

私立東海大學資訊工程學系研究所

碩士論文

指導教授：林祝興 博士

Dr. Chu-Hsing Lin

以 ZigBee 為基礎之室內定位技術研究

Indoor Location Estimation Based on the ZigBee

研究生：蔡昇興

(Sheng-Hsing Tsai)

中 華 民 國 一 百 年 六 月

東海大學碩士學位論文考試審定書

東海大學資訊工程學系 研究所

研究生 蔡昇興 所提之論文

以 ZigBee 為基礎之室內定位技術研究

經本委員會審查，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員會

召集人

張隆池 簽章

委員

邱善坤

胡亭詩

林冠廷

指導教授

林冠廷 簽章

中華民國 100 年 6 月 29 日

目錄

圖目錄	5
表目錄	7
摘要	8
Abstract	9
第一章 簡介	11
1.1 研究背景與動機	11
1.2 研究主題與目的	12
1.3 論文架構	13
第二章 相關文獻探討	14
2.1 ZigBee 無線網路之介紹	14
2.1.1 ZigBee 之特性介紹	14
2.1.2 ZigBee 網路拓樸介紹	16
2.2 相關定位技術介紹	19
2.2.1 Range-base 的定位技術	19
第三章 實驗環境與軟硬體介紹	25
3.1 實驗環境介紹	25
3.2 實驗設備介紹	26
第四章 實驗方法介紹	30
4.1 環境訊號特徵比對法介紹	30
4.2 資料庫建立與強度資料的處理	32
4.3 定位演算法	34
4.4 感測節點之加權值探討	35
4.5 最近鄰居法	36

4.6 動態定位演算法.....	39
第五章 實驗結果與討論	40
5.1 靜態定位實驗.....	40
5.1.1 感測節點擺設方式的影響.....	40
5.1.2 感測節點加入權重的影響.....	43
5.1.3 最近鄰居法加入參數的影響.....	43
5.2 動態定位實驗.....	44
第六章 結論	47
參考文獻	48

圖目錄

圖 1：ZigBee 通訊協定.....	15
圖 2：ZigBee 之樹狀拓撲型態.....	16
圖 3：ZigBee 之星狀拓撲型態.....	17
圖 4：ZigBee 之網狀拓撲型態.....	17
圖 5：ZigBee 的角色及組態.....	18
圖 6：TOA 訊號傳送示意圖.....	20
圖 7：TOA 定位環境示意圖.....	20
圖 8：TDOA 訊號傳送示意圖.....	21
圖 9：TOA 定位環境示意圖.....	22
圖 10：AOA 定位環境示意圖.....	23
圖 11：實驗環境配置圖.....	25
圖 12：實驗室環境圖.....	26
圖 13：閘道器外觀.....	27
圖 14：感測節點外觀.....	27
圖 15：定位標籤外觀.....	28
圖 16：轉盤外觀.....	29
圖 17：定位訊號傳送流程.....	29
圖 18：環境訊號特徵比對法之流程圖.....	31
圖 19：接收數據強度分佈.....	33
圖 20：多種不同基準之差異值比較.....	33
圖 21：距離與訊號強度關係圖.....	35
圖 22：最近鄰居法分佈示意圖.....	37

圖 23：演算法之流程	38
圖 24：不同接收器擺設方法	41
圖 25：不同接收器擺設方法實驗結果	42
圖 26：定位誤差分布圖	42
圖 27：加入權重對實驗結果之影響	43
圖 28：最近鄰居法改善誤差效果統計圖	44
圖 29：路徑 B2—L2 動態定位誤差	45
圖 30：路徑 B4—L4 動態定位誤差	45
圖 31：動態定位路徑圖	46

表目錄

表 1：ZigBee 相關標準規格.....	15
表 2：閘道器特性及功能簡介.....	27
表 3：感測節點之特性及功能.....	28
表 4：感測標籤之特性及功能.....	28
表 5：定位演算法之符號說明.....	37

摘要

由於電子製程能力以及無線通訊技術的進步，硬體可取得成本降低，使得無線感測技術的應用大幅度的增加，使用感測器除了可以替代人力外，在資料收集上更有即時性和全面性的優點。在大部分的應用服務中位置資訊是相當重要的資訊，所以定位技術就成為無線感測這個領域中重要的一環。本篇論文是針對室內環境，以發送的訊號強度為基礎，利用環境特徵比對法 (fingerprint) 作為主要的定位方法。

我們將研究室劃分成多個區域，以這些區域作為定位時的參考節點，並在室內放置數個感測節點接收訊號。在資料庫建置階段，我們利用將定位標籤旋轉的方式改善了無線訊號傳播的方向性問題，以及討論感測節點的擺設對定位結果的影響。在定位階段，我們將收到的訊號強度與資料庫中的資料比對計算進而求出定位位置。而在定位階段考慮動態變更感測節點權重所帶來的效益，最後會再以最近鄰居法加強定位結果的精度。由實驗結果可看出，定位的平均定位誤差約為 83 cm，最佳狀況的定位誤差只有 26.5cm，可應用於一般的位基定位服務中，例如大賣場或室內停車場等場所。

關鍵字：無線感測網路，室內定位，環境特徵比對法，最近鄰居法

Abstract

In recent years, with the rapid development of wireless network technology and the reduction of the wireless hardware costs, various value added services have emerged. Among them, Location-based services (LBS) has been developed rapidly in recent years and finds its applications in areas such as medical care, warehouse management and museum mobile guide systems. In this paper, a fingerprinting based location estimation technology based on the ZigBee protocol is proposed. At first, the system uses the signal strength from several base stations to determine the location of the mobile station. Next, the issues about the data collecting methods and the node placement will also be discussed. Finally, the precision of the location estimation technology is further improved by the k-nearest neighboring method. The experiment results demonstrate the validity of the proposed technology. By the experimental result, the average of localization position error approximately is 83 cm, the best localization error only is 26.5cm, we observe that our method can apply to the general Location-based services, such places just like supermarket or indoor parking.

Keywords: wireless sensor network, Indoor localization, fingerprint, k-nearest neighbors

致謝

又到了鳳凰花開的時候，在這個畢業時節裡，莘莘學子將離開學校各奔前程，回想在研究所與大家一起努力的日子，對於將要離開學校一方面依依不捨，但另一方面也因為順利完成學業而感到開心。

很高興能進入林祝興老師教授的資訊安全實驗室，林老師不只在學業上的指導讓我獲益良多，在為人處事方面也讓我獲益匪淺。這段求學的日子中，要感謝實驗室的夥伴們以及學弟妹的協助與參與，讓我在實驗室的生活上能夠多采多姿，特別要感謝學妹逸竹以及戰友建興在各方面的幫助，有你們大家的幫忙才能順利地完成這段學業。

本篇畢業論文能夠順利完成，首先要感謝我的指導教授林祝興博士在研究上的指導，同時要感謝在百忙之中撥冗的張隆池教授、江憲坤教授以及胡學誠教授的指導，指出論文不完善之處，使這篇論文能夠更趨完備。

最後要感謝的是我的家人，感謝你們在我求學的期間給予最大的支持及包容，讓我能夠專心於學業上，順利的完成學業。感謝大家這段時間的協助、鼓勵與相挺，在此昇興致上由衷的感謝，謝謝大家。

蔡昇興 謹誌於 2011 年 7 月

第一章 簡介

1.1 研究背景與動機

由於電子科技以及無線通訊技術大幅度的進步，電子通訊產品有下列三項的改變：(1) 產品體積更小、重量更輕和電力更省；(2) 無線通訊技術的多樣化，可以依不同的使用環境選擇適合的通訊技術來搭配；(3) 電子製程能力的突破以及大量的生產使得產品可取得的成本降低。

一般在環境、居家、軍事的相關應用中，於資料的收集方面都必須由人員實地做資料的收集紀錄才有辦法進行後續相關的應用，但是由人員收集資料可能受限於該地的環境狀況和時間性，資料可能不夠全面性和即時性而造成實用性的降低。有著以上的需求加上現今無線設備容易取得，相關的無線感測技術運用就相應而生。研究人員搭配可以收集各種物理性質數據的感測器，將感測器佈署在相關的環境中，感測器可以替代人工，定時將收到的資料利用無線訊號傳送到電腦系統中，進行相關應用的後續工作，不但資料收集較全面可提高參考價值，還可以節省人力資源的浪費 [1][2]。

在無線感測技術中，定位技術是其中相當重要的一環，許多位基服務的應用都必須掌握人員和物品的相關位置，如居家照護、人員管理及博物館導覽等等都屬於此一應用範圍 [3][4]。

● 居家照護

目前國內人口逐漸趨向高齡化，且家庭的成員大都需要外出工作，對於老人與小孩的照護服務日益重要。在居家照護的應用上，利用定位系統可以隨時知道被照護者的動態，除了可以避免人員的走失，如果再加上一些輔助功能的協助，例如被照護者在樓梯間或浴室停留的時間如果過久，系統立刻

發出警告訊息，便可視需要在第一時間提供必要的協助 [5]。

- **博物館導覽**

在博物館中參觀民眾可以拿著一台掌上型電腦或智慧型手機，透過館中定位系統的輔助，將參觀者的位置資訊傳送給導覽系統，系統會主動將數位多媒體資訊傳送到裝置中，參觀者就能即時地收到展覽物的相關資訊，如同有導覽人員在旁邊解說一樣，如今在台中科學博物館就有提供相關的服務 [6]。

- **人員管理**

於組織中工作人員可以配戴內嵌有無線通訊晶片的卡片，利用晶片所發出的訊號，人員管理系統可以即時得知工作人員的所在位置，也可以彙整出員工的行動軌跡，提供相關的管理人員做參考。

1.2 研究主題與目的

現今在定位的議題中已發展出多種技術，目前使用上最成熟的就是全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS)，使用者利用手持裝置發送無線電波到天空上的 3~4 顆衛星，分別計算手持裝置與各衛星的距離，再利用幾何定位方法就可以輕易地得知使用者的目前所在位置 [7]，但是衛星訊號容易受到建築物的遮蔽，而且其定位的精確度約在十公尺以上，所以只適合用在室外定位。

在本篇論文中針對室內定位的需求，是以無線訊號強度為基礎來協助定位。早期的研究中，都是利用距離和訊號強度之間的關係，將訊號強度換算成距離後，再利用幾何演算法，直接計算出訊號的來源位置。但問題是在室內環境中無線訊號的傳送，會被室內的擺設、牆壁及人員所干擾，而產生折

射、散射及繞射等問題，造成直接轉換的方法定位誤差較大。在本文中是將訊號強度值當作特徵，而不將訊號強度直接轉換成距離，這個方法的優點是將訊號傳送時的干擾因素加入考慮，可將干擾所帶來的影響降到最低。

1.3 論文架構

本論文在架構上共分成六個部份，主要是對室內定位技術作深入探討，論文架構簡述如下：

第一章 簡介：說明本論文的研究背景動機與主要目的。

第二章 相關文獻探討：介紹 ZigBee 無線網路的起源及設計概念，相關定位技術的研究探討。

第三章 實驗環境與軟硬體介紹：針對實驗環境及使用的軟、硬體做介紹。

第四章 實驗方法介紹：介紹實驗所使用的環境特徵比對法。

第五章 實驗結果與討論：利用實驗來驗證論文中提出之演算法並對結果作效益分析。

第六章 結論：總結本論文之研究成果。

第二章 相關文獻探討

近年來因為無線通訊技術的進步，利用無線網路來完成定位工作的技術越來越受到歡迎，其中無線區域網路 (Wireless Local Area Network, WLAN) 適合用來協助室內定位服務的應用，在無線技術中以 IEEE 802.11 和 802.15 為基礎的無線網路已經被廣泛使用，其中 ZigBee/IEEE 802.15.4 是一個簡單且具彈性的通訊協定，其協定強調較具彈性的網路架構，低傳輸速率，低電源功率消耗的特性。而且依據不同的傳送功率，傳輸距離可達 30~75 公尺，相當適合拿來當作室內定位的技術，所以在研究中我們利用 ZigBee 的系統當作定位實驗的設備[8][9][10]。以下我們將針對 ZigBee 作詳細的介紹。

2.1 ZigBee 無線網路之介紹

2.1.1 ZigBee 之特性介紹

ZigBee 是一個無線網路協定，最初是由 Honeywell 公司發起的 ZigBee 聯盟 (ZigBee Alliance) 所制定，其協定層由下至上分別為實體層 (PHY Layer)、媒體存取控制層 (MAC Layer)、網路和安全層 (Network & Security Layer) 等，詳細之架構如圖 1 所示。

ZigBee 協定具有以下特色：網路架構簡單具彈性、低傳輸速率、低功率消耗、短距離的訊號傳輸等等，使用的頻帶和傳輸速率標準規格如下表 1 所列，網路架構有 Master/Slave 的特性，可雙向進行通信。ZigBee 協定的特性詳述如下：

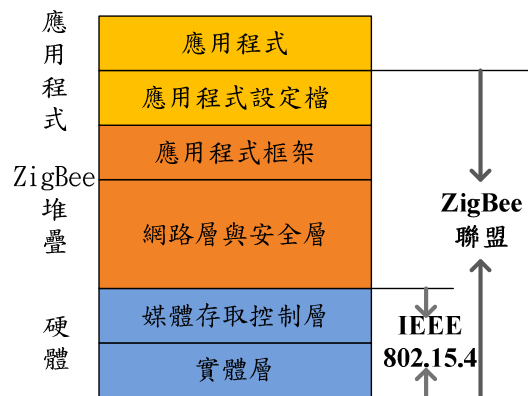


圖 1：ZigBee 通訊協定

表 1：ZigBee 相關標準規格

頻率	868MHz	915MHz	2.4GHz
適用區域	歐洲	美國	全世界
頻道數量	1	10	16
最高傳輸速率	20Kbps	40Kbps	250Kbps

1. 省電：

ZigBee 的傳輸速率較低，因此資料傳輸量也較少，訊號傳送接收時間也較短。 ZigBee 若處在非工作模式時，設備將會進入睡眠模式，而工作模式與睡眠模式轉換時間也很短，只需要 15 毫秒，因此 ZigBee 的設備非常地省電。

2. 高可靠度：

ZigBee 的 MAC 層，採用碰撞避免機制，當有傳送需求時可立即傳送，每一個發送的資料封包，接收方都必須確認是否受到，並傳回確認訊息。若傳送方沒有收到回覆的訊息，就代表資料封包在傳送途中發生碰撞，傳送方必須重送此封包，透過此方式將提高資料傳輸的可靠度。

3. 高度擴充性：

透過 ZigBee Coordinator，整體網路最多可達到 65535 個網路節點，整體 ZigBee 網路節點的數量可說是非常可觀。

2.1.2 ZigBee 網路拓撲介紹

802.15.4 協定堆疊的網路層，制定其可支援樹狀、網狀和星狀拓撲三種網路架構。拓撲形狀如圖 2、3 及 4 所示 [11]。ZigBee 網路的節點可以分成兩種型態，第一種是具有全功能的設備 (Full function device, FFD)，可以放置在所有的拓撲中，當作網路中的 Coordinator 以及與其他所有設備進行溝通；第二種是具有簡單功能的設備 (Reduced function device, RFD)，其具相當多的限制，只可放置在星狀拓撲中，只可以對 Coordinator 進行溝通以及只具有簡單功能的特性。

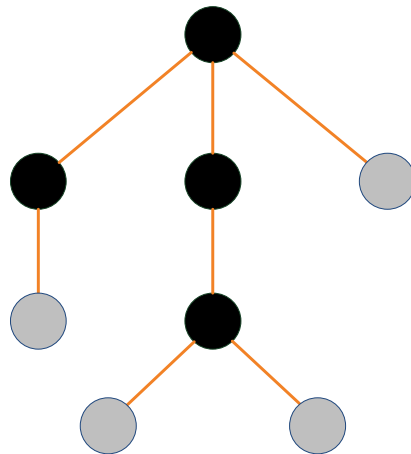


圖 2：ZigBee 之樹狀拓撲型態

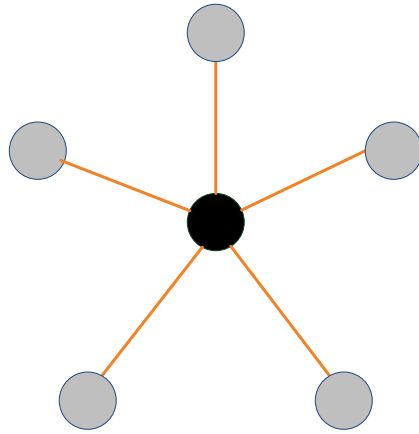


圖 3：ZigBee 之星狀拓撲型態

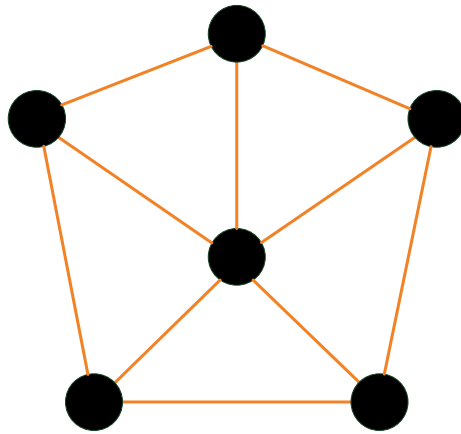


圖 4：ZigBee 之網狀拓撲型態

ZigBee 網路裝置的角色可分為 ZigBee Coordinator、ZigBee Router、ZigBee End Device 共三種，功能分述如下 [12]，其組態如圖 5 所示。

1. ZigBee Coordinator 功能：

- 發起一個網路
- 設定各項網路參數
- 管理網路節點
- 儲存鄰居節點的資訊
- 對封包做安全性處理

- 繞送封包到目標節點
- 找尋並維護節點間的繞送路徑

2. ZigBee Router 功能：

- 對封包做安全性處理
- 繞送封包到目標節點
- 找尋並維護節點間的繞送路徑
- 搜尋鄰居節點
- 儲存鄰居節點的資訊

3. ZigBee End Device 功能：

- 為 ZigBee 網路的終端節點，負責收集資訊並透過 ZigBee 協定交換訊息。

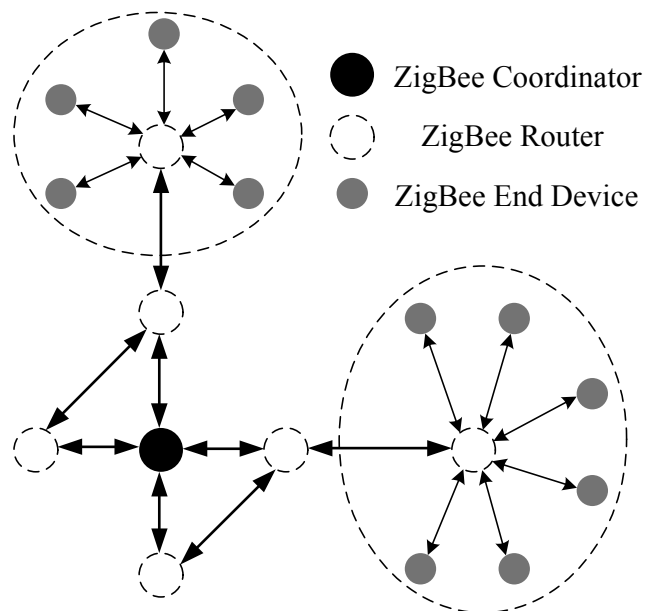


圖 5：ZigBee 的角色及組態

2.2 相關定位技術介紹

在相關的定位演算法中，可以分成 Range-base 和 Range-free 兩類定位技術。Range-free 的技術，不需要得知定位標籤 (Tag) 與感測節點的距離，也能判斷定位標籤的位置。相對來說，Range-base 的技術必須先知道感測節點與定位標籤的距離[13]。在 IEEE 802.15 Ranging subcommittee Final Report [14]中提出四種較常用的測距演算法：(1) 抵達時間 (Time-of-Arrival, TOA)、(2) 抵達時間差 (Time-Difference-of-Arrival, TDOA)、(3) 抵達角度 (Angle-of-Arrival, AOA)、(4) 訊號強度測距法 (Signal Strength Ranging, SSR)。底下將針對上述四種演算法進行簡單說明：

2.2.1 Range-base 的定位技術

(一) 抵達時間法 (Time of Arrival, TOA)

抵達時間法是依據傳送方發送訊號(無線電波或超音波)到接收方所經過的傳遞時間，並利用訊號傳送的速率來計算傳送方與接收方之間的距離 [15][16][17]。訊號傳送的過程如圖 6 所示，感測節點送出訊號 S_1 ，訊號由使用者接收，隨後使用者再發出訊號 S_2 ，最後感測節點接收此訊號。經過時間差的計算，得出訊號傳送的時間，根據訊號傳遞速率 V ，透過公式 (1)、(2) 及 (3)，即能推算出感測節點 A 與使用者的距離 d_A 。透過三個以上的感測節點重複傳送與接收訊號，分別計算出每一個感測節點與使用者的距離後，最後再利用三點定位公式來計算出感測標籤在室內空間的相對位置，TOA 定位環境的示意圖如圖 7。

TOA 定位方法有一重要前提為感測節點及使用者雙方的時間要精確地

同步，計算出來的距離才會準確。由此可知 TOA 定位對硬體方面要求較高，設備相對來講就較昂貴。

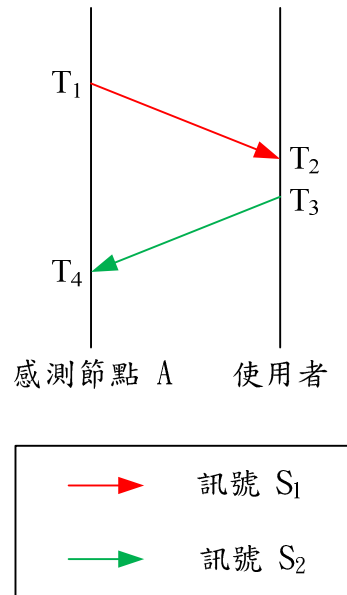


圖 6：TOA 訊號傳送示意圖

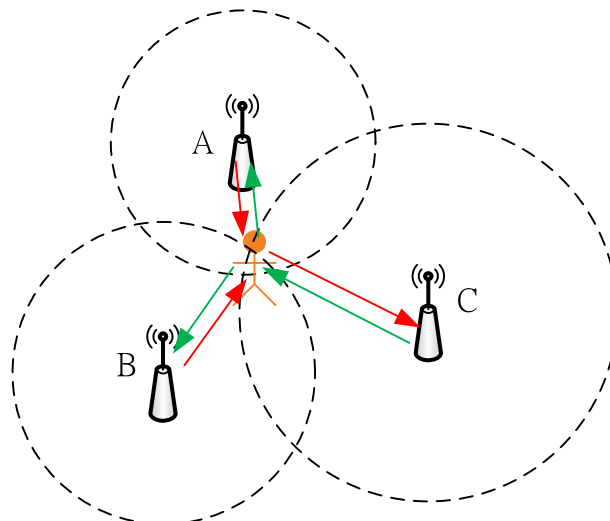


圖 7：TOA 定位環境示意圖

$$T_2 - T_1 = T_{A1} \quad (1)$$

$$T_4 - T_3 = T_{A2} \quad (2)$$

$$\frac{(T_{A1} + T_{A2}) \times V}{2} = d_A \quad (3)$$

(二) 抵達時間差法 (Time Difference of Arrival, TDOA)

TDOA 和 TOA 非常相近，它和 TOA 不同的地方是使用者會發射兩種速率不同的訊號（如超音波和無線電訊號），感測節點再根據這兩種訊號抵達的時間差，計算兩者之間的距離 [18][19][20]。訊號傳送流程如圖 8 所示，感測節點先後發射 2 種速率不同的訊號 A_1 和 A_2 ，使用者收到訊號後根據抵達時間計算出 T_1 及 T_2 ，再依據兩種訊號傳送速度分別為 V_1 與 V_2 ，由公式 (4) 計算感測節點與使用者之間的距離。分別計算出三個或以上的感測節點與使用者的距離，最後與 TOA 同樣透過三點定位公式或其他演算法，計算出使用者的位置，TOA 定位環境的示意圖如圖 9。

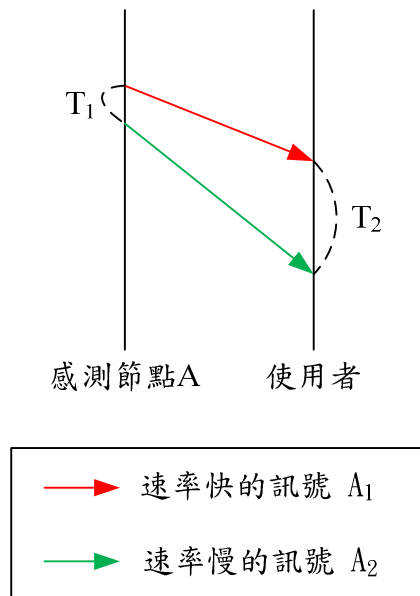


圖 8：TDOA 訊號傳送示意圖

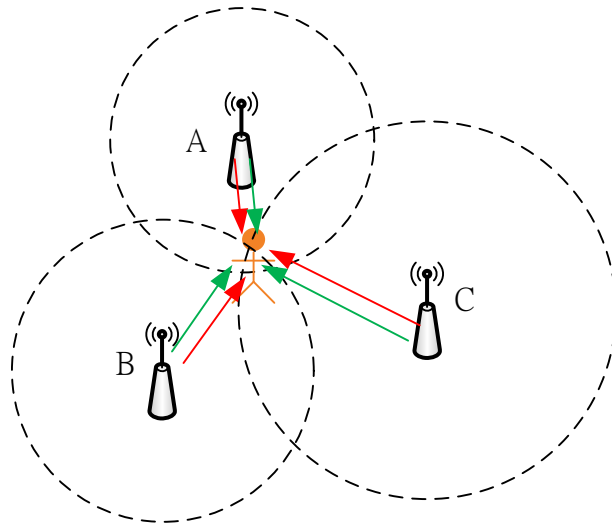


圖 9：TOA 定位環境示意圖

$$d_A = (T_2 - T_1) \times \frac{V_1 \times V_2}{V_1 - V_2} \quad (4)$$

(三) 抵達角度法 (Angle of Arrival, AOA)

AOA 法是藉助裝有方向性天線感測節點的配合，當定位標籤送出訊號時，感測節點利用方向性天線便能夠得知訊號送達的入射角度，利用這 2 個角度以及兩個感測節點的位置，就能計算出使用者的位置 [21][22][23]。AOA 環境概念圖如圖 10 所示，兩個感測節點的位置與距離為已知，當使用者傳送訊號後，感測節點可以利用方向性天線，計算出入射角 θ_A 以及 θ_B ，最後利用公式 (5)、(6)、(7)、(8)、(9) 及 (10) 的計算，就可以求出使用者的實際位置，但此方法也需要使用額外的設備輔助，所需的硬體成本較高。

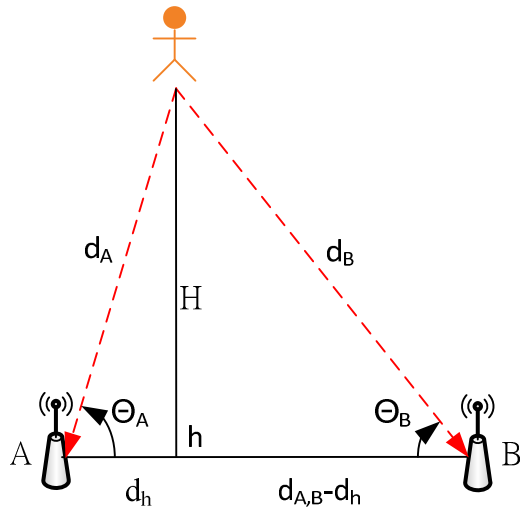


圖 10：AOA 定位環境示意圖

$$d_A \sin \theta_A = d_B \sin \theta_B \quad (5)$$

$$\cos \theta_A = \frac{d_h}{d_A} \quad (6)$$

$$\cos \theta_B = \frac{d_{AB} - d_h}{d_B} \quad (7)$$

$$d_{AB} = \frac{d_h \tan \theta_B}{\tan \theta_A + \tan \theta_B} \quad (8)$$

$$d_A = \frac{d_h}{\cos \theta_A} \quad (9)$$

$$d_B = \frac{d_{A,B} - d_h}{\cos \theta_B} \quad (10)$$

(四) 訊號強度測距法 (Received Signal Strength, RSS)

M. Lihan 與 C. Papamantho 等學者有提到，在接收訊號強度法中，感測節點會由訊號強度指示器將收到的訊號解析出訊號強度，再由訊號強度換算成距離 [24][25]。訊號發送源若與感測節點的距離越遠，則收到的訊號將越弱 [26]，在公式 (11) 我們可以看出訊號強度會隨著距離值 d 變大，而訊號強度越來越弱。但訊號強度會因為環境的干擾，而產生反射、散射及繞射的情形，而產生隨機的衰減，所以利用接收訊號強度法，將會有誤差過大的缺點。

$$\bar{P}(d) = P_0 - 10n_p \log \frac{d}{d_0} \quad (11)$$

在 TOA、TDOA 與 AOA 的方法中都必須使用額外的設備，所以硬體的成本較貴較不適合做大量的佈署，而且 TOA 與 TDOA 的方法對時間非常的敏感，即使接收到的時間誤差即使非常小，計算出來的距離誤差也會很大。在 RSS 方法中在室內的環境中因為人員和擺設的影響，造成定位的不準確。所以在這篇論文中，我們利用特徵法為基礎，進行室內定位的技術研究。

第三章 實驗環境與軟硬體介紹

本篇論文是以實作的方式來求出在室內環境中定位標籤的實際位置與定位誤差。實驗環境是利用實驗室內部做為實驗的地點，而實驗器材是採用盛暘科技開發，符合 ZigBee/IEEE 802.15.4 協定的硬體來做為定位的工具，傳輸的範圍可達 30 m，適合用來當作定位的工具。

3.1 實驗環境介紹

實驗的環境為長 10 公尺、寬 4.5 公尺的長方形實驗室，在實驗室中間利用 3 公尺 × 6 公尺的空間，以 60 公分作為一個區段，將長邊分為 10 段，短邊分為 5 段，總共可以劃分成 66 個參考點，環境配置圖及參考點的編號，如圖 11 所示。

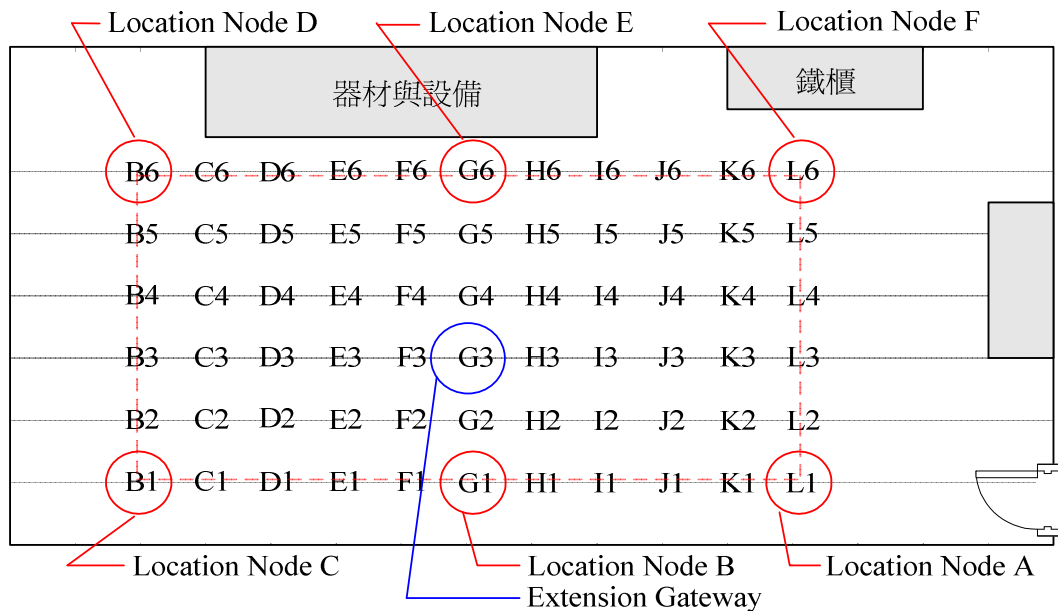


圖 11：實驗環境配置圖

實驗設備共分為兩種類別，一種是 FT-6340 Location Node 共有 6 個，我們將其當作定位信標分別配置在實驗室的天花板上四周，另一種是 FT-6310 Extension Gateway 只有 1 個，其作為閘道器架設在天花板的中央，如圖 12 所示。

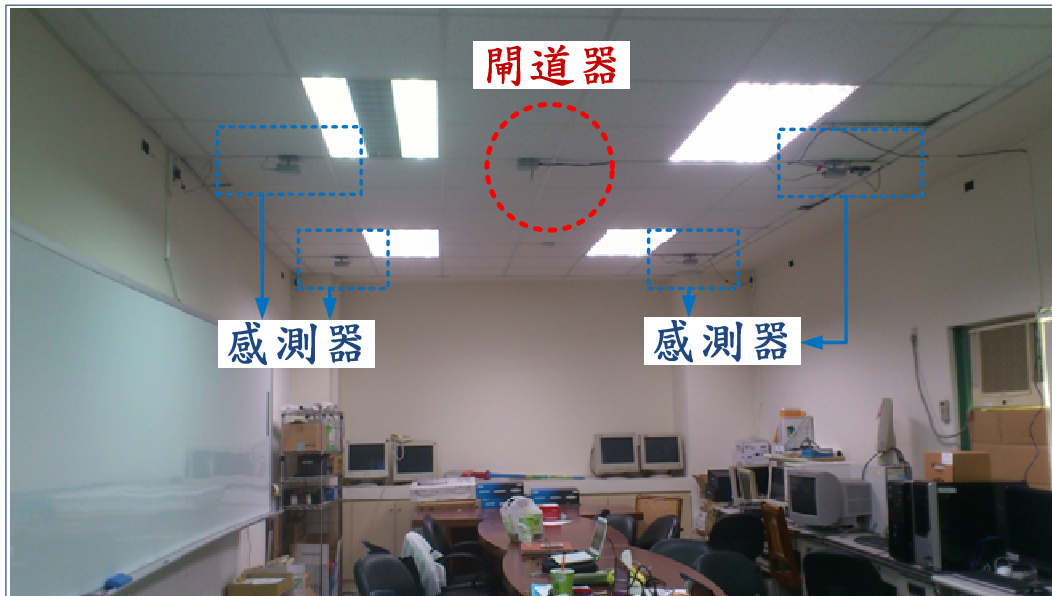


圖 12：實驗室環境圖

3.2 實驗設備介紹

實驗設備為盛暘科技開發，符合 IEEE 802.15.4 協定的硬體，包含：

1. 閘道器 (FT-6310 Extension Gateway)，數量為一個，包含 ZigBee Coordinator 和 ZigBee To Ethernet Bridge 兩個功能，負責把收集到的資料透過 Ethernet 傳送給電腦處理，特性及功能如表 2，外觀如圖 13。



圖 13：閘道器外觀

表 2：閘道器特性及功能簡介

閘道器特性及功能
無線網路中心
無線有線網路橋接器
無線資料收集中心
Dipole Antenna
收集所有感測節點封包

2. 感測節點 (FT-6340 Location Node)，數量有六個，為了提供更明顯的訊號特徵採用的是指向性天線的設計，在 ZigBee 網路中扮演 Router 的角色，在系統中也當做定位信標 (Beacon)，將參考點資訊及接收到的強度傳回給定位標籤，特性及功能如表 3，外觀如圖 14。



圖 14：感測節點外觀

表 3：感測節點之特性及功能

感測節點特性及功能
區域位置信標發射站
提供低頻事件觸發信號
指向性天線設計
扮演網路中的路由器角色

3. 定位標籤 (FT-6360 Location Tag)，數量為一個，功能是發送出廣播訊號，再收集感測節點傳回的資料，轉送給閘道器，回報時間間隔可以設定為 0.5 秒至 65 秒，在我們實驗過程中是設為 0.5 秒，特性及功能如表 4，外觀如圖 15。



圖 15：定位標籤外觀

表 4：感測標籤之特性及功能

感測標籤特性及功能
低耗電無線技術 (IEEE 802.15.4)
可充電設計
雙向溝通緊急求救建

4. 轉盤，數量為一個，會以固定的速率自動旋轉，功能是輔助定位標籤可以均勻的在各個方向送出無線訊號，外觀如圖 16。



圖 16：轉盤外觀

定位標籤在送出訊號後，定位訊號在感測節點與閘道器之間傳送流程如圖 17。

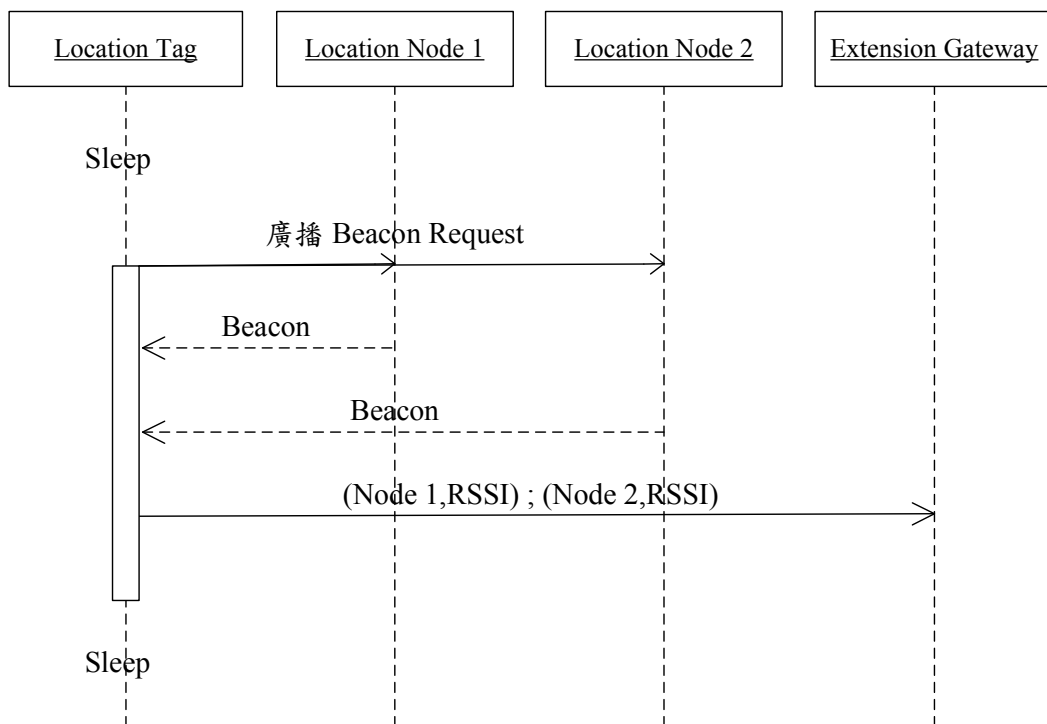


圖 17：定位訊號傳送流程

第四章 實驗方法介紹

由前面的幾種定位技術可知道，在室內定位中 RSS 有定位誤差較大的缺點，而其它的技術則有設備上的限制。在本篇論文的研究中，我們是參考 RADAR 定位技術，這個技術是一個利用 radio-frequency(RF) 為基礎的系統，用來定位和追蹤在建築物中使用者的位置。以下我們對環境訊號特徵比對法進行詳細的介紹。

4.1 環境訊號特徵比對法介紹

本篇論文主要是針對室內環境，參考 RADAR 提出的環境訊號特徵比對法作為主要定位方法 [27]，此方法雖然需要得知定位標籤的訊號強度，但並非根據訊號強度大小，將其轉換為定位標籤與感測節點的距離。當定位標籤在指定區域出現時，利用事先建立好的訊號強度資料庫，將感測節點收到的訊號強度與資料庫做比對，進而判斷定位標籤在該區域的位置。

此法將定位過程分為兩個階段：

1. 訓練階段 (Off-line)：此階段主要的目的是建立訊號強度資料庫。假設我們欲得知定位標籤在某室內空間的位置時，必須事先於該空間內裝設許多感測節點，然後針對該空間區域作分割建立數個參考點，於每一個參考點做測量，來取得該空間的強度樣本。在室內環境中因擺設的不同，訊號傳送受干擾的程度也不同，因此強度樣本的數量越多，愈能反映環境的特性。由此可知參考點越密集，訊號強度樣本越多，此法的定位精確度也會上升，但相對的所花費的量測成本也會提高，所以我們應該由空間區域的變動性、擺設的複雜度與應用服務所需的定位精準度需求來設定參考點的數量。

2. 定位階段 (Real-time/On-line)：我們可以在室內空間的任何一個地點，利用定位標籤發出訊號，經由感測節點的資料回饋我們可以得到一組訊號強度值，利用訊號強度與資料庫的強度樣本作比對計算，最後由定位演算法得出定位結果。此定位技術因為簡易，花費成本也不高，目前已有許多的相關研究提出不同的演算法，來提高定位的精確度。

環境訊號特徵比對法的流程圖如下圖 18。

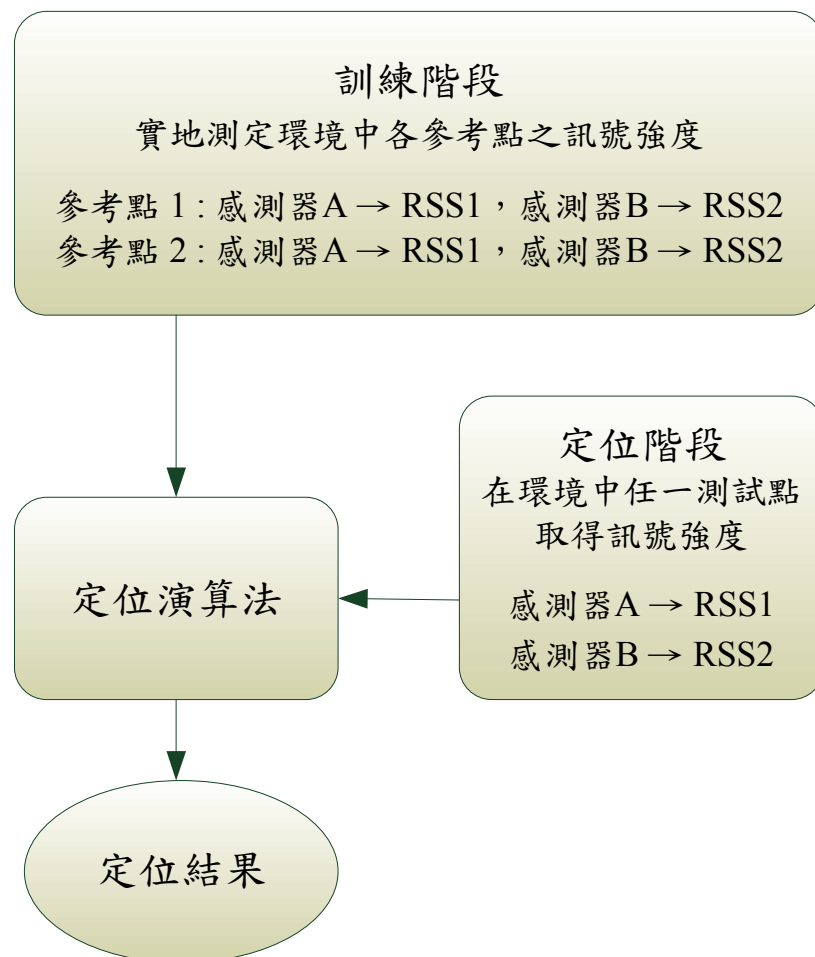


圖 18：環境訊號特徵比對法之流程圖

4.2 資料庫建立與強度資料的處理

無線訊號傳輸有方向性的問題，定位標籤發送訊號到感測節點，會因定位標籤方向不同，感測節點收到的訊號強度也會不一樣，定位標籤在不同方向送到感測節點的訊號強度，收集後應該介於一個強度範圍之內。若就單一方向量測得到的訊號強度，直接作為資料庫的樣本，可能是範圍中的極大或極小值，會降低定位的精確度。我們考慮到方向性所帶來的問題，故在實驗數據收集部分，會利用一個自動旋轉的轉盤，在其上方放置定位標籤，當轉盤在轉動時，定位標籤將可以均勻地自各個方向送出訊號，故受到方向的影響將可降到最低。本文採用之演算法不考慮複雜的接收方向判定問題 [28]，相關研究的方法會在每個參考點均進行多個方向的量測，再將收集到的資料作處理，但利用轉盤輔助的量測方法會比較節省時間。

在訓練階段我們在實驗區域的參考點，放置轉盤並將定位標籤置於上方後讓轉盤自動旋轉，定位標籤送出訊號後經過一段時間，我們會在 PC Server 上收到每一個感測標籤所接收到的訊號強度值，我們必須重複執行相同的動作，直到所有的參考點都量測過為止。

在實驗數據收集的過程中，將在每一個參考點進行78 秒(轉盤轉一圈的時間)之量測，每一個感測節點將收到 60 至70 筆訊號強度值。透過收集的數據，我們觀察到訊號強度值之分布，如圖 19 所示。其統計數據如下：平均數：111.7、眾數：126 及中位數：114，在此本文是取平均數作為基準值。

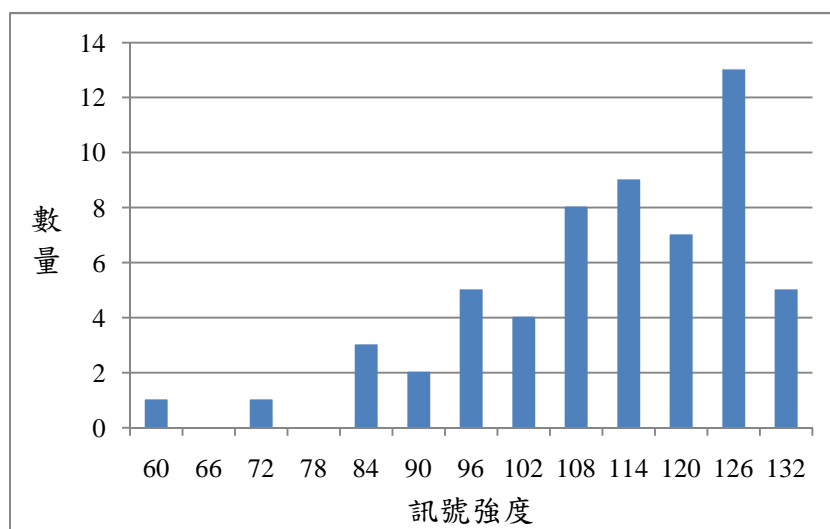


圖 19：接收數據強度分佈

在實驗中我們會發現，定位標籤在不同方向送出之訊號強度，其強度差異範圍有 40~60dbm。在資料庫中的樣本收集我們可以分成兩種方式，第一種是以多個方向之平均當基準值，第二種是以單一方向收到的訊號當基準值，將收到的訊號強度對這兩種資料庫做比對。計算出差異值後發現，在越多方向收集訊號強度並將其平均作為資料庫的參考值，計算出來的差異值將會越小，如圖 20，因此整體的定位誤差會有顯著的改善。

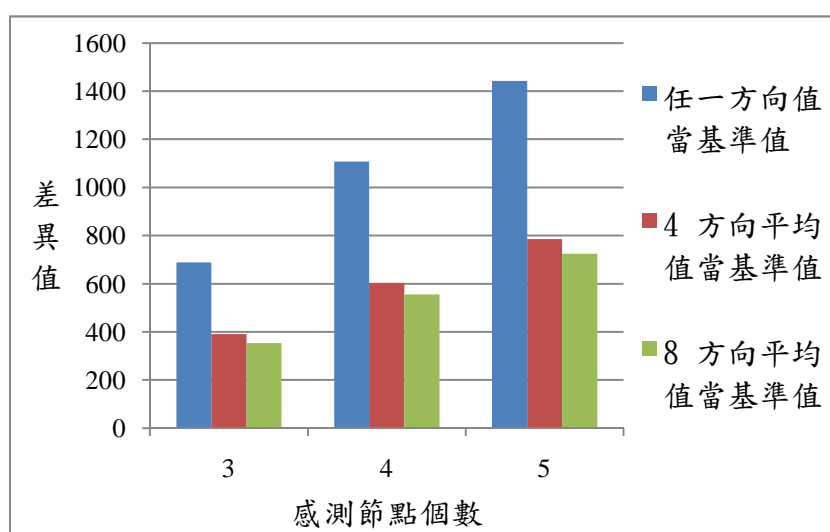


圖 20：多種不同基準之差異值比較

實驗中分別在每一個參考點作完資料收集，並將資料取算術平均數，得出訊號強度值，存放在資料庫的格式如下：

$$\langle Node_name, X, Y, RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_n \rangle$$

Node_name 為參考點名稱， X 為 X 軸座標值， Y 為 Y 軸座標值， RSS_n 為第 N 個感測節點收到的訊號強度值；我們將這些資料建成資料庫後，便完成訓練階段的工作。

4.3 定位演算法

本文所採用之定位演算法為差異值比對法。在定位階段使用者會在實驗區域中的任一點放置感測標籤送出感測訊號，我們會設定量測時間，當量測完成後會收到一組訊號強度值，便與資料庫中的參考點資料逐一進行進行比對計算，公式如下列公式 (12)，當計算出一組差異值時，自動比較組內數值的大小，最小值所代表的參考點就當成是定位標籤的實際位置。

$$diff_val_N = \sum_{i=1}^K (RSS_i' - RSS_i)^2 \quad (12)$$

$diff_val_N$ 代表的是差異值，公式中的下標 N 代表與資料庫中第 N 個參考點樣本作比較， K 表示感測節點的個數， RSS_i' 表示定位階段收到的訊號強度， RSS_i 表示資料庫中第 N 個參考點的訊號強度。

4.4 感測節點之加權值探討

將實驗中距離與訊號強度的關係整理出來，將其繪製成下圖 21 距離與訊號強度關係圖，可以發現訊號強度雖然會隨著距離越遠而漸漸地變弱，但在某些區段中變動性卻不大，例如收到 RSSI 的值是 95，對應到的可能有 4.2m、4.8m、6.0m 和 6.6m 這四種距離，將其作分析並不容易得到可供使用的函數圖形。但可以看出訊號強度在較強的區間，較容易對應到唯一的距離。所以我們知道若收到的 RSSI 值越大，表示定位標籤越靠近該感測節點，以及越靠近定位標籤的感測節點可靠度應該越高。但我們無法預知定位標籤的位置，也就無法判斷定位標籤與感測節點之距離，只能依據收到的 RSSI 值，動態給予感測節點不同的權重。

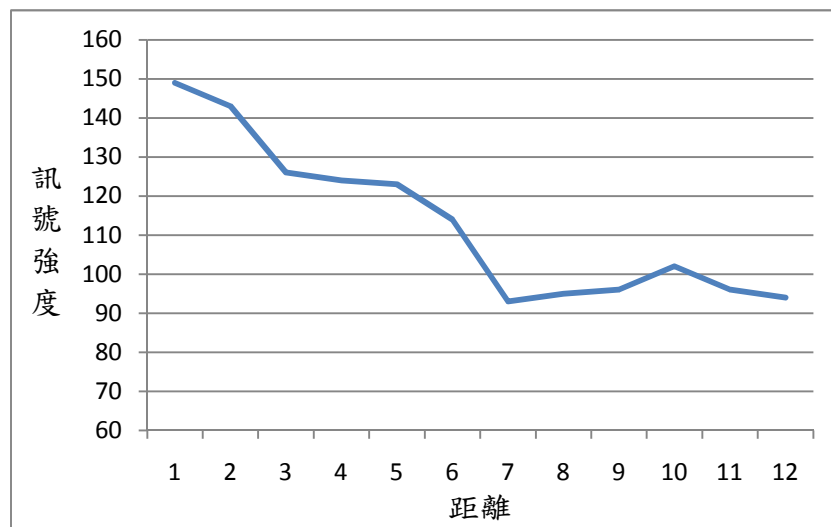


圖 21：距離與訊號強度關係圖

本實驗的定位演算法假設收到訊號強度越強之感測節點，將可以給予較高的加權值，但若直接給予某一感測節點非常高的加權值（如加權值從 1 調成 5），會破壞感測節點訊號強度數值之間的平衡，所以在實驗中所給予的加權值 = (訊號強度 / 100)。例如訊號強度是 150 則給予的加權值是 1.5。但

假如在只需判定定位標籤在某一範圍內的區域，我們給予的權重變異可以更大。以下是加入加權值後的差異值公式(13)。

$$diff_val_N = \sum_{i=1}^K (RSS_i' / 100) * (RSS_i' - RSS_i)^2 \quad (13)$$

4.5 最近鄰居法

上述的演算法是在一組差異值中選出最小的值，以該數值對應之參考點當作定位結果，但接收訊號強度可能會因溫度、濕度以及其他因素影響，導致收到的強度值有變化，所以只考慮一個參考點當作定位結果的風險相當高。以環境特徵比對法的特性來看，越靠近定位標籤的參考點差異值會越小，距離越遠差異值會越大，所以差異值較小的值彼此之間應該存在一個關係，就是越接近實際位置。本研究是利用最近鄰居法 (K Nearest Neighbors) 來輔助定位計算，計算出差異值後，取三個最小的值作為候選地點之集合 [29][30]。本研究認為這一組集合代表較靠近定位標籤之位置，在實際情形中，這一組集合中的地點可能很接近，也可能很分散。節點較靠近的組別即使誤判也不至於有太大的誤差，所以我們將每一個節點的權重皆設定為差異值的平方，如圖 22 (a) 所示。相對的較分散的組別因為無法正確判斷哪一個較接近實際位置，若誤判產生的誤差極大，所以將集合中每一個節點的權重均定為 1，如圖 22 (b) 所示；圖 23 為本研究所設計之演算法流程，我們在圖中對兩種不同的分佈情況，簡述了相對應的計算公式。

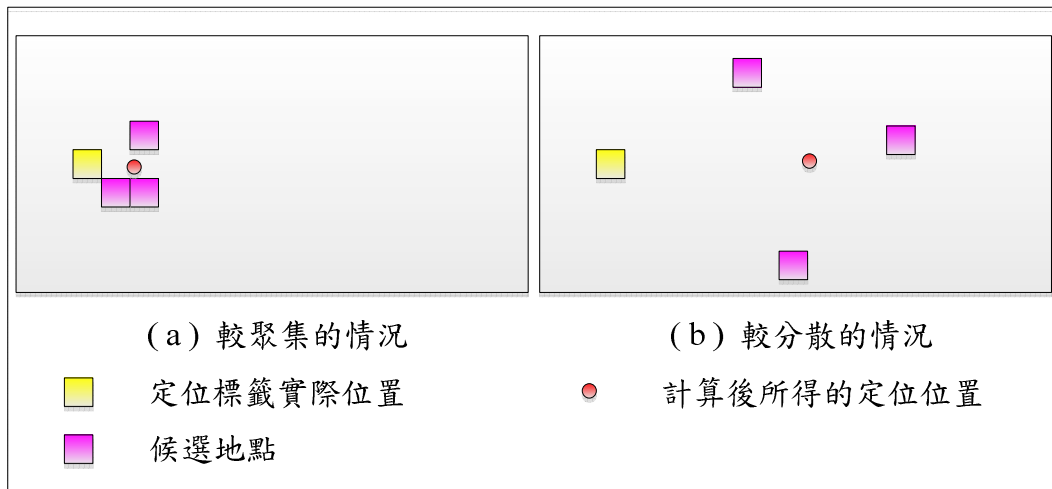


圖 22：最近鄰居法分佈示意圖

表 5：定位演算法之符號說明

X, Y	定位階段中定位標籤所在的X軸和Y軸的座標值
N	資料庫中參考點個數
RSS_i	在訓練階段感測節點收到的訊號強度值
RSS_i'	在定位階段從感測節點收到的訊號強度值
$diff_val_N$	差異值，用來比較Input中訊號強度與資料庫的相似度
X_n, Y_n	差異值最小的三個最小值代表之候選地點之集合中各參考點的X軸和Y軸的座標值
P_{pre}	定位階段後得出的估計位置
X_{pre}, Y_{pre}	定位階段後得出的估計位置的X軸和Y軸的座標值
ε	最近鄰居法中避免分母出現0，加入的一個極小數值
$Dist_{err}$	定位結果誤差

```

input : (X, Y, RSS1', RSS2', RSS3', RSS4', RSS5', RSS6')

for(n = 1 → N)

    diff_valN =  $\sum_{i=1}^K (RSS_i' / 100) * (RSS_i' - RSS_i)^2$ 

    從 {diff_val} 找出三個最小數值，其數值代表三個參考點之座標值 : (X1, Y1), (X2, Y2), (X3, Y3)

    if( ( (X1, Y1), (X2, Y2), (X3, Y3) } 分布的區域在長寬 1.8m 矩形內)

        
$$P_{pre} = (X_{pre}, Y_{pre}) = \frac{\sum_{j=1}^3 \frac{1}{diff\_val_j^2 + \epsilon} * (X_j, Y_j)}{\sum_{k=1}^3 \frac{1}{diff\_val_k^2 + \epsilon}}$$


    else

        
$$P_{pre} = (X_{pre}, Y_{pre}) = \frac{\sum_{j=1}^3 (X_j, Y_j)}{3}$$


        
$$Dist_{err} = \sqrt{(X_{pre} - X)^2 + (Y_{pre} - Y)^2}$$


output : Ppre, Disterr

```

圖 23：演算法之流程

4.6 動態定位演算法

在動態定位方面，我們是要找出一個物件的移動軌跡，我們可以利用多次的靜態定位結果，將結果依時間順序的關係，依序將定位點連接，就可以模擬出物件移動的軌跡。在實驗中是選擇 2 條 6 公尺的路徑，每一條都在一分鐘內走完，每隔 6 秒進行一次定位，再將定位結果連接，最後就可以看出物件的移動路徑。

在實驗中，訊號強度的接收頻率平均是 1 組/sec，數據相當有限，在動態定位的模式中，物件在移動的狀態下系統會持續的收集訊號，而在一個區段時間內的訊號，彼此間的距離都相當接近，訊號強度具有一定的關係。考慮上述的因素，我們在收集訊號時會分成兩種方式，第一種是取得一筆資料立刻進行定位，第二種是將區段時間內收集的訊號作處理，再進行定位的工作，定位階段訊號收集後，定位的方式與靜態定位相同。

第五章 實驗結果與討論

在位基服務的應用上通常可分為兩類，一類只須知道目標物目前的位置，如博物館導覽和物品管理等，博物館導覽只須知道遊客目前的所在的位置，而物品管理只須知道目標物品的位置即可。另一類就需要知道目標物的移動軌跡，如人員管理和家庭照護的部分應用上，兩者都必須知道相關人員的移動路徑。本篇論文的定位實驗將分為兩種，分別是靜態定位實驗和動態定位實驗兩種。

在靜態實驗中我們在每一個參考點各進行一次定位測試，共取得 66 組訊號強度的 sample，以定位演算法計算出定位誤差後我們取誤差最小的 22 組當最佳情況，誤差最大的 22 組當最差情況，全部的 66 組當作平均情況，來對定位誤差進行討論。

在動態實驗中，我們會在實驗室中選擇 2 條 6 公尺的直線路徑，分別都以 1 分鐘走完，再利用演算法計算出平均誤差與繪製移動軌跡。

5.1 靜態定位實驗

5.1.1 感測節點擺設方式的影響

在實驗的環境中，定位節點數量多寡與擺設方法不同，會對定位準確度造成影響，本文將討論以 4 個和 6 個感測節點在不同擺設下得出的定位結果。以下詳述採取不同的配置方式來進行定位的結果與討論，實驗設定概述如下：

1. 在 BCDE 佈置感測節點，評估部分實驗範圍不在感測節點包圍範圍內的影響，如圖 24 之擺設 1
2. 在實驗範圍的 4 個地點—ACDF 佈置感測節點，評估把感測節點擺在實驗範圍角落的影響，如圖 24 之擺設 2。
3. 在 ABCDEF 分別放置 6 個感測節點，驗證此方法是否可以避免掉嚴重的鏡射問題，如圖 24 之擺設 3。

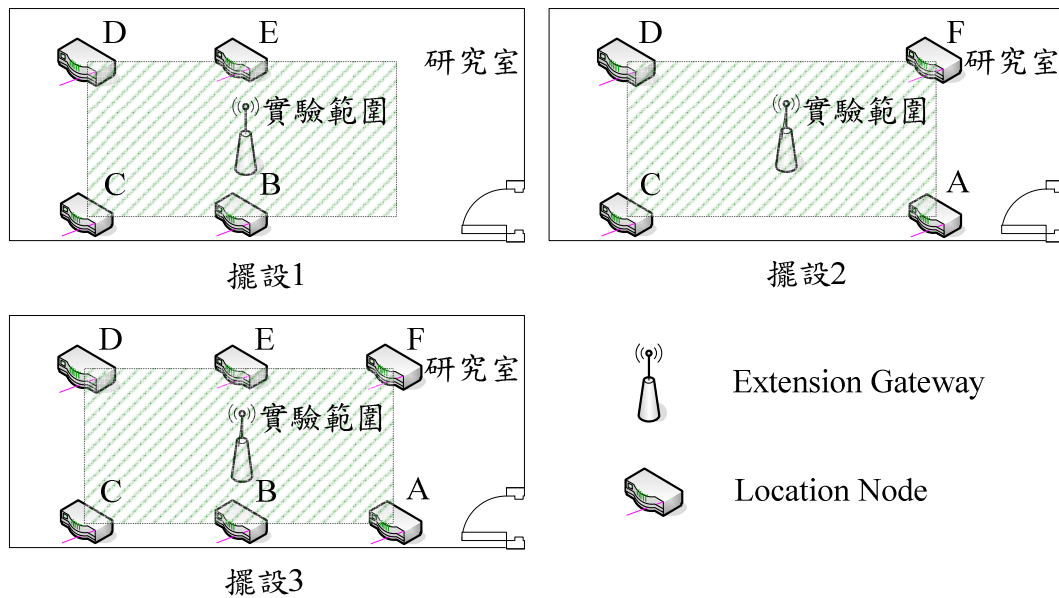


圖 24：不同接收器擺設方法

由圖 25 結果可知擺設 3 的定位誤差最小，擺設 2 為其次，擺設 1 效果最差，定位誤差由 128.1 至 86.6 公分的範圍。由擺設 1 和擺設 2 的定位結果顯示，兩者的定位誤差相差有 16.7 cm，可以看出同樣數量的感測節點會因為擺設的方式不同，定位的誤差也會不同。另外由擺設 2 和擺設 3 可看出後者的定位誤差由 111.8 降到 86.6 公分，改善了 25.2 cm，說明了增加了感測節點的數量，也會為定位的準確度帶來幫助。

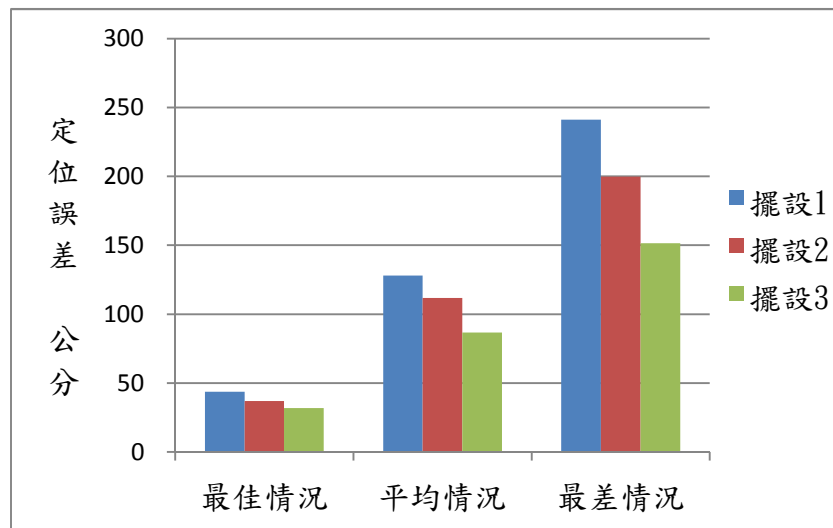
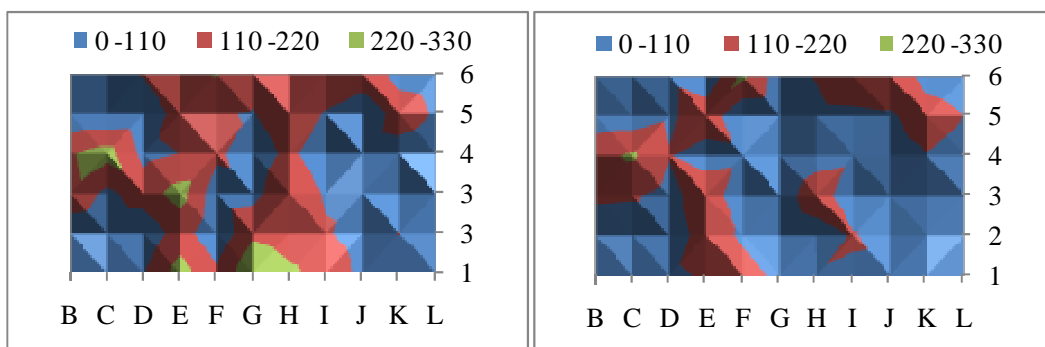


圖 25：不同接收器擺設方法實驗結果

再來以整體實驗環境的定位誤差分布來看，在實驗環境之中央偏左和偏右的地方，這一個環型區域都離感測節點比較遠，收到的一組訊號強度數值都差不多，經過差異值計算後數值的變動性不大，可以說存在鏡射的問題，由圖 26 我們發現，其環狀區域之定位誤差明顯較高。但加入 2 個感測節點後，該區域的定位誤差大幅度的降低，由結果可知在適當的地方加上感測節點，可改善鏡射的情形，使的該區域之定位誤差變得較平均，大幅降低定位誤差。



(a) 擺設 2 定位誤差分布圖

(b) 擺設 3 定位誤差分布圖

圖 26：定位誤差分布圖

5.1.2 感測節點加入權重的影響

在距離與訊號強度關係圖中我們可以發現，在定位標籤發出訊號後，越靠近該發射地點的感測節點所收到的訊號強度越具有參考價值，所以我們再實驗中以收到的訊號強度判定兩者之間的距離，訊號強度值越高給予該感測節點越高的權重，由圖 27 結果可知在本研究的實驗環境中，小幅度變更感測節點的計算權重，平均誤差將由 86.8 降至 84.8 公分，可見幅度並不大，但在最佳情況中誤差由 31.9 降至 28.0 公分，定位誤差改善程度達到 12%。

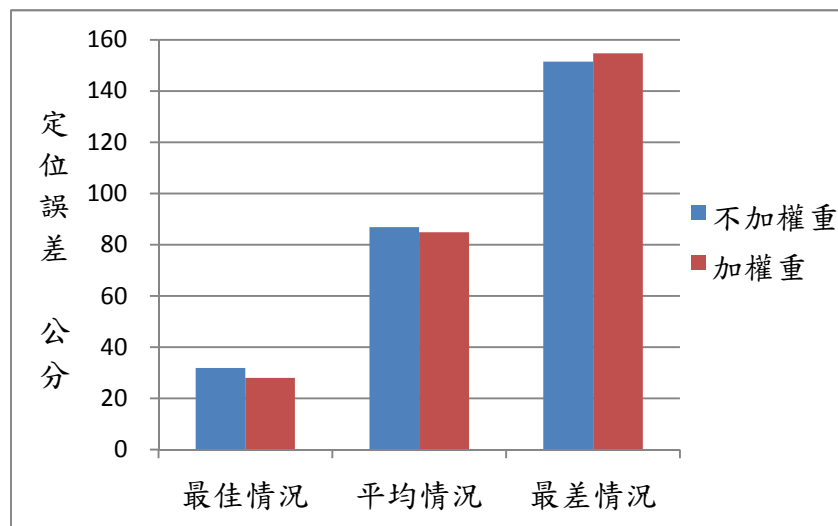


圖 27：加入權重對實驗結果之影響

5.1.3 最近鄰居法加入參數的影響

在定位演算法計算出一組差異值後，較小的差異值所代表的參考點位置，都有可能是訊號實際的發射地點，但每一個點的可能性並沒有實際的方法可以判定出來，所以我們依這些點的分布情況來看，將其分為分散型與靠近型兩種型態，圖 28 為對各種不同的型態，配合最近鄰居法的輔助計算，並給

予不同權重所產生的結果，演算法將根據四種情況，給予最近鄰居法不同的參數。其中各實驗情形分述如下：

設定 1：不用最近鄰居法，由差異值最小的參考點代表定位結果。

設定 2：分散型態組別及靠近型態組別參數都給 1。

設定 3：分散型態組別及靠近型態組別參數都給差異值。

設定 4：分散型態組別參數都給 1，靠近型態組別參數給差異值的平方。

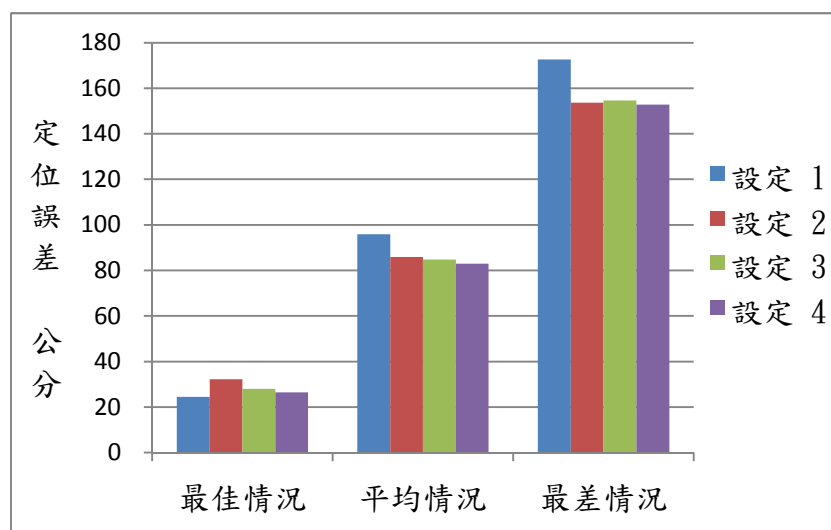


圖 28：最近鄰居法改善誤差效果統計圖

於實驗結果可以發現利用最近鄰居法後，整體的平均誤差由 95.9cm 降至 85.8cm 改善了 10.1cm，而調整參數後平均誤差由 85.8cm 降至 82.9cm 也可以再降低 2.8cm，尤其是最佳情形可以改善 5.7 cm，若在其他應用上可以排除最差情形的發生，那調整參數的效益將更加顯著。

5.2 動態定位實驗

在實驗中我們設定物件在實驗室中，會在 60 秒內走完 6 公尺，物件在移動中系統會持續的收集訊號強度，每隔 0.6 公尺會做一次定位，接收訊號

的方式分為以下三種：

設定 1：收集 1 筆訊號強度後，就進行定位

設定 2：收集時間包括前後 1 秒，共 3 秒的時間，約有三筆資料

設定 3：收集時間包括前後 1 秒，共 5 秒的時間，約有五筆資料

實驗的移動路徑共規畫為兩條，第一條由 B2 點到 L2 點，第二條則是由 B4 點到 L4 點，圖 29 及 30 為動態定位誤差。

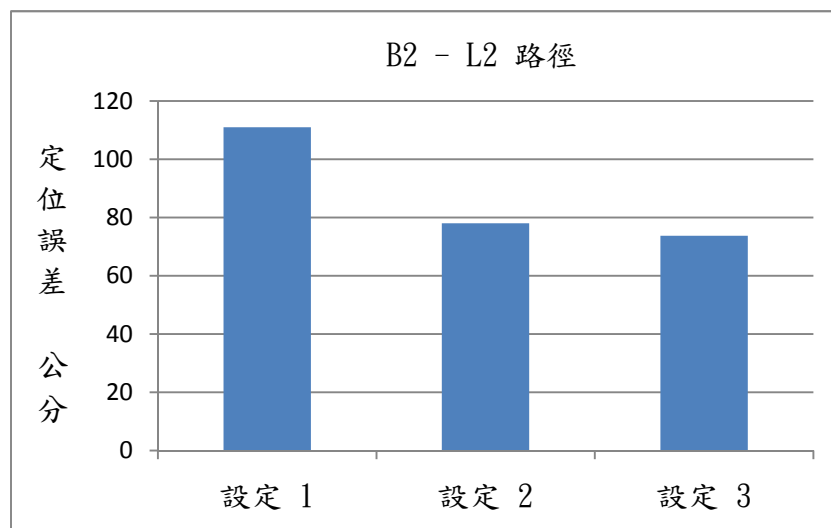


圖 29：路徑 B2—L2 動態定位誤差

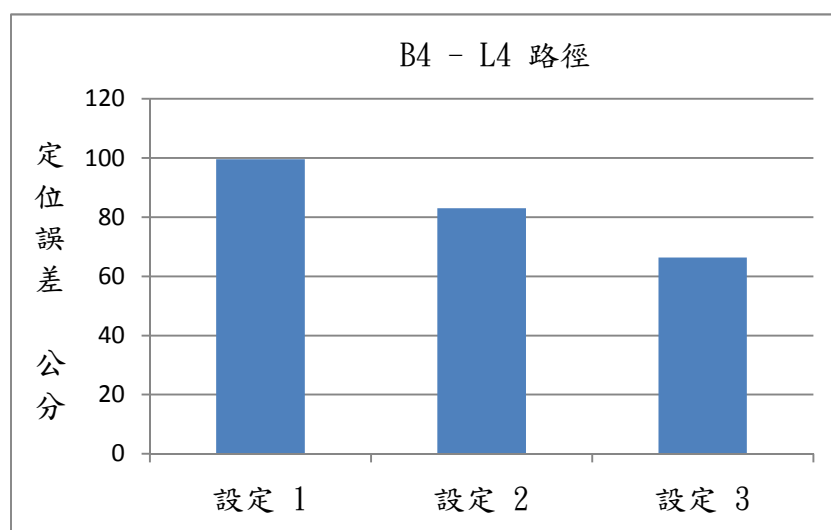


圖 30：路徑 B4—L4 動態定位誤差

由上述的實驗可發現利用設定三收集訊號的方式，所得出的動態定位誤差較小，表示在定位點附近的訊號強度皆有參考價值，甚至量測時就算有受到干擾，也可以利用鄰近的訊號強度來增進定位的準確性。我們將兩條路徑的實際軌跡繪製如下圖 31。

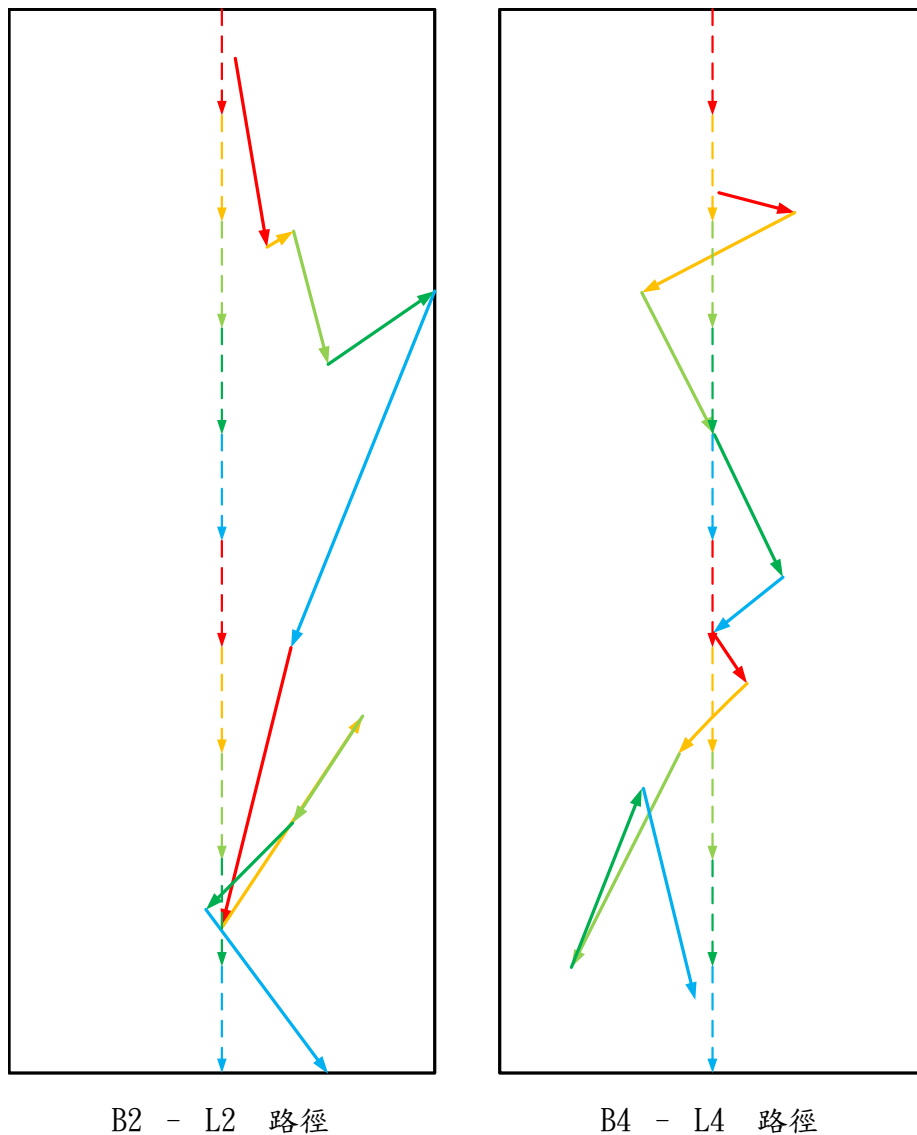


圖 31：動態定位路徑圖

第六章 結論

此篇論文中說明了在室內的環境中，以環境特徵比對法進行定位的方法及流程。在研究中我們在定位的步驟中，檢視各個環節，藉以提出能夠加強定位精確度的方法。在資料庫的建置階段，以轉盤讓定位標籤旋轉的方法，改善了訊號傳送方向性帶來的困擾，同時大幅節省資料庫建置所花的時間成本。在感測節點的擺設方面，我們利用變更感測節點的擺設以及增加感測節點的數量共兩種方法，改善鏡射的情形及提升了定位的精確度，改善幅度為定位誤差由 120cm 降到了 82cm。在定位演算法中，我們利用動態變更感測節點的權重，以及修改最近鄰居法的計算公式方式，將定位誤差改善平均誤差達 6%，最佳狀況改善達 30%。本篇論文主要是針對室內方面的研究，希望將來有機會能將此研究應用在大範圍的區域上，使這篇論文能夠更加完備。

參考文獻

- [1] A. Cerpa, J. Elson, M. Hamilton, and J. Zhao, “Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology,” *Workshop on Data communication in Latin America and the Caribbean*, 2001.
- [2] L. Yu, N. Wang, and X. Meng, “Real-time Forest Fire Detection with Wireless Sensor Networks,” *Wireless Communications Networking and Mobile Computing*, vol. 2, 2005, pp. 1214-1217.
- [3] 周駿呈, “行動定位服務應用發展趨勢分析,” *工研院 IEK 產業分析報告*, 2007.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless Sensor Networks: A Survey,” *Computer Networks* 38, 2002, pp. 393-422.
- [5] A. Milenkovic, C. Otto, and E. Jovanov, “Wireless Sensor Networks for Personal Health Monitoring: Issues and an Implementation,” *Computer Communications*, vol. 29, no. 13, Aug. 2006, pp. 2521-2533.
- [6] 林彥銘, “互動式多媒體展示研究以國立自然科學博物館為例,” 國立雲林科技大學視覺傳達設計系碩士論文, 2004.
- [7] P. Enge, P. Misra, “Special Issue on GPS: The Global Positioning System,” *Proceeding of the IEEE*, vol. 87, no. 1, Jan. 1999, pp. 3-15.
- [8] 曾煜棋, 潘孟鉉, 林致宇, “無線區域及個人網路-隨意及感測器網路之技術與應用,” 易習出版社, 2010.
- [9] 鄭立, “ZigBee 開發手冊,” 全華圖書股份有限公司, 2008.
- [10] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, “Wireless Sensor Networks: A Survey on the State of the Art and the 802.15.4

- and ZigBee Standards,” *Computer Communications*, vol. 30, no. 7, May. 2007, pp. 1655-1695.
- [11] S. Safaric, K. Malaric, “ZigBee Wireless Standard,” *International Symposium*, June. 2006, pp. 259-262.
- [12] P. Kinney, “ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works,” *Communications Design*, Oct. 2003.
- [13] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, “Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks,” *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2003.
- [14] R. Roberts, “IEEE 802.15 Wireless Personal Area Networks: Ranging Subcommittee Final Report,” *Harris Corporation*, 2004.
- [15] M. Heidari, “Identification and Modeling of the Dynamic Behavior of the Direct Path Component in TOA-based Indoor Localization Systems,” *Electrical & Computer Engineering, Worcester Polytechnic Institute*, May. 2008.
- [16] S. Venkatraman, J. Caffery, and H. R. You, “A Novel TOA Location Algorithm Using Los Range Estimation for NLos Environments,” *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 5, 2004, pp. 1515-1524.
- [17] T. Y. Chen, C. C. chiu, and T. C. Tu, “Mixing and Combining with AOA and TOA for the Enhanced Accuracy of Mobile Location,” *Personal Mobile Communications*, 2003, pp. 276-280.
- [18] L. Cong, W. Zhuang, “Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 3, July. 2002, pp. 439-447.
- [19] M. Bocquet, C. Loyez, and A. B. Delaï, “Using Enhanced-TDOA Measurement for Indoor Positioning,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, Oct. 2005, pp. 612-614.
- [20] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses, and N. S. Correal, “Locating the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor

- Networks,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, 2005, pp. 54-69.
- [21] R. Peng, M. L. Sichitiu, “Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks,” *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2006, pp. 374-382.
- [22] D. Niculescu, B. Nath, “Ad Hoc Positioning System Using AOA,” *Computer and Communications*, vol. 3, 2003, pp. 1734-1743.
- [23] 江振瑞, 徐翊嘉, “無線感測網路旋轉指向天線定位法,” 國立中央大學資訊工程學系碩士論文, 2010.
- [24] M. Lihan, H. Sawano, T. Tsuchiya, and K. Koyanagi, “Comparison of Orientation-aware RSS-based Localization Algorithms,” *Mobility Conference*, no. 100, 2008.
- [25] C. Papamanthou, F. P. Preparata, and R. Tamassia, “Algorithms for Location Estimation Based on RSSI Sampling,” *Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, July. 2008, pp. 72-86.
- [26] H. Hashemi, “The Indoor Radio Propagation Channel,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 7, July. 1993, pp. 943-968.
- [27] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, “RADAR: An in-building RF-based User Location and Tracking System,” *IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 2, 2000, pp. 775-784.
- [28] M. Lihan, T. Tsuchiya, and K. Koyanagi, “Orientation-Aware Indoor Localization Path Loss Prediction Model for Wireless Sensor Networks,” *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, pp. 169-178.
- [29] K. Beyer, J. Goldstein, R. Ramakrishnan, and U. Shaft, “When Is Nearest Neighbor Meaningful?” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 154, 1999, pp.217-235.
- [30] T. Seidl, H. P. Kriegel, and H. Corporation, “Optimal Multi-Step k-Nearest Neighbor Search,” *ACM SIGMOD*, 1998.