

無線感測網路中基於六角形式之移動路徑樹

Hexagonal-based Moving Path Tree in Wireless Sensor Networks

段裘慶

C.-C. Tuan

國立台北科技大學

電腦與通訊研究所

cctuan@ntut.edu.tw

趙書榮

S.-J. Chao

國立台北科技大學

電腦與通訊研究所

s4419001@ntut.edu.tw

柯文彬

W.-P. Ke

國立台北科技大學

電腦與通訊研究所

t5418014@ntut.edu.tw

摘要

電能對於無線感測網路是項重要的研究議題，若能適確地預測出待追蹤物件可能移動之方向，再配合節點睡眠機制於正確之時間及地點，喚醒該區域之感測節點，則能節省節點電能，進而延長感測網路的生命週期。以正方形網格為基礎的移動路徑樹用以記錄物件過往移動路徑之方式，其缺點為節點若要與斜對邊之相鄰節點作資料傳遞，傳輸半徑需擴增為 $\sqrt{2}$ 倍，易增加電量消耗。本研究以六角形網格佈署感測節點，以改善正方形網格之節點傳輸電能消耗過多之問題。此外，以六角形佈署尚能減少 20% 節點佈署數，並將記錄物件的移動方向由 8 方向縮減為 6 方向，可更有效預測物件於下一時間之移動方向。

關鍵字：無線感測網路、移動路徑樹、正方形網格、六角形網格

Abstract

Energy is an important research issue in Wireless Sensor Networks (WSN). It could reduce the power consumption by predicting the moving path of mobile object correctly and waking up the sleep sensor nodes (sn) at the right time and the right position. Then the life time of WSN is prolonged. Square-based Moving Path Tree (MPT) was used as recording the profile of an object's moving paths. The disadvantage of MPT is that the communication

power must be enhanced $\sqrt{2}$ times when transmitting data to bevel sn. We deploy sn in hexagonal manner to improve the power consumption of MPT. Moreover, our method could reduce 20% amount of sn to be deployed and predict the object's next moving path more efficiently.

Keywords: Wireless Sensor Network, Moving Path Tree, Square, Hexagonal.

1. 簡介

無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)是由許多小體積、低成本且低電能耗損之裝置，依據特殊目的需要，大量佈署感測節點(sensor node, sn)而成的網路系統，這些 sn 裝置整合了感測器、無線通訊及簡易的微處理機系統。故得以大量地佈署 sn 於待偵測的環境中，例如：森林環境溫度監測、化學污染區域監測、野生動物監測及災難現場搜救行動等，基礎設施不易建置或易於遭到破壞的環境。

WSN 中 sn 具有一般行動節點所需的功能，同時也具有封包轉送的能力。其特點可歸納如下：(1)無中央控制節點：WSN 沒有控制中心，所有 sn 的功能相等，且具有自我組織能力，任何 sn 可以隨時加入或離開網路，且局部 sn 失效時不致影響整個網路的運作。(2)

路由功能：sn 具有路由功能，在佈署後可快速地自動偵測並組成自主的網路，透過多重跳躍路由(Multi-hop Routing)方式傳遞資料，因此在無基礎架構環境中，佈署 WSN 是快速且較容易的。(3)動態拓樸：WSN 中之 sn 可隨時隨地加入與離開，因而使得網路拓樸易於改變，以致於 WSN 網路拓樸不易有效掌握。(4)電能限制：由於 sn 小體積關係，使其不易配置高容量的電力裝備，因而電源需有效利用以延長其生命週期。因此若能縮短 sn 間之傳輸距離，以降低傳遞資料時所需耗費之傳輸電能，以此達到延長整個 WSN 之生命週期，是本研究之重點。

2. 文獻探討

目前有相當多的研究已提出適用於 WSN 的目標追蹤機制，與本研究相關的議題概分為以下二大類：(1)[3, 10, 12]提出以點為主之追蹤方式，'點'的定義是指在目標移動的路線上，單一時間點上目標只會有'點'的存在。(2)以空間面為主的演算法[7] (Mobicast)，對移動中之行動收集點(Sink)追蹤方式提出了兩個區域，一是資料傳遞區(Delivering Zone, DZ)，為現階段($Z(t)$) Sink 之接收資料涵蓋範圍，另一區域是下一時間點($Z(t+1)$)預測 Sink 移入的位置，稱為資料待傳送區(Forwarding Zone, FZ)，在 FZ 中之 sn 必需事先喚醒，一旦 Sink 移入該區域時，待傳之感測資料可事先備妥以縮短傳送至 Sink 所需之時間。[8]改良 Mobicast 協定，提出一更可靠的路由方式以作資料傳遞。同樣以空間面為主的路由法 VE-Mobicast [11]，透過一橢圓方程式以計算 $F_{VE}(i)$ ，在時間為 i 時是一變形卵形狀， $F_{VE}(i+1)$ 會隨著 DZ 在形狀上作動態的修正，以確實掌握下一時間點之 FZ，可提升 FZ 之預測正確率。

針對 WSN 電能管理方面，已有學者提出諸多的策略，來延長 WSN 的存活時間，[5, 6]容許各種睡眠機制應用於 WSN 上，在不影響

WSN 整體運作之情況下，透過 sn 工作模式與睡眠狀態之交替切換，以達到節省電量來延長整體網路壽命之目的。

在網格拓樸探討方面，[13]中探討正方形與六角形的網格架構，一正方形網格僅能與相鄰四個網格內的之節點作資料傳遞，而六角形網格則能與相鄰六個網格內的之節點作資料傳遞。[4]則是將三角形、正方形與六角形網格作比較，發現在同大小的感測區域內，採用六角形網格佈署能以最少的 sn 數覆蓋整個 WSN 區域。[1]利用機器人以相鄰節點距離為 $\sqrt{3} R_s$ 之方式佈署 sn，可以最少的 sn 數目覆蓋最大之感測面積。

後續有更準確的物件偵測方法，其中[9]是以 Mobicast 為基礎，提出一移動路徑樹(Moving Path Tree, MPT)，以紀錄 Sink 的移動路徑(moving path, mp)，作為下一次預測 mp 的參考，即由 MPT 中搜尋出最常行走(頻率最高)的 mp 作為下一時間點欲喚醒之 sn 依據。透過 MPT 記錄 mp 作為預測的參考能大幅提升預測正確率，然而該 MPT 是以正方形座標方式佈署 sn，如圖 1 所示，A 節點與相鄰節點 B 之距離為 $\sqrt{2}$ 倍之感測半徑(R_s)，而 A 節點與 C 節點之距離為 $2R_s$ ，若 A 節點要與斜對邊

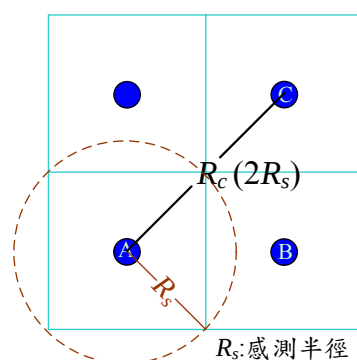


圖 1 正方形佈署 sn 之傳輸半徑

的 C 節點作資料傳遞，因距離增為 $2R_s$ ，故通訊所需之電能亦需增加，此舉會造成 sn 電量消耗上升，造成整體 WSN 生命週期下降。為改善 MPT 傳輸半徑(R_c)增大所造成電能多餘損耗之問題，本研究提出 hexagonal-based MPT

(hMPT)採用六角形網格來佈署 sn，則任一 sn 要作資料傳遞，其 R_c 僅需以 $\sqrt{3} R_s$ 即能與相鄰六個 sn 作資料傳遞，如圖 2 所示。

3. 正方形與六角形網格之比較

本研究採用六角形佈署之原因有如下三點：

1. 相鄰節點傳輸半徑縮小：

hMPT 佈署與 MPT 功能相同之 sn， R_s 相同，可得六角形之 R_c 與 R_s 之關係如圖 2 所示

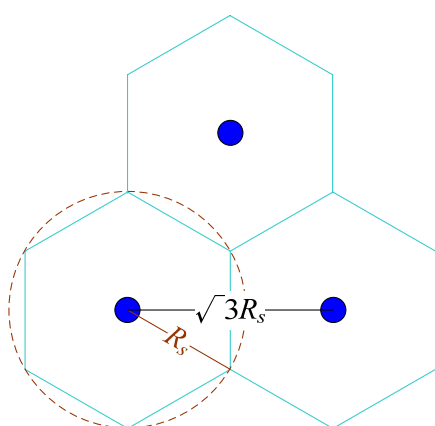


圖 2 六角形佈署 sn 之傳輸半徑

， $R_c = \sqrt{3} R_s$ ，與 MPT 之 $R_c = 2R_s$ 比較，能有效節省傳遞資料時所需之電能消耗，延長整個 WSN 之生命週期。

2. sn 佈署數目：

假設於一感測區域，如圖 3 所示，表正方形佈署之網格，網格邊長為 d ，單位為公尺，感測區域之長、寬分別為 l 與 w ($l, w = nd$, n 為自然數)，六角網格表示在此感測區域佈署排列方式，由於六角網格佈署個數與邊長 l 與 w 非整倍數關係，因此本文設定兩參數 L_y 與 L_x 來計算六角網格之佈署個數， L_y 表垂直軸佈署 sn 的階層數； L_x 表水平軸佈署 sn 之個數， L_y 與 L_x 之計算式如下：

$$L_y = \left\lceil \frac{l - R_s}{1.5R_s} \right\rceil + 1 \quad (1)$$

$$L_x = \left\lceil \frac{w}{\sqrt{3}R_s} \right\rceil \quad (2)$$

此處 $R_s = \frac{d}{\sqrt{2}}$ 。計算出 L_y 與 L_x 後，可由式(3)、

(4)得到六角網格所需佈署個數(N)，在此設一

參數 $M = \frac{w}{\sqrt{3}R_s} - \left\lceil \frac{w}{\sqrt{3}R_s} \right\rceil$ ，當 $M \leq 0.5$ 時，

N 以式(3)計算：

$$N = L_x \times L_y \quad (3)$$

當 $M > 0.5$ 時， N 以式(4)計算：

$$N = L_x \times \left\lfloor \frac{L_y}{2} \right\rfloor + (L_x + 1) \times \left\lceil \frac{L_y}{2} \right\rceil \quad (4)$$

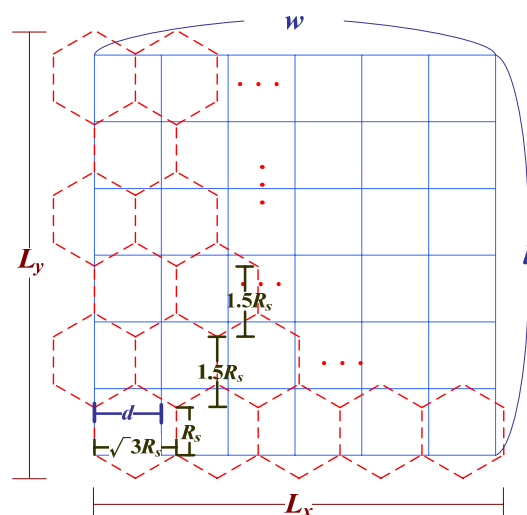


圖 3 六角網格佈署排列方式

M 小於等於 0.5 時， L_y 之奇數與偶數層佈署之節點數相同， N 以式(3)計算，假設計算得一 L_y 與 L_x 分別為 4 與 3，如圖 4 所示，帶入式(3)可得其 sn 之個數 N ：

$$N = 3 \times 4 = 12$$

；當 M 之值大於 0.5 時， L_y 之偶數層需多佈署一節點，因此 N 以式(4)計算，假設計算得一 L_y 與 L_x 分別為 3 與 3，如圖 5 所示，帶入式(4)

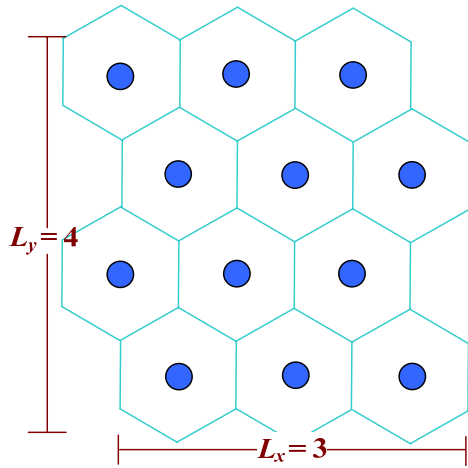


圖 4 $M \leq 0.5$ sn 佈署

可得其 sn 之個數 N ：

$$N = 3 \times \left\lfloor \frac{3}{2} \right\rfloor + (3+1) \times \left\lfloor \frac{3}{2} \right\rfloor = 10$$

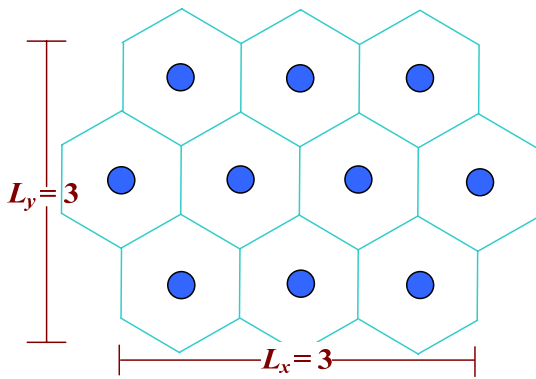


圖 5 $M < 0.5$ sn 佈署

3. sn 感測重疊區域較小：

正方形與六角網格相鄰 sn 之重疊面積如

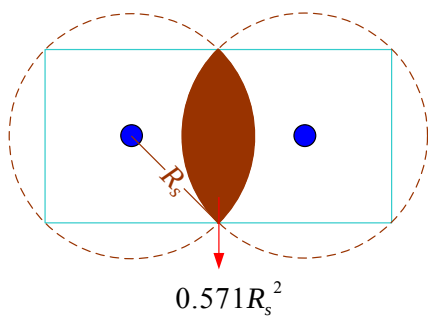


圖 6 正方形網格重疊面積

圖 6、7 所示，正方形網格一塊感測重疊區域約等於 $0.571R_s^2$ ，而六角網格感測重疊區域約等於 $0.181R_s^2$ ，六角網格約比正方形網格減少

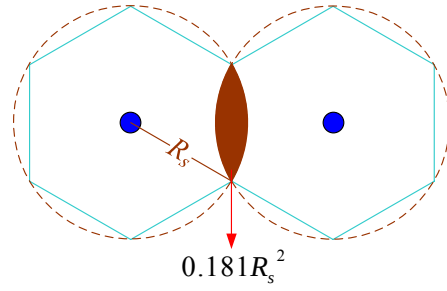


圖 7 六角形網格重疊面積

32%之重疊區域。計算出一塊重疊區域後，更進一步比較相同大小之感測區域正方形與六角形網格之重疊面積關係，由式(5)、(6)計算出感測區域六角網格之重疊區域個數(N_{ol})：

當 $M \leq 0.5$ 時：

$$N_{ol} = 3N - 2(L_x + L_y) + 1 \quad (5)$$

當 $M > 0.5$ 時：

$$N_{ol} = (L_x - 1) + 3L_x \times \left\lfloor \frac{L_y}{2} \right\rfloor + (3L_x - 1) \times \left\lfloor \frac{L_y - 1}{2} \right\rfloor \quad (6)$$

計算出 N_{ol} 再乘以單一塊重疊區域之面積，可得整體網路之重疊區域面積，再除以整體感測網路面積(A_{total})，即可求出佔總網路面積比(R_{ol})：

$$R_{ol} = \frac{A_{ol} \times N_{ol}}{A_{total}} \quad (7)$$

A_{ol} 為一塊重疊區域之大小。正方形與六角形網格之佈署個數與重疊面積關係將於第五節作介紹。

4. 六角形節點佈署之 MPT (Hexagonal-based MPT, hMPT)

本研究沿用 MPT 之基本架構，但修正 sn 佈署由正方形改為六角形座標系統，以下說明 hMPT 之架構：

4.1 六角形節點佈署架構

sn 佈署採用六角形之節點佈署方式，如圖

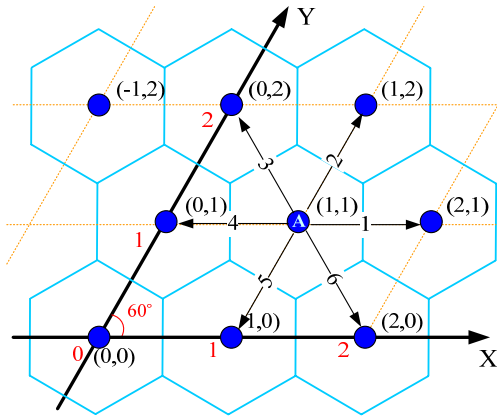


圖 8 3×3 六角形節點佈署架構

8 所示為 3×3 範例，水平方向有 3 個 sn，垂直方向則以斜向交錯 60° 之方式佈署 3 個 sn，相鄰 sn 間的距離為 $\sqrt{3} R_s$ ，sn 間資料的傳遞以 $\sqrt{3} R_s$ 為傳輸半徑即可，不需如正方形佈署分有 $\sqrt{2} R_s$ 與 $2R_s$ 之距離，如以傳遞資料而言，需以 $2R_s$ 為基準，故以六角形佈署能有效節省 sn 之電量消耗。

4.2 六角形節點佈署之方向定義

記錄 Sink 路徑資訊時必須含括其移動方向，六角網格方向定義如圖 8 所示，以節點 A 為中心，具有六個可移動方向，正東方之方向（角度設為 0° ）編號為 1，兩相鄰方向間之夾角為 60° ，依序為編號 2~6，當 Sink 由 A 節點移至相鄰之 sn 時，hMPT 會記錄是由哪一方向移出 A 節點。正方形佈署之方向夾角 45° ，而六角形網格佈署之方向夾角為 60° （如圖 9 所示），故後者增加了 15° ，代表同樣喚醒兩個 sn，六角形網格所涵蓋角度較大，意指可感測到物件之機率也相對提升 33%，使得 hMPT 之預測正確率能優於 MPT。

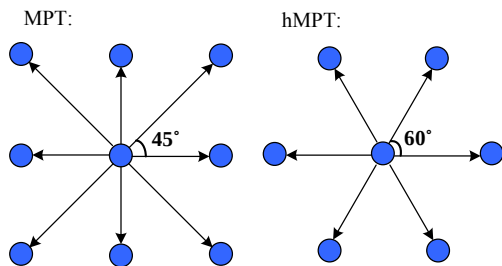


圖 9 MPT 與 hMPT 佈署方向角度差

4.3 六角形節點佈署之座標系統

hMPT 之 sn 佈署所採用之座標系統如圖 8 所示，座標軸 X、Y 夾角為 60° ，每一 sn 之座標表為 (x, y) ， x, y 分別對應於 X、Y 軸之座標值。以 (x, y) 設為 sn 之 ID，作為記錄 mp 時辨識 sn 之用，當 Sink 產生一條新 mp 時，即將 sn 之 ID 以資料鏈結之方式記錄下來，如下圖 10 之 $mp_1: (0, 0) \rightarrow (0, 1) \rightarrow (1, 1) \rightarrow (1, 2)$ 與 $mp_2: (1, 0) \rightarrow (0, 1) \rightarrow (0, 2)$ 分別為 Sink 移經 sn 所記錄下來之 mp，以作為未來預測 Sink 移動路徑之參考。

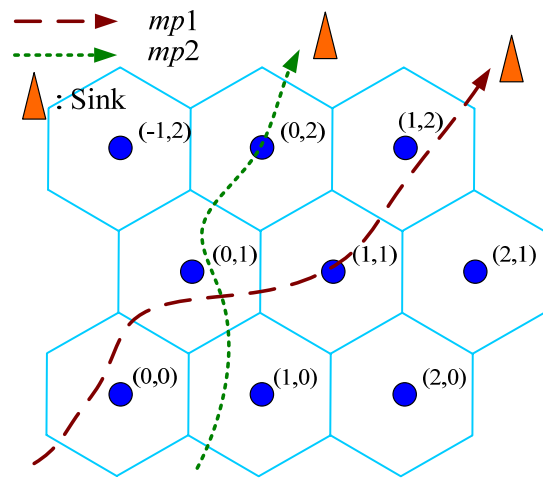


圖 10 Sink mp 之形成

5. 效益分析

以下就 hMPT 之六角形佈署與 MPT 之正方形佈署作效益比較與分析。分述如下四項：

1. 提升網路生命週期：

MPT 之 sn 傳輸半徑須增為 $2R_s$ 始可與斜邊之 sn 作溝通；然而 hMPT 之六角形網格佈署，sn 之傳輸半徑為 $\sqrt{3} R_s$ 即可與相鄰六個 sn 作資料傳遞，如此可有效降低 sn 之電量消耗，提升整體 WSN 之生命週期。於[2]中提出在一平坦無障壁之環境下，無線傳輸所需功率 P 與半徑距離 R_c 之平方成正比，將 MPT 與 hMPT 之 sn 傳輸半徑代入比較可得式(8)之電能消耗比為 4:3，意指 MPT

$$P_{MPT} : P_{hMPT} = (2R_s)^2 : (\sqrt{3}R_s)^2 = 4:3 \quad (8)$$

與 hMPT 之 sn 傳遞資料次數相同情況下，hMPT 之 sn 可比 MPT 之 sn 節省 25% 之電能，如此可大幅提升 WSN 之網路生命週期。

2. 減少 sn 佈署數目：

依據 3.2 節之公式，感測區域相關參數設定如下表 1：

表 1 sn 佈署數參數設定

參數名稱	
d	10 m
參數名稱	
w, l	100, 200, ..., 800 m
R_s	7.071 m

計算出 hMPT 六角形佈署之 sn 數目，與 MPT 正方形佈署之 sn 數目作比較，實驗計算結果如下圖 11，橫坐標為網路邊長(l, m)，縱座標為 hMPT 與 MPT sn 佈署數目，當網路邊長為 500 m 時，hMPT 可比 MPT 降低 20% 之節點數，能有效降低網路佈署之成本。

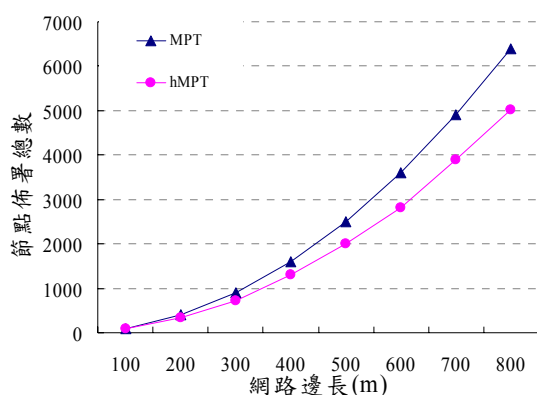


圖 11 sn 佈署數比值

3. 降低 sn 感測區域重疊面積：

MPT 係由記錄物件過往 mp 之方式來預測未來之 mp ，故當物件於網路移動時，僅被單一 sn 偵測到，於記錄其 mp 時，能確保路徑方向之準確性。圖 12 為 hMPT 與 MPT 重疊面積之比較，橫坐標為網路邊長，縱座標為重疊區域與總網路面積($w \times l$)之比值(R_{ol})，MPT 之重疊面積如實心三角曲線所示，約佔總網路面積 55%，亦即物件於網路移動時，有一半以上

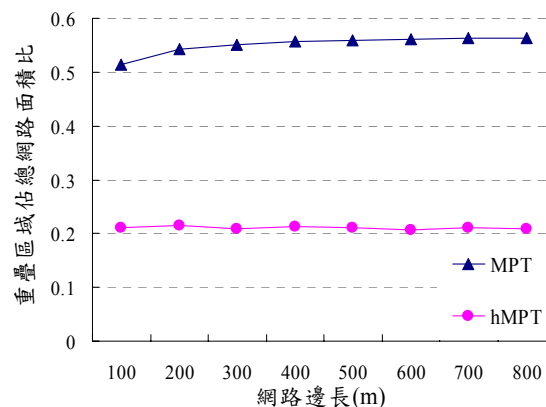


圖 12 MPT 與 hMPT 之重疊面積

之時間同時被兩個 sn 偵測到，易造成路徑資訊不正確；而 hMPT 之重疊面積(實心圓曲線)約佔總網路面積 20%，相較於 MPT 降低 35%，除了降低物件遭同時偵測之機率，也提升路徑資訊之正確性。

4. 提升預測準確率：

hMPT 之 sn 佈署方向角度差 60° 與 MPT 佈署方向角度差 45° 作比較，同樣喚醒兩個 sn，hMPT 所覆蓋之角度較 MPT 大 15° ，代表偵測到移動物件之機率也提升了 33.3%，有益提升預測準確率；此外，也能透過喚醒較少方向之 sn，來預測下一時間點之 mp ，以節省 sn 之電能消耗。

6. 結論與未來工作

透過 hMPT 之六角網格佈署 sn 能有效節省 25% 電能消耗，降低 sn 佈署個數，可減少約 20% 之佈署成本，尚能提升預測準確率，未來將續探討於 hMPT 加入 mp 資訊與 MPT 之預測準確率作比較。此外，於實際感測環境大多為不易佈署非規則性之地形，未來續探討將 hMPT 之建構應用於非規則性之網路拓樸，使其更趨近於實際監測環境之應用。

7. 致謝

本論文研究獲國科會計畫「代理節點解

決無線感測網路之能量洞問題」(計劃編號 NSC-96-2221-E-027-007)與「臺北科技大學96年伯樂計劃」贊助,特此致謝。

參考文獻

- [1] C. Y. Chang, H. R. Chang, C. C. Hsieh, and C. T. Chang, "OFRD: Obstacle-Free Robot Deployment Algorithms for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE Wireless Comm. and Networking Conf. (WCNC)*, pp. 4371-4376, Mar. 2007.
- [2] D. P. Agrawal and Q. A. Zeng, "Introduction to Wireless and Mobile Systems," 2nd Edition, Thomson, 2006.
- [3] K. Mechitov, et al., "Cooperative Tracking with Binary-detection Sensor Networks," in *Proceedings of 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor System (SenSys'03)*, LA, Nov. 2003.
- [4] M. Iqbal, I. Gondal, and L. Dooley, "Coverage Characteristics of Symmetric Topologies for Pervasive Sensor Networks," in *Proceedings of IFIP Int'l Conf. on Wireless and Optical Comm. Networks (WOCN05)*, Session 14.1 Paper 1, Dubai UAE, Mar. 2005.
- [5] M. Zorzi and R. R. Rao, "Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Multihop Performance," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 2, no. 4, pp. 337-348, Oct.-Dec. 2003.
- [6] M. Zorzi and R. R. Rao, "Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Energy and Latency Performance," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 2, no. 4, pp. 349-365, Oct.-Dec. 2003.
- [7] Q. Huang, C. Lu, and G. C. Roman, "Spatiotemporal Multicast in Sensor Networks," in *Proceedings of the ACM Conf. on Embedded Networked Sensor System (SenSys)*, pp. 205-217, Nov. 2003.
- [8] Q. Huang, C. Lu, and G. C. Roman, "Reliable Mobicast via Face Aware Routing," in *Proceedings of the IEEE Int'l Conf. on Computer Comm. (INFOCOM)*, Mar. 2004.
- [9] S. J. Chao, C. C. Tuan, and C. Y. Ding, "Using Tree-based Structure to Predict Mobile Sink's Moving Paths on Wireless Sensor Network," in *Proceedings of the 13th Mobile Computing Workshop 2007 (MC'07)*, Changhua, Taiwan, pp. 491-497, Apr. 20, 2007.
- [10] W. Zhang and Guohong Cao, "DCTC: Dynamic Convoy Tree-Based Collaboration for Target Tracking in Sensor Networks," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 3, no. 5, pp. 1689-1701, Sept. 2004.
- [11] Y. S. Chen and S.Y. Ann, "VE-Mobicast: A Variant-Egg-Based Mobicast Routing Protocol in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 40th IEEE Int'l Conf. on Comm. (ICC 2005)*, May 2005.
- [12] Z. Feng, J. Shin, and J. Reich, "Information-driven Dynamic Sensor Collaboration for Tracking Applications," *IEEE Signal Processing Magazine*, Mar. 2002.
- [13] Z. Wang and J. Zhang, "Energy Efficiency of Two Virtual Infrastructures for MANETs," in *Proceedings of the 2005 IEEE Int'l Workshop on Strategies for Energy Efficiency in Ad Hoc and Sensor Networks (IEEE IWSEEASN'05)*, pp. 547-552, Phoenix, AZ, Apr. 2005.