

# 明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

在行動感測網路中設計具網路連通保證之移動機制  
Design of a Connectivity-Guaranteed Moving Scheme for  
Mobile Sensor Networks

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-97-資管\_03

執行期間： 97 年 3 月 1 日至 97 年 9 月 30 日

計畫主持人：王勝石

共同主持人：

計畫參與人員：楊竣傑

處理方式：公開於校網頁

執行單位：資訊管理系

中 華 民 國 97 年 10 月 22 日

## 中文摘要

從目前眾多的感測網路應用觀點來看，網路覆蓋與網路連通均為相當重要的考量，因此，本計畫著眼於行動感測網路之感測器移動機制的設計以確保網路連通與有效覆蓋，我們設計之感測器移動機制稱為 CGMS，主要目的是使得感測器可自主性地移動到適當的位置以修補網路中的空洞 (Hole)，不但確保與 Sink 的連通，並希望提高網路的有效覆蓋。CGMS 共有兩個階段，分別為「網路初始化階段」與「網路維護階段」。在網路初始化階段中，Mobile Sensors 將會利用封包的擴散使得知鄰居節點的相關資訊，並在之後欲移動的時候根據這些資訊進行移動的決策。網路維護階段則是讓 Mobile Sensors 如何判別移動的時機、如何決定移動方向及如何計算移動之目的位置。從本計畫的模擬中可看出 CGMS 在有效 Sensors 個數及移動次數兩方面均優於目前的多種機制。

關鍵字：行動感測網路、覆蓋、連通、空洞

## 英文摘要

The project is a nine-month project, whose primary goal is to design an efficient moving strategy to guarantee network connectivity in Mobile Sensor Networks (MSNs). Basically, coverage and connectivity are two critical issues that should be taken into account in the design of the mechanisms for a variety of applications in sensor networks. In order to achieve network connectivity as well as effective coverage, this project focuses on the design of a Connectivity-Guaranteed Moving Scheme, termed CGMS. The main idea of CGMS is to enable a mobile sensor to move to a suitable position in an autonomous manner for connectivity guarantee when the connected hole exists in the MSN. CGMS consists of two major phases, network initialization phase and network maintenance phase. The network initialization phase allows all sensors to collect the useful information for movement. The maintenance phase aims to determine when the sensors have to move and where the sensors move to. The simulation results show that the proposed CGMS indeed outperforms the existing approaches in number of effective sensors and movements.

Keywords : Mobile Sensor Network (MSN), Coverage, Connectivity, Hole

## 目 錄

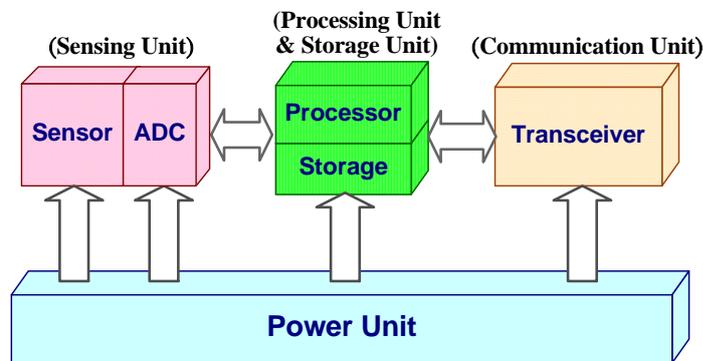
前言 .....	1
研究目的 .....	3
文獻探討 .....	5
研究方法 .....	8
實驗結果 .....	14
結論 .....	16
參考文獻 .....	16

## 圖目錄

圖一. Sensor 的基本組成 .....	1
圖二. MSN 中出現 3 個 Mobile Sensors 的 Partition .....	2
圖三. 本計畫考慮的場景圖 .....	4
圖四. VEC 方法的運作範例示意圖 .....	6
圖五. VOR 方法的運作範例示意圖 .....	6
圖六. Minmax 方法的運作範例示意圖 .....	7
圖七. (a). 所有 Mobile Sensors 均為 Effective Sensors (b). Sensors A、B 與 C 為非 Effective Sensors .....	10
圖八. 網路初始化後，所有 Mobile Sensors 將可得到自己與 Sink 的最短距離 .....	11
圖九. MSN 中已形成一包含 3 個 Mobile Sensors 的 Partition .....	12
圖十. Risk Sensor S 將發起以 Right Hand Rule 為傳送方式的偵測封包 .....	13
圖十一. 感測不平衡之示意圖 .....	13
圖十二. Risk Sensor 的移動示意圖 .....	14
圖十三. Effective Sensor 個數 .....	15
圖十四. 移動次數 .....	15

## 前言

近幾年來，由於微機電系統（Micro-Electro-Mechanical System，MEMS）的進步，一些學術機構與廠商已開發出具有低成本（Low Cost）、低耗電（Low Power）與短距離傳輸（Short Radio Range）等特性的感測器（Sensor）。一般而言，Sensor 的基本組成元件如圖一所示，主要包括感測元件（Sensing Unit）、儲存元件（Storage Unit）、處理元件（Processing Unit）、通訊元件（Communication Unit）。Sensor 的主要運作方式是利用 Sensing Unit 感測環境的屬性（例如：溫度、濕度或加速度）或物體（例如：人、車輛或動物），感測到的資料將儲存在 Storage Unit（即 Memory）中，並由 Processing Unit（即 Processor）進行處理，最後再透過 Communication Unit（即 Transceiver）將資料回傳到匯集點（Sink）。



圖一.Sensor 的基本組成

無線感測網路（Wireless Sensor Network，WSN）可視為由眾多佈建在感測區域（Sensing Field）中的 Sensors 形成的一種網路架構，此架構可廣泛應用在戰場上的軍事偵測、自然保育區的生態監控、自然災害的警報、災區的探測與監視等場景[1][2][3][5]，因此 WSN 一旦形成後，便可進行資料收集[3]、目標物或事件追蹤[4][7][8][9]及環境監控[6][10]等工作。

一個 Sensor 除了基本的感測、運算、傳送與接收能力外，如果還具備移動能力，便可稱為行動感測器（Mobile Sensor），相較於固定式感測器（Static Sensor），Mobile Sensor 除了可以像固定式感測器一樣進行基本的運作外，當網路出現異常現象時便可即時反應，進行移動以便完成網路的自我修復。行動式感測器所形成的網路可稱之為「行動感測網路」（Mobile Sensor Network，MSN）。

一般而言，Sensor 主要負責感測任務，其感測程度將取決於 Sensor 的佈建位置，若 Sensing Field 中任一位置均可被至少一個 Mobile Sensor 所感測，則我們視該 Sensing Field 為完整覆蓋（Full-covered）。基於低成本與低耗電的特性，Mobile Sensor 幾乎都是依賴電池（Power Unit）提供運作上使用的電力，也就是 Mobile Sensor 的感測及傳輸能力均有限。因此，為了節省 Mobile Sensor 的電量消耗，所有 Mobile Sensors 將盡可能以協同合作的方式完成感測及通訊任務。

一般 MSN 的形成是將大量的 Mobile Sensors 以隨機方式佈建在網路中，當 Mobile Sensors 佈建完成後，儘管每個 Mobile Sensor 的感測範圍（Sensing Range）有限，但由

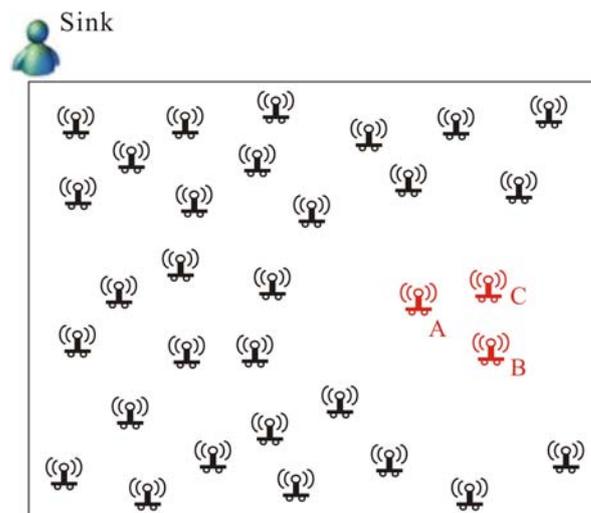
於網路中 Mobile Sensors 的密度甚高，因此要達到網路的完整覆蓋並非難事。但由於 MSN 大多應用在人類不易到達的區域，因此對 Mobile Sensor 進行電池的更換或充電將難以實現。當網路中一些 Mobile Sensor 的佈建不均勻，或是某些 Mobile Sensors 因耗盡電量或發生故障而失去原本具備的感測、通訊或計算能力時，這些無法繼續工作的 Mobile Sensors 不但導致原先的感測任務無法順利進行，更可能造成資料無法回傳到 Sink。

若考量網路覆蓋 (Network Coverage) 與網路連通 (Network Connectivity) 兩個方面，則 MSN 的運作過程中可能產生下列問題：

**Network Uncoverage**：原本能被覆蓋的 Sensing Field 在某些 Mobile Sensors 無法工作且其他 Mobile Sensors 也無法完整覆蓋這些區域的情形下，使得 MSN 中被覆蓋的區域減少，如此將導致 Sink 收集到的資料不完整。

**Network Disconnectivity**：由於來源 Mobile Sensor 必須藉由其他 Mobile Sensor 的代傳將感測到的資料回傳至 Sink，因此當某個代傳資料的 Mobile Sensor 失去通訊能力而無法協助代傳封包，此時網路的連通性將會降低，導致感測資料無法回傳至 Sink。此時儘管該 Mobile Sensor 仍能進行感測，但卻因為無法進行通訊而無法對網路的運作有所貢獻。

上述說明可得知，當 Mobile Sensors 的 Sensing Unit 無法正常工作時，Sensing Field 可能會出現感測空洞 (Hole)，這些 Holes 不但減少 Sensing Field 中被感測的面積，還可能必須改變原先建立好的資料回傳路徑，增加額外的成本。若 Sensing Field 中一直產生 Holes，則可能造成網路的分割 (Partition)。如圖二所示，Partition 可視為包含多個 Mobile Sensors 的網路結構，Partition 中的 Mobile Sensor 均無法找到任何路徑將感測資料回傳至 Sink。試想，若 Partition 中的 Mobile Sensors 還有剩餘電量，也就是說它們仍能進行感測、通訊與計算等工作，但卻因為 Hole 的存在而無法利用剩餘的電量對整體網路有所貢獻，則這些 Mobile Sensors 的存在將變得無意義，很明顯地，網路中若存在 Partition 將嚴重破壞了 MSN 的 Connectivity，並減少 Coverage 的程度。



圖二. MSN 中出現 3 個 Mobile Sensors 的 Partition

鑑於上述考量，為了滿足 Network Coverage 和 Network Connectivity 的要求，當網路不連通 (Disconnect) 或出現空洞 (Hole) 等異常或突發狀況時，一些 Mobile Sensors

必須在考量移動所花費的電量下移動到適當位置以維持網路的連通，即儘可能利用仍可正常工作 Mobile Sensors 完成資料回傳的任務。

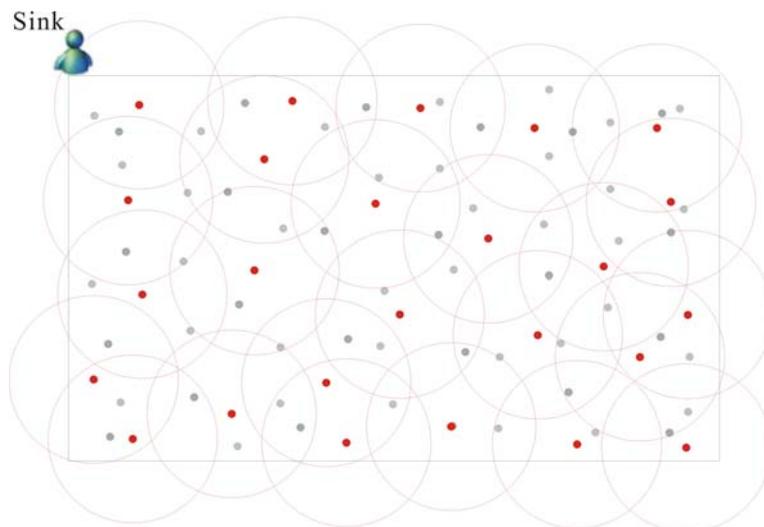
## 研究目的

本計畫「在行動感測網路中設計具網路連通保證之移動機制」係分別從 Network Coverage 與 Network Connectivity 兩方面進行 MSN 中 Mobile Sensor 移動策略之研究，目的是要設計一個適用於 MSN 中 Mobile Sensor 的移動機制。

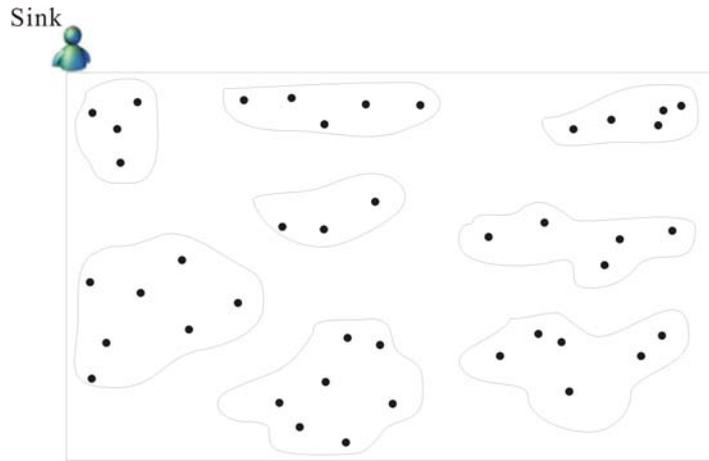
圖三為本計畫所考慮的場景，圖三(a)為網路佈建後的 Mobile Sensors 之分佈圖，圖三(b)為可滿足 Full-covered 的一組負責感測的 Mobile Sensors，圖三(c)為當網路運作一段時間後，因部分 Mobile Sensors 無法正常工作而產生 Partitions，圖三(d)為了確保仍能正常工作的 Mobile Sensors 可以將感測資料回傳至 Sink，這些 Mobile Sensors 將向 Sink 方向移動，圖三(e)為 Mobile Sensors 移動後的結果，所有仍能正常工作的 Mobile Sensors 均與 Sink 連通（即滿足網路連通），如此將可確保感測資料的順利回傳。



(a). 網路佈建後的 Mobile Sensors 分佈圖



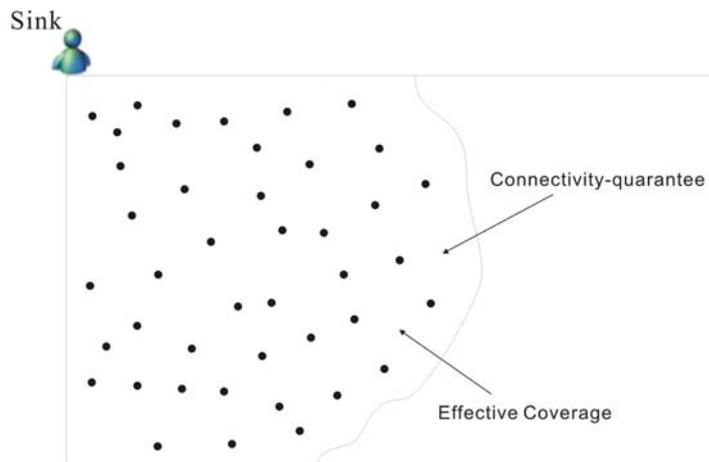
(b). 一組負責感測工作的 Mobile Sensors (紅色) 分佈圖



(c). 網路出現七個 Partitions



(d). Partitions 內的 Mobile Sensors 向 Sink 方向移動



(e). Mobile Sensors 向 Sink 方向移動後的結果

圖三.本計畫考慮的場景圖

為了因應網路的變化，當網路中出現無法進行通訊的 Mobile Sensor 時很可能造成網路的不連通，我們將設計一個 Mobile Sensor 的移動策略以避免網路產生 Partitions 的現

象，並利用僅存的可運作 Mobile Sensors（即仍具備感測與通訊能力的 Mobile Sensors）盡可能滿足網路的有效覆蓋（Effective Coverage）。

## 文獻探討

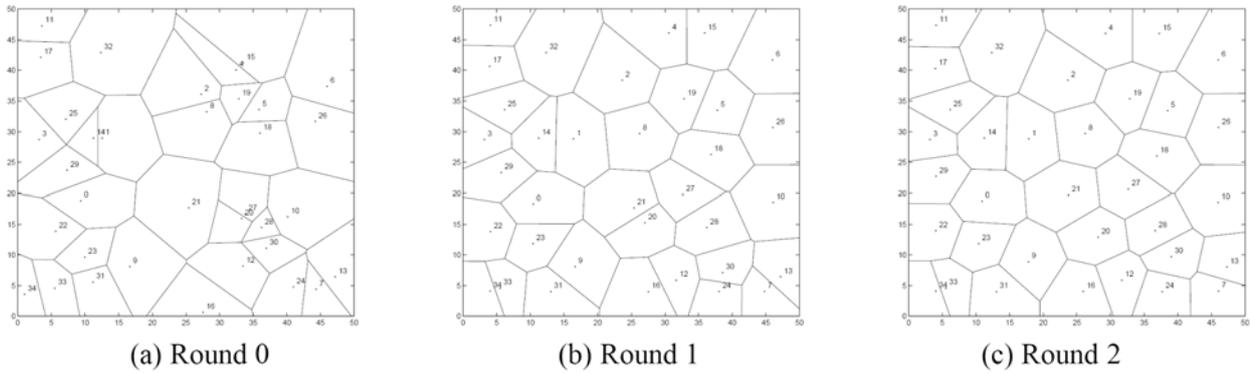
對於一個 MSN 來說，儘管每個 Sensor 的 Sensing Range 有限，但若網路中隨機佈設的 Sensor 數目夠多，此時 Sensors 之間的 Sensing Range 會出現重疊的覆蓋區域，即 Sensing Field 中某些地方會被多個 Sensors 共同感測到。基於 Sensor 的特性與應用，一個感測網路要如何達到使用者要求的覆蓋程度是一個重要的研究議題。目前國內外已有許多這方面的研究，其中一類的解決方案是在網路中佈建具移動能力的 Mobile Sensors，主要目的是希望 Mobile Sensors 佈建不均勻，或當一些無法進行感測任務的 Mobile Sensors 造成網路出現 Holes 時，這些 Mobile Sensors 可以自我修復並動態地調整網路拓撲以增加網路的覆蓋面積[11][12][13][14][15][16][17][18][19]。此類研究所提出之解決方案主要是藉由 Mobile Sensors 的移動使得 Mobile Sensors 的散佈密度更加均勻，並提高 Network Coverage。基本上，本計畫欲探討的環境是一個佈建具移動性的 Mobile Sensors，因此，以下將著重此類相關研究的闡述與說明。

一般而言，若已經事先知道網路出現 Hole 及其位置，則 Mobile Sensors 可以根據事先的路徑規劃移動到最佳的位置填補 Hole，這方面的議題已有一些相關研究提到適當的解決方案[21][22][23][24]。這類的作法一般是採集中式的方式運作，而本研究則是希望 Mobile Sensors 可以分散式（Distributed）的方式決定較佳的移動策略填補 Hole，因此本節中我們將著重以分散式方式填補 Hole 的相關研究。

Wang 等人[11]的研究係當 Mobile Sensors 佈建在網路後，該方法將會利用 Voronoi Diagram 試圖尋找網路中的 Coverage Holes。作者分別提出 VECtor-based（VEC）、VORonoi-based（VOR）及 Minmax 三種分散式自我佈建（Self-Deployment）演算法，一旦偵測到網路存在 Holes，Mobile Sensors 將會移動到適當位置以填補 Holes 或減小 Hole 的範圍。整體而言，VEC 是將 Mobile Sensors 從較密集的區域推向（Push）較稀疏的區域；VEC 是將 Mobile Sensors 從較稀疏的區域拉向（Pull）較密集的區域；而 Minmax 則讓 Mobile Sensor 移向局部中心區域（Local Center Area），這三種方法的運作概念分別概述如下。

### (1). VEC

VEC 方法是以電磁學中的排斥力（Expelling Force）為核心概念，即如果任意兩個 Mobile Sensors 距離太近，則此兩者會利用互相間的排斥力進行移動。基本上，若網路中佈建足夠數量的 Mobile Sensors，則這些 Mobile Sensors 應該是均勻分佈在網路中。基於這個特性，在 VEC 中，每個 Mobile Sensors 會計算自己與其他鄰居節點的距離，並依據兩者的理論位置（即 Mobile Sensor 都均勻分佈在網路中時的位置）求得彼此應該移動的距離長度，之後再求算相對於所有鄰居節點的合力決定出自己的移動方向與距離。圖四為 VEC 方法的一個範例圖，我們可以發現當網路佈建完成後（即圖四(a)），所有 Mobile Sensors 的分佈較不均勻，平均覆蓋程度約 75.7%，透過 VEC 方法的運作，第一個回合之後的平均覆蓋程度達到 92.2%（即圖四(b)），第二個回合之後的平均覆蓋程度可達到 94.7%（即圖四(c)），所有 Mobile Sensors 的分佈明顯較剛佈建時均勻。

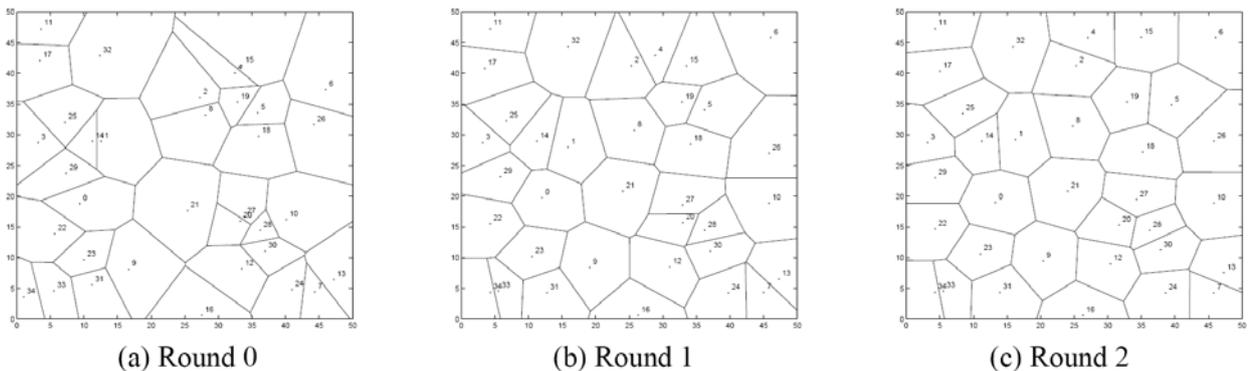


圖四.VEC 方法的運作範例示意圖

### (2). VOR

VOR 方法主要是利用自己擁有的局部 Voronoi Diagram 資訊，讓 Mobile Sensor 移動到局部最大空隙的區域 (Local Maximum Coverage Hole)，即往自己 Voronoi Diagram 之最遠的 Voronoi Vertex 移動，但若超過自己的 Sensing Range，則只移動到 Sensing Range 的邊界處。然而，為了避免一些超過 Communication Range 的 Mobile Sensor 導致的移動誤差，VOR 中限制 Mobile Sensor 的移動距離最多不得超過 Communication Range 的一半。

圖五為 VOR 方法的一個範例圖，我們可以發現當網路佈建完成後 (即圖五(a))，所有 Mobile Sensors 的分佈較不均勻，平均覆蓋程度約 75.7%，透過 VOR 方法的運作，第一個回合之後的平均覆蓋程度達到 89.2% (即圖五(b))，第二個回合之後的平均覆蓋程度可達到 95.6% (即圖五(c))，所有 Mobile Sensors 的分佈明顯較剛佈建時均勻。



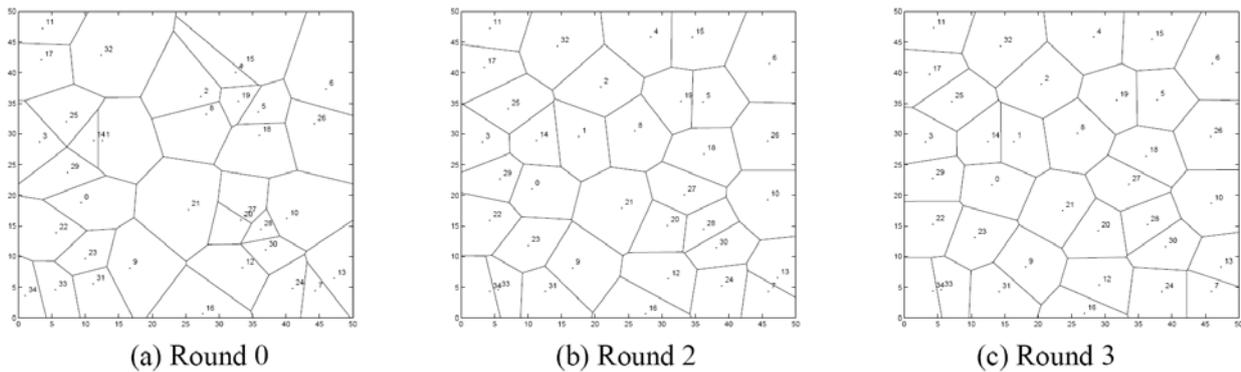
圖五.VOR 方法的運作範例示意圖

### (3). Minmax

Minmax 方法類似上述 VOR 方法，但不同的是 Minmax 方法傾向於在 Voronoi Polygon 中選擇一個距離最遠的 Voronoi Vertex 最近的一個點當作移動的目的位置，該點稱為 Minmax Point。一般而言，如果 Mobile Sensors 是均勻 (Uniform) 分佈，Mobile Sensor 距離自己任意一個 Voronoi Vertex 應不會太遠，因此，Minmax 方法希望 Mobile Sensor 在往自己 Voronoi Diagram 最遠的 Voronoi Vertex 移動的同時，仍能記錄與其他 Voronoi

Vertices 的距離，並試圖找尋自己 Voronoi Polygon 中距離最遠的 Voronoi Vertex 距離最短的點當作移動的目的位置。

圖六為 Minmax 方法的一個範例圖，我們可以發現當網路佈建完成後（即圖六(a)），所有 Mobile Sensors 的分佈較不均勻，平均覆蓋程度約 75.7%，透過 VOR 方法的運作，第一個回合之後的平均覆蓋程度達到 92.7%（即圖六(b)），第二個回合之後的平均覆蓋程度可達到 96.5%（即圖六(c)），所有 Mobile Sensors 的分佈明顯較剛佈建時均勻。



圖六.Minmax 方法的運作範例示意圖

相較於 VEC 方法，Minmax 方法係採被動 (Reactive) 方式，在移向最遠的 Voronoi Vertex 的同時一併直接填補局部區域中的 Holes。相較於 VOR 方法，Minmax 方法在 Mobile Sensor 移動的同時考慮更多的資訊，並進行謹慎的移動以避免來回的頻繁移動，造成電量的耗費。從上述實驗結果可發現，當回合數愈多，Minmax 方法可以得到較佳的平均覆蓋率。

Heo 和 Varshney [12]的研究中提出一個稱為 DSSA (Distributed Self-Spreading Algorithm) 方法讓 Mobile Sensor 進行 Self-Deployment。基本上，DSSA 源自於生物化學領域中分子均衡 (Molecule Equilibrium) 的概念，目的是希望減少分子的能量消耗 (Molecular Electronic Energy) 並減小細胞核間的排斥 (Inter-nuclear Repulsion) 現象。DSSA 的運作概念和上述 VEC 方法類似，每個 Mobile Sensor 在得到周圍 Mobile Sensors 的資訊後，以鄰居個數作為局部網路密度 (Local Density)，並進一步整合與鄰居距離和網路密度資訊求算 Partial Force，以此作為移動方向與距離長度的依據。

除了 DSSA，Heo 和 Varshney[13]還提出一種以叢集 (Clustering) 概念為主的智慧型 Mobile Sensor 佈建方式，稱為 Intelligent Deployment and Clustering Algorithm (IDCA)。IDCA 的作法主要是利用 Clustering 可以減少電量消耗的特性決定 Mobile Sensors 是否需要移動。基本上，每個 Mobile Sensor 根據 Local Density 及剩餘電量決定自己是否該成為 Clustering Mode，或是 Peer-to-Peer Mode。IDCA 方法的運作步驟和 DSSA 類似，不同的是在 IDCA 方法中，Mobile Sensor 的移動策略將考慮其所處的 Mode，處於 Clustering Mode 的 Mobile Sensor 必須考慮剩餘電量，而處於 Peer-to-Peer Mode 的 Mobile Sensor 則不需考慮電量的影響。

Wang 等人[16]提出的 Bidding 演算法應用的場景是同時具有 Static Sensors 和 Mobile Sensors 的異質型感測網路，所有 Mobile Sensors 完成佈建後便會有一個基本價格，稱為 Basic Price。Bidding 演算法中的 Static Sensors 以 Voronoi Diagram 的幾何概念為主，負責偵測局部區域中是否存在 Holes，若偵測到 Hole，該 Static Sensor 將根據 Hole 大小決

定一個出價價格，稱為 Bid，並召喚 (Bid) 附近的 Mobile Sensors 進行填補 Hole 的工作。若 Mobile Sensor 的 Price 小於多個召喚的 Static Sensors 的 Bids，則該 Mobile Sensor 將會往具有較大 Bid 值的 Static Sensor 方向移動。此外，Mobile Sensor 在移動的過程中還會根據新產生的 Hole 之大小改變自己的 Price 以符合網路的變動，而前述所提之 VEC 方法亦被用在 Bidding 演算法中以進行局部的調整。

Ganerival 等人[17]提出的 Co-Fi (COverage Fidelity Maintenance Algorithm) 方法可應用在因 Mobile Sensor 電量耗盡而產生 Hole 的網路。當一個低剩餘電量的 Mobile Sensor (Dying Sensor) 預期自己即將無法運作 (Death) 時，便會廣播一個類似求救的 Panic Packet，若某個收到 Panic Packet 的 Mobile Sensor (Helper) 可以進行移動但不會影響目前的覆蓋狀況，則此 Mobile Sensor 將回覆一個包含自己剩餘電量與移動成本的 Panic Reply Packet。當 Dying Sensor 收到多個 Panic Reply Packets 後，便根據這些 Helpers 的剩餘電量及移動成本選擇一個最佳的 Helper，並通知該 Helper 進行移動。

整體而言，目前針對 Hole 進行填補的相關研究大多把焦點放在 Coverage 的議題上 [11][12][13][14][15][16][17][18]，一般說來，MSN 開始運作時網路密度均維持在一定程度之上，Network Connectivity 的狀況可有效維持。然而，若網路密度低於某種程度時，我們認為必須讓整體 Mobile Sensors 盡量靠近 Sink 以維持 Network Connectivity。若以目前研究提出的機制運作，即不考慮 Sink 位置而只求網路密度更平均以維持 Network Coverage，則最後將可能導致網路漸漸形成 Partition 的結構，Network Connectivity 勢將無法確保，此時 Mobile Sensors 無法把感測資料回傳至 Sink，整個 MSN 亦將喪失基本的感測與資料傳輸功能。

## 研究方法

本研究所探討的 Network Coverage 與 Network Connectivity 必須滿足下列「感測資料收集」(Sensor Data Gathering) 的主要目標，即**每個 Mobile Sensor 收集到感測資料皆必須成功回傳到 Sink**。在這個目標的考量下，本研究方法的假設條件有下列幾項：

(a). 大量且密集的 Mobile Sensors 佈建在 Sensing Field 中，佈建後這些 Mobile

Sensors 均可進行正常的感測、通訊與計算工作，但會隨著時間漸漸喪失任何一項工作能力。

(b). 每個 Mobile Sensor 的 Communication Range 為 Sensing Range 的兩倍。

(c). 每個 Mobile Sensor 均知道自己的位置資訊。

本研究設計的具連通保證之感測器移動機制稱為 (Connectivity-Guaranteed Moving Scheme, CGMS)，基本上，CGMS 可視為網路維護 (Network Maintenance) 的一種機制，主要是希望維持整個 MSN 的連通性 (即避免網路出現 Partition)，使得 MSN 中的每個 Mobile Sensor 除了可以成功地將感測資料回傳至 Sink 外，還能維持一定程度的「有效覆蓋」(Effective Coverage)。

### 1. 基本概念

CGMS 演算法的目的是希望網路中仍能正常運作的 Mobile Sensors 盡可能將感測資料回傳到 Sink，因此，原則上這些 Mobile Sensors 的移動方向將會朝向 Sink 所在的位置。CGMS 演算法包括「網路初始化」與「網路維護」兩個階段。

#### (1) 網路初始化階段

這個階段的主要目的是讓網路中所有 Mobile Sensors 都具有方向性與連結性。由於 Sink 的位置將會影響 Mobile Sensors 的移動，因此在這個階段將會透過封包的擴散使每個 Mobile Sensor 得知鄰居節點的相關資訊，這些資訊將提供 Mobile Sensors 之後的移動決策（例如：移動與否、移動的方向與目的位置）之依據。

#### (2) 網路維護階段

此階段的主要工作是讓 Mobile Sensors 如何判別移動的時機、如何決定移動方向及如何計算移動之目的位置。此階段主要包括「Risk Sensor Determination」與「Effective Movement Decision」兩個部分，其中 Risk Sensor Determination 主要是網路中的 Mobile Sensor 可以自行判斷自己是否為 Risk Sensor。由於本研究希望離 Sink 較遠且與 Sink 失去連通性的 Mobile Sensors 移動到適當的位置以便與 Sink 建立連結而維持網路的 Connectivity，因此，一旦成為 Risk Sensor 的 Mobile Sensor 便將進行移動。Effective Movement Decision 主要的目的是要決定 Risk Sensor 之有效移動策略，也就是說，Risk Sensor 的移動的方向和目的位置。在移動策略的設計上，我們擬採用右手法則（Right Hand Rule, RHR）[20]決定 Risk Sensor 的移動方向，並進而尋找對 Risk Sensor 有幫助的 Attached Sensors 計算 Risk Sensor 之移動目的位置。

### 2. 進行步驟

基本上，本研究希望設計的 Mobile Sensor 移動策略是一個完全分散式的機制，每個 Mobile Sensor 僅需透過區域性的資訊（Local Information），並以協同合作的方式計算移動的目的位置，目的是希望這種方式不僅維持 MSN 的 Connectivity，還可以提高網路的 Effective Coverage。在此，我們先對本研究提到的 Effective Sensor 與 Effective Coverage 做比較明確的定義：

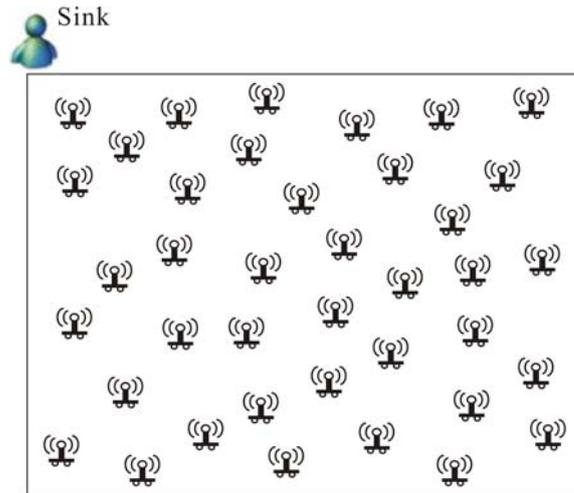
#### [定義一] Effective Sensor

若一個 Mobile Sensor 在不移動的前提下能與 Sink 連通，則此 Mobile Sensor 即稱為 Effective Sensor。

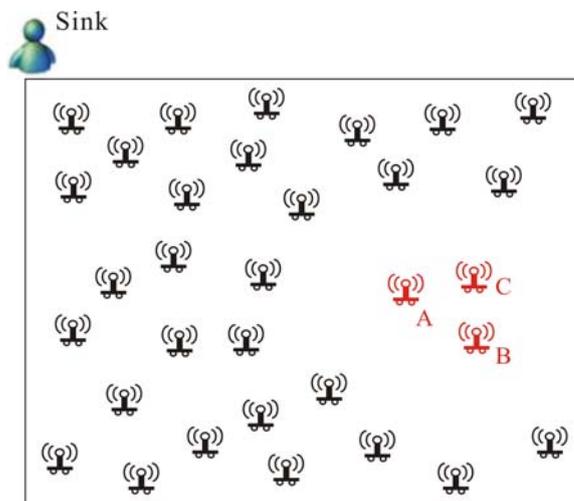
#### [定義二] Effective Coverage

MSN 中所有 Effective Sensors 可以覆蓋的區域之聯集即稱為 Effective Coverage。

原先網路中的所有 Mobile Sensors 均可和 Sink 連通（如圖七(a)），因此所有的 Mobile Sensors 都是 Effective Sensors。一旦網路出現 Partition 時（如圖七(b)），A、B 與 C 三個 Mobile Sensors 便無法與 Sink 連通，因此它們無法將感測結果透過 Multi-hop 的方式回傳給 Sink。根據上述的定義，圖七(b)中除了 A、B 與 C 之外的 Mobile Sensors 即 Effective Sensors，從另外一個角度來看，這些 Effective Sensors 可以將感測資料回傳給 Sink，因此對 MSN 的運作而言確實是有貢獻地。反觀 A、B 與 C 三個 Mobile Sensors，儘管還有電量可以進行感測，但因為與 Sink 不連通，以致於對 MSN 來說是沒有貢獻的。



(a)



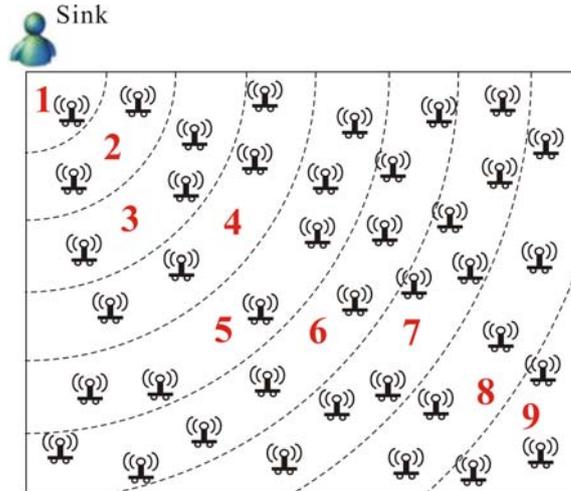
(b)

圖七. (a). 所有 Mobile Sensors 均為 Effective Sensors (b). Sensors A、B 與 C 為非 Effective Sensors

有了前述的說明後，以下我們將分別說明在「網路初始化階段」及「網路維護階段」的作法。

(1) 網路初始化階段

當 MSN 中 Mobile Sensors 佈建完成後，Sink 會廣播一個初始化封包 (INIT Packet)，此封包包括 Sink 的位置座標、代傳點的 ID、代傳點的位置座標與距離 Sink 的最小埠數 (Hop Count，記做  $h_{min}$ ) 等四項重要資訊，基於此，我們假設每個 Mobile Sensor 可以利用現有的一些定位演算法求得自己的位置座標，其中  $h_{min}$  是用來表示 Mobile Sensor 與 Sink 間的距離。一旦收到 INIT Packet，Mobile Sensor 會將 INIT Packet 內的  $h_{min}$  欄位值加 1 再轉送出去。若收到兩個  $h_{min}$  相異的 INIT Packet，則 Mobile Sensor 會以  $h_{min}$  較小之 INIT Packet 為主。透過這種方式，最後 MSN 中每個 Mobile Sensor 將會擁有 Sink 的位置座標、自己與 Sink 的距離 ( $h_{min}$ )、鄰居節點的 ID 及其位置資訊與  $h_{min}$ 。圖八所示即為網路初始化後的結果，圖中的數字是該 Mobile Sensor 與 Sink 的距離 (即  $h_{min}$ )。



圖八. 網路初始化後，所有 Mobile Sensors 將可得到自己與 Sink 的最短距離

此外，在網路初始化階段中，為了區分一個 Mobile Sensor 與其鄰居節點相對於 Sink 的距離，對於一個 Mobile Sensor  $s_i$  而言，我們將其鄰居節點根據  $h_{min}$  值區分成下列三種不同的角色：

### Parent Neighbor

若  $s_i$  鄰居節點的  $h_{min}$  比自己小，則表示此鄰居節點與 Sink 間的距離比自己近，故該鄰居節點被稱為 Parent Neighbor。

### Sibling Neighbor

若  $s_i$  鄰居節點的  $h_{min}$  與自己一樣，則表示此鄰居節點與 Sink 間的距離跟自己一樣近，故該鄰居節點被稱為 Sibling Neighbor。

### Child Neighbor

若  $s_i$  鄰居節點的  $h_{min}$  比自己大，則表示此鄰居節點與 Sink 間的距離比自己遠，故該鄰居節點被稱為 Child Neighbor。

## (2) 網路維護階段

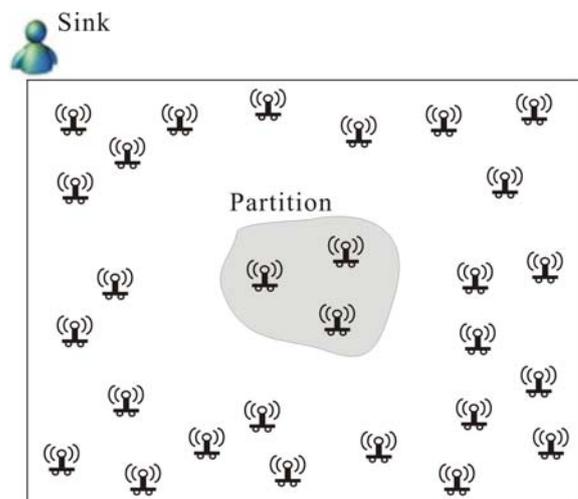
如前所述，本研究的主要目的為避免網路 Partition 的產生，因此 Mobile Sensor 必須判斷移動時機，並計算移動的目的位置。基本上，本階段為 CGMS 的核心部分，包括「Risk Sensor Determination」與「Effective Movement Decision」三個部分，茲分別說明如下。

### ● Risk Sensor Determination

當網路完成初始化後，我們觀察到一個特性，即對於一個  $h_{min}$  值為  $n$  的 Mobile Sensor 而言，必定存在至少一個  $h_{min}$  值為  $n-1$  的 Parent Neighbor，而一個  $h_{min}$  值為  $n-1$  的 Mobile Sensor 而言，必定存在至少一個  $h_{min}$  值為  $n-2$  的 Parent Neighbor，以此類推，則此  $h_{min}$  值為  $n$  的 Mobile Sensor 與 Sink 是連通地，即該 Mobile Sensor 與 Sink 之間至少存在一條路徑，且該路徑上的 Mobile Sensors 之  $h_{min}$  值依序為  $n-1$ 、 $n-2$ 、...、1。此時表示 MSN 的 Network Connectivity 良好，每個 Mobile Sensor 都可以有效地透過其他 Mobile Sensors 與 Sink 交換資訊，並將感測到的資訊回傳至 Sink。

另一項我們觀察到的特性是一旦網路存在 Partition，則此 Partition 內必定至少存在一個 Mobile Sensor 失去與所有 Parent Neighbors 的連結。以圖九為例，MSN 中存在一個

Partition，且這個 Partition 包含三個  $h_{min}$  分別為 3、4 及 4 的 Mobile Sensors，很明顯可以看出  $h_{min}$  為 3 的 Mobile Sensor 已經不存在任何 Parent Neighbor。由此可知，若可以有效的讓 MSN 中每個 Mobile Sensor 至少維持與一個 Parent Neighbor 連結，則可以成功的避免網路 Partition 的產生。



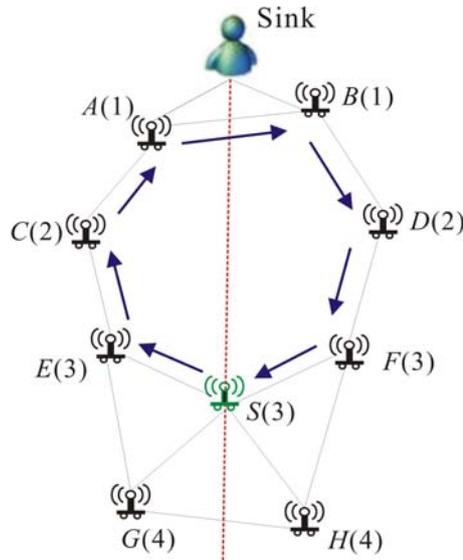
圖九.MSN 中已形成一包含 3 個 Mobile Sensors 的 Partition

#### ● Effective Movement Decision

本研究中將失去所有 Parent Neighbors 的連結的 Mobile Sensor 稱為 Risk Sensor。也就是說，一旦某個 Mobile Sensor 成為 Risk Sensor，那麼該 Mobile Sensor 必須決定自己的移動方向及目的位置。

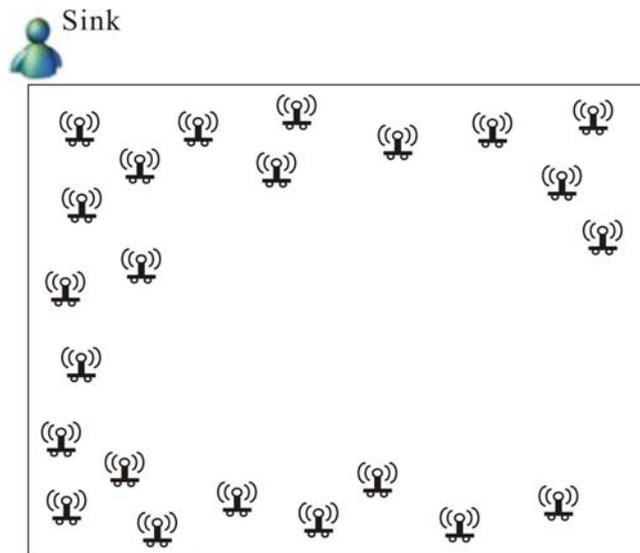
一旦 Risk Sensor 決定後，則該節點將試圖與離 Sink 較近的 Effective Sensors 建立連結以維持 Network Connectivity，我們稱這些欲連結的 Effective Sensors 為 Attached Sensors。基本上，符合一個 Risk Sensor 的 Attached Sensors 可能很多，為了有效地選擇適合的 Attached Sensors，本研究將採用 RHR 右手法則的概念試圖尋找較佳的 Attached Sensors。主要的概念係 Risk Sensor 在移動前先透過 RHR 沿途蒐集相關 Mobile Sensors 的位置資訊並逐步過濾以維持封包大小。由於每個 Effective Sensor 均維護鄰居節點的資訊，因此 Risk Sensor 將利用這些資訊並以 RHR 方式傳送搜尋欲連節點資料的封包。

此處以圖十說明 Risk Sensor 如何決定較佳的 Attached Sensors。假設 Effective Sensor  $S$  的  $h_{min}$  值為 3，一旦 Sensor  $S$  發現自己成為 Risk Sensor，則發起探測封包 (PROBE Packet) 尋找 Attached Sensors。由於採用 RHR，因此該 PROBE Packet 將會依序流經 Effective Sensors  $E$ 、 $C$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $D$  及  $F$ ，而最後將傳回至 Risk Sensor  $S$ 。PROBE Packet 在傳送的过程中，每個代傳的 Effective Sensors 都將加入相關資訊至此 PROBE Packet 提供 Risk Sensor 決定 Attached Sensors 及判斷移動的目的位置。



圖十. Risk Sensor  $S$  將發起以 Right Hand Rule 為傳送方式的偵測封包

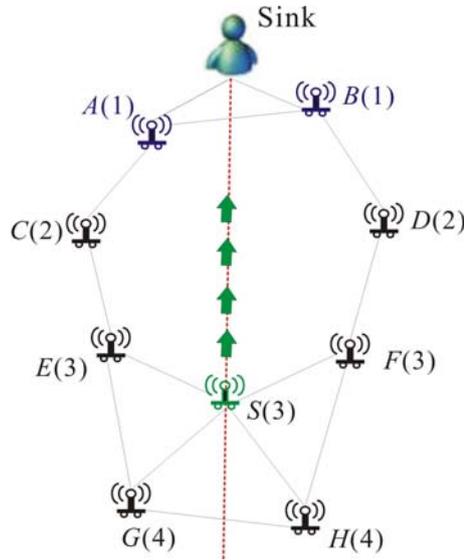
由於我們希望 Risk Sensor 往 Sink 方向移動以維持 Network Connectivity，因此 Risk Sensor 將連結更靠近 Sink 的 Effective Sensors。基於此，若 Risk Sensor 的  $h_{min}$  值為  $n$ ，則 Attached Sensors 之  $h_{min}$  值將小於  $n$ 。此外，若所有 Effective Sensors 均集中在 Sensing Field 的某一側，這樣將會造成如圖十一所示之感測不平衡 (Imbalance) 的現象，也就是無法感測某側 Sensing Field 的狀況，因此本研究在決定 Attached Sensors 時亦將考慮與 Sink 的相對位置。



圖十一. 感測不平衡之示意圖

從圖十中可觀察到，若採用 RHR，則 PROBE Packet 將會經過 Effective Sensors  $A$  與  $B$ 。採此外，基於上述的考量，Risk Sensor  $S$  將儘可能往 Effective Sensors  $A$  與  $B$  移動，因此我們希望 Effective Sensors  $A$  與  $B$  為 Risk Sensor  $S$  的 Attached Sensors，這樣的直線移動方式將可減少移動距離，節省移動所消耗的電量，再者，往 Sink 方向移動的原則更能確保 Network Connectivity。為了達到這樣的目的，PROBE Packet 封包還必須包含 Risk Sensor 與 Sink 的直線方程式。

整體而言，一旦收到 PROBE Packet 後，每個轉送 PROBE Packet 的 Effective Sensor 根據 PROBE Packet 內的直線方程式資訊判斷是否與 PROBE Packet 的 Sender（上一個代傳點）位在直線同側。若兩者位於直線的兩側，則表示此二個 Effective Sensors 即可被視為 Attached Sensors，因此，Risk Sensor 將以這兩個 Attached Sensors 的位置為移動的主要依據，圖十二即為 Risk Sensor A 的移動示意圖。



圖十二. Risk Sensor 的移動示意圖

儘管根據上述的方式確實可以提供 Risk Sensor 一個較佳的移動策略以滿足 Network Connectivity 的要求，然而，本研究更希望能在 Network Connectivity 的前提下仍可使網路達到一定程度的 Effective Coverage，因此我們進一步計算 Risk Sensor 移動後的目的位置。假設 Risk Sensor 移動的目的位置為  $P_{target}$ ，則我們認為  $P_{target}$  必須落在 A、B 及中垂線上，且 A、B 及移動後 Risk Sensor 三個節點的 Sensing Ranges 必須相交於一點。

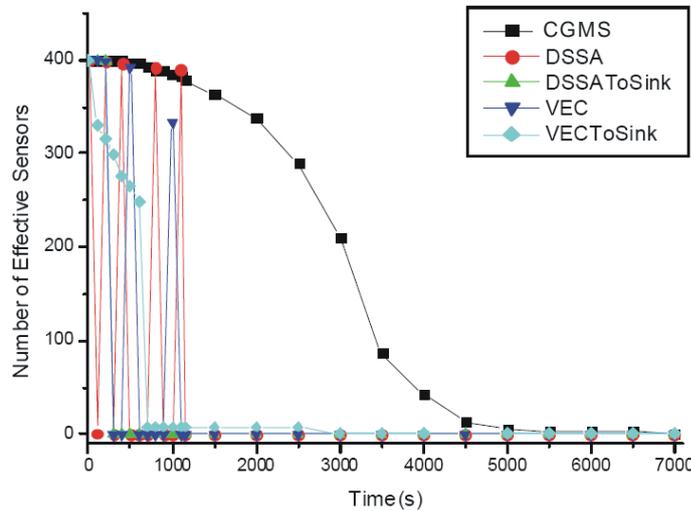
## 實驗結果

本研究的實驗參數設定如下：Sensor 的 Sensing Range 為 30m，Communication Range 為 60m，初始電量大小為 500000 Joule。網路中的感測區域大小為邊長 800m 的正方形區域，且在該區域隨機佈設 400 個 Mobile Sensors。

本研究的實驗將和 Distributed Self-Spreading Algorithm (DSSA) 及 VECTOR-based (VEC) Sensor 佈建協定進行比較，其中 DSSA 將考慮 Mobile Sensor 週遭網路密度與整體網路密度，希望透過 Mobile Sensor 的移動使整體網路的密度更加平均，而 VEC 則考量 Mobile Sensors 之間的距離關係，並利用電磁學中的互斥力概念決定 Mobile Sensor 是否該進行移動。

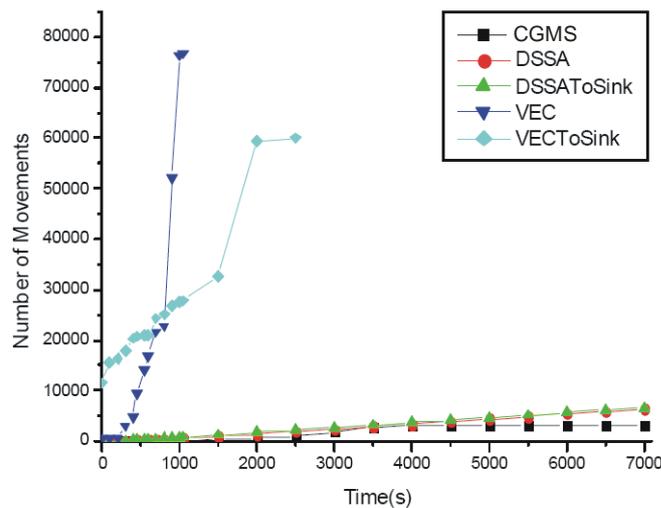
圖十三為執行不同方法後得到的 Effective Sensors 個數，由於 CGMS 的移動考慮 MSN 的 Connectivity，因此曲線將成較平緩的方式下降，但 DSSA 與 VEC 則因為移動方向不固定，一旦 MSN 上訊息通訊量累積至足以將 Sink 附近代傳封包的 Mobile Sensors 的電量耗盡時，網路便會出現 Partitions，因此 DSSA 與 VEC 方法中，網路的 Effective Sensors 個數都急速減少，但可能經過一段時間的移動又恢復與 Sink 間的連通，以致於

曲線呈現震盪的趨勢。我們將原本 DSSA 與 VEC 的做法稍作修改，使其可考慮 Sink 方向作為移動依據（分別標示為 DSSAToSink 與 VECToSink）。對於 DSSA 而言，加上這樣的機制後，由於 DSSA 方法本身的缺陷導致整體 MSN 加快成為 Partition 的速度。而 VECToSink 則僅能輕微減緩下降的趨勢，但效果仍然比 CGMS 差。



圖十三. Effective Sensor 個數

由於 CGMS 移動時機判斷與移動目的，CGMS 總移動次數會比其他方法少，在 MSN 運作時間內總移動次數約 3000 多次，如圖十四所示。DSSA 與 DSSAToSink 則因主要目的為使所 MSN 分佈更趨平均，若 MSN 中有 Mobile Sensors 將電量耗盡，則 MSN 上每個 Mobile Sensors 將不斷地移動以達到平衡，當 CGMS 移動次數達 3000 次時，DSSA 與 DSSAToSink 的移動次數則達約 6000 多次。VEC 與 VECToSink 方法中 Mobile Sensor 的移動停止機制和其鄰居節點相對位置有關。由於網路中某些 Mobile Sensors 電量耗盡導致所有 Mobile Sensors 為了達到停止條件而必須不斷移動，因此圖十四顯示 VEC 與 VECToSink 方法中 Mobile Sensors 的移動次數呈現明顯的上升趨勢。



圖十四. 移動次數

## 結論

本研究提出一個應用於行動感測網路中具網路連通保證之 Mobile Sensor 移動機制 (稱為 CGMS), CGMS 包含「網路初始化」與「網路維護」兩個階段。在網路初始化階段,我們將以 Sink 為中心求得未來 Mobile Sensor 移動方向的依據,而在網路維護階段中, Mobile Sensor 在網路可能產生 Partition 前,先利用右手法則傳送 PROBE 封包蒐集相關位置資訊以計算未來的移動位置與方向,之後再根據該位置與方向進行移動。整體而言,我本研究提出的 CGMS 分散式機制不但可有效維護網路的連通,模擬結果亦顯示與 DSSA 與 VEC 相比較,CGMS 產生的 Mobile Sensor 移動次數較少,如此將可減少電量的浪費,進而達到延長網路存活時間的目標。

## 參考文獻

- [1]. M. Ding, D. Chen, A. Thaler, and X. Cheng, "Fault-Tolerant Target Detection in Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Mar. 2005.
- [2]. Q. Huang, C. Lu, and G.-C. Roman, "Reliable Mobicast via Face-Aware Routing," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM, the Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Mar. 2004.
- [3]. K. Kalpakis, K. Dasgupta, and P. Namjoshi, "Efficient Algorithms for Maximum Lifetime Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks," *Computer Networks*, vol. 42, no. 6, pp. 697-716, Aug. 2003.
- [4]. H. T. Kung and D. Vlah, "Efficient Location Tracking Using Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Mar. 2003, pp. 1954-1961.
- [5]. C. Liu, K. Wu, Y. Xiao, and B. Sun, "Random Coverage with Guaranteed Connectivity: Joint Scheduling for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol.17, no. 6, pp. 562-575, June 2006.
- [6]. A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring," in *Proceedings of the ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Sept. 2002, pp. 88-97.
- [7]. T. Vercauteren, D. Guo, and X. Wang, "Joint Multiple Target Tracking and Classification in Collaborative Sensor Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 4, pp. 714-723, Apr. 2005.
- [8]. H. Yang and B. Sikdar, "A Protocol for Tracking Mobile Targets Using Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA)*, May 2003, pp. 71-81.
- [9]. W. Zhang and G. Cao, "DCTC: Dynamic Convoy Tree-Based Collaboration for Target Tracking in Sensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 1689-1701, 2004.
- [10]. Habitat Monitoring on Great Duck Island. <http://www.greatduckisland.net/>
- [11]. G. Wang, G. Cao, and T. LaPorta, "Movement-Assisted Sensor Deployment," in *Proceedings of the Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies (INFOCOM)*, Mar. 2004, pp. 2469-2479.
- [12]. N. Heo and P. Varshney, "A Distributed Self Spreading Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Mar. 2003, pp. 1597-1602.
- [13]. P. Varshney and N. Heo, "An Intelligent Deployment and Clustering Algorithm for A Distributed Mobile Sensor Network," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Oct. 2003, pp. 4576-4581.

- [14]. T. Wong, T. Tsuchiya, and T. Kikuno, "A Self-Organizing Technique for Sensor Placement in Wireless Micro-Sensor Networks," in *Proceedings of the 18th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2004, pp. 78-83.
- [15]. Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization in Distributed Sensor Networks," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol. 3, pp. 61-91, Feb. 2004.
- [16]. G. Wang, G. Cao, and T. LaPorta, "A Bidding Protocol for Deploying Mobile Sensors," in *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, Nov. 2003, pp. 315-324.
- [17]. S. Ganeriwal, A. Kansal, and M. Srivastava, "Self Aware Actuation for Fault Repair in Sensor Networks," in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2004, pp. 5244-5249.
- [18]. J. Hwang, D. Du, and E. Kusmierk, "Energy Efficient Organization of Mobile Sensor Networks," in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW)*, Aug. 2004, pp. 84-91.
- [19]. S. Zhou, M.-Y. Wu, and W. Shu, "Finding Optimal Placements for Mobile Sensors: Wireless Sensor Network Topology Adjustment," in *Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication (CAS)*, Jun. 2004, pp. 529-532.
- [20]. B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," in *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Aug. 2000, pp. 243-254.
- [21]. Y. Wang, J. Gao, and J. S. B. Mitchell, "Boundary Recognition in Sensor Networks by Topological Methods," in *Proceedings of the 10th annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Sep. 2006, pp. 122-133.
- [22]. R. Ghrist and A. Muhammad, "Coverage and Hole-Detection in Sensor Networks via Homology," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, Apr. 2005, pp. 254-260.
- [23]. A. Ghosh, "Estimating Coverage Holes and Enhancing Coverage in Mixed Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Nov. 2004, pp. 68-76.
- [24]. N. Ahmed, S. S. Kanhere, and S. Jha, "The Hole Problem in Wireless Sensor Networks: A Survey," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Reviews*, vol. 9, no. 2, pp. 4-18, Apr. 2005.



