

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

空載重力技術研究(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-009-057-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：黃金維

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 6 月 18 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報
告 期

中進度
報 告

(空載重力技術研究 (1/3))

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2211-E-009-057

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：黃金維

共同主持人：

計畫參與人員：蕭宇伸、施? 昶、呂誌強

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報
告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究
計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
 涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開

查詢

執行單位：交通大學土木工程學系

中 華 民 國 92 年 6 月 15 日

中文摘要

關鍵詞：空載重力，大地起伏，GPS

本計畫預計三年內開發空載重力之相關技術、向量式及純量式之空載重力儀均將被研究，以期瞭解空載重力測量在重力及大地起伏方面可達之精度。第一年將完成空載重力觀測模式分析，並收集國外實測資料（如落磯山脈、瑞士、格陵蘭等）。此外還要評估空載重力對台灣大地起伏之貢獻，並與成大等單位，聯合發展 GPS 測定、飛機位置、速度及加速度等技術，並舉辦空載重力講習，請國際知名學者授課。

Abstract

Keywords: airborne gravimetry , geoid, areogravity, acceleration, GPS

In a three-year term, this project aims to investigate the methodology for airborne gravimetry. Both the scalar type and vector type of airborne gravimeters will be studied to see the achievable accuracies in gravity determination and geoid modeling. In the first year, the observed model for airborne gravimetry will be analyzed. We will also collect the areogravity data from abroad(Rocky Mountains, Switzerland and Greenland) and estimate the contribution to Taiwan's geoid. On the other hand, we will develop the GPS techniques to get the position, the velocity and the acceleration of aircraft with NCKU. Finally, the gravity workshop will be held and International well-known scholars on areogravity will be invited to lecture.

一、緣由

台灣本島高山居多，四周環海，此為重力測量工作遲遲未有重大發展的因素之一，圖 1 是台灣及周圍海域地形圖，圖 2 為目前台灣島及周圍所蒐集的重力值，這些點位大都分布在水準點上，密度不均，對大地起伏計算、二維之地球科學研究、正高改正等並沒有太大的幫助，尤其在山區及海面上資料更是缺乏參考(黃金維,2001)。就台灣的地理環境而言，測量重力時最適合之技術為空載重力測量，因其有不受地形限制的優點。

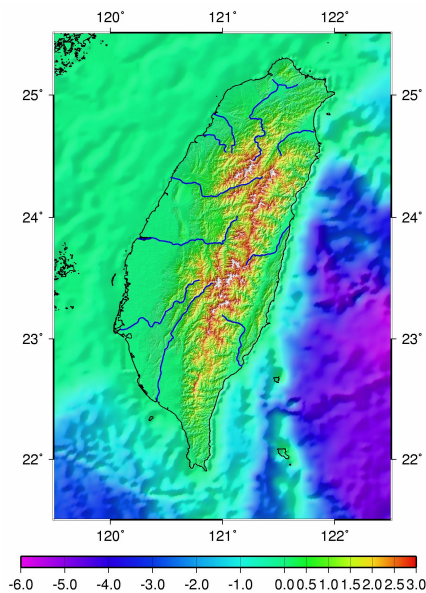


圖 1 台灣及周圍海域地形圖

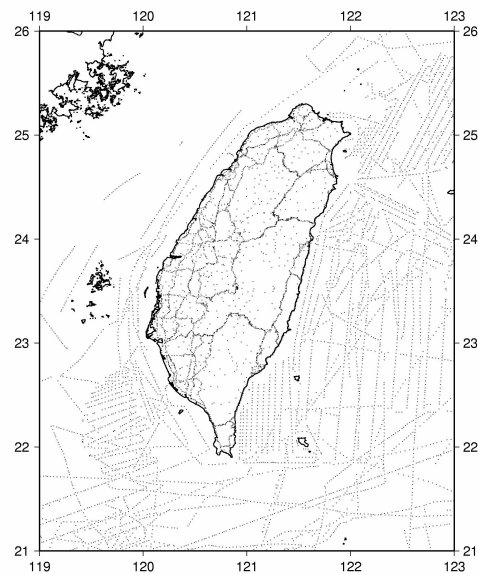


圖 2 目前台灣島及周圍所蒐集的重力值

二、方法與步驟

空載重力是利用飛機空載重力儀，獲得地面重力值的技術，早在 1960 年代初即已有學者提出，但因飛機速度甚快，在當時無法精確定出其位置及加速度而未被實際為測量重力之用。直到 1990 年初，GPS 定位技術逐漸成熟後，才被開始測試而臻成熟。許多地區，如瑞士 (Klinge et al., 1997 and Verdun et al., 2003)，格陵蘭 (Bell et al., 1999; Forsberg et al., 2002) 均已實施過空載重力。以下將逐一敘述之：

1. 空載重力儀

空載重力儀分為向量式 (vector) 與純量式 (scalar) 兩種，向量式重力儀乃由慣性導航系統 (INS) 發展而成，於 1990 年代啟始於加拿大的卡加利 (Calgary) 大學的測量系，其原理為用 INS 中的慣性測量儀 (IMU)，量測飛機飛行所受到三維的加速度 (含飛機加速度及地球引力之加速度)，因而稱向量式重力儀，圖 3(a)

是 applanix 所生產的慣性測量儀。純量式重力儀只量測在飛機位置之垂線方向重力分量，其使用之儀器一般以船載重力改裝而成，圖 3(b)的重力儀的型號是 L&R Air-Aea Gravity System II，此部重力儀是第二年計畫中，實際測量台灣空載重力的儀器，以下是關於此部儀器的基本簡介：

尺寸：71 × 56 × 84 cm

重量：86 kg

所需電力：240 Watts

解析度：0.01 mgal

精度：小於 1 mgal

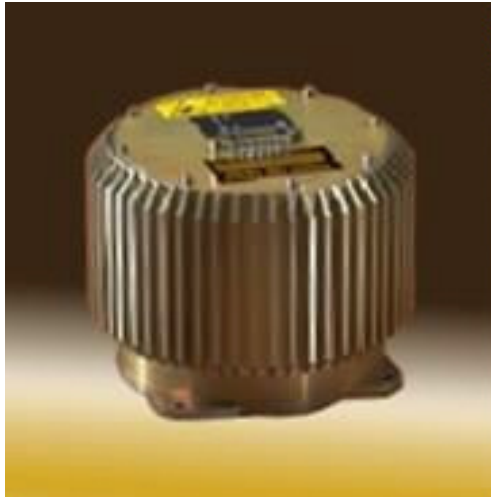


圖 3(a) applanix 慣性測量儀 II



圖 3(b) L&R Air-Aea Gravity System

2. 觀測模式

純量式空載重力儀觀測量，可表為

$$g_b = a_r - f_r - \left[\frac{V_e}{N+h} + 2w_e \cos \phi \right] V_e - \frac{V_n^2}{M+h}$$

(1)

其中：

g_b ：鉛垂方向重力

a_r ：飛機沿鉛垂方向加速度

f_r ：重力儀量得之鉛垂方向加速度

V_e, V_n ：飛機之東西、南北速度分量

N, M ：卯酉、子午圈曲率半徑

h ：飛機橢球高

w_e ：地球自轉角速度

ϕ ：緯度

(1)式中 $2w_e \cos \phi v_e$ 項為因地球自而引起之 Eotov 效應(Torge, 1989, p.271)，空載

重力的 Eotov 效應改正可參考 Harlan(1968)。由(1)式中可知，雖然 f_r 之量測精度甚高，但其他改正項（除 f_r 外）亦必須具高精度，而高精度改正項的前提是飛機之位置、速度、加速度必須精確，在 GPS 出現之前，這點非常難做到。而向量式重力儀之觀測模式類似(1)式，為

$$\bar{g} = \bar{a} - \bar{f} + (P + 2\Omega_e) \bar{V} \quad (2)$$

其中

\bar{g} ：重力向量

\bar{a} ：飛機加速度向量

\bar{f} ：INS 量得之加速度向量

p ：3×3 矩陣，將飛機之速度轉換為離心加速度向量

Ω_e ：3×3 矩陣，計算 Eotov 效應向量

Glennie et al. (2000) 則建議向量式及純量式聯合使用會獲得最佳效果。向量重力精度較差（約 3-4mgal，而純量式的則有次 mgal 精度），但可同時觀測三維之重力分量，因而理論上同一點上向量式之觀測量為純量式之三倍(圖 4)。

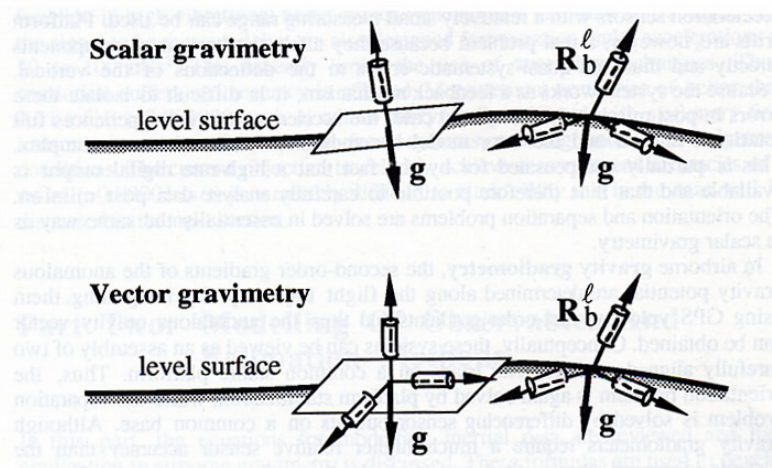


圖 4 純量式(上)與向量式空載重力儀觀測概念

2. 空載重力測量載具之 GPS 座標、速度、加速度之計算分析

由(1)(2)式可發現，當實施空載重力時，飛機內除了需要空載重力儀測出重力值外，還需要利用動態 GPS 的技術來定位、定速度、定加速度，以及以慣性導航儀定出飛機飛行的姿態，如圖 5。其中為了增加飛機定位的精度，可在飛機上架設多個 GPS 天線，如圖 6(a)所示，這是格陵蘭實施空載重力時所使用的飛機，飛機型號為 Twin-Otter aircraft，在機頂、機尾、機翼等處，均架設天線。圖 6(b)是我國農林航測所航測飛機，也是預計明年用於台灣空載重力測量的飛機，目前只有一部天線架設於機頂。

近年來，隨著 GPS 定位技術的進步，利用更成熟的演算法，我們已經可以使用 GPS 達到公分級的即時動態定位。目前本研究團隊正自 Goad and Yang

(1997) 所發展之軟體開始，加以修改及改善到可應用求解飛機速度、加速度。根據文獻，利用 GPS 動態定位系統提供空載重力之載具的定位、速度、加速度，由於採載波相位觀測其定位最佳時將可達公分級精度(楊名, 1997)。對於空載重力而言，其精度可達次 mgal 精度 (Kennedy et al., 2001)。



圖 5 空載重力測量的各種儀器



圖 6(a) 格陵蘭空載重力測量所使用的飛機



圖 6(b) 農林航測所航測飛機

3. 空載重力測量交叉點精度分析

評估空載重力精度常用的方法之一為交叉點分析。其原理為，當飛機飛過同一地點（且高度相同），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。空載重力與航測一般，按某一設計之航線觀測，兩航線（幾近直線）可形成一交叉點。由於上述誤差因素，在交叉點之兩重力值不太可能相同，此時需要進行交叉點平差。根據 Verdun(2003) 在瑞士與法國所做的實驗，若未經交叉點平差處理的重力值，僅有 15.34mgal 的精度，經過交叉點平差處理後，重力精度驟降為 0.012mgal。故由此可知，交叉點精度分析在空載重力中，扮演極重要的角色。目前本研究團隊也正積極發展此一平差軟體。詳細的精度分析方法可參考 Wessel(1989)。此外，在平差進行時，應對沿航線之原始觀測重力進行剔除粗差及濾波動作，濾波處理技巧見 Childers et al. (1999)

4. 空載重力測量向下延續計算方法及精度分析

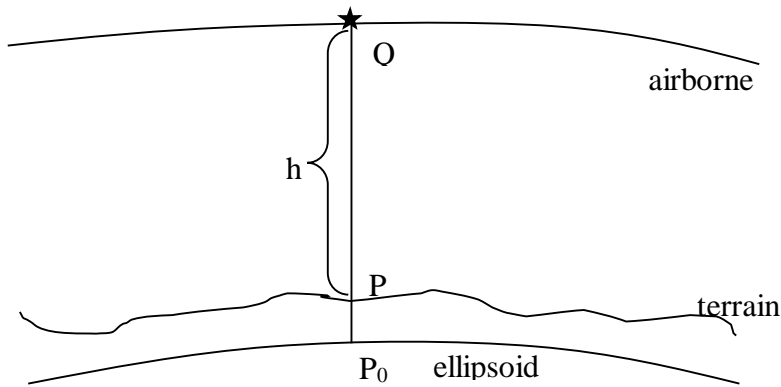


圖 7 空載重力約化示意圖

空載重力所測得的是飛機所在高度之重力，應用時必須將之向下延續到地表或海平面（或大地水準面）。如圖 7 所示，亦即將 Q 點所測得的重力值，約化至 P 點。

$$\mathbf{F}\{\Delta g_{down}\} = \mathbf{F}\{\Delta g_{up}\} \exp\{h\omega\} S(\omega) \quad (3)$$

其中

Δg_{down} ：地表面的重力值

Δg_{up} ：空載重力值

h：航高

F：傅利葉轉換運算子

ω ：頻率

$S(\omega)$ ：濾波

本計畫正積極研究一空載重力之最佳濾波(Buttkus, 2000)，用以計算最佳之地表重力。另一向下延續之方法為最小二乘配置法(Moritz, 1980)，本團隊亦一並研究之。

5. 航線規劃

以 2003 年 Verdun 等實施的空載重力測量為例(圖 8(a))，測區涵蓋瑞士與法國，共有 18 條南北航線與 16 條東西航線，飛機上裝置 5 個天線，地面共有 7 個 GPS 控制站，最後經過計算，在空間解析度 8km 時，空中獲得的布格重力異常與地面約化至空中的重力異常比較後，兩者差值均方根值(rms)達 7.68mgal。圖 8(b)是 Forsberg(2002)在格陵蘭與北極海一帶所做的空載重力航線規劃圖，圖中的航線較圖 10(a)少，交叉點也明顯較少。

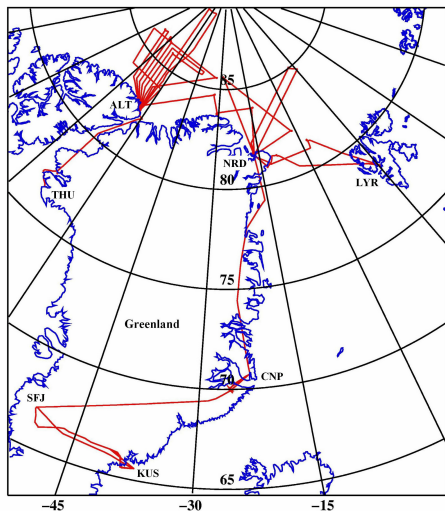
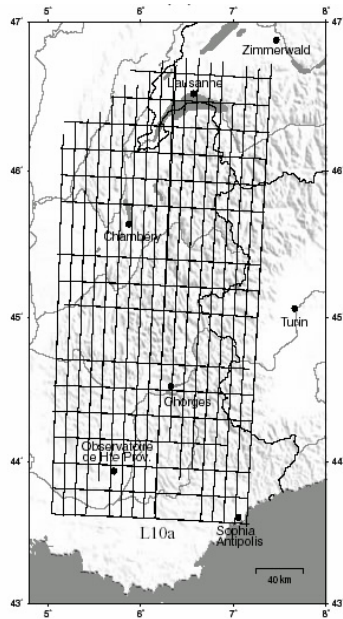


圖 8(a) 瑞士與法國空載重力航線規劃圖

圖 8(b) 格陵蘭與北極海空載重力航線規劃圖

6. 收集並整理國外應用重力儀辦理空載重力測量資料

本次計畫已蒐集的空載重力計算資料包括北極海(Forsberg et al., 2002)(如圖 9(a))和加拿大卡加利大學的 K.P Schwarz 教授在美國落磯山脈所實施的空載重力測量資料(Jekeli, 私人通訊, 2002)(如圖 9(b))。其中北極海的資料是圖 8(b)中的其中一段航線資料，屬於純量式資料，而落磯山脈的資料屬於向量式資料，此航

線規劃的特色是三條重複觀測的航線重疊在一起，適合於研究交叉點分析。吾人亦積極接洽 Klingelé 與 Verdun 等人。希望獲得在瑞士法國一帶(Klingelé et al., 1997 and Verdun J et al, 2003)的實測計算資料。

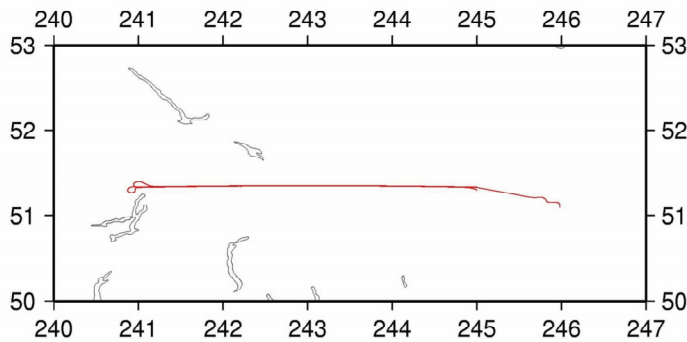
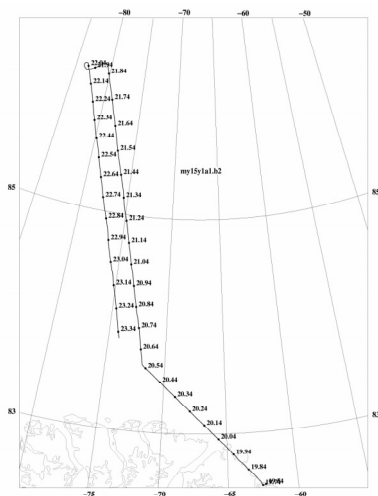


圖 9(a) 北極海空載重力資料圖

料圖

圖 9(b) 落磯山脈空載重力資料圖

7. 辦理重力測量相關研討會

本計畫預定於 2003 年 8 月 10 日(日)~2003 年 8 月 13 日(三) 於台灣新竹交通大學舉辦為期五天之會議，並聘請國際知名學者辦理空載重力講習，會中將邀請兩岸專家學者參與。目前暫定由交通大學(台灣)、武漢大學共同辦理，但由於近期受到 SARS 影響，會議是否能如期進行還未可知，若屆時 SARS 疫情未獲控制，則會議勢必延期。會議議程的安排暫定如表 1。

表 1 重力及水準面研討會暫定時程

日期	主題
2003 年 8 月 10 日(星期日)	會議註冊
2003 年 8 月 11 日(星期一)	重力及水準面論文宣讀
2003 年 8 月 12 日(星期二)	重力及水準面論文宣讀
2003 年 8 月 13 日(星期三)	航空重力講習(國際知名學者)

會議中所探討的主題含絕對重力、相對重力、衛星重力測量、空載重力測量、重力網平差、衛星測高決定重力與水準面、求定水準面的方法、重力與水準面在地球物理學與海洋學的應用、重力與水準面的時間變化等。

三、結論

目前本研究團隊正積極的開發各項空載重力測量相關的軟體，包括空載重力測量所用載具之 GPS 座標、速度、加速度計算軟體、交叉點分析平差軟體、空載重力測量向下延續計算軟體等，也正積極研究與蒐集國外實測的資料，將來台灣地區實施空載重力測量工作時，上述所開發的軟體，將作為資料處理之用。預期將來空載重力測量，將對台灣地區的大地測量，地球科學，海洋學等科學提供巨大貢獻。

四、參考文獻

- 黃金維(2001) 一等一級水準點上實施重力測量工作報告書，內政部
- 楊名(1997)。公分級 GPS 衛星即時動態定位系統，測量工程 第 39 卷 P.1-18。
- Bell RE, Childers VA, Arko RA, et al. (1999) Airborne gravity and precise positioning for geologic applications. J Geophys Res 104: (B7) 15281-15292
- Buttkus B (2000) Spectral Analysis and Filter Theory, Springer, Berlin
- Childers VA, Bell RE, Brozena JM (1999) Airborne gravimetry: An investigation of filtering. Geophysics 64: (1) 61-69
- Forsberg R, Olesen A, Bastos L, et al. (2002) Airborne geoid determination. Earth Planets Space 52: (10) 863-866
- Forsberg R, Keller K., Hvidegaard S M and. Olesen A(2002) European airborne gravity and lidar survey in the Arctic Ocean, ESAG-2002 final report ,National Survey and Cadastre (KMS), Denmark
- Glennie CL, Schwarz KP, Bruton AM, et al. (2000) A comparison of stable platform and strapdown airborne gravity. J Geodesy 74: (5) 383-389
- Goad CC, Yang M (1997) A new approach to precision airborne GPS positioning for photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 63(9): 1067-1077
- Harlan, R.(1968). Eotvos corrections for airborne gravimetry, J. geophys. Res., 73, 4675-4679.
- Kennedy SL, Bruton AM, Schwarz KP(2001) Improving DGPS Accelerations for Airborne Gravimetry : GPS Carrier Phase Accelerations Revisited, IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, pp211-216
- Klinge EE, Cocard M, Kahle HG, et al. (1997) Kinematic GPS as a source for airborne gravity reduction in the airborne gravity survey of Switzerland. J Geophys Res 102: (B4) 7705-7715

Moritz H (1980) Advanced Physical Geodesy, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe

Torge W (1989) Gravimetry, de Gruyter, Berlin

Verdun J, Klingele EE, Bayer R, Cocard M, Geiger A, Kahle HG (2003) The alpine Swiss-French airborne gravity survey, *Geophysical Journal International*, 152 (1): 8-19

Wessel, P (1989) XOVER. A crossover error error detector for track data, *Comput. Geosci.*, 15, 333-346