

無線感測網路之階層式定位策略

施再繁
朝陽科技大學資工所
助理教授
tfshih@cyut.edu.tw

張巍騰
朝陽科技大學資工所
研究生
s9567607@cut.edu.tw

摘要

無線感測網路位置感知是一項重要的議題。目前在位置感知的研究中，以 GPS 及無線定位系統是最常被提到的方法，我們將提出一個不需使用 GPS、天線等額外硬體設備的定位策略，使感測網路的定位更為經濟，我們的定位策略包含兩大特性：其一、對兩節點間的測距進行簡單的修正得到更精確的測量值。另一項是利用中繼節點轉傳功能以完成階層式感測節點定位策略，以減少多基地台帶來成本負擔。階層式定位常因誤差的累加造成誤差快速提昇，經由模擬實驗數據證明我們的方法可以有效抑制誤差快速增大的效應。

關鍵詞：無線感測網路、全球定位系統、無線隨意網路。

Abstract

Wireless sensor network (WSN) location-aware is an important topic. To date, in the location positioning system research, Global Positioning System (GPS) and wireless positioning are the methods mentioned the most. We are putting forward a hierarchical localization strategy. This strategy will explore a method which does not require additional hardware equipments such as GPS and Sector Antenna but makes the sensor network nodes localization more economical. Our strategy includes two aspects: first, getting a relatively good measurement error value from the survey distance between two nodes by way of simple statistics and then correcting the survey distance to get a more accurate node location; second, using relaying nodes to fulfill hierarchical positioning strategy. The advantage of this method is that it can reduce cost spent in the considerable extra hardware in sensor network. Through simulation experiment, the evidence confirmed the proposed method can effectively improve localization accuracy and enhance the

localization rate of estimated nodes.

Keywords: wireless sensor network, GPS, wireless Ad hoc network.

1. 前言

無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)是一個結合無線隨意網路(Wireless Ad Hoc network)與眾多感測器所組成的新興網路技術，每個感測器節點(sensor node)不但具有偵測周圍環境的功能外，還具備了體積小、低成本及無線通訊的特性。因此，促使感測網路逐漸實現於日常生活以及運用於自動化生產過程中以節省人力及降低生產成本。感測網路多元化的應用在引起了廣泛性的研究與討論，例如：位置感知(Location-Aware)、部署和覆蓋範圍…等。其中位置感知是一項值得研究的課題，在感測網路中位置資訊對節點的部署、覆蓋範圍、路由(routing)、位置服務(location service)、目標追蹤等 [7], [18]都有很大的幫助。

目前在位置定位的研究領域中，以全球定位系統(Global Positioning System, GPS) [3], [6], [14]與無線定位系統是最常被提到的方法。其中以 GPS 是最精確的一項技術，但是 GPS 仍有幾項缺點：第一，接收端必須加裝 GPS 晶片，所以會消耗感測器額外的電力以及增加產生成本的負擔。第二，GPS 必須同時接收到四個衛星訊號才能發揮定位功能，如果受到遮蔽物及建築物的影響而接收不到衛星訊號，GPS 就失去功能造成成本的浪費。因此，在無法使用 GPS 時就必須依靠無線定位的方法來完成節點的定位任務。無線定位的方法大致分成 Range-based 和 Range-free 兩大類[8]。Range-based 的方法是測量節點與節點之間的距離或角度資訊來估算未知節點的相對位置，此類方法需要增加一些額外的硬體設備及多次測量才能獲得較準確的距離或角度資訊。Range-free 的方法，並不需要增加額外的

硬體設備，只利用簡單粗糙的計算方法來估算節點的位置。在這兩類的定位方法中以 Range-based 有較高的準確率，也是本篇論文所要探討及運用的技術。

由於無線感測網路先天的條件限制(例如：運算能力低、能源有限、傳輸半徑短...等)。因此，感測器的傳輸距離都在百米之內，如果要完成位置的計算就必須架設多基地台來幫助定位，如此將造成建構成本的增加。為了節省感測網路定位成本而又可得到較準確的測量距離及完成定位率，在本篇論文中，我們將提出一個階層式的定位方法，以期達到經濟的定位策略。

本論文架構如下：第二節討論相關研究；第三節說明階層式定位的方法，並且討論測量誤差及修正測量誤差；第四節為實驗結果；第五節為結論。

2. 相關研究

近幾年來有許多測距技術運用於無線定位的研究，目前已被提出運用在無線感測網路的定位上，包括訊號強弱 (Received Signal Strength, RSS) [9], [13]、到達角度測量法 (Angle Of Arrival, AOA) [5], [15], [16]、到達時間測量法 (Time-of-Arrival, TOA)、抵達時間差 (Time Difference Of Arrival, TDOA) [2], [4], [7], [10] 等方法。

RSS 技術是利用數學模型隨著節點距離的遠近來模組化訊號衰減程度，在依據訊號的變化程度來推算節點到基地台之間的距離進而求解未知節點的相對位置。AOA 技術是利用方向性天線 (Sector Antenna) 或陣列天線 (Antenna Array) 等硬體設備來幫助判斷基地台與節點間接收訊號的方向角，由兩個以上的基地台所形成的方向線 (Line-of-Bearing) 交點處便是未知節點的位置。然而，這兩種方法容易受到外在因素的干擾，造成在測量距離時產生相當大的誤差。因此，必須在視線傳播效應 (Line-of-sight, LOS) 存在時，才會有精確的測量結果。TOA 技術是量測電磁波由一個節點到另一節點的傳播時間，並將此測量到的傳播時間轉換成兩節點間的距離，以基地台為圓心，此距離為半徑，則可以得到一個圓而待估節點會在此圓周上。採用 TOA 測量法必須測量多個基地台與節點之間的距離以形成一組聯立方程組，方程式的解就是待估節點的位置。然而，此方法對時間的敏感度相當高，必須量測

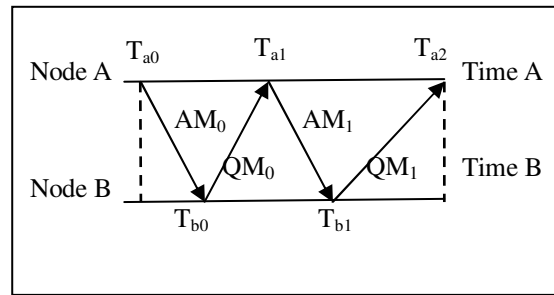


圖 1 TOA 測距方法

到十分精準的傳播時間，才能有較佳的定位結果。

TOA 量測兩節點間傳播時間的方式如下：如圖 1 所示，假設有兩節點分別為發送端(Node A)與接收端(Node B)。Node A 發出一個詢問訊息給 Node B，並且記錄發送時間，當 Node B 收到 Node A 所發出的訊息便記錄收到訊息的時間，並回送一個回覆訊息，當 Node A 收到 node B 的回覆訊息後，會重複上述過程一次，則可以從下列式子得出電磁波由 Node A 到 Node B 的傳播時間(A_t)。

$$A_t = \frac{1}{2} ((T_{a2} - T_{a0}) - (T_{b1} - T_{b0}))$$

當詢問端有了電磁波傳播時間後，將所量測的傳播時間乘上電磁波傳遞速率(C)就可得到 Node A 和 Node B 之間的距離($\tilde{d}_{AB}$)。式子如下：

$$\tilde{d}_{AB} = A_t * C \quad (1)$$

TDOA 測量法是以 TOA 為基準，利用時間基準點去量測其他兩個基地台的相對到達時間做為測距的參數。採用 TDOA 方法最少須有三個已知座標節點做為參考依據。從幾何的觀念來看 TDOA，可以利用方程式中兩項相減為定值的特性，兩方程式組合看作是兩組雙曲線，利用雙曲線的交會點即可判斷出節點的位置，TDOA 演算法如下：

$$\begin{cases} \Delta \tilde{D}_{toAC} = (T_1 - T_3) \times C = \tilde{d}_{DA} - \tilde{d}_{DC} \\ \Delta \tilde{D}_{toAB} = (T_1 - T_2) \times C = \tilde{d}_{DA} - \tilde{d}_{DB} \end{cases} \quad (2)$$

$\Delta \tilde{D}_{toAC}$ 為 DA 距離與 DC 距離的差， $\Delta \tilde{D}_{toAB}$ 為

DA 距離與 DB 距離的差。假設在待估節點 D 附近有三個已知座標節點分別為 $A(x_a, y_a)$ 、 $B(x_b, y_b)$ 、 $C(x_c, y_c)$ 三點，利用歐基里得距離公式來求解最佳值。式子如下：

$$\begin{cases} (x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 = (\tilde{d}_{DA})^2 \\ (x-x_b)^2 + (y-y_b)^2 = (\tilde{d}_{DB})^2 \\ (x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 = (\tilde{d}_{DC})^2 \end{cases} \quad (3)$$

將上述式子(3)代入式子(2)中即可求解出未知節點的相對座標。

在上述的所有方法中，以 TOA 及 TDOA 不需要增加太多額外的設備，符合了感測網路低成本的條件。

3. 階層式定位策略

我們以TDOA測量法為基礎，提出階層式感測網路節點定位策略。我們將利用簡單的統計學概念進行分析計算及修正測距誤差，降低感測器能量的消耗及提高定位的準確率。如圖2所示，我們將感測網路所有的節點區分為三類：第一類是定位起始節點稱為信標點(Beacon Point)；第二類是完成定位的節點稱為中繼節點(Relay Node)；第三類是等待定位的估算節點(Compute Node)。感測網路定位系統運作設定初期，我們在感測網路中以基地台或Sink以及人工擺放的二個已知位置感測節點作為定位起始的三個信標節點，標記為Level-0。在網路中可接收到所有信標點訊息的節點最先進行定位，此節點直接與所有信標點相互通訊，以TDOA方式測量封包傳播時間。並將所得到的估測結果代入式子(1)、(2)中求解估算點的相對位置，當估算節點完成定位任務後，則估算節點的身份將轉換成中繼節點，所屬層級標記為Level-1，中繼節點保留位置資訊並以廣播方式轉送給中繼節點通訊半徑內而未完成定位的所有節點，層級為Level-2。當Level-2中的節點由Level-1得到位置資訊後會採相同方式進行定位任務，依此類推，整個感測網路定位任務直到全部有效節點都得到相對位置為止。而無法與其它節點通訊的節點我們稱為無效節點，無需進行定位。

當節點佈署於真實環境時，會因各種干擾因素，造成訊號傳遞的延遲，造成距離測量的不準確，產生嚴重的誤差，因此所測量到訊號

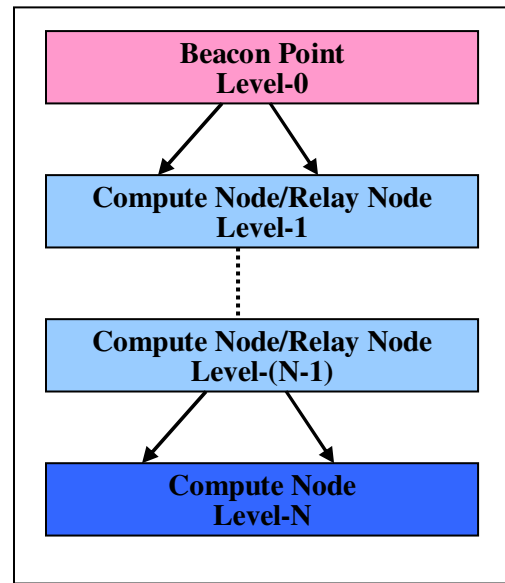


圖 2 在無線感測網路中以階層式定位架構

傳遞時間的可信度極為重要。在兩節點間封包的傳播時間測量上，造成時間延遲的主要誤差來源有非視線傳遞(Non-line of Sight, NLOS)與多重路徑延遲(Multi-path delay)兩種誤差 [1], [11], [12], [17]。

3.1 測距誤差修正

上述兩種干擾情形在測量距離時將產生不良的測距結果，進而影響到節點定位的準確率，因此，為了避免所測量到的距離含有過大的誤差而造成準確性降低的情況，我們必須在定位運算前先進行減低及改善測量距離時可能產生的距離誤差。其中造成多重路徑延遲的主要原因是無線網路採廣播方式進行通訊，所以，封包可能經過多條路徑的轉傳才到達詢問端或回應端，為了克服此種情況所造成的時間延遲，我們在封包中加入一個 hop_count 參數，此參數用來記錄封包被轉傳的次數，有了此參數詢問端或回應端只對參數值為 1 的封包進行動作。NLOS 所帶來的時間延遲是測距中最難克服的，到目前為止沒有較有效的解決之道可以完全消除此誤差。NLOS 主要是因為電波受到障礙物而產生反射、繞射效應而造成訊號延遲到達，這樣的結果會讓封包的傳送時間延長，而影響到距離測量的準確度。為了改善傳播時間延遲所造成的定位誤差，我們重新定

義測量距離公式如下：

$$R = d + e \quad (4)$$

R 為兩節點間的測量距離， d 為真實距離， e 為測量誤差變數。我們利用多次測量的方式及標準差觀念來得到測量時較合理的誤差值。

假設，我們在兩節點間測量 k 次距離，將 k 次量測所得到的距離，以一維向量表示成 $L = [R_1, R_2, \dots, R_k]_{1 \times n}$ ，我們將藉此進一步分析在測量距離中可能含有的誤差值，進而從測量距離中減去誤差。我們測量誤差值的方法如下：

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k R_i = \frac{1}{k} \times \left(\sum_{i=1}^k d + \sum_{i=1}^k e_i \right) \quad (5)$$

上式可轉換成：

$$\bar{R} = d + \bar{e} \quad (6)$$

利用式子(6)計算測量距離的標準差：

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k \|R_i - \bar{R}\|^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k \|e_i - \bar{e}\|^2} \end{aligned} \quad (7)$$

我們可以從式子(7)得到一個純量的誤差值。由於在有限條件下的測量，我們無法百分之百得到真正的誤差值，所以我們將 σ 定義為 NLOS 傳遞時較佳的測量誤差值。定義式子如下：

$$\begin{cases} NLOS, & \sigma \neq 0, e = \sigma \\ LOS, & \sigma = 0, e = 0 \end{cases} \quad (8)$$

因為所測量到的距離比真實距離大，我們期望可以得到一個逼近於真實距離的測量距離值，因此，我們在多次測量中選擇最小的測量距離值減去較佳的測量誤差值，修正式子如下：

$$d' = R_{\min} - \sigma \quad (9)$$

式子(9)中的 d' 則為兩節點間修正後的新測量距離，估算節點記錄儲存此修正後的測量距離。假設有一組節點分別為估算節點 (x, y) 及三

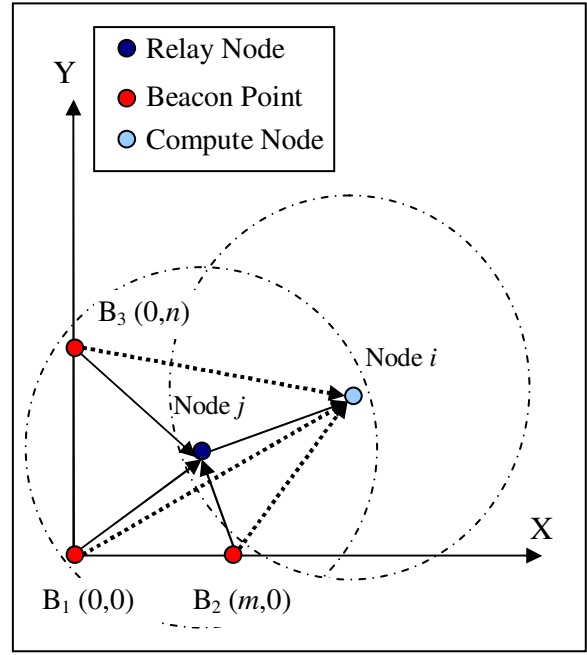


圖 3 其它階層距離估算

個已知位置資訊的信標點為 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ，估算節點到信標點新修正後的測量距離分別為 d'_1 、 d'_2 、 d'_3 ，重新定義式子如下：

$$\begin{cases} ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2) - ((x-x_2)^2 + (y-y_2)^2) = (d'_1)^2 - (d'_2)^2 \\ ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2) - ((x-x_3)^2 + (y-y_3)^2) = (d'_1)^2 - (d'_3)^2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令 } \Delta L_{12} = (d'_1)^2 - (d'_2)^2, \Delta L_{13} = (d'_1)^2 - (d'_3)^2$$

將式子(10)展開移項後得到：

$$\begin{cases} (x_2 - x_1)x + (y_2 - y_1)y = \frac{1}{2}((\Delta L_{12} + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)) \\ (x_3 - x_1)x + (y_3 - y_1)y = \frac{1}{2}(\Delta L_{13} + x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2) \end{cases} \quad (11)$$

解聯立方程式的方法有很多，在本論文中我們將以矩陣方程式 $Ax=b$ 求解，若令：

$$A = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$x = [x \ y]^T \quad (13)$$

$$b = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \times (\Delta L_{12} + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2) \\ \frac{1}{2} \times (\Delta L_{13} + x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式子(12)、式子(13)、式子(14)可求出估算節點的相對座標值(x, y)。

3.2 其它階層的位置計算

在第 3 單元中提到，第一階的節點利用三個信標點的位置資訊以完成定位，當定位完成節點的身份即由估算節點轉變成中繼節點。其餘的未定位節點(包括在信標點通訊範圍內，但無法同時收到三個信標點的節點)必須依賴中繼節點的幫助以完成定位任務。以圖 3 為例：假設有三個信標點分別為 B₁、B₂、B₃，此三點佈建於二維平面座標上，其中，B₂位於 X 軸上的任意位置以 m 表示，B₃位於 Y 軸上的任意位置以 n 表示，而 B₁為中心位置(0,0)。第一階中已完成定位的中繼節點 j 及其它階層未定位的估算節點 i，節點 i 不在任一個信標點的通訊範圍內，當節點 i 要完成定位任務時必須透過有效通訊範圍內的中繼節點 j 幫助，節點 i 所屬的階層數為節點 j 的階層數加 1。節點 i 由節點 j 取得信標點的相對座標位置以及所須資訊來完成估算距離。我們以向量方式推算節點 i 到三個信標點間的估測距離。由式子(9)我們可以得到三信標點到中繼節點 j 的修正後測量距離，也可以推算出估算節點到中繼節點的修正後測量距離，我們假設估算節點 i 已經收到中繼節點所傳送來的信標點位置及中繼點到三個信標點的修正後測量距離。以 B₁為基準，我們以向量方式推估 B₁到估算節點 i 的向量 $\overrightarrow{B_1 i}$ 如下：

$$\overrightarrow{B_1 i} = \overrightarrow{B_1 j} + \overrightarrow{j i} \quad (15)$$

我們由式子(15)為基準，及利用信標點的位置資訊可得到 B₁到 B₂的向量長度，以及 B₁到 B₃的向量長度。同樣的，我們可以推算 B₂到估算點 i 的向量 $\overrightarrow{B_2 i}$ ，以及 B₃到估算節點 i 的

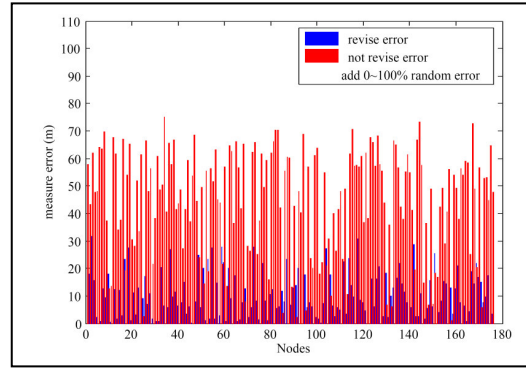


圖 4 修正測距誤差與未修正測距誤差結果比較(一)

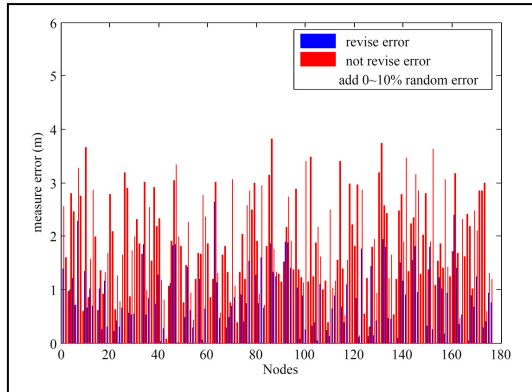


圖 5 修正測距誤差與未修正測距誤差結果比較(二)

向量 $\overrightarrow{B_3 i}$ 。式子如下：

$$\begin{cases} \overrightarrow{B_2 i} = \overrightarrow{B_1 i} - \overrightarrow{B_1 B_2} \\ \overrightarrow{B_3 i} = \overrightarrow{B_1 i} - \overrightarrow{B_1 B_3} \end{cases} \quad (16)$$

估算節點 i 可從式子(15)、式子(16)得到所對應於各信標點的向量長度，並作為節點 i 到各信標點的修正後測量距離，代入式子(10)以求得估算節點 i 的相對位置。其餘估算節點同樣依上述方式進行定位任務。

4. 模擬實驗與結果

本節將針對所提出的測距誤差修正及階層式定位方法進行模擬，由於到目前為止 TDOA

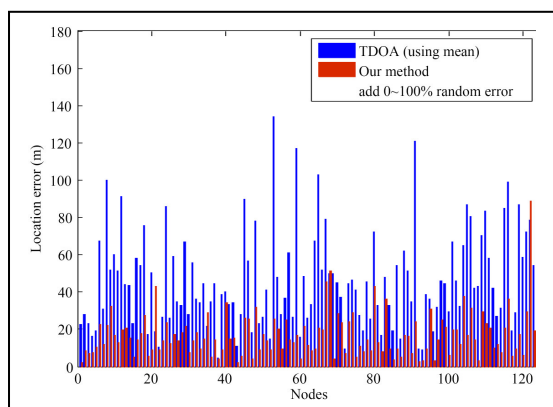


圖 6 加入 0~100 % 隨機誤差值完成定位後的距離誤差比較

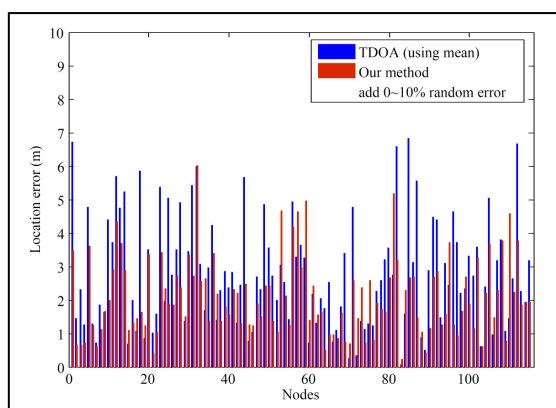


圖 7 加入 0~10 % 隨機誤差值完成定位後的距離誤差比較

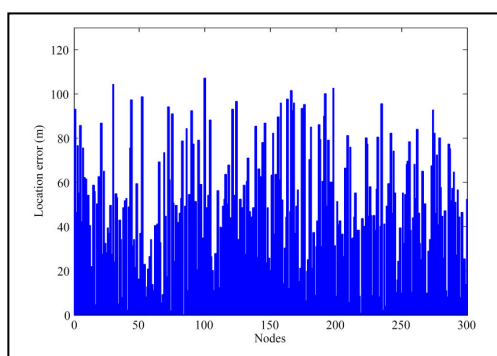


圖 8 以階層式定位完成 300 個節點的位置估算結果

演算法僅使用在多基地台與節點間的定位演算，因此，我們所提出的方法與 TDOA 演算法

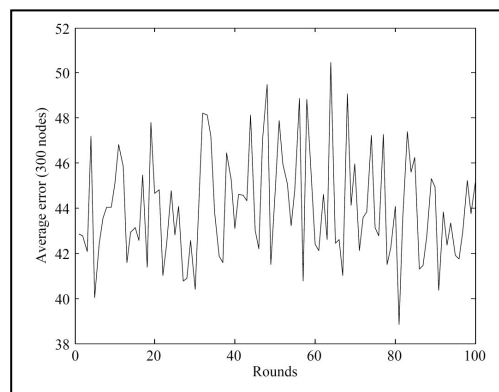


圖 9 共 300 個節點模擬實驗 100 回合，每回合的總平均誤差結果

只在第一階層中進行相互的比較。

4.1 模擬環境假設

我們以MATLAB開發模擬軟體。模擬環境的各種系統參數如下：網路大小為 150×150 平方公尺(m^2)，信標點的相對位置分別為(50,0)、(0,0)、(0,50)，兩節點間的有效通訊距離為90公尺，感測器節點為300個隨機分散式佈建於網路中，所有節點的距離並不相等，每回測距採樣次數設定為10次。在實驗中以兩種干擾大小不同的參數進行比較，一種為干擾較大的環境，將兩節點間的實際距離分別加入 0 與 1 之間的隨機亂數為誤差值，另一種是干擾情況較小的環境，分別加入 0 與 0.1 之間的隨機亂數為誤差值。

4.2 模擬結果

首先，進行測距誤差修正效果的模擬實驗，實驗結果如圖4及圖5所示，紅色實線部份為測量距離誤差，藍色實線部份是以我們所提出的方法將測量距離進行誤差修正後的結果。從圖中可以看出我們所提出的方法經過修正後，誤差有明顯的改善，尤其在干擾較大的環境中。

接著，將我們的方法與TDOA進行定位效能的比較，從圖6可看出在干擾大的環境下我們的方法仍有較佳的結果，共有118個節點完成定位，我們所提的方法定位誤差平均值為15.199公尺而TDOA為40.5104公尺。圖7為以干擾較小的環境進行實驗的結果，我們的方法

與TDOA的效能差不多，但是仍然可以看出我們的方法在定位誤差比TDOA有較佳的結果。我們進一步縮小通訊門檻值為60公尺，以干擾較大的環境進行階層式定位，其結果顯示在圖8中，實驗結果最大誤差在100公尺左右，全部節點的總平均誤差為45.9054公尺。我們更進一步模擬實驗100回合，並且統計300個節點的平均定位誤差，結果如圖9所示，這100回合所模擬的誤差平均為44.0261公尺。其中最大誤差的平均值為121.0738公尺，最小誤差的平均值為1.20962公尺，從圖8和圖9可以証明我們所提出的方法在經過多階層定位所產生的誤差並沒隨階層數的增加而有誤差快速放大現象，定位誤差很平均的保持在一定的範圍中。圖10及圖11分別為單一回合第一階及最後一階完成定位的節點數以及與真實位置比較的誤差距離。在第4階中的任一節點並沒有產生巨大的誤差。

5. 結論

在感測網路中提供位置感知服務，感測網路必須完成節點的定位策略。目前的無線定位技術應用在感測網路上將造成製造成本的提高，而全球定位系統必須在有衛星訊號下才可發揮功效，因此，為了使感測網路定位策略能夠滿足低成本的經濟效益，我們提出一個層階式的定位方法，以最少的基地台及利用網路節點的轉傳功能完成最佳化的階層定位，並以模擬實驗驗證我們所提出的兩項方法：(1) NLOS測距誤差修正 (2) 階層式定位演算法。我們的方法可達到用最少的硬體設備來完成較高的節點定位率及降低定位的建構成本，還可降低因階層定位造成各種因素的誤差累計。由實驗數據顯示經過階層式定位其誤差結果仍然維持在一個可接受的範圍內，沒有快速的產生誤差擴大效應。

致謝

感謝行政院國家科學委員會支持本研究，本研究為國科會計畫(NSC96-2218-E-324-003-)之延伸成果。

參考文獻

- [1] Andreas Savvides, Wendy L. Garber, Randolph L. Moses, Mani B. Srivastava,
- [2] Benesty J., Yiteng Huang, Jingdong Chen, "Time Delay Estimation via Minimum Entropy," *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 14, No. 3, pp. 157-160, March 2007.
- [3] B. H. Wellenhoff, H. Lichtenegger and J. Collins, "Global Positioning System: Theory and Practice," *Springer Verlag*, Fourth Edition, 1997.
- [4] Bocquet M., Loyez C., Benlarbi-Delai A., "Using Enhanced-TDOA Measurement for Indoor Positioning," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 15, No. 10, pp. 612-614, October 2005.
- [5] C. Savarese, J. M. Rabaey, and J. Beutel, "Locating in Distributed Ad-hoc Wire-

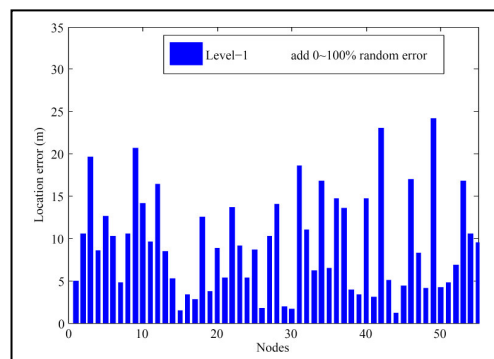


圖 10 單一回合中，第一階完成定位節點的距離誤差

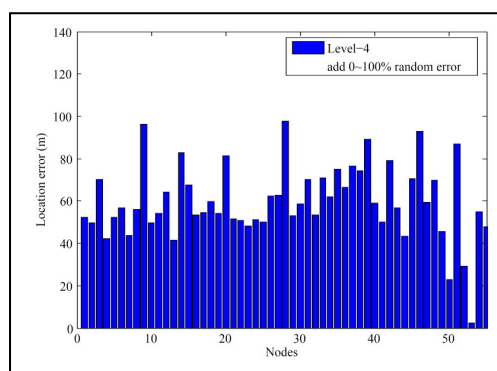


圖 11 單一回合中，第四階完成定位節點的距離誤差

An Analysis of Error Inducing Parameters in Multihop Sensor Node Localization," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 4, No. 6, pp. 567-557, November / December 2005.

- less Sensor Networks,” in *Proc. ICASSP*, Vol. 4, pp. 2037-2040, May 2001.
- [6] J. Hightower and G. Borriello, “Location Systems for Ubiquitous Computing,” *IEEE Computer*, vol. 34, pp. 57-66, August 2001.
- [7] Kenneth D. Frampton, “Acoustic Self Localization in a Distributed Sensor Network,” *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 6, No. 1, February 2006.
- [8] K.-F. Ssu, C.-H. Ou, and H. Jiau, “Localization with Mobile Anchor Points in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 54, pp. 1186-1197, May 2005.
- [9] Kohvakka, M., Suhonen, J., Hannikainen, M., Hamalainen, T.D., “Transmission Power Based Path Loss Metering for Wireless Sensor Networks,” *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium*, September 2006.
- [10] Kuen-Tsiar Lay and Wei-Kai Chao, “Mobile Positioning Based on TOA/TDOA/TDOA Measurements with NLOS Error Reduction,” *International Symposium on IS-PACS 2005*, pp. 545-548, December 2005.
- [11] L. Cong and W. Zhuang, “Non line of Sight Error Mitigation in Mobile Location,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, pp. 560-573, March 2005.
- [12] L. Cong and W. Zhuang, “Non line of Sight Error Mitigation in TDOA Mobile Location,” in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 1, pp. 680-684, November 2001.
- [13] N. Patwari, A. O. Hero, M. Perkins, N. S. Correal, and R. J. O’Dea, “Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 51, No. 8, pp. 2137-2148, August 2003.
- [14] Rappaport, T.S., Reed, J.H., and Woerner, B.D., “Position location using wireless communications on highways of the future,” *IEEE Comm.*, Vol. 34, pp. 33-41, October 1996.
- [15] S. Capkun, M. Hamdi, and J. P. Hubaux, “GPS-free Positioning in Mobile Ad-hoc Networks,” *presented at the 34th IEEE Hawaii Int. Conf. Systems Science*, Jan 2001.
- [16] Sinan Gezici, Zhi Tian, Georgios B. Giannakis, Hisashi Kobayashi, Andreas F. Molisch, H. Vincent Poor, and Zafer Sahinoglu, “Localization via Ultra-Wideband Radios [A Look at Positioning Aspects of Future Sensor Networks],” *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, Vol. 22, pp. 70-84, July 2005.
- [17] S.-S. Woo, H. R. You, and L.-S. Koh, “The NLOS Mitigation Technique for Position Location Using IS-95 CDMA Networks,” in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 4, pp. 2556-2560, September 2000.
- [18] T.-F. Shih, “Particle Swarm Optimization for Energy-Efficient Cluster Based Sensor Networks,” *IEICE Transactions Fundamentals*, Vol. E89, No. 7, July 2006.