

# ZigBee 無線感測技術應用於自走車之定位 -增廣卡爾曼濾波器研究

林鴻興 楊曜任  
修平科技大學電機系  
lin01@hust.edu.tw

## 摘要

本研究使用 CC2530 ZigBee 無線感測節點模組系統應用到自走車機器人的定位。CC2530 ZigBee 無線感測節點經由校正所建立的接收訊號強度數據 (Received Signal Strength Indication; RSSI)，由此數據轉換成距離的特性曲線，用以求得從 ZigBee 無線感測節點與架在自走車上節點的距離，並在已知環境中估測出自走車的即時定位姿態。此方法不但可以決定自走車相對於慣性參考座標的絕對位置及車頭角，當機器人在已知的工作環境中移動時，應用增廣卡爾曼濾波器 (EKF) 演算法融合 ZigBee 無線感測接收 RSSI 值轉換成距離和方位推算量測機器人的車體之動態位置及車頭方向估測值。透過電腦模擬及實驗數據可以證實所提之方法是具有有效性與可行性。

**關鍵詞：**ZigBee、發射訊號強度、增廣卡爾曼濾波器方法、定位。

## Abstract

This paper develops methodologies and techniques for localization of a vehicle. The designed localization system includes the CC2530 ZigBee wireless sensor module for global pose initialization is presented based on the Received Signal Strength Indication measurements, the proposed calibration method and extended Kalman filter method for robot. In this method, not only the static position and orientation of the robot can be determined uniquely with respect to an inertial frame of reference, but also the dynamic pose estimates can be obtained by the ZigBee wireless sensor fusion approach. Simulation and experimental results are provided to verify the feasibility and effectiveness of the proposed localization methods.

**Keywords:** ZigBee, RSSI, Extended Kalman filter Method, Localization.

## 1. 前言

機器人的一個基本功能是可以自我確定自身在環境中的定位。最近，機器人被廣用於智慧型家庭各種不同的定位問題[1]中，機器人的定位能力有兩個主要問題是關於初值定位和行走中的追蹤姿態定位技術，及在未知的環境(地圖)中，如何尋找最初的定位。使用內部和外部感測器來考慮初值化

姿態和保持機器人的連續即時姿態對自主導航機器人是重要的，因為不只僅僅在起動中的初值定位問題，而且在操作期間中，倘若當機器人定位一旦發生分歧時，如何給予機器人作適時的定位補償。

隨著無線網路的發達，因此發展出許多不同無線網路的型態，而無線感測網路 (Wireless Sensor Network: WSN) 更是近年來無線網路的應用新技術。目前在無線感測網路上最熱門在探討定位技術，但是無線感測網路在定位技術方面仍有許多問題點必須去克服，其中影響定位準確性最大問題則是會受到環境中所帶來各種因素。在區域性定位系統中，在無線感測器方面，主要有RFID及ZigBee兩種，早期大多數的定位系統都採用RFID，由於RFID的優點包含頻段小、波長短、體積小及堅固省電等，在RFID也發展出主動式及被動式等形態，但由於RFID的缺點是容易受到環境干擾、安全性低及採樣慢且有方向性因素等之外，使得會影響到定位系統的精準性及即時性。利用RFID處理有關初值的姿態問題時，準確度和方向性方面卻是有需要再改進的缺點。

最近由於 IEEE 協會及 ZigBee 聯盟的努力之下，且在 2004 年提出以 IEEE802.15.4 的規格[2]，也是業界第一個以測量控制為目的無線感測網路的國際標準，ZigBee 技術主要是能滿足耗電量、低費用、網路容量及相互連接性這 4 點要求，同時 ZigBee 的雙向傳輸、涵蓋範圍、抗干擾、標籤數目、低功耗、連線速度、擴充性、適應環境及佈建費用都極為適合用於定位領域，並且 ZigBee 的技術日漸成熟、製作成本也愈來愈低的趨勢下，ZigBee 技術必定在定位方面會有相當好的應用及多方面貢獻。

定位是機器人導航之相當關鍵技術，用以隨時知悉該機器人相對於展示空間世界座標系之姿態(含位置與車頭方向)，進而完成任務。機器人的定位研究早已行之多年，使用外部感測器和配合所設計的定位演算法可以量測到有關的定位技術，尤其是使用 RFID、影像、雷射掃瞄器與超音波測距模組的區域(Local)與全域(Global)定位技術研究論文與報告，更是不勝枚舉。但這些技術因易受環境空間限制，需要加強設計的複雜度，方能運用於擁擠的展示空間中。本研究擬將四個 CC2530 ZigBee 無線感測節點置放於環境空間中，將其中一個 ZigBee 無線感測節點置放於機器人上；藉由三個 ZigBee 無線感測節點的校正方式，將接收訊號強度(RSSI)轉

成距離資料，再運用增廣卡爾曼濾波器方法，將測量到的距離資料，估算成機器人全域位置值，並完成精確的車體定位。

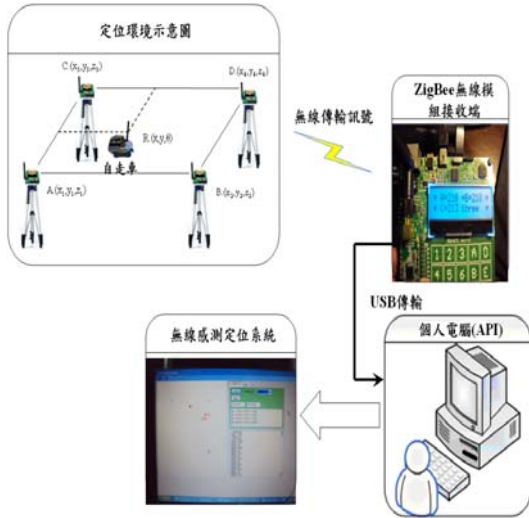


圖 1 ZigBee 無線感測定位系統示意圖

## 2. ZigBee/IEEE.802.15.4 無線網路

### 2.1 ZigBee 無線感測網路

ZigBee 是一種短距離傳輸通訊技術，理想傳輸距離可達 300 公尺，實際距離分為室內 30 公尺及室外 100 公尺，資料傳輸速度由頻率頻寬 868MHz、915MHz、2.4GHz 的不同分別為 20kbps、40kbps、250kbps 三種無線傳輸速度。

### 2.2 ZigBee CC2530 傳輸模組

來自德州儀器(TI)的CC2530為一真正晶片系統解決方案，專為 IEEE 802.15.4、ZigBee、ZigBee RF4CE 與 Smart Energy 應用量身訂做。擁有高達 256 KB 容量的大型快閃記憶體，CC2530 特別適合 ZigBee PRO 的應用。64 K 與以上的版本將針對 ZigBee RF4CE 支援新的 RemoTI™ 堆疊，這是業界第一個符合 ZigBee RF4CE 之協定堆疊，同時加大的記憶體容量能讓單晶片 OTAD (Over The Air Download) 支援系統內再編程。此外，CC2530 將完全整合的高效能 RF 收發器、8051 MCU、8 KB RAM、32/64/128/256 KB 快閃記憶體，與其他威力強大的功能與周邊相結合[3]。

本研究所使用的 ZigBee 無線感測節點及 TI 的 CC2530 晶片，ZigBee 無線感測節點使用 IAR 嵌入式平台(IAR Embedded Workbench)設計掃描出 RF 的訊號強度並算出 RSSI 訊號值，再傳輸到 ZigBee 無線感測主板，圖 1 為 ZigBee 無線感測定位系統示意圖，由 RS-232 傳輸到電腦裡，在經由 Visual Basic.NET 將數據進入演算法計算出距離及座標。

## 3. RSSI 校正和增廣卡爾曼濾波器演算法

### 3.1 RSSI 校正方法

定位校正主要目的是計算出距離，以方便定位演算法計算出座標位置。ZigBee 定位是利用 RSSI 值來分析無線感測節點之間的距離，其校正流程如圖 2 所示，需要進行 ZigBee 無線感測校正。校正過程中可以確定的是 ZigBee 無線感測 RSSI 值在某個特定環境下，會和距離產生某種特定關係。利用波傳導理論和實驗經驗，求得的 RSSI-Distance 特性曲線後，利用此校正曲線，轉換成相對應距離後，再使用增廣卡爾曼濾波器(EKF)演算法來處理多節點運算[5]及求得車體姿態座標，定位程序如圖 3 所示。

對於 m 個無線感測節點而言，RSSI 值和相對應距離的數學關係式可表示為

$$RSSI_i = \frac{K}{d_i^n}, \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

其中  $d_i$  為距離，參數 K 和 n 為兩個校正參數，為了找出參數 K、n；對(1)式，取以 10 為底的對數寫成下列方程式

$$\log_{10} RSSI_i = \log_{10} K - n \cdot \log_{10} d_i = a - b \cdot \log_{10} d_i, \quad i = 1, \dots, m.$$

或寫成矩陣形式

$$\begin{bmatrix} 1 & -\log_{10} d_1 \\ 1 & -\log_{10} d_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\log_{10} d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log_{10} RSSI_1 \\ \log_{10} RSSI_2 \\ \vdots \\ \log_{10} RSSI_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $a = \log_{10} K$  和  $b = n$ 。由每個 ZigBee 無線感測節點實驗 n 公尺的 RSSI-Distance 關係，可以得到下列聯立方程式

$$\begin{bmatrix} 1 & -\log_{10} d_1 \\ 1 & -\log_{10} d_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\log_{10} d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log_{10} RSSI_1 \\ \log_{10} RSSI_2 \\ \vdots \\ \log_{10} RSSI_n \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (2)$$

其中參數 a、b 可經由(3)式求得

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $K = 10^a$ ,  $n = b$ 。

由 3.1 所得到的校正曲線，可以求出各別 ZigBee 無線感測節點之間的相對應距離，實驗流程如 4 所示，設定 m 個 ZigBee 固定感測器節點， $T_1 = (x_1, y_1, z_1)^T, T_2 = (x_2, y_2, z_2)^T, \dots, T_m = (x_m, y_m, z_m)^T$ ,  $d_i = (K_i / RSSI_i)^{1/n_i}, i = 1, \dots, m$ 。轉換每個 ZigBee 無線感測節點的 RSSI 值成為相對應距離。

由圖 4 所示，可以得到下列聯立方程式

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2 = d_m^2 \end{cases} \quad (4)$$

經由化簡，可得下列方程式

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) & 2(z_1 - z_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_1 - x_i) & 2(y_1 - y_i) & 2(z_1 - z_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_1 - x_m) & 2(y_1 - y_m) & 2(z_1 - z_m) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} d_2^2 - d_1^2 + (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) + (z_1^2 - z_2^2) \\ \vdots \\ d_i^2 - d_1^2 + (x_1^2 - x_i^2) + (y_1^2 - y_i^2) + (z_1^2 - z_i^2) \\ \vdots \\ d_m^2 - d_1^2 + (x_1^2 - x_m^2) + (y_1^2 - y_m^2) + (z_1^2 - z_m^2) \end{bmatrix}$$

由最小平方解矩陣方程式

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} = (x, y, z)^T \quad (5)$$

$\mathbf{X}$  即為車體的位置座標  $(x, y, z)^T$ 。

### 3.2. 車體靜態定位演算法

當車體在 ZigBee 無線感測節點有效訊號幅射的範圍內，在全域架構下要作自我定位或校正當時的姿態時，利用即時初值定位演算法，車體可以正確找到起動時的初值定位，演算法步驟說明如下：

步驟 1: 測量到全部 ZigBee 無線感測節點 ( $T_1, \dots, T_l$ ) 和架在車體上 ZigBee 無線節點 ( $R_1$ ) 之間的  $RSSI_1(j), \dots, RSSI_l(j), j=1, 2, 3, \dots, n$ ，全部  $n$  組的 RSSI 數據。

步驟 2: 測量到全部 ZigBee 無線感測節點 ( $T_1, \dots, T_l$ ) 和架在車體上的 ZigBee 無線感測節點 ( $R_1$ ) 之間的  $n$  組 RSSI 數據後再利用下列公式求平均值；

$$\overline{RSSI}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RSSI_i(j), i=1, \dots, l.$$

步驟 3: 使用(2)式校驗的參數  $K_i$  和  $m_i$ ，可以把步驟 2 求得到的 RSSI 測量平均值轉變成所相對的距離；

$$d_i = (K_i / \overline{RSSI}_i)^{1/m_i}, i=1, \dots, n. \quad (6)$$

步驟 4: 再利用最小平方方法(5)式，可以估測出車體起動時的初始位置  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)$ 。

步驟 5: 讓車體沿著直線移動  $\Delta d$  距離時，利用(5)式求得車體下一步的位置  $(\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1)$  時，然後透過下式估測出車體起動時的方位角； $\hat{\theta}_0 = A \tan 2(\hat{y}_1 - \hat{y}_0, \hat{x}_1 - \hat{x}_0)$  (7)

式中  $\hat{x}_1 - \hat{x}_0 = v \cos \hat{\theta}_0$ 、 $\hat{y}_1 - \hat{y}_0 = v \sin \hat{\theta}_0$  以及  $v$  為車體的線性速度。

### 3.3 增廣卡爾曼濾波器(EKF)演算

利用增廣卡爾曼濾波器(EKF)演算法過程中，以降低初值姿態估測誤差，描述 WMR 的靜止的姿態狀態方程式如下：

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{X}(k) \quad (8)$$

$$\mathbf{X}(k) = [x_c(k) \quad y_c(k) \quad \theta_c(k)]^T,$$



圖 2 ZigBee 無線感測節點校正流程圖



圖 3 ZigBee 無線感測節點定位程序圖

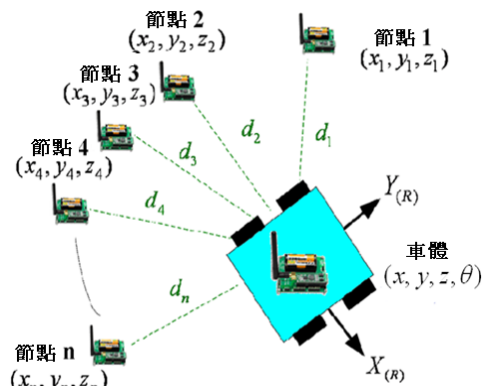


圖 4 車體姿態定位示意圖

放於機器人上 ZigBee 無線感測節點發射到其它三個 ZigBee 無線感測節點所接收訊號強度(RSSI)轉成距離測量方程式表示如下：

$$\mathbf{Z}(k) = h(\mathbf{X}(k)) + \mathbf{V}(k) \quad (9)$$

式中

$$\mathbf{Z}(k) = [RSSI_1 \quad RSSI_2 \quad RSSI_3]^T$$

$$h(\mathbf{X}(k)) = [d_1 \quad d_2 \quad d_3]^T$$

$$V_u(k) = [v_1(k) \quad v_2(k) \quad v_3(k)]^T$$

並且，當  $i=1,2,3$ ,

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i1})^2 + (y_i - y_{i1})^2 + (z_r - z_{i1})^2},$$

$$d_{i+3} = \sqrt{(x_{i+3} - x_{i2})^2 + (y_{i+3} - y_{i2})^2 + (z_r - z_{i2})^2}$$

相互獨立的測量噪音過程分別為  $v_1(k), v_2(k)$  和  $v_3(k)$ ，零平均白色高斯(zero-mean white Gaussian)用協方差矩陣過程  $R(k) = \text{diag}\{\sigma_{v1}^2, \sigma_{v2}^2, \sigma_{v3}^2\}$ 。使用離散時間的增廣型卡爾曼濾波器(EKF)演算法，並融合放置於機器人上 ZigBee 無線感測節點發射到其它三個 ZigBee 無線感測節點所接收訊號強度(RSSI)轉成距離的測量，估算輪式機器人的姿態，描述其步驟如下[6-8]：

步驟 1：當時間  $k=0$  時位置之初始估測值為  $\hat{X}(0/0)$ ，誤差變異差矩陣(error covariance matrix)的初值為  $\tilde{P}(0/0)$ 。

$$E\{X(0/0)\} = \hat{X}(0/0) = [\bar{x}_c \quad \bar{y}_c \quad \bar{\theta}]^T,$$

$$E\left\{X(0) - \hat{X}(0) \mid X(0) - \hat{X}(0)\right\}^T = \tilde{P}(0/0).$$

步驟 2：時間為  $k$  時之位置  $X(k)$  的估測值為  $\hat{X}(k/k)$ ，其誤差變異差矩陣為  $\tilde{P}(k/k)$ ，由式(10、11)之計算可得最佳預測值為  $X(k+1/k)$ ，其誤差變異差矩陣為  $\tilde{P}(k+1/k)$ 。

$$\hat{X}(k+1/k) = f(\hat{X}(k/k)) \quad (10)$$

$$\tilde{P}(k+1/k) = F(\hat{X}(k/k)) \cdot \tilde{P}(k/k) \cdot F(\hat{X}(k/k))^T + Q(k) \quad (11)$$

式中

$$F(\hat{X}(k/k)) = \left. \frac{\partial f(X(k))}{\partial X(k)} \right|_{\hat{X}(k/k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

步驟 3：在時間為  $k+1$  時系統收到放於機器人上 ZigBee 無線感測節點發射到其它三個 ZigBee 無線感測節點所接收訊號強度(RSSI)轉成距離的測量資料  $Z(k+1)$ ，利用(12-13)式計算得到更新的估測值  $\hat{X}(k+1/k+1)$ ，其誤差變異差矩陣為  $\tilde{P}(k+1/k+1)$ 。

$$\hat{X}(k+1/k+1) = \hat{X}(k+1/k) + K(k+1) \cdot [Z(k+1) - h(\hat{X}(k+1/k), M)] \quad (12)$$

$$\tilde{P}(k+1/k+1) = [I - K(k+1) \cdot H_i] \cdot \tilde{P}(k+1/k) \quad (13)$$

其中卡門濾波器增益為：

$$K(k+1) = \tilde{P}(k+1/k) \cdot H_i^T [H_i \cdot \tilde{P}(k+1/k) \cdot H_i^T + R(k+1)]^{-1}$$

式中

$$H_i = \left. \frac{\partial h}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}(k+1/k)} = \begin{bmatrix} \frac{y_1 - y_c}{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2} & \frac{x_c - x_1}{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2} & -1 \\ \frac{y_2 - y_c}{(x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2} & \frac{x_c - x_2}{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2} & -1 \\ \frac{y_3 - y_c}{(x_3 - x_c)^2 + (y_3 - y_c)^2} & \frac{x_c - x_3}{(x_3 - x_c)^2 + (y_3 - y_c)^2} & -1 \end{bmatrix}$$

步驟 4：重複步驟 2 到步驟 3。

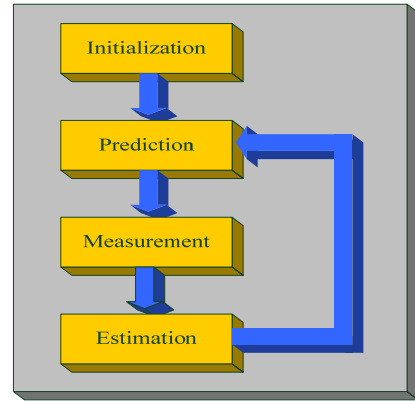


圖 5 增廣卡爾曼濾波器演算法(EKF)流程圖

#### 4. 全域性姿態估測演算法

當已知機器人最初始值姿態時，使用車上的編碼器和放於機器人上 ZigBee 無線感測節點發射到其它三個 ZigBee 無線感測節點所接收訊號強度(RSSI)轉成距離系統探求 WMR 的連續移動姿態。應用機器人上 ZigBee 無線節點發射到其它 ZigBee 無線節點所接收 RSSI 轉成距離系統結合增廣卡爾曼濾波器方法即時校正車體位置的估測誤差，車體的運動狀態方程式描述如下：

$$X(k+1) = f(X(k)) + W(k) \quad (14)$$

或

$$\begin{bmatrix} x_c(k+1) \\ y_c(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c(k) + \Delta d \cos \theta(k) \\ y_c(k) + \Delta d \sin \theta(k) \\ \theta(k) + \Delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x(k) \\ w_y(k) \\ w_\theta(k) \end{bmatrix}$$

其中

$$f(X(k)) = \begin{bmatrix} x(k) + \Delta d \cos \theta(k) \\ y(k) + \Delta d \sin \theta(k) \\ \theta(k) + \Delta \theta \end{bmatrix},$$

$$W(k) = \begin{bmatrix} w_x(k) \\ w_y(k) \\ w_\theta(k) \end{bmatrix}, \quad \Delta \theta = \Delta T \cdot w_c, \quad \Delta d = \Delta T \cdot v_c,$$

上式中  $w_x(k)$  和  $w_y(k)$  表示位置方位推算器的位置誤差； $w_\theta(k)$  表示地面不平的隨機干擾量； $v_c(t)$  是機器人的線性速度和  $w_c(t)$  是機器人的角速度， $\Delta T$

是取樣時間；經過計算可以得到一個遞迴公式近似獲得機器人的下一個瞬時位置與方向角。使用離散時間的增廣卡爾曼濾波器如圖 5 所示，估算機器人的姿態，步驟說明如下：

步驟 1：當時間  $k=0$  時位置之初始估測值為  $\hat{X}(0/0)$ ，誤差變異差矩陣(error covariance matrix)的初值為  $\tilde{P}(0/0)$ 。

步驟 2：預估。時間為  $k$  時之位置估測值為  $\hat{X}(k/k)$ ，其誤差變異差矩陣為  $\tilde{P}(k/k)$ ，由式(15-17)式計算可得最佳預測值為  $X(k+1/k)$ ，其誤差變異差矩陣為  $\tilde{P}(k+1/k)$ 。

$$\hat{X}(k+1/k) = f(\hat{X}(k/k)) \quad (15)$$

$$\tilde{P}(k+1/k) = F(\hat{X}(k/k)) \cdot \tilde{P}(k/k) \cdot F(\hat{X}(k/k))^T + Q(k) \quad (16)$$

式中

$$F(\hat{X}(k|k)) = \left. \frac{\partial f(X(k))}{\partial X(k)} \right|_{\hat{X}(k|k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta d \sin \theta \\ 0 & 1 & \Delta d \cos \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

步驟 3：在時間為  $k+1$  時，系統收到放於機器人上 ZigBee 節點發射到其它三個 ZigBee 節點所接收 RSSI 訊號強度轉成距離的量測資料，利用 (18-19) 式計算得到更新的估測值  $\hat{X}(k+1/k+1)$ ，其誤差變異差矩陣為  $\tilde{P}(k+1/k+1)$ 。

$$\hat{X}(k+1/k+1) = \hat{X}(k+1/k) + K(k+1) \cdot [Z(k+1) - h(\hat{X}(k+1/k), M)] \quad (18)$$

$$\tilde{P}(k+1/k+1) = [I - K(k+1) \cdot H_i] \cdot \tilde{P}(k+1/k) \quad (19)$$

其中卡門濾波器增益為：

$$K(k+1) = \tilde{P}(k+1/k) \cdot H_i^T [H_i \cdot \tilde{P}(k+1/k) \cdot H_i^T + R(k+1)]^{-1}$$

步驟 4：重複步驟 2 到步驟 3。

## 5. 模擬、實驗結果與討論

在實驗流程方面，各節點校正程序是為了解決每個無線感測器節點因製程與使用環境不同所產生的個別差異，在不同環境中都必須對每個無線感測器節點都進行校正，建立較為精確的 RSSI-Distance 特性曲線(節點 A)，如圖 6 所示[9]。

定位程序必須先設定 3 個無線感測器節點在已知環境位置的座標，經放置於車體上的無線感測節點即時接收所設定這 3 個節點間的 RSSI 值，並依照在無線感測器節點校正程序中由訊號強度數據轉換距離所建立的特性曲線轉換成相對應距離，得到 3 筆相對應距離後再使用增廣卡爾曼濾波器演算法可求得車體即時位置和車頭角度座標。

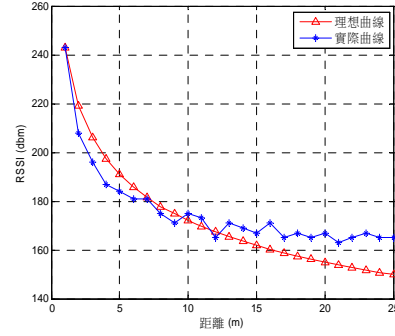


圖 6 校正 RSSI-Distance 特性曲線圖(節點 A)

### 5.1 模擬結果與討論

假設車體在 1000cm×1000cm 正方形的工作環境中放置了四個 ZigBee 無線感測器節點分別為  $(x_1, y_1, z_1) = (160\text{cm}, 920\text{cm}, 58\text{cm})$ ,  $(x_2, y_2, z_2) = (160\text{cm}, 120\text{cm}, 53\text{cm})$ ,  $(x_3, y_3, z_3) = (960\text{cm}, 120\text{cm}, 43\text{cm})$  和  $(x_4, y_4, z_4) = (960\text{cm}, 920\text{cm}, 58\text{cm})$ 。車體在已知環境模型內作 50 度靜態模擬，假設最初的估計值是  $\hat{X}(0/0) = [620, 495, 50^\circ]^T$ ，其中有關參數  $R = \text{diag}\{0.000025, 0.000025, 0.000025\}$  是考慮初始化誤差協方差矩陣。車體的真實的位置和方位為  $(x, y, \theta) = (580\text{cm}, 555\text{cm}, 50^\circ)$ ，應用靜態定位增廣卡爾曼濾波器(EKF)演算法可以估測車體的位置和方位。在圖 7 中，O 符號代表是機器人的真實位置，x 符號是代表車體的估測位置，□符號代表是無線感測節點放置的位置，取樣周期是 0.05 秒。圖 7 為自動導航車 x-y 軸姿態估測軌跡，圖 8 是車頭角度估測軌跡。其結果在圖 7 和 8 中可以明確顯示估測值是非常接近真實值，估測值為  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta}) = (580.25\text{cm}, 554.75\text{cm}, 49.993^\circ)$  而且穩態誤差是  $(-0.25\text{cm}, 0.25\text{cm}, 0.007^\circ)$ 。

### 5.2 靜態初始化實驗

本實驗將進行 ZigBee 節點使用 2.4GHz 及 6db 全向性天線，其中一個 ZigBee 節點置架在自走車上的實際位置(600 cm, 600 cm)，另外三個 ZigBee 節點分別放置在已知的環境位置座標分別為 (300cm, 300cm)、(300cm, 900cm) 和 (900cm, 900cm) 如圖 9 所示，車頭角度  $\theta$  分別是  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$  和  $315^\circ$  進行自走車的靜態初始化定位。從實驗的結果，自走車姿態(位置與車頭方向)測量誤差 E 的準確性被定義為量測值和真實值之間的錯誤，則  $E = |\text{測定值} - \text{真實值}|$ 。圖 10 為 VB 介面顯示的定位實作圖，黑色□符號代表自走車的真實位置，紅色□符號是代表自走車利用最小平方方法的估測位置，藍色□符號是代表無線感測節點的位置。從表 1 的實驗結果能觀察出，位置的準確度至少在 31 cm 以內和車頭角度的準確度至少在  $12^\circ$  以內。

從靜態、動態實驗結果了解，自走車在已知環

境裡所提出的靜態姿態初始化、動態定位演算法，都證明有良好的定位能力。

### 6. 結論

本研究利用 CC2530 ZigBee 無線感測模組，實驗前經由校正程序後，ZigBee 無線感測節點經由校正所建立的發射訊號強度數據 RSSI 值，由訊號強度數據轉換距離的特性曲線，用以求得由 ZigBee 無線感測節點與架在自走車上節點的距離，並在已知環境中使用增廣卡爾曼濾波器(EKF)演算法估測出自走車的即時定位姿態並證明其可行性。未來為增進定位估測的精確度與強健度時，擬設計增加 ZigBee 無線感測模組數量及建立更完善的定位環境達到更精確的定位效果。

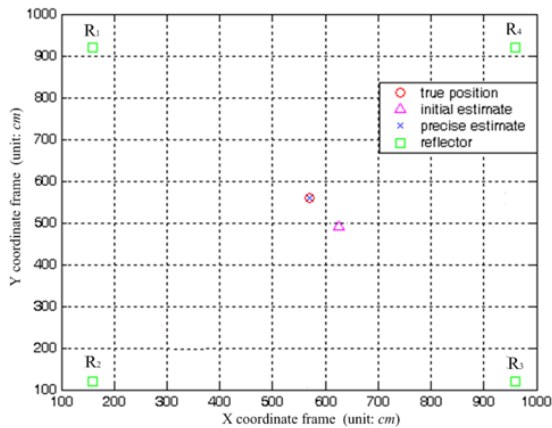


圖 7 x-y 軸姿態估測定位座標模擬圖

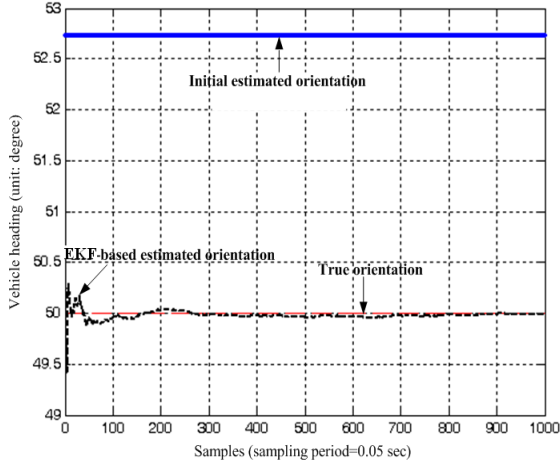


圖 8 車頭角度估測軌跡



圖 9 使用 6db 天線車體實驗照片

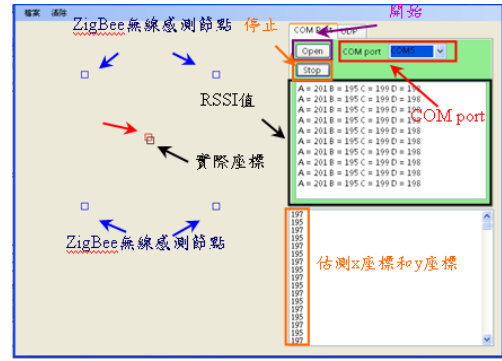


圖 10 VB 介面顯示的定位實作圖

表1 車體在不同車頭角靜態定位實驗結果

$(x, y)$ cm	(600,600)	(600,600)	(600,600)	(600,600)
$\theta$ (degree)	0°	45°	90°	135°
$(\hat{x}, \hat{y})$ cm	(598.87, 611.45)	(569.28, 599)	(600.18, 599.83)	(569.28, 599)
$\hat{\theta}$ (degree)	353.62°	56.84°	87.07°	150.06°
$ \hat{x} - x $	1.13cm	30.72cm	0.18cm	30.72cm
$ \hat{y} - y $	11.45cm	1cm	0.17cm	1cm
$ \hat{\theta} - \theta $	6.38°	11.84°	2.93°	15.6°
$(x, y)$ cm	(600,600)	(600,600)	(600,600)	(600,600)
$\theta$ (degree)	180°	225°	270°	315°
$(\hat{x}, \hat{y})$ cm	(622.95, 599)	(621.64, 585.11)	(588.5, 598.44)	(569.28, 599)
$\hat{\theta}$ (degree)	178.52°	229.13°	266.13°	316.61°
$ \hat{x} - x $	22.95cm	21.64cm	11.5cm	30.72cm
$ \hat{y} - y $	1cm	14.89cm	1.56cm	1cm
$ \hat{\theta} - \theta $	1.48°	4.13°	3.87°	1.61°

### 參考文獻

- [1] H. H. Lin, C. C. Tsai, and J. C. Hsu, "Ultrasonic localization and pose tracking of an autonomous mobile robot via fuzzy adaptive extended information filtering," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 9, pp. 2024-2034, 2008.
- [2] P. S. Maybeck, *Stochastic Models, Estimation, and Control*, vol.1, New York, Academic Press, 1979.
- [3] G.N. Desouza and A. C. Kak, "Vision for mobile robot navigation: a survey" *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 2, pp. 237-267, Feb. 2002.
- [4] E. T. Baumgartner and S. B. Skaar, "An autonomous vision-based mobile robot," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 3, pp. 493-502, 1994.
- [5] I. Ohya, A. Kosaka, and A. Kak, "Vision-based navigation by a mobile robot with obstacle avoidance using single-camera vision and ultrasonic sensing," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 969-978, Dec. 1988.
- [6] Adam, A.; Rivlin, E.; Rotstein, H, "Fusion of fixation and odometry for vehicle navigation."
- [7] Khusvinder Gill, Shuang-Hua Yang, Fang Yao, and Xin Lu, "A ZigBee-Based Home Automation System," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 55, No. 2, pp. 422-430, 2009.
- [8] J. Chen, X.J. Wu, P.Z. Wen, F. Ye, J.W. Liu1, "A New Distributed Localization Algorithm for ZigBee Wireless Networks," 2009 Chinese Control and Decision Conference, pp. 4451-4456, 2009.
- [9] C. Wang, R. Wang, X. Wang, C. Wang, S. Feng, Q. Sun, "Realization of an improved location algorithm based on the Zigbee Wireless Sensor Network\*," *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp.1082-1086, 2010.