

中 華 大 學

碩 士 論 文

題目：GPS/INS整合設計研究
GPS/INS System Design and Integration



系 所 別：機械工程學系碩士班
學號姓名：M09408050 王 春 發
指導教授：林 君 明 博士

中華民國 九十八年 八 月

中文摘要

本研究是利用數位信號處理器 (Digital Signal Processor, DSP) TMS320F2812, 及感測器 GIMU (GPS-enabled Inertial Measurement Unit), 並使用卡門濾波器來進行載具 GPS/INS 導航系統的整合。系統整合的方法, 由數位信號處理器 (DSP) 為運算核心, 透過 SCI (Serial Communication Interface) 將運算所得的載具資訊, 如位置、速度及航向, 傳回 PC 上。



關鍵字：數位信號處理器 (Digital Signal Processor, DSP)、卡門濾波器 (Kalman Filter)

Abstract

The purpose of this research is by using DSP and sensors(GPS and IMU, GIMU) with Kalman Filter to carry out the integration of vehicle navigation system design. The GIMU consists with three gyroscopes, three accelerometer and GPS receiver. The system is implemented with loosely-coupled Kalman filter of lower order computation requirement. In addition, this research developed a program program by using GPS and Kalman Filter, which can evaluate the performance of Kalman Filter.



Keywords : DSP (Digital Signal Processing) 、 Kalman Filter

誌謝

在研究所的求學生涯中，特別要感謝的是我的指導教授 林君明博士，在老師跟前學習令吾人獲益良多，多元化的學習環境，與其不倦悉心指導下，不管是在學業或是人生的規劃上，亦給予我許多的指導與寶貴的意見，鍛鍊了獨自解決問題的方法與能力。同時亦要感謝陳振文博士、黃榮興博士、范志海博士、蔡渙良博士給予許多指導與建言，使本論文能順利完成且不致闕失太多而更臻完善。

再來，要感謝政嶽、俊杰與仁超學長在研究上給予的指教，同學敬庭、俊男及忠慶、廷揆、英哲、振宏等學弟們在研究上適時的幫忙，非常衷心的感謝。更要感謝我的家人，父母親的支持與栽培，給予我在精神上的支持與鼓勵，再加上對我無限的包容和永遠的關心。謝謝所有曾經幫助過我，讓我的研究生活多采多姿，順利的踏出校園，進入人生的另一個旅程，在此由衷感謝，謝謝。

謹識

中華民國九十八年七月二十八日

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1
1.1 簡介.....	1
1.2 研究動機與方法.....	1
1.3 文獻回顧及內容摘要.....	4
第二章 GPS 及慣性導航系統.....	7
2.1 GPS 定位系統簡介.....	7
2.2 GPS 定位系統的基本架構.....	8
2.3 全球定位系統誤差源分析.....	11
2.4 慣性導航系統簡介.....	15
2.5 陀螺儀姿態模組系統架構.....	16
2.6 陀螺儀姿態模組的運算流程及步驟.....	17
2.7 陀螺儀姿態模組整合系統之誤差分析.....	22
2.8 尤拉角簡介.....	24

第三章 數位訊號處理器	29
3.1 數位訊號處理器簡介	29
3.2 DSP 系統整合應用	31
3.3 TI TMS320F2812 晶片簡介	37
3.4 eZdsp F2812	40
第四章 系統軟硬體架構與實驗結果	46
4.1 系統硬體架構	46
4.2 eZdsp I/O Card 簡介	53
4.3 Code Composer Studio 操作	54
4.4 串列通訊界面	57
4.5 GIMU 實驗結果	61
4.5.1 實驗步驟	61
4.5.2 INS 靜態實驗	63
4.5.3 INS 動態實驗	68
4.5.4 INS 動態實驗和尤拉角轉換	71
第五章 GPS/INS 整合模擬實驗結果	76
5.1 座標系統簡介	76
5.1.1 地固地心座標系(ECEF)	76
5.1.2 世界地理座標(WGS-84)	77



5.1.3 X-Y 2D座標系統.....	80
5.2 卡門濾波器(Kalman Filter).....	84
5.3 卡門濾波器模擬實驗結果.....	86
5.4 GPS/INS 及卡門濾波器整合實作.....	100
第六章 結論與未來展望.....	104
6.1 結論.....	104
6.2 未來展望.....	104
參考文獻.....	106



圖目錄

圖 1.1 透過 Wii 動態強化感測器來提供更細微的高爾夫擊球變化	4
圖 2.1 GPS 定位系統衛星及軌道分布圖	8
圖 2.2 全球定位系統架構	9
圖 2.3 衛星位置與接收機間的示意圖	11
圖 2.4 GPS 定位三大誤差源	12
圖 2.5 GPS 訊號受高樓影響產生多重路徑及假象訊號示意圖	14
圖 2.6 滾轉(Roll), 俯仰(Pitch), 偏航(Yaw)各角度之示意圖	19
圖 2.7 尤拉角的示意圖	24
圖 3.1 TI 的 TMS320 DSP 系列發展史示意圖	30
圖 3.2 TMS320 各系列的特有功能及分類示意圖	31
圖 3.3 DSP 模組與平台機構馬達控制應用方塊圖	33
圖 3.4 DSP 模組之語音應用方塊圖	34
圖 3.5 DSP 模組之通訊應用方塊圖	35
圖 3.6 DSP 模組之影像應用方塊圖	36
圖 3.7 DSP 模組之電力監測控制系統方塊圖	37
圖 3.8 TMS320F281x 系列 DSP 功能方塊圖	39
圖 3.9 eZdsp F2812 週邊連接埠界面配置圖	40

圖 3.10 JTAG 接腳圖	41
圖3.11 P4/P8/P7, I/O 界面接腳圖	43
圖3.12 P5/P9 A/D轉換界面	44
圖 4.1 GIMU 的外觀實體圖	47
圖 4.2 GIMU 的側視圖	47
圖 4.3 GIMU 的右側視圖	48
圖 4.4 Packet Type 1 Example	51
圖 4.5 Packet Type 2 Example	52
圖 4.6 連接 F2812 自行製作之 I/O Card	54
圖 4.7 模擬器設定圖	55
圖 4.8 CCS Setup 介面	56
圖 4.9 選擇 F2812 eZdsp 驅動，儲存並開啟 CCS	56
圖 4.10 Debug->Connect 將 DSP 與 PC 連結	57
圖4.11 DSK系統時脈圖	59
圖4.12 SCI模組界面圖	59
圖 4.13 GIMU 以及 F2812 總成圖	61
圖 4.14 設定要用到的暫存器	62
圖 4.15 撰寫接收 GIMU 傳送過來資料的程式	62
圖 4.16 P 軸未修正誤差靜態實驗結果	64

圖 4.17 Q 軸未修正誤差靜態實驗結果.....	64
圖 4.18 R 軸未修正誤差靜態實驗結果.....	65
圖 4.19 P、Q、R 軸未修正累積誤差.....	65
圖 4.20 P 軸已修正誤差靜態實驗結果.....	66
圖 4.21 Q 軸已修正誤差靜態實驗結果.....	66
圖 4.22 R 軸已修正誤差靜態實驗結果.....	67
圖 4.23 P、Q、R 已修正累積誤差.....	67
圖4.24 旋轉P軸實體圖.....	68
圖 4.25 P 軸動態實驗結果.....	69
圖4.26 旋轉Q軸實體圖.....	69
圖 4.27 Q 軸動態實驗結果.....	70
圖4.28 旋轉R軸實體圖.....	70
圖 4.29 R 軸動態實驗結果.....	71
圖 4.30 P 軸轉到 90 度的座標.....	72
圖 4.31 P 軸轉回 0 度的座標.....	72
圖 4.32 P 軸轉到 -90 度的座標.....	72
圖 4.33 P 軸轉回 0 度的座標.....	72
圖 4.34 Q 軸轉到 90 度的座標.....	73
圖 4.35 Q 軸轉回 0 度的座標.....	73



圖 4.36 Q 軸轉到-90 度的座標.....	73
圖 4.37 Q 軸轉回 0 度的座標.....	73
圖 4.38 R 軸轉到 90 度的座標.....	74
圖 4.39 R 軸轉回 0 度的座標.....	74
圖 4.40 R 軸轉到-90 度的座標.....	74
圖 4.41 R 軸轉回 0 度的座標.....	74
圖5.1 WGS-84橢球座標與直角座標的關係圖	78
圖5.2 台灣地區TM 2度座標系統示意圖.....	84
圖5.3 卡門濾波器運算方塊圖.....	86
圖 5.4 未經過校正的 INS 測試結果圖(有發散情況).....	87
圖 5.5 模擬 GPS 的訊號位置.....	88
圖 5.6 模擬一速度值.....	88
圖 5.7 模擬 GPS 的訊號位置及速度.....	88
圖 5.8 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖.....	89
圖 5.9 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之速度圖.....	89
圖 5.10 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之加速度圖.....	89
圖 5.11 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置、速度、加速度圖 ...	90
圖 5.12 k1~k3 的圖.....	90
圖 5.13 未經過校正的 INS 測試結果圖(還是有發散情況).....	91

圖 5.14 模擬 GPS 的訊號位置.....	91
圖 5.15 模擬一速度值.....	92
圖 5.16 模擬 GPS 的訊號位置及速度.....	92
圖 5.17 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖.....	93
圖 5.18 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之速度圖.....	93
圖 5.19 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之加速度圖.....	94
圖 5.20 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置、速度、加速度圖....	94
圖 5.21 k1~k3 的圖.....	95
圖 5.22 未經過校正的 INS 測試結果圖(仍然有發散情況).....	95
圖 5.23 模擬 GPS 的訊號位置.....	96
圖 5.24 模擬一速度值.....	96
圖 5.25 模擬 GPS 的訊號位置及速度.....	97
圖 5.26 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖.....	97
圖 5.27 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之速度圖.....	98
圖 5.28 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之加速度圖.....	98
圖 5.29 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置、速度、加速度圖....	99
圖 5.30 k1~k3 的圖.....	99
圖 5.31 未經過校正的 INS 測試結果圖(依然有發散情況).....	100
圖 5.32 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖.....	101

圖 5.33 P11 的圖.....	101
圖 5.34 P22 的圖.....	102
圖 5.35 P33 的圖.....	102
圖 5.36 k1 的圖.....	102
圖 5.37 k2 的圖.....	103
圖 5.38 k3 的圖.....	103



表目錄

表3.1 各連接埠界面配置定義表.....	41
表 3.2 JTAG 接腳配置表.....	41
表3.3 P4/P8 I/O接腳配置表.....	43
表3.4 P5/P9 A/D轉換接腳配置表.....	45
表 4.1 GPS Module 四腳連結器.....	48
表 4.2 SCI 接腳配置表.....	58
表 4.3 LSPCLK clock = 37.5MHz 下, 鮑率設定對照表.....	60



第一章 緒論

1.1 簡介

藍芽、紅外線、陀螺儀、加速儀，雖然都是早已成熟的技術，但又是如何打造出風靡全球的遊樂器 Wii 風潮呢？其實 Wii 最具創意的特色是遙控器 Wii Remote，是以微機電系統（MEMS）技術為基礎的三軸加速度感測器整合而成。其中是採用 ADI 及 ST 的感測器元件。此舉不但讓遊戲機設計進入了一全新的階段，且影響越來越多的消費性電子產品。因為無論是手機、筆記型電腦、3D 遙控和空中滑鼠，都開始採用 MEMS 元件，以提供更佳的操控功能或創新應用。

陀螺儀姿態模組（Gyroscope attitude module）【1~3】等感測器所組成的系統，可感測載具之角速度。而後再利用慣性導航系統之動態方程式，可即時（Real-Time）求得載具之速度、位置的變化，而得到載具於慣性座標系統之定位資訊。在此使用 MEMS 感測元件，可大幅縮減模組體積，解決了體積方面的問題，而將電源與接地線分開成兩層，更能減少雜訊與提高精度。

1.2 研究動機與方法

Wii 當中的加速度感應器（accelerometers）可以感知玩家腕部和手部動作，並測量 Wii 遊戲控制器當中的直線加速度，將其運動轉化到螢幕上遊戲角色的動作。

當這種運動感應技術進入手機，手機的實用性也跟著發生了幾項有趣的轉變，比如，它能夠成為動作感應滑鼠，讓你上下左右晃晃手機即可以輕鬆瀏覽行動版的網際網路。它能夠測量你行進步伐、速度以及卡路里的燃燒，來計算你運動成果。

而這僅僅是開始。隨著加速度感應器由單軸座標判斷變成雙軸、甚至三軸發展，它們的精確性已經大幅提高。Invensense 等公司已經將這項技術推向前進，這家公司將三軸座標加速度感應器與陀螺儀進行結合，能夠讓系統測量旋轉速度，配備這些技術的手機能夠提高拍照時的穩定性，並精確進行定位與導航服務。

事實上，陀螺儀的運用早已深入生活層面，如風行歐美的魔法輪（Segway），因裝有精密的陀螺儀與敏銳的「傾斜感測器」，隨時偵測騎乘者身體重心的移動變化，Segway 上的電腦運用收集到的資料來模擬人體的平衡；而市面上標榜防手振的相機，也是運用陀螺儀概念。

如躲避飛彈追擊中的戰鬥機，要如何在激烈運動後，還能知道自己正朝向東南西北哪個方位；而追擊中的飛彈又如何讓尋標頭能夠一直鎖定目標。至於邊越野邊用火砲瞄準敵人的戰車、航海或車用的 GPS 定位，也都是陀螺儀的功勞。

就在今年 5 月，日本任天堂（Wii）官方網站開設了「Wii 動態強化感測器（Wii MotionPlus）」的特設網頁，刊出社長與研發人員的訪談，解說 Wii 動態強化感測器的關鍵技術與透露研發秘辛。

Wii 動態強化感測器是安裝於 Wii 遙控器擴充插槽的附加感應器，採用最新微機電陀螺儀（MEMS Gyroscope）感測器來提供 Wii 遙控器更精確的動態感測能力。

訪談中研發人員提到當初原本有考慮過直接將陀螺儀整合到 Wii 遙控器中，但是因為體積與成本等因素而未能實現，現在則是藉由微機電技術來縮小感測器體積。

加上能感測各軸旋轉角度的陀螺儀之後，讓 Wii 遙控器不再只能感測直線式的移動，而能精確的感測包括移動與轉動的細微變化。且 Wii 動態強化感測器所採用的陀螺儀感測器的感測能力是一般的 5 倍，並具備低速高精度與高速高動態 2 種感測模式。

同時也提到許多研發秘辛，包括改為外凸裙襬造型以避免手滑，克服外接固定的強度考驗，解決陀螺儀感測器因溫度變化與封裝樹脂吸水膨脹所造成的誤差等。由圖 1.1 可知多加陀螺儀之後更能讓使用者感受到角度的變化，而不再只有直線式的行進。

Wii Sports



Wii Sports Resort



圖 1.1 透過 Wii 動態強化感測器來提供更細微的高爾夫擊球變化

本研究是採用數位信號處理器（Digital Signal Processing，簡稱 DSP）TMS320F2812 DSK 模組，利用 Code Composer Studio（CCS）作程式開發工具，而後植入 TMS320F2812 DSK，接收三個單軸陀螺儀的數位信號，並將運算過後的數位信號傳送至 PC，達到展示的目的。

並使用卡門濾波器來對 GPS 及 INS 做模擬運算，作為比對有無使用卡門濾波器之功效如何，及實體整合 GPS 及 INS，並探討其效果如何。

1.3 文獻回顧及內容摘要

大部份的導航系統（Vehicle Navigation System），都採用全球定位系統（GPS），作為車用導航的輔助設備，以修正慣性導航系統。

其整合的方式有 GPS/INS、DGPS/INS、GPS/DR【4~9】，使用的硬體方面，包括有磁羅盤（Magnet Compass）、陀螺儀、加速儀等。本研究是以陀螺儀姿態模組為主體。

有鑒於 Wii Remote 的架構，只採用三軸加速儀來感測加速度，進行滾轉、俯仰、偏航等動作定位，勢必較為單薄。若考慮更精準的方式，因此採用陀螺儀姿態模組，應為較好的選擇。

本研究是利用 DSP 模組做慣性導航系統，其優點是容易整合，數學的運算階數不會太高，沒有奇異解的問題，使得系統可以達到即時（Real-Time）的顯示。同時特別針對陀螺儀姿態模組，在短時間內精度的檢測；由實驗結果可知在短時間內，陀螺儀所提供的定位資訊，精確度還不錯。再加上本研究是以嵌入式系統的硬體為導向，利用 DPS 為計算核心，陀螺儀姿態模組體積也已縮小，除可提高便利操作性外，其可靠度也相對的提升許多。

論文的架構分為六章，主要內容概述如下：

第一章：緒論。

第二章：簡介 GPS、陀螺儀姿態模組、陀螺儀的運算流程、四元素法，及尤拉角。

第三章：簡介數位訊號處理器（DSP），如何用於處理整個電子導航系統的計算。

第四章：簡介以 DSP 為平台之 GIMU 之軟硬體架構，以及實驗結果的分析。

第五章：簡介卡門濾波器及 GPS/INS 使用卡門濾波器之模擬和實作。

第六章：結論與未來展望。



第二章 GPS 及慣性導航系統

2.1 GPS 定位系統簡介

全球衛星定位系統(Global Positioning System)【10~13】是美國國防部自 1973 年起為了軍事定時、定位與導航目的而建立。歷經三個階段，耗時 20 年並投資 300 億美元，於 1993 年 6 月佈署完成之三維精確定位系統。目前美國已開放 GPS 系統，免費提供世界各國及民間之應用。

GPS 在民間的應用日益普遍，近年來也慢慢形成航太工業體系中的另一個領域，GPS 的應用範圍，也隨著每一個人的想像力在擴展當中。自 1973 年代此系統初次形成時，它的定位準確性就令人震驚，GPS 系統隨著時間的演進而日益完備，在幾次美國介入對外的戰爭中，展現出其優異的表現。這也證明了 GPS 系統原先的構想及設計的完整性，美國軍方各兵種也因為此原因，相繼投入各項 GPS 軍用設備的研發。由此可以預見，在未來以科技為主的戰爭中，GPS 設備將會繼續扮演不可或缺的角色。

GPS 系統包含 BLOCK I，BLOCK II/II A 等 24 顆操作使用衛星，及(BLOCK II R) 3 顆預備衛星。2000 年後有第二代後續型(BLOCK II F)，乃至第三代的衛星以取代先前第二代衛星。這些衛星均勻分佈在 6 個軌道面上，軌道面與赤道成 55 度的傾角，各軌道面

上之衛星相距 90 度。

GPS 衛星軌道高度距地球表面約 20200 公里，每一顆衛星運行地球一週時間為 11 小時又 58 分，如圖 2.1 所示。所以在全球各地任何時間，仰角為十五度以上，最少可以觀測到四顆衛星(一般可以觀測到四至六顆)。透過四顆衛星的幾何位置關係，再經由聯立之導航方程式加以運算，就可以得到連續且全天候的即時導航，或利用不同的定位技術提供不同的定位精度。



圖 2.1 GPS 定位系統衛星及軌道分布圖

2.2 GPS 定位系統的基本架構

GPS 定位系統的基本架構，主要可分為三大部分：即太空部分（Space Segment），地面控制部分（Control Segment），及設備使用者部分（User Segment），如圖 2.2 所示。分別敘述如下【2、3、14】：

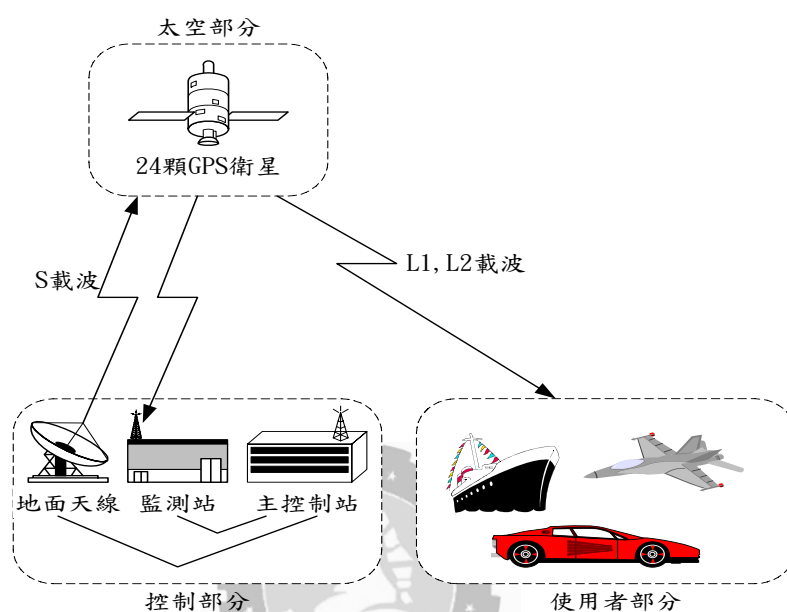


圖 2.2 全球定位系統架構

(1) 太空部分 (Space Segment)

太空部分指的是安置在太空中的 GPS 衛星群（計 24 顆），關於衛星的型號與部署狀況在之前已大略提及。有關於備用衛星之功能，是當作主衛星失效時之備用品，以及加強衛星之幾何分佈。在平時，這些備用衛星也可用於定位，所以又稱之為主動式預備衛星（Active spares），如此可以保障在太空部份的工作能正常及提高工作效率。

(2) 地面控制部份 (Control Segment)

GPS 地面控制系統是於 1985 年 9 月完成，GPS 地面控制系統部份包括一個主控制站（Master Control Station，MCS），位於科羅拉多州春田市的空軍基地（Colorado Spring）。三個地面天線（Ground Antenna，GA）位於關島（Kwajalein）、亞松森島（Ascension）以及迪亞歌加西亞（Diego Garcia）等三處。另外有五個監測站（Monitor Station，MS），位於科羅拉多州春田市的空軍基地（Colorado Spring）、夏威夷（Hawaii）、關島（Kwajalein）、亞松森島（Ascension）以及迪亞歌加西亞（Diego Garcia）等五處。

每個地面監測站均擁有一個 GPS 雙頻接收機，標準原子鐘、感測器及資料處理器，並使用 WGS-84 座標系統。每天 24 小時不停的連續追蹤、觀測每一顆 GPS 衛星，並將 GPS 觀測量、及觀測所得之氣象資料和電離層資料等，聯合求解及經過平滑處理過的資料（Smoothed Data），每 15 分鐘一組傳送至主控制站。由主控制站立即整合各監測站之各項資料，並計算衛星星曆、衛星時錶修正量及電離層修正係數等。所得結果彙集成導航訊息（Navigation Messages），先傳到地面天線處，再由地面天線利用 S 頻道之無線電波，將更新的資料，傳送給各顆衛星，以更新衛星導航等訊息。

（3）設備使用者部份（User Segment）

設備使用者部份為接收 GPS 衛星訊號之用戶接收機，由使用環

境之不同，可分為低動態、高動態、單頻、雙頻等接收機。使用者可依不同須求目的而選用不同功能、精確度的接收機，做不同的應用如導航、計時、大地測量……等。GPS 接收機設備包括硬體與軟體，硬體方面有天線、接收機、顯示螢幕、資料處理器、資料記錄器以及電源供應器等。軟體部份則根據接收機硬體所解出的電碼，聯立出導航方程式加以解算，提供定位結果，如圖 2.3 所示。

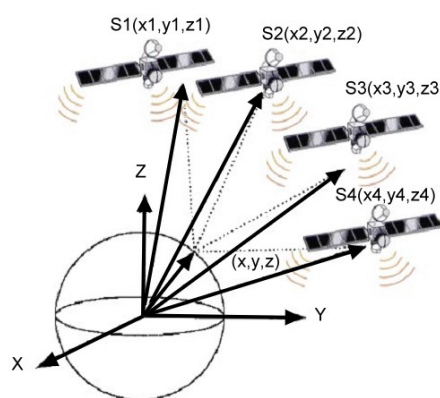


圖2.3 衛星位置與接收機間的示意圖

2.3 全球定位系統誤差源分析

GPS 和衛星之間的距離非常遙遠，因此在接收的過程會存有許多的誤差源，造成定位精度的降低。為了提高定位精度，必須詳細了解各種誤差的來源和大小，以消除或減少這些誤差，而達到提高定位精度的目的。

影響 GPS 定位精度的因素很多，大體而言，可從衛星、觀測和訊號傳送等三大方面來討論。如圖 2.4 所示：

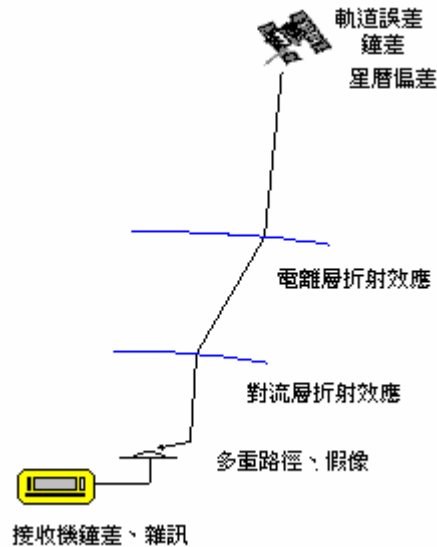


圖 2.4 GPS 定位三大誤差源

(一) 衛星方面的誤差

衛星方面的誤差包括有【2、15】：

- (1) 衛星星曆偏差：這種偏差是指衛星實際的運行軌道，或瞬間位置與 GPS 訊號中提供的廣播星曆本身就有的偏差。一般由星曆計算的衛星位置誤差約為 20~40 公尺。
- (2) 衛星時錶的鐘差：衛星時錶與 GPS 時錶之間的鐘差，此因素所造成之影響約有 30~300 公里，但若利用廣播訊號提供的改正項（Broadcast Correction）加以修正，將可以降低到 100 公尺以內。

被觀測衛星定位精度降低之幾何因子：衛星幾何性分佈的影響，是以『精度降低因子』DOP（Dilution of Precision）來表示，即定位

精度是以所有誤差因素之合成偏差（包括三度空間及時間的合成偏差），和理論觀測精度（虛擬距離的標準偏差）的比值。

（二）觀測方面的誤差

觀測方面的誤差包括有：

(1) 週波脫落和週波未定值：一般理論上載波相位觀測量的精度，可達 1~3 mm，但由於週波脫落和週波未定值的問題，所以無法達到此精度。解決的方法：可利用兩個接收天線，利用基線長度設定的方法，或是利用干擾儀的方法，都可以解決這方面的問題。

(2) 多重路徑與假像：所謂多重路徑是因為接收機附近之地表，或建築物等反射衛星的訊號，造成不同之路徑傳輸現象，使得接收機受到不同路徑訊號之干擾。假像也是多重路徑的一種，特別是指訊號傳送過程中，有些訊號來自反射物尖銳的邊緣或角落，此現象會使天線的相位中心偏移。多重路徑與假象，會使得虛擬距離定位法產生 10 公尺左右的偏差，或使載波相位定位法產生數公分的偏差，如圖 2.5 所示。

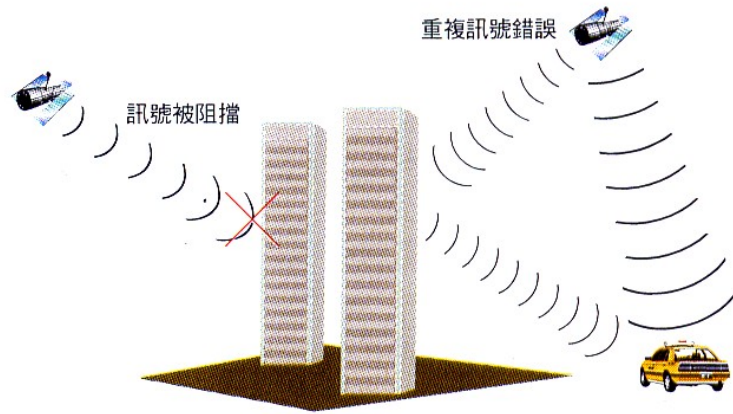


圖2.5 GPS訊號受高樓影響產生多重路徑及假象訊號示意圖

(三) 訊號傳遞方面的誤差

訊號傳遞方面的影響包括有：

(1) 電離層延遲誤差:電離層是指約在地表 100Km~1000Km 之間的大氣層，在此範圍內充滿了離子化之微粒(Ionized Particles)及電漿(即所謂的 Plasma)。當傳遞的訊號通過此電離層，會產生折射效應，所以對定位精度的影響甚大。由於電離層對訊號之影響會隨訊號之頻率而變，所以可利用雙頻觀測法，來消除電離層的影響誤差。電離層所造成的誤差約 5 公尺至 150 公尺之間。午後兩點電離層電子密度較高，影響最顯著，夜間則影響較不顯著。

(2) 對流層的影響:對流層乃是指位於地表面起算，到約 40km 處之大氣範圍，因其為一中性的大氣範圍，對電磁波之影響與

訊號之頻率無關。所以無法利用不同頻率的方法來消除，可經過數學模式運算的方式來消除。

(3) 人為的因素:美國軍方基於國防安全，為了讓一般使用者，不要達到太高的精度，而加上的一種保護(Anti-Spoof，AS)措施，除非是經過特別的允許，否則極難解碼接收。例如：Y-code 即是一例。另一種人為的干擾則來自抖動(Dithering)衛星時鐘之頻率，此誤差稱為亂碼干擾誤差(Selective Availability，S/A)，已於 2000 年 5 月 2 日宣佈取消，但仍會不定期對某些地區實施干擾。

2.4 慣性導航系統簡介

慣性導航系統 (Inertial Navigation System，INS) 於 1950 年開發完成，是一個高性能、獨立自主性的導航系統。它是利用地球的慣性重力運作的電子導航系統，不受天候、距離，也不受外來的干擾，而且，不需借助外來的資料，只靠本身之慣性組件(Inertial-Components)即可完成。它是由陀螺儀 (Gyroscope) 和加速儀 (Accelerometer) 等感測器所構成，可裝在載具上，用來測量載具運動狀態，而根據載具的角速度和線性加速度隨時間的變化資料，再利用系統的導航計算機來運算，就可以即時 (Real-Time) 得知載具於慣性座標系統之導航資料如位置、速度和姿態。

慣性導航系統優於其他導航系統，可歸納出下列幾項優點【1】：

- (1) 可即時，連續地送出位置及速度的訊息。
- (2) 為一自給式系統，因此無電磁波輻射，不受敵人及外在環境的干擾。
- (3) 任何氣候、任何位置（在任一經緯度，包括極區）均能得到導航資料。
- (4) 其他如都卜勒導航及全球定位系統都會因加速度太大而脫鎖。
- (5) 慣性導航系統可提供位置、對地速度、航向及高度等，是載具量測航向、高度與位置最好的方法。

慣性導航系統亦有下列的缺點：

- (1) 無論載具是靜止或運動的狀態下，其位置與速度的誤差，會隨時間的增加而發散。
- (2) 精度高的設備價格十分昂貴，維修比較困難。
- (3) 起始值之正確性，直接而嚴重地影響慣性導航系統的精度，尤其是初始之方位，確有失之毫厘差之千里的影響，因此初始校正非常重要。但若緯度超過 75 度，則精確度會降低。

2.5 陀螺儀姿態模組系統架構【3、8】

陀螺儀姿態模組系統的理論基礎是依據，牛頓（Newton）於 18 世紀所提出的力學三大定律，一般將陀螺儀整合系統分為兩大類，其

一是穩定平台系統 (Stabilized Platform System)，簡稱「環架系統」，其二是固裝系統 (Strap-Down System)【4、16】。

本研究是使用為固裝系統。其原理是將陀螺儀直接固裝於載具上，由陀螺儀直接量測載具之角速度，經由計算機的運算，求出瞬時載具對慣性座標的關係，進而計算出載具運動的姿態變化，以作為導航參考之用。它的優點有：結構簡單成本低，容易安裝，且少了環架機構的磨損與磁場效應。但因陀螺儀等隨著載具運動，會產生不少的誤差，且座標的轉換是以陀螺儀量到之數值為參考值，因此對陀螺儀之要求是在一寬頻的輸入範圍內，操作須為線性。且固裝式系統對電腦、計算器的要求也特別高，因其需利用即時計算器來計算龐大的 DCM (Direction Cosine Matrix)。目前因計算機技術大有進步，所以使用固裝式者居多。

一般就精度而言，「環架系統」比「固裝系統」為佳，且環架式的陀螺儀比較不受外界環境的影響，可作較長時間的使用。但不管如何，任何陀螺儀整合系統之誤差皆有，隨工作時間增加而發散的先天缺點。不過，就陀螺儀整合系統而言，由於其在高頻響應的特性良好，所以可在較短的工作時間及高動態的環境下，即時的提供較正確的位置、速度和姿態的變化資料，達到即時導航的目的。

2.6 陀螺儀姿態模組的運算流程及步驟【3、16、17】

陀螺儀姿態模組主要是由三個陀螺儀所組成，其安裝方式是以右手定則的三個方向，如圖 2.6 所示，互相垂直排列，所以系統共有 3 個感測軸。當載具運動時，在載具上的陀螺儀會立刻提供三個軸向的角速度資料。以這些資料再加上輸入的初始姿態等參考資料，經過計算機的運算之後，就可以求出載具目前所在姿態。

陀螺儀姿態模組的計算過程為下列幾個步驟：

- (a) 設定初使滾轉角 (Roll)、俯仰角 (Pitch) 及偏航角 (Yaw)，並計算對應四元素的初始值。將這些姿態角轉換成四元素

(Quaternion) 的主要目的是預防 \cos 、 \sin 在某些角度時的值為零，若又出現在分母，將導致一個無窮大的值，造成系統發散。

四元素與初始姿態角之關係如下：

$$q_1 = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (2-1)$$

$$q_2 = -\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (2-2)$$

$$q_3 = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (2-3)$$

$$q_4 = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (2-4)$$

其中 ϕ, θ, ψ 分別為初始滾轉角、俯仰角及偏航角

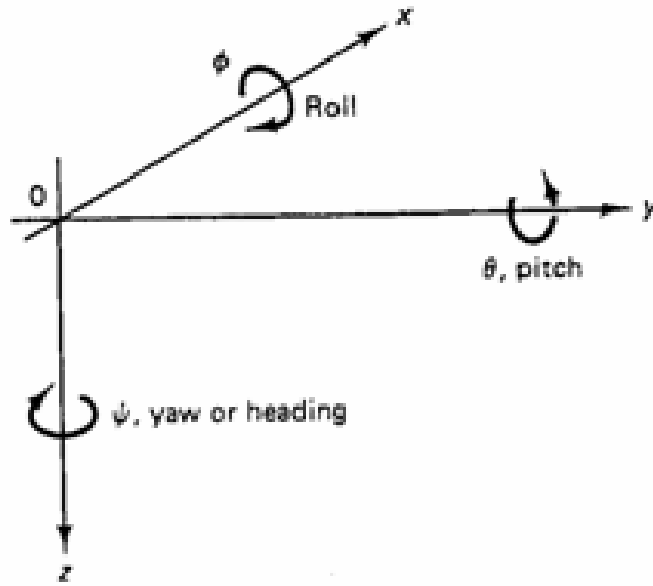


圖 2.6 滾轉 (Roll)，俯仰 (Pitch)，偏航 (Yaw) 各角度之示意圖

(b) 取得陀螺儀之量測值

系統每隔 0.3 m sec 時，依序讀取陀螺儀 1，2，3（或加速儀 1，2，3）之量測值，讀取一次完整的資料共需 1.8 m sec 。

(c) 將四元素作正常化 (Normalization) 運算

依理論四元素值有下列關係，

$$q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1 \quad (2-5)$$

但由於計算次數的增加，而產生的截位誤差 (Truncation error)

和捨位誤差 (Round-off) 將使得式 (2-5) 不滿足，所以計算一

段時間後須再對四元素做正常化，以免誤差擴大。方法如下，

令

$$d^2 = q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1 - E \quad (2-6)$$

$$q'_i = q_i/d = q_i/\sqrt{1-\epsilon} \approx q_i(1+\frac{1}{2}\epsilon) = q_i(\frac{3}{2}-\frac{1}{2}d^2) \quad (2-7)$$

q'_i 即為正常化後之四元素值

(d) 四元素值經過正常化之後，可套用 Runge-Kutta 積分法來對

q_1, q_2, q_3, q_4 求取其積分 $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4$ ，可得知下一時刻的 q_1, q_2, q_3, q_4 。

$$\dot{q}_1 = -\frac{1}{2}(q_2 p + q_3 q + q_4 r) + k \in q_1 \quad (2-8)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{2}(q_1 p - q_4 q + q_3 r) + k \in q_2 \quad (2-9)$$

$$\dot{q}_3 = \frac{1}{2}(q_4 p + q_1 q - q_2 r) + k \in q_3 \quad (2-10)$$

$$\dot{q}_4 = \frac{1}{2}(-q_3 p + q_2 q + q_1 r) + k \in q_4 \quad (2-11)$$

p, q, r 為陀螺儀量側的角加速率， k 為一大於零之常數，通常等於 100。

(e) 將姿態由載具 (Body) 座標，轉換至切面 (Tangent Plane) 座標先輸入載具角速率、地球轉速補償值，經計算而得到四元素值。

姿態微分方程式為

$$\dot{q}_b^t = \frac{1}{2} q_b^t \omega_{ib}^b = \frac{1}{2} q_b^t \omega_{ib}^b - \frac{1}{2} q_b^t \omega_{ii}^b \quad (2-12)$$

$\omega_{ii}^b = \omega_{ie}^b$ 表地球轉速，式 (2-12) 右側之第二項為地球轉速補償，

若載具在地球表面，則不需補償時，可使用式 (2-13)

$$\dot{q}_b^t = \frac{1}{2} q_b^t \omega_{ib}^b \quad (2-13)$$

式 (2-13) 的解可寫為

$$\begin{aligned}
q(t + \Delta t) &= q(t)P(t, \Delta t) \\
&= (q_1(t) + \bar{i}q_2(t) + \bar{j}q_3(t) + \bar{k}q_4(t))(P_1 + \bar{i}P_2 + \bar{j}P_3 + \bar{k}P_4) \quad (2-14)
\end{aligned}$$

其中 Δt 為每次中斷的時間，而 P_1, P_2, P_3, P_4 的求法如下：

$$S = \Delta\theta_x^2 + \Delta\theta_y^2 + \Delta\theta_z^2 \quad (2-15)$$

$$P_1 = 1 - S/8 \quad (2-16)$$

$$P_2 = \Delta\theta_x \times (1/2 - S/48) - (\Delta\theta_y \Delta\theta_z^* - \Delta\theta_z \Delta\theta_y^*)/24 \quad (2-17)$$

$$P_3 = \Delta\theta_y \times (1/2 - S/48) - (\Delta\theta_z \Delta\theta_x^* - \Delta\theta_x \Delta\theta_z^*)/24 \quad (2-18)$$

$$P_4 = \Delta\theta_z \times (1/2 - S/48) - (\Delta\theta_x \Delta\theta_y^* - \Delta\theta_y \Delta\theta_x^*)/24 \quad (2-19)$$

其中 $\Delta\theta_x^*, \Delta\theta_y^*, \Delta\theta_z^*$ 為陀螺儀之前一次中斷時間內的角度增量。

其次計算轉換後之四元素值：

$$q_1(t + \Delta t) = q_1(t)P_1 - q_2(t)P_2 + q_3(t)P_3 - q_4(t)P_4 \quad (2-20)$$

$$q_2(t + \Delta t) = q_1(t)P_2 + q_2(t)P_1 + q_3(t)P_4 - q_4(t)P_3 \quad (2-21)$$

$$q_3(t + \Delta t) = q_1(t)P_3 - q_2(t)P_4 + q_3(t)P_1 + q_4(t)P_2 \quad (2-22)$$

$$q_4(t + \Delta t) = q_1(t)P_4 + q_2(t)P_3 - q_3(t)P_2 + q_4(t)P_1 \quad (2-23)$$

(f) 由新的四元素更新資料及求出載具姿態

由式(2-20~23)可求得轉換後之載具滾轉角、俯仰角及偏航角。

$$\theta = \sin^{-1}(-2(q_2q_4 - q_1q_3)) \quad (2-24)$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{2(q_2q_3 + q_1q_4)}{2(q_1^2 + q_2^2) - 1}\right) \quad (2-25)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2(q_3q_4 + q_1q_2)}{2(q_1^2 + q_4^2) - 1}\right) \quad (2-26)$$

2.7 陀螺儀姿態模組整合系統之誤差分析

陀螺儀誤差，是影響慣性導航系統性能和精度主要來源，一般而言，其誤差可分為四大部份【3】：

(1) 靜態誤差 (Static Errors)：

此類誤差是因為載具加速度、及工作環境溫度所造成之有感性漂移誤差 (G and Temperature Sensitivity Drift)、比例因子 (Scale Factor) 誤差、以及原差 (Bias) 等等，這些誤差皆可以不斷的測試與統計，而由程式予以修正。

(2) 因運動而造成之誤差 (Motion Induced Error)：

由於運動因素會受力，因而會造成誤差的產生，這些誤差可以經過事先的計算，而予以修正。

(3) 假性角錐誤差 (Pseudo-Coning Error)：

若積分陀螺儀在兩個軸向做相同頻率之角運動時，則其第三軸將會產生一定值角速度輸出。同樣的，若系統之兩個軸向同時以相同頻率振動，則系統亦將在第三軸向輸出定值角速率。此外陀螺儀之輸出軸向作角加速度運動，而與其任一軸向之振動頻率為同一頻率時，亦將產生系統之假性輸入角速率，此即假性角錐誤差，這種現象在固裝式導航系統中極為明顯，必須妥善處理。

(4) 零亂誤差 (Random Errors)：

此類誤差形成的原因不明，並無一定的規則，是自然存在的現象，多以統計的方式加以估計，一般看成白色雜訊（White Noise）。

了解以上四項誤差後，可經過不斷的實驗與統計，並將一些已知的定性及定量因素先行除去，如零亂漂移（Random Walk）、隨意原差（Random Bias）等，再利用統計的方法來求其結果，可由下列的一階馬可夫模式來表示。

$$\begin{aligned} \delta \dot{X}_{GYRO} &= A_{GYRO} \delta X_{GYRO} + \omega_{GYRO} \\ E\{\delta \omega^2(0)\} &= \sigma_G^2 \end{aligned} \quad (2-27)$$

其中： $A_{GYRO} = -\frac{1}{\tau_G}$

τ_G ：零亂誤差之時間常數(Time Constant)

ω_{GYRO} ：白色雜訊(White Noise)

其功率頻譜密度（Power Spectrum Density）定義如下

$$Q_{GYRO} = \sqrt{\frac{2\sigma_G^2}{\tau_G}} \quad (2-28)$$

σ_G ：陀螺儀的均方根 (rms) 誤差

若同時考慮三個軸向，則其狀態方程式可合併表為：

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{\omega}_{vx} \\ \delta \dot{\omega}_{vy} \\ \delta \dot{\omega}_{vz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/\tau_{Gx} & 0 & 0 \\ 0 & -1/\tau_{Gy} & 0 \\ 0 & 0 & -1/\tau_{Gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \omega_{vx} \\ \delta \omega_{vy} \\ \delta \omega_{vz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2\sigma_{Gx}^2}{\tau_{Gx}}} \omega_x(t) \\ \sqrt{\frac{2\sigma_{Gy}^2}{\tau_{Gy}}} \omega_y(t) \\ \sqrt{\frac{2\sigma_{Gz}^2}{\tau_{Gz}}} \omega_z(t) \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

一般而言，其統計的數值大小為：

$$\text{環架式陀螺儀} \quad \sigma_G^2 = \left(0.01 \frac{\text{deg}}{\text{hr}}\right)^2, \quad \tau_G = 2 \text{hrs}$$

$$\text{固裝式陀螺儀} \quad \sigma_G^2 = \left(1.0 \frac{\text{deg}}{\text{hr}}\right)^2, \quad \tau_G = 5 \text{min}$$

2.8 尤拉角簡介

靜態的定義

對於在三維空間裏的一個參考系，任何座標系的取向，都可以用尤拉角來表現。參考系又稱為實驗參考系，是靜止不動的。而座標系則固定於剛體，隨著剛體的旋轉而旋轉。設定 xyz 軸為參考系的參考軸，xy 平面與 XY 平面的相交為交點線。尤拉角可以這樣定義：

ϕ 是 x 軸與交點線的夾角（也可以是 α ）

θ 是交點線與 X 軸的夾角（也可以是 β ）

φ 是 z 軸與 Z 軸的夾角（也可以是 γ ）

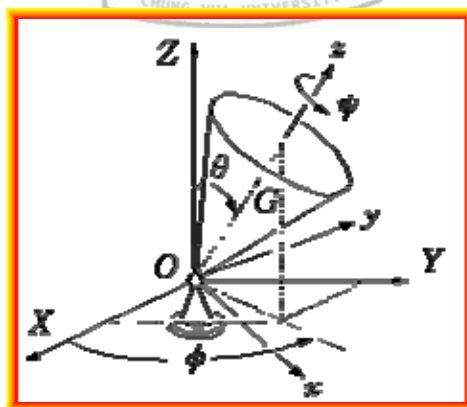


圖 2.7 尤拉角的示意圖

很可惜地，對於夾角的順序和標記，夾角的兩個軸的指定，並沒有任何常規。科學家對此從未達成共識。每當用到尤拉角時，我們必須明確的表示出夾角的順序，指定其參考軸。

實際上，有許多方法可以設定兩個座標系的相對取向。尤拉角方法只是其中的一種。此外，不同的作者會用不同組合的尤拉角來描述，或用不同的名字表示同樣的尤拉角。因此，使用尤拉角前，必須先做好明確的定義。

旋轉矩陣

前面提到，設定剛體取向的旋轉矩陣[R]是由三個基本旋轉矩陣合成的：

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

它們是單獨分開作用，每個矩陣各自代表繞著其轉動軸的旋轉；但是，當它們照次序相乘，最裡面(最右)的矩陣代表繞著 z 軸的旋轉。最外面(最左)的矩陣代表繞著 Z 軸的旋轉。在中間的矩陣代表繞著交點線的旋轉。[R]經過一番運算後可得：

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \beta \cos \alpha \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma \\ -\cos \alpha \sin \gamma - \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \beta \cos \alpha \cos \gamma & \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & \cos \beta \end{bmatrix}$$

[R]的逆矩陣是：

$$[\mathbf{R}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma - \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma & \sin \beta \sin \alpha \\ \sin \alpha \cos \gamma + \cos \beta \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \beta \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \beta \cos \alpha \\ \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \end{bmatrix}$$

動態的定義

我們也可以給予尤拉角兩種不同的動態定義。一種是繞著固定於剛體的座標軸的三個旋轉的複合；另外一種是繞著參考軸的三個旋轉的複合。用動態的定義，我們能更了解，尤拉角在物理上的含義與應用。特別注意，以下的描述，XYZ 座標軸是旋轉的剛體座標軸；而 xyz 座標軸是靜止不動的參考軸。

(1) 繞著 XYZ 座標軸旋轉：最初，兩個座標系統 xyz 與 XYZ 的座標軸都是重疊著的。開始先繞著 Z 軸旋轉角值。然後，繞著 X 軸旋轉角值。最後，繞著 Z 軸作角值的旋轉。

(2) 繞著 xyz 座標軸旋轉：最初，兩個座標系統 xyz 與 XYZ 的座標軸都是重疊著的。開始先繞著 z 軸旋轉角值。然後，繞著 x 軸旋轉角值。最後，繞著 z 軸作角值的旋轉。

定義 1 與定義 2 的相等可以用旋轉矩陣來證明：

思考任何一點 P1，在 xyz 與 XYZ 座標系統的坐標分別為 r_1 與 R_1 。

定義角為繞著 Z 軸旋轉角值。那麼，定義 1 可以表述如下：

$$R_1 = Z(\gamma) \circ X(\beta) \circ Z(\alpha) \circ r_1。$$

用旋轉矩陣表示：

$$Z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$X(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$Z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

思考任何一點 P2，在 xyz 與 XYZ 座標系統的座標分別為 r2 與 R2。

定義角為繞著 z 軸旋轉角值。則定義 2 可以表述如下：

$$\mathbf{r}_2 = z(\alpha) \circ x(\beta) \circ z(\gamma) \circ \mathbf{R}_2。$$

用旋轉矩陣表示：

$$z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$x(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

假設， $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2$ 。那麼，

$$\mathbf{r}_1 = z(\alpha) \circ x(\beta) \circ z(\gamma) \circ \mathbf{R}_2。$$

乘以反矩陣，

$$z^{-1}(\gamma) \circ x^{-1}(\beta) \circ z^{-1}(\alpha) \circ \mathbf{r}_1 = z^{-1}(\gamma) \circ x^{-1}(\beta) \circ z^{-1}(\alpha) \circ z(\alpha) \circ x(\beta) \circ z(\gamma) \circ \mathbf{R}_2$$

但是，從旋轉矩陣可以觀察出，

$$z^{-1}(\alpha) = Z(\alpha) ,$$

$$x^{-1}(\beta) = X(\beta) ,$$

$$z^{-1}(\gamma) = Z(\gamma) .$$

所以，

$$Z(\gamma) \circ X(\beta) \circ Z(\alpha) \circ \mathbf{r}_1 = \mathbf{R}_2 ,$$

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2 .$$

定義 1 與定義 2 是相等的。



第三章 數位訊號處理器

3.1 數位訊號處理器簡介

數位化是近代科技一個很重要的趨勢與成就，數位化能讓系統可靠性、精確度皆提高、提升抗干擾能力、可程式規劃、便於維護、及容易模組化等優點，這些優點可以改進以往類比系統的限制。數位訊號處理技術，是因應數位化的需求而發展出來的。隨著數位積體電路技術的發展，把數位訊號處理技術的核心程式也植入矽晶片中，通用型數位訊號處理器（Digital Signal Processor，DSP）也發展出來，使得數位訊號處理的操作效率越來越高，價格也越來越低廉。

隨著演算法與硬體的日漸複雜化，傳統的單晶片如 8051（最快 40MHz）、及 Peripheral Interface Controller（PIC）等，已經無法達到使用者在速度及運算上的需求。但是如果想要設計 ASIC 或是 FPGA 晶片，則遇到設計、測試與製造時間較長的問題。再加上目前 DSP（Digital Signal Processor）編譯除錯軟體的成熟，使得 DSP 的使用，變成了一條更方便、快速且準確的可行之道。

1982 年，德州儀器公司（Texas Instrument，TI）發表了 TMS320 系列中，第一顆定點（Fixed Point）運算的數位訊號處理器。自最初的 DSP TMS320C10 以來，到目前為止，TI 又先後推出了 C10、C20、C30、C40、C50、C60 等，6 代 TMS320 系列的 DSP 產品。接著又推

出 C2000、C5000 和 C6000 等系列產品。而其在市場上佔有百分之四十以上的比例，TI 公司推出的 TMS320 系列，是目前世界上最有影響的主流 DSP 產品之一，都顯示出 TI 在 DSP 領域上，扮演著舉足輕重的角色。圖 3.1 說明，TI 的 TMS320 DSP 系列發展史示意圖。

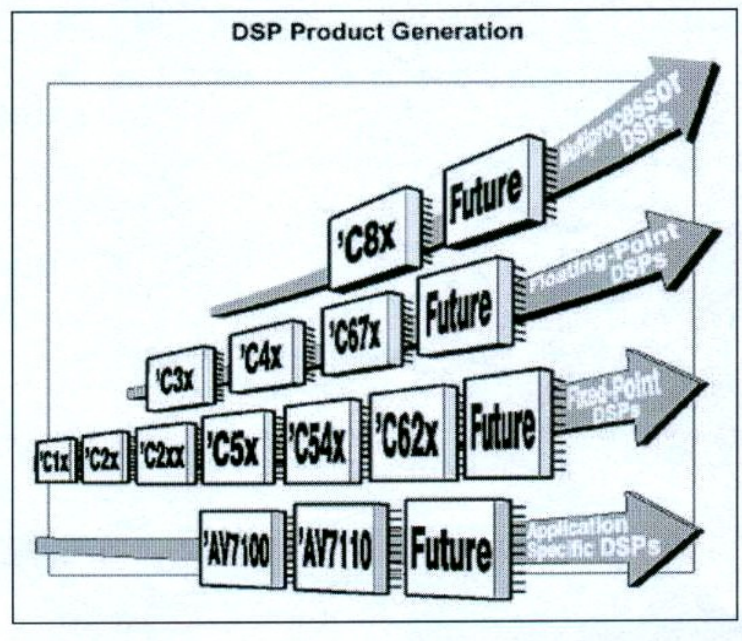


圖 3.1 TI 的 TMS320 DSP 系列發展史示意圖

由圖 3.2 說明 TMS320 各系列，特有功能及分類。TI DSP TMS320 系列是由定點、浮點，及多 CPU 核心的數位信號處理器所組成。

TMS320 是針對即時信號處理而設計，具備許多優點【18】，如：

- (1) 非常有彈性的指令集 (Instruction Set)
- (2) 保有操作上的靈活性
- (3) 高速的性能
- (4) 創新的管線接力式作業 (Pipeline)

(5) 合乎經濟效益

(6) 和 C 語言一樣，使設計者感到有親切感的架構

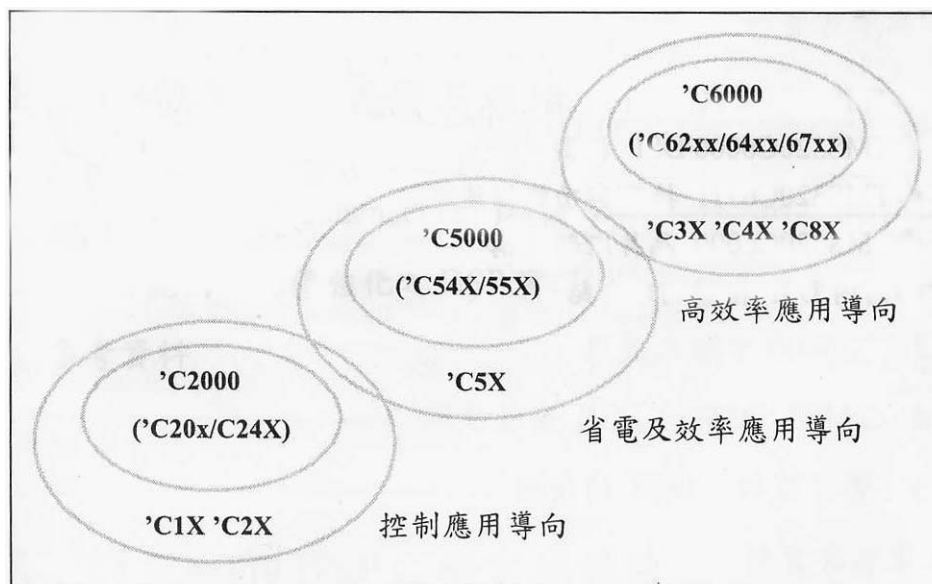


圖 3.2 TMS320 各系列的特有功能及分類示意圖

3.2 DSP 系統整合應用

DSP 不只是單晶片，而是結合了控制與快速數學運算處理能力，使得 DSP 達到即時的處理速度，在應用上更廣泛。而將訊號數位化的另一個好處是可以非常容易的改變、處理、壓縮和傳輸。

數位訊號除了具有高品質、抗雜訊及準確的傳訊特性外，最重要的是可以作數位化的處理，如聲音、影像、文字和資訊等壓縮和整合。如今，數位訊號處理器擁有高速及高效能的處理能力，數位訊號處理器也已經被廣泛應用至機械、電子、電機等各領域之中【19】，如：

(1) 通訊應用：

資料密碼、數位語音、數位接收機、數據機、行動通訊、編/

解碼器、雜訊對消、電視會議、高速調變解調、ISDN、ADSL、CDMA、W-CDMA、T1、E1、ATM 等。

(2) 電腦應用：

2D/3D 圖形加速器、虛擬實境、影像處理、多媒體、神經網路、硬碟機、印表機、D3D、DVD、DVR 等。

(3) 工業控制：

機器人控制、數值控制、資料存取、噪音消除、伺服馬達控制、UPS 等。

(4) 消費電子：

數位答錄機、音樂合成器、玩具與遊樂器、數位音響/電視、語音辨識、HDTV、數位相機、保全監控、MP3、PDA、電子書、伴唱機等。



(5) 軍事應用：

加密/解密通信、雷達與聲納信號處理、雷達偵測、導向飛彈控制、導航等。

(6) 航太工業：

遠端設備控制、遙控測試、無人駕駛飛機、航空照相、衛星通訊等。

(7) 醫學應用：

電腦斷層攝影、磁核共振影像、X-光射線斷層掃描、超音波設備、生理信號監視、助聽器、胎兒監視等。

以下介紹 DSP 整合系統的應用：

(1) 馬達控制應用：

交直流馬達、伺服馬達、步進馬達、線性馬達、壓電陶瓷馬達 (Piezo)、致動器、CNC、放電加工、雕刻機、機器人、電動車、自動測試系統、半導體設備、X-Y 平台、飛行模擬器、飛機及飛彈導航系統、儀器量測等，所需的設備有馬達及驅動器、光學尺、磁力尺、滾珠導螺桿、手輪、極限開關、耦合器、位置顯示器。例如平台機構之馬達控制應用方塊，如圖 3.3 所示。

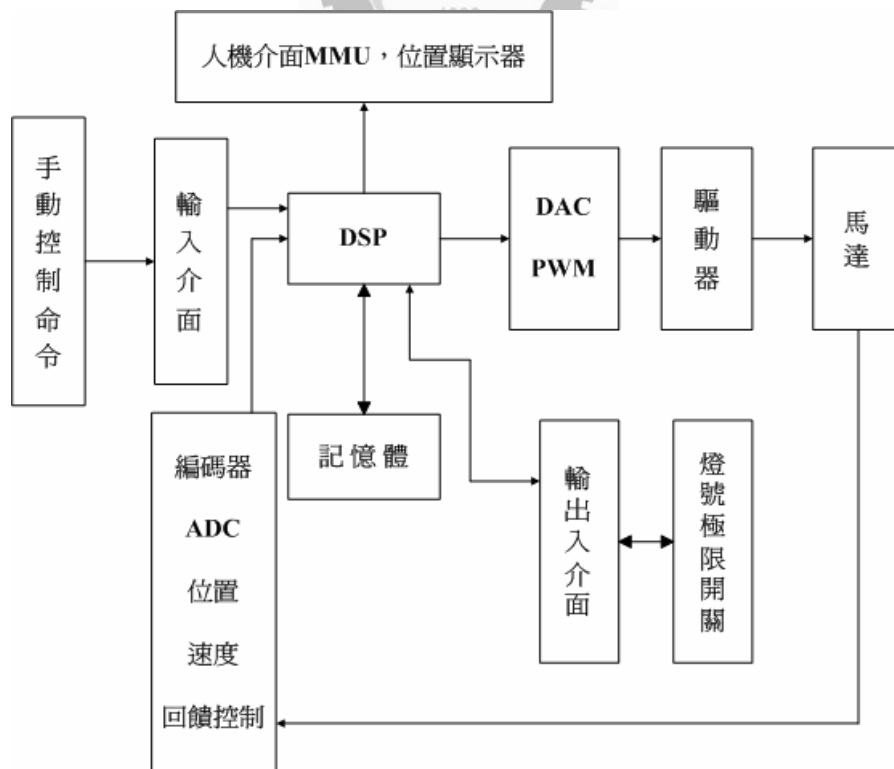


圖 3.3 DSP 模組與平台機構馬達控制應用方塊圖

(2) 語音應用：

在語音應用方面有：語音分析/合成、語音辨識、聲紋辨識、加密/解密、T.T.S (Text to Speech)，多通道語音監聽/錄音等，所需的設備有麥克風、前置放大器、功率放大器、喇叭、語音記錄器、語音聲紋顯示器等。DSP 模組之語音應用方塊，如圖 3.4 所示。

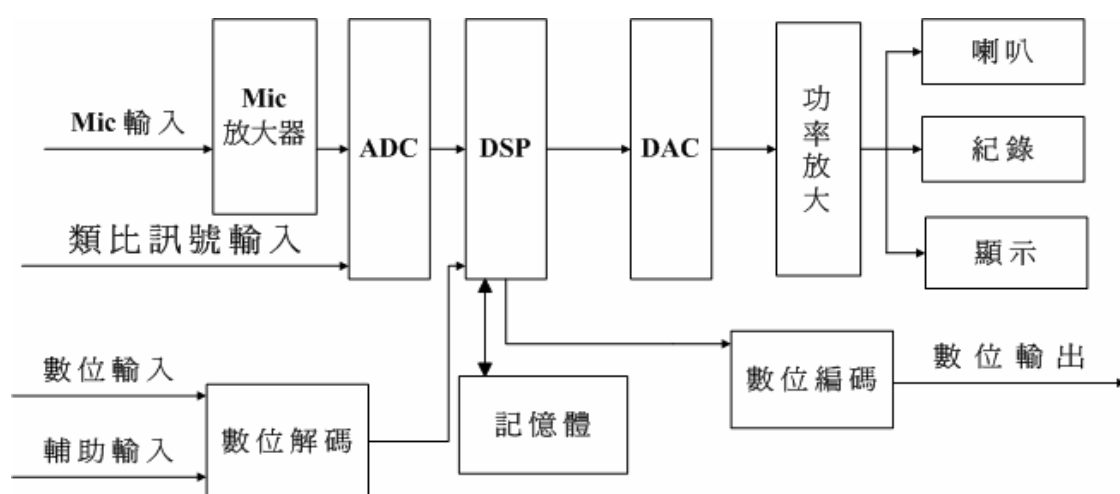


圖 3.4 DSP 模組之語音應用方塊圖

(3) 通訊應用：

在通訊應用方面有：加密/解密、T1/E1、ATM、廣播通訊、蜂巢式電話、CDMA、ADSL、I-Phone、Video Phone、Digital Radio、衛星通訊、Modem、視訊會議系統、電話語音秘書、雷達/聲納系統等，所需的設備有麥克風、前置放大器、功率放大器、喇叭、頻譜分析儀、信號記錄器、信號顯示器、高頻收發機、數據機、昇頻器、降頻器、高頻信號產生器等。DSP 模組之通訊應用方塊，如圖 3.5 所示。

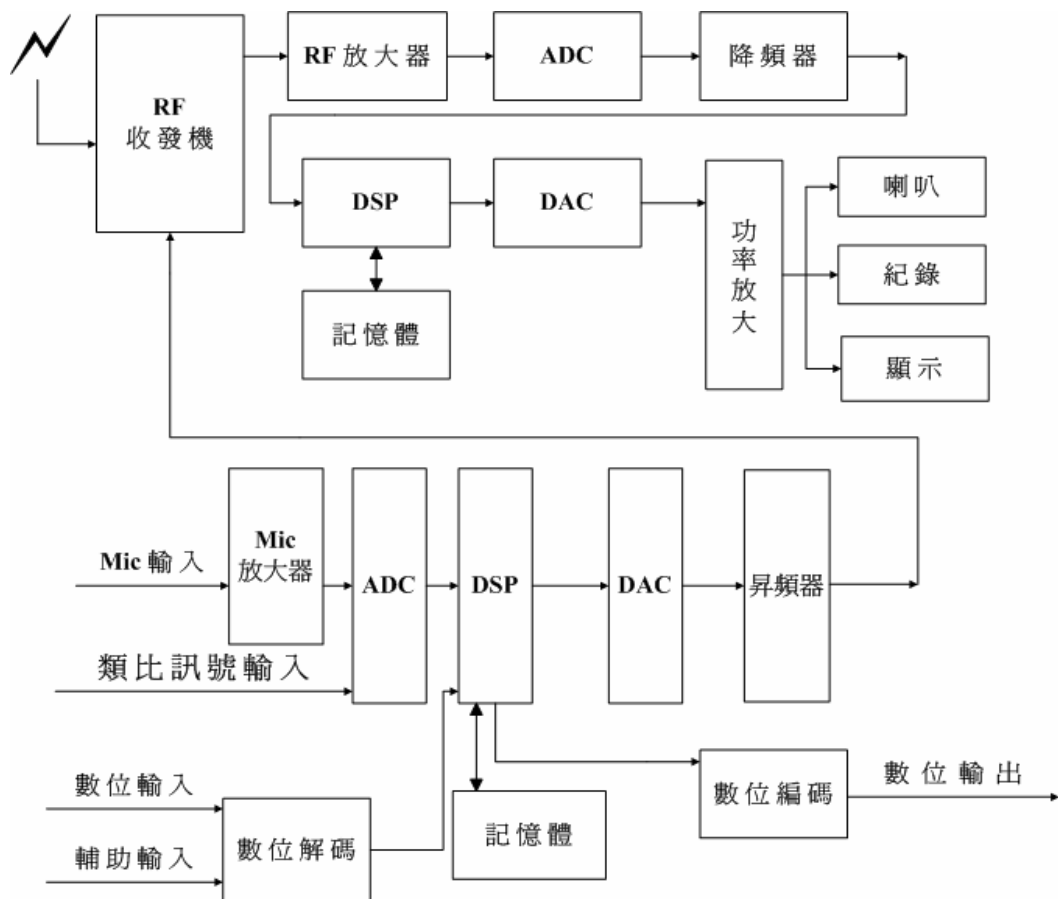


圖 3.5 DSP 模組之通訊應用方塊圖

(4) 影像應用：

在影像應用方面有：影像辨識、影像瑕疵檢測 (PCB 板、銅板、木材、隧道壁)、影像傳送、醫學影像、X 光片儲存、生理影像監測、指紋辨識、虛擬影像、3D 圖形、飛行模擬、數位相機等，所需的設備有攝影機、鏡頭、各式倍率鏡頭、偏光鏡、濾光鏡、影像顯示器、影像儲存器等。DSP 模組之影像應用方塊，如圖 3.6 所示。

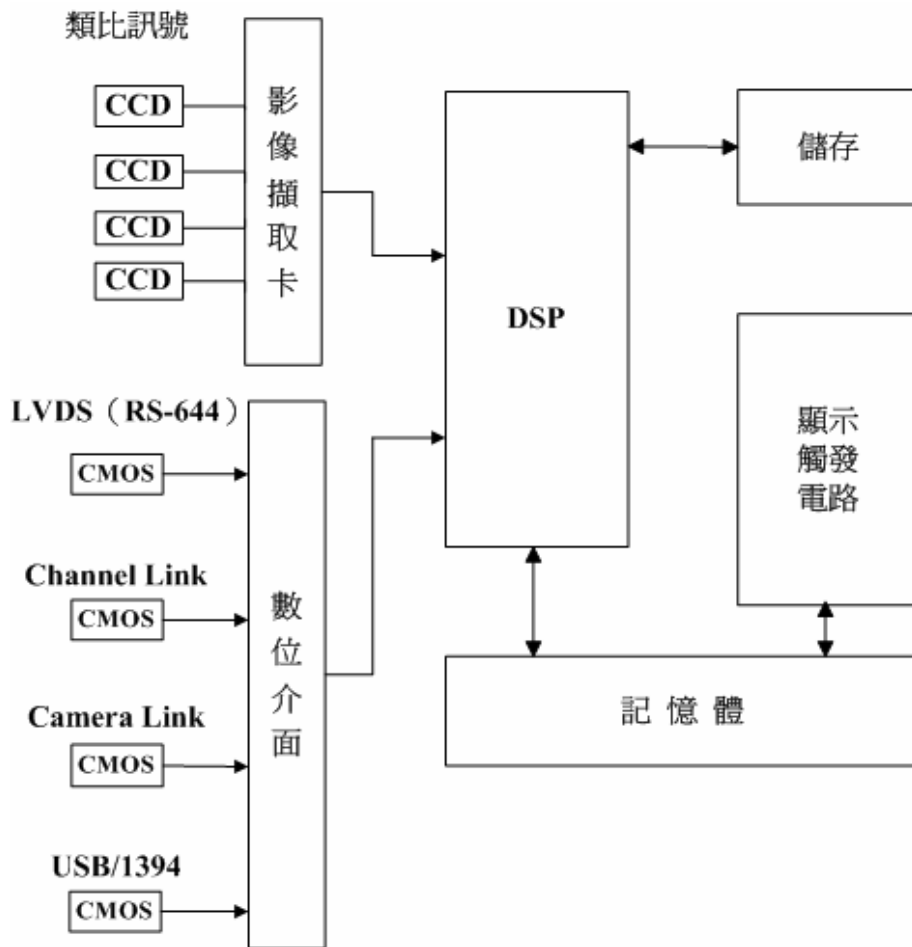


圖 3.6 DSP 模組之影像應用方塊圖

(5) 電力監測控制系統：

電力監測控制系統普遍應用於半導體工廠、動力火車、捷運及大電力需求之單位，為求電力傳送品質佳、使用品質好及節省電量需求之目的因此適當的控制及監測便能達到上述的要求，一般的控制監測的內容大多以電壓、電流、諧波、頻率、效率為主，所需的設備有電流感測器、電壓感測器、開關電路、顯示電路等。DSP 模組之電力監測控制系統方塊，如圖 3.7 所示。

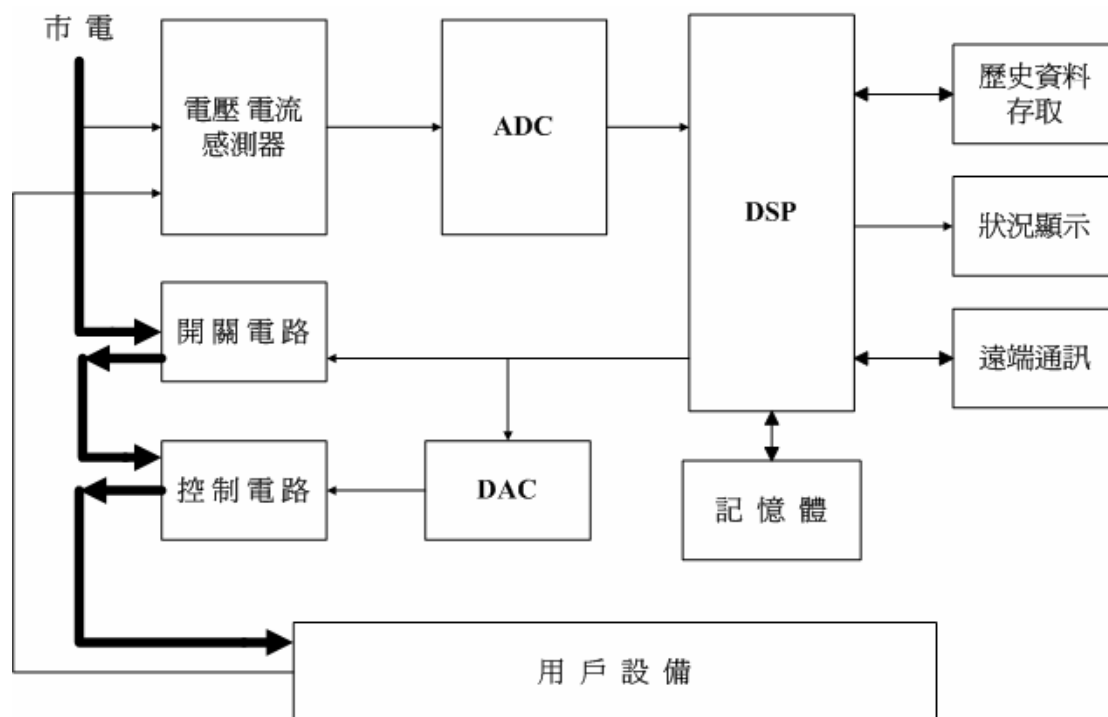


圖 3.7 DSP 模組之電力監測控制系統方塊圖

3.3 TI TMS320F2812 晶片簡介

TMS320F281x 系列 DSP（數位訊號處理器）為 TI 所開發的數位訊號處理器，此系列處理器為定點運算的數位訊號處理器。F2812 上的代碼及指令，與 F24x 系列數位訊號處理器完全相容，因此確保了產品設計的可延續性。與 F24x 數位訊號處理器比較，F281x 數位訊號處理器提高了運算的精度（32 位元）及系統的處理能力（高達 150MIPS）。

以下簡述此晶片的重要特性【20、21】：

- （1）TMS320F281x DSP 使用高性能的 CMOS 技術，其時脈數高達 150MHz（周期時間為 6.67ns）。
- （2）支援 JTAG 介面。
- （3）高性能的 32 位元 CPU，內部有 16×16 位元及 32×32 位元的乘法累

加操作、 16×16 位元的雙乘法累加器。具有快速中斷響應與處理能力。擁有4MB的程序/數據位址空間 (Program/Data Address Reach)，且支援C/C++與組合語言，與TMS320F24x/F240x系列的數位訊號處理器相容。

- (4) 晶片內部記憶體 (On-Chip Memory)，最多達 $128K \times 16$ 位元 (F2812) 的FLASH存儲器； $128K \times 16$ 位元的ROM； $1K \times 16$ 位元的OTP ROM；L0、L1各為 $4K \times 16$ 位元的SARAM (Single-Access RAM)；H0為 $8K \times 16$ 位元的SARAM；M0、M各為 $1K \times 16$ 位元的SARAM。

- (5) 串列通訊埠週邊 (Serial Port Peripherals)，配置有串列通訊週邊界面 (SPI)，兩組UART標準定義串列通訊界面 (Serial Communications Interface, SCI)，增強控制區域網路 (Enhanced Controller Area Network, eCAN)，及多通道緩衝串列通訊埠 (Multichannel Buffered Serial Port, McBSP)。

- (6) 時脈和系統控制 (Clock and System Control)，支援動態相位鎖定迴路 (Phase-Locked Loop, PLL) 的倍頻係數，且具有看門狗定時模組。

- (7) 具有三個外部中斷。週邊中斷擴充模組 (Peripheral Interrupt Expansion, PIE)，可支援45個週邊中斷。計時器的部份，則有

三個32位元的CPU計時器。

(8) 12位元16通道類比/數位轉換模組 (12-Bit ADC, 16 Channels)，

為2×8通道多工輸入，可單獨或同時進行通道轉換，於12.5MHz

下最高轉換速率為80ns。

(9) 高達56個可配置用的I/O接腳 (General Purpose I/O, GPIO)。

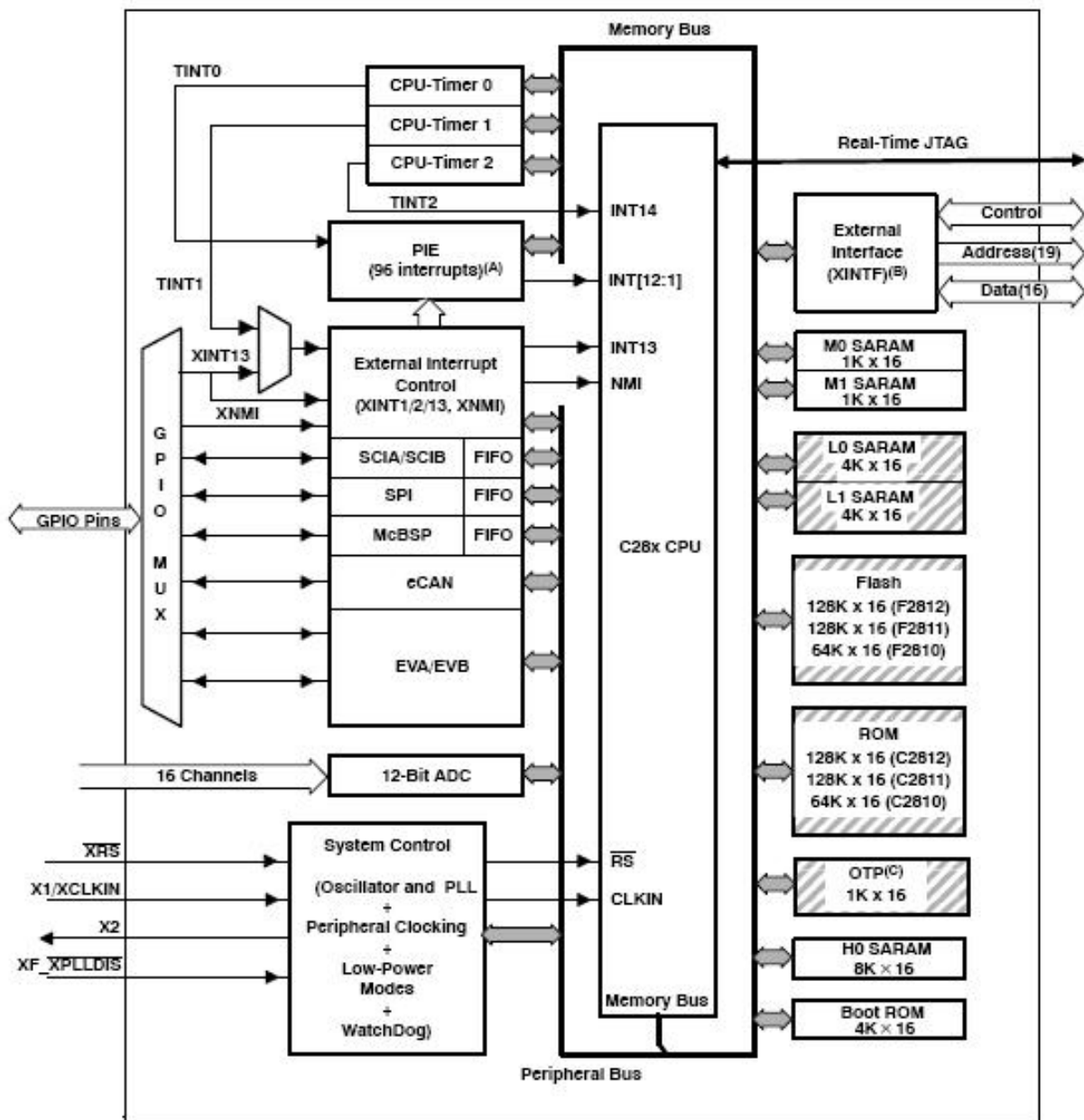


圖3.8 TMS320F281x系列DSP功能方塊圖

3.4 eZdsp F2812 【20】

eZdsp F2812為Spectrum Digital所推出的發展板，為一低價位、容易使用操作的DSP發展板，架構於TMS320F2812定點運算處理器上，150MHz的工作頻率，工作週期時間為6.67ns。eZdsp F2812以平行並列埠介面或是透過JTAG，作為與PC溝通的橋樑，進行DSP程式的模擬與除錯。圖3.9為eZdsp F2812週邊連接埠配置圖。表3.1為各連接埠界面配置圖。

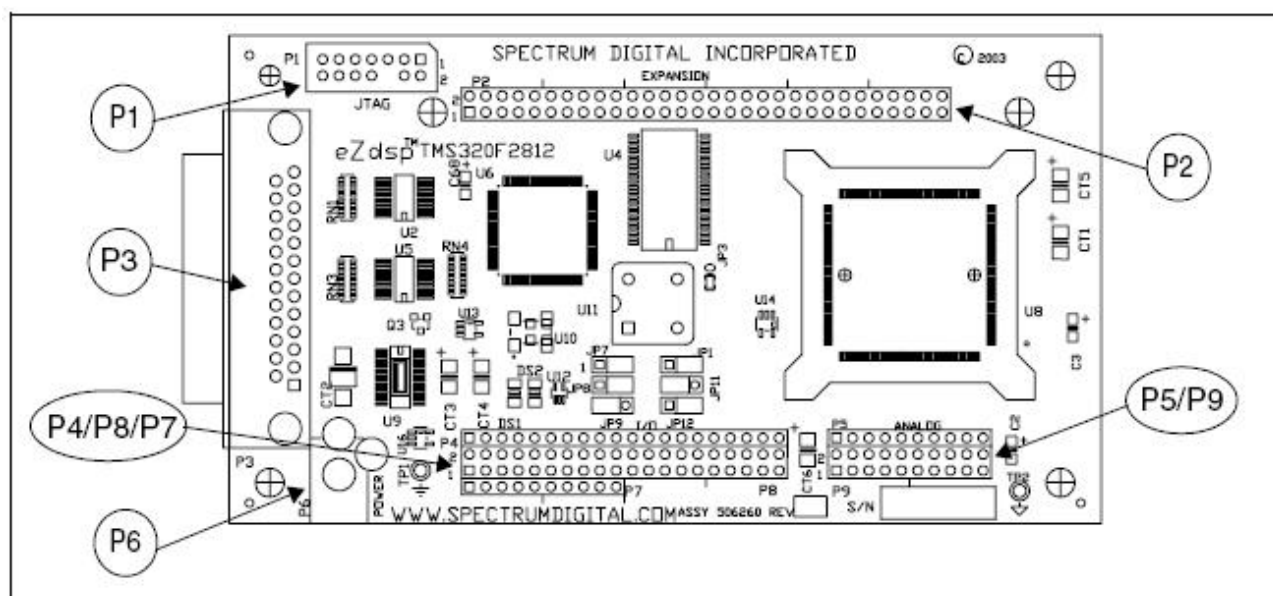


圖3.9 eZdsp F2812週邊連接埠界面配置圖

表3.1 各連接埠界面配置定義表

Connector	Function
P1	JTAG Interface
P2	Expansion
P3	Parallel Port/JTAG Controller Interface
P4/P8/P7	I/O Interface
P5/P9	Analog Interface
P6	Power Connector

P1, JTAG 界面 (Joint Test Action Group Interface, JTAG Interface)

P1 為 F2812 的 JTAG 連接埠，可提供 PC 與 DSP 溝通的橋樑，經由 JTAG 可於 PC 進行模擬與除錯。JTAG 埠有 14 個接腳，如圖 3.10，接腳配置可參照表 3.2。

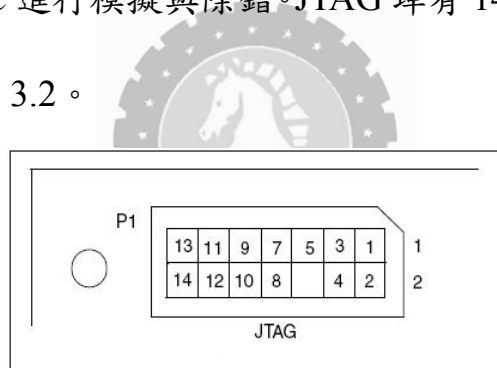


圖 3.10 JTAG 接腳圖

表 3.2 JTAG 接腳配置表

Pin #	Signal	Pin #	Signal
1	TMS	2	TRST-
3	TDI	4	GND
5	PD (+5V)	6	no pin
7	TDO	8	GND
9	TCK-RET	10	GND
11	TCK	12	GND
13	EMU0	14	EMU1

TI 的 JTAG 埠使用了 5 個標準定義的 IEEE1149.1 信號：TCK (Test Clock)、TMS (Test-Mode Select)、TRST (Test Reset)、TDI (Test-Data

In) 和 TDO (Test-Data Out)，透過串列通信完成電路的測試與分析。
JTAG 操作模式的選擇，則由 TRST (Test Reset)、EMU0 (Emulation pin 0)、EMU1 (Emulation pin 1) 信號的狀態決定，可選擇為被動模式、正常操作模式等。

P2, 擴充界面 (Expansion Interface)

eZdsp F2812使用IS61LV6416-10T (64K×16 SRAM) 外部擴充I/O埠，其擴充界面P2上有60個接腳，I/O腳位有XA1~XA18、XD1~XD15。

P3, 平行並列埠/JTAG界面 (Parallel Port/JTAG Interface)

eZdsp F2812也可使用平行並列埠-JTAG界面裝置。本裝置也包含了標準的平行並列埠界面，提供ECP (Enhanced Capability Port)、EPP (Enhanced Printer Port) 和SPP (Standard Printer Port) 等傳輸格式。其驅動包含在C2000 Code Composer Studio工具套件裡頭。

P4/P8/P7, I/O界面 (I/O Interface)

DSP的I/O信號整合成P4/P8/P7界面，可供使用者方便使用SCI (Serial Communications Interface)、SPI (Serial Peripheral Interface)、PWM (Pulse-width Modulation) 等界面，其接腳位置如圖3.11，接腳配置如表3.3。

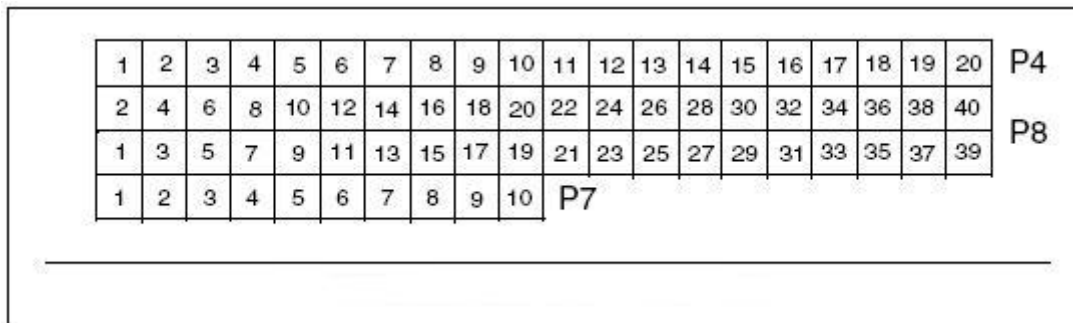


圖3.11 P4/P8/P7, I/O界面接腳圖

表3.3 P4/P8 I/O接腳配置表

P4 Pin #	P4 Signal	P8 Pin #	P8 Signal	P8 Pin #	P8 Signal
1	+3.3V/+5V/NC *	1	+3.3V/+5V/NC *	2	+3.3V/+5V/NC *
2	XINT2/ADCSOC	3	SCITXDA	4	SCIRXDA
3	MCLKXA	5	XINT1n/XBIO _n	6	CAP1/QEP1
4	MCLKRA	7	CAP2/QEP2	8	CAP3/QEPI1
5	MFSXA	9	PWM1	10	PWM2
6	MFSRA	11	PWM3	12	PWM4
7	MDXA	13	PWM5	14	PWM6
8	MDRA	15	T1PWM/T1CMP	16	T2PWM/T2CMP
9	No connect	17	TDIRA	18	TCLKINA
10	GND	19	GND	20	GND
11	CAP5/QEP4	21	No connect	22	XINT1N/XBIO _n
12	CAP6/QEPI2	23	SPISIMOA	24	SPISOMIA
13	T3PWM/T3CMP	25	SPICLKA	26	SPISTEA
14	T4PWM/T4CMP	27	CANTXA	28	CANRXA
15	TDIRB	29	XCLKOUT	30	PWM7
16	TCLKINB	31	PWM8	32	PWM9
17	XF/XPLLDIS _n	33	PWM10	34	PWM11
18	SCITXDB	35	PWM12	36	CAP4/QEP3
19	SCIRXDB	37	T1CTRI _P /PDPINTA _n	38	T3CTRI _P /PDPINTB _n
20	GND	39	GND	40	GND

SCI支援CPU與採用NRZ（Non-Return-to-Zero）標準格式的週邊

設備通訊。TMS320F2812 DSK有兩組SCI模組可供使用，分別為SCIA

及SCIB。SCI支援CPU與採用NRZ（Non-Return-to-Zero）標準格式通訊。SCITXD（Serial Communication Interface Transmit Data）為資料的輸出接腳，SCIRXDA（Serial Communication Interface Receiver Data）為資料的輸入接腳。

SPI則一般使用於DSP與其於DSP或MCU（Microcontroller）之間的通訊。SPISOMI（Serial Peripheral Interface Slave Out, Master In）於Master Mode為信號輸入接腳，Slave Mode則為信號輸出接腳。

SPISIMO（Serial Peripheral Interface Slave In, Master Out）於Master Mode為信號輸出接腳，Slave Mode則為信號輸入接腳。SPISTE（Serial Peripheral Interface Slave Transmit enable）為SPI於Slave Mode發送致能接腳。SPICLK（Serial Peripheral Interface clock）為SPI時脈信號。

P5/P9, 類比界面（Analog Interface）

圖3.12為P5/P9類比/數位轉換界面，其接腳配置如表3.4所示。

P5					ANALOG				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
P9									

圖3.12 P5/P9 A/D轉換界面

表3.4 P5/P9 A/D轉換接腳配置表

P5 Pin #	Signal	P9 Pin #	Signal	P9 Pin #	Signal
1	ADCINB0	1	GND	2	ADCINA0
2	ADCINB1	3	GND	4	ADCINA1
3	ADCINB2	5	GND	6	ADCINA2
4	ADCINB3	7	GND	8	ADCINA3
5	ADCINB4	9	GND	10	ADCINA4
6	ADCINB5	11	GND	12	ADCINA5
7	ADCINB6	13	GND	14	ADCINA6
8	ADCINB7	15	GND	16	ADCINA7
9	ADCREFM	17	GND	18	VREFLO *
10	ADCREFP	19	GND	20	No connect

ADC模組有16個通道，可配置成兩個獨立的8通道模組，以便為事件管理器A及B服務。兩個獨立的8通道模組可組成一個16通道模組。ADC A組的輸入接腳為ADCINA0~ADCINA7，ADC B組的輸入接腳為ADCINB0~ADCINB7。

eZdsp F2812提供初學者，能快速使用DSP與其既有的週邊。由於其功能齊全，可使用C語言、組合語言及線性組合語言的執行運作。使用者可靈活且自由撰寫應用程式軟體，並可外接一些所需求的應用I/O週邊進行系統擴充。同時搭配CCS（Code Composer Studio）程式開發平台，以進行系統模擬與偵錯。整體而言，可簡化DSP程式的發展時間，與提昇除錯的能力。

第四章 系統軟硬體架構與實驗結果

4.1 系統硬體架構

本研究所使用之慣性感測裝置為雷優科技之 GIMU

(GPS-enabled Inertial Measurement Unit) Version MECHU 是專為中華

大學機械所修改之產品，包含了以下特性：

- (1) 正交三軸加速規 (MEMS Accelerometer)
- (2) 加速規測量範圍 $\pm 1.5g$
- (3) 正交三軸陀螺儀 (MEMS Gyroscopes)
- (4) 陀螺儀測量範圍 $\pm 50^\circ/\text{sec}$
- (5) GPS 定位能力
- (6) GPS 資料包含經度、緯度、定位衛星數
- (7) UART 傳輸，19200,N,8,1 格式
- (8) 加速規與陀螺儀每秒取樣六次
- (9) GPS 定位資料每秒取樣一次
- (10) 3.3V~3V 直流供電
- (11) 耗電低於 100mA

圖 4.1 為 GIMU 的外觀實體圖，圖 4.2 為側視圖，圖 4.3 為右側視圖。



圖 4.1 GIMU 的外觀實體圖

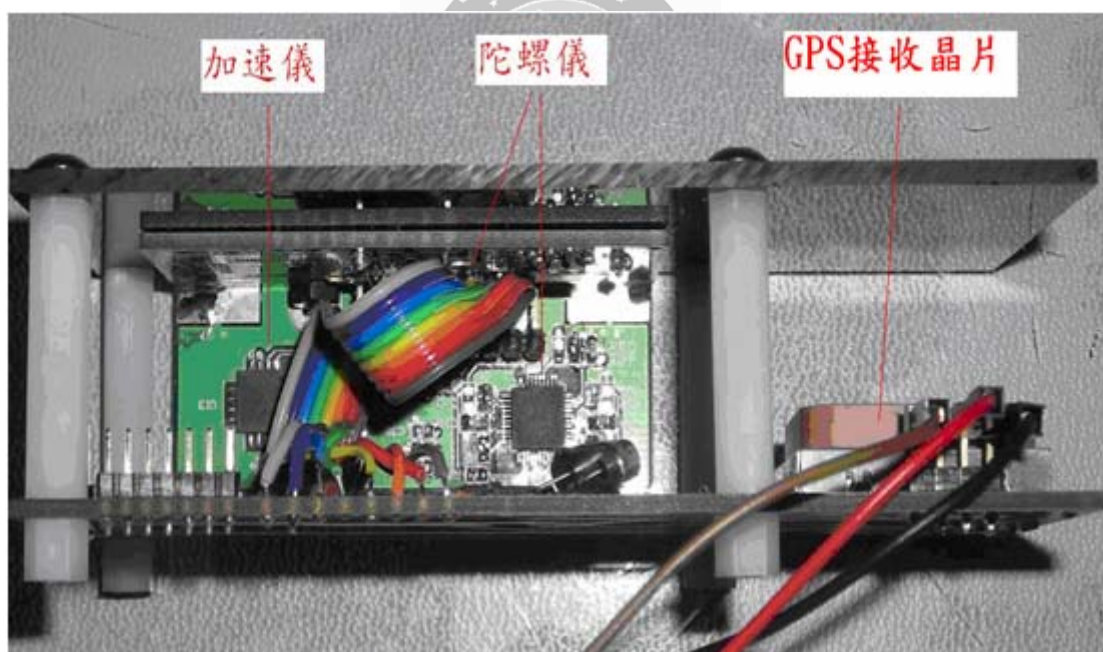


圖 4.2 GIMU 的側視圖

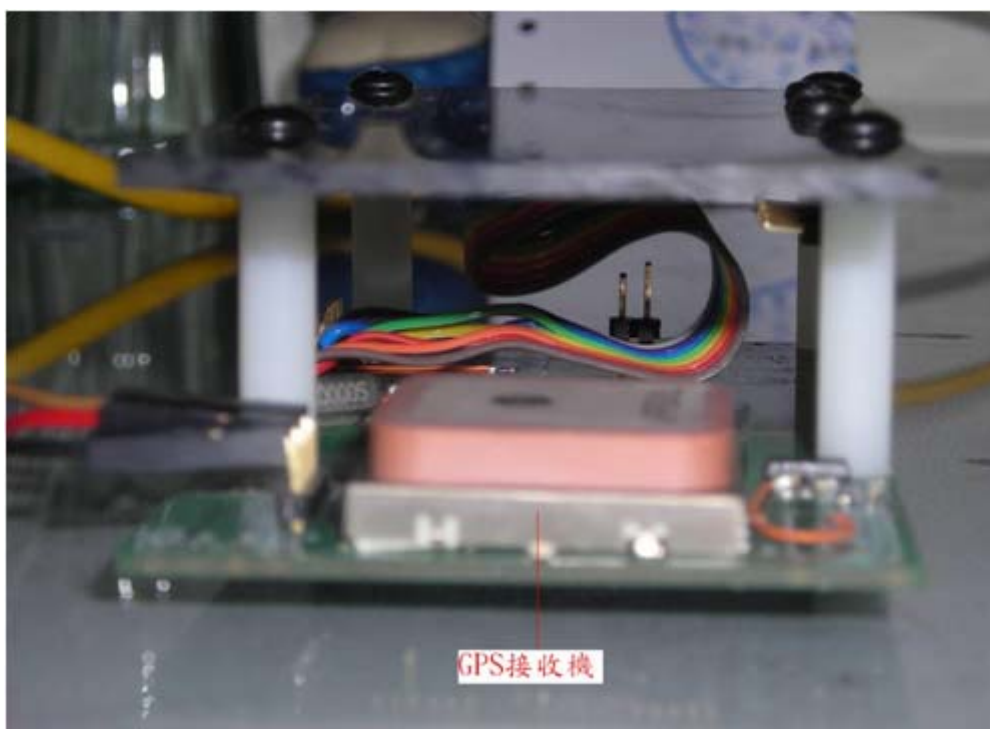


圖 4.3 GIMU 的右側視圖

GIMU 內有一金屬盒子，此為 GPS Module。GIMU 採用 MTK 之高敏感度 GPS 接收晶片，內建被動天線，不需外加天線即可達成有效定位能力。GPS Module 下方有一四腳連結器，標示如表 4.1。

表 4.1 GPS Module 四腳連結器

T	R	V	G
---	---	---	---

這四隻腳分別代表如下：

T：GIMU 信號輸出腳位，請直接連線到 DSP 的 UART input 腳位。

R：GPS Native Signal。建議不使用。此處可攔截 GPS Module 原生之 NMEA Packets。

V：Voltage input。請供應一 3.3V~3.0V 之間的電壓。

G：GND。請接地，必須與 DSP 之地線相連。

只要 GIMU 有接上 V 與 G 兩隻腳位，當 DSP 過電啟動時，GIMU 也會收到電壓，在 100ms 內會啟動完畢，開始送出貨訊。為了使用方便起見，GIMU 上並無電源開關，但有電源指示燈，當紅色 LED 亮起時，代表系統過電工作中。不論 DSP 是否工作中，GIMU 都會持續送出貨訊。

MEMS Sensors and Outputs 簡介：

GIMU 一共使用三顆 MEMS Motion Sensors，分別是：

- (1) Freescale MMA7260Q。Tripple-Axis Accelerometer。
- (2) Invensense IDG1004。Dual-Axis Gyroscope，負責 Yaw rate，另一軸輸出忽略。
- (2) Invensense IDG1004。Dual-Axis Gyrosocpe，負責 Roll rate 與 Pitch rate。

以上兩種 MEMS Sensor 都是單電源類比輸出，經 12bits ADC 轉換為數位資訊。單電源類比輸出之 Sensor，無法輸出正負電壓，因此 Null Value(零輸出)為 $V_{cc}/2$ 左右，再根據運動狀態而出現以 Null Value 為中心之正負擺動波形。12bits ADC 將 $0 \sim V_{cc}$ 轉換為十六進位 $0x000 \sim 0xFFFF$ ，也就是十進位的 0 至 4095 之間，一般來說，Null Value 約是 2047，但每個 Sensor 的輸出都會有誤差與飄移，需逐一校正。

GPS Outputs 簡介

GSP Module 資料輸出採用國際通用的 NMEA 格式。但此格式相當繁瑣，絕大多數資訊都會被捨去，因此 GIMU 擷取其中部分資訊，與 MEMS Motion Sensors 同步後再輸出。GIMU 輸出之資訊包含經度、緯度、定位之衛星數量。

一般來說，在空間中需三顆衛星方可定位，四顆衛星才能做到精密定位，因此 DSP 必須隨時注意 GIMU 所回傳之衛星數量資訊，以判斷資料是否具參考價值。

GIMU 輸出格式

GIMU 輸出信號特性為 19200bps、No parity check、8-bits、1 stop bit。GIMU 輸出之資料為 Binary data，非 ASCII encoded！也就是說，每個位元組八位元都有使用，因此不能用 Windows 下的超級終端機直接讀取之。GIMU 每秒送出六個封包，間隔為 1/6 sec。GIMU 的封包有兩種：

- (1) 只有包含 MEMS Sensor 資料。
- (2) 包含了 MEMS Sensor 資料與 GPS 資料。

因為 GPS 每秒定位一次，故 GIMU 每送出五次第一種封包，第六次時送出的封包是第二種。以下解釋 GIMU 的封包資訊，都是以十六進位格式表示之。如圖 4.4。

Byte0 ₁	Byte1 ₁	Byte2 ₁	Byte3 ₁	Byte4 ₁	Byte5 ₁	Byte6 ₁	Byte7 ₁	Byte8 ₁	Byte9 ₁	Byte10 ₁	Byte11 ₁	Byte12 ₁	Byte13 ₁
Header ₁		Gyro P ₁		Gyro Q ₁		Gyro R ₁		Acc X ₁		Acc Y ₁		Acc Z ₁	
0xAA ₁	0x55 ₁	0x12 ₁	0x34 ₁	0x56 ₁	0x78 ₁	0xAB ₁	0xCD ₁	0xBA ₁	0x98 ₁	0x76 ₁	0x54 ₁	0x32 ₁	0x10 ₁

圖 4.4 Packet Type 1 Example

Header 用來標示封包的開始，這是固定的資訊，0xAA 與 0x55

兩個位元組。請注意到高位元組先送，再送低位元組。

Gyro P value : 0x1234

Gyro Q value : 0x5678

Gyro R value : 0xABCD

Acc X value : 0xBA98

Acc Y value : 0x7654

Acc Z value : 0x3210



以上之數值均為示範之用，實際上不可能為這些數值，因為

Sensor 資料經過 12bits ADC 轉換，故數值最多只能到 4095，也就是

0xFFF，都小於上面示範用之數值。以 Gyro P 軸來說，假設 Gyro P

之 Null value 是 4095 的一半， $2047 = 0x7FF$ ，當讀取到 0x912 時，以

真正的角旋轉率為 $0x912 - 0x7FF = 0x113 = 275$ units。IDG1004 之輸出

是每度每秒 4mV，4mV 換算成 ADC 所測量之數值是

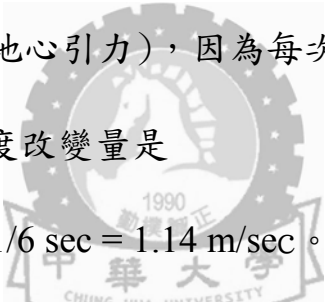
$4mV * (4095/3300) = 5$ ，也就是說，當陀螺儀偵測到每秒旋轉一度

時，ADC 讀數為 5 帶入上述之 275 units，意義為 $275/5 = 55$ ，所以陀

螺儀當時偵測到的是每秒 55 度的旋轉率。請注意這輸出是旋轉率，

不是角度！旋轉率對時間積分，輸出才會變成角度。現在的取樣速度是每秒六次，所以上述的 275 units，或是 55 度/sec，必須乘以時間 $55(\text{度/sec}) * 1/6 (1/\text{秒}) = 9.2 \text{ 度}$ 。這個例子中，GIMU 轉動了 9.2 度。

加速規之輸出也是類似的計算過程。假設某軸加速規之輸出為 0xABB，而加速規之 Null Value 也是 4095 的一半， $2047 = 0x7FF$ ，代表加速規獲得 $0xABB - 0x7FF = 0x2BC = 700$ 加速規之輸出為每 g (一個地心引力) 為 800mV，經過 12bits ADC 之轉換為 $800\text{mV} * (4095/3300) = 993 \text{ units}$ ，所以該加速規之輸出可以換算成 $700 / 993 = 0.7\text{g}$ (0.7 個地心引力)，因為每次的取樣時間是 1/6 秒，所以在這段時間內，速度改變量是 $0.7\text{g} * (9.8\text{m/sec/sec}) * 1/6 \text{ sec} = 1.14 \text{ m/sec}$ 。



Byte0 ₁	Byte1 ₁	Byte2 ₁	...	Byte13 ₁	Byte14 ₁	Byte15 ₁	Byte16 ₁	Byte17 ₁	Byte18 ₁	Byte19 ₁	Byte20 ₁	Byte21 ₁	Byte22 ₁
Header ₁		Gyro P ₁		AccZ ₁	Latitude ₁				Longitude ₁			Sates ₁	
0xAA ₁	0x55 ₁	0x12 ₁	...	0x11 ₁	0x07 ₁	0x28 ₁	0xF0 ₁	0x40 ₁	0x01 ₁	0x77 ₁	0x36 ₁	0xB0 ₁	0x04 ₁

圖 4.5 Packet Type 2 Example

Type2 封包，如圖 4.5 所示，一共 22 bytes，前面 14 個與 Type1 的完全相同，但後方多出三個欄位，依序是 Latitude、Longitude、Sates(衛星數量)。以此範例來說，Latitude (緯度)一共是 4 bytes，高位元組先行，故將此四個位元組拼湊可得 Latitude = 0x0728F040，也就是十進位的 120123456 要拆成兩個部分，不論前方有幾個字，後方六個字都是小數，所以補上小數點變成

$120123456 / 1000000 = 120.123456$ ，這代表緯度 120 度，剩餘的 123456

還要再退兩位一次，獲得 $123456 / 100 = 12.3456$ 這邊得到的單位是

分，沒有再精細到秒。請注意一度等於六十分。

經度也是一樣的算法，先拼湊出 0x017736B0 四個位元組，換算成十進位是 $0x017736B0 = 24590000$ 先退六位，得到 $24590000 / 1000000 = 24.590000$ ，再將 $590000 / 100 = 59.0000$ ，所以經度是 24 度 59 分零秒。最後是檢查衛星數，這邊是 04，也就是四顆衛星，定位資訊可信。

4.2 eZdsp I/O Card 簡介

如果 GIMU 輸出為類比訊號的話，就要在與 TMS320F2812 間加一個 I/O Card，其作用是用來轉換電壓，讓電壓能符合 TMS320F2812 的 0V~3.3V。而 TMS320F2812 具有 16 通道 12 位元的 A/D 轉換模組，能接受輸入的類比信號介於 0V~3.3V 之間，由於大部份陀螺儀輸出的類比信號為 0V~5V，此信號尚需進行電壓位準的調變後，才能輸入至 DSP 上的 A/D 轉換模組。圖 4.6 為自行設計製作之 I/O Card。

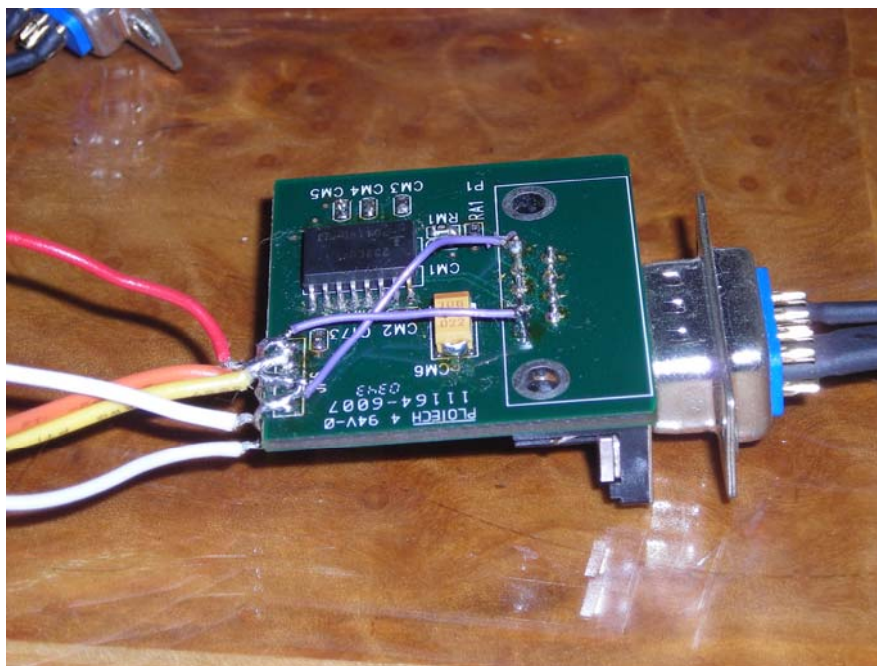


圖 4.6 連接 F2812 自行製作之 I/O Card

本研究所用之 GIMU，其內部已有 I/O Card，固傳輸為數位訊號，因此無須製作此一電路版，可直接讓 F2812 接收。

4.3 Code Composer Studio 操作

安裝購買 eZdsp F2812 所附贈的 TMS320C2000TM DSP Platform Code Composer Studio™ DSK v3.1 IDE 光碟，可使用 parallel port 來與 DSP 連結；如需使用 JTAG，則需正式版的 v3.1 光碟。

開啟 SdConfig v3.1 進行模擬器設定，選擇 XDS510PP_PLUS@0x378，硬體名稱選擇 XDS510PP_PLUS，模擬器通訊埠位址選擇 0x378，模擬器通訊埠選擇 SPP8，並點選模擬器測試且儲存。設定如圖 4.7。

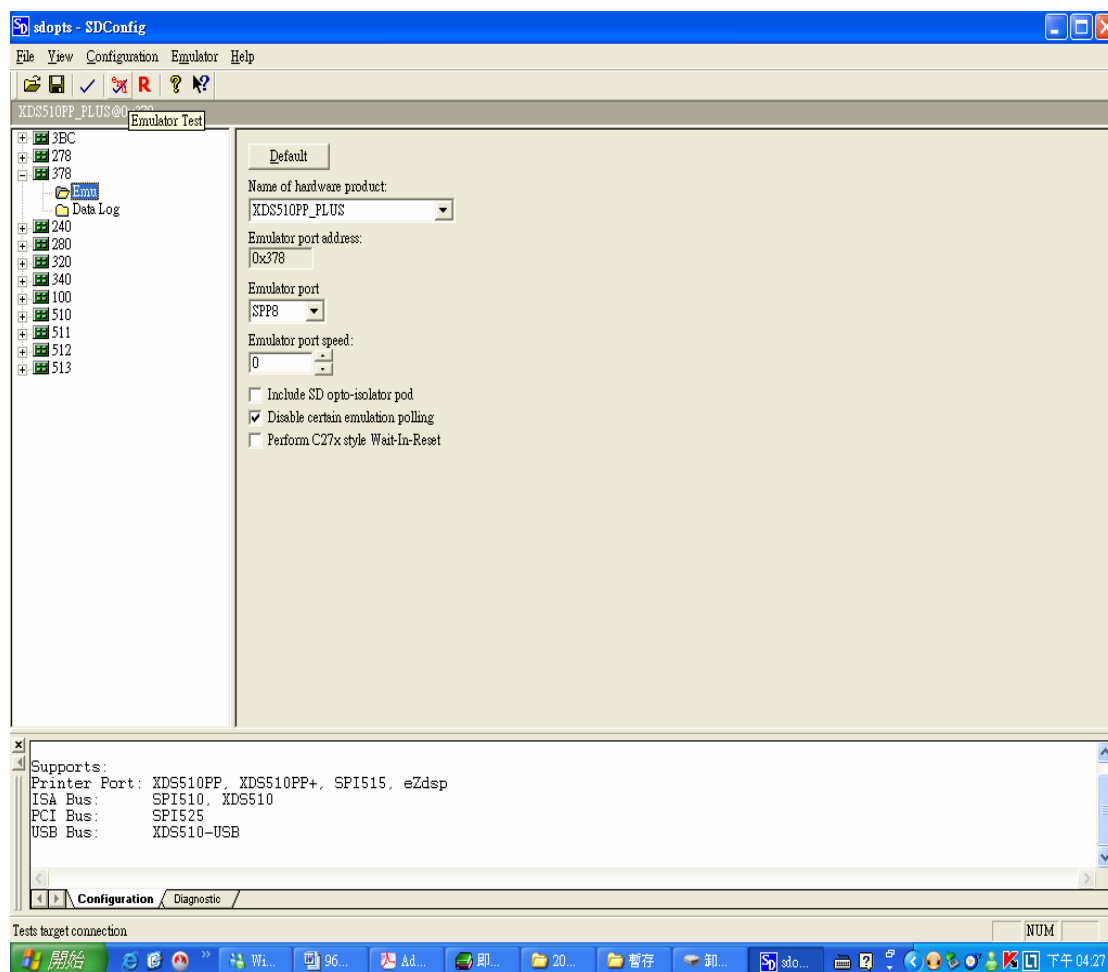


圖 4.7 模擬器設定圖

如使用 USB JTA-K 連結，是使用型號 XDS510 USB，則 SdConfig v3.1 的設定，則需選擇 XDS510_USB@0x510，其餘設定則與 parallel port 設定相同。

進行模擬器設定後，則需選擇對應 DSP 型號的驅動器，方能順利開啟 CCS，進行與 DSP 連結的動作，進行測試與開發。CCS Setup 如圖 4.9 所示，本研究使用為 F2812，因此在 parallel port 的通訊方式底下，則需選擇 eZdsp F2812 此型號儲存並開始啟用 CCS。

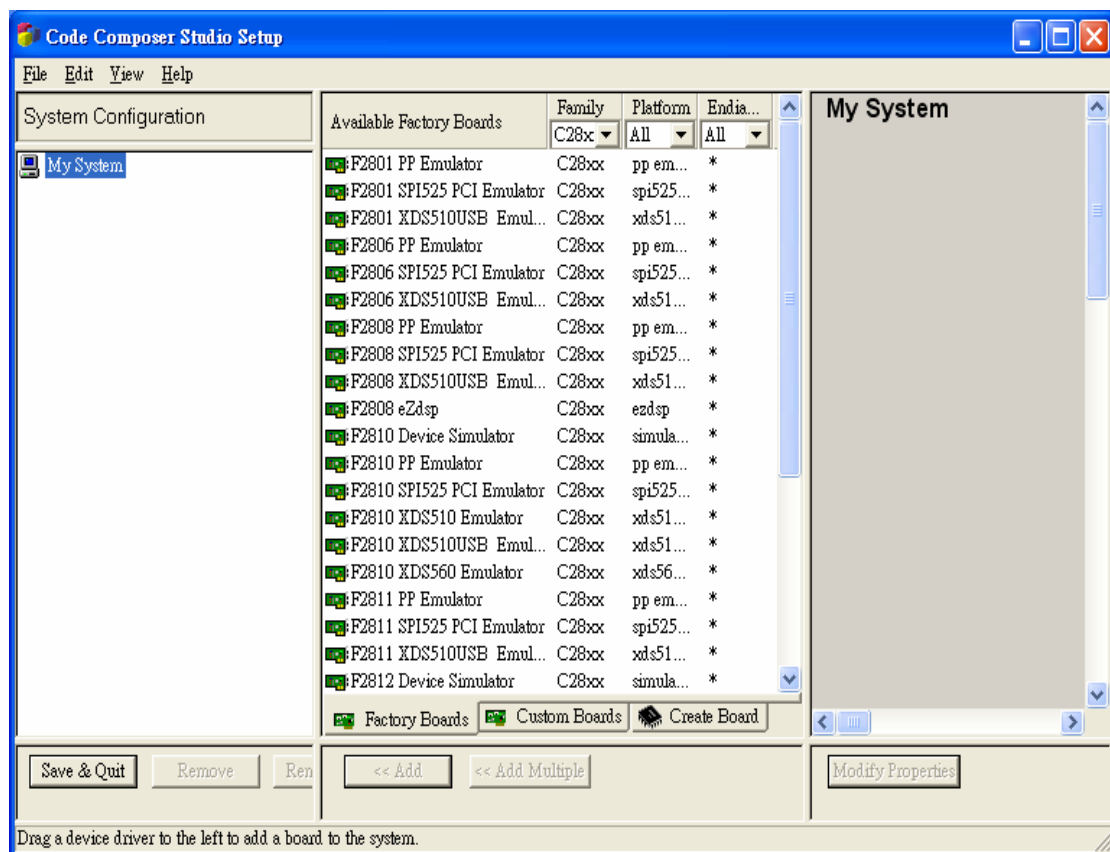


圖 4.8 CCS Setup 介面

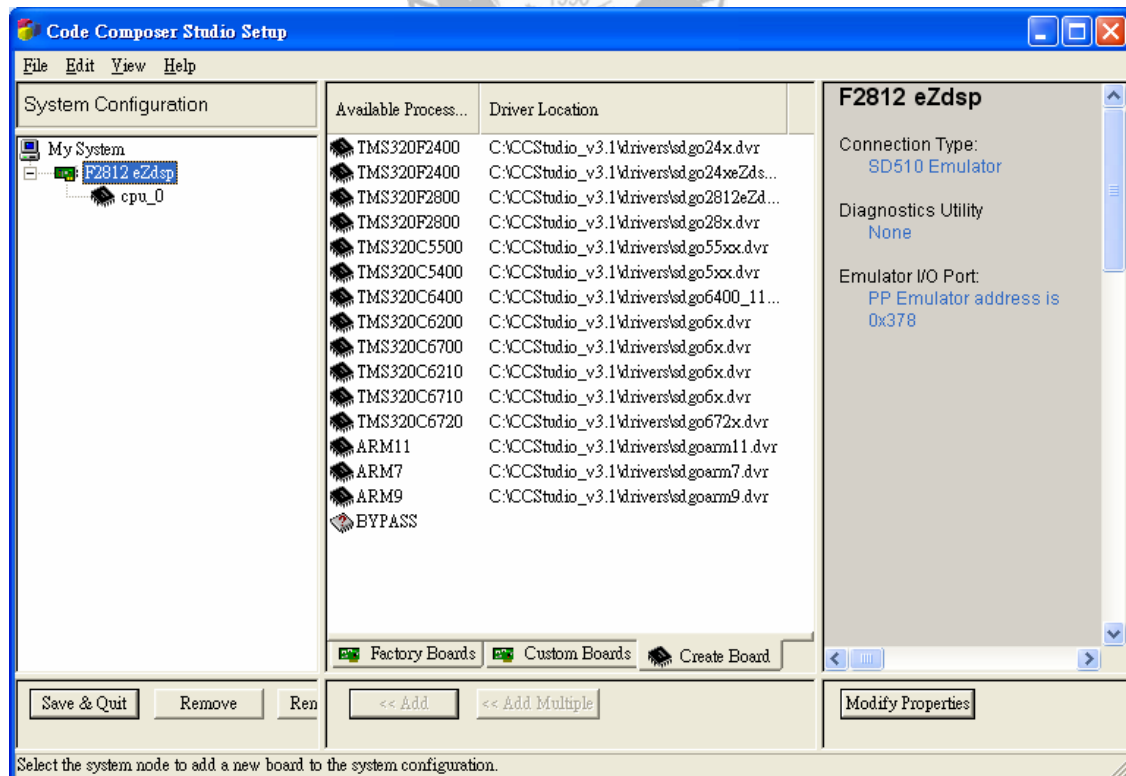


圖 4.9 選擇 F2812 eZdsp 驅動，儲存並開啟 CCS

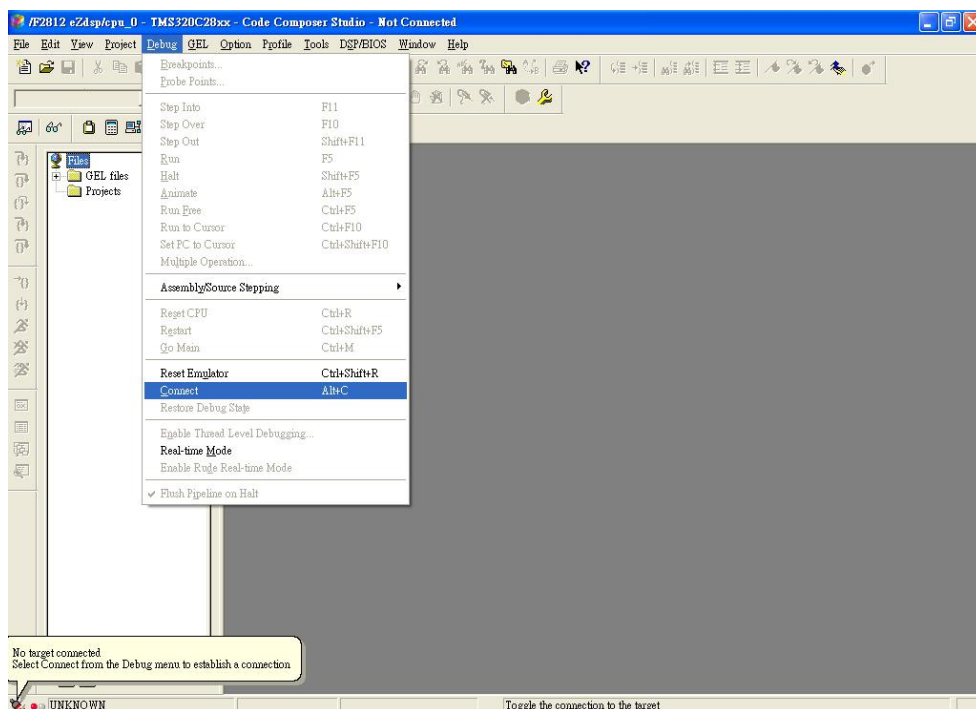


圖 4.10 Debug->Connect 將 DSP 與 PC 連結

4.4 串列通訊界面

DSP 運算後的數位信號，傳送至 PC 進行動畫的連結，是使用 RS232 通訊界面。TMS320F2812 包含兩組 SCI 模組，SCI 模組提供數位通訊，採用標準 Non-Return-To-Zero (NRZ) 格式的串列週邊界面。SCI 的接收和傳送都為雙緩衝區，各自都擁有區分及中斷位元。兩者皆可操作於獨立，或同時的雙工模式下。鮑率 (Baud Rate) 可經由一個 16-bit 鮑率選擇暫存器來設定，最大可達 65000 種不同的速度。其規格及接腳配置如表 4.2。

表 4.2 SCI 接腳配置表

SCI Channel of DSP	DSP Signal	Pin Number
SCITXDA	Data Transmit	3(P8)
SCIRXDA	Data Receive	4(P8)
SCITXDB	Data Transmit	6(P9)
SCITXDB	Data Receive	8(P9)

由於 PC 端的 RS232 通訊設定採用 no parity、8 data bits、1 stop bit，且鮑率為 19200 bps。因此 DSP 內部的 SCI，也要參照相同的設定，才能進行正常的 RS232 通訊。

DSP裡SCI的設定【22】，鮑率的部分由SCI 鮑率選擇暫存器（Baud-Select Registers）設定SCIHBAUD（MSbyte）、SCILBAUD（LSbyte）為0x00F3，此為19200 bps，鮑率的算法及公式如：

$$\begin{aligned}
 \text{鮑率} &= \frac{LSPCLK}{(BRR+1)*8}, \text{ when } BRR \neq 0 \\
 &= \frac{LSPCLK}{16}, \text{ when } BRR=0
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

LSPCLK為低速週邊時脈（Low Speed Peripheral Clock），如圖4.11所示。eZdsp上提供一30MHz的clock（OSCCLK），經過PLL Clock-in Register（PLLCR.DIV設為0x1010, 10進制為10）倍頻，因此SYSCLKOUT（System clock）為150MHz，其計算公式如下【23】：

$$\text{SYSCLKOUT} = (\text{OSCCLK} * x) / 2 \tag{4-2}$$

其中x = 10。

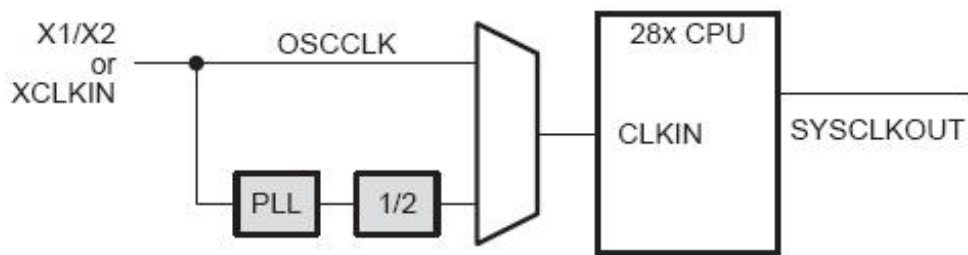


圖4.11 DSK系統時脈圖

如圖4.12所示，CPU產生SYSCLKOUT為150MHz，經由低速週邊時脈預先比例暫存器（Low-Speed Peripheral Clock Prescaler Register, LOSPCP），將LSPCLK設定為0x010（10進制為4），透過公式得知，LSPCLK為37.5MHz。

$$\text{Low speed clock} = \text{SYSCLKOUT}/x \quad (4-3)$$

其中 $x = 4$ 。

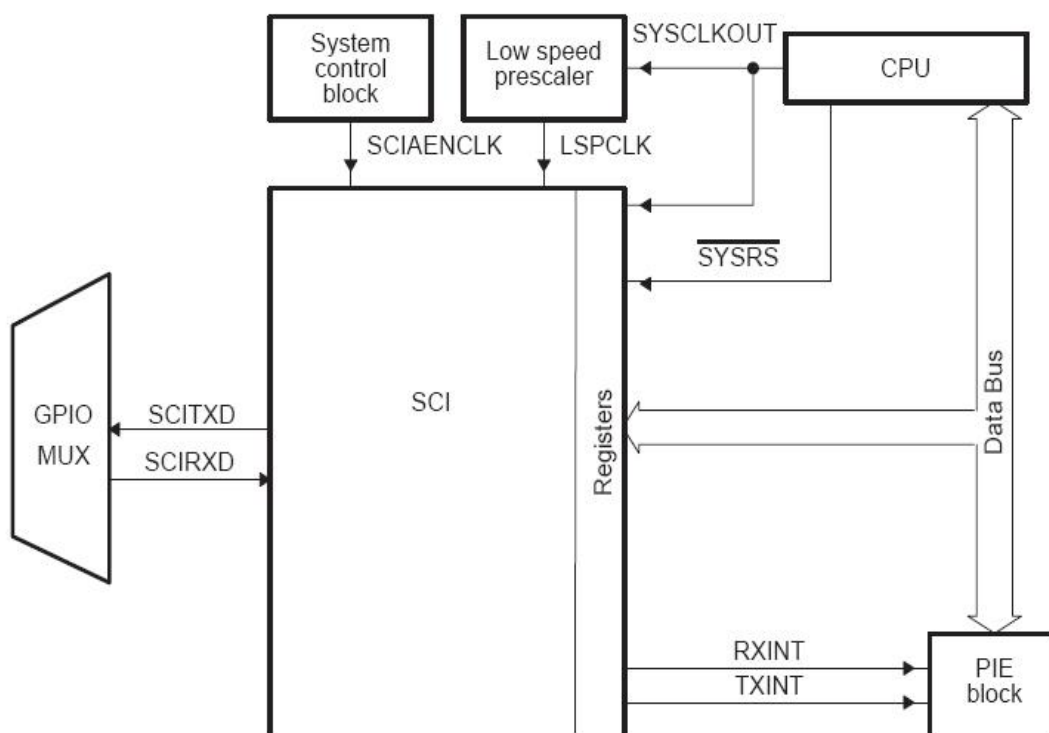


圖4.12 SCI模組界面圖

鮑率的設定可以參照公式 (4-1)，對應如表4.3

表4.3 LSPCLK clock = 37.5MHz下，鮑率設定對照表

Ideal Baud	LSPCLK Clock Frequency, 37.5 MHz		
	BRR	Actual Baud	% Error
2400	1952 (7A0h)	2400	0
4800	976 (3D0h)	4798	-0.04
9600	487 (1E7h)	9606	0.06
19200	243 (F3h)	19211	0.06
38400	121 (79h)	38422	0.06

SCI暫存器中，設定SCI通訊控制暫存器（SCI Communication Control Register, SCICCR）為0x0007，即是設定通訊格式為no parity、8 data bits、1 stop bit。

SCI設定後，傳送與接收，都必須透過SCI傳送資料緩衝暫存器（SCI Transmit Data Buffer Register, SCITXBUF）、SCI接收資料緩衝暫存器（SCI Receiver Data Buffer Register, SCIRXBUF）。只需把欲傳送的資料給予SCITXBUF，即可進行傳遞。接收則讀取SCIRXBUF，即可獲取資料。

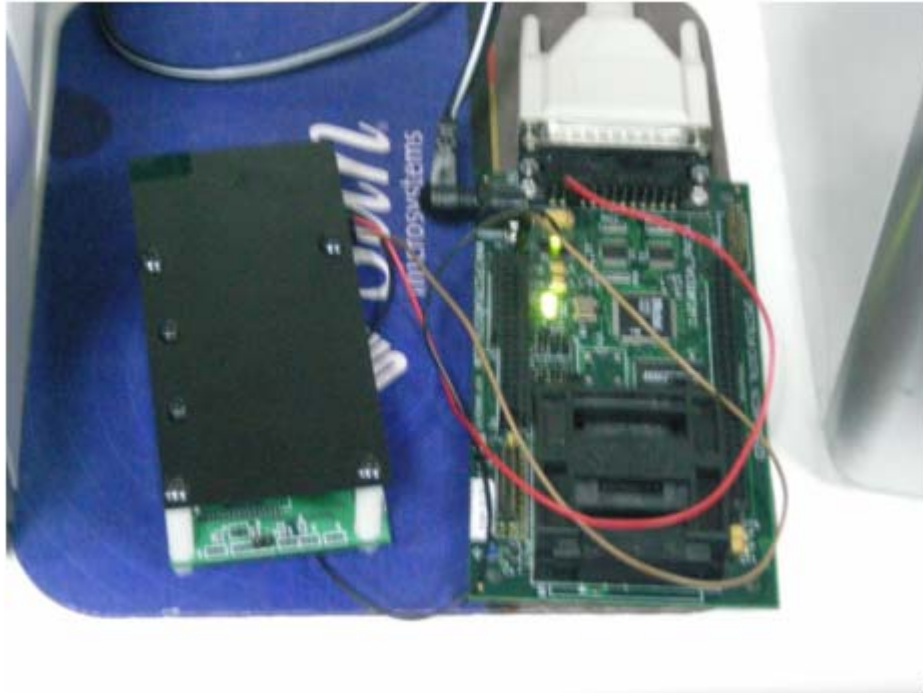


圖 4.13 GIMU 以及 F2812 總成圖

4.5 GIMU 實驗結果

4.5.1 實驗步驟

- (1) 開啟 CCS 後，讀取專案檔來做修改，首先將所要用到的暫存器來做設定，如圖 4.14 所示。

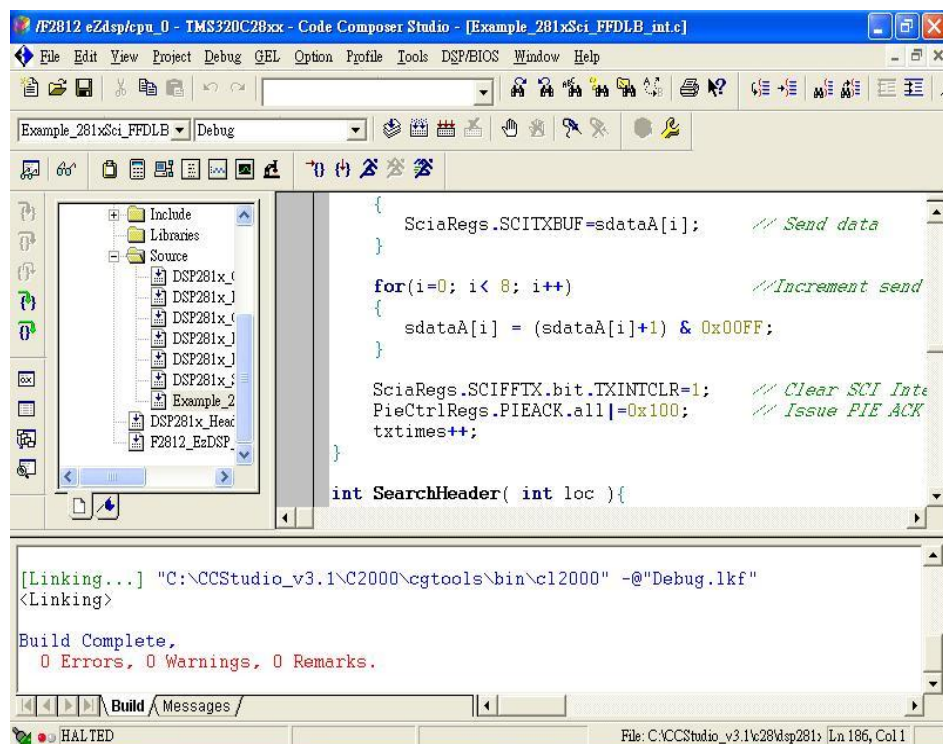


圖 4.14 設定要用到的暫存器

(2) 撰寫接收 GIMU 傳送過來資料的程式，如圖 4.15。

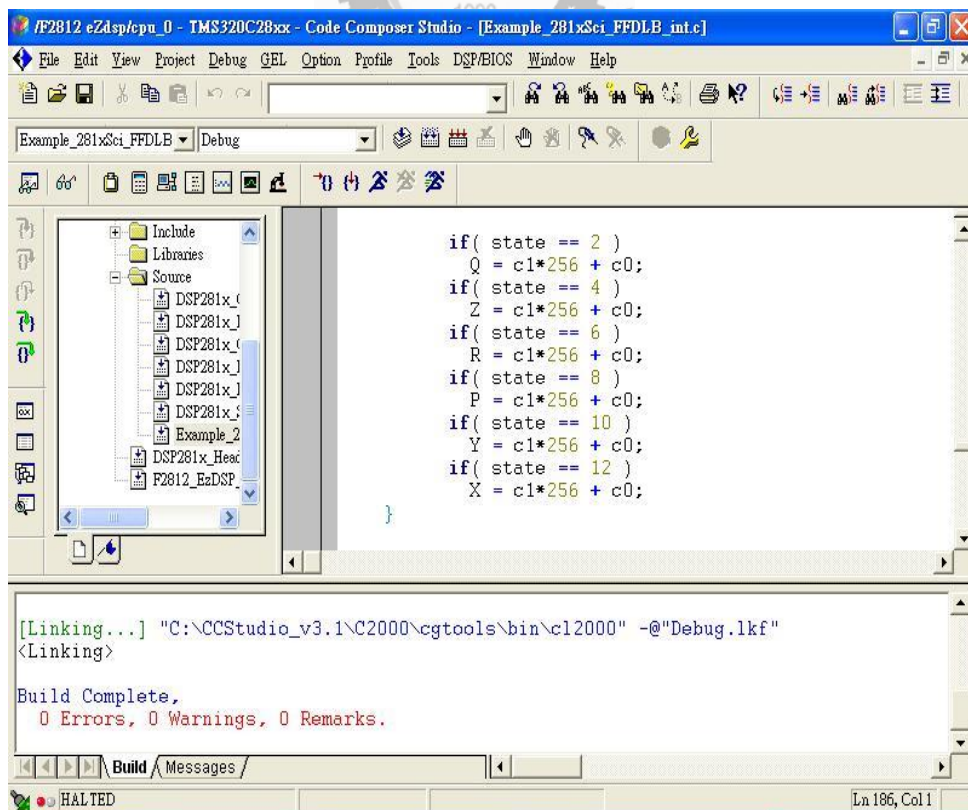


圖 4.15 撰寫接收 GIMU 傳送過來資料的程式

(3) 所接收到的 P、Q、R 數值，是轉動的角速率，還需將角速率作積分，才會得到角度。

(4) 由於 GIMU 傳送的 P、Q、R 值，是藉由轉動時電壓改變的數值而做感測變化。且 GIMU 的電壓是在-3.3V~3.3V 之間，經過轉換會讓數值介於 0~4095 之間，這是一相對的數值。所以積分出來的角度是相對於 GIMU 感測數值而定的，也就是跟電壓改變量有關，因此這中間還有一個 K 值常數，藉由與 K 值的運算後，便會得到所轉動的角度為何了。

(5) 實際做實驗去計算 K 值，每一軸的 K 值都不相同，實驗計算後的 K 值如下：

$$KP=0.2087$$

$$KQ=0.2099$$

$$KR=0.1993$$



4.5.2 INS靜態實驗

實驗時間：60 sec(未修正累積誤差)。

實驗後的方位角偏移量及累積誤差如圖4.16~4.19：由本實驗可知 P 及 R 軸有漂移誤差，而 Q 軸則有一偏置誤差及一些零亂 (Random) 誤差。

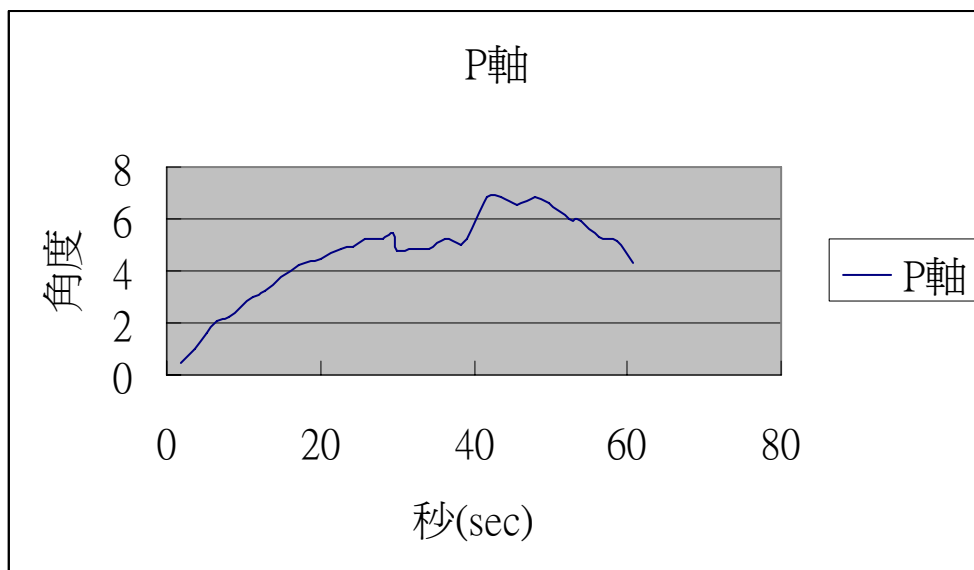


圖 4.16 P 軸未修正誤差靜態實驗結果

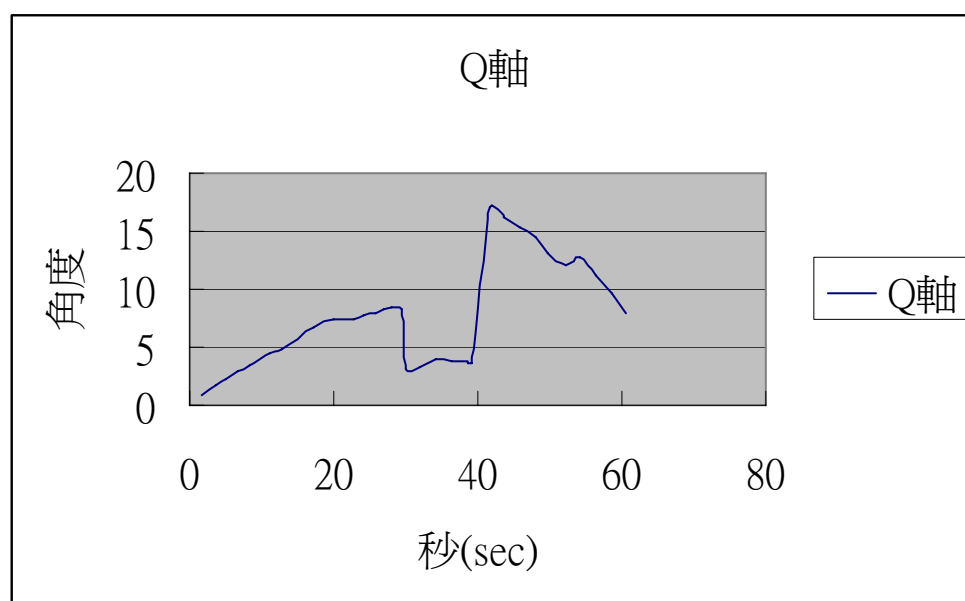


圖 4.17 Q 軸未修正誤差靜態實驗結果

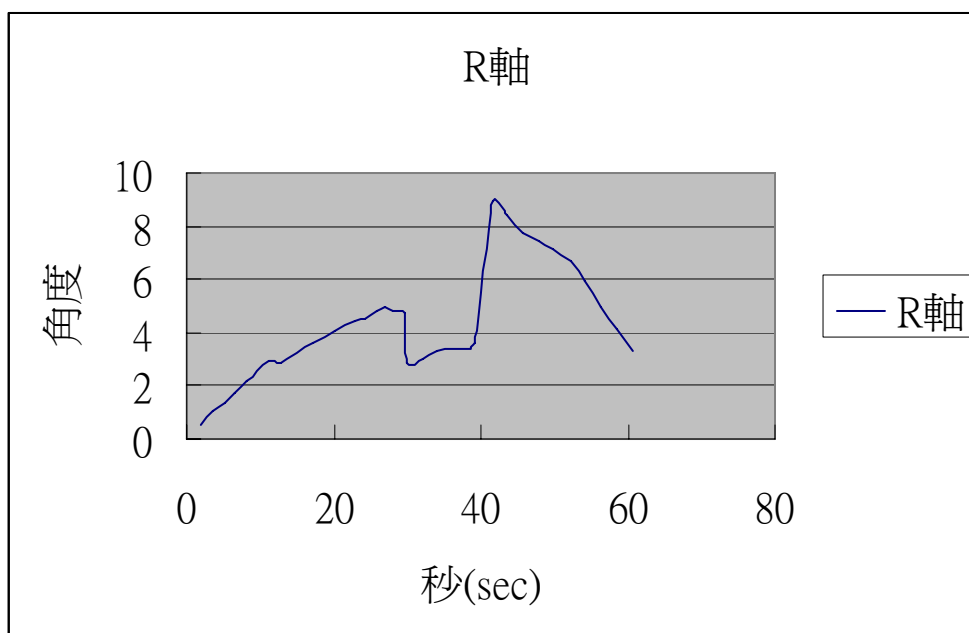


圖 4.18 R 軸未修正誤差靜態實驗結果

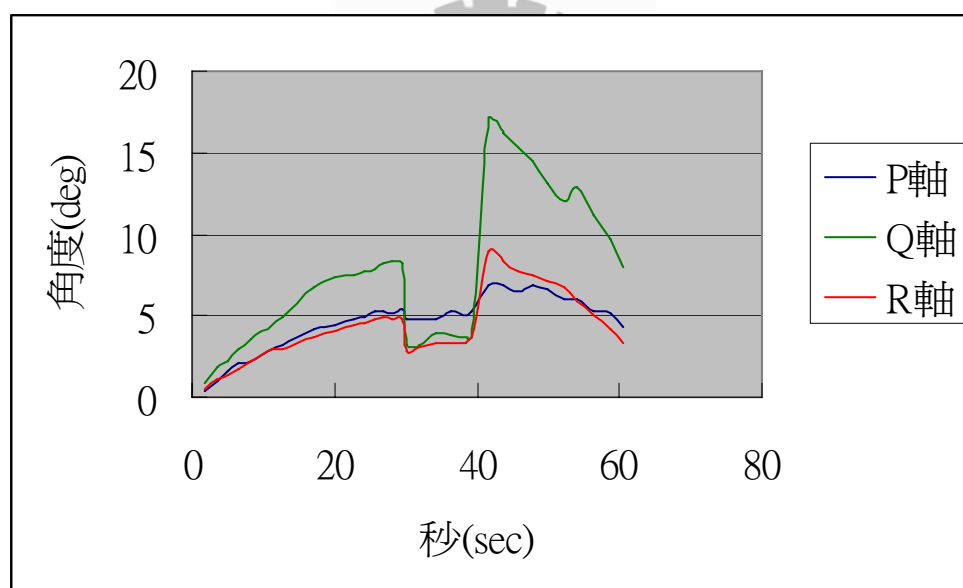


圖 4.19 P、Q、R 軸未修正累積誤差

實驗時間：60 sec（使用 NULL 值來做校正）。

實驗後的方位角偏移量及誤差如圖 4.20~4.23：本實驗誤差造成主因仍在於陀螺儀參考電壓的漂動以及轉換精度等問題，經由校正後，漂移量已明顯下降。

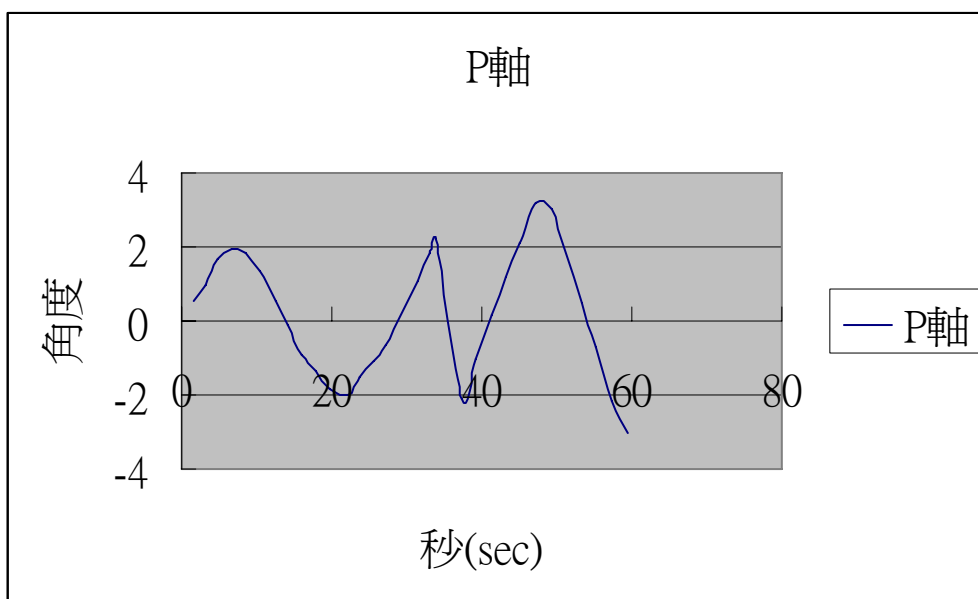


圖 4.20 P 軸已修正誤差靜態實驗結果

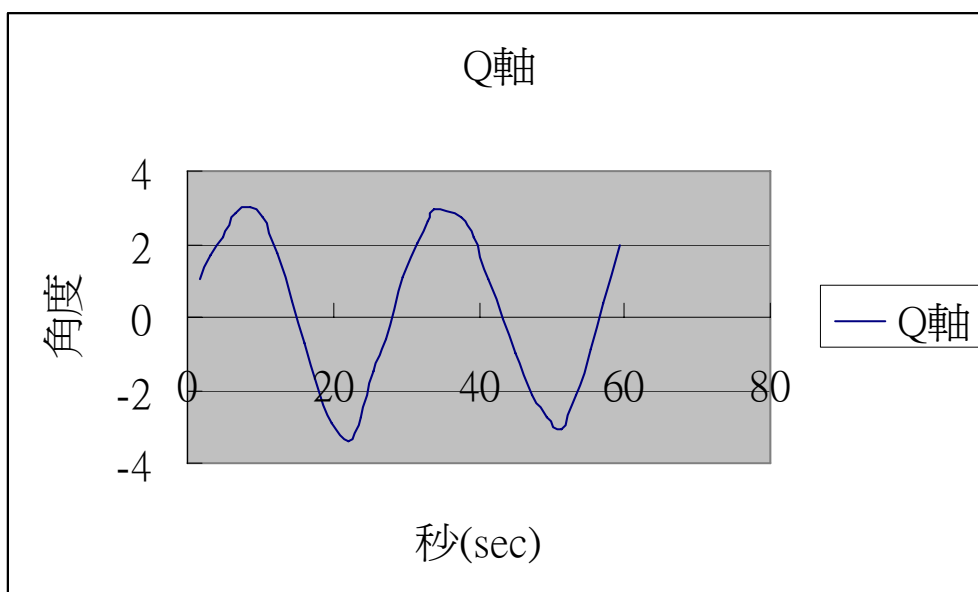


圖 4.21 Q 軸已修正誤差靜態實驗結果

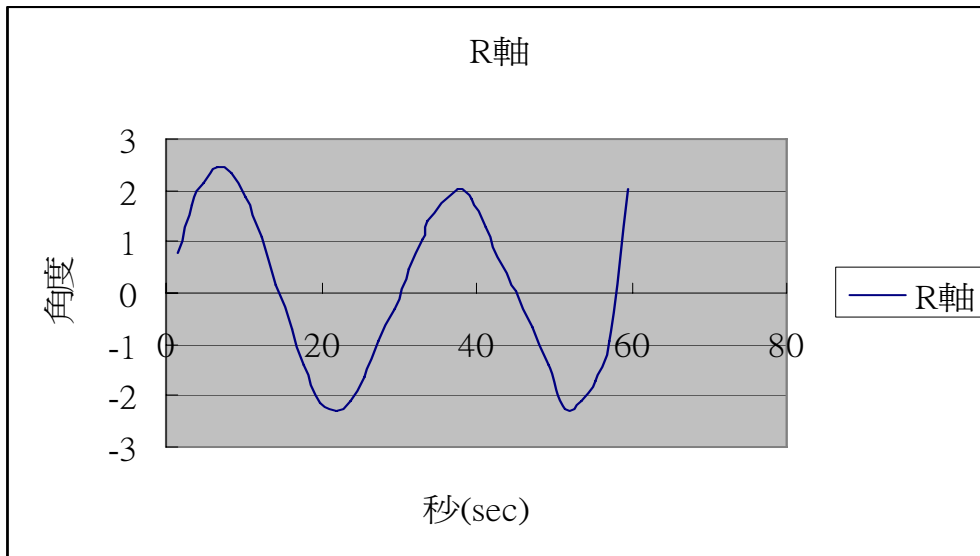


圖 4.22 R 軸已修正誤差靜態實驗結果

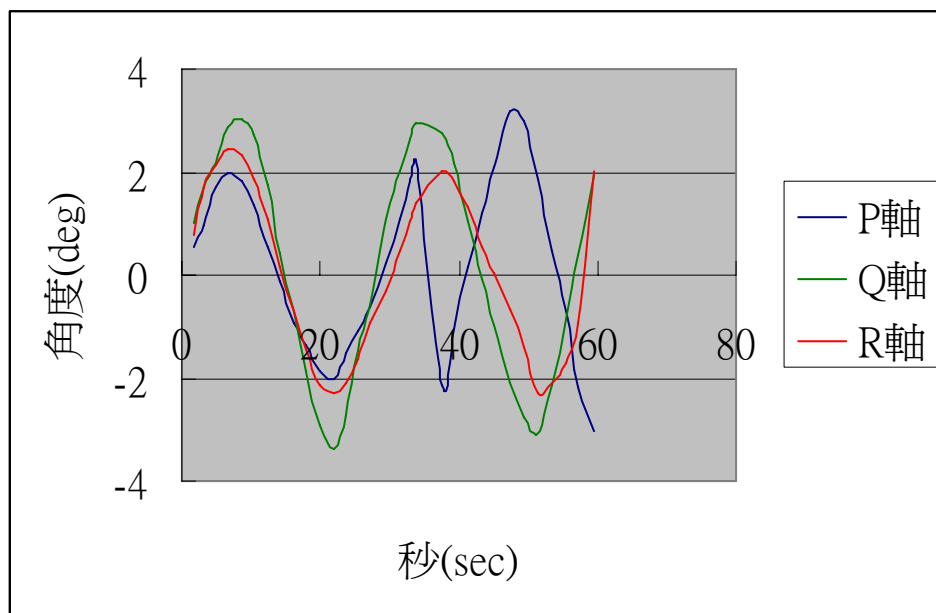


圖 4.23 P、Q、R 已修正累積誤差

經過實驗後，未經誤差修正的陀螺儀，開機靜置 1 分鐘後，角度偏差累積至 8~10 度左右，甚至更大。原因為計算次數的增加，會產生截位誤差（Truncation error）和捨位誤差（Round-off），使誤差擴大。且陀螺儀的輸入電壓會產生誤差，轉換精度本身也有誤差，因此

經由 NULL 值來修正。經由修正過後，角度偏差累積至 1~2 度左右，已大幅降低誤差值。

4.5.3 INS 動態實驗

實驗方式：將 GIMU 放置於桌面上，對各軸（P、Q、R 軸）來回做 $\pm 90^\circ$ 翻轉，看每次從原始位置轉回原點時，誤差漂移量有多大。也可看出實際使用的情況，是否能符合需求。實驗旋轉各軸及旋轉後的方位角偏移量和誤差如圖 4.24~4.29 所示。

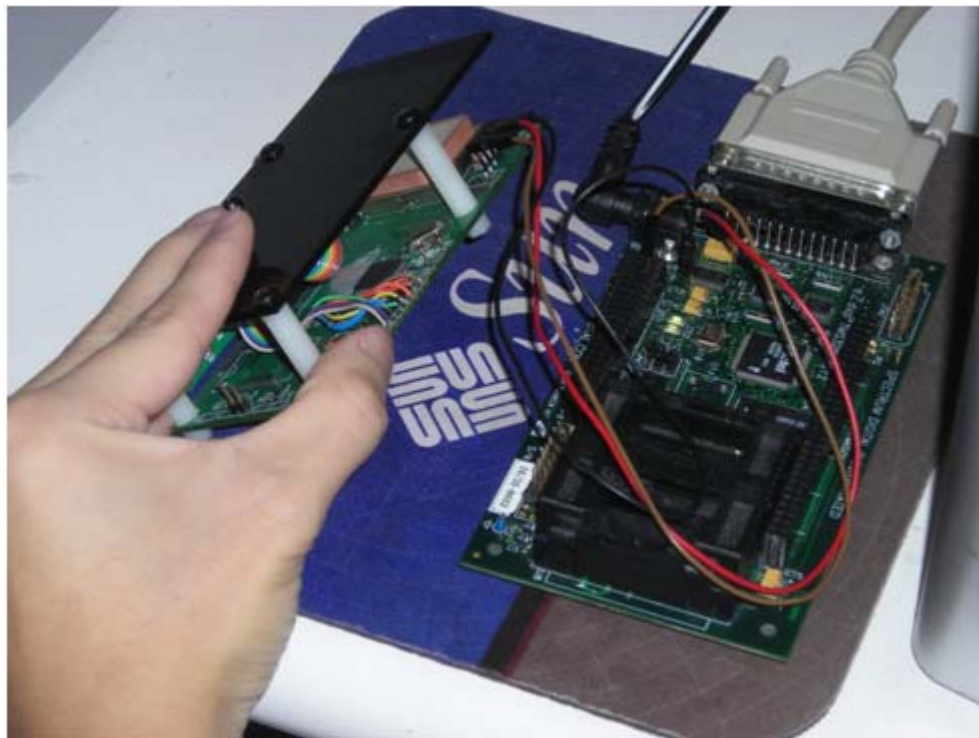


圖4.24 旋轉P軸實體圖

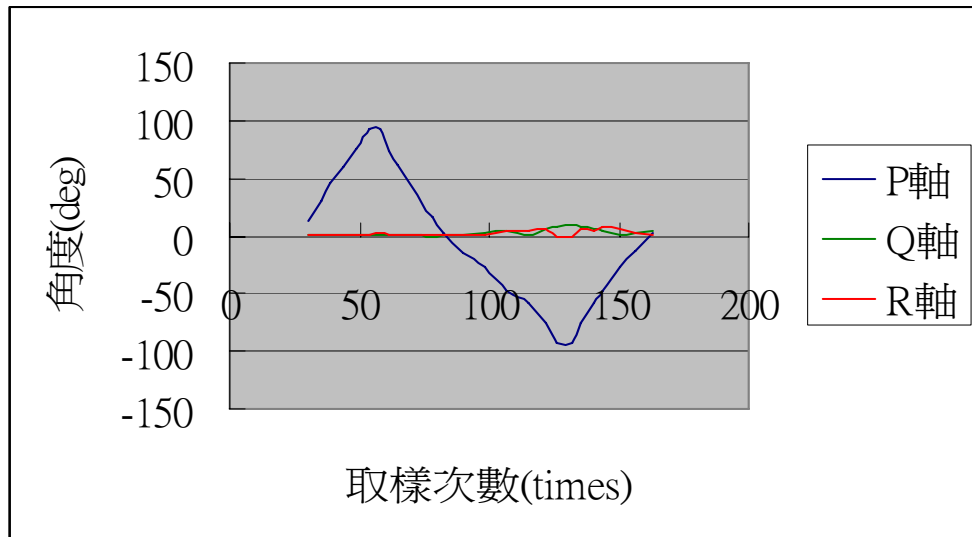


圖 4.25 P 軸動態實驗結果

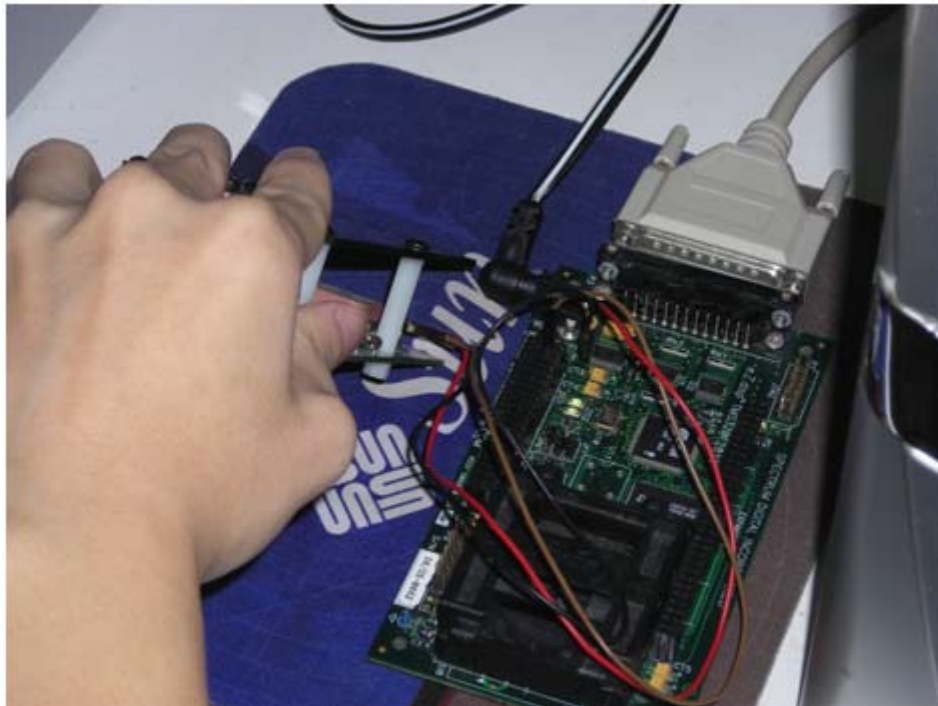


圖4.26 旋轉Q軸實體圖

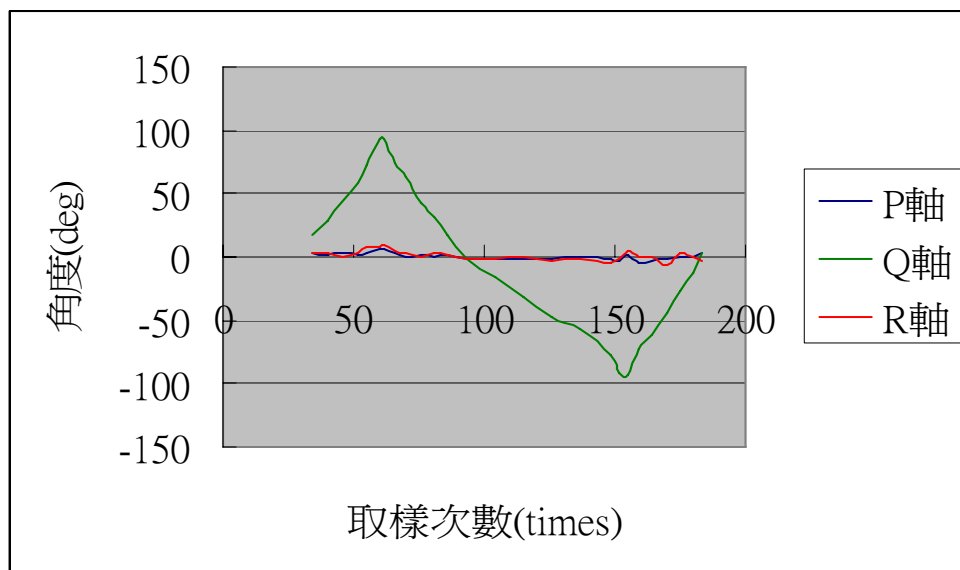


圖 4.27 Q 軸動態實驗結果

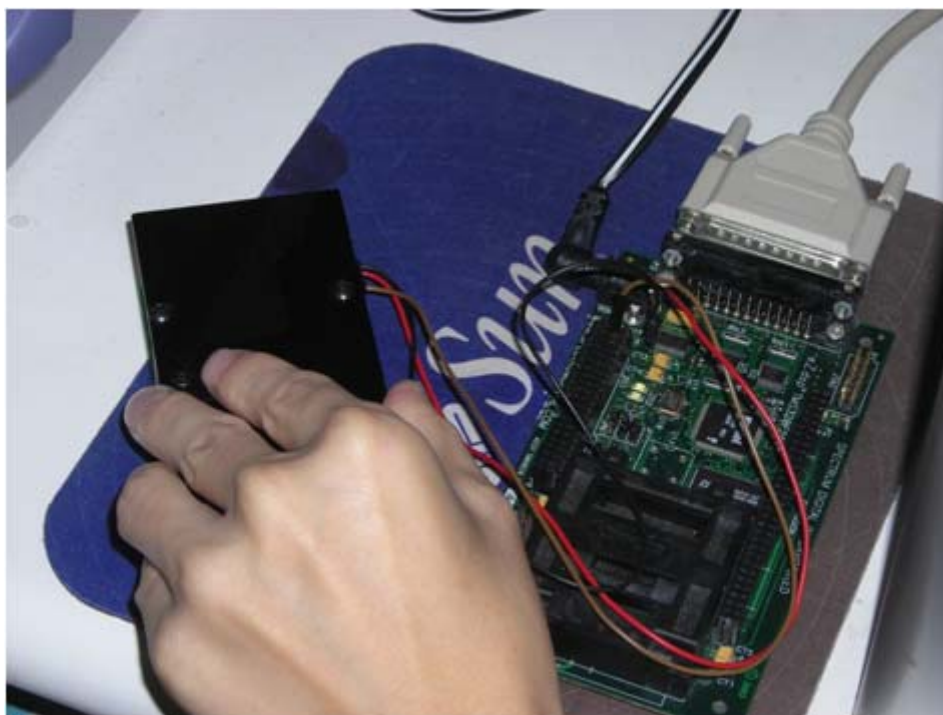


圖4.28 旋轉R軸實體圖

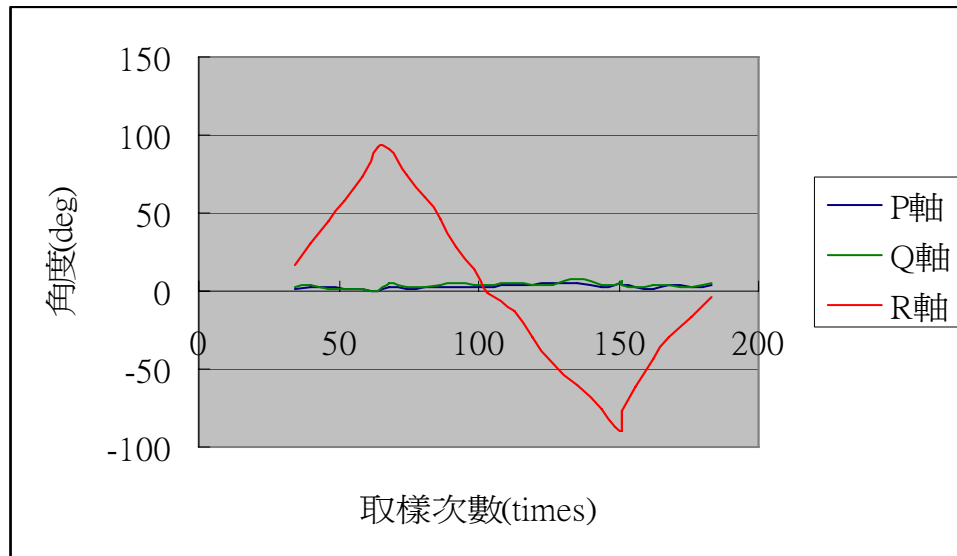


圖 4.29 R 軸動態實驗結果

經過實驗後，三軸於動作後回歸至原點時，有時會因誤差量，無法正確的歸零。其累積誤差的原因包括：陀螺儀姿態模組的信號誤差、取樣頻率與轉換精度，以及操作陀螺儀姿態模組有時會有碰撞效應，導致陀螺儀姿態模組的參考電壓改變，因此累積誤差等。

4.5.4 INS 動態測試和尤拉角轉換

在一開始靜止時（未轉動），假設初始座標為 $(1, 0, 0)$ ，透過尤拉角轉換，將實際轉動的角度轉換成座標，在 INS 動態測試中，把改變過後的座標設為 $(S1, S2, S3)$ ，測試結果說明如下：

（一）P 軸

(1)先轉到 90 度時，帶入公式可得 $(S1, S2, S3) = (0, 1, 0)$ ，實驗結果為圖 4.30：

◆ S1	-0.06193586	float
◆ S2	0.99808	float
◆ S3	0.0003546075	float

圖 4.30 P 軸轉到 90 度的座標

(2)再從 90 度轉回 0 度時，應該回到(1, 0, 0)，實驗結果為圖 4.31：

◆ S1	0.9989662	float
◆ S2	0.04545937	float
◆ S3	9.627986e-06	float

圖 4.31 P 軸轉回 0 度的座標

(3)從 0 度轉到-90 度，帶入公式中可得(S1, S2, S3)=(0, -1, 0)，

實驗結果為圖 4.32：

◆ S1	-0.05586213	float
◆ S2	-0.998434	float
◆ S3	-0.002995608	float

圖 4.32 P 軸轉到-90 度的座標

(4)從-90 度轉回到 0 度應回到 (1, 0, 0)，實驗結果為圖 4.33：

◆ S1	0.9969229	float
◆ S2	0.07835077	float
◆ S3	0.002460026	float

圖 4.33 P 軸轉回 0 度的座標

(二) Q 軸

(1)先轉到 90 度時，帶入公式中可得(S1, S2, S3)=(1, 0, 0)，

實驗結果為圖 4.34：

◆ S1	0.9861505	float
◆ S2	0.1047591	float
◆ S3	0.1285797	float

圖 4.34 Q 軸轉到 90 度的座標

(2)再從 90 度轉回 0 度時，應該回到 $(1, 0, 0)$ ，實驗結果為圖

4.35：

◆ S1	0.9979895	float
◆ S2	-0.06336925	float
◆ S3	0.001063316	float

圖 4.35 Q 軸轉回 0 度的座標

(3)從 0 度轉到-90 度，帶入公式中可得 $(S1, S2, S3) = (1, 0, 0)$ ，

實驗結果為圖 4.36：

◆ S1	0.9974805	float
◆ S2	-0.06422275	float
◆ S3	0.03013706	float

圖 4.36 Q 軸轉到-90 度的座標

(4)從-90 度轉回到 0 度應回到 $(1, 0, 0)$ ，實驗結果為：

◆ S1	0.9999833	float
◆ S2	0.004849009	float
◆ S3	-0.003133943	float

圖 4.37 Q 軸轉回 0 度的座標

(三) R 軸

(1)先轉到 90 度時，帶入公式中可得 $(S1, S2, S3) = (0, 1, 0)$ ，

實驗結果為圖 4.38：

◆ S1	-0.05454875	float
◆ S2	0.9984826	float
◆ S3	0.007561914	float

圖 4.38 R 軸轉到 90 度的座標

(2)再從 90 度轉回 0 度時，應該回到 $(1, 0, 0)$ ，實驗結果為圖 4.39：

◆ S1	0.9996165	float
◆ S2	0.02765796	float
◆ S3	-0.001398068	float

圖 4.39 R 軸轉回 0 度的座標

(3)從 0 度轉到-90 度，帶入公式中可得 $(S1, S2, S3) = (0, -1, 0)$ ，

實驗結果為圖 4.40：

◆ S1	0.06065408	float
◆ S2	-0.9907876	float
◆ S3	-0.1210832	float

圖 4.40 R 軸轉到-90 度的座標

(4)從-90 度轉回到 0 度應回到 $(1, 0, 0)$ ，實驗結果為圖 4.41：

◆ S1	0.9998368	float
◆ S2	0.01734935	float
◆ S3	-0.005053628	float

圖 4.41 R 軸轉回 0 度的座標

經過實驗後，三軸於動作後回歸至原點時，有時會因誤差量，無法正確的歸零。其累積誤差的原因包括，陀螺儀姿態模組的信號誤差、ADC 的取樣頻率與轉換精度，以及操作陀螺儀姿態模組有時會

有碰撞效應，導致陀螺儀姿態模組的參考電壓改變，導致累積誤差。

由座標變化可明顯看出精度還不錯，誤差都是很微小的，表示 GIMU 的準確度是不錯的。



第五章 GPS/INS 整合模擬實驗結果

5.1 座標系統簡介

一般常用在導航系統的座標分為三種：GPS的資料是世界地理座標(World Geodetic System 1984，WGS-84)系統。而DR方位推估法所推出的位置，是使用GIS地理座標系統。另一方面INS的系統使用ECEF(Earth Center Earth Fixed Coordinate Frame)座標系統。本研究使用的方法是把由GPS衛星所求出的經緯度座標值，轉換為X-Y 2D座標系統。再配合GIMU感測器所得到的累積值，並使用卡門濾波器(Kalman Filter)完成一整合GPS/INS的系統，以達到實際的整合應用。以下介紹最常用的三種座標系。

5.1.1 地固地心座標系 (ECEF)

地固地心(Earth Center Earth Fixed Coordinate Frame，ECEF)座標系為直角座標系，原點固定在地球球心，三軸各自相互垂直，也隨著地球旋轉。Z軸方向指向北極，X軸方向指向赤道面經度為0的地方。Y軸也是為在赤道面，分別與X、Z兩軸垂直，使用右手定則即可決定其方向如圖5.1所示。這個座標系的好處是方便計算，我們可以在座標系上任意取出兩點，即可計算兩點的直線距離。定義如下：

X軸：通過平均格林威治子午線(mean Greenwich Meridian)，並與國際時間校準局BIH(Bureau International del'Heure)定義的零子午線方向平行。

Z軸：與國際時間局BIH定義的傳統地極(Conventional Terrestrial Pole，CTP)方向平行。

Y軸：與X、Z軸成正交。

5.1.2 世界地理座標 (WGS-84)

世界地理座標(World Geodetic System 1984, WGS-84)也是固定球心的座標，但不同的是它以橢圓球體(Geocentric ellipsoid of revolution)來定義。三軸分別代表經度(Longitude)、緯度(Latitude)和高度(Height above ellipsoid)，如圖5.1所示。WGS-84和ECEF最大的不同是，前者為橢球座標系，後者為直角座標系。

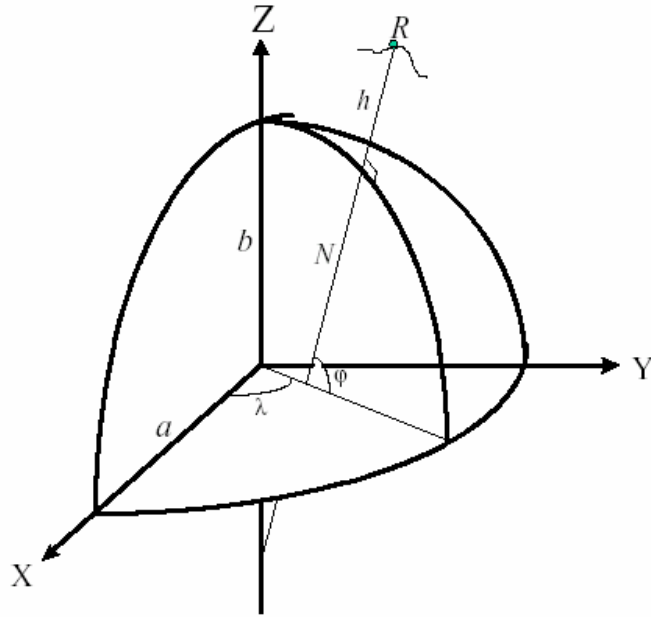


圖5.1 WGS-84橢球座標與直角座標的關係圖

有關直角座標 (X, Y, Z) ，與橢球座標 (φ, λ, h) 的轉換公式敘述於後。包含橢球座標 (φ, λ, h) 與直角座標 (X, Y, Z) 的轉換公式，及直角座標 (X, Y, Z) 與橢球座標 (φ, λ, h) 的轉換公式。

(1) 橢球座標 (φ, λ, h) 與直角座標 (X, Y, Z) 的轉換公式：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ (N+h)\cos\varphi\sin\lambda \\ (\frac{b^2}{a^2}N+h)\sin\varphi \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

其中

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2\cos^2\varphi + b^2\sin^2\varphi}} \quad (5.2)$$

φ ：經度

λ : 緯度

h : 地表到接收機距離

N : 地心到地表的距離

a : 橢圓球體的長軸

b : 橢圓球體的短軸

(2) 直角座標(X, Y, Z)與橢球座標 (φ, λ, h) 的轉換公式：

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{Z + e^2 b \sin^3 \theta}{p - e^2 a \cos^3 \theta} \\ \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ \frac{p}{\cos \varphi} - N \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

其中

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (5.4)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (5.5)$$

φ : 經度

λ : 緯度

h : 地表到接收機距離

N : 地心到地表的距離

a : 橢圓球體的長軸



b :橢圓球體的短軸

依照TWD 97規格定義 $a=6378137\text{m}$ ， $b=6356752.314\text{m}$

5.1.3 X-Y 2D座標系統

X-Y 2D座標系統就是將參考橢球體上的經緯度位置，利用地圖投影的方式投影到一平面，用來表示點位間於平面空間關係的二維座標。因此每一種地圖投影方法都會產生變形，但也都保持某種特性。

TWD97座標基準投影方式，即為橫麥卡托投影經差二度分帶，以間隔經度每差兩度的區域，為一投影帶進行投影，得到的投影座標，簡稱為二度TM座標。橫麥卡托投影，屬於一種包持形狀投影法(Conformal Projection)，即在小面積區域中，距離與方向保持相似。就幾何意義上來看，可假想用一個橫橢球圓柱套在地球橢球體外面，並與某一子午線相切(此子午線即為中央經線)，橢球圓柱的中心軸位於橢球的赤道上。投影後原橢球面上的中央經線、距中央經線九十度的經線，與赤道在投影面上為直線。由於沿著其中央經線的投影尺度可維持一個常數，所以適合南北狹長的地區，台灣本島即屬於此種地形，而本研究也就是使用此種座標系統。

以下將介紹經緯 (ϕ, λ) 轉成 (X, Y)座標，及由(X, Y)轉成 (ϕ, λ) 座標公式，如下(5.6)~(5.9)式【24、25】。

(1) 橫麥卡托投影一般公式 (ϕ, λ) 轉 (X, Y)

$$Y = \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} & B(\varphi) + \frac{t}{2} N \cos^2 \varphi L^2 + \frac{t}{24} N \cos^4 \varphi (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) L^4 \\ & + \frac{t}{720} N \cos^6 \varphi (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2) L^6 \\ & + \frac{t}{40320} N \cos^8 \varphi (1385 - 3111t + 543t^4 - t^6) L^8 + \dots \end{aligned}$$

$$X = \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} & N \cos \varphi L + \frac{1}{6} N \cos^3 \varphi (1 - t^2 + \eta^2) L^3 \\ & + \frac{1}{120} N \cos^5 \varphi (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2) L^5 \\ & + \frac{1}{5040} N \cos^7 \varphi (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) L^7 + \dots \end{aligned}$$

符號說明：B(φ) = 緯度處之子午圈曲率半徑

$$N = \frac{a^2}{b\sqrt{1+\eta^2}} : \text{緯度處之卯酉圈曲率半徑}$$

$$\eta^2 = (e^t)^2 \cos^2 \varphi$$

$$e^t = \sqrt{\frac{(a^2 - b^2)}{b^2}}$$

$$t = \tan \varphi$$

$$L = \lambda - \lambda_0$$

$$\lambda_0 = \text{中央子午線}$$

其中：B(φ) = α[φ + β sin 2φ + γ sin 4φ + δ sin 6φ + ε sin 8φ + ...]

其它變數分述如下：

$$\alpha = \frac{a+b}{2} (1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 + \dots)$$

$$\beta = -\frac{3}{2}n + \frac{9}{16}n^3 - \frac{3}{32}n^5 + \dots$$

$$\gamma = \frac{15}{16}n^2 - \frac{15}{32}n^4 + \dots$$

$$\delta = -\frac{35}{48}n^3 + \frac{105}{256}n^5 - \dots$$

$$\epsilon = \frac{315}{512}n^4 + \dots$$

$$n = \frac{a-b}{a+b}$$

(2) 橫麥卡托投影一般公式 (X, Y) 轉 (ϕ , λ)

$$\phi = \quad (5.8)$$

$$\phi_1 - (N_1 \frac{\tan \phi_1}{R_1}) [\frac{D^2}{2} - (5 + 3T_1 + 10C_1 - 4C_1^2 - 9e'^2) \frac{D^4}{24} + (61 + 90T_1 + 298C_1 + 45T_1^2 - 252e'^2 - 3C_1^2) \frac{D^6}{720}]$$

$$\lambda = \quad (5.9)$$

$$\lambda_0 + [D - (1 + 2T_1 + C_1) \frac{D^3}{6} + (5 - 2C_1 + 28T_1 - 3C_1^2 + 8e'^2 + 24T_1^2) \frac{D^5}{120}] / \cos \phi_1$$

符號說明如下：

$$\phi_1 = \mu + (\frac{3e_1}{2} - \frac{27e_1^3}{32} + \dots) \sin 2\mu + (\frac{21e_1^2}{16} - \frac{55e_1^4}{32} - \dots) \sin 4\mu + (\frac{151e_1^3}{96} + \dots) \sin 6\mu + \dots$$

$$e_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{1 + \sqrt{1 - e^2}}$$

$$\mu = M / [a(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} - \dots)]$$

$$M = M_0 + \frac{Y}{k_0}$$

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

$$C_1 = e'^2 \cos^2 \phi_1$$

$$T_1 = \tan^2 \phi_1$$

$$N_1 = \frac{a}{\sqrt{1 - e'^2 \sin^2 \phi_1}}$$

$$R_1 = \frac{a(1 - e'^2)}{\sqrt[3]{1 - e'^2 \sin^2 \phi_1}}$$

$$D = \frac{X}{N_1 k_0}$$

$$k_0 = 0.9999$$

$$a = 6378137m$$

$$b = 6356752.314m$$

由 (ϕ, λ) 轉 (X, Y) 之後，由於此座標系統的Y軸為中央經度線121度處，所以會使得有左半部分地區位在第二象限平面，即X值為負值。故將Y軸西移250000公尺，可以使X軸和Y軸同為正值，也可簡稱為二度TM座標系統。因以虎子山為大地基準點，故又泛稱為虎子山座標系統，也是台灣現今地籍量測所使用的座標系統，如圖5.2所示。

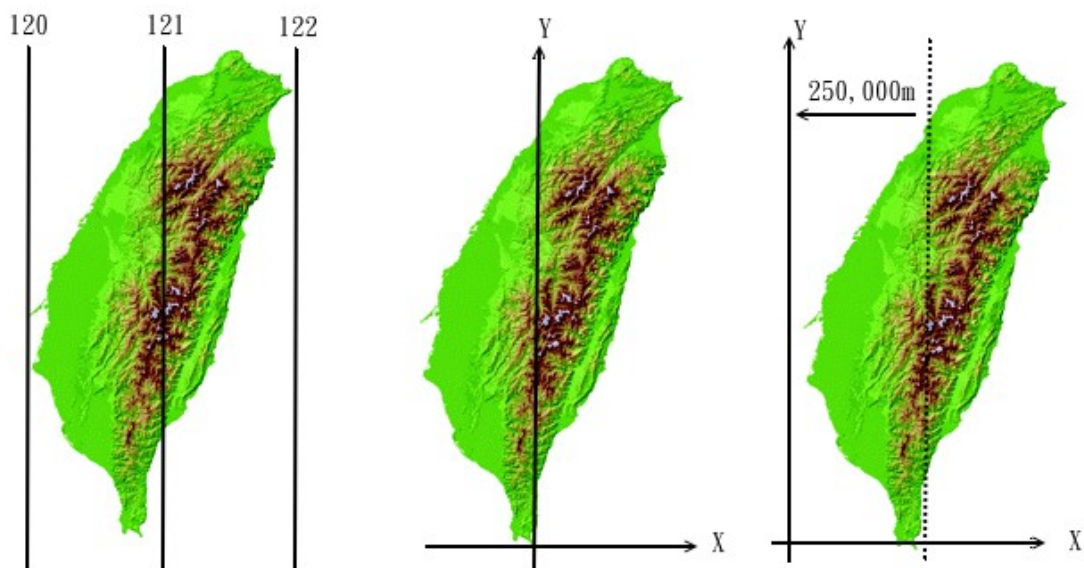


圖5.2 台灣地區TM 2度座標系統示意圖

5.2 卡門濾波器 (Kalman Filter)

卡門濾波器(Kalman Filter)【26~28】為一種最佳化狀態估測，主要是用在有隨機雜訊的動態系統。卡門濾波器的理論介紹如下：

考慮一個數位化的系統如下：

$$\text{系統狀態方程式(State Equation): } x_k = A_{k-1}x_{k-1} + w_{k-1} \quad (5.10)$$

$$\text{量測方程式(Measurement Equation): } z_k = H_k x_k + v_k \quad (5.11)$$

其中 w_k 為系統雜訊， v_k 為量測雜訊，在此可將 w_k 、 v_k 視為白色雜訊。並由系統雜訊 w_k 和量測雜訊 v_k ，分別定義出系統雜訊的共變異矩陣(Covariance Matrix) Q_k ，和量測雜訊的共變異矩陣 R_k ，其中

$$\begin{aligned} E[w_k w_i^T] &= Q_k, & i &= k \\ E[w_k w_i^T] &= 0 & i &\neq k \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} E[v_k v_i^T] &= R_k, \quad i = k \\ E[v_k v_i^T] &= 0, \quad i \neq k \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$E[w_k v_k^T] = 0 \quad (5.14)$$

藉由量測方程式，在k時刻估測出最佳的狀態變數向量 x_k (即 \hat{x}_k)，其估測轉變及效果可由估測誤差共變異矩陣來判定：

$$P_k = E\left\{ \left[x_k - \hat{x}_k \right] \left[x_k - \hat{x}_k \right]^T \right\} \quad (5.15)$$

本研究的目的是要由估測前的狀態 $x_k(-)$ ，已知的觀測量 z_k ，系統雜訊共變異矩陣 Q_k ，及量測共變異矩陣 R_k ，來求出最佳的卡門增益值 K_k ，繼而得出最佳的狀態估測值 $x_k(+)$ ，使得 P_k 有最小值。卡門濾波器的遞迴運算公式如下(5.16)~(5.20)式。

$$\text{Error covariance extrapolation: } P_k(-) = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (5.16)$$

$$\text{Kalman gain matrix: } K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (5.17)$$

$$\text{Error covariance update: } P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-) \quad (5.18)$$

State estimate observation update:

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k \left[z_k - H_k \hat{x}_k(-) \right] \quad (5.19)$$

$$\text{其中 } \hat{x}_k(-) = A_k \hat{x}_{k-1}(+) \quad (5.20)$$

卡門濾波器運算方塊，如圖5.3所示。

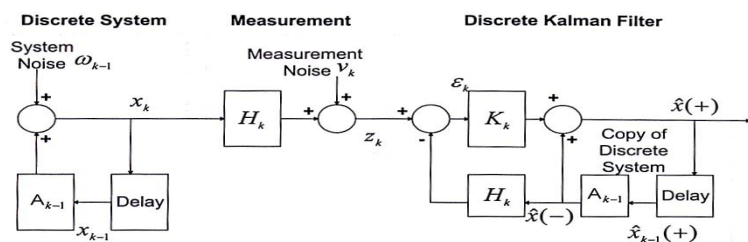


圖5.3 卡門濾波器運算方塊圖

藉由下列遞迴演算法，即可求出最佳的狀態估測值【29】：

步驟一：定義系統初始值 $\hat{x}_0(+)$ 、 $P_0(+)$ 、 Q_k 、 R_k

步驟二：量測訊號未進入系統前的狀態外插估測

$$\hat{x}_k(-) = A_k \hat{x}_{k-1}(+) \quad (5.21)$$

$$P_k(-) = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (5.22)$$

步驟三：從量測系統中得到量測值 z_k

步驟四：計算卡門濾波器增益值，修正後之狀態共變異矩陣，並更新狀態估測值

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (5.23)$$

$$P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-) \quad (5.24)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - H_k \hat{x}_k(-)]$$

5.3 卡門濾波器模擬實驗結果

本程式使用迴圈進行 1000 次的重複計算，取樣間隔為 0.05 秒。

寫完程式以後編譯，並進入 MSDOS 模式下將程式重新導向為.csv 格式檔案，方便使用 MS Excel 製作圖表。並以模擬的高精度 GPS 積分

計算加上模擬雜訊混合信號進行性能評估。

圖 5.4 為顯示未經過校正的 INS 測試結果圖，縱軸代表位置，速度及加速度，INS 輸出信號的大小，橫軸代表執行運算的次數，每一張圖表皆為執行 1000 次計算的結果，乘上取樣週期（0.05 秒），即為執行秒數，可以發現 INS 數據發散得非常嚴重，需要 GPS 的輔助。

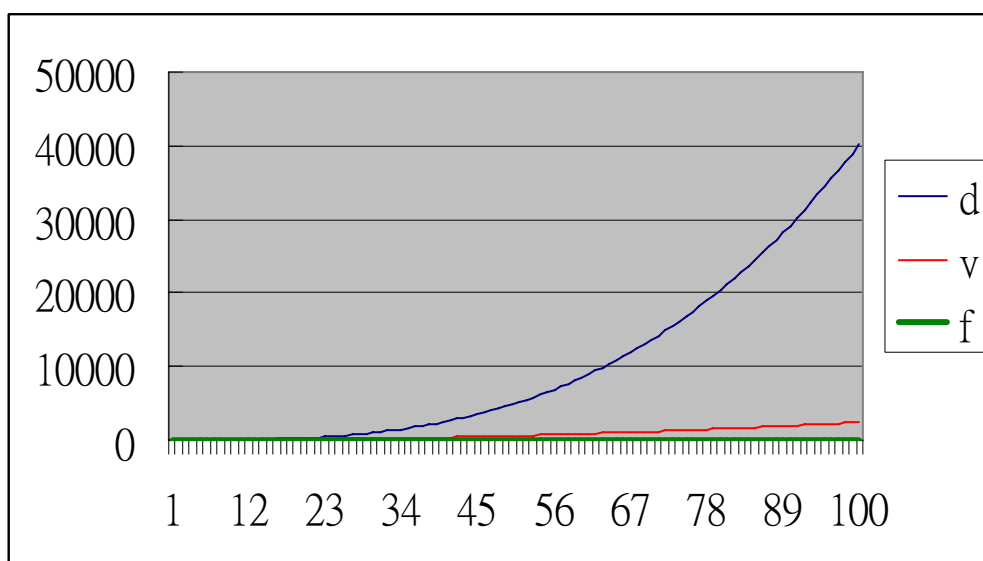


圖 5.4 未經過校正的 INS 測試結果圖（有發散情況）

接著開啟卡門濾波器程式，模擬一高精度 GPS 位置及速度值，來做整合，最後產生收斂的結果，如圖 5.5~5.12 所示。

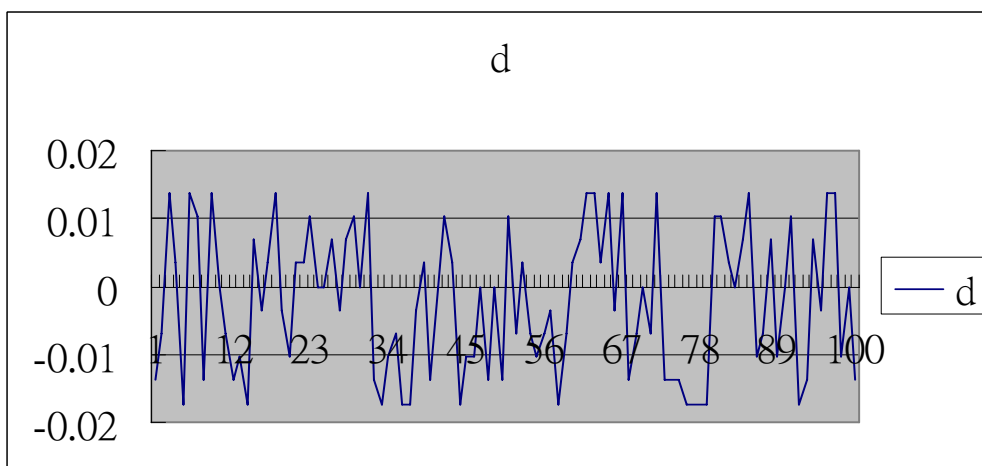


圖 5.5 模擬 GPS 的訊號位置

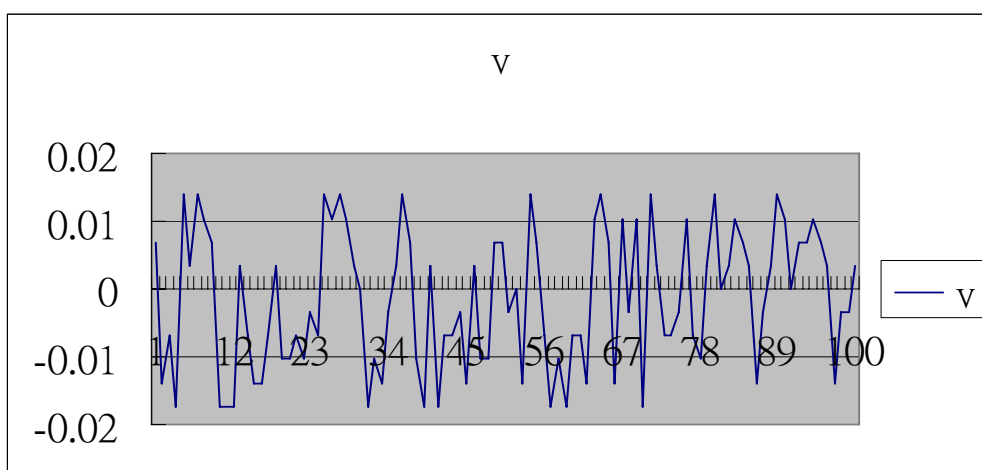


圖 5.6 模擬一速度值

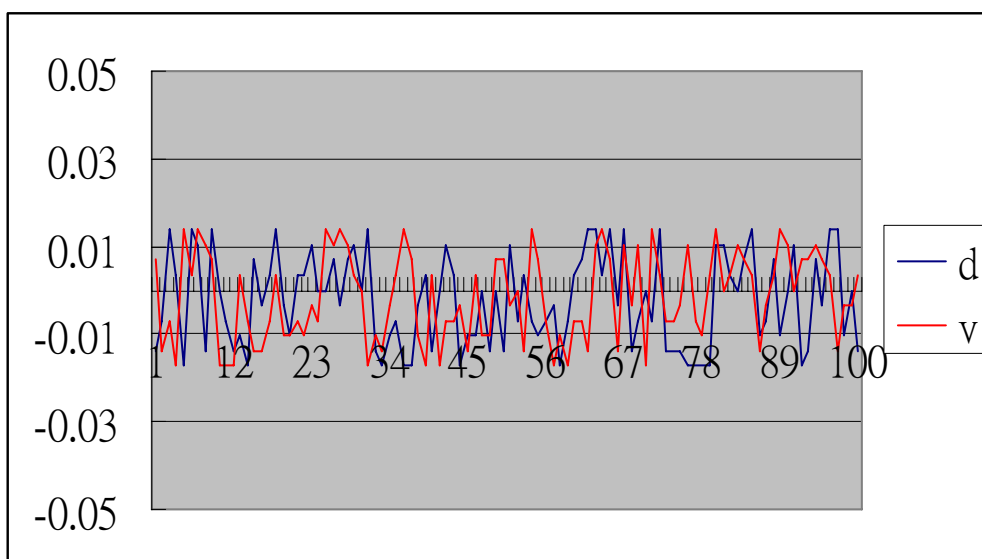


圖 5.7 模擬 GPS 的訊號位置及速度

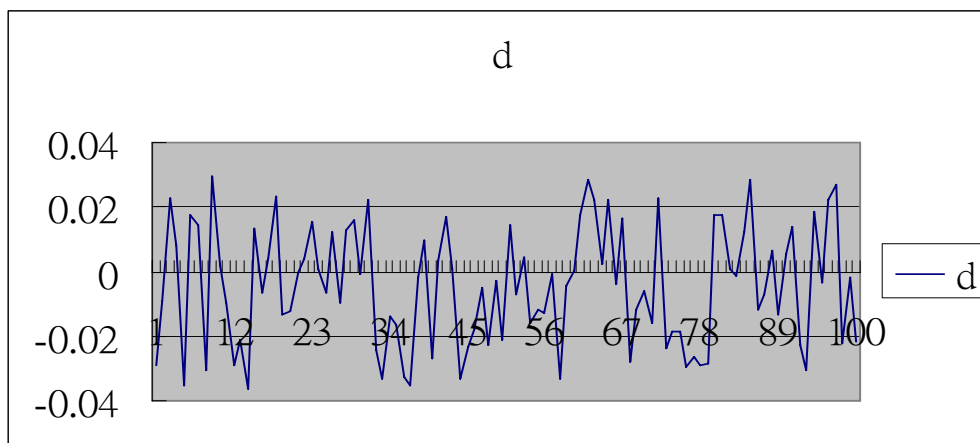


圖 5.8 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖

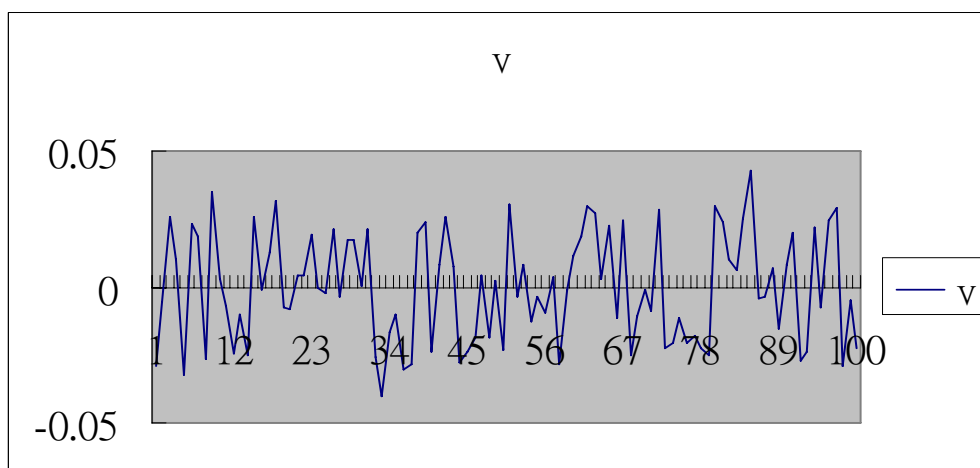


圖 5.9 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之速度圖

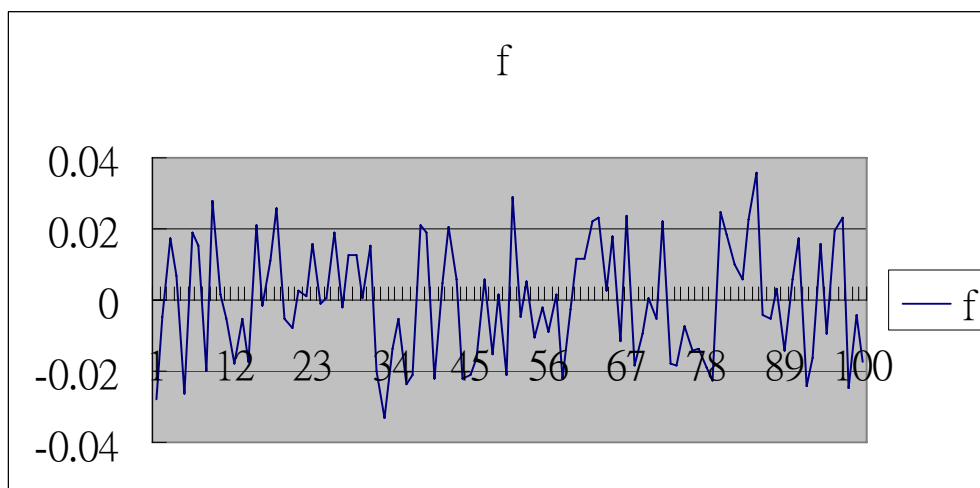


圖 5.10 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之加速度圖

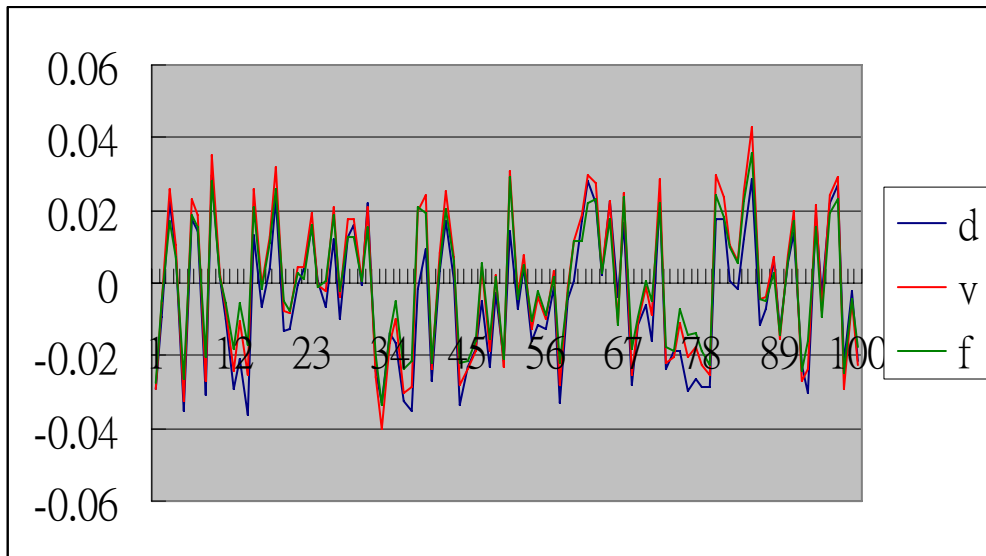


圖 5.11 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置、速度、加速度圖

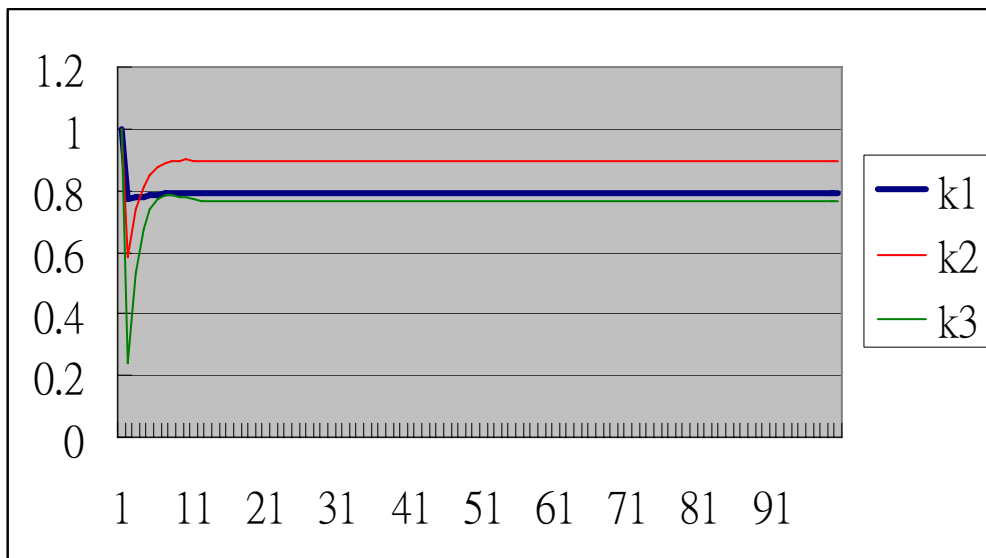


圖 5.12 k1~k3 的圖

原本模擬次數是設定為 1000 次，接著將模擬次數調高到 3000 次
來看看會否和 1000 次相類似，或有些什麼現象。如圖 5.13~5.21 所示。

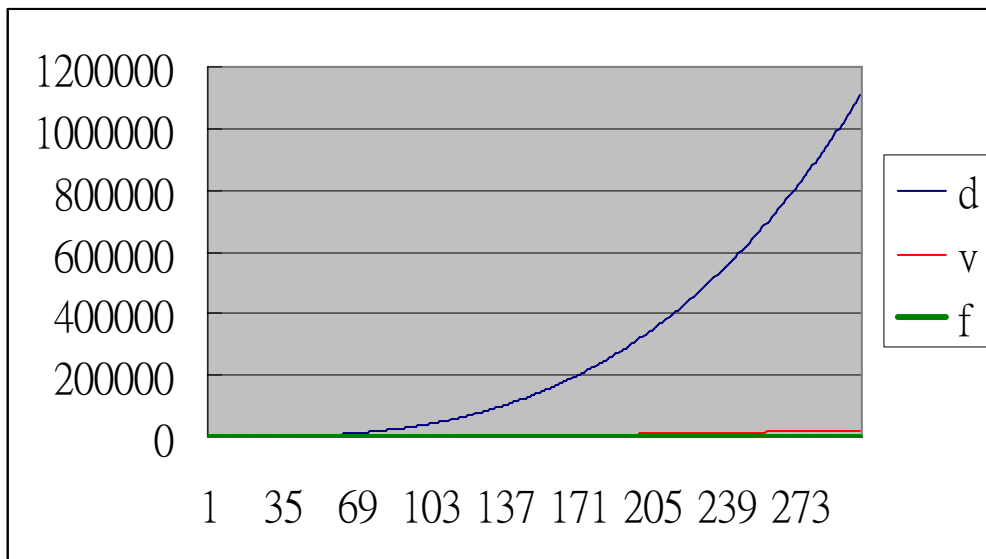


圖 5.13 未經過校正的 INS 測試結果圖（還是有發散情況）

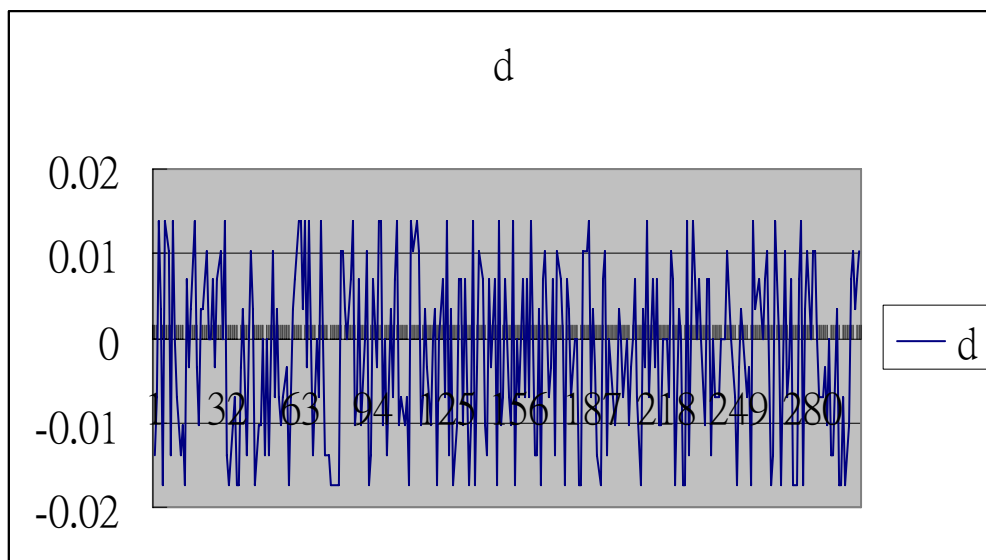


圖 5.14 模擬 GPS 的訊號位置

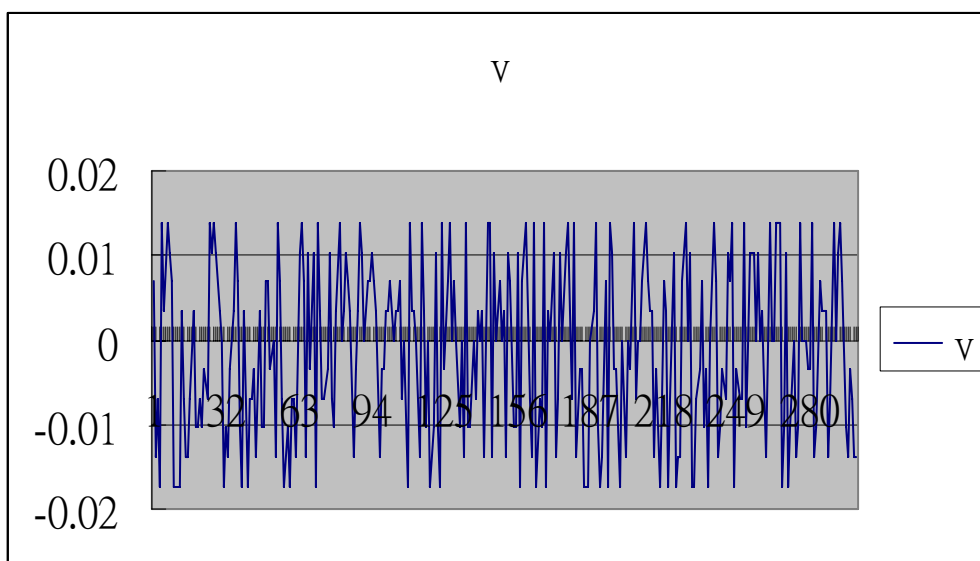


圖 5.15 模擬一速度值

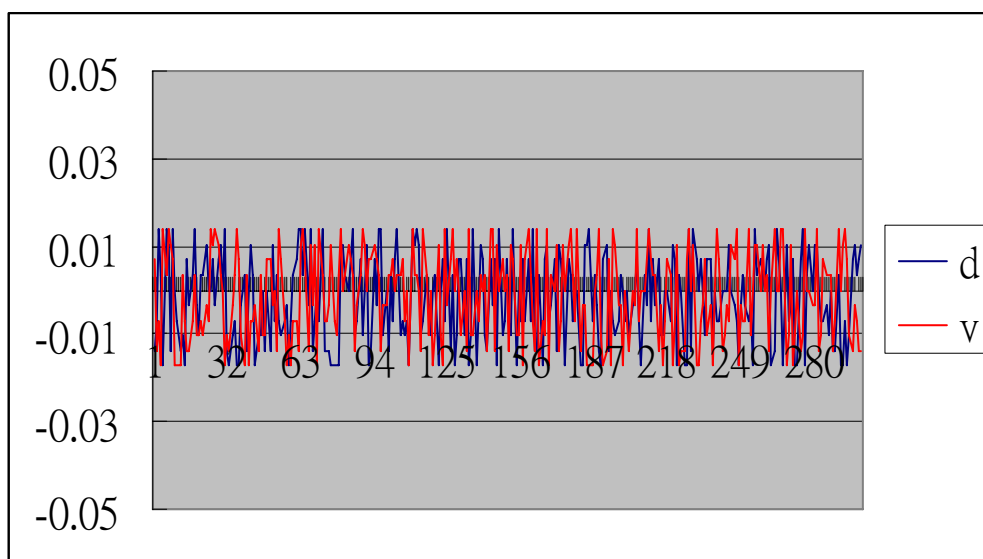


圖 5.16 模擬 GPS 的訊號位置及速度

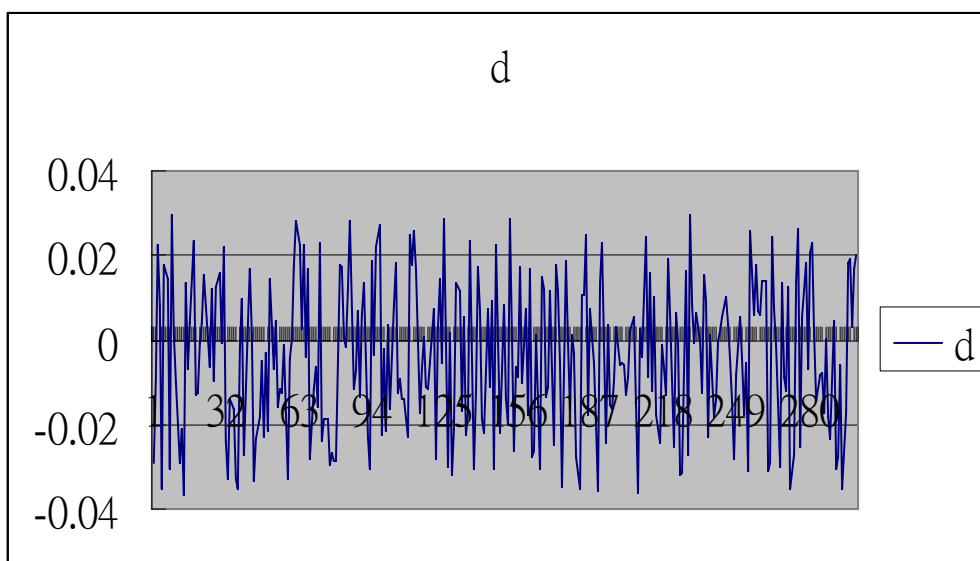


圖 5.17 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖

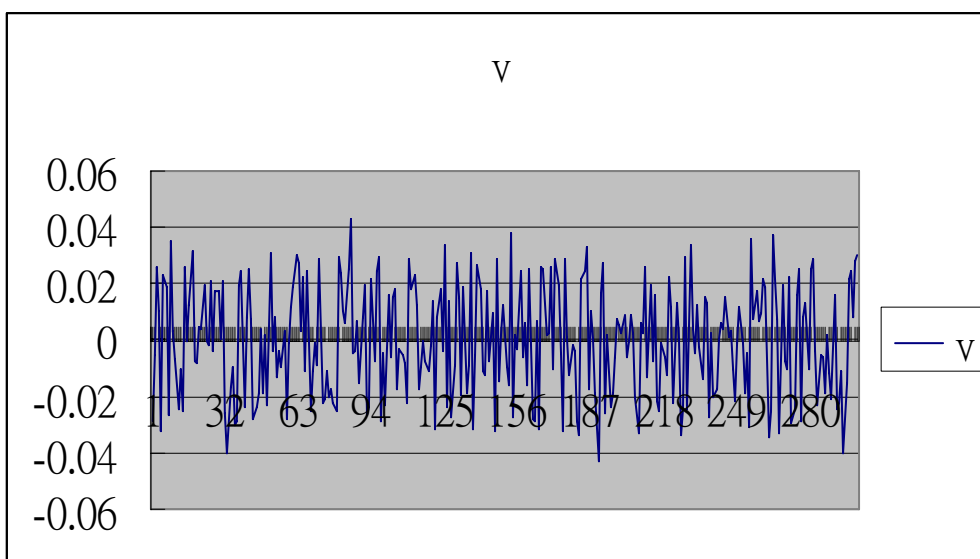


圖 5.18 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之速度圖

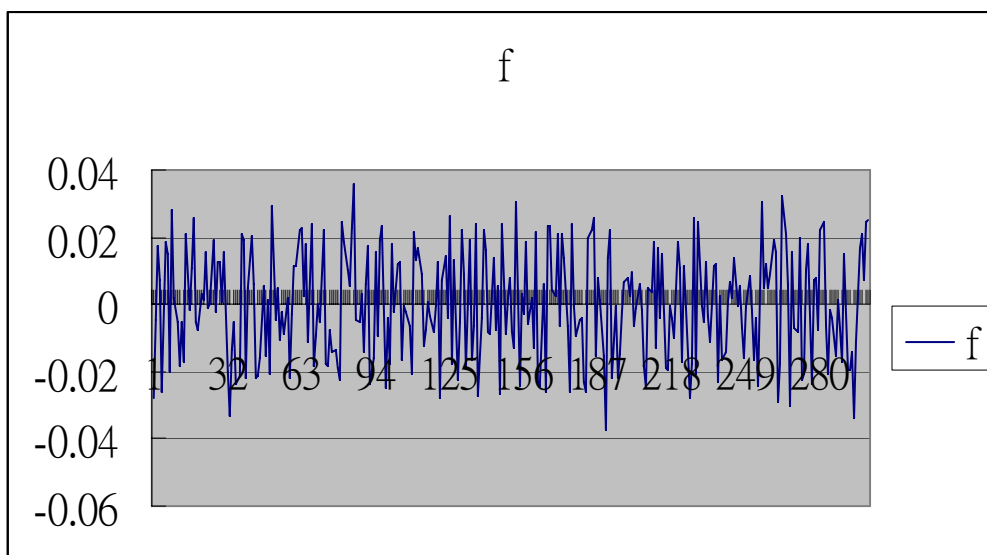


圖 5.19 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之加速度圖

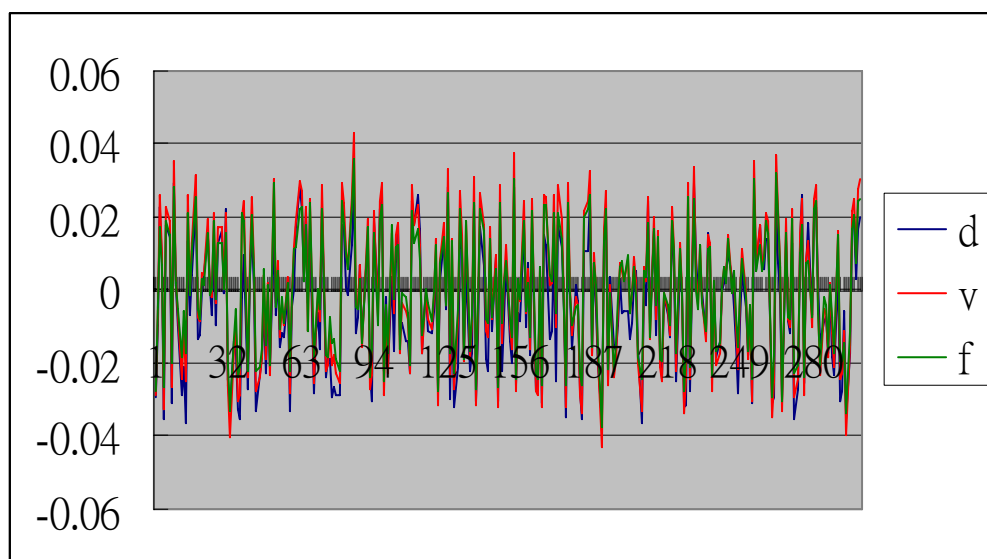


圖 5.20 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置、速度、加速度圖

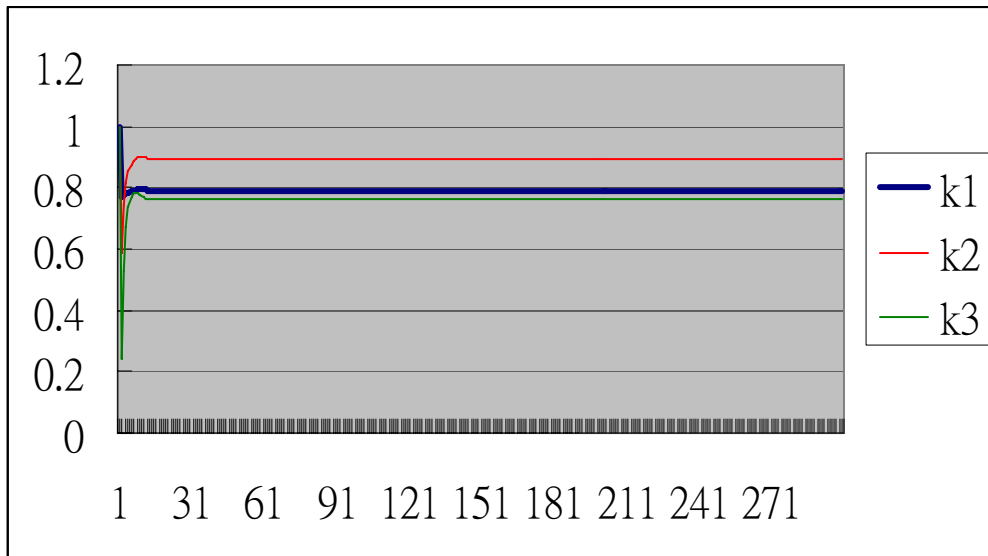


圖 5.21 k1~k3 的圖

當次數增加代表開啟卡門程式的時間也跟著增加，由實驗結果來看，長時間的進行，依然可以保持著收斂的狀態，表示卡門程式效果是還不錯的。最後試著把模擬訊號放大 10 倍來看看，是否因為訊號量變大，而影響了結果，如圖 5.22~5.30 所示。

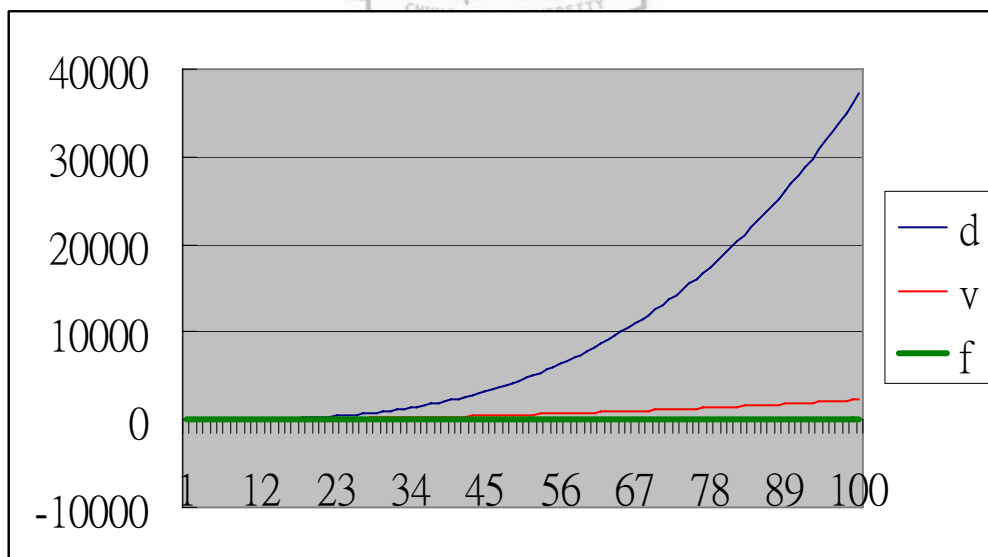


圖 5.22 未經過校正的 INS 測試結果圖（仍然有發散情況）

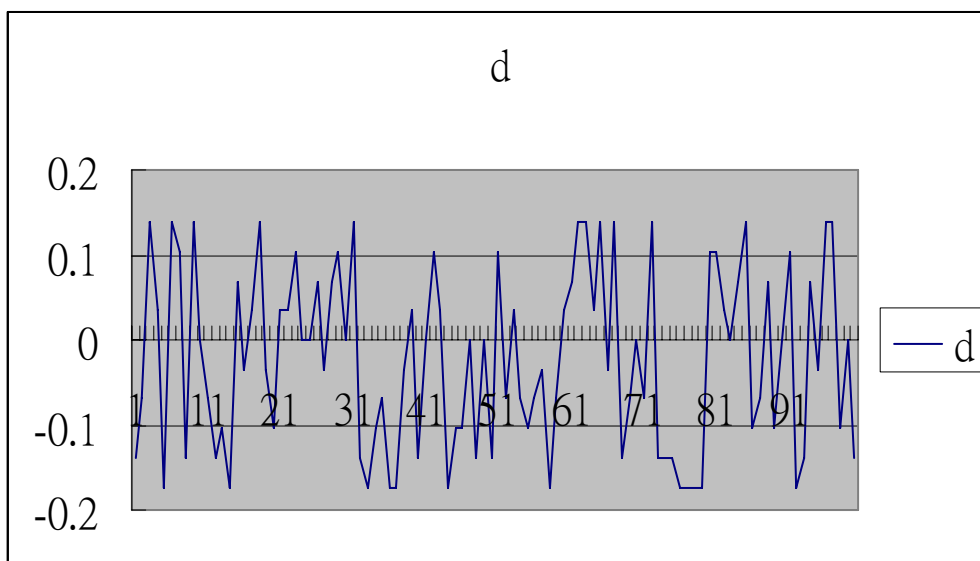


圖 5.23 模擬 GPS 的訊號位置

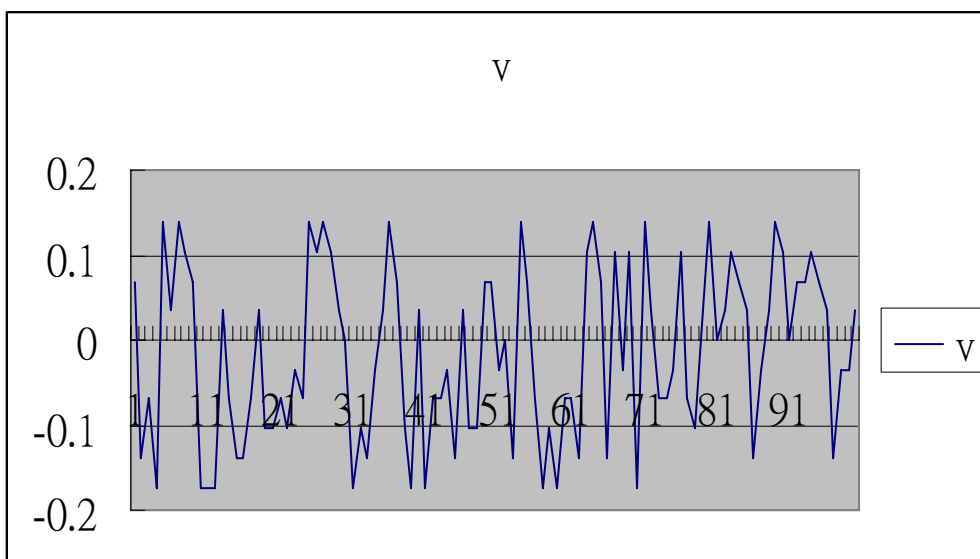


圖 5.24 模擬一速度值

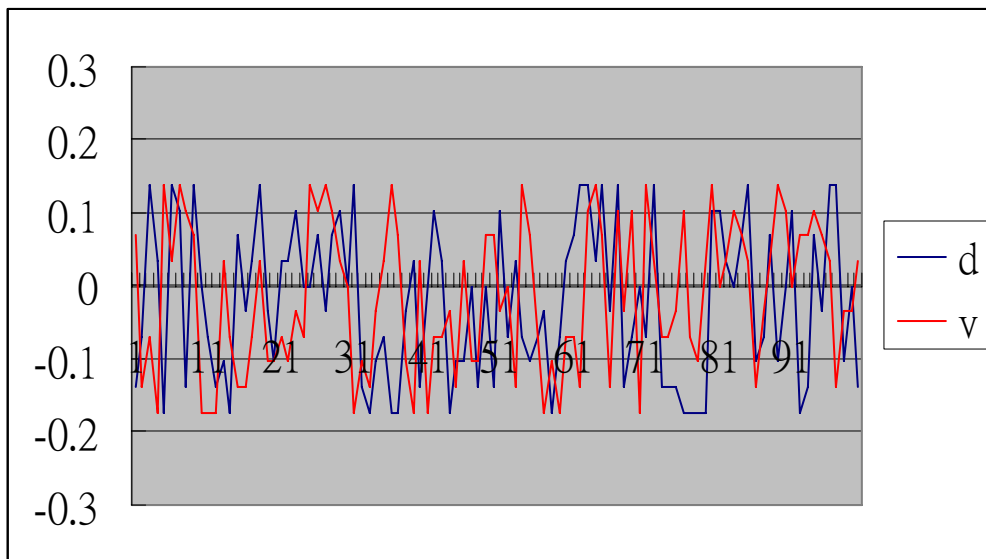


圖 5.25 模擬 GPS 的訊號位置及速度

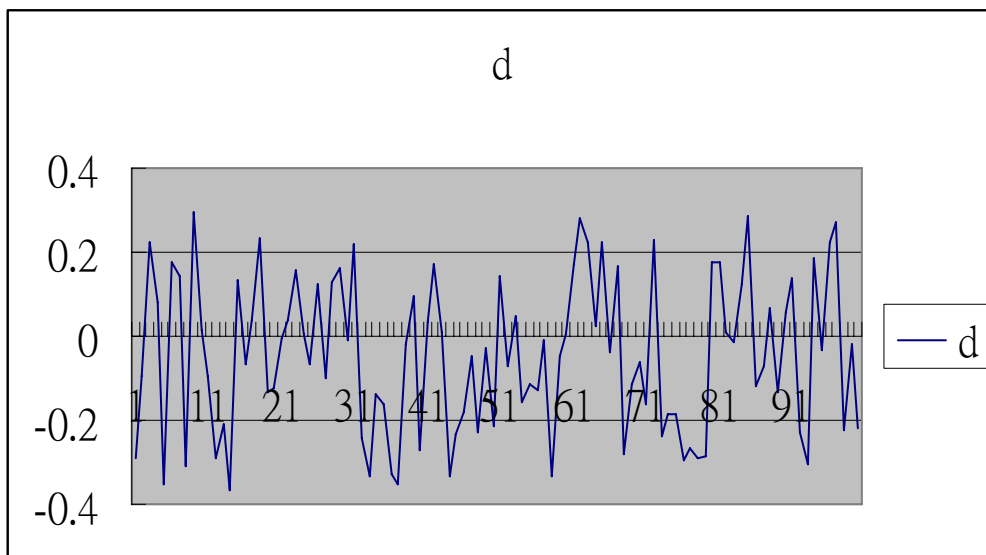


圖 5.26 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖

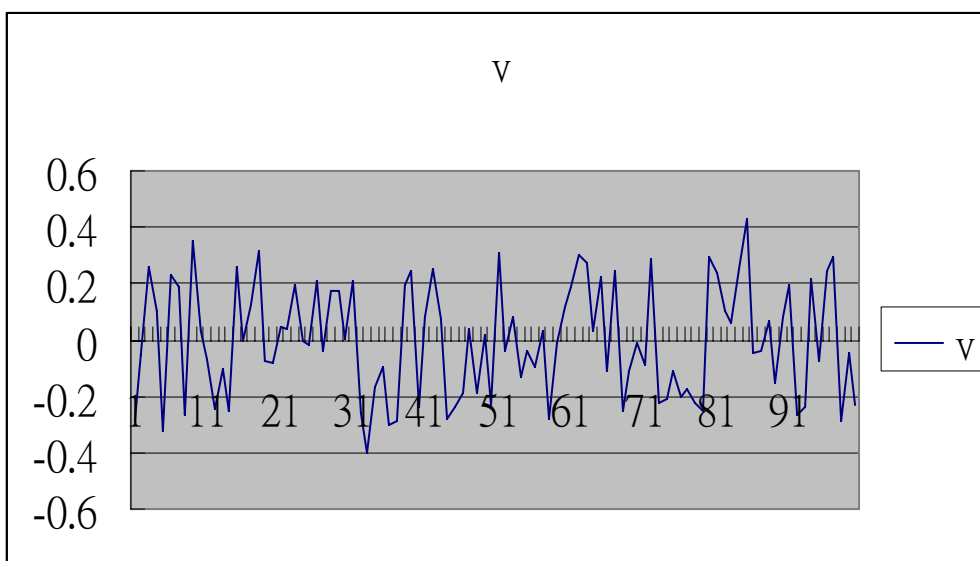


圖 5.27 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之速度圖

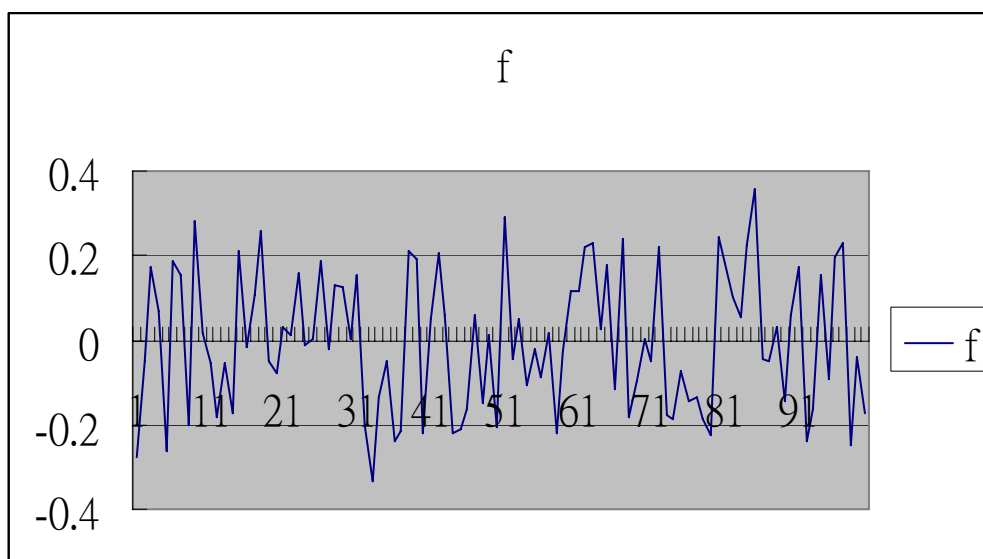


圖 5.28 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之加速度圖

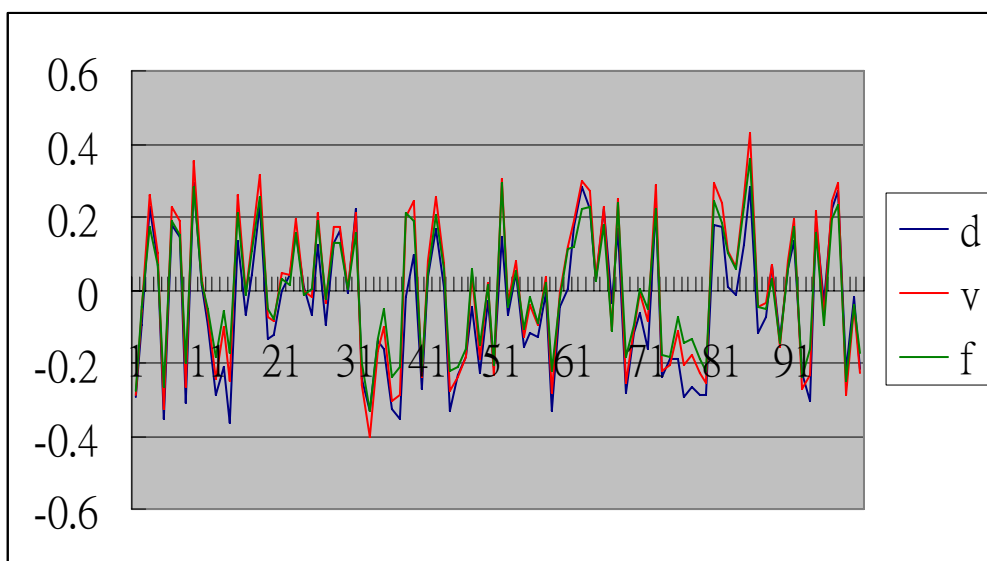


圖 5.29 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置、速度、加速度圖

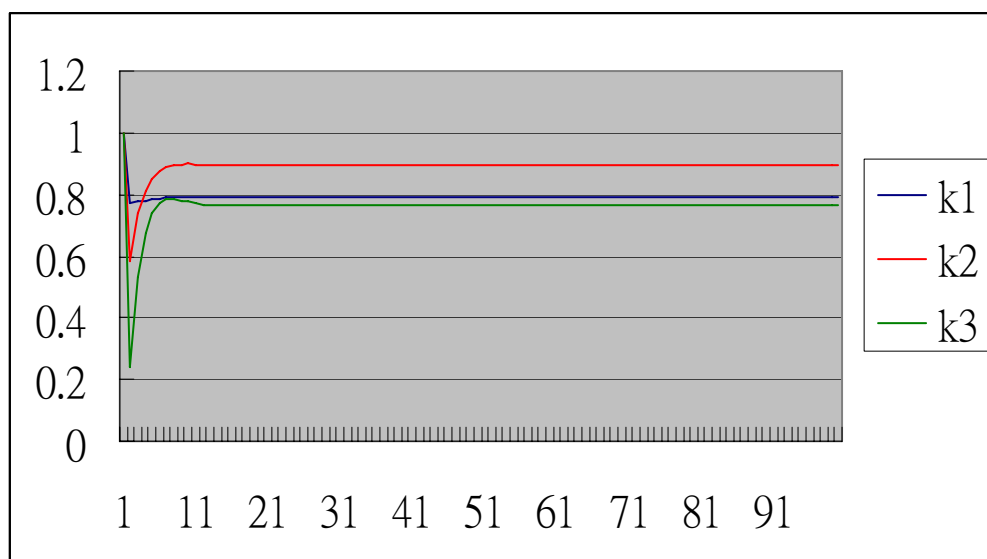


圖 5.30 k1~k3 的圖

當模擬訊號增加的情況下，開啟卡門程式之後沒有因為訊號過大而發散，由實驗結果來看，還是可以保持收斂的狀態，代表卡門程式是有發揮效果的。

而由圖 5.4~5.30 可以發現，原先未經過 GPS 校正整合的 INS 數據，會隨著時間的增加，誤差不斷累積，最後就會使載具的定位偏離

原先位置甚遠。但是在經過輸入 GPS 信號進行校正，即加入卡門濾波器的整合修正信號之後，誤差發散程度就明顯受到控制，不再隨著時間不停累積誤差。中途只要收得到 GPS 資料，就有辦法降低誤差，得到較為精確的導航數據。

5.4 GPS/INS 及卡門濾波器整合實作

藉由上一節的模擬實驗結果可知卡門濾波器是有發揮效果的，接著將模擬的訊號換成 GIMU，透過感測器實際情況來看開啟卡門程式前後有何差別，及所顯示出的狀態為何。操作步驟同第四章實驗，只是多了卡門濾波器。

在未開啟卡門程式前，INS 的位置會有發散的情況，如圖 5.31。

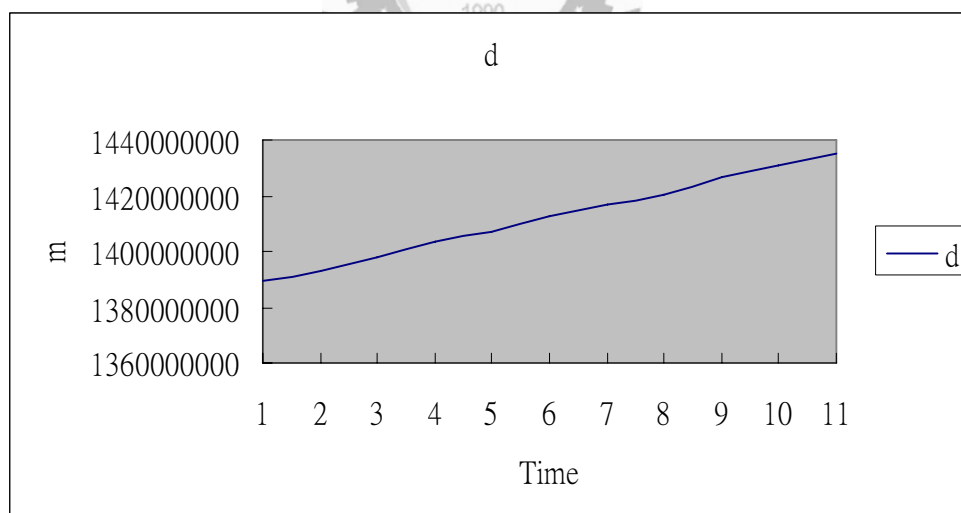


圖 5.31 未經過校正的 INS 測試結果圖（依然有發散情況）

開啟卡門程式後，漸漸會發揮效用。當 INS 逐漸要發散時，卡門程式會作一個拉回的動作，使它不會發散出去，等到下一次逐漸要發散出去時，它又會在一次將其拉回，就這樣變成一迴圈的形式，使其

能夠收斂而不會發散，如圖 5.32。

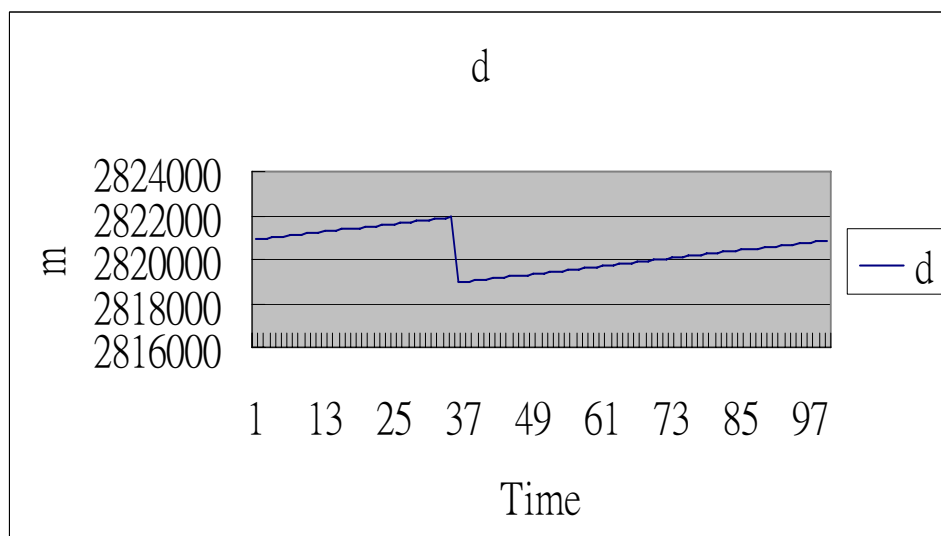


圖 5.32 開啟卡門程式後 GPS/INS 整合後之位置圖

以下是開啟卡門程式後的一些參數圖，呈現收斂的狀態，如圖

5.33~5.38 所示。

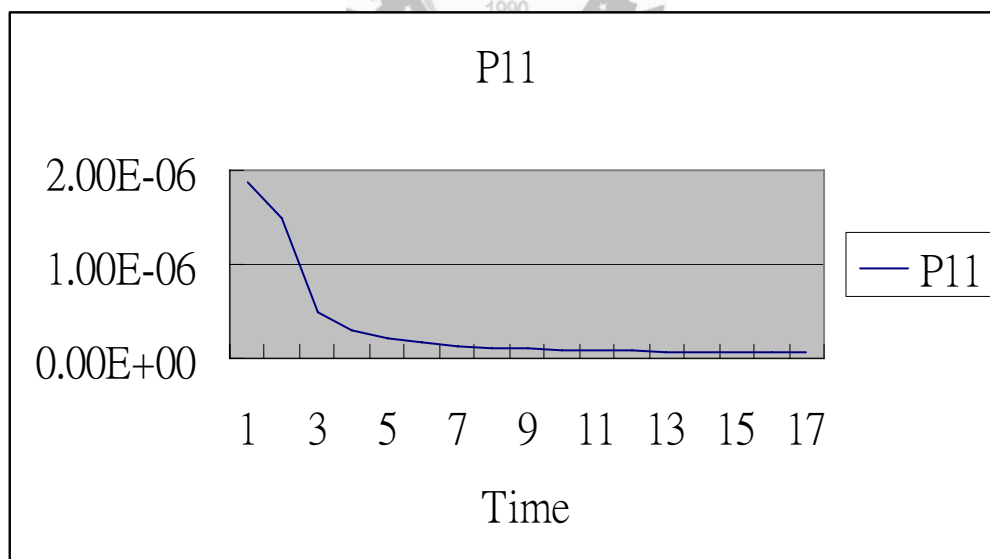


圖 5.33 P11 的圖

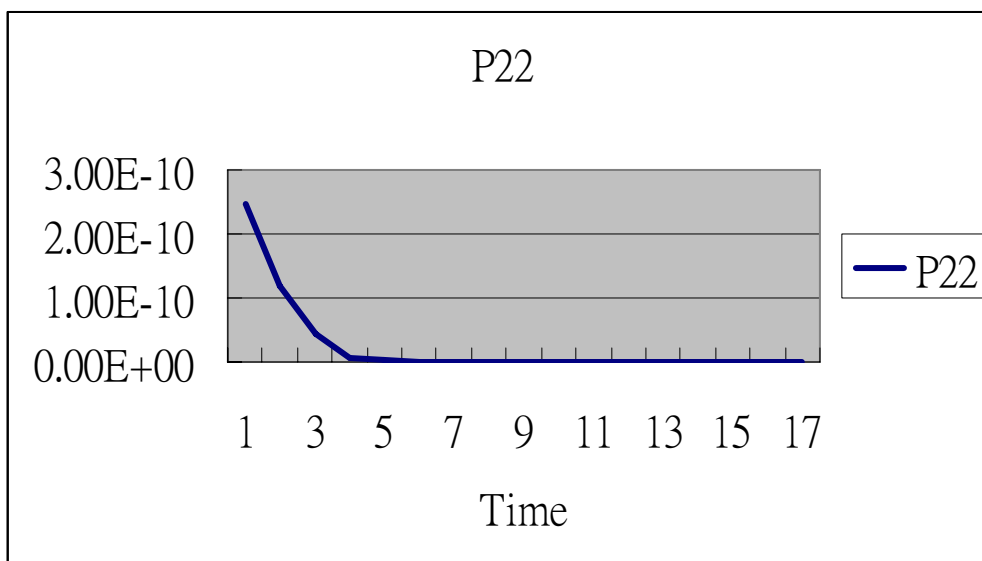


圖 5.34 P22 的圖

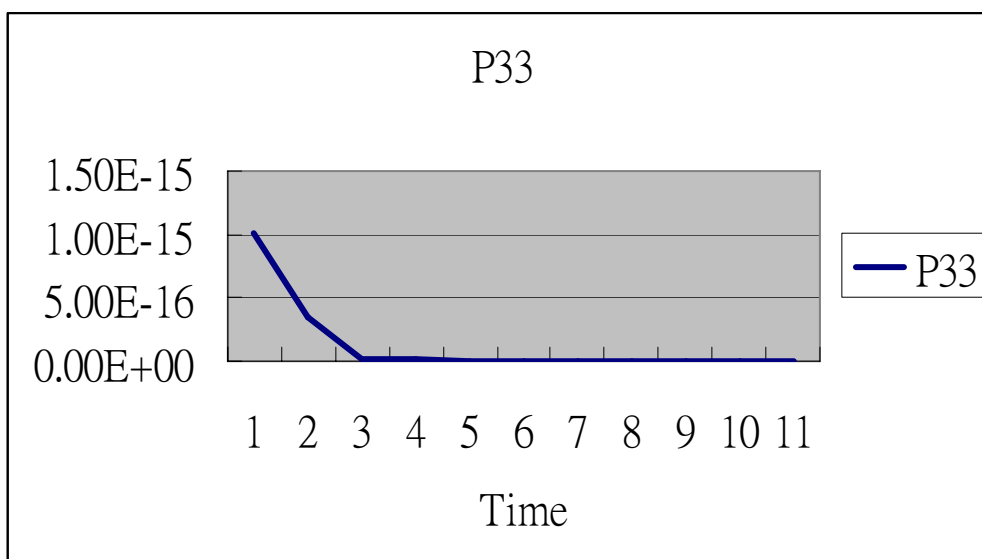


圖 5.35 P33 的圖

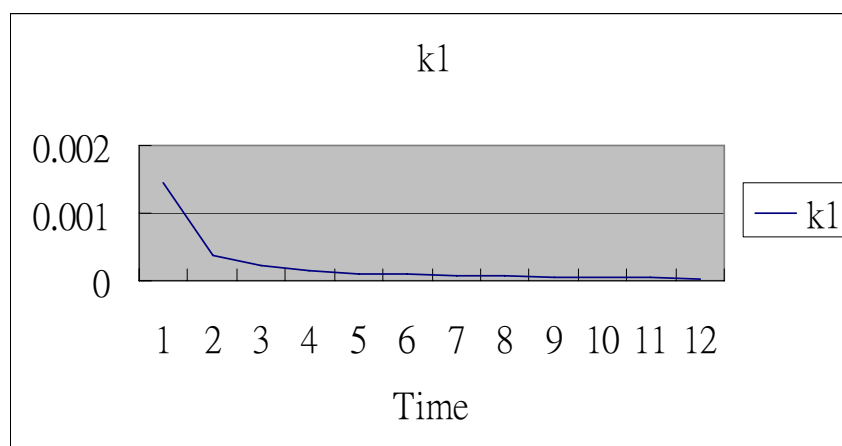


圖 5.36 k1 的圖

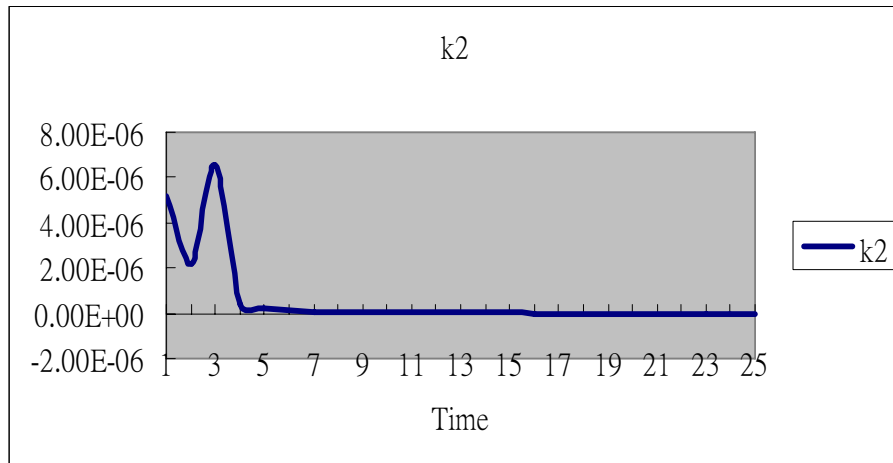


圖 5.37 k2 的圖

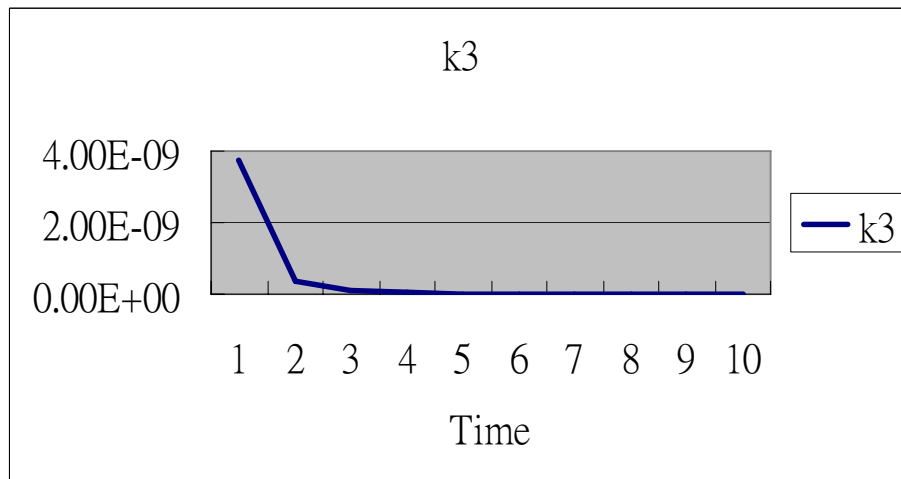


圖 5.38 k3 的圖

透過模擬及實作之後，可發現當 INS 發散時，只要有 GPS 資訊進來，並整合卡門濾波器確實能有效控制，不會再繼續發散，而會收斂起來，因此卡門濾波器是有發揮效果的。

第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本研究之導航系統採用數位式感測器，整合 GIMU 和卡門濾波器。在第四章的實驗結果中，本研究有比較、分析陀螺儀姿態模組靜態整合前，與整合後有無誤差修正時，姿態角變化的軌跡，與動態整合後顯示出的整合效果，可知陀螺儀姿態模組的精度還不錯。

本研究使用嵌入式的硬體，可增加導航系統之可靠 (Reliability) 外，MEMS 感測元件，大幅縮減模組體積，解決了體積方面的問題，而電路板使用四層板架構，更能減少雜訊與提高精度。採用定點運算處理器，雖在浮點運算上，會較為耗時，但價格較為低廉，可實現較低價的 DSP/INS 整合系統。

本研究整合 GPS/INS 時，原先未經過 GPS 校正整合的 INS 數據，會隨著時間的增加，誤差不斷累積，最後就會使載具的定位偏離原先位置甚遠。加入卡門濾波器的整合修正之後，誤差發散程度就明顯受到控制，不再隨著時間不停累積誤差。所以中途只要收得到 GPS 資料，就有辦法降低誤差，得到較為精確的導航數據。

6.2 未來展望

在軟體設計方面可加強程式時序的控制，及程式碼的最佳化。在時序的控制方面，可採用 DPS 基本輸入輸出系統 (Basic Input/Output

System, BIOS) 的功能，作多執行緒 (Multi-Thread) 的編排，使每個工作 (Task) 能更接近同步化。而程式碼最佳化方面，可使用 DSP 的組合語言，對各硬體元件作最佳化的控制，以提升整體的效能，使導航系統更接近即時的性能。

同時也建議 GIMU 與 DSP 的溝通，可採用無線傳輸模組，主要目的是方便使用者操作，且可脫離 PC。因此欲進行 GIMU 與其他介面整合，僅需將 GIMU 放置於載具上即可，但會受限於無線傳輸模組的距離限制 (10~200 公尺不等...)。



參考文獻

- 【1】 黃國興，“慣性導航系統原理與應用”，全華科技圖書股份有限公司，1995。
- 【2】 黃勇平，“移動載具定位導航系統之研究” 私立中華大學機械與航太工程研究所碩士論文，1999。
- 【3】 蔡豐隆，“汽車導航系統之設計”，中華大學航太所碩士論文，90 年 7 月。
- 【4】 張博光，“全球定位系統及慣性參考導航系統複合之研究”，私立中華工學院航太所碩士論文，1994。
- 【5】 黃振文，“全球定位系統與慣性導航系統整合之車輛導航系統設計”，中華工學航太所碩士論文，85 年 6 月。
- 【6】 陳見生，“全球定位系統及慣性參考系統複合式系統研究”，私立中華工學院航太所碩士論文 1995。
- 【7】 林鴻志，“以全球定位系統輔助之慣性導航複合系統研究”，私立中華工學院航太所碩士論文 1995。
- 【8】 謝壽鏞，“全球定位系統與慣性導航系統之複合式三度空間導航系統硬體架構研究” 私立中華大學機械與航太工程研究所碩士論文，1998。
- 【9】 林伯仲，“全球定位系統與慣性導航系統之複合式三度空間導

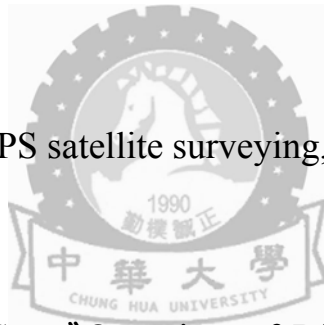
航系統軟體設計”私立中華大學機械與航太工程研究所碩士論文，1998。

【10】Bradford W.Parkinson ,James J.Spilker , “Global Positioning System:Theory & Applications ” , American Institute of Aeronautics and Astronautics , 1996.

【11】安守中, “全球衛星定位系統入門”, 全華科技圖書股份有限公司, 2002。

【12】莊智清、黃國興, “電子導航”, 全華科技圖書股份有限公司, 2001。

【13】Alfred Leick , “GPS satellite surveying,2nd” , Wiley. Interscience Co. , 1995.



【14】Backwell , Eral G. , “Overview of Difference GPS Method” , Navigation,J. Institute of Navigation, Vol.32, No.2, pp.114-125 (Summer , 1985) .

【15】邱聰輝, “全球衛星定位系統載波相位測量定位法研究”, 中華大學航太所碩士論文, 87 年 7 月。

【16】莊凱驛, “以 DSP 為平台之 GPS/INS 導航整合系統設計” 私立中華大學機械與航太工程研究所碩士論文, 2004。

【17】江政嶽, “以嵌入式 DSP 為平台之載具與陀螺儀姿態模組虛擬實境即時動畫顯示系統整合設計” 私立中華大學機械與航太工

程研究所碩士論文，2007。

- 【18】吳賢財，“德州儀器入門實務”滄海書局，2003。
- 【19】李清、林育賢、連怡仲、侯志忠、蘇泰光，“內嵌式 C32DSP 實務應用”全華科技圖書股份有限公司，2002。
- 【20】Texas Instruments，“TMS320C/F2812 Digital Signal Processors Data Manual”，2006.
- 【21】Texas Instruments，“TMS320x280x DSP Analog-to-Digital Converter (ADC) Reference Guide”，2004.
- 【22】Texas Instruments，“TMS320x281x, 280x DSP Serial Communication Interface (SCI) Reference Guide”，2004.
- 【23】Texas Instruments，“TMS320x280x DSP System Control and Interrupts Reference Guide”，2004.
- 【24】謝權信，“智慧型e化車輛導航系統研究”，中華大學航太所碩士論文，91年7月。
- 【25】劉佳峰，“結合GPS與GIS技術建立之汽車導航系統”，中央大學資訊管理研究所，碩士論文，1996。
- 【26】Mohinder S. Grewal Angus P. Andrews “Kalman Filtering Theory and Practice”，WILEY INTER-SCIENCE，1993.
- 【27】Mohinder S. Grewal Angus P. Andrews “Global Position

System ,Inertial Navigation ,and integration ” , WILEY
INTER-SCIENCE,2001.

【28】 Jay A. Farrell & Matthew Barth “The Global Positioning System
& Inertial Navigation ” ,The McGraw-Hill Companies,Inc,1999.

【29】 陳嘉賢,“以DSP為平台之GPS/INS/GIS與聲控整合式載具平面
導航系統設計” 私立中華大學機械與航太工程研究所碩士論
文, 2005。

