

# 基於智慧手機發展即時平滑器與約制演算法 提升行人於空間中定位之精度

廖振凱<sup>1\*</sup> 江凱偉<sup>2</sup> 周志明<sup>3</sup> 李智鴻<sup>4</sup>

## 摘要

近年來車載與空載移動製圖系統逐漸成熟，而智慧手機與穿戴式裝置正逐漸應用到日常生活之中，各種微機電系統感測器也隨之普及，具有潛力取代過去可攜式移動製圖系統所需配戴的設備。然而廣泛應用於車載和空載整合導航系統的慣性積分導航，卻不適用於行人室內定位。本研究使用控制點取代衛星定位系統，來源可以是傳統地測點、地圖、影像特徵點或無線射頻等室內定位技術。同時也針對慣性積分的誤差累積提出步速約制演算法與即時平滑器。實驗結果顯示本研究提出的方法，能夠有效提升使用慣性積分導航與智慧型手機的即時行人室內定位精度。

**關鍵詞：**行人室內定位、慣性導航系統、智慧型手機

## 1. 前言

對於行人室內導航的應用而言，智慧型手機由於內建的全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)、慣性量測單元(Inertial Measurement Unit, IMU)、磁力計、無線網路、藍芽與相機等硬體，輕便與多樣性的感測器，使其成為一個相當理想的可攜式導航系統。同時，智慧型手機近幾年在全球的快速發展，高度的普及率使其同時具有成為個人行動導航系統的優勢。這些特性與過去需要佈設大量設備的室內定位技術相比，可以大幅減少室內定位應用的推廣與發展成本。使用者的室內位置資訊結合大數據分析與地理位置服務(Location Based Service, LBS)，能夠促進個人商務和行動支付的市場。而針對測繪應用而言，高精度的室內圖資除了提供專家分析各種資訊和輔助定位以外，一般使用者也開始希望能夠透過智慧行動裝置進行室內導航，例如以智慧手機顯示室內環境影像，甚至三維的虛擬空間，輔助使用者更加清

楚自身位置，並了解如何到達目的地。因此來自導航定位、室內設計與測繪等領域，以及博物館、車站和商場等各種室內空間的室內製圖需求開始增加。然而最近已相當成熟的室外移動製圖技術需要精確的載台位置資訊，卻受限室內遮蔽環境，而無法接收良好的衛星訊號。同時狹窄的空間也限制了載台的類型、體積與載重，讓積分式慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)失去了可靠的外部輔助與平穩的載台，難以提供精確的定位與姿態訊息，造成移動製圖系統無法執行直接地理定位的演算。行人是室內空間最方便的平台之一，但要以身人做為移動製圖系統的載台，慣性積分導航的行人室內定位精度就必須提升。

室內定位技術發展至今已二十多年，基於不同理論與設備也演化出許多不同的定位方法(Gu & Lo, 2009; Harle, 2013; Koyuncu & Yang, 2010; Mautz, 2012)，技術彙整見下表 1。室內行人定位技術最關鍵的挑戰是如何適應行人運動的模式，並在沒有衛星定位系統的輔助下，達到室內導航與移

<sup>1</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 博士候選人

<sup>2</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

<sup>3</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士

<sup>4</sup> 財團法人資訊工業策進會智慧網通系統研究所 技術產品經理

\*通訊作者，電話:06-2370876 ext.857, E-mail:cacalut1690@gmail.com

收到日期：民國 104 年 09 月 23 日

修改日期：民國 105 年 06 月 08 日

接受日期：民國 105 年 09 月 01 日

動製圖應用所需要的精度。

傳統室內定位技術的原理多透過發射器與接收器間的訊號傳遞，或是進一步利用到達時間定位法(Time of Arrival, ToA)、到達角度定位法(Angle of Arrival, AoA)與到達時間差定位法(Time Difference of Arrival, TDOA)等方法獲得定位解。Want *et al.* (1992)提出的紅外線室內定位系統是早期較為人知的系統之一，透過佈建發射器與接收器可以達到房間等級(Room level)的定位精度。除了採用人工的紅外線來源以外，Hauschildt & Kirchhof (2010)也曾發表一套基於被動式熱感測器的紅外線定位系統，追蹤人體所在的位置進行定位。當觀測訊號改為聲波時，Ward *et al.* (1997)提出了一套聲波定位系統，透過天花板上的接收器，接收使用者身上發射器發送的聲波訊號進行定位，三維精度可以達到 3 公分。該研究的實際案例曾在一千平方公尺的空間設置 750 個接收器與 75 個移動發射器。另外

也有在使用者身上裝設接收器的被動式系統 (Jiménez *et al.*, 2009)與基於回音的系統(Wan & Paul, 2010)。Seco *et al.* (2010)則是利用無線射頻辨識系統(Radio Frequency Identification, RFID)在一千六百平方公尺的空間以 71 個主動式標籤達到定位精度約 1.5 公尺。Peng *et al.* (2011)更進一步以 RFID 整合室外 INS/GNSS 定位系統，建置一套公尺級的室內外無縫定位系統。

然而這類無線射頻技術(Radio Frequency, RF)的方法大都需要額外的設備與建置成本，將設備佈設於室內環境或使用者身上，精度與佈設的密度高度相關。因此這類定位方法，比較適合用在使用者密度較高，室內空間相對較小的環境 (Groves *et al.*, 2007)。同時定位精度也與訊號的品質和環境障礙有關，例如紅外線會受環境光線影響，而聲波會受多路徑效應影響等等，較難獲得穩定的定位解。

表 1 室內導航技術彙整(Mautz, 2012)

Technology	Typical Accuracy	Typical Coverage (m)	Typical Measuring Principle
Cameras	0.1mm – dm	1 – 10	Angle measurements from images
Infrared	cm – m	1 – 5	Thermal imaging active beacons
Tactile & Polar Systems	$\mu$ m – mm	3 – 2000	Mechanical, interferometry
Sound	cm	2 – 10	Distances from time of arrival
WLAN/WiFi	m	20 – 50	Fingerprinting
RFID	dm – m	1 – 50	Proximity detection, fingerprinting
Ultra-Wideband	cm – m	1 – 50	Body reflection, time of arrival
High Sensitive GNSS	10m	global	Parallel correlation, assistant GPS
Pseudolites	cm – dm	10 – 1000	Carrier phase ranging
Other Radio Frequencies	m	10 – 1000	Fingerprinting, proximity
Inertial navigation	1%	10 – 100	Dead reckoning
Magnetic Systems	mm – cm	1 – 20	Fingerprinting and ranging
Infrastructure System	cm – m	building	Fingerprinting, capacitance

表 2 近代主流室內導航技術的特色

現行常見的室內定位技術	無線網路 (Wi-Fi)	藍芽訊號 (Bluetooth)	無線射頻辨 識系統(RFID)	影像視覺 (Vision based)	慣性導航系統 (INS)	行人航位推算 (PDR)
需要額外基礎設施	需要	需要	需要	不一定	不需要	不需要
需要建置定位資料庫	需要	不一定	不一定	需要	不需要	不需要
需要訓練過程	需要	不一定	不一定	需要	不需要	不一定
抗環境變化的能力	差	差	差	差	優	優
定位誤差隨時間累積	不會	不會	不會	不會	會	會

無線網路與藍芽定位則是近代兩種最廣為人知的室內無線射頻定位技術。前者同樣能以上述三種訊號定位方法進行定位，但更多的是利用指紋辨識(Fingerprinting)的概念，訓練並建置場域訊號的強度資料庫，經由比對使用者所處位置的訊號強度判斷其所在的位置。King *et al.*(2006)就已經基於無線網路訊號強度與精密的訓練程序，發展出達到平均誤差約 1.6 公尺的指紋辨識定位系統。Golden & Bateman (2007)則基於 ToA 方法在消除多路徑效應的影響後可以達到 1 到 5 公尺的定位精度。而許多學者也在研究分析造成無線訊號強度變化的因子，包括設備的方向(Xiang *et al.*, 2004)與人體的影響(Gansemer *et al.*, 2010)等等。

藍芽定位則以近年蘋果公司(Apple Inc.)大力推動的低功耗藍芽(Bluetooth Low Energy, BLE)最為著名，常見的定位方式為當感應到藍芽裝置(Beacon)時，即視作使用者位於該位置，為一種提供近似位置的方法。此外也有不少利用三邊交會或指紋辨識等概念進行定位的研究。Wang *et al.* (2013)和 Salas(2014)都利用智慧手機收到的藍芽訊號換算成距離進行三邊定位並分析其效能。Fernandez *et al.* (2007)則是基於指紋辨識方法並發展動態率定程序，改善藍芽定位系統的可靠度。然而不論是無線網路或是藍芽傳輸，都仍是基於射頻訊號的發布與傳遞，因此同樣會受到設備密度、訊號品質與環境因子的影響，與紅外線或聲波等做為觀測訊號的其他定位技術相比，其設備較普及且成本較低為其優勢。

另外一種相當著名且歷史久遠的室內定位技術則是以影像為基礎，透過使用者在現地拍攝的影像，與環境影像資料庫進行比對來決定使用者的位

置。Kohoutek *et al.* (2010)使用三維點雲資料與 LoD (Level of Detail) 4 級的建物內部模型進行匹配，再結合三邊與空間交會獲得精確的相機位置。Muffert *et al.* (2010)則使用全景相機(Omnidirectional camera)透過匹配連續影像與相機相對方位進行定位。Mulloni *et al.* (2009)基於手機的相機與條碼式的標籤發展了一套低成本的室內定位系統，透過標籤的辨識進行定位並提供 LBS。前述三個研究分別代表不同的影像定位類型，但是都與射頻技術的指紋辨識方法一樣，需要建置資料庫或伺服器，或需要額外設施的佈建，也不允許環境有任何的改變。此外，影像匹配與特徵辨識演算法的效能是這種方法在即時應用上面臨的挑戰，其定位精度則取決於影像的品質以及演算法的效能。

行人航位推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)是室內行人導航應用慣性量測技術最常見的方法，透過計步器與方位感測器以類似導線測量的概念，推估使用者的二維位置。PDR 將三維世界簡化為二維平面並避開加速度的積分運算，因此沒有 INS 使用慣性積分方程式常見的重力投影問題。這一優勢大幅減低了 PDR 於行人導航定位的誤差，並使 PDR 成為最常見的慣性室內行人導航方法。Weinberg (2002)將加速度計放置在腰部並以垂直方向的加速度估測使用者的步長進行航位推算。Liu *et al.* (2011)則將陀螺固定在大腿和腰部，前者用於估測使用者行走的擺盪幅度估算步長，後者用於計算人體旋轉角度，然後進行航位推算。Chen *et al.* (2011)使用智慧手機中的慣性量測單元與經驗步長模型發展行人航位推算。

但是 PDR 的方位角(Heading)精度與積分式 INS 一樣受限於陀螺與磁力計的精度。行人運動的

震動雜訊不僅使得陀螺積分後的角度誤差快速累積，也造成行人與感測器坐標系統間的動態非正交誤差，更進一步惡化了積分後的精度。雖然 Kim *et al.* (2004) 使用磁力計輔助行人航位推算，但磁力計通過量測環境磁場推估方位角，卻容易受到環境變化與磁性物質的干擾，使得估計的方位角有突發性的粗差。PDR 與積分式 INS 不同的誤差來源，是 PDR 使用的步長估計模型一般為各種經驗公式，常無法精確地符合不同使用者的身體特徵與行走習慣。雖然可以透過模型參數的率定和調整獲得更準確的步長，但由於模型係數的不確定性，往往產品系統的效能會比實驗系統差，後處理的模式也並不適用在即時導航的應用。根據國外研究，不同行人間的步長變化幅度可能達到 50%，即使在行走速度相同的條件下，變化幅度仍可能達到 40% (Harle, 2013)。因此，PDR 仍會由不精確的步長與方位角估值造成類似 INS 積分方程式中，積分加速度與角速度產生的位置誤差。故 PDR 與積分式 INS 一樣需要外部的輔助資訊約制誤差的累積。但 PDR 若無氣壓計的輔助，就無法提供高度資訊獲得三維坐標。

表 2 整理近代主流室內定位技術的特性。表中額外的基礎設施指的是無線網路基地台 (Access Point, AP)、訊號發射器與接收器等等。由表中的比較與前述的介紹表明，雖然室內定位方法相當多樣，但在各有優缺點的情況下，INS 積分導航仍有其存在的需要，加上近年室內定位應用的需求逐漸增加，因此發展一種低成本、高精度和可靠的行人室內定位技術變得相當重要。

## 2. 相關研究

積分式 INS 通常與 GNSS 整合，透過積分方程式估計位置與姿態，於室外遮蔽環境中輔助衛星定位系統完成無縫導航。INS/GNSS 整合系統的演算法經過多年的發展已趨於成熟，並衍伸不同的方法以適應各種嚴苛的戶外環境。然而這種 INS 卻不常用於行人導航，主要的原因是行人運動不同於地面或空中載具，其運動模式更為複雜：行走的震動頻率較低而幅度大，規律性也較引擎機械等來的

低。故慣性量測單元因走路震動產生的雜訊，難以透過低通濾波器濾除；此外震動也造成感測器坐標系統和行人坐標系統的非正交誤差持續地動態變化，同樣會使加速度計和陀螺積分後的位置和姿態誤差快速累積，尤其是使用精度較低的微機電系統 (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS) IMU 時。所以國際上使用 INS 積分導航發展行人導航技術的研究，多半使用較高階的 IMU，或是需要配戴在鞋子或腰帶等特定位置，以獲得較精確的感測資訊，維持良好的定位精度。

儘管如此，積分式 INS 與其他非慣性方法相比的優勢在於其允許外界環境的變化，而且不需要訓練與建立資料庫，同時又能夠減少額外硬體的佈設數量和建置成本，獲得的位置也不是近似解。與 PDR 方法的不同之處在於積分式 INS 能夠推估三維位置與姿態隨時間改變的連續變化量，而非逐步的位置，或依賴氣壓計與加速度計換算的離散高度和姿態。

根據表 1 與表 2，室內定位技術有許多不同的特性和精度分級，取決於應用條件和建置成本，通常成本越高，應用範圍越狹隘的精度越高，因此配合不同方法的特性與優缺點進行整合，成為具有高性價比、高穩定度和高精度的即時室內行人導航系統，將是有效的解決方案之一。擴展式卡曼濾波器 (Extend Kalman Filter, EKF) 是最常見的多感測器整合架構之一 (Chiang & Huang, 2008; Shin, 2005)，是車載 INS/GNSS 整合導航系統中常用的濾波器。故本研究使用 EKF 以及其他外部定位技術提供的位置，取代衛星定位觀測量，整合智慧型手機中的 MEMS IMU 與其他感測器資料，進行室內行人導航的最優估計。

非諧合約制 (Non-holonomic Constraint, NHC) 和零速更新 (Zero Velocity Update, ZUPT) 是 INS/GNSS 整合導航系統於車載應用上常見的約制演算法 (Liu, 2012)。國內外其他行人導航的研究，多將感測器放置在腳上，或是在其他部位使用更高精度的感測器，偵測行走時支撐腳短暫的靜止，以此頻繁的進行 ZUPT，維持 INS 慣性積分良好的精度。NHC 最初是針對車載應用提出，因為車輛行

進時，由於機構的設計，並不會有側向與縱向的位移，因此能夠根據這樣的前提約制導航解。國外亦有人提出 INS/PDR 的整合架構，使用背包式的戰術級 IMU，以 PDR 推估的步長作為觀測量，在 KF 中更新 INS 積分的距離，獲得最佳的導航解 (Groves *et al.*, 2007)。由此啟發，本研究提出基於 NHC 概念的走速約制(Walking Velocity Constraint, WVC)，將 PDR 資訊應用在約制演算法，並使用室內控制點作為 EKF 中的觀測量而非 PDR 步長，雙管齊下減少誤差的累積。

平滑器(Smoother)是結合正向與反向濾波器的估計資訊與協變方矩陣，於後處理模式下提供最優的估計結果(Shin, 2005)。實驗選用 Rauch-Tung-Striebel (RTS)平滑器是一種固定區間的平滑器。但這類平滑器一般需要等待正向估計完全結束後，才能執行反向估計，並開始進行平滑演算，這對於導航應用的即時需求來說相當不方便。因此即時平滑的概念被提出應用在車載 INS/GNSS 整合導航系統中(Chiang *et al.*, 2012)。Chiang *et al.* (2012)提出的即時平滑器概念是針對車載 INS/GNSS 整合系統，當偵測到有衛星定位系統提供的更新觀測量時，即進行平滑。因此正常狀況下，配合衛星定位系統的資料頻率，執行平滑的間隔約為 1 秒，若衛星訊號受到遮蔽則不執行平滑，僅依靠 INS/NHC 進行無縫導航。其理論可行性的依據是當 k 時刻執行完 KF 估計後至 k+1 時刻的剩餘時間，

因資料量小，硬體效能高，仍足夠執行平滑的演算，並達到即時的效能。但本研究針對行人的室內應用，改變了執行即時平滑的策略。

### 3. 研究方法

#### 3.1 核心架構

在室外以衛星定位輔助積分式 INS 初始化之後，其餘室外空間皆模擬遮蔽環境移除衛星定位資料，與室內環境一起使用控制點以經緯度、橢球高之形式於 EKF 中作為更新觀測量，系統架構見下圖 1。室內使用的控制點由地面控制點(Ground Control Point, GCP)結合藍芽傳輸技術提供，前者具有公分級精度而後者為公尺級。演算法也可以接受其他定位技術如影像或各種無線射頻技術，提供之具備相同坐標系統，且達可用精度的位置訊息。系統使用 21 個狀態參數的 EKF：

$$x = [\delta r_{1 \times 3} \ \delta v_{1 \times 3} \ \delta \phi_{1 \times 3} \ b_{1 \times 3}^{acc} \ b_{1 \times 3}^{gyro} \ s_{1 \times 3}^{acc} \ s_{1 \times 3}^{gyro}] \dots \dots \dots (1)$$

式中  $x$  為狀態向量； $\delta r_{1 \times 3}$  為位置誤差； $\delta v_{1 \times 3}$  為速度誤差； $\delta \phi_{1 \times 3}$  為姿態誤差； $b_{1 \times 3}^{acc}$  為加速度計三軸偏差； $b_{1 \times 3}^{gyro}$  為陀螺儀三軸偏差； $s_{1 \times 3}^{acc}$  為加速度計三軸尺度誤差； $s_{1 \times 3}^{gyro}$  為陀螺三軸尺度誤差。

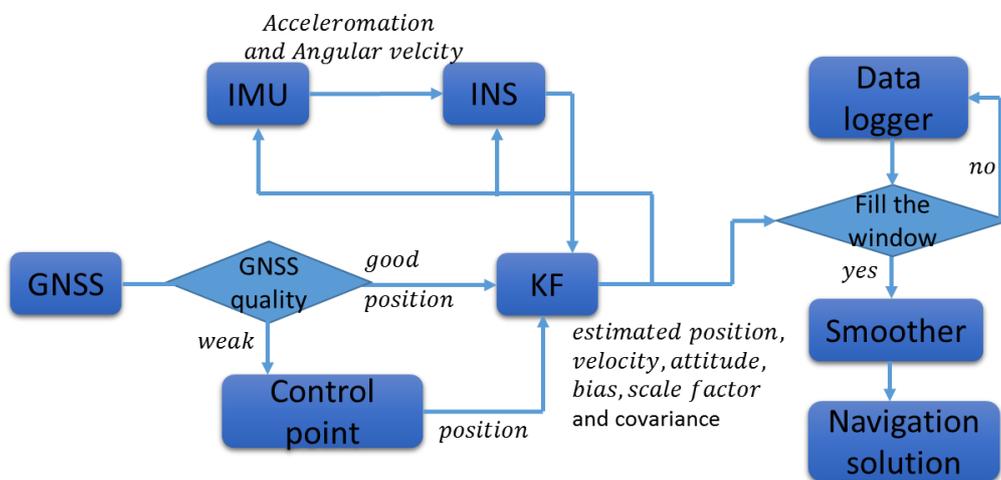


圖 1 即時平滑器與 EKF 之系統架構

EKF 可以分為預測與更新兩個階段，更新階段使用的觀測量於戶外時為 GNSS，室內及室外遮蔽區域則為控制點。預測和更新階段的模型如下：

預測階段：

$$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} \dots \dots \dots (2)$$

$$P_k = \Phi_{k-1}P_{k-1}\Phi_{k-1}^T + Q \dots \dots \dots (3)$$

式中  $\Phi$  為  $k-1$  至  $k$  時刻狀態的轉換矩陣(Transition matrix);  $P$  為狀態向量的協變方矩陣;  $Q$  為系統雜訊的協變方矩陣。

更新階段：

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R_k)^{-1} \dots \dots \dots (4)$$

$$\hat{x}_k = x_k + K_k(z_k - Hx_k) \dots \dots \dots (5)$$

$$\hat{P}_k = (I - K_k H)P_k(I - K_k H)^T + K_k R_k K_k^T \dots \dots \dots (6)$$

式中  $K$  為卡曼增益(Kalman gain);  $H$  為觀測量設計矩陣;  $R$  為觀測量雜訊的協變方矩陣;  $\hat{x}_k$  為  $k$  時刻更新後的狀態向量;  $z$  為觀測量。

一般而言感測器的率定應在實驗室中以高階設備完成，但這種率定方式不適合即時的導航應用，同時 MEMS IMU 系統誤差的低穩定度也使得感測器誤差容易隨時間而有大幅度的變化，故實驗室率定的成果不一定符合當下使用的現況，因此即時率定是必須的(Liao *et al.*, 2014)。EKF 的狀態估計結果會即時回饋至 IMU 與 INS 積分方程式進行誤差補償，雖然補償效果不如實驗室率定成果好，但尤其適合用在需要即時率定和感測器誤差相當大的低成本 MEMS IMU。因此在 EKF 中以室內控制點位置作為更新觀測量不只能改善無 GNSS 環

境下，導航狀態估計的品質，同時也提供感測器系統誤差的即時推估。

## 3.2 約制演算法

NHC 和 ZUPT 常用於 INS/GNSS 車載整合系統中，在積分式 INS 失去 GNSS 輔助時，約制純慣性的導航誤差，使導航解有更長的時間能維持在良好的精度。NHC 假設當載體行進時，側向與垂直方向的速度應為零。ZUPT 則假設當載體靜止時，三軸方向的速度皆應為零(Liu, 2012)。此外，兩種約制演算法皆是在感測器坐標系統與載體坐標系統具有固定關係的前提下。

因為行人運動具有輕微的側向位移，震動的振幅與規律性也較機械引擎來得大與不穩定，使得 NHC 並不能直接適用在行人導航。尤其是手持智慧型手機的方式，震動會使感測器坐標系統與行人坐標系統間的關係呈動態變化。上述原因使得 NHC 約制反而會造成不當的側向與縱向約制，加上震動雜訊與重力的投影在積分運算後造成的誤差，會讓前進方向的位置誤差快速累積。故本研究提出 WVC 約制演算法，調整 NHC 在側向與垂直方向的權重，並加上前進方向的速度約制。另外，使用手持式的智慧型手機，不論是放置的位置或感測器等級皆難以偵測行走時支撐腳短暫的靜止，因此本研究在使用者轉彎後，靜止 1~3 秒的時間進行 ZUPT。圖 2 為 NHC、ZUPT 與 WVC 的概念示意圖。圖中行人的  $v_y$  與  $v_z$  皆為零，說明約制條件為側向與縱向的速度為零，換言之演算法模型期望行人與車載模式在這兩個方向上的速度是零。由於車載的先天條件使得這個期望能夠接近為真，因此車載 NHC 在這兩個方向給約制條件的權值相當大。但行人的運動模式使這項期望不容易完全為真，因此 WVC 適當的減低了在這兩個方向上的約制權重。

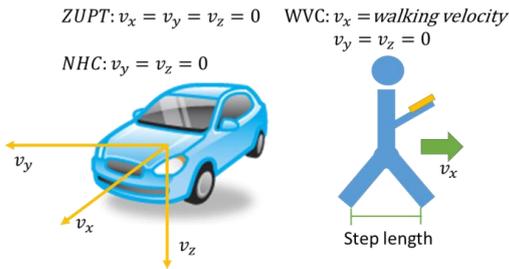


圖 2 NHC、ZUPT 和 WVC 的概念

WVC 約制前進方向的速度由計步演算法和步長模型(Chen *et al.*, 2011)即時解算得到。選擇此一步長模型的理由為該模型考量了使用者身高、行走頻率與尺度因子，屬於較嚴謹的模型。而為了切合即時的應用，實驗皆使用預設的身高與模型參數值，行走頻率則由計步演算法即時計算。走速計算的方程式如下：

$$v_k^x = (0.7 + a(h - 1.75) + b \frac{(F_k - 1.79)h}{1.75})c \times F_k \dots (7)$$

式中  $v_k^x$  為  $k$  時刻的行走速度； $F_k$  為  $k$  時刻的行走頻率； $a$ 、 $b$  和  $c$  為步長模型參數； $h$  為使用者身高。

### 3.3 即時平滑器

RTS 平滑器是採固定間隔的方式，常用來後處理 INS/GNSS 車載整合系統的資料，從而獲得比 EKF 濾波解更好的平滑解。平滑器是結合 KF 的正向濾波與反向濾波結果來獲得最優的估計。RTS 平滑器的估計方程式如下(Shin, 2005)：

$$x_k^{sm} = x_k^{update} + G_k(x_{k+1}^{sm} - x_{k+1}^{predict}) \dots (8)$$

$$P_k^{sm} = P_k^{update} + G_k(P_{k+1}^{sm} - P_{k+1}^{predict})G_k^T \dots (9)$$

$$G_k = P_k^{update} \Phi_{k+1} P_{k+1}^{predict} \dots (10)$$

式中  $G$  為平滑增益； $P^{sm}$ 、 $P^{update}$  和  $P^{predict}$  分別為平滑、更新和預測的協變方矩陣； $x^{sm}$ 、 $x^{update}$  和  $x^{predict}$  分別為平滑、更新和預測的狀態向量。

即時平滑器概念最早由本團隊應用在車載 INS/GNSS 整合系統(Chiang *et al.*, 2012)。而不同於參考文獻採偵測到外部輔助觀測量即執行平滑之做法，本研究採用固定時間間距的單窗執行平滑，原因是室內環境獲得控制點更新的頻率不如衛星定位系統高且穩定，同時雖然 WVC 等約制演算法效果不如外部輔助，但在一定程度上仍具有優化估計的效果，因此即時平滑的執行不必等待外部輔助的觀測量。反之如果行人在室內環境時，控制點數目有限，又長時間不執行平滑，誤差就會快速累積。

圖 3 說明在即時導航的應用上執行即時平滑的概念與可行之原因，尤其是一般行人導航使用智慧裝置的資料頻率多介於 15~17Hz，較車載系統常用高階 IMU 的頻率來得低，因此更有充足的時間進行平滑演算。即時平滑於整個導航系統架構中的運作模式見圖 1，當資料累積到設定單窗的大小時，即會觸發平滑器，平滑這段區間的導航濾波解，獲得更佳的状态估計值。

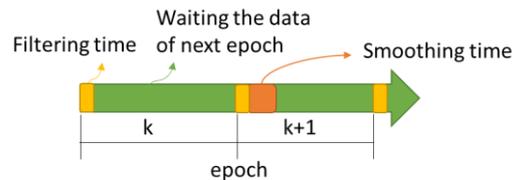


圖 3 即時平滑的原理與可行性示意圖

## 4. 成果與討論

實驗手機使用 iPhone 5S 與 Samsung S5，如下圖 4，並以兩種方案進行測試。關於兩支智慧手機的慣性量測單元率定報告可以參考本團隊過去的研究(Liao *et al.*, 2014)。參考軌跡以商用高階 MEMS IMU MIDG-II 進行相同的實驗，其規格見下表 3。



圖 4 iPhone 5S 與 Samsung S5

表 3 MIDG-II 規格表

Specification				
Output rate (Hz)	Bias		Scale factor error	
	Gyro (deg/hr)	Accelerometer (mg)	Gyro (ppm)	Accelerometer (ppm)
50	4.7	6.0	5000	19700

參考軌跡由 MIDG-II 分別與兩款智慧手機同步實驗，確保其經歷相同的實驗路線和行人運動，並執行 NHC 與 ZUPT 等約制，經後處理之平滑器獲得最佳解。下圖 5 與圖 6 則以參考軌跡和示意圖說明實驗路線。

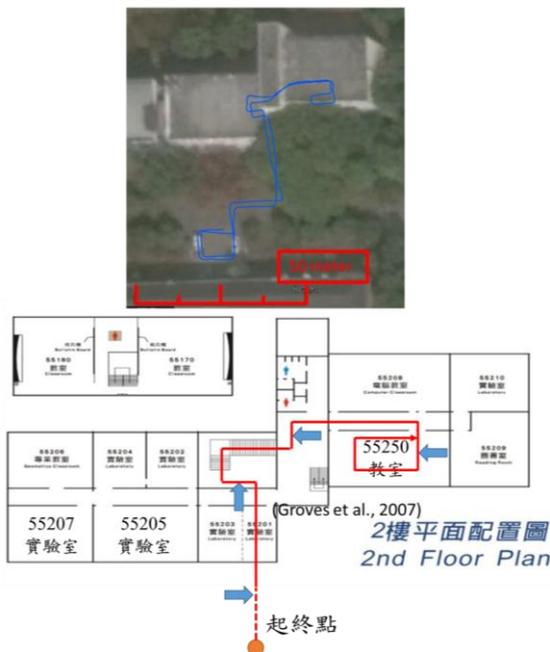


圖 5 Samsung S5 實驗路線



圖 6 iPhone 5S 實驗路線

圖 5 為以 Google Earth 展示 Samsung S5 經歷的實驗路線，由戶外起始點進入國立成功大學測量及空間資訊學系系館，經樓梯至二樓 55250 教室繞行一圈後循原路徑返回，起終點相同。圖 6 則為 iPhone 5S 的實驗路線，起點與 Samsung S5 相同，上樓後先至 55207 實驗室外走廊底端，折返往 55250 教室，在教室內繞行一圈後終點在 55205 實驗室。

由本團隊過去的率定表明兩款智慧手機的慣性量測單元規格相去不遠，因此實驗路線終點的不同，是為比較終點有無衛星定位輔助對於平滑是否有明顯影響。兩條路線僅保留在戶外繞行兩圈時的衛星定位資料進行初始化，其餘路線皆無衛星定位輔助，並於後續路段均勻設置有 4 個室內控制點，見上圖 5 與圖 6 中藍色箭頭處，這四個點為全站儀施測的地面控制坐標，由藍芽裝置發送位置訊號，多數位於轉角前後和走廊中段等區域，實際測試時約每 15 秒會遭遇一個控制點。後續誤差分析結果皆已移除含衛星定位輔助的前段軌跡，兩支智慧手機的實驗資料也以相同演算法處理。

### 4.1 WVC 約制與控制點更新

圖 7 為 Samsung S5 以不同約制演算法解算的濾波器軌跡解，紅色軌跡為 NHC 與 ZUPT 約制的 EKF 解；淺藍色軌跡為 WVC 與 ZUPT 約制的 EKF 解；綠色軌跡則是在與淺藍色軌跡相同的演算方法下，加入控制點更新；紫色軌跡是在與綠色軌跡相同的估計方法，再經後處理平滑器取得最優估計解；藍色軌跡則為 MIDG-II 的參考軌跡，同樣經過後處理平滑器。圖中 GCP 表示地面控制點更新。圖 8 和圖 9 分別為 Samsung S5 實驗的位置與姿態誤差圖。表 4 與表 5 分別為 Samsung S5 位置與姿態誤差的數值分析表。

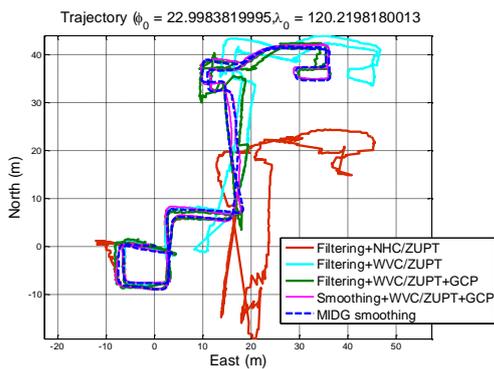


圖 7 Samsung S5 實驗軌跡

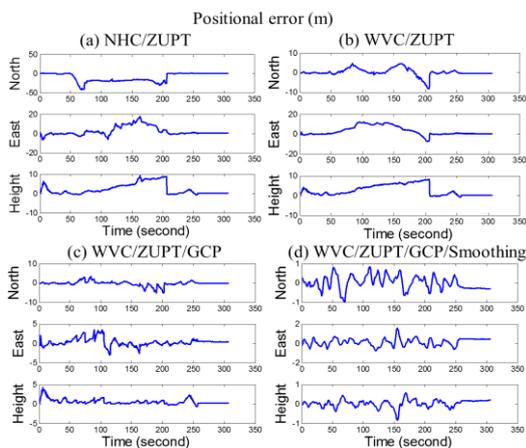


圖 8 Samsung S5 軌跡的位置誤差

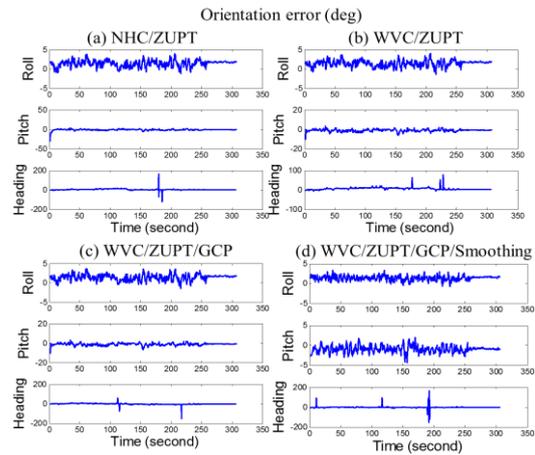


圖 9 Samsung S5 軌跡的姿態誤差

表 4 Samsung S5 軌跡的位置誤差表

Samsung			
Maximum Error (m)			
	N	E	H
Filtering + NHC/ZUPT	42.4434	17.8689	9.1891
Filtering + WVC/ZUPT	8.2482	12.6542	8.1319
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	5.2678	3.4510	4.2113
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	0.9934	1.5437	0.8396
RMS Error (m)			
	N	E	H
Filtering + NHC/ZUPT	14.8002	5.1419	3.6398
Filtering + WVC/ZUPT	1.9790	5.4046	3.7849
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	1.2300	0.9918	0.8697
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	0.3470	0.3967	0.1928
STD of Error (m)			
	N	E	H
Filtering + NHC/ZUPT	10.8298	4.5642	2.8352
Filtering + WVC/ZUPT	1.9672	4.5010	2.6703
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	1.2023	0.9531	0.6861
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	0.3471	0.3735	0.1917

表 5 Samsung S5 軌跡的姿態誤差表

Samsung			
Maximum Error (deg)			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering + NHC/ZUPT	3.9337	30.9506	165.9032
Filtering + WVC/ZUPT	3.9861	10.7497	76.7442
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	3.6279	10.7743	152.7002
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	3.3745	4.3051	163.9725
RMS Error (deg)			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering + NHC/ZUPT	1.6547	2.2114	11.2172
Filtering + WVC/ZUPT	1.6406	1.6758	8.8643
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	1.6132	1.6947	8.9252
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	1.5150	1.3010	13.8960
STD of Error (deg)			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering + NHC/ZUPT	0.8630	1.9621	10.3672
Filtering + WVC/ZUPT	0.8259	1.2997	6.1352
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	0.8141	1.2968	8.7811
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	0.6065	0.8834	13.8562

圖 10 為 iPhone 5S 的濾波器軌跡解，不同顏色的軌跡採用的方法與 Samsung S5 的案例相同。藍色軌跡同樣為 MIDG-II 的參考軌跡。圖 11 和圖 12 分別為 iPhone 5S 實驗的位置與姿態誤差圖。表 6 與表 7 分別為 iPhone 5S 實驗的位置與姿態誤差分析表。

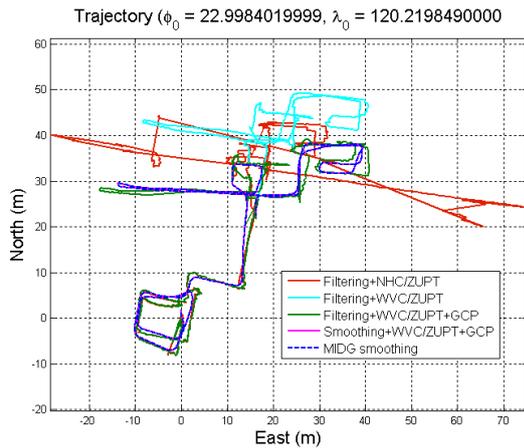


圖 10 iPhone 5S 實驗軌跡

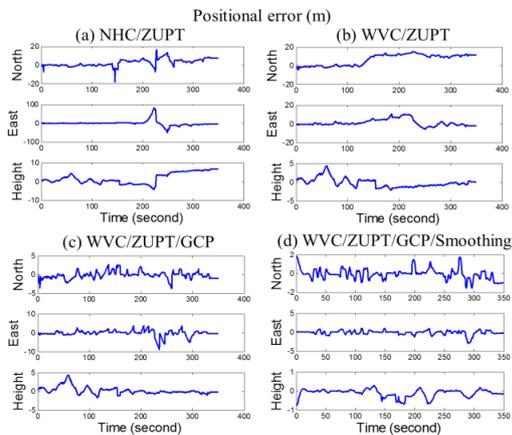


圖 11 iPhone 5S 軌跡的位置誤差

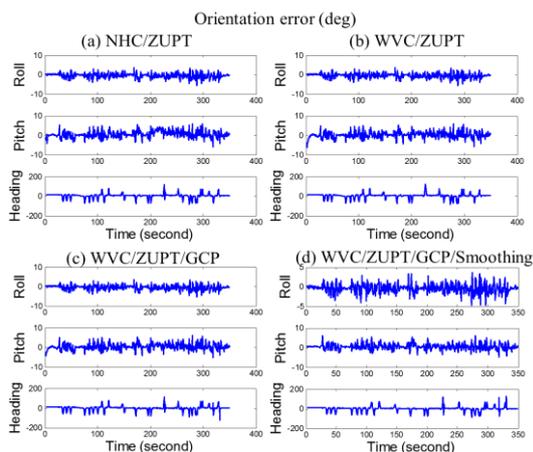


圖 12 iPhone 5S 軌跡的姿態誤差

表 6 iPhone 5S 軌跡的位置誤差表

IPHONE			
Maximum Error (m)			
	N	E	H
Filtering + NHC/ZUPT	18.0619	82.6971	6.8075
Filtering + WVC/ZUPT	15.2382	10.5535	4.2622
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	3.6413	8.8276	4.2631
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	1.8793	2.8986	0.7766
RMS Error (m)			
	N	E	H
Filtering + NHC/ZUPT	4.6846	14.5990	3.4490
Filtering + WVC/ZUPT	8.9068	3.7412	1.1919
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	0.9885	1.6341	0.9695
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	0.5507	0.5810	0.2295
STD of Error (m)			
	N	E	H
Filtering + NHC/ZUPT	3.8666	14.5965	2.9353
Filtering + WVC/ZUPT	5.8658	3.5451	1.1807
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	0.9784	1.6314	0.9493
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	0.5480	0.5714	0.2037

表 7 iPhone 5S 軌跡的姿態誤差表

IPHONE			
Maximum Error (deg)			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering + NHC/ZUPT	5.6265	5.9168	118.4948
Filtering + WVC/ZUPT	5.5191	6.5720	121.1888
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	5.4040	6.1171	119.2676
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	4.7800	6.0273	124.9589
RMS Error (deg)			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering + NHC/ZUPT	1.2830	1.8301	23.4859
Filtering + WVC/ZUPT	1.2675	1.6899	23.6683
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	1.2703	1.6635	23.7835
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	1.2498	1.5886	23.6394
STD of Error (deg)			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering + NHC/ZUPT	1.2305	1.7372	23.2259
Filtering + WVC/ZUPT	1.2155	1.6706	23.4418
Filtering + WVC/ZUPT + GCP	1.2209	1.6239	23.7836
Smoothing + WVC/ZUPT + GCP	1.1879	1.4946	23.6151

實驗結果表明 WVC 相較 NHC 更能有效約制行人運動對慣性積分導航所產生的誤差，對濾波器解具有相當不錯的效果，尤其是對位置的最大誤差。而改善的幅度與步速推估的精度有關，故與演算法中的計步器和步長模型高度相關。實驗中的模型參數皆為預設值，因此若能使用更精準的計步演算法與步長模型，將能有效提升 WVC 約制的效能。經過 WVC 輔助的即時濾波器解在沒有室內控制點更新的輔助下，使用目前預設的模型參數能夠達到 10 公尺內的均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)，並大幅減緩誤差飄移的速度。

因為 MEMS IMU 相當低的精度使得誤差曲線圖短時間即有劇烈的變化，而無法明顯觀察控制點作用的確切時間點，但經由數據的分析，比較淺藍色軌跡(未加入 GCP)與綠色軌跡(加入 GCP)，室內控制點提供絕對位置的更新，能夠將偏移的軌跡校正到正確的路徑，有效改正 WVC 約制後殘留的誤差，將位置的 RMSE 降低至 1 到 2 公尺。若使用

不精確的約制演算法，智慧手機的行人室內慣性積分導航解，將會快速飄移，而需要更頻繁的室內控制點更新，以維持整體良好的精度，故 WVC 也能夠減少演算法對室內控制點的需求。而經過後處理平滑的軌跡位置誤差更降低為 50 公分左右，但後處理模式無法滿足基於智慧裝置發展即時室內行人導航的目的。

姿態精度的改善幅度在兩個實驗方案中皆不顯著，但仍然可以觀察出演算法對姿態誤差具有改善的效果。如表 5 在改用 WVC 之後俯仰角(pitch)最大誤差從 30 度減少為 10 度。但加入 GCP 的效果不明顯，是因為行人手持手機時姿態的動態變化較複雜且頻繁，姿態精度原本就難以提升。而加入 GCP 是利用其已知位置作為更新觀測量，在濾波器的系統模型中對姿態的修正效益較低，因此改善的效果就不顯著，此時誤差的分析指標就會因為濾波器估計的隨機性，呈現有好有壞的小範圍浮動。表 7 與表 5 相同的原因，但是因為 iPhone 本身感測器規格較佳，橫滾角(roll)跟俯仰角的最大誤差在使用 NHC/ZUPT 時就僅有 6 度左右，在加入 GCP 後改善效果不顯著的狀況下，精度指標就因為同樣的原因開始浮動。換言之，在某些狀況下，NHC/ZUPT 模式可能有數十度的姿態最大誤差值，連帶影響其他的精度指標，而 WVC/ZUPT 或 WVC/ZUPT 加 GCP 可以減少最大誤差到 10 度以內，以及減少 RMSE 到 2 度以內。但無法更進一步改善姿態的精度。

此外，手機感測資料的時間標籤精度較差，取樣率低且不穩定(約 20Hz)，會造成與參考解(200Hz)時間同步的誤差，在後續做姿態的誤差分析時，就產生比對誤差。這個現象尤其對方位角的影響最為顯著。從軌跡圖的軌跡在各路段皆沒有明顯的方位偏移，而數值分析表卻有 100 多度的方位誤差，說明同一個時刻可能參考解已經開始轉向，而手機解卻因為延遲仍維持直行，造成比對後方位角至少數十度的誤差。

## 4.2 即時平滑器

即時平滑的實驗使用不同的罩窗大小進行比較。軌跡皆以 WVC/ZUPT 加室內控制點更新進行估計。圖 13 為 Samsung S5 的即時平滑軌跡，圖 14 及圖 15 分別為 Samsung S5 位置及姿態的誤差圖。表 8 和表 9 則分別為 Samsung S5 位置及姿態的誤差分析。

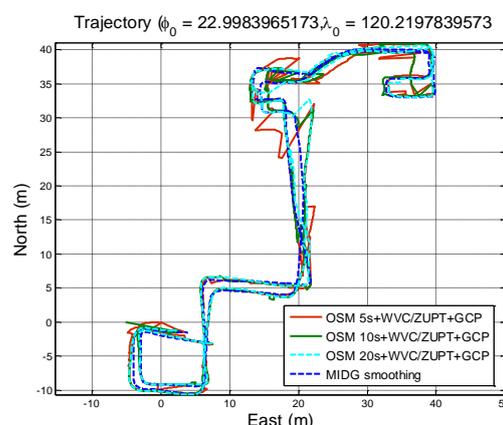


圖 13 Samsung S5 即時平滑軌跡

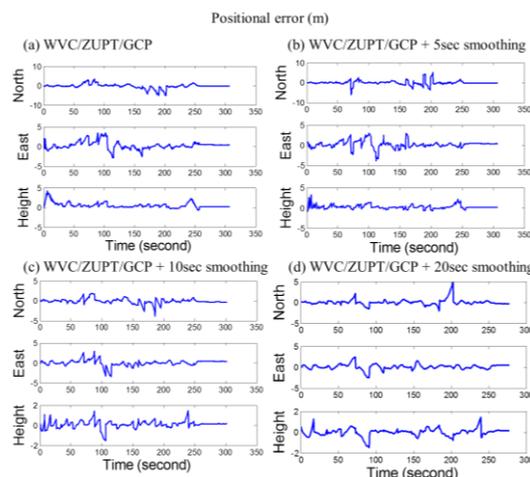


圖 14 Samsung S5 即時平滑位置誤差

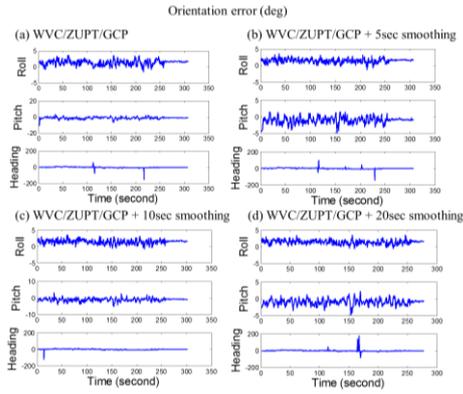


圖 15 Samsung S5 即時平滑姿態誤差

表 8 Samsung S5 即時平滑位置誤差表

Samsung			
Maximum Error (m)			
WVC/ZUPT/GCP			
	N	E	H
Filtering	5.2678	3.4510	4.2113
Online 5sec	5.9395	3.9361	3.2414
Online 10sec	3.8347	3.3244	1.5016
Online 20sec	4.9408	2.4800	1.4568
Samsung			
RMS Error (m)			
WVC/ZUPT/GCP			
	N	E	H
Filtering	1.2300	0.9918	0.8697
Online 5sec	1.0854	0.9195	0.5467
Online 10sec	0.6484	0.7452	0.3804
Online 20sec	0.6913	0.6346	0.3586
Samsung			
STD of Error (m)			
WVC/ZUPT/GCP			
	N	E	H
Filtering	1.2023	0.9531	0.6861
Online 5sec	1.0858	0.8942	0.4833
Online 10sec	0.6417	0.7448	0.3633
Online 20sec	0.6898	0.6280	0.3589

表 9 Samsung S5 即時平滑姿態誤差表

Samsung			
Maximum Error (deg)			
WVC/ZUPT/GCP			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering	3.6279	10.7743	152.7002
Online 5sec	3.5914	4.8251	144.6131
Online 10sec	3.5304	5.1947	121.8075
Online 20sec	3.6010	4.7899	176.2538
Samsung			
RMS Error (deg)			
WVC/ZUPT/GCP			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering	1.6132	1.6947	8.9252
Online 5sec	1.5722	1.4565	9.2053
Online 10sec	1.6012	1.4674	6.8155
Online 20sec	1.5690	1.3635	12.2263
Samsung			
STD of Error (deg)			
WVC/ZUPT/GCP			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering	0.8141	1.2968	8.7811
Online 5sec	0.6550	1.0274	9.1029
Online 10sec	0.6675	0.9689	6.6363
Online 20sec	0.6652	0.9149	12.2072

即時平滑的罩窗大小在 iPhone 5S 和 Samsung

S5 兩個實驗中皆為相同的設置。圖 16 為 iPhone 5S 的即時平滑軌跡，圖 17 和圖 18 分別為 iPhone 5S 軌跡的位置誤差和姿態誤差。表 10 和表 11 則分別為 iPhone 5S 位置和姿態誤差的誤差分析表。

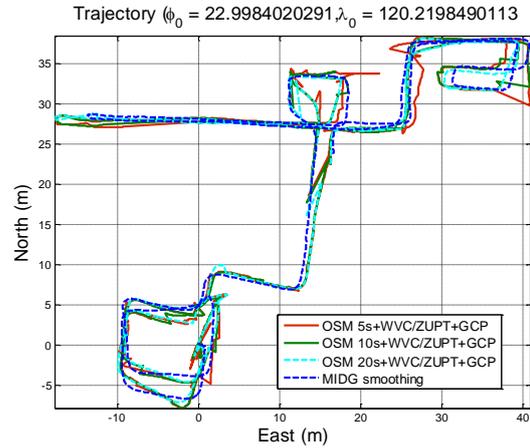


圖 16 iPhone 5S 即時平滑的軌跡

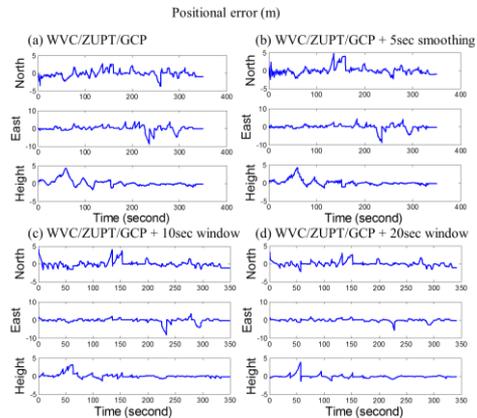


圖 17 iPhone 5S 即時平滑位置誤差

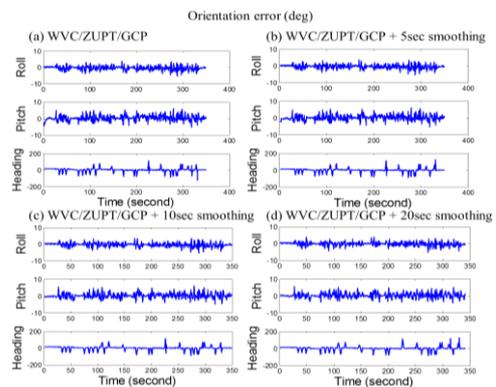


圖 18 iPhone 5S 即時平滑姿態誤差

表 10 iPhone 5S 即時平滑位置誤差表

IPHONE			
Maximum Error (m)			
WVC/ZUPT/GCP			
	N	E	H
Filtering	3.6413	8.8276	4.2631
Online 5sec	4.7680	8.8186	4.1972
Online 10sec	4.2114	8.2043	3.1500
Online 20sec	3.2674	5.6132	3.9008

IPHONE			
RMS Error (m)			
WVC/ZUPT/GCP			
	N	E	H
Filtering	0.9885	1.6341	0.9695
Online 5sec	1.0969	1.5530	0.8141
Online 10sec	0.8574	1.2766	0.6265
Online 20sec	0.6907	0.7679	0.4985

IPHONE			
STD of Error (m)			
WVC/ZUPT/GCP			
	N	E	H
Filtering	0.9784	1.6314	0.9493
Online 5sec	1.0967	1.5431	0.8072
Online 10sec	0.8580	1.2591	0.6222
Online 20sec	0.6900	0.7572	0.4989

表 11 iPhone 5S 即時平滑姿態誤差表

IPHONE			
Maximum Error (deg)			
WVC/ZUPT/GCP			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering	5.4040	6.1171	119.2676
Online 5sec	5.3331	6.0057	124.9439
Online 10sec	5.3331	5.9968	113.9289
Online 20sec	5.4680	5.6365	125.4649

IPHONE			
RMS Error (deg)			
WVC/ZUPT/GCP			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering	1.2703	1.6635	23.7835
Online 5sec	1.2434	1.5994	23.6365
Online 10sec	1.2427	1.5391	23.0376
Online 20sec	1.1930	1.5398	24.3203

IPHONE			
STD of Error (deg)			
WVC/ZUPT/GCP			
	Roll	Pitch	Heading
Filtering	1.2209	1.6239	23.7836
Online 5sec	1.2101	1.5776	23.6481
Online 10sec	1.2127	1.5115	23.0553
Online 20sec	1.1745	1.5056	24.3132

經過 WVC 和室內控制點更新的即時濾波器解，再使用即時平滑後能夠獲得最佳的精度。本實驗中定位精度達到最佳的單窗大小為 20 秒，即時平滑的單窗越大，進行平滑估計的資料量越多，單窗能涵蓋控制點的機會越大，則平滑後的精度改善也更顯著。換句話說，如果設定每 5 秒執行一次平滑，則精度與可靠度的改善幅度會比 10 秒執行一

次平滑的結果來得差，因為不含控制點更新的單窗數變多。但同時導航的即時效能也隨著單窗變大而越差，假設單窗的大小為 10 秒，代表使用者在獲得即時的濾波器解後，需等待 10 秒才能獲得過去 10 秒到當下的平滑軌跡。圖 19 說明平滑單窗大小和定位誤差的關係。

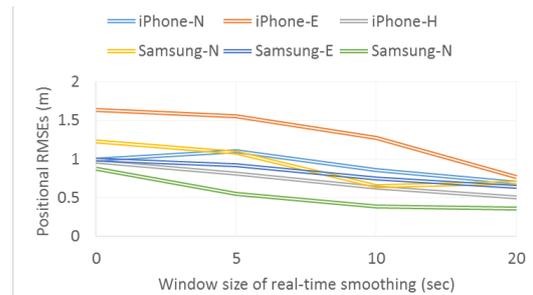


圖 19 平滑單窗大小與定位誤差關係

圖 19 中 Samsung-N 的誤差在 20 秒單窗不減反增的原因，是因為平滑器的概念就是在正向濾波之後，進行反向濾波以求降低估計的誤差，故在平滑單窗的中間，平滑剩餘誤差會最大，如下圖 20 的綠色線(Chiang *et al.*, 2012)。本研究中單窗越大精度越好的部份原因，是因為較長的單窗比較有機會能夠包含到一個以上的控制點，而含有控制點的單窗其平滑效果比較好。同時，當使用長單窗時，可以比使用短單窗時有更少的單窗不包含控制點，也就是表現不佳的平滑單窗個數會比較少。

但是本研究的控制點有限，使用長單窗時，一旦某個單窗不包含控制點，就會在單窗中段累積更多的誤差，如下圖 21 的橘色線。Samsung-N 的案例，20 秒單窗的 RMSE 比 10 秒單窗差，就是因為少數幾個不包含控制點的 20 秒單窗在單窗中間所累積的誤差，影響已經超過更多個不含控制點的 10 秒單窗。至於其他案例沒有出現這樣的現象，是因為平滑殘留的誤差與累積的速率，還跟濾波器誤差模型與約制演算法有關，圖 21 的橘色線有可能更平緩而綠色線起伏較大。

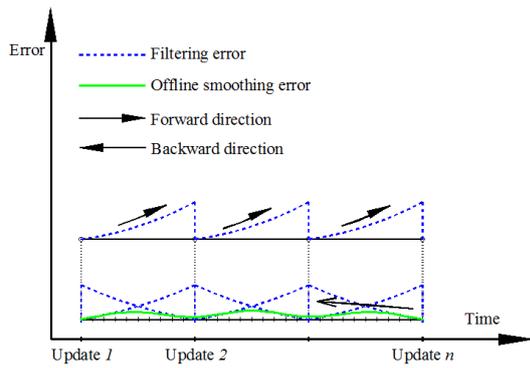


圖 20 平滑器的誤差行為

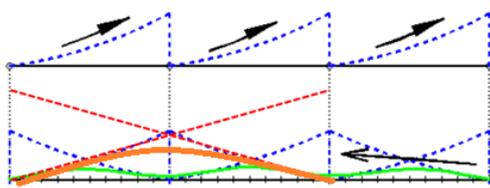


圖 21 兩倍罩窗大小時的誤差行為

最佳罩窗係指在最短的時間內執行平滑，同時又能滿足行人室內導航所需要的定位精度。本實驗中 20 秒罩窗大小的定位精度改善幅度不比 10 秒的罩窗高太多，換言之罩窗的設定最好大於 5 秒，但不需要超過 20 秒，因為雖然罩窗越大定位精度越好，但改善的幅度卻逐漸縮小，同時若控制點較少也會有前述誤差累積的風險。本實驗獲得之最佳罩窗大小落在 10~20 秒間，恰好與控制點設置密度提供的更新時間間距相似。因此平滑能改善濾波器解精度的原因除了額外的反向濾波外，良好的外部更新觀測量也是相當重要的。精度良好的控制點因為本身的可靠度與系統模型的设计，比 WVC 跟 ZUPT 做為更新觀測量進行濾波跟平滑的效果更好。因此若控制點更新的頻率越高，或約制演算法效能越好，即時平滑的最佳罩窗大小就能越小。而當室內控制點較少，且 WVC 使用的模型參數無法契合使用者時，將無法有效約制導航誤差，只能將即時平滑的罩窗設得比較大，透過更多資料進行平滑推估並增加涵蓋控制點的機率，獲得近即時的良好精度。

姿態的最大誤差與控制點更新位置，以及手機和參考軌跡的時間同步誤差有一定程度的關係，如前述即時濾波器解的分析，在使用即時平滑器時仍有同樣的狀況。即轉彎的時候感測器在輸出時間上的些微差異會導致大角度的方位角比對誤差，連帶影響方位角 RMSE 與標準差的估算。儘管如此，即時平滑仍能更進一步稍微減低姿態角的 RMSE，並比較俯仰角與橫滾角的標準差與 RMSE，可以發現姿態的系統誤差較小，而多數為隨機誤差，這也說明行人運動的震動與動態非正交誤差，以及濾波器模型對姿態精度的隨機影響。因此不論是使用 WVC、GCP 或即時平滑，要進一步提升改善的效能就必須要考慮這個問題。

此外，方位角對於行人導航非常重要。雖然精度分析表中特別大的方位角誤差多數是由與參考解的時間同步誤差造成。但是若要進一步縮短即時平滑罩窗，提升平滑的即時性與定位精度，並減低對控制點數量的需求，更穩定的方位角的確是有幫助的。尤其因為濾波器的模型設計，控制點更新對於姿態誤差的改善效果較弱，引入外部的方位角資訊做為更新觀測量，相信對於姿態精度的改善會有所助益。目前有在思考整合磁力計輔助卡曼濾波器的方式，或透過地圖資訊，約制某些位置上的方位角。

## 5. 結論

實驗證明 WVC 與室內控制點更新能夠有效改善慣性積分導航的即時濾波器解，尤其是針對不合理的誤差最大值。即時平滑應用在行人導航的效能也同時被驗證，若能根據室內控制點的密度來決定執行平滑的時間間隔，能夠獲得效率最好的罩窗大小。室內控制點可以由任何其他已知資訊或定位技術提供，前提是有良好的精度和相同的坐標系統。若要使用手持裝置和 INS 慣性導航積分方程式，進行即時室內行人導航，本研究建議的完整解決方案為：1) WVC 約制演算法。2) 充足且位於關鍵位置的控制點。3) 即時平滑器。三種方法的整合能夠補足 WVC 因為不精確的步長模型和計步演算法所殘留的誤差，同時減少對室內控制點數量的需求，

以及縮短即時平滑的最佳罩窗大小，提升即時平滑器的即時效率。最後，本研究提出的整合架構，經驗證能夠將即時行人慣性積分導航之精度，維持在室內應用所需的標準內，解決過去積分後誤差快速飄移的現象，提供即時行人室內導航、可攜式製圖系統等應用公分到公尺級的定位精度。

## 參考文獻

- Chen, R., Pei, L., and Chen, Y., 2011. A Smart Phone Based PDR Solution for Indoor Navigation. 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR, USA. pp. 1404-1408.
- Chiang, K.W. and Huang, Y.W., 2008. An intelligent navigator for seamless INS/GPS integrated land vehicle navigation applications. *Appl. Soft Comput.*, pp. 722-733.
- Chiang, K.W., Duong, T.T., Liao, J.K., Lai, Y.C., Chang, C.C., Cai, J.M., and Huang, S.C., 2012. On-line smoothing for an integrated navigation system with low-cost MEMS inertial sensors. *Sensors*, 12:17372-17389.
- Fernandez, T.M., Rodas, J., Escudero, C.J., and Iglesia, D.I., 2007. Bluetooth Sensor Network Positioning System with Dynamic Calibration. 2007 4th International Symposium on Wireless Communication Systems, IEEE, Trondheim, Norway, pp. 45-49.
- Gansemer, S., Großmann, U. and Hakobyan, S., 2010. RSSI-based Euclidean Distance Algorithm for Indoor Positioning Adapted for the Use in Dynamically Changing WLAN Environments and Multi-Level Buildings. Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), September 15–17, Campus Science City, ETH Zurich, Switzerland.
- Golden, S. and Bateman, S., 2007. Sensor Measurements for Wi - Fi Location with Emphasis on Time-of-Arrival Ranging. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 6(10):1185–1198.
- Groves, P.D., Pulford, G.W., Littlefield, C.A., Nash, D.L.J., and Mather, C.J., 2007. Inertial Navigation Versus Pedestrian Dead Reckoning Optimizing the Integration. Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, TX, USA. pp. 2043-2055.
- Gu, Y., and Lo, A., 2009. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 11:13-32.
- Harle, R., 2013. A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 15:1281-1293.
- Hauschildt, D. and Kirchhof, N., 2010. Advances in Thermal Infrared Localization: Challenges and Solutions. Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), September 15–17, Campus Science City, ETH Zurich, Switzerland.
- Jiménez, A.R., Prieto, J.C., Ealo, J.L., Guevara J. and Seco, F., 2009. A Computerized System to Determine the Provenance of Finds in Archaeological Sites Using Acoustic Signals. *Journal of Archaeological Science*, 36(10):2415–2426.
- Kim, J.W., Jang, H.J., Hwang, D.H., Park, C., 2004. A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system. *Journal of Global Positioning Systems*, 3(1-2):273–279.
- King, T., Kopf, S., Haenselmann, T., Lubberger, C. and Effelsberg, W., 2006. Compass: A Probabilistic Indoor Positioning System Based on 802.11 and Digital Compasses. Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiNTECH), Los Angeles, CA, USA, September 2006.
- Kohoutek, T.K., Mautz, R. and Donaubaue, A., 2010. Real-time Indoor Positioning Using Range Imaging Sensors. Proceedings of SPIE Photonics Europe, Real-Time Image and Video Processing, vol. 7724.
- Koyuncu, H., and Yang, S.H., 2010. A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 10:121-128.
- Liao, J.K., Zhou, Z.M., Tsai, G.J., Duong, T.T., and Chiang, K.W., 2014. The Applicability Analysis of Using Smart Phones for Indoor Mobile Mapping Applications. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, USA. pp. 510 - 531.
- Liu, C.Y., 2012. The Performance Evaluation of a Real-time Low-Cost MEMS INS/GPS Integrated Navigator with Aiding from ZUPT/ZIHR and Non-Holonomic Constraint for Land Applications. Proceedings of the 25th

- International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, TN, USA. pp. 1500 - 1520.
- Liu, Z., Aduba, C., Won, C.H., 2011. In-plane dead reckoning with knee and waist attached gyroscopes. *Measurement*, 44(10):1860–1868.
- Mautz, R., 2012. Indoor Positioning Technologies. Habilitation Theses, ETH Zurich.
- Muffert, M., Siegemund, J. and Förstner, W., 2010. The Estimation of Spatial Positions by Using an Omnidirectional Camera System. *Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Control & Guidance*, pp. 95–104.
- Mulloni, A., Wgner, D., Schmalstieg, D., and Barakonyi, I., 2009. Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones. *Pervasive Computing*, IEEE, 8:22–31.
- Peng, J., Zhu, M. and Zhang, K., 2011. New Algorithms Based on Sigma Point Kalman Filter Technique for Multi-sensor Integrated RFID Indoor/Outdoor Positioning. *Proceedings of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, September 21–23, Guimarães, Portugal.
- Salas, A.C., 2014. Indoor Positioning System based on Bluetooth Low Energy. Department of Telecommunications Engineering Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, Spain.
- Seco, F., Plogemann, C., Jiménez, A. and Burgard, W., 2010. Improving RFID - Based Indoor Positioning Accuracy Using Gaussian Processes. *Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, September 15–17, Campus Science City, ETH Zurich, Switzerland.
- Shin, E.H., 2005. Estimation Techniques for Low-Cost Inertial Navigation. Doctoral dissertation, Department of Geomatics Engineering. University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada. (UCGE 20219).
- Wan, E. and Paul, A., 2010. A Tag-free Solution to Unobtrusive Indoor Tracking Using Wallmounted Ultrasonic Transducers. *Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, September 15–17, Campus Science City, ETH Zurich, Switzerland.
- Wang, Y., Yang, X., Zhao, Y., Liu, Y., Cuthbert, L., 2013. Bluetooth Positioning Using RSSI and Triangulation Methods. *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pp. 837-842.
- Want, R., Hopper, A., Falcão, V., and Gibbons, J., 1992. The Active Badge Location System. *ACM Transactions on Information Systems*, 10(1):91–102.
- Ward, A., Jones, A., and Hopper, A., 1997. A New Location Technique for the Active Office. *Personal Communications*, IEEE, 4(5):42–47.
- Weinberg, H., 2002. Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications. *Analog Devices AN-602 application note*.
- Xiang, Z., Song, S., Chen, J., Wang, H., Huang, J. and Gao, X., 2004. A Wireless LAN-Based Indoor Positioning Technology. *Journal of Research Development*, 48(5/6): 617–626.

# Using the On-line Smoothing and Constraint Algorithms to Improve the Accuracy of Pedestrian Indoor Navigation

Jhen-Kai Liao<sup>1\*</sup> Kai-Wei Chiang<sup>2</sup> Zhi-Ming Zhou<sup>3</sup> Chih-Hung Li<sup>4</sup>

## ABSTRACT

The vehicle-based and airborne mobile mapping system become a mature technology in recent years. The smartphone and wearable device are also gradually apply to our daily life. They have the potential to replace the past portable mobile mapping system with various and popular MEMS sensors. However, the inertial navigation is not suitable for pedestrian indoor navigation which generally using in vehicle-based and airborne mobile mapping system. This study proposes the indoor control points to replace the Global Navigation Satellite System in indoor. The indoor control points can be the ground control point, map point, feature point or provided by radio-based positioning technology. In addition, the walking velocity constraint and online smoothing are proposed for improve the accumulative error of inertial integration. The preliminary results show the proposed methods improve the accuracy of pedestrian indoor navigation with smartphone and inertial navigation significantly.

**Keywords** : pedestrian indoor navigation, Inertial Navigation System, smartphone

<sup>1</sup>Ph.D. Candidate, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

<sup>2</sup>Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

<sup>3</sup>Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

<sup>4</sup>Product manager, Smart Network System Institute, Institute for Information Industry

\*Corresponding Author, Phone: 06-2370876 ext.857, E-mail: cacalut1690@gmail.com

Received Date: Sep. 23, 2015

Revised Date: Jun. 08, 2016

Accepted Date: Sep. 01, 2016