1000429A	417.726	0.0	0.4	0.1	0.000	0.010	0.002
17	KASH	CKSV	CHYI	00000036.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000027.SSF	1000427A	187.700	0.3	-0.3	-0.5	0.016	-0.016	-0.027
18	KASH	CKSV	FALI	00000036.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000429A	00000032.SSF	1000427A	164.934	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000
19	KASH	CKSV	TASI	00000036.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000429A	00000036.SSF	1000427A	245.981	0.2	0.0	-0.5	0.008	0.000	-0.020
20	KASH	CKSV	KDNM	00000036.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000429A	00000042.SSF	1000427A	262.456	0.6	-0.4	-0.7	0.023	-0.015	-0.027
21	KASH	CKSV	CHYI	00000036.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	187.700	-0.1	-0.1	0.0	-0.005	-0.005	0.000
22	KASH	CKSV	FALI	00000036.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000427A	00000012.SSF	1000429A	164.934	0.2	-0.4	-0.6	0.012	-0.024	-0.036
23	KASH	CKSV	TASI	00000036.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000427A	00000013.SSF	1000429A	245.981	0.0	-0.4	-0.1	0.000	-0.016	-0.004
24	KASH	CKSV	KDNM	00000036.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000427A	00000017.SSF	1000429A	262.456	-0.2	0.0	0.1	-0.008	0.000	0.004
25	KASH	FALI	CHYI	00000037.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000025.SSF	1000427A	264.562	-0.1	0.5	-0.2	-0.004	0.019	-0.008
26	KASH	FALI	TASI	00000037.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000429A	00000031.SSF	1000427A	320.384	-0.2	0.8	-0.2	-0.006	0.025	-0.006
27	KASH	FALI	CKSV	00000037.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000429A	00000032.SSF	1000427A	164.934	-0.3	0.9	0.2	-0.018	0.055	0.012
28	KASH	FALI	KDNM	00000037.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	181.304	0.1	0.4	-0.4	0.006	0.022	-0.022
29	KASH	FALI	CHYI	00000037.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	264.562	-0.6	0.6	0.3	-0.023	0.023	0.011
30	KASH	FALI	TASI	00000037.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000427A	00000013.SSF	1000429A	320.384	-0.4	0.3	0.3	-0.012	0.009	0.009
31	KASH	FALI	CKSV	00000037.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000427A	00000014.SSF	1000429A	164.934	-0.4	0.2	-0.1	-0.024	0.012	-0.006
32	KASH	FALI	KDNM	00000037.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000017.SSF	1000429A	181.304	-0.7	0.7	0.5	-0.039	0.039	0.028
33	KASH	KDNM	CHYI	00000040.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000030.SSF	1000427A	362.215	-0.8	1.8	0.6	-0.022	0.050	0.017

34	KASH	KDNM	FALI	00000040.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	181.304	-1.1	2.1	1.2	-0.061	0.116	0.066
35	KASH	KDNM	TASI	00000040.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000429A	00000039.SSF	1000427A	417.726	-0.9	2.1	0.6	-0.022	0.050	0.014
36	KASH	KDNM	CKSV	00000040.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000429A	00000042.SSF	1000427A	262.456	-1.1	2.2	1.1	-0.042	0.084	0.042
37	KASH	KDNM	CHYI	00000040.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	362.215	-0.8	1.5	0.6	-0.022	0.041	0.017
38	KASH	KDNM	FALI	00000040.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000012.SSF	1000429A	181.304	-0.6	1.2	0.0	-0.033	0.066	0.000
39	KASH	KDNM	TASI	00000040.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000427A	00000013.SSF	1000429A	417.726	-0.7	1.2	0.5	-0.017	0.029	0.012
40	KASH	KDNM	CKSV	00000040.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000427A	00000014.SSF	1000429A	262.456	-0.7	1.1	0.1	-0.027	0.042	0.004
41	CHYI	TASI	KASH	00000043.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000013.SSF	1000427A	246.991	0.2	-0.5	0.3	0.008	-0.020	0.012
42	CHYI	TASI	KASH	00000043.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	246.991	0.5	0.2	0.2	0.020	0.008	0.008
43	CHYI	TASI	FALI	00000043.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000429A	00000031.SSF	1000427A	314.843	0.1	0.0	0.7	0.003	0.000	0.022
44	CHYI	TASI	CKSV	00000043.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000429A	00000036.SSF	1000427A	160.930	0.2	0.1	0.7	0.012	0.006	0.043
45	CHYI	TASI	KDNM	00000043.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000429A	00000039.SSF	1000427A	414.447	0.6	-0.4	0.2	0.014	-0.010	0.005
46	CHYI	TASI	FALI	00000043.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000427A	00000025.SSF	1000429A	314.843	0.5	-0.3	-0.2	0.016	-0.010	-0.006
47	CHYI	TASI	CKSV	00000043.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000427A	00000027.SSF	1000429A	160.930	0.5	-0.4	-0.1	0.031	-0.025	-0.006
48	CHYI	TASI	KDNM	00000043.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000427A	00000030.SSF	1000429A	414.447	0.1	0.1	0.4	0.002	0.002	0.010
49	CHYI	CKSV	KASH	00000044.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000014.SSF	1000427A	187.700	0.0	-1.0	-0.1	0.000	-0.053	-0.005
50	CHYI	CKSV	KASH	00000044.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	187.700	0.2	-0.2	0.2	0.011	-0.011	0.011
51	CHYI	CKSV	FALI	00000044.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000429A	00000032.SSF	1000427A	259.590	-0.1	-0.5	0.3	-0.004	-0.019	0.012
52	CHYI	CKSV	TASI	00000044.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000429A	00000036.SSF	1000427A	160.930	0.1	-0.5	-0.1	0.006	-0.031	-0.006

53	CHYI	CKSV	KDNM	00000044.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000429A	00000042.SSF	1000427A	359.374	0.5	-0.9	-0.3	0.014	-0.025	-0.008
54	CHYI	CKSV	FALI	00000044.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000427A	00000025.SSF	1000429A	259.590	0.3	-0.7	-0.2	0.012	-0.027	-0.008
55	CHYI	CKSV	TASI	00000044.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000427A	00000026.SSF	1000429A	160.930	0.1	-0.7	0.3	0.006	-0.043	0.019
56	CHYI	CKSV	KDNM	00000044.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000427A	00000030.SSF	1000429A	359.374	-0.1	-0.3	0.4	-0.003	-0.008	0.011
57	CHYI	FALI	KASH	00000045.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000012.SSF	1000427A	264.562	-0.4	-0.2	0.2	-0.015	-0.008	0.008
58	CHYI	FALI	KASH	00000045.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	264.562	-0.3	0.5	0.6	-0.011	0.019	0.023
59	CHYI	FALI	TASI	00000045.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000429A	00000031.SSF	1000427A	314.843	-0.3	0.3	0.2	-0.010	0.010	0.006
60	CHYI	FALI	CKSV	00000045.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000429A	00000032.SSF	1000427A	259.590	-0.4	0.4	0.6	-0.015	0.015	0.023
61	CHYI	FALI	KDNM	00000045.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	357.733	0.0	-0.1	0.0	0.000	-0.003	0.000
62	CHYI	FALI	TASI	00000045.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000427A	00000026.SSF	1000429A	314.843	-0.3	0.0	0.7	-0.010	0.000	0.022
63	CHYI	FALI	CKSV	00000045.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000427A	00000027.SSF	1000429A	259.590	-0.3	-0.1	0.3	-0.012	-0.004	0.012
64	CHYI	FALI	KDNM	00000045.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000030.SSF	1000429A	357.733	-0.6	0.4	0.8	-0.017	0.011	0.022
65	CHYI	KDNM	KASH	00000048.SSF	1000425A	00000065.SSF	1000429A	00000017.SSF	1000427A	362.215	-1.1	1.1	1.1	-0.030	0.030	0.030
66	CHYI	KDNM	KASH	00000048.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000427A	00000011.SSF	1000429A	362.215	-0.5	1.4	0.8	-0.014	0.039	0.022
67	CHYI	KDNM	FALI	00000048.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	357.733	-1.2	1.6	1.5	-0.034	0.045	0.042
68	CHYI	KDNM	TASI	00000048.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000429A	00000039.SSF	1000427A	414.447	-1.0	1.6	1.0	-0.024	0.039	0.024
69	CHYI	KDNM	CKSV	00000048.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000429A	00000042.SSF	1000427A	359.374	-1.2	1.7	1.5	-0.033	0.047	0.042
70	CHYI	KDNM	FALI	00000048.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000025.SSF	1000429A	357.733	-0.5	0.9	0.4	-0.014	0.025	0.011
71	CHYI	KDNM	TASI	00000048.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000427A	00000026.SSF	1000429A	414.447	-0.6	0.9	0.9	-0.014	0.022	0.022

72	CHYI	KDNM	CKSV	00000048.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000427A	00000027.SSF	1000429A	359.374	-0.6	0.8	0.5	-0.017	0.022	0.014
73	TASI	CKSV	KASH	00000051.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000429A	00000014.SSF	1000427A	245.981	-0.3	-1.0	-0.4	-0.012	-0.041	-0.016
74	TASI	CKSV	KASH	00000051.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000427A	00000013.SSF	1000429A	245.981	-0.2	0.1	0.0	-0.008	0.004	0.000
75	TASI	CKSV	CHYI	00000051.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000429A	00000027.SSF	1000427A	160.930	-0.1	-0.8	-0.4	-0.006	-0.050	-0.025
76	TASI	CKSV	CHYI	00000051.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000427A	00000026.SSF	1000429A	160.930	-0.4	-0.1	0.0	-0.025	-0.006	0.000
77	TASI	CKSV	FALI	00000051.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000429A	00000032.SSF	1000427A	315.627	-0.3	-0.5	0.1	-0.010	-0.016	0.003
78	TASI	CKSV	FALI	00000051.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000427A	00000031.SSF	1000429A	315.627	-0.1	-0.4	-0.5	-0.003	-0.013	-0.016
79	TASI	CKSV	KDNM	00000051.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000429A	00000042.SSF	1000427A	415.101	0.2	-0.9	-0.6	0.005	-0.022	-0.014
80	TASI	CKSV	KDNM	00000051.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000427A	00000039.SSF	1000429A	415.101	-0.5	0.0	0.1	-0.012	0.000	0.002
81	TASI	FALI	KASH	00000052.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000427A	00000013.SSF	1000429A	320.384	-0.7	0.8	0.4	-0.022	0.025	0.012
82	TASI	FALI	KASH	00000052.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000429A	00000012.SSF	1000427A	320.384	-0.7	-0.2	-0.1	-0.022	-0.006	-0.003
83	TASI	FALI	CHYI	00000052.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000427A	00000026.SSF	1000429A	314.843	-0.9	0.6	0.3	-0.029	0.019	0.010
84	TASI	FALI	CHYI	00000052.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000429A	00000025.SSF	1000427A	314.843	-0.5	0.0	-0.1	-0.016	0.000	-0.003
85	TASI	FALI	CKSV	00000052.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000427A	00000036.SSF	1000429A	315.627	-0.7	0.2	0.0	-0.022	0.006	0.000
86	TASI	FALI	KDNM	00000052.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000039.SSF	1000429A	411.000	-1.0	0.7	0.5	-0.024	0.017	0.012
87	TASI	FALI	CKSV	00000052.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000429A	00000032.SSF	1000427A	315.627	-0.7	0.4	0.3	-0.022	0.013	0.010
88	TASI	FALI	KDNM	00000052.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	411.000	-0.3	-0.1	-0.3	-0.007	-0.002	-0.007
89	TASI	KDNM	KASH	00000055.SSF	1000425A	00000067.SSF	1000429A	00000017.SSF	1000427A	417.726	-1.4	1.1	0.8	-0.034	0.026	0.019
90	TASI	KDNM	KASH	00000055.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000427A	00000013.SSF	1000429A	417.726	-0.9	1.7	0.6	-0.022	0.041	0.014

91	TASI	KDNM	CHYI	00000055.SSF	1000425A	00000097.SSF	1000429A	00000030.SSF	1000427A	414.447	-1.2	1.3	0.7	-0.029	0.031	0.017
92	TASI	KDNM	CHYI	00000055.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000427A	00000026.SSF	1000429A	414.447	-1.1	1.5	0.6	-0.027	0.036	0.014
93	TASI	KDNM	FALI	00000055.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	411.000	-1.4	1.6	1.3	-0.034	0.039	0.032
94	TASI	KDNM	FALI	00000055.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000031.SSF	1000429A	411.000	-0.9	1.2	0.1	-0.022	0.029	0.002
95	TASI	KDNM	CKSV	00000055.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000429A	00000042.SSF	1000427A	415.101	-1.5	1.7	1.2	-0.036	0.041	0.029
96	TASI	KDNM	CKSV	00000055.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000427A	00000036.SSF	1000429A	415.101	-1.0	1.1	0.2	-0.024	0.026	0.005
97	CKSV	FALI	KASH	00000058.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000427A	00000014.SSF	1000429A	164.934	-0.5	1.3	0.8	-0.030	0.079	0.049
98	CKSV	FALI	KASH	00000058.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000429A	00000012.SSF	1000427A	164.934	-0.4	0.2	-0.1	-0.024	0.012	-0.006
99	CKSV	FALI	CHYI	00000058.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000427A	00000027.SSF	1000429A	259.590	-0.7	1.1	0.7	-0.027	0.042	0.027
100	CKSV	FALI	CHYI	00000058.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000429A	00000025.SSF	1000427A	259.590	-0.2	0.4	-0.1	-0.008	0.015	-0.004
101	CKSV	FALI	TASI	00000058.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000427A	00000036.SSF	1000429A	315.627	-0.5	0.8	0.8	-0.016	0.025	0.025
102	CKSV	FALI	KDNM	00000058.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000042.SSF	1000429A	259.767	-0.9	1.2	1.0	-0.035	0.046	0.038
103	CKSV	FALI	TASI	00000058.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000429A	00000031.SSF	1000427A	315.627	-0.3	0.7	-0.1	-0.010	0.022	-0.003
104	CKSV	FALI	KDNM	00000058.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	259.767	-0.1	0.3	-0.3	-0.004	0.012	-0.012
105	CKSV	KDNM	KASH	00000061.SSF	1000425A	00000068.SSF	1000429A	00000017.SSF	1000427A	262.456	-1.1	1.5	0.8	-0.042	0.057	0.030
106	CKSV	KDNM	KASH	00000061.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000427A	00000014.SSF	1000429A	262.456	-0.7	2.2	1.0	-0.027	0.084	0.038
107	CKSV	KDNM	CHYI	00000061.SSF	1000425A	00000098.SSF	1000429A	00000030.SSF	1000427A	359.374	-0.9	1.7	0.7	-0.025	0.047	0.019
108	CKSV	KDNM	CHYI	00000061.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000427A	00000027.SSF	1000429A	359.374	-0.9	2.0	1.0	-0.025	0.056	0.028
109	CKSV	KDNM	FALI	00000061.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000429A	00000035.SSF	1000427A	259.767	-1.2	2.0	1.3	-0.046	0.077	0.050

110	CKSV	KDNM	FALI	00000061.SSF	1000425A	00000102.SSF	1000427A	00000032.SSF	1000429A	259.767	-0.7	1.7	0.5	-0.027	0.065	0.019
111	CKSV	KDNM	TASI	00000061.SSF	1000425A	00000103.SSF	1000429A	00000039.SSF	1000427A	415.101	-1.0	2.0	0.7	-0.024	0.048	0.017
112	CKSV	KDNM	TASI	00000061.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000427A	00000036.SSF	1000429A	415.101	-0.8	1.7	1.0	-0.019	0.041	0.024
113	FALI	KDNM	KASH	00000066.SSF	1000425A	00000066.SSF	1000429A	00000017.SSF	1000427A	181.304	-0.6	0.8	0.4	-0.033	0.044	0.022
114	FALI	KDNM	KASH	00000066.SSF	1000425A	00000069.SSF	1000427A	00000012.SSF	1000429A	181.304	-0.3	1.4	0.7	-0.017	0.077	0.039
115	FALI	KDNM	CHYI	00000066.SSF	1000425A	00000096.SSF	1000429A	00000030.SSF	1000427A	357.733	-0.4	1.0	0.4	-0.011	0.028	0.011
116	FALI	KDNM	CHYI	00000066.SSF	1000425A	00000099.SSF	1000427A	00000025.SSF	1000429A	357.733	-0.5	1.2	0.7	-0.014	0.034	0.020
117	FALI	KDNM	TASI	00000066.SSF	1000425A	00000100.SSF	1000429A	00000039.SSF	1000427A	411.000	-0.6	1.3	0.3	-0.015	0.032	0.007
118	FALI	KDNM	CKSV	00000066.SSF	1000425A	00000101.SSF	1000429A	00000042.SSF	1000427A	259.767	-0.7	1.4	0.8	-0.027	0.054	0.031
119	FALI	KDNM	TASI	00000066.SSF	1000425A	00000104.SSF	1000427A	00000031.SSF	1000429A	411.000	-0.4	0.9	0.7	-0.010	0.022	0.017
120	FALI	KDNM	CKSV	00000066.SSF	1000425A	00000105.SSF	1000427A	00000032.SSF	1000429A	259.767	-0.4	0.8	0.3	-0.015	0.031	0.012

附錄 4 投稿文章

1. 投稿對象：第三十屆測量及空間資訊研討會

文章標題及摘要：

大地起伏模型對於台灣地區發展高程現代化的 貢獻

Contributions of a Geoid model to Taiwan Height modernization

楊名¹、黃金維²、陳國華³、許宏銳⁴、黃啟訓⁵、吳曉雯⁶

Ming Yang¹, Cheinway Hwang², Kwo-Hwa Chen³, Hung-Jui Hsu⁴,

Chi-Hsun Huang⁵, Hsiao-Wen Wu⁶

摘要

台灣收集很多不同空間解析度及精度的重力資料，例如陸測重力資料、空載重力資料、船載重力資料及測高重力資料，如何將這些不同來源的重力資料進行有效的整合極具挑戰性，也是本文章研究重點。整合空載重力資料前，使用考慮地形效應的向下延續技術將空載重力資料約化至海平面上。使用波形重定後的 Geosat/GM 和 ERS-1/GM 的海平面梯度來提升沿岸區域的測高重力精度。為了有效的整合山區五千公尺航高的空載重力資料，依對應之地形高度進行空載重力資料的分類並依照對應地形高度由低至高之順序將空載重力資料進行整合，整合過程中所使用的網格化方法為最小曲率法與最小二乘配置法。重力法大地起伏模型採用去除計算回復法，將其大地起伏分成長、中及短波長三部分，此法使用全球大地位模式及台灣數值高程模型，殘餘大地起伏則以最小二乘配置法計算。透過六條一等水準點上之觀測大地起伏進行檢核，其差值的標準偏差均在十公分以內。採用約兩千個 GPS/水準點上之重力法大地起伏與實際觀測大地起伏差值，製作

一階和面修正重力法大地幅模型，經在六條水準測線測試成果其標準偏差約為2、3公分。

關鍵字：衛星測高、重力異常、波形重定、大地水準面

2. 投稿對象：[Marine Geodesy](#)

文章標題及摘要：

Airborne gravity surveys over Taiwan Island and Strait, Kuroshio Current and South China Sea: comparison of GPS and gravity accuracies at different flight altitudes

Cheinway Hwang, Hsuan-Chang Shih, Yu-Shen Hsiao, and Chi-Hsun Huang

Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, 1001 Ta Hsueh Road, Hsinchu 300, Taiwan, ROC

Abstract

We compare the accuracies of GPS and gravity observations obtained from three airborne gravity surveys over Taiwan Island at altitude 5000 m, and over Kuroshio Current, Taiwan Strait, and Dongsha Atoll at altitude 1500 m. A kinematic network adjustment was used to determine the positions of the aircrafts. GPS positioning errors are at the decimeter-level, which are not entirely propagated to velocity and acceleration errors due to cancellation of long wavelength errors. Outliers are downweighted in the Gaussian filtering to improve the gravity accuracy, especially at altitude 1500 m. Compared with the upward-continued gravity, the gravity anomalies from the 1500-m surveys show a consistent accuracy of about 3 mgal; the accuracy from the 5000-m survey is degraded, especially over high mountains. The RMS crossover differences at 1500 m and 5000 m are all below 3 mgal, suggesting flight

altitudes do not affect the crossover difference. Coherence analysis suggests that the spatial resolvable wavelengths of the airborne gravity range from 4 km (altitude 1500 m) to 6 km (altitude 5000 m).

Keywords: airborne gravity, Dongsha Atoll, filter, Kuroshio Current, Taiwan

附錄 5 規格標採購評選委員所提意見及其辦理情形（僅節錄與期末

報告相關部分）

審查委員	審 查 意 見	修 正 辦 理 情 形
劉 召 集 人 正 倫	1. 若貴團隊順利得標，在蒐集內政部或其他機關(單位)的重力資料方面，能否將年度、數量、資料品質…等詳細資料於爾後報告裏說明。	已於第二章將資料作一說明，並針對年代、數量、資料品質等列於表 2-1~表 2-3。
	2. 重力資料內部檢核過程及方法應記錄，係成果繳交時一併提出，便於作為正式作業方法之說明。	針對船載重力測量之精度檢核方式敘述於 3-5 節，並將各交叉點之資料列於附錄 1；對於其餘重力資料之處理過程敘述於 3-6 節。

附錄 6 期末報告初稿審查意見及修正辦理情形

審查委員	審 查 意 見	修 正 辦 理 情 形
楊 委 員 名	1. 第 2 行「小於 10 公里的短基線，由於距離短，進行雙頻 L3 相對差分定位時，電離層的訊號延遲誤差可暫時不考慮」此段，既然可以忽略電離層影響，為何要組 L3 觀測量使得偶然誤差放大 $\sqrt{2}$ 倍?請說明。	這裡為文字誤植，已重新敘述於 P. 31。
	2. P37 本案船測 GPS 資料是否估計對流層附加參數?請補充說明。	已補充說明於 P. 31~33。
	3. P73 本案船載重力資料達 1.33mgal 之精度，足以符合建立臺灣地區高精度大地起伏模式之精度要求，成果良好，請詳加敘述。	已刪除此段敘述，另外 1.33mgal 所代表的精度品質說明於 P. 41。
崔 委 員 國 強	1. P49 有關大地起伏計算，未敘明採用之大地位模式為何?在計算剩餘地形模型時，所採用之 DEM 資料亦未敘明，請補充(如採用 5m×5m DEM，平均地形採用若干?)	所採用之參考場模式為 EGM2008，敘述於 P. 66；DEM 資料補充說明於 P. 68。
	2. P70 請將加入本案船測重力資料前後所計算全島之大地起伏差異圖列出。並請列入計算大地起伏差異量之統計分析表(Max.、Min.、Mean、Std. dev.)。	已增列圖 5-6 及表 5-2。

	3. P74 第 11 行「精度提升了 2cm」從何數據比對推論而得?請補充說明。	已補充說明於 P. 79。
侯 委 員 進 雄	1. 期末報告修正版建議加上摘要(中、英文摘要)。	已增列中、英文摘要。
	2. P28 述及臺灣南方海域為黑潮必經之路，因湧浪過高，考慮安全問題，沒有施測該地區，請提出後續作業因應對策。	已說明於 7-2 小節，見 P. 81。
	3. P55「陸上 GPS 測量」此節，過多文字描述，不易閱讀，請補充圖示以利於閱讀。	已重新編排獨立為第四章。
	4. 本報告應增加一章節為「繳交項目」，即 5-1 結論部分，應屬繳交項目及成果，並非結論。另結論部分請加強內容。	已增加第六章，並改寫 7-1 結論部分。
	5. 應於前言後半段或增加一節補述本案應辦理的工作項目及進度甘梯圖，俾以了解工作是否完成。	已增列於 1-3 小節- 辦理之工作項目。
	6. P5 重力資料蒐集，資料來源有新舊之分，即已蒐集及新蒐集之分，是否舊資料只與新資料重新整合解算而已，其資料的解算應敘明清楚	已說明於 P. 6 第一段，並在 3-6 重力資料整合小節敘明資料處理方法。

王 委 員 成 機	1. P55-P69「陸上 GPS 測量」應專節撰寫，且內容有多項處理流程或外業流程，請編號敘述，以利閱讀。	已重新編排獨立為第四章，並針對各項流程加以編號。
	2. P38 公式 3-7 之 g_0 、 f_0 未定義，P41 公式 3-15 之 g_s 未定義，請詳細敘明。	已增加說明於公式 3-9 及 3-17 下方，見 P. 35 及 P. 38。
	3. P51 公式 4-5、4-6 中之 ρ ，符號定義卻用 ρ_1 ，另多個符號未定義清楚，請修正並說明。	式 5-5、5-6 之符號已更改，見 P. 68、69。
	4. P69 請說明 Twgeoid 何時產製，何單位產製。	已補充說明於 P. 74。
	5. P71 表 4-4 請加註單位：公尺(m)。	已加註於 P. 75 表 5-1。
	6. 未來年度可考慮納入內政部曾委託臺大海洋所徐春田教授之船載重力測量案之資料。	已說明於 P. 82。
朱 委 員 杏 修	1. P2 第 8 行「陸地面積上」請修正為「陸地上」。	已更正於 P. 1。
	2. P4 第 9 行「整體規畫」請修正為「整體規劃」。	全文規劃中有相關文字錯誤情形皆已修正。
	3. P5 第 15 行「19 絕對重力控制點」請修正為「19 個絕對控制點」。	因報告重新修正，此敘述已經刪除。
	4. P9 第 7 行「試重力儀特性而定」請	原 2-1-1 已刪除，故無此敘述。

	修正為「視重力儀特性而定」。	
	5. P17 第 2 行「臺灣中央大學」請修正為「中央大學」。	已修正於 P. 11。
	6. P19 第 15-16 行「始於 2008 年 12 月 9 日至 2008 年 9 月 13 日止，共 27 個工作天」此段，作業期程請再查證。	已修正於 P. 15 最後一行。
	7. P24 第 4 行「球諧係數慘生重力異常」請修正為「球諧係數產生重力異常」。	已修正於 P. 45。
	8. P25、P55、P73 及 P74 皆出現「台灣」請修正為「臺灣」。	全文規劃中有相關文字錯誤情形皆已修正。
	9. P28 第 3 行「12 海涅」請修正為「12 哩」或「12 海里」。	全文規劃中有相關文字錯誤情形皆已修正。
	10. P32、P33 使用相對重力儀廠牌型號請統一。	以統一敘述，見 P. 27、28。
	11. P37 第 5 行「佔對流層…的 90%」請修正為「占對流層…的 90%」。	已修正於 P. 33。
	12. P51 圖 4-2 及 P64「部份」請修正為「部分」。	全文規劃中有相關文字錯誤情形皆已修正。

	13.P55 行政區名請配合五都改制修正。	已修正於 P. 50。
	14.P55 第 7-8 行「台北縣…台北縣往西…橋板湖」請修正文字。	已修正於 P. 50。
	15.P74 東南部海域因湧浪施測困難，如何克服?請補充說明。	已說明於 7-2 小節，見 P. 81。
鄭召集人彩堂	1. 封面請將交通大學及中興測量有限公司修正為執行單位，並調整版面位置。	封面已更正。
	2. 本案規格標採購評選委員所提意見及其辦理情形，請連同本次期末審查意見、處理情形整理，納入期末報告修正版。	已增列於附錄 5、6。
	3. 第一章前言請依合約要求，增加目的相關文字內容。	已增加計畫目的於 1-2 節。
	4. 原服務建議書審查承諾文章投稿部分，請將已投稿對象及摘要等相關資料列入期末報告修正版。	列於附錄 4。
	5.P5 提及 1、2 等重力點數 (655+3690=4345)，但合計為 4336 點;P14 提及 1、2 等重力測量觀測筆數 (12435-67=12368)，但合計 4356 筆，	已刪除 2-1-1 節，原 P. 14 重力觀測筆數相關敘述說明不清，各項陸地重力資料筆數列於表 2-1。

	<p>其重力平差前後篩選點數有所不符，應是省略敘述部分環節所致，請修正並說明。</p>	
	<p>6. 第 2 章為重力資料蒐集，應係對以往相關成果及資料作蒐集回顧及整理，惟其內容敘述方式似為本次作業內容，應予修正，如 2-1-1 有成果分析，2-5 重力資料整合等；另 2-2 離島船載重力測量所引述似為本中心成果，均應敘明來源。另引用本年度本中心另一花東及山區重力測量案之資料，亦請列入第 2 章或其他適合章節；至 2-1-1 僅有該 1 節，宜予增補節或刪除該節次。</p>	<p>章節已重新編排並有增補及刪除之情形；2-1-1 節已刪除，另重力資料整合挪至 3-6 節。</p>
	<p>7. P28 提及本年於鵝鑾鼻附近遭遇黑潮洋流影響而無法施測部分，請於報告書修正版中提供因應方式或建議事項。</p>	<p>已說明於 7-2 小節，P. 81。</p>
	<p>8. 本案為 4 年計畫，廠商執行成效優良，經本中心審核同意後，優先取得爾後年度議價權利，請提供未來 3 年規劃工作項目或方向建議，其中 101 年應較有完整詳細之作業規劃，以提供本中心作為推動未來計畫之參考。</p>	<p>已增列 7-3 節做相關說明。</p>
	<p>9. 報告內容提及本中心及其他單位名稱時，第 1 次先以全名敘述(如 P3 本中心及 P5 中興測量…)，第 2 次以後再用簡稱；年度敘述有以民國年者，亦有以西元年者，請儘量統一；另圖</p>	<p>相關情形已修正，目錄與本文的英文大小寫亦已統一。</p>

	<p>次在文中與圖目錄之英文大小寫不一致(如圖 2-1-A(B))。</p>	
<p>業務單位初審意見</p>	<p>1. 第一章前言，多處敘述引用本案服務建議徵求書，但時間點已不適宜本報告，請以本報告之角度敘述，請修正。</p>	<p>已修正於 1-1 節。</p>
	<p>2. P5 第二章重力資料蒐集</p> <p>針對建構大地起伏模式，應詳述運用了哪些重力資料？且詳細列表(年代、數量)，若需考慮不同精度的影響給定不同權值---應說明如何給定。P. 44 而對重力資料蒐集此章，對其各年度、種類之重力資料做一篩選處理---應有詳細完整內容，請敘明。</p>	<p>已增列表 2-1 做相關說明。</p>
	<p>3. P6 敘述本案亦加入 100 年度花東山區重力資料，而 P7 亦敘述加入內政部委託中興測量有限公司所觀測重力資料，對於大地起伏所加入之重力資料，應有其先後次序，請修正敘述次序。</p>	<p>2-1 節已重新編寫，並刪除 2-1-1，原 P. 7 之敘述已經刪除。</p>
	<p>4. P7 2-1-1 節重力網平差</p> <p>為何於此節敘述重力網平差？辦理本案建立大地起伏模式，需將歷年其他之重力資料蒐集後重新重力網平差嗎？還是僅為加權平差？請說明。</p>	<p>2-1 節已重新編寫，並刪除 2-1-1。對於各重力資料如何整合，敘述於 3-6 節。</p>
	<p>5. P7 為何僅敘述內政部當時之重力資料，那其他之重力資料未敘述，為何？請說明。</p>	<p>2-1 節已重新編寫，並刪除 2-1-1，原 P. 7 之敘述已經刪除。</p>

	6. P14 何以出現「成果分析」這一節(為何會有重新計算得出成果分析?)	2-1 節已重新編寫，並刪除 2-1-1，原 P. 14 之敘述已經刪除。
	7. P15 2-2 節船載重力測量資料 應補充有多少船測資料量數據加入大地起伏模式，請詳細列表。	已增列表 2-2 做相關說明。
	8. P15 應敘述加入 95、96、97 年度離島高程的重力資料，請註明為國土測繪中心的資料。	已補充說明於 P. 9，並亦在表 2-2 中加註。
	9. P24 2-5 節先敘述重力資料整合，而第 3 章敘述本案 100 年度近岸船測作業，2-5 節的重力資料整合是否已包括本案 100 年度近岸船測的資料?請加入 100 近岸船測的重力資料，再作分析成果。	已將重力資料整合挪至 3-6 節，並說明所用之資料。
	10. P28 第三章 請採「海里」或「哩」之統一用詞。	全文規劃中有相關文字錯誤情形皆已修正。
	11. P37，本案採用 TRACK 軟體解算船載 GPS 動態資料，依據報告書應加入大氣條件參數(溫度、濕度、壓力)改正對流層延遲誤差，請補充本案作業期間大氣條件資料;另本作業船載 GPS 動態資料精度可達公分等級，請說明其可靠度。	大氣條件參數補充說明於 P. 30;相關精度說明列於 P. 33。

	12.P39，後 4 行敘述其用詞請再調整修正。	更正於 P. 36。
	13.P41，3-15 式中 h 為潮高，報告書未說明本作業 h 來源與 h 值，請說明。	補充說明於 P. 38。
	14.P44 內文的先後次序，應是交叉點分析之後，才敘述重力整合計算，請修正內容。	已將重力資料整合挪至 3-6 節。
	15.P44 本作業係採用 41 個交叉點重複觀測量評估重力觀測成果，並獲至結論(1)1.33mgal 的精度數據，報告書應詳列 41 個交叉點的資料(坐標、重力觀測值、與計算式有關之資料-如潮高)外，另應說明 1.33mgal 所代表之意義或品質如何?	各交叉點之資料列於附錄 1;另外 1.33mgal 所代表的精度品質說明於 P. 41。
	16.P48 圖 3-10 船測重力處理流程圖，請放置適當章節。	已改為圖 3-1，見 P. 22。
	17.P54 4-2 節大地起伏模型精度驗證方法及 24 小時 GPS 測量? 此 1 節混合多項工作，應再分小節敘述。	已將 24 小時 GPS 測量獨立於第四章。
	18.P70 「加入本案船測重力前對於北部、東部之大地起伏精度沒有影響，中部南部的稍有差異，新增之 20 點的檢核線顯示大地起伏在那地區提升約為 2cm。」--有關此段，而 100 年度花東及	已說明於 P. 74~75。

	<p>山區重力資料有否加入大地起伏模式? 請說明。</p>	
	<p>19.P71 請補充說明「新增 20 點」一定義哪些資料，並說明表 4-4 所要表達的意義。</p>	<p>已修改 P. 74~P. 77 相關敘述。</p>
	<p>20.P73 重力資料蒐集「對其各項做一篩選處理」--請列出詳細完整內容。</p>	<p>已更正相關敘述，重力資料整合相關內容說明於 3-6 節。</p>
	<p>21.P73 大地水準面模式計算「考慮不同精度的影響給定不同權值」--如何給定?請說明。</p>	<p>已更正相關敘述，最小二乘配置法的各項重力資料權值相關內容說明於 3-6 節。</p>
	<p>22.P74 陸上 GPS 測量成果，僅敘述成果列於附錄，甚為簡略。請針對成果品質詳細敘述。</p>	<p>補充於 P. 79。</p>
	<p>23.P74 大地水準面模式精度檢核「加入了本案船載重力成果之後」，應再加入 100 年度花東及山區重力測量資料後，進行精度檢核。</p>	<p>修正敘述於 P. 79。</p>
	<p>24.P74 建議「可考慮在未來計畫內施測東南部海域時加以補足」---關於此一敘述，於 P28 已表達不能執行，為何又有如此建議，如何改善?</p>	<p>已說明於 7-2 小節，見 P. 81。</p>

	25. 文章中出現許多黑體字標題，但未編予小節，請視內容多寡，原則上酌予重編小節。	相關情形已經修正，章節編排亦已不同。
--	---	--------------------