

緊耦合與鬆耦合式低成本 IMU/GPS 整合式 POS 於移動測繪應用之適用性分析

The Applicability Analysis of LC and TC Based Low Cost MEMS IMU/GPS POS for MMS Applications

黃芸玟¹

蔡孟倫¹

江凱偉²

Yun-Wen Huang

Meng-Lun Tsai

Kai-Wei Chiang

摘要

近年來，整合數值影像處理與直接地理定位系統的移動測繪系統(MMS)已迅速發展。藉由直接地理定位系統可決定各時刻載具的位置與速度。全球定位系統(GPS)為提供位置導航訊息的主要來源，慣性導航系統(INS)可藉由加速度與姿態角提供所需之姿態訊息，整合GPS與INS可提升導航系統，彌補各自的缺點與限制。卡曼濾波器(KF)為INS/GPS整合系統研究中，數據處理較佳估計理論；具體實現方式包含鬆耦合(LC)與緊耦合(TC)架構。前者為將GPS的位置、速度與INS的導航訊息做整合；後者直接使用GPS之觀測量，故少於四顆衛星時亦能使用。本研究將利用LC與TC之架構，針對低成本MEMS IMU/GPS定位系統，應用在車載MMS之應用。初步實驗成果顯示，在都市地區GPS訊號遮蔽的環境下，TC比起LC有較佳的結果，故TC的高定位與定向的精度與無縫定位之特性特別適合應用於車載MMS之應用。

關鍵詞：移動測繪系統、全球定位系統、慣性導航系統

Abstract

Mobile mapping system (MMS), the methodology that integrates digital imaging with direct geo-referencing, has developed rapidly over the past fifteen years. Global positioning system (GPS) has become the primary source of providing navigation information for most of the present navigation applications. An inertial navigation system (INS) is a self-contained positioning and attitude device. Integrated systems provide an enhanced navigation system with superior performance in comparison with either a stand-alone GPS or INS as it can overcome each of their limitations. The Kalman Filter (KF) has been considered as one of the most common optimal estimation tools for INS/GPS integrated kinematic POS determination. The most common

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 博士生
² 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

INS/GPS integration is known as the loosely coupled (LC). Another type of integration is known as tightly coupled (TC). In this research, both LC and TC integration will be utilized to analyze the applicability for low-cost MEMS INS/GPS POS systems for MMS. The preliminary results presented in this research illustrate the TC have better performances than LC. Consequently, the TC INS/GPS POS system is a suitable solution to setup a low-cost INS/GPS POS system with higher position and attitude accuracies to meet the requirement of land-based MMS application.

Keywords: Mobile Mapping System, Global Positioning System, Inertial Navigation System

一、簡介

早期發展的移動測繪系統(MMS)受限於外方位元素，這些參數取決於現有的地面控制點(El-Sheimy, 1996)。根據(Tao & Li, 2007)，移動測繪系統為利用一移動平台，搭載相關感測器，以取得相關地理空間資訊。過去相關研究工作可追溯到1980年代末期，主要為公路基礎設施測繪和盤點載貨運輸量。1990年代初，衛星與慣性導航技術的發展，提供我們在測繪地圖方面更多不同的方式。過去使用地面控制點當作參考點位，將影像與地面做一轉換，現今可直接地決定影像平台的軌跡和姿態(El-Sheimy, 2002)。搭載整合相機、導航和定位感測器的平台車輛可進行測繪目的，感興趣的物體可直接量測及繪製圖像。

直接地理參考系統可決定數位影像平台移動時的位置與方向參數(El-Sheimy, 1996)。現今最常見的技術為使用全球定位系統(Global Positioning System, GPS)和慣性測量裝置(Inertial Measuring Unit, IMU)。原則上GPS與IMU都可以同時確定位置和方向，但IMU主要為方向感測器，而GPS接收儀為位置感測器。IMU方向的精度主要取決於該陀螺漂移量，由偏差量(bias)、短週期的偏差穩定

性、隨機角度游走表示(Shin, 2005)。

原則上，IMU包含一慣性感測器，其包含三個陀螺儀和加速度計，可補償原始觀測量，包含自身平台框架(body frame)三軸方向的速度變化和方向變化。若要計算得即時導航解，IMU需搭配電腦與導航方程式進行計算。換句話說，慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)通常是指一個慣性測量裝置結合小型電腦，可以提供不同導航框架時所需的導航解決方案，也可提供補償原始觀測量。因此，慣性測量裝置和慣性導航系統主要區別為，前者無法提供即時導航解，後者可提供即時導航解及補償的觀測量(Goad, 1991)。

最初應用MMS於土地開發的研究機構包含美國俄亥俄州立大學測繪中心與加拿大卡加利大學(El-Sheimy, 1996; Goad, 1991)。2000年初期，陸基系統已應用在商業發展上(Goad, 1991)，相關系統對於測繪製圖方面的影響，抱持很高的期望(El-Sheimy, 1996)。藉由使用導航和定位技術可完成取得數位影像序列的直接地理參考系統。整合各種不同的感測器、GPS、IMU和航位推算資料處理，可提高直接地理參考系統的準確性和可靠性，傳統測繪所需的地面控制點可因此消除。

卡曼濾波器(Kalman Filter, KF)

已被廣泛認為其為一處理整合 INS/GPS 資料的最佳估計工具。然而，卡曼濾波器也有其限制，可參考相關文獻 (Chiang, 2004)，其主要的不足處為，針對每個感測器誤差需要有預先定義的準確隨機模型 (Wendel, 2004)，同時，每個感測器系統的 INS 與 GPS 資料的協方差矩陣及其統計特性 (即方差和相關時間) 也都必須準確地知道 (Chiang *etc.*, 2004)。此外，擴展卡曼濾波器 (Extended Kalman Filter, EKF) 針對整合非線性的 INS/GPS 觀測量計算應用時，需假設狀態變化為高斯隨機變量。當然，擴展卡曼濾波器也可運作於非高斯分佈的非線性動態系統，但在嚴重傾斜的非線性動態系統情況下，可能會遇到問題 (El-Sheimy, 2002)。

資料後處理，如 RTS (Rauch Tung Striebel) 平滑化的優點為利用整個任務數據進行軌跡的估計，對於 MMS 應用在 POS 方面而言，可得到高精度要求。事實上，現今大多數商業化的 MMS 皆使用最佳平滑化法，提供準確的 POS 直接地理參考。最常利用於整合 INS/GPS 策略為鬆耦合 (Loosely Coupled, LC)，其為結合 GPS 位置與速度及 INS 裝置上的導航訊息。LC 的優點為結構簡單且彈性

高，但限制為當 GPS 接收儀接收少於 4 顆衛星時，GPS 的 KF 將不會提供位置和速度解及更新。另一種類型稱為緊耦合 (Tightly Coupled, TC)，其並非使用 GPS 位置與速度進行更新，而是處理 GPS 原始觀測量，因此即使不足 4 顆衛星時仍可使用。TC 技術上只有一個的 KF，用來處理慣性導航感測器上的加速度和角速率。此外，KF 也會處理 GPS 接收儀的虛擬距離和虛擬距離比率觀測量，相關濾波器使用的觀測量不僅可估計導航解，也可以做為慣性感測器校正參數，彌補加速度計和陀螺儀錯誤。

二、鬆耦合與緊耦合架構

現今最常見的整合方式為鬆耦合方式，其架構如圖 1 所示。經由 GPS 的 KF 得到的位置和速度估計，帶入慣性導航系統的卡曼濾波器，幫助 INS 解算。此種方式的好處為有簡單的架構，容易使用於導航系統。然而 GPS 的 KF 位置和速度錯誤與時間相關，若不考慮，會有卡曼濾波器導航不穩定的情形發生 (Wendel & Trommer, 2004)。如果可接收衛星顆數不足 4 顆時，GPS 接收機的輸出須被完全忽略，INS 視為獨立運作 (Lewantowicz, 1992)。

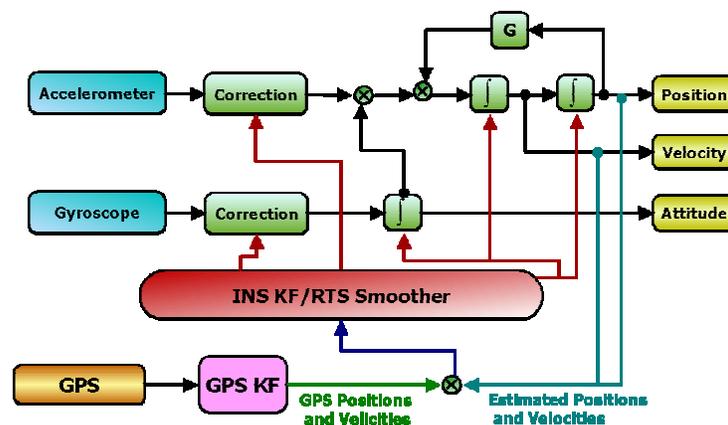


圖 1 鬆耦合架構

緊耦合為使用一個卡曼濾波器，整合 GPS 和 INS 的觀測量。圖 2 為緊耦合方式的架構。圖中所示可知，首先取得 IMU 的原始資料，透過觀測方程式轉換成所需坐標系統內的位置、速度與姿態。接著 GPS 虛擬距離與增加的虛擬距離觀測透過主要的卡曼濾波器進行處理 (Scherzinger, 2000)。TC 的主要優點

為，當可視衛星少於 4 顆衛星時，原始 GPS 觀測量仍然可以被用來更新 INS，對於高樓大廈林立的都市而言，幫助特別的大。此外，若使用 GPS 載波相位觀測量，INS 可用於幫助未知解的運算。然而，因為 TC 相較於 LC 有著複雜的架構，目前並非常用的整合 GPS 和 INS 方法 (Hide & Moore, 2005)。

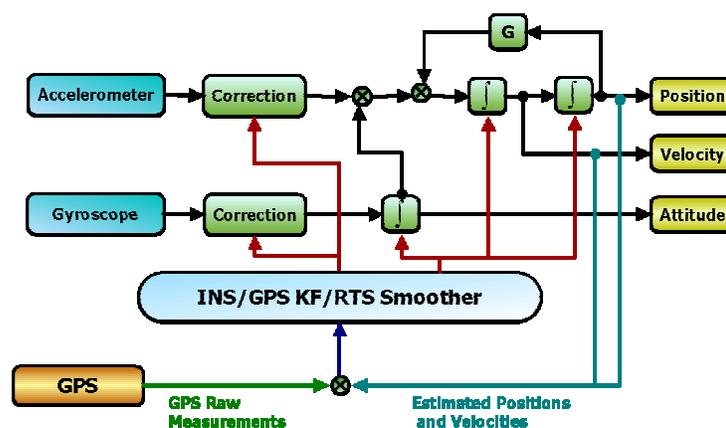


圖 2 緊耦合架構

三、卡曼濾波器與平滑器

最佳的估計導航解方法，需整合 GPS 的位置和速度解，以求得 INS 導航方程式的輸出。EKF 為目前最常見的整合技術。一簡單參考當地坐標系統框架的導航方程式表示如下 (Tao & Li, 2007)：

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

其中 r^l 為位置向量 (ϕ (緯度), λ (經度), h (高度))

v^l 為速度向量 (e, n, u)

R_b^l 為 IMU 的 body 框架轉換至當地框架

的旋轉矩陣

g^l 為當地框架的重力向量

Ω_{ib}^b 、 Ω_{il}^b 為角速度向量 w_{ib}^b 、 w_{il}^b 的 skew-symmetric 矩陣

D^{-1} 為一 3x3 的非零矩陣，分別為使用者的緯度 ϕ 及橢球高 (h)

相關更進一步方程式的討論，請參考文獻 (El-Sheimy, 2002)。由於慣性感測器的偏差和相關的錯誤，使得 POS 參數快速偏離，因此 INS 導航方程式很少有好的結果。導航軟件必須具備考慮這些誤差來源，以估計錯誤，糾正 POS 的參數 (Chiang, 2003)。透過 INS 導航方程式的線性化和忽略部分線性化模型結果可得到 KF 所使用的動態誤差模型導航參數 (位置、速度和姿態)。簡化公式如

下所示(Bar-Itzhack & Berman, 1988)：

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

其中 δr^l 為當地坐標框架的位置向量誤差

δv^l 為當地坐標框架的速度向量誤差

δA^l 為當地坐標框架的高度誤差

δg^l 為當地坐標框架的重力向量誤差

$\delta \mathcal{F}^b$ 、 δw^b 為 body 框架的加速度偏差與陀螺儀的漂移量

S_a 、 S_g 為加速度計與陀螺儀的尺度因子

E 為 3x3 的非零矩陣，分別為載具的緯度及地球曲率半徑

在擴展卡曼濾波器，INS 誤差用來更新 GPS 與 INS 解。本研究 EKF 包含 21 個狀態加上 GPS 差分組合數：位置、速度、方向、加速度偏差量與尺度因子、陀螺漂移與尺度因子、與 GPS 差分組合後之相對電離層延遲(Shin & El-Sheimy, 2005)，公式如下：

$$\left[\delta r_{1 \times 3} \quad \delta v_{1 \times 3} \quad \delta A_{1 \times 3} \quad b_{a,1 \times 3} \quad b_{g,1 \times 3} \quad s_{a,1 \times 3} \quad s_{g,1 \times 3} \right]^T \quad (3)$$

KF 的方程式分為兩部分：預測和更新。時間預測方程式將過去的時刻(k-1)轉換至下一個時刻(k)。預測方程式如下：

$$\hat{x}_k(-) = \Phi_k \hat{x}_{k-1}(+) \quad (4)$$

$$P_k(-) = \Phi_k P_{k-1}(+) \Phi_k^T + Q_{k-1} \quad (5)$$

其中 \hat{x} 為最佳估值狀態

Φ 為轉換矩陣

P 為慣性導航方差-協方差矩陣

Q 為雜訊的矩陣

(-) 為預測後的估值

(+) 為更新後的估值

利用新的觀測量與先驗狀態估值更新觀測方程式，可獲得優化後驗估值方程式，其更新後的方程式如下：

$$K_k = P_k(-) H_k^T \left[H_k P_k(-) H_k^T + R_k \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k (Z_k - H_k \hat{x}_k(-)) \quad (7)$$

$$P_k(+) = P_k(-) - K_k H_k^T P_k(-) \quad (8)$$

其中 K 為卡曼增益矩陣

H 為設計矩陣

Z 為位置與速度觀測量的更新

R 為方差-協方差矩陣

因此藉由觀測量更新方程式，KF 可產生一個更新的估計，減少 INS 誤差。

如同公式(7)所示，藉由使用更新後的觀測量，KF 提供在 $k(\hat{x}_k)$ 時刻最佳的估值狀態向量。相對而言，最佳回饋平滑化允許在 $k(\hat{x}_{ks})$ 時刻時，最佳平滑估計狀態向量可使用所有或部分的觀測量，平滑化估值(\hat{x}_{ks})可被認為是最佳整合前向與後向估計。前向估計為使用所有至 k 時刻的觀測量，其由 KF 提供。後向估計為使用 k 時刻以後所有或部分的觀測量。由於使用更多的觀測量來更新估值，後向估計法即使成果不是更準確，也不會低於濾波估計法(Gelb, 1974)。

由於平滑化後進行濾波階段，所有平滑化法取決於所獲得的濾波解。因此，準確平滑化決定準確的濾波(Gelb, 1974)。根據文獻(Gelb, 1974)，目前有 3 種 backward 平滑化演算法：固定區間平滑(fixed-interval smoothing)、不動點(單點)平滑(fixed-point smoothing)、固定延遲平滑(fixed-lag smoothing)。本研究使用固定區間平滑化法，詳細請參考文獻

(Gelb, 1974)、(Brown & Hwang, 1992)。如同圖 3(a)所示，N 時段內的每一時刻可由差分計算得。濾波器解的估值可由 KF 中的每一時刻 $k(\hat{x}_{k,k})$ 取得，其中 $k=0, 1, 2, \dots, N$ (El-Sheimy, 2002)。整個時間間隔觀測量在固定區間平滑法的最初和最後時刻是固定的，即要求所有時段 k 的最佳平滑估計介於 0 和 N 之間，

如圖 3(b)所示。在這種情況下，所有介於 0 和 N 之間的觀測量皆被更新使用，因此， k 時刻最佳平滑估計為 $\hat{x}_{k,k}^s$ 。很明顯的，因為需要獲得到 N 時刻的所有觀測量，這種類型的平滑化僅使用於資料完全取得後的後處理 (Shin & El-Sheimy, 2005)。

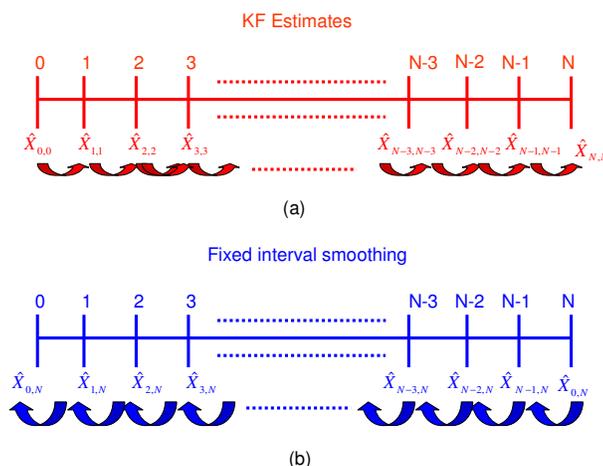


圖 3 固定區間平滑化法示意圖

本研究所用 RTS backward 平滑法，相對於其他固定區間平滑，RTS 運算法則為最容易且簡單 (Gelb, 1974)。RTS 平滑法包含前算步驟和倒算步驟。KF 包含儲存每一時刻所有預測的最新估值和相應的協方差，稱為前算步驟。倒算步驟開始於前算濾波器的結束 (即在第 N 時刻)，初始條件為 $\hat{x}_{N,N}^s = \hat{x}_{N,N}$ 與 $P_{N,N}^s = P_{N,N}$ 。RTS 計算方法如下 (Scherzinger, 2000)：

$$\hat{x}_{k,N}^s = \hat{x}_{k,k} + A_k (\hat{x}_{k+1,N}^s - \hat{x}_{k+1,k}) \quad (9)$$

$$A_k = P_{k,k} \Phi_{k+1,k}^T P_{k+1,k}^{-1} \quad (10)$$

其中 $\hat{x}_{k,N}^s$ 為平滑後狀態向量估值

A_k 為平滑化增益矩陣

k 為 $N-1, N-2, \dots, 0$

平滑化狀態的協方差矩陣如下式所示 (Gelb, 1974)：

$$P_{k,N}^s = P_{k,k} + A_k (P_{k+1,N}^s - P_{k+1,k}) A_k^T \quad (11)$$

計算任何時刻 k 的 RTS 平滑化估值時，將其視為一個濾波估計線性組合，得到該時刻的平滑估值，並將之視為下一時刻 $k+1$ 的指標。因此，RTS 平滑估計可用來更新前算濾波解，以獲得更好的估計 (El-Sheimy, 2002)。計算每一個時刻平滑估值時需要儲存 KF 預測和更新 (過濾) 估值及相對應的協方差。當進行整合 INS/差分 GPS 解算時，可利用連續不間斷的數據資料。考慮差分 GPS 情況下，只有預測估計和協方差可被利

用。圖 4 所示為 RTS 平滑器定位誤差概念圖。如圖所示，使用後處理 RTS 平滑器可顯著地去除 KF 的殘餘誤差。

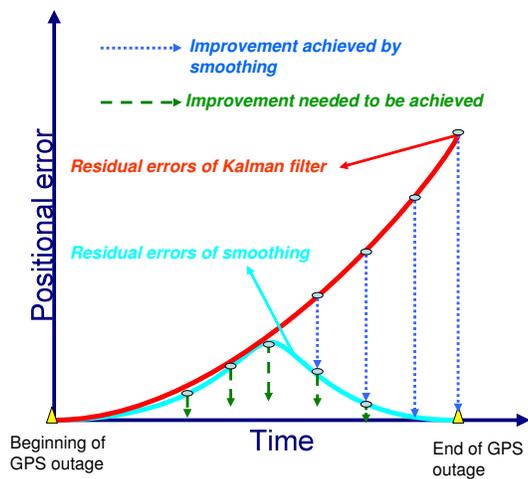


圖 4 平滑器定位誤差的影響

四、實驗結果

本研究實驗區域為台灣台南市，針對測繪車搭載的 GPS RTS 平滑器與低成本 INS 進行測試分析。測試路線包括市區、近郊區、市中心區和郊區之間。這三條路線包含了把三個條件：

(1)透空區；(2)半透空區；(3)GPS 訊號接收受到限制的市區。本次實驗將於汽車上裝載一參考用的 IMU、NovAtel 的 SPAN-CPT、兩個測試用的 IMU、C-MIGITS™、BEI 的 MMQ-G。相關儀器及測試車輛如圖 5 所示。



圖 5 (a)載具平台(b)市區(c)近郊區(d)市中心區和郊區之間

GPS 基站架設在成功大學測量及空間資訊系館頂樓，使用儀器為 SPAN-CRT 及 ProPak V3，接收雙頻觀測量，並利用 GrafNavTM 8.10 將 GPS 原始觀測量進行差分處理，提供 IMU LC 的更新。當載波相位 ambiguity are fixed 時，GPS 將進行更新。SPAN-CPT 的原始觀測量進行 TC 平滑化處理當做參考軌跡。測試的 IMU 資料為兩個低成本的 IMU：C-MIGITS™ III 及 MMQ-G，GPS 資料由 SPAN-CPT 取得。測試前將 GPS 與 IMU 的 lever arms 進行改正，並利用軟體

Inertial Explore 8.10 將所有 LC 或 TC 軌跡進行處理和平滑化，最後可比較測試與參考 IMU 軌跡之間的位置及 heading 的誤差。

4.1、Outskirt area

實地郊區測試路線及差分 GPS 結果如圖 6 所示。測試開始後約 200 秒為 IMU 進行率定，目的為取得初始 IMU 的姿態。圖 7、圖 8 為 C-MIGITS III 的 LC 與 TC 位置及 heading 的誤差；圖 9、圖 10 為 MMQ-G。

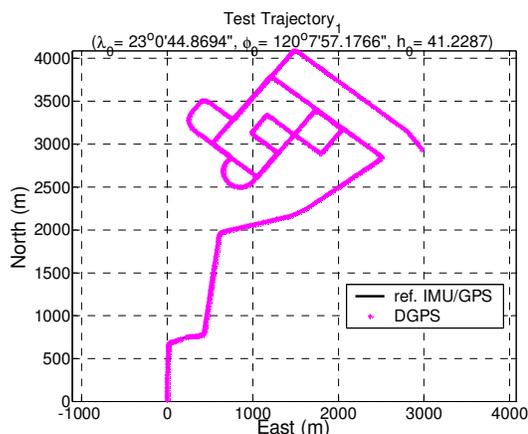


圖 6 郊區測試路線

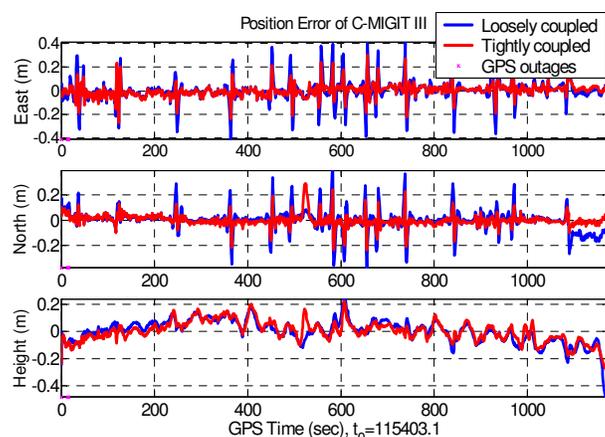


圖 7 C-MIGITS III 位置誤差

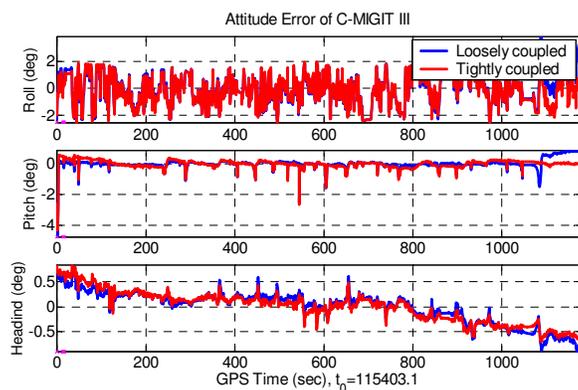


圖 8 C-MIGITS III 姿態誤差

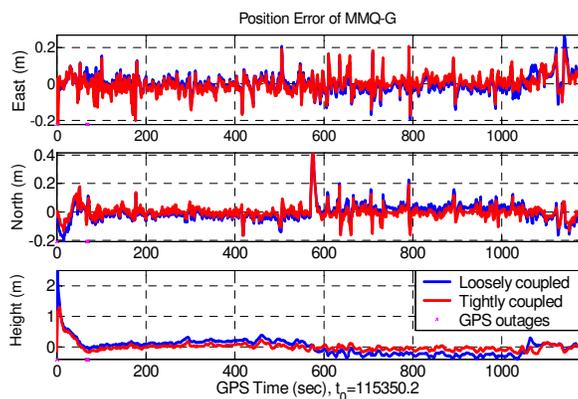


圖 9 MMQ-G 位置誤差

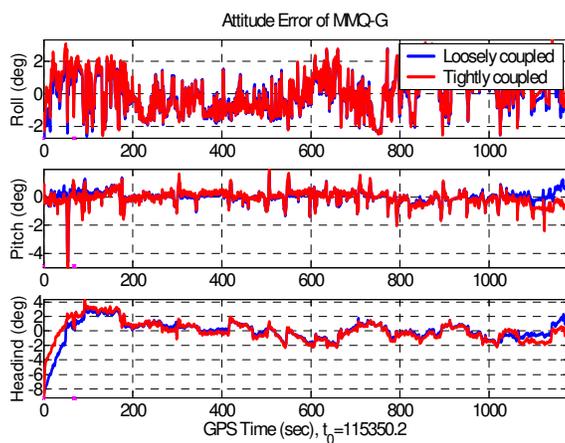


圖 10 MMQ-G 姿態誤差

由圖 7 至 10 成果顯示，TC 位置精度有所提升，然而 roll 與 pitch 方向精度卻不佳。主要因為車內兩個測試用的 IMU 在 x 與 y 軸上的振動比起車頂參考用的 IMU 來得劇烈，但是車輛移動所

造成的振動對於 heading 方向影響並不大。兩個測試用的 IMU 在 LC 與 TC 的 heading 方向有相似的成果。相關成果列於表 1。

表 1 位置與方向精度成果

C-MIGITS III			
	RMS value (m) (deg)		Improvement (%)
	Loosely coupled	Tightly coupled	
East	0.0938	0.054	42.43
North	0.0803	0.0472	41.22
Up	0.0871	0.0762	12.51
Roll	1.1613	1.1010	5.18
Pitch	0.3561	0.3143	11.74
Heading	0.3146	0.3131	0.48
MMQ-G			
	RMS value (m) (deg)		Improvement (%)
	Loosely coupled	Tightly coupled	
East	0.0514	0.0498	3.18
North	0.0586	0.0499	14.83
Up	0.2684	0.1583	41.00
Roll	1.2046	1.2581	-4.43
Pitch	0.4713	0.5274	-11.91
Heading	1.5103	1.4116	6.54

4.2、Test between downtown and outskirts

測試路線如圖 11 所示，因為有高樓大廈遮蔽，圖中可得 GPS 無法完整提供

整個實地測試區域皆有解。圖 12、圖 13 為 C-MIGITS III 的 LC 與 TC 位置及 heading 的誤差；圖 14、圖 15 為 MMQ-G。

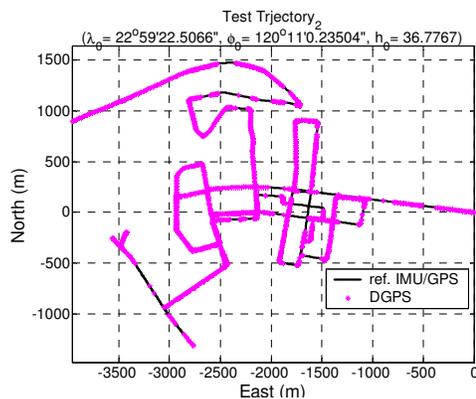


圖 11 測試路線

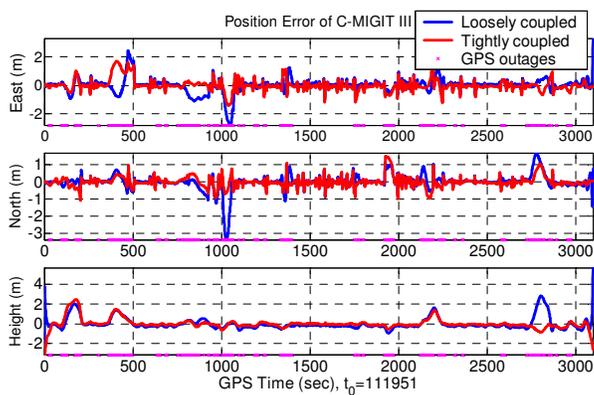


圖 12 C-MIGITS III 位置誤差

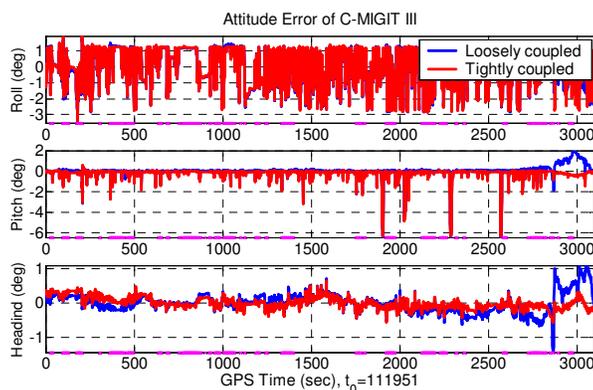


圖 13 C-MIGITS III 姿態誤差

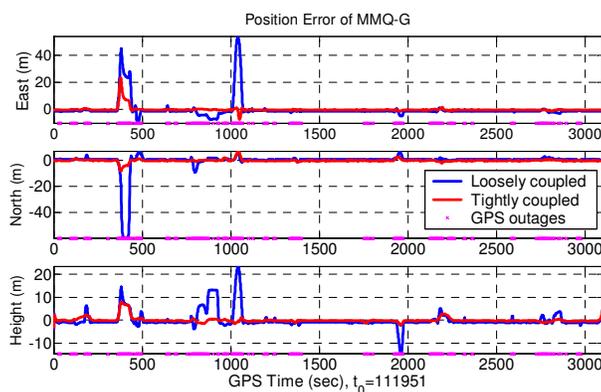


圖 14 MMQ-G 位置誤差

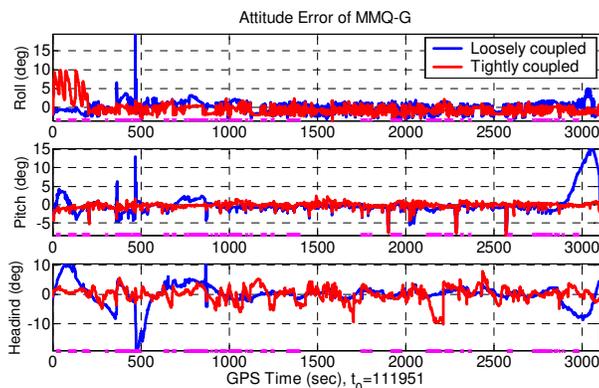


圖 15 MMQ-G 姿態誤差

相關成果列於表 2。由成果可得，若忽略先前提到車輛振動的影響，定位及姿態的精度有很大的提升。C-MIGITS III 在水平位置的均方根小於 1 公尺，此成果符合 MMS 的要求。此外，MMQ-G 利用 TC 方法於北方向定位誤差由 57 公尺提升至 7 公尺。

表 2 位置與方向精度成果

C-MIGITS III			
	RMS value (m) (deg)		Improvement (%)
	Loosely coupled	Tightly coupled	
East	0.5037	0.4106	18.49
North	0.4585	0.3052	33.42
Up	0.6159	0.5164	16.15
Roll	1.1120	1.1076	0.39
Pitch	0.7392	0.6474	12.42
Heading	0.2758	0.1662	39.72
MMQ-G			
	RMS value (m) (deg)		Improvement (%)
	Loosely coupled	Tightly coupled	
East	6.8588	1.8494	73.04
North	7.1154	0.9890	86.10
Up	3.5731	1.1404	68.08
Roll	1.4160	1.8026	-27.30
Pitch	2.8988	0.9335	67.79
Heading	3.6314	2.4944	31.31

4.3、Test in the downtown area

實地市區測試路線如圖 16 所示。實地測試時有約 40% 的時間可視衛星少於 4 顆，因此無法利用 LC 方法進行位置及速度的更新。圖 17、圖 18 為 C-MIGITS

III 的 LC 與 TC 位置及 heading 的誤差；圖 19、圖 20 為 MMQ-G。由成果可得，因為沒有衛星訊號，GPS 在第 18 分鐘時發生長達 200 秒的 outage，位置精度快速降低，因此位置誤差估計不如預期。此

外，雖然大多數時間可接收 4 顆以上衛星，但 DOP 值仍非常大，主要原因可能有兩個：(1) 衛星幾合分布不佳(2) 反射訊號導致市區 GPS 位置與速度精度下降。在此情況下，KF 的誤差估計無法提升導航解的精度。

表 3 所示為市區成果。由於 C-MIGITS III 比起 MMQ-G 有更佳的性

能，C-MIGITS III 依賴 GPS 的程度比起 MMQ-G 較低，因此當 GPS 訊號接收不良時，MMQ-G 精度比起 C-MIGITS III 下降來得多。如表 3 所示，C-MIGITS III 利用 TC 在北方向與垂方向精度有所提升，MMQ-G 在垂直方向卻是降低。此外，不論是否在市區，C-MIGITS III 姿態精度比起 MMQ-G 而言，有明顯的提升。

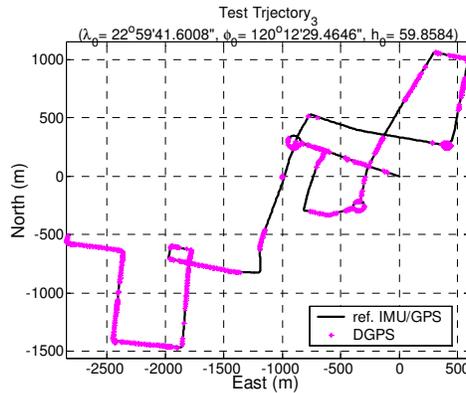


圖 16 測試路線

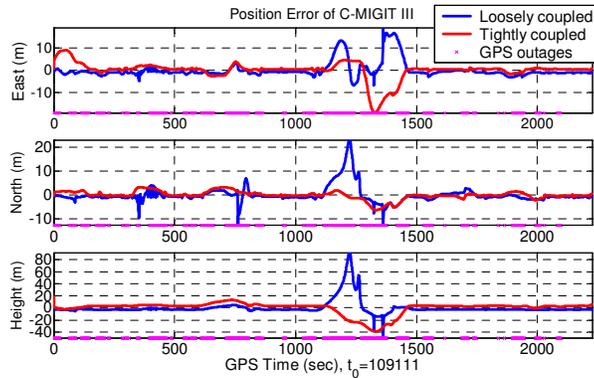


圖 17 C-MIGITS III 位置誤差

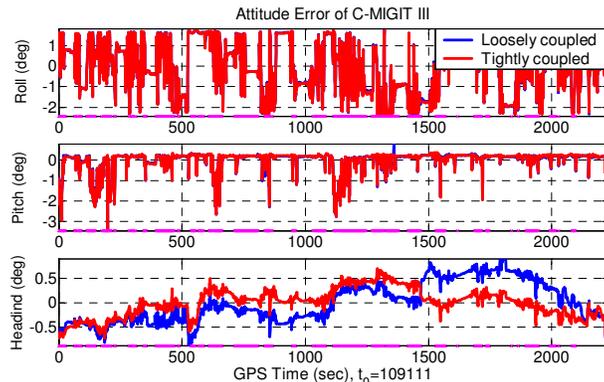


圖 18 C-MIGITS III 姿態誤差

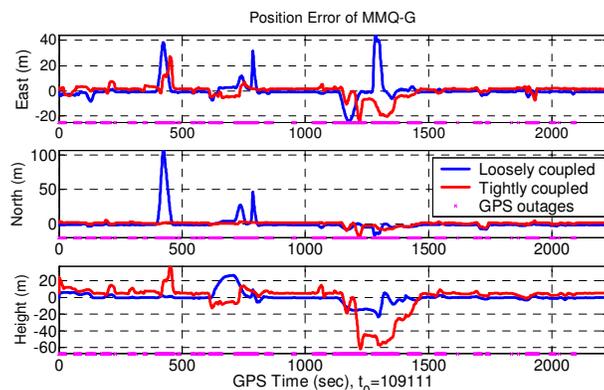


圖 19 MMQ-G 位置誤差

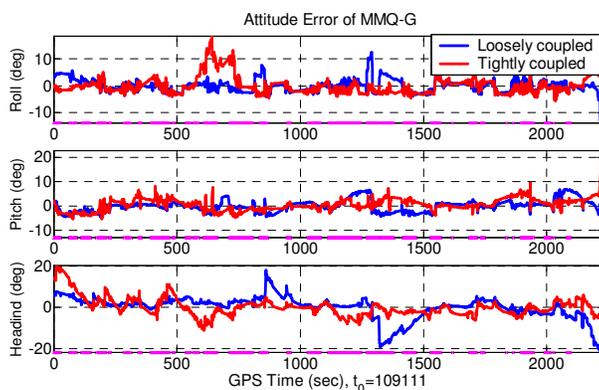


圖 20 MMQ-G 姿態誤差

表 3 位置與方向精度成果

C-MIGITS III			
	RMS value (m) (deg)		Improvement (%)
	Loosely coupled	Tightly coupled	
East	3.7196	4.0059	-7.70
North	3.4296	1.7717	48.34
Up	12.1738	10.0519	17.43
Roll	1.2357	1.2285	0.58
Pitch	0.4769	0.4714	1.15
Heading	0.4097	0.2832	30.88
MMQ-G			
	RMS value (m) (deg)		Improvement (%)
	Loosely coupled	Tightly coupled	
East	9.8277	4.5843	53.35
North	3.1243	2.6278	15.89
Up	6.6257	11.7530	-77.38
Roll	2.3963	3.2606	-36.07
Pitch	2.5033	2.5587	-2.21
Heading	5.4537	4.5736	16.14

五、結論

本研究討論三種不同區域情形，使用兩個低成本的 MEMS IMU 進行 LC 與 TC 的成果分析比較。結果顯示，C-MIGITS III 的 LC 在三個不同測試中，定位及 heading 方向的精度皆有所提升。然而低成本的 MEMS IMU 的感測能力與衛星於市區時的反映訊號，將降低位置與姿態的精度，特別是在垂直與 heading 方向。

為了獲得直接定理定位技術及相關應用，MMS 需達到公分等級的定位精度。傳統的 LC 至少需要 4 顆可視衛星，然而市區 GPS 會有訊號遮蔽問題，在此情況下，TC 的優點為可直接使用原始 GPS 觀測量進行更新。如同本研究成果所示，C-MIGITS III 可用來提供 MMS 所需的位置和方向資訊，但使用 TC 在市區時無法達到 MMS 所需精度的成果；而 MMQ-G 僅在透空度良好的地區達到要求的精度。

本研究後續的將著重於市區 GPS 發生 outages 時的影響，未來也許可配合里程計數器或高度計等其他感測器，做為相關更新來源。未來利用 TC 發展整合低成本的 MEMS IMU 與 GPS 搭配其他更多的感測器，期望精度可以更進一步地提升。

陸、參考文獻

- 1.Bar-Itzhack, I.Y. and Berman, N., 1988. Control Theoretic Approach to Inertial Navigation System, AIAA Journal of Guidance Control & Dynamics, Vol. 11, pp. 237-245.
- 2.Brown, R.G. and Hwang, P.Y.C., 1992. Introduction to random signals, John Wiley and Sons, New York.
- 3.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 No. 20209.
- 4.Chiang, K.W., Noureldin, A. and El-Sheimy, N., 2003. A New Weight Updating Method for INS/GPS Integration Architectures Based on Neural Networks, Measurement Science and Technology, Vol. 15(10), pp.2053-2061.
- 5.El-Sheimy, N., 1996. The Development of VISAT - A Mobile Survey System for GIS Applications, Ph.D. thesis, Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, UCGE Report No. 20101.
- 6.El-Sheimy, N., 2002. Introduction to Inertial Navigation, Geomatics department, University of Calgary, ENGO 699.71 lecture notes.
- 7.Gelb, A., 1974. Applied Optimal Estimation, The Analytic Science Corporation.
- 8.Goad, C.C., 1991. The Ohio State University Mapping System: The Positioning Component, Proc. of the 47th annual Meeting, The Institute of Navigation (ION), Williamsburg, VA, pp. 121-124.
- 9.Hide, C. and Moore, T., 2005. GPS and Low Cost INS Integration for Positioning in the Urban

- Environment, Proc. of ION GNSS, pp.1007-1015.
- 10.Lewantowicz, Z.H., 1992. Architectures and GPS/INS integration: impact on mission accomplishment, IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, Vol. 7(6) ,pp. 16-20.
 - 11.Scherzinger, B.M., 2000. Precise robust positioning with Inertial/GPS RTK, Proc. of the ION GPS, Salt Lake City, UT, USA, pp. 155-162.
 - 12.Shin, E.H., 2005. Estimation Techniques for Low-Cost Inertial Navigation, Ph.D. thesis, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, UCGE Report No. 20219.
 - 13.Shin, E.H. and El-Sheimy, N., 2005. Navigation Filter Design for Pipeline Piggings, Journal of Navigation, 58:283-295 Cambridge University Press.
 - 14.Tao, V. and Li, J., 2007. Advance in Mobile Mapping Technology, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Book Series, Taylor and Francis.
 - 15.Wendel, J. and Trommer, G.F., 2004. Tightly coupled GPS/INS integration for missile applications, Aerospace Science and Technology Vol. 8, pp.627-634