

# 提昇微機電 IMU/GNSS 整合系統定位定向精度可行策略之研究\*

## The Investigation of some Practical Strategies for Improving the Accuracy of a MEMS IMU/GNSS Integrated System

姚冠宇<sup>1</sup>      黃芸玟<sup>2</sup>      江凱偉<sup>3</sup>  
Guan-Yu Yao      Yun-Wen Huang      Kai-Wei Chiang

### 摘要

GPS/INS 整合系統相較於個別系統在單獨使用之狀況下能克服個別系統之限制；並提供導航系統更佳表現。本研究首先利用 GPS 航向器之輔助來提昇定位系統的精度。對於定位精度而言，航向的誤差影響是相當顯著的。水平速度的誤差會受到方位角誤差的影響，故當載體的速度越高，因為方位角誤差所導致的定位誤差會越大。本研究提出的第二個策略為利用高採樣率之 GPS 接收儀，現行使用的動態 GPS 接收機之採樣頻率皆習慣使用 1Hz。對於低成本的 IMU 而言，在兩個整秒之 GPS 更新期間之定位及定向的誤差累積量顯著高於高精度系統。故本研究的重點在於嘗試使用高採樣頻率(10Hz)之 GPS 接收機並評估該策略對整體動態定位定向精度之影響。

**關鍵詞：**GPS、INS、整合系統、定位定向精度

### Abstract

Integrated GPS/INS systems provide an enhanced navigation system that has superior performance in comparison with either system operating in stand-alone mode as it can overcome each of their limitations. In this study, the heading updates provided by the heading sensor is first proposed to improve the accuracy of a MEMS IMU/GPS integrated system. The error of heading has great influence on the positional accuracy because it multiplies with horizontal velocities. Therefore, those additional velocity errors project onto horizontal positioning errors after numerical integration implemented in the INS mechanization. The faster the vehicle moves, the larger the positional errors

---

<sup>1</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士生

<sup>2</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 博士生

<sup>3</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

\* 此篇論文曾於第二十七屆測量及空間資訊研討會以口頭報告方式發表

caused by the heading error. In addition, this study applies two sets of GPS receivers that have relatively high sampling rate, 10Hz. In general ; the sampling rate of the GPS receivers used for kinematic positioning is rather limited to 1 Hz only. The positioning and attitude errors between consecutive GPS updated measurements update for a MEMS IMU accumulate much more significantly than those of other sophisticated systems. Therefore, this study applies a set of GPS receivers with 10Hz sampling rate to investigate the impact of measurement update frequency provided by GPS on the positioning and attitude accuracy with the use of a MEMS IMU/GPS integrated system.

Keyword : GPS、INS、integrated systems、Positioning and attitude accuracy

## 一、前言

GNSS 在市區、地下道、隧道、森林等地區會受到訊號遮蔽的效應所影響 (Parkinson and Spilker 1996)，圖 1 所示為 GPS 訊號遮蔽效應的示意圖及 INS/GPS 在訊號遮蔽下的軌跡差異。一般而言，訊號遮蔽的效應可區分為完全遮蔽導致無法鎖定 4 顆衛星及部分遮蔽所導致的觀測量品質不佳等二種效應。

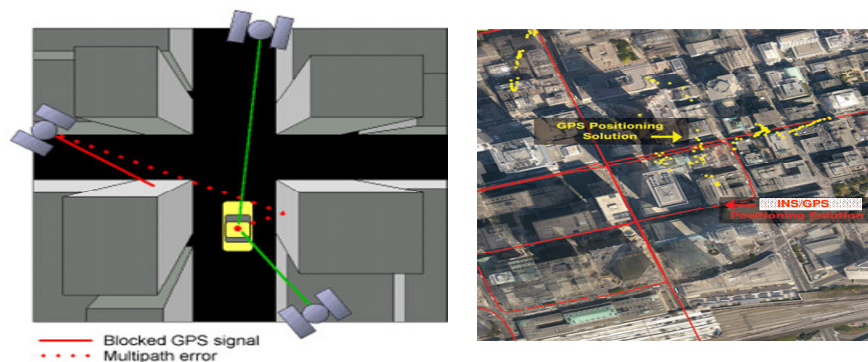


圖 1、GNSS 訊號遮蔽的效應

慣性導航系統具有高採樣頻率及短時間內高精度之特性，所以可以被使用來解決 GNSS 所遭遇諸如訊號遮蔽、低採樣頻率、週波脫落、易被干擾等限制。相對的，INS 在獨自運作的模式下，其定位誤差約略與時間的平方成正比，如圖 2 所示。

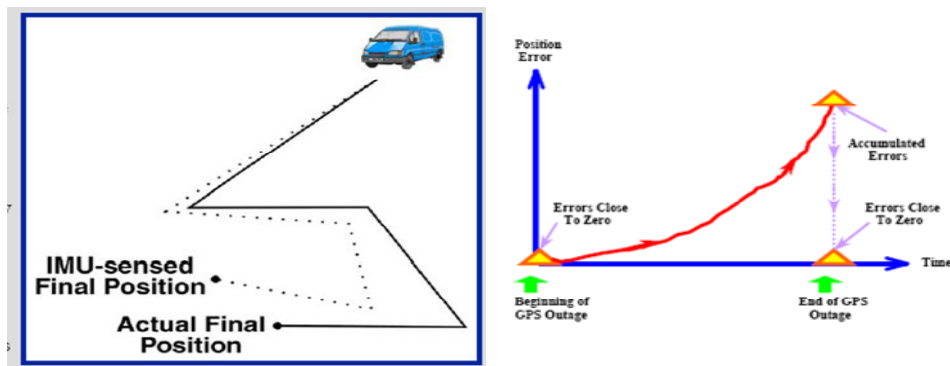


圖 2、INS 誤差累積的效應

故整合式定位及導航系統能夠克服單一系統之缺點且提供更穩定的導航及定位成果，故目前不管在軍用或民用的整合系統發展皆趨向於使用 INS 及 GNSS。主要的動機在於此二系統具有互補之特徵；GNSS 在無訊號遮蔽的環境下可以提供穩定的定位及導航資訊。故它可用來減低 INS 因為積分加速度計及角速度之系統誤差所造成隨時間累積的定位誤差。對於高動態運動的物體而言，GNSS 無法提供足夠的採樣頻率來追蹤載體的運動。另外 INS 可以提供 GNSS 所無法提供的姿態參數。

對於高精度的移動式測圖應用而言，限於高精度 INS 成本的需求及 GNSS 的定位精度限制，目前仍無法依賴單一的 INS/GNSS 系統完成所有地面點位之直接定位。但精密的定位定向模組在現階段移動式測圖的應用而言至少可以大幅減少設置地面控制點的需求。國外的經驗顯示 (Shin, 2001)，利用整合式定位定向系統輔助之航測任務可較傳統使用 GPS 空三之程序省去近 70% 之作業時間及成本。一般而言，INS/GNSS 整合式定位系統的性能提升策略有二，如表 1 所示。

因此在未來，在精度提升的前提下，由 INS/GNSS 整合式定位定向系統輔助的遙測及製圖系統將朝全自動的領域再進一大步。故本研究嘗試在軟體層次提出兩種策略：一是利用 GPS 航向感測器之輔助；另一則為使用高採樣率的 GPS 接收機，來提升本系自行整合的微機電 IMU/GPS 整合式定位定向系統之精度。

表 1、INS/GNSS 整合式定位系統的性能提升策略

優缺點	硬體層次	軟體層次
策略	購買導航等級的 IMU	INS/GNSS 演算法的進化
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 有效</li> <li>■ 使用者無須投入大量時間與人力</li> <li>■ 立竿見影</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 便宜</li> <li>■ 使用者可以進行研發</li> <li>■ 未來的擴充性</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 出口限制</li> <li>■ 價格昂貴</li> <li>■ 製造商的解決方案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 使用者對整合系統的瞭解決定軟體之貢獻</li> <li>■ 軟體參數的調校</li> </ul>

## 二、INS/GNSS 整合演算法

在慣性導航演算法中，最基本的過程就是 INS 解算方程式。INS 解算方程式將慣性感測器的加速度和角速度做適當的重力改正及積分，來計算車輛的位置速度姿態，若要求得理想的導航解，INS 解算結果就必須與 GPS 的位置和速度作一整合，本研究在整合方面採用擴張卡曼濾波器 (Extended Kalman Filter, EKF)，其為目前整合方面最炙手可熱的估算技術。INS 在當地水準坐標系統解算方程式如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{r}^l \\ \dot{v}^l \\ \dot{R}_b^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}v^l \\ R_b^l f^b - (2\Omega_{ie}^l + \Omega_{el}^l)v^l + g^l \\ R_b^l (\Omega_b^b - \Omega_l^b) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$r^l$  為位置向量 (緯度  $\phi$ 、經度  $\lambda$ 、高度  $h$ )， $v^l$  為三方向 e、n、u 速度向量， $R_b^l$  為載體座標系統 (Body frame) 轉換至當地水平座標系統 (local level frame) 的轉換矩陣，為姿態函數， $g^l$  是 local level frame 的重力向量， $\Omega_b^b$ 、 $\Omega_l^b$  是角速度向量  $w_{ib}^b$ 、 $w_{il}^b$  的非對稱矩陣，而  $D^{-1}$  為 3X3 的非零矩陣，為緯度和橢球高的函數，請參考 Shin(2001)。

在 EKF 中，INS 誤差由 GPS 和 INS 解的差值做同步更新。卡曼濾波器的誤差狀態向量包含了基本導航誤差狀態 (如：位置、速度和姿態誤差)，和陀螺儀和加速度計狀態的偏差。本研究所使用的狀態動態方程式 (如位置、速度、姿態) 可由線性化 INS 在當地水準座標系統解算方程式而得如下之方程式：

$$\begin{aligned} \delta \dot{r}^l &= D^{-1} \delta v^l \\ \delta \dot{v}^l &= -(2\Omega_{ie}^l + \Omega_{el}^l) \times \delta v^l - \delta R_b^l f^b + R_b^l \delta f^b + \delta g^l \\ \delta \dot{A}^l &= E \delta v^l + R_b^l \delta \omega^b & \delta f^b &= b_a + \text{diag}(f^b) s_a \\ \delta \omega^b &= b_g + \text{diag}(\omega^b) s_g \end{aligned} \quad (2)$$

$\delta r^l$ 、 $\delta v^l$ 、 $\delta A^l$  為 local level frame 中的位置、速度、姿態誤差狀態向量， $\delta g^l$

為 local level frame 中經過計算的重力向量之誤差， $\delta f^b$  &  $\delta \omega^b$  為 body frame 的加速度計偏差及陀螺漂移向量， $S_a$  &  $S_g$  為加速度計及陀螺儀的尺度因子， $E$  是一個 3x3 矩陣，其中非零元素為機器的緯度及曲率半徑之函數。

在 KF 裡，INS error 是藉由 GPS 與 INS 不同解來更新，在此研究裡使用 21 個狀態向量： $[\delta p_{b3} \ \delta v_{b3} \ \delta A_{b3} \ b_{a,b3} \ b_{g,b3} \ s_{a,b3} \ s_{g,b3}]^T$ 。KF 的方程式分成預估與更新，預估部份是將現時狀態移至下一時刻狀態間的時間轉換。預估方程式如下 Shin(2005)：

$$\hat{x}_k(-) = \Phi_k \hat{x}_{k-1}(+) \quad (3)$$

$$P_k(-) = \Phi_k P_{k-1}(+) \Phi_k^T + Q_{k-1} \quad (4)$$

$P$  為慣性狀態時的估算變方協變方矩陣， $Q$  為系統雜訊矩陣， $(-)$  表示預估的估算值， $(+)$  為更新後的估算值。另外的更新方程式如下，原理為利用新觀測量輸入先前狀態而得到往後理想狀態的估算值：

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k (Z_k - H_k \hat{x}_k(-)) \quad (6)$$

$$P_k(+) = P_k(-) - K_k H_k^T P_k(-) \quad (7)$$

$K$  為卡曼增益矩陣， $Z$  為位置與速度的更新觀測量向量， $R$  是觀測量的變方協變方矩陣。在 IMU/GPS 整合濾波器中，GPS 的位置和速度用來作為 KF 更新的觀測量。圖 3 所示為標準的鬆耦合 (Loosely coupled) INS/GNSS 整合架構。此架構利用 GNSS 和慣性導航系統輸出的位置和速度資訊的差值作為量測值，經由卡曼濾波器，估計慣性導航系統的誤差，然後對慣性導航系統進行校正。這種模式與緊耦合整合架構相比，其優點是結構較簡單 (Chiang, 2004)。

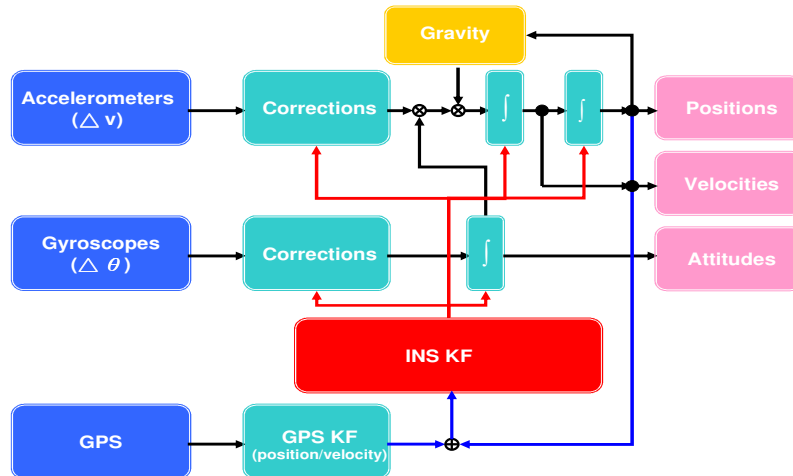


圖 3、鬆耦合 (Loosely coupled) INS/GNSS 整合架構

### 三、效能提升策略之發展

#### 3.1 利用 GPS 航向器之輔助

對於精確的定位定向需求而言，傳統的 INS/GPS 整合架構利用 GPS 提供的導航解(包含位置及角度)透過 INS 卡曼濾波器直接對 INS 之位置及速度等狀態利用觀測量更新之模式提供直接推估。同時因為 Roll 和 Pitch 與水平速度有緊密的耦合關係，故一般鬆耦合式的 INS/GNSS 整合架構對於上述兩個姿態角度的精度是相當高的。然而對於定位精度而言，航向的誤差影響是相當顯著的，這點原因在於 INS 的解算方程式時，水平速度的誤差會受到方位角誤差的影響，亦即當載體的速度越高，因為方位角誤差所導致的定位誤差會越大。因為航向及水平速度的耦合關係並不顯著，故透過 GNSS 速度與位置之更新並無法對方位角提供適當的輔助。故本研究目的在於修改擴張式卡曼濾波器 (extended Kalman filter, EKF) 觀測方程式架構利用的高精度 GPS Heading vector module 以提供直接的航向觀測量來提升整體定位定向之精度，而使用 GPS 的航向較磁羅盤提供的方位角好的原因為沒有訊號同步與磁場率定。

換言之，航向誤差在目前的鬆耦合式 INS/GNSS 整合架構較 Roll 及 Pitch 之誤差可大於一個量級 (E1-Sheimy, 2004)。故本研究的創新在於修改鬆耦合 INS/GNSS 整合架構與 EKF 觀測方程式之架構，除了原先提供之 GNSS 和 INS 輸出的位置和速度資訊，再加上利用本系自製的高精度 GPS Heading sensor 以 (0.1 度) 提供直接的航向觀測量來提升整體定位定向之精度 (Huang et al., 2007)，如圖 4 所示。

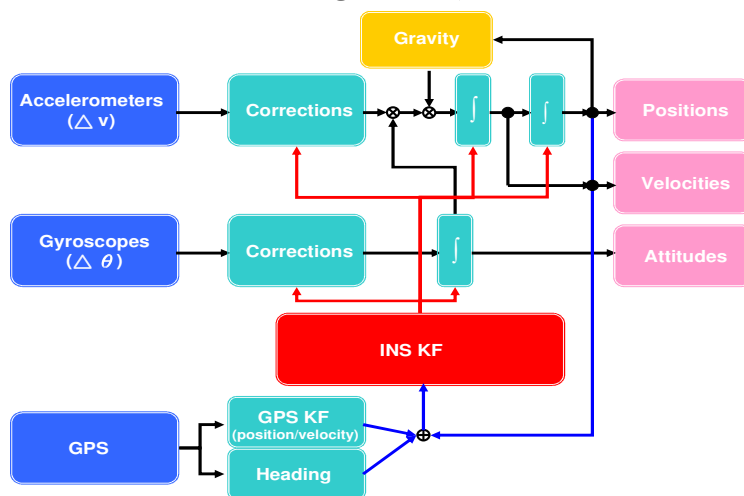


圖4、改良式鬆耦合 (Loosely coupled) INS/GNSS 整合架構

### 3.2 利用高採樣率之 GPS 接收儀

現行使用的動態 GPS 接收機之採樣頻率皆習慣使用 1Hz，對於低成本的 IMU 而言，在兩個整秒之 GPS 更新期間之定位及定向的誤差累積量顯著高於高精度系統。利用鬆耦合 INS/GNSS 整合架構，圖 5 所示為當 GNSS 之速度與位置解為可得時，整個系統之運作為觀測量更新模式。而位於兩個整秒 GPS 更新之間的定位定向解則透過預測的方式得到。故本研究的重點在於嘗試使用高採樣頻率(2Hz~10Hz)之 GPS 接收機並評估該策略對整體動態定位定向精度之影響。

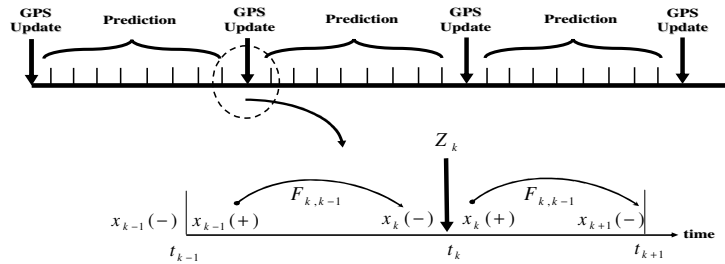


圖5、INS/GNSS整合式系統運作之示意圖

## 四、結果與討論

為了驗證本研究所提出之架構，吾人於 2007 年 10 月 31 日於台南市郊區進行一次路測。此次路測相關儀器之設置示於圖 6。本次實驗使用二組 GPS 接收機為 Leica GPS 500 系列大地測量型之接收機。其中一組架設於車頂；而另一組設置於安南區地政事務所當作此次動態測試之參考站。實驗之測區位於參考站方圓五公里內。所使用的 GPS 航向系統為一組加拿大 Hemisphere 公司所研發的 GPS OEM 向量模組。而本次實驗所使用的微機電 IMU 為美國 Systron Donner Inertial Division 公司所提供之低階戰術等級之 IMU(C-MIGIT III)。



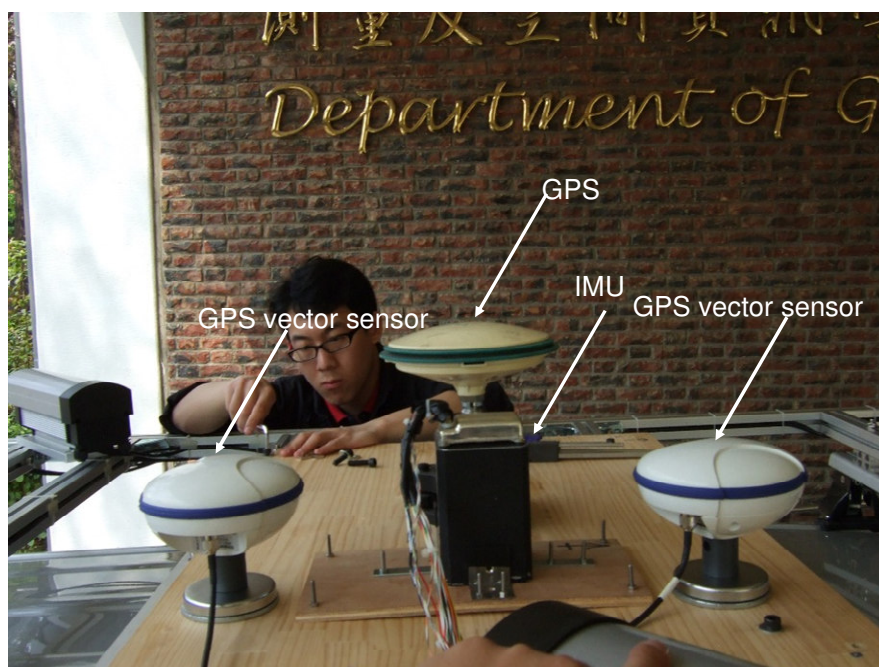


圖6、實驗設備之設置

本次實驗所採集的 IMU 與 GPS 觀測量皆使用本研究室之 INS/GNSS 資料處理軟體進行計算與分析。本次實驗所使用的測試軌跡為利用 21 個狀態的 EKF 並依照本研究所提出之策略所得之結果；再與利用本研究室自行開發的 INS/GNSS RTS 平滑器所得之高精度參考軌跡進行比較已進行精度分析。一般而言，INS/GNSS RTS 平滑器所得之軌跡精度較 INS/GNSS EKF 之精度足以提升近 70%，故國外相關之學術及產業界皆習慣將平滑器之軌跡視為參考軌跡以評估 EKF 之計算成果。此次路測之軌跡示於圖 7。圖 7 中綠色點位為使用載波向位 DGPS 所解算之軌跡，其三維定位精度約為 30 公分。而藍實線為 INS/GNSS 整合之解，圖中吾人可發現其定位解較紅線密實，此乃肇因於 INS 之採樣率為 100Hz，遠高於目前 GPS 接收機提供之 1Hz。



圖7、路測之軌跡



綠色點位為使用載波相位 DGPS 所解算之軌跡，其三維定位精度約為 30 公分。而藍實線為 INS/GNSS 整合之解，可發現其定位解較紅線密實，此乃因 INS 之採樣率為 100Hz，遠高於目前 GPS 接收機提供之 1Hz。

#### 4.1 GPS 航向儀輔助之結果：

圖 8 所示為 GPS 航向儀之輸出，圖中航向資料在  $\pm 180^\circ$  之間，大幅度上下震盪部份乃是因為 heading 資料處於  $180^\circ$  附近所造成。

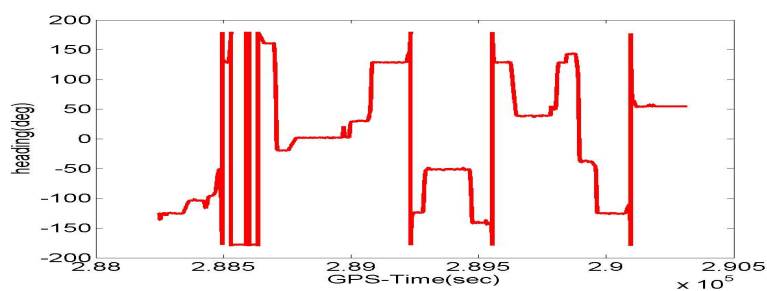


圖8、GPS航向儀之輸出

將收集得到的 GPS 及 IMU 資料整理，利用 INS/GNSS EKF 程式分別計算有加入 GPS 航向與未加入 GPS 航向之軌跡；同時利用有加入 GPS 航向之 INS/GNSS RTS 平滑器所解算得之解當作參考軌跡。圖 9 及 10 所示分別比較有無 GPS 航向輔助之定位定向誤差。圖中藍色線條為使用圖 3 架構所計算得之成果，而紅色線條為使用圖 4 架構所計算得之成果。

根據圖 9、10 與表 2，INS/GNSS 之定位定向解在加入航向資料後有顯著地精度提升。GPS 航向資料可有效改善每一個位置及方向的誤差。事實上它主要的誤差影響來自陀螺儀偏差，陀螺儀的偏差大小由干擾力矩的大小決定。引起干擾力矩的原因有很多，如：靜平衡不精確形成的質量偏移，摩擦力或外磁場的作用等等，如前所述，航向的精度會顯著地投射到速度與位置誤差，故相關結果顯示本研究所提的策略能夠有效地提昇定位精度，整體的定位精度提升比率約為 65%。在定向成果部分，雖然在 roll 及 pitch 角度部份的精度提升有限，但在 heading 部份的提升可達 80%。

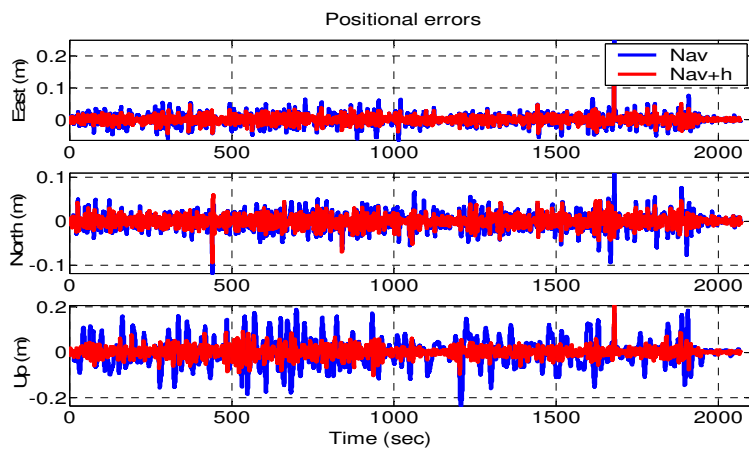


圖 9、定位誤差

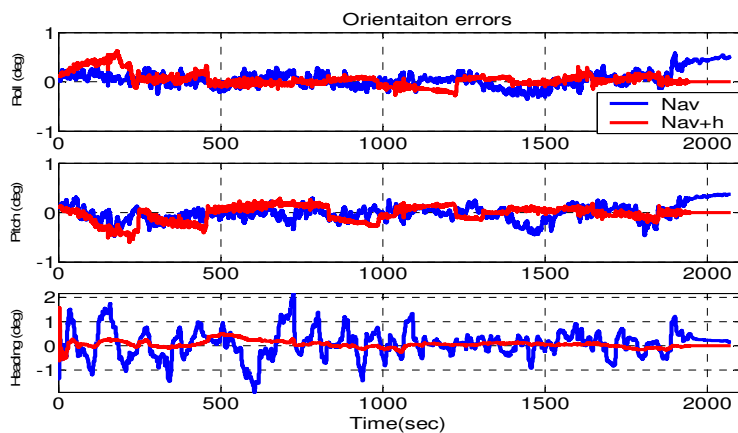


圖 10、定向誤差

表 2、利用 GPS 航向器輔助之定位定向精度提昇

	RMS value		提昇百分比 (%)
	INS/GPS	INS/GPS+ Heading	
East(m)	0.2294	0.0815	64
North(m)	0.0440	0.0120	73
Up(m)	0.0605	0.0234	61
Roll(deg)	0.1478	0.1323	11
Pitch(deg)	0.1547	0.1318	15
Heading(deg)	0.8712	0.1585	82

由表 2 我們可以看到第一個策略加入了 GPS heading 資料輔助之結果，在定位方面的精度達到 65% 左右，而定向精度 roll 及 pitch 因為有 GNSS 位置及速度之輔助，精度提昇較為有限。而 Heading 精度的提昇達到 82%，結果是相當不錯的。

#### 4.2 高採樣頻率之 GPS 觀測量：

以鬆耦合 INS/GNSS 整合架構分別使用 1Hz 與 10Hz 之 GPS 導航解計算。以 10Hz GPS 採樣頻率所更新之 INS/GNSS RTS 平滑器所解算得之解當作參考軌跡。圖 11 及 12 所示比較使用不同 GPS 採樣頻率之模式計算所得之定位定向誤差。圖中藍色線條及紅色線條分別為使用 1Hz 和 10Hz GPS 觀測量所計算得之成果。表 3 所示為利用高採樣率之 GPS 觀測量所達成之精度提升比率。

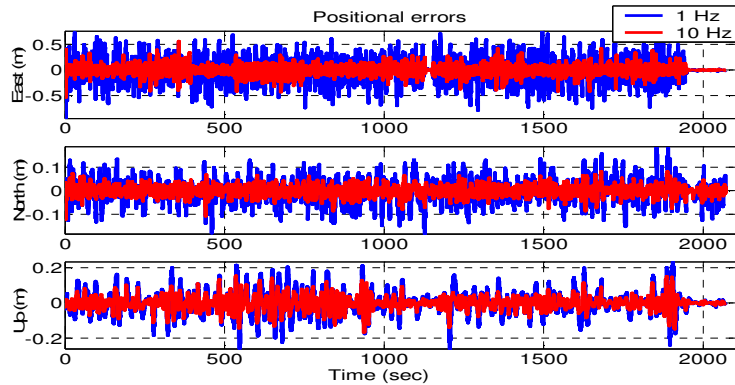


圖 11、定位誤差

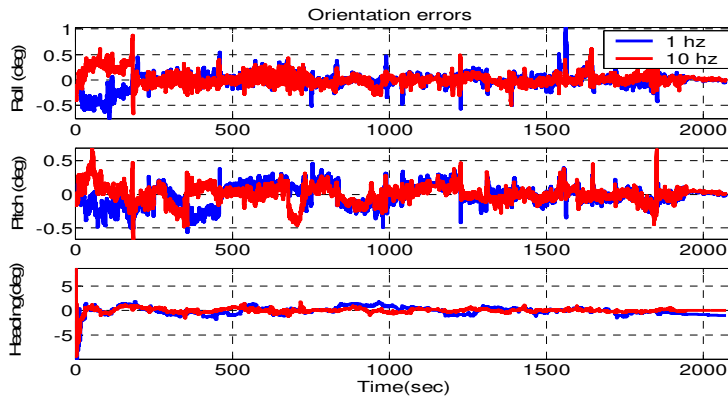


圖 12、定向誤差

表 3 利用 GPS 高採樣頻率輔助之定位定向精度提昇

	RMS value		提昇百分比 (%)
	1 Hz	10 Hz	
East(m)	0.2294	0.0814	65
North(m)	0.0440	0.0218	51
Up(m)	0.0605	0.0420	31
Roll(deg)	0.1478	0.1227	17
Pitch(deg)	0.1547	0.1243	20
Heading(deg)	0.8712	0.5955	32

由表 3 得到的第二個策略利用 GPS 高採樣頻率輔助之結果，可看到於定位及定向精度，因為重複較多次的反覆校正，對於定向以及 Heading 的精度也都做了一定的提昇。

## 五、結論

本研究主要是提出分別以利用 GPS 航向器之輔助及利用高採樣率之 GPS 接收儀，來提昇微機電 IMU/GNSS 整合系統定位定向精度的策略。相關的演算架構利用實際的路測資料加以驗證。

航向的精度會顯著地投射到速度與位置誤差，故相關結果顯示本研究所提的策略能夠有效地提昇定位精度，整體的定位精度提升比率約為 65%。在定向成果部分，雖然在 roll 及 pitch 角度部份的精度提升有限，但在 heading 部分的提升可達 80%。INS/GNSS 之定向解中，roll 及 pitch 因為有 GNSS 位置及速度之輔助故其估算的精度較高，導致本研究所提策略之效能提升較為有限。

高頻率的 GPS 觀測量亦可有效地提升整體定位及定向之精度。由於 GPS 的更新速率提昇，對於整體運算時進行較多次的反覆校正，因此將定位及定向方面的誤差都做了相當的提昇。雖然同樣地對 Roll 及 Pitch 提昇的較為有限，不過定位精度以及航向的精度都提昇不少，可得知利用高採樣率之 GPS 接收儀是一項提昇微機電 IMU/GNSS 整合系統定位定向精度的可行策略。

未來本研究將朝更廣範圍的工作區域收集更多資料證實此計畫以及試著提昇 GPS 航向感測器於動態情況下收集資料的精度。此項工作的最後目的是在於發展出一個可提供於移動式製圖應用的低成本定位定向平台。

## 六、致謝

本研究承蒙國科會（編號：NSC 96-2815-C-006-038-E）的支持，使本研究得以順利完成，僅致萬分謝忱

## 七、參考文獻

- El-Sheimy, N., 2004: Inertial Techniques and INS/DGPS Integration, ENGO 623 lecture notes, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Huang, Y-W., Li, C-Y., Wu, H-W, Chang, H-W., Hu, H-W. and Chiang, K-W., 2007: Improving the Positioning Accuracy of a Low Cost MEMS/GPS Integrated System Using GPS Heading Sensor, ION NTM 2007, January 22-24, 2007, Catamaran Resort Hotel, San Diego, California (EI) NSC 95-2221-E-006 -335 -MY2
- Shin, E.H., 2005: Estimation Techniques for Low Cost Inertial Navigation, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada , UCGE Report 20219
- Shin, E.H., 2001: Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Application, (M.Sc. thesis), UCGE Report No. 20156. Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Parkinson, B.W. and Spilker, Jr. J., 1996: Global Positioning System: Theory and Applications Volume I. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, D.C., 1996.
- Chiang, K.W., 2004 : INS/GPS Integration Using Neural Networks for Land Vehicular Navigation Applications, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, UCGE Report 20209