

# 一個基於 Voronoi diagram 的新型無線偵測網路中繼點機制

柯鈞達

李忠憲

國立成功大學電通所

q3695431@mail.ncku.edu.tw jsli@mail.ncku.edu.tw

## 摘要

無線偵測網路能即時偵測資料並以無線方式回傳至主控端，不僅節省人力資源，也能以相對以較少時間完成偵測。本文研究目的，是要提供適用於無線偵測網路的中繼點機制，利用 Voronoi diagram 的特性，針對網路節點分佈情況設立中繼點，藉由中繼點提供中控端路由資訊及降低網路節點的電力損耗。經過模擬驗證，我們發現採用我們的中繼點機制的確能有效降低回傳的延遲時間及能量消耗，提高封包傳送的效率及網路的生存時間，藉此增進無線偵測網路的效能。

**關鍵字：**無線網路(wireless network)、偵測網路(sensor network)、電力控制。

## 1 簡介

由於近年來科技的進步，使得我們得以製造出小型偵測器，可具有環境感測、無線通訊及資料統整傳遞的能力。而此偵測器大多為小型且便宜的裝置，所以通常可由數百或數千個偵測器來組成無線偵測網路(Wireless Sensor Network)[3]，視任務需要來調整其擺設密度，進行對一特定區域的即時監控感測，並將大量偵測到分散各地的即時資料，迅速地傳回管理者或中控裝置，如此一來便能有效率得到區域的即時資訊。

Sensor 通常是低功率且電源不具補充性，若能源消耗完畢將會使得原本完整的偵測網路出現漏洞，也無法提供對其它 sensor 資料的轉傳，更會提高其它 sensor 資料傳送上的負擔，換言之網路連結問題是相當基本且重要的問題。由於所有 sensor 必需將所偵測到的資料回傳給觀測站(sink)，倘若由於電力不足而無法運作，或是由於惡劣環境而無法順利通訊，將會使得整個網路連結上出現斷點，嚴重時甚至導致部分網路的癱瘓，sensor 無法回傳其偵測資料，觀測站因此無法收集資訊。

Sensor 的電力控制對於維持整個網路的生命週期(Lifetime)及網路的完整連結性是非常重要的關鍵，如圖 1 所示，我們可以輕易的發現在觀測站附近的節點將負擔較高的 traffic load，造成節點快速死亡，導致封包回傳效率迅速降低。本論文即針對此點，將專門負責轉傳封包的中繼點(relay node)加入成為網路的一部分，針對已部署 sensor 的區

域，進行以 Voronoi diagram 為基礎的中繼點設立演算法的研究，如何妥善安排 relay node 的位置及數量、如何利用 relay node 分擔 traffic load、有效率的能量消耗，藉此提高 lifetime 及網路的效能。

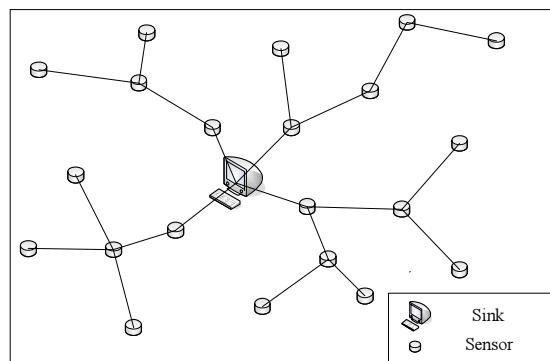


圖 1 Sensor network 示意圖

## 2 相關研究

### 2.1 Sensor routing

無線區域網路主要分為二種傳輸架構，分別以 Access Point 及 Ad Hoc 二種模式執行運作，而 sensor network 是由部屬於監控地區的 sensor，偵測並將各地資料回傳匯集於中控端(sink)，而各 sensor 是以 Ad Hoc 的模式運作，彼此間可互相連結並幫助轉傳資料，所以算是結合 Access Point 及 Ad Hoc 二種模式的混合型無線網路。以下介紹幾個前人所提出較為知名的路由協定：

- **直接擴散 (directed diffusion)**

Directed diffusion 的特色是不以節點位址來區分，而是以 sensor 所偵測到的資料來命名，觀測者或中控端可對想獲得的資料傳送詢問(query)，將此訊息廣播出去，而當有任何一 sensor 有偵測到所詢問的資料時，便會將資料回傳給觀測者或中控端。由於是區域性交換資料，所以各 sensor 不需了解整個網路的 topology，路由資料不會造成太大負擔，因此十分適合會動態變化的網路架構。

- **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[9]**

LEACH 會先將網路中多個相鄰的 sensor 組成各別的 cluster，接者再依程序選出 cluster head，而 cluster head 負責將所偵測到的資料彙集並進行資料

融合後再回傳給中控端，以避免回傳相同資料所造成的能源消耗，而 cluster head 的選取主要是以能節省能量達到延長 lifetime 為考量，期望能讓每個 sensor 能源的利用達到最佳化。

## 2.2 Power control

資料傳送是 sensor network 電力消耗最大的部份，為了能回傳偵測資料因此必須能與其它 sensor 或中控端互傳資料，這些大多都是經由短距離無線傳輸的技術來進行發送及接收資料。由於電力控制是 sensor 設計之首要考量，因此除了開發較低功率的無線收發器外，另有人提出以睡眠裝置來更進一步節省能源消耗，但進入睡眠狀態或結束睡眠狀態所消耗的電力對於 sensor 來說也是不少，因此如何安排 sensor 進入睡眠在提高 lifetime 的同時而不影響網路的運作是十分重要的。

## 2.3 Relay placement

在思考及改善 sensor 的佈置方式時，研究學者便想到利用新增額外的 relay node 來進一步加強 sensor network 的效能。[4]提出一個 heuristic method 去估計在所有可能的 relay 佈置方式下，對於 sensor network 網路效能提高的上限以及其下限。[6]對於如何部署 sensor、relay node 以及中控端進行討論，在確保 sensor 能覆蓋整個區域以及網路完整連結性之下等條件下，分別針對最少數量、最少電力消耗、最大 lifetime 等情況下去設定部署方式，依據實際應用選擇最適合的部署方式。

[1]考慮如何利用 relay node 將散於區域各處的 sensor cluster head 連結起來，形成一個完整連結的無線偵測網路，分別分析過最差情況跟最佳情況及後，提出有效降低 relay node 數量的佈署方式。[2]提出利用 relay node 所提供的額外資料傳遞路徑，來有效降低 link 間的 traffic load，減少節點發生 congestion 的情況。Sensor 在傳遞資料上可能受到周遭環境的限制，因此[8]利用最佳化的 relay node 佈署方式來避免周遭環境所造成的影響，並能在所需的 lifetime 下達成電力的最佳化消耗，最小化網路能源的消耗。

## 2.4 Voronoi diagram

Voronoi diagram 是一個應用於分析幾何問題上的工具，它能將幾何空間上的所有點依據距離物件遠近關係作分隔，讓每個物件能劃分得到一定區域，在區域內的任意點和該物件的距離皆比其它物件要來得近。圖 2 為 Voronoi diagram 例圖。

我們令  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ,  $2 \leq n \leq \infty$  是一個在二維歐式幾何平面上的點所成的集合，而  $P_1, P_2, \dots, P_n$  這些點則稱為 sites。將二維歐式幾何平面上所有的

點，依照距離它最近的 site 來把此平面做分割動作，而由此條件將  $P_i$  所蒐集而成的圖形稱之為 Voronoi cell  $V(P_i)$ ，也就是說  $V(P_i)$  代表一個區域，在這個區域內的所有點距離  $P_i$  皆比其它 sites 要來得近。Voronoi Diagram  $V(P)$  則為所有 Voronoi cell 所組成的圖形。

$$V(P_i) = \{x : \|P_i - x\| \leq \|P_j - x\| \forall j \neq i\} \quad (1)$$

$$V(P) = \{V(P_1), V(P_2), \dots, V(P_n)\} \quad (2)$$

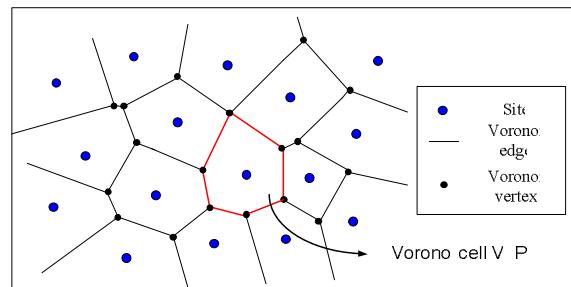


圖 2 Voronoi Diagram 示意圖

我們可以從圖 2 中發現，在空間中的點不一定只跟一個 site 有著最小距離，即  $x \in V(P_i) \cap V(P_j), i \neq j$ ，將這些同時屬於多個 Voronoi cell 的點收集起來，所形成的圖形稱為 Voronoi edge，而這些邊所交集而成的頂點稱為 Voronoi vertex。

## 3 中繼點系統設計

### 3.1 Network model

在已部署好 sensor network 的網路上，我們加入中繼點使其能減輕各 sensor 的負擔，協助傳輸、匯集資料，並提供切換偵測任務指令的傳遞，使其成為一高效能的網路架構。我們提出的系統架構有三種元件，分別是感測器(sensor)、中繼點(relay node)及中控端(sink)，將負責不同的功能。

**Sensor**，負責感測環境並產生資料封包。

**Relay node**，負責 sensor 封包的傳輸、資料統整，並協調節點間的運作。

**Sink**，負責收集回傳的資料封包。

### 3.2 中繼點演算法

#### 3.2.1 Proposed algorithm

設立中繼點是系統中重要的一環，假如設置位置不當將會在傳輸資料上有過多的能量消耗，進而影響整體網路的 lifetime，因此我們依據 Voronoi diagram 提出中繼點設置法，能讓同群組下的所有 sensor 有相同傳輸距離，達到平衡能量損耗的目的。

**表 1 Notation**

Symbol	Definition
N	The number of sensor nodes
M	The number of relay nodes
K	The number of Voronoi vertices
T	The transmission radius of sensor and relay nodes
$U_{relay}$	The set of relay nodes under consideration
$U_{vertex}$	The set of vertices under consideration
C	Sink
$S = \{ s_1, \dots, s_N \}$	The set of sensors
$R = \{ r_1, \dots, r_M \}$	The set of relay nodes
$V = \{ v_1, \dots, v_K \}$	The set of Voronoi vertices
X	Variable node, $X \in C \cup S \cup R \cup V$
$D(X_i, X_j)$	The distance between $X_i$ and $X_j$ node
Nexthop(X)	The node which relay data for the X node

表 1 是我們所使用的符號及其意義，我們所提出的中繼點設置法如圖 3、圖 4 所述：

我們的演算法首先必須得知 sensor 的數量及位置，再由網路建置者利用演算法算出所需的 relay nodes 的數量及位置，藉此完成完整的網路連結。以下將以多個範例圖來說明我們所提出的中繼點演算法如何用於偵測網路，並詳細說明完整設立過程：

第一步利用所得知的 sensor network topology(圖 8(a))，將 sensor 的點作為 sites 去計算出 Voronoi diagram 得知所有 Voronoi vertices 集合 V，我們將利用這個集合 V 來決定 relay node 擺放的位置。

第二步我們開始尋找合適的 Voronoi vertex 來設立 relay node(圖 8(b))，依照 sensor 距離 sink 的遠近關係，由遠而近我們依序判斷在 sensor 的傳輸範圍內是否有 relay node 可供轉傳資料，若有就考慮下一個 sensor，若是沒有則分成二種建立方式：第一種是找尋距離本身最近且較 sensor 更接近 sink 的 Voronoi vertex 設立 relay node，稱為 our scheme MIN。第二種則是在傳輸距離內找尋距離本身最遠且較 sensor 更接近 sink 的 Voronoi vertex 設立 relay node，稱為 our scheme MAX。二種方式將產生不同的結果，我們會在第四章進行相關討論。

會用由遠而近的順序來建立 relay node 主要原因是為了提高 relay node 對範圍內 sensor 的貢獻，若是由近而遠的順序來建立 relay node 則會如同圖 5 所示，relay node 範圍內的 sensor 純大部分會有

**Proposed algorithm**


---

1. Use  $S$  as sites and find the Voronoi vertices  $V$ .  
 2. Sort the elements of the set  $S$  by decreasing  $D(s_i, C)$ .  
 Let  $S' = \{ s'_1, \dots, s'_N \}$  be the sorted set.  
 For  $i = 1$  to  $N$  {  
 $U_{relay} = \{ x | D(s'_i, x) \leq T, x \in R \cup C \}$   
 if  $U_{relay} = \emptyset$   
 $U_{vertex} = \{ v | D(s'_i, C) > D(v, C), v \in V \}$   
 Find the minimum / maximum  $D(s'_i, v)$ ,  
 $v \in U_{vertex}, D(s'_i, v) \leq T$   
 (if  $v = \emptyset$ , find  $v$  under  $2 \cdot T, 3 \cdot T, \dots$ , until  $v \neq \emptyset$ )  
 Place a new relay node  $r$ , to the position of  $v$ .  
 Add  $r$  to the set  $R$ . Call Insert( $s'_i, r$ ).  
 }  
 $M_{step2}$  = the number of elements in the set  $R$ .  
 3. Sort the elements of the set  $R$  by increasing  $D(r_i, C)$ .  
 Let  $R' = \{ r'_1, \dots, r'_{M_{step2}} \}$  be the sorted set.  
 For  $i = 1$  to  $M_{step2}$  {  
 $U_{relay} = \{ x | D(r'_i, C) > D(x, C), x \in R \cup C \}$   
 Find the minimum  $D(r'_i, x), x \in U_{relay}$   
 Let  $n = \left\lceil \frac{D(r'_i, x)}{T} \right\rceil$ ,  
 $U_{relay} = U_{relay} - \{ x | D(r'_i, x) > n \cdot T, x \in U_{relay} \}$   
 Find the minimum  $D(x, C), x \in U_{relay}$ .  
 Call Insert( $r'_i, x$ ).  
 }

---

**圖 3 Proposed algorithm****Insert( $s, d$ )**

- 
- Let  $y_0 = s, y_{n+1} = d, n = \left\lfloor \frac{D(y_0, y_{n+1})}{T} \right\rfloor$
  - Insert  $n$  new relay nodes ( $y_1, \dots, y_n$ )  
on the segment  $\overline{y_0 y_{n+1}}$ ,
- $$\overline{y_0 y_1} = \overline{y_1 y_2} = \dots = \overline{y_n y_{n+1}} = \frac{D(y_0, y_{n+1})}{n + 1}$$
- Add  $y_1, \dots, y_n$  to the set  $R$ .
- For  $i = 0, 1, 2, \dots, n$   
 $\text{Nexthop}(y_i) = y_{i+1}$
- 

**圖 4 Insert algorithm**

更近的轉傳對象，而不會選擇新設的 relay node，如此惡性循環下去將會大幅提高所需的 relay node 個數。利用由遠而近的方式可避免此情況的產生，且遠方的 sensor 勢必是必須指派 relay node 來轉傳資料，優先考慮這些遠方的 sensors 將可提高 relay node 的貢獻並降低所需的個數。

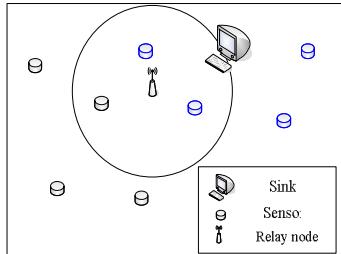


圖 5 設立中繼點示意圖

第三步我們必須確保 relay nodes 之間的連結，能夠將 sensor 的資料回傳到 sink(圖 8(c))，因此依照 relay node 距離 sink 的遠近關係，我們由近而遠依序判斷是否需要 additional relay node 來幫助轉傳資料，不論需不需要 additional relay node 皆在範圍內找尋最接近 sink 的 relay node 幫助回傳。最後 sensor 可以利用最短路徑法來選擇 relay node 作為轉傳對象，完成網路連結(圖 8(d))。

我們採用由近而遠的順序對每個 relay node 做考量，主要原因是為了提高這些 additional relay nodes 的貢獻，圖 6 中的數字代表 additional relay node 所建立的順序。由圖 6 左可發現由外圍向 sink 方向建立 additional relay node 將只是單純的 forward 資料給其它 relay node，確保資料能送到 sink，但在圖 6 右中的 additional relay node 除了確保資料能送到 sink 外，還能提供給之後的 additional relay node 當轉傳的對象，如此便可以利用這些 additional relay node 來減少轉傳 hop 數，提高傳輸的效率。

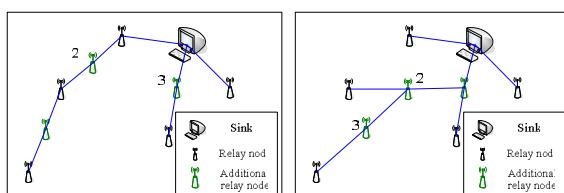


圖 6 左為由外圍向 sink 建立的設立結果，右為由 sink 往外圍建立的設立結果

Insert algorithm 是為了確保 source 及 destination 之間能夠傳遞資料，若是二點間的距離超過傳輸範圍  $T$ ，則先計算出所需適當數量的 relay nodes，將這些 relay nodes 等距離的放置在二點間，如圖 7 所示。

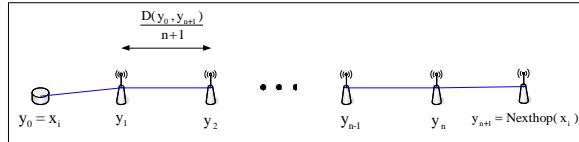


圖 7 Insert algorithm 安插節點示意圖

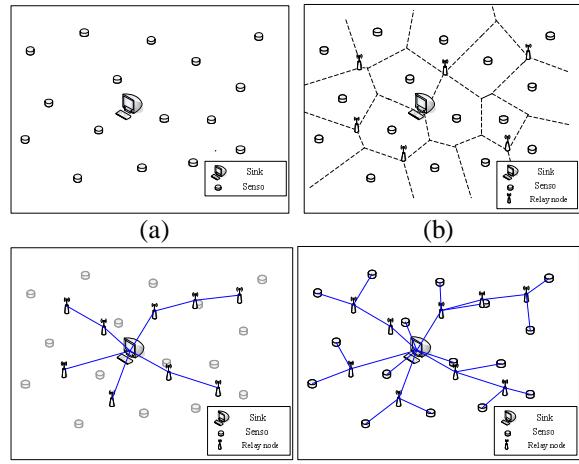


圖 8 中繼點建立示意圖

### 3.3.2 Minimum set cover

[5][7]所提出的中繼點建置演算法，為了方便閱讀以下皆以 Minimum set cover 演算法代稱之。Minimum set cover 首先先找出能被最多數節點傳輸範圍所覆蓋的區域(densest region)，再從這些區域裡找出最少數目的集合，且此集合必須能連結到所有 sensor，最後在這些區域內設立 phase1 relay node，而 sensor 則是連結到距離最近的 phase1 relay node，再經由 phase2 relay node 連結到中控端，完成完整連結。

### 3.3.3 Predetermined location

[8]所提出的中繼點建置演算法，我們一樣以 Predetermined location 演算法代稱之。Predetermined location 將 sensor 所分佈的區域切割為正方形的格狀圖，這些正方形上的頂點為可能的中繼佈置點，再經演算法計算如何佈置可以達到最低電力消耗及幫助 sensor 傳遞資料，以達最佳網路效能。

### 3.3.4 None of relay node

Sensor 在自身傳輸範圍內選取距離中控端最近的 sensor 建立連結以幫助轉傳資料，不另外設立中繼點，每個 sensor 皆以此方式連結至中控端。這是這種不依靠 relay nodes 以 sensor 來轉傳資料的方式，我們以 None of relay node 來代稱之。

## 4 參數及效能模擬

我們所提出之中繼點演算法利用軟體進行計

算，並依其計算結果與其它演算法互相比較。

#### 4.1 基本假設

我們採用 Slotted Aloha 來進行實驗模擬，假定節點間的時間同步是完美的，模擬過程中沒有任何外在環境因素干擾進行，節點會持續完成它的工作直到電力消耗完畢。環境參數設定為在一邊長為一百公尺的正方形場地上，隨機佈置多個 sensor 於其上並運作，佈置方式為中央集中式，意即愈靠中心地帶將會有較多 sensor 佈置其上。令所有 sensor 及中繼點能量為 20J，網路頻寬 1Mb/s，傳送的資料封包為 10kbits，每次傳送資料所需耗損的能量  $P_t$  及  $P_r$  由(3)(4)式決定，

$$P_t(r, d) = r \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 d^n) \quad (3)$$

$$P_r(r) = r \cdot \beta \quad (4)$$

參考 [9] 我們設定傳輸參數如下： $\alpha_1 = 50nJ/bit$ 、 $\alpha_2 = 10pJ/bit/m^2$ 、 $\beta = 50nJ/bit$ ，sensor 偵測、傳輸範圍皆為 15 公尺，而偵測所耗損的功率為  $P = 5 \times 10^{-3}J$ 。我們以上述參數對 sensor 個數為 50, 55, ..., 100 時，分別以 C 程式進行多次模擬並於下節進行結果分析。

#### 4.2 模擬結果

##### 4.3.1 Total number

圖 9 可看出隨著節點的增加，所需的 relay node 的數目也相對的增加，其中 minimum set cover 演算法的節點數最高，推測是由於 phase 2 relay node 並不與其它 relay node 相互配合回傳資料，每個 phase 1 relay node 需要額外新增自己的 phase 2 relay node，而其它的方法皆會互相幫助回傳需要新增節點的機會相對少很多。

##### 4.3.2 Energy consumption

在能量消耗方面分為 sensor、relay 及二者總和三部分來觀察，在同樣的 traffic load 的單位時間內我們測量能量消耗的狀況，結果如下圖 10、11、12。

Sensor 部分可看出由於 Predetermined location 演算法主要還是依靠 sensor 作轉傳因此能量消耗較多，而 minimum set cover 演算法的特性是使用較少 phase1 relay node 作為中繼點，相對來說 sensor 之間的 collision 機會也較高，因此能量消耗也不少。而 our scheme MIN 及 our scheme MAX 法則由於 MIN 法 collision 機會較低，因此能量消耗最少。

Relay node 部分則是剛好相反，Predetermined location 演算法對 relay node 的依賴性較低，能量的消耗最少，而另外三者皆需依靠 relay node 來回傳資料到 Sink，因此能量的消耗相對較高。

在二者總和部分我們可以看出除了 minimum set cover 演算法之外，其它的演算法皆比 none of relay node 時要來得省電，於 sensor 節點數 100 時 our scheme MIN 法能降低 6.27% 的電力消耗，推測原因是我們利用 Voronoi diagram 的特性，在 sensor 較擁塞的區域給予較多中繼點來平衡與其相連的 sensor 數，在降低 collision 機會之外也降低了回傳的 hop 數，因此我們能有效降低電力消耗。

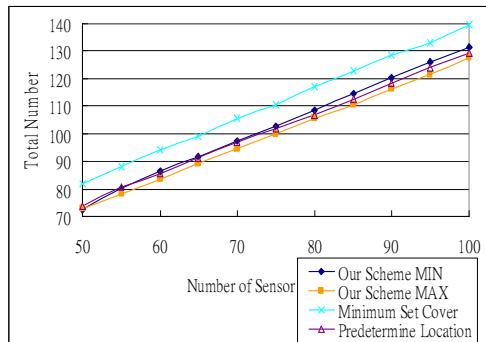


圖 9 Total Node Number

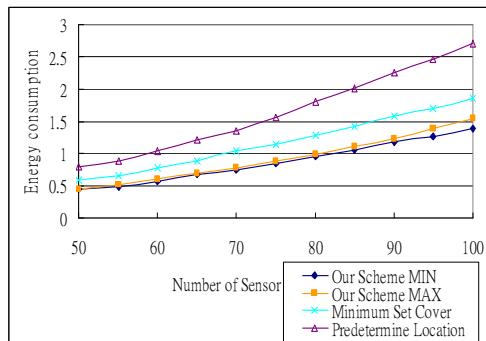


圖 10 Energy consumption-sensor

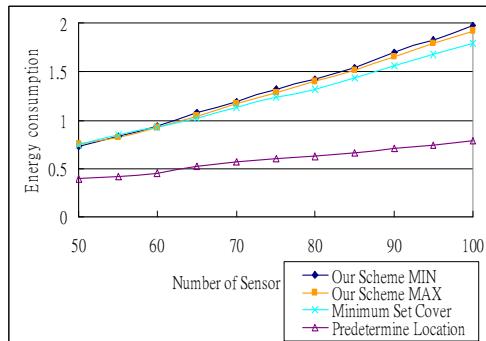


圖 11 Energy consumption-relay node

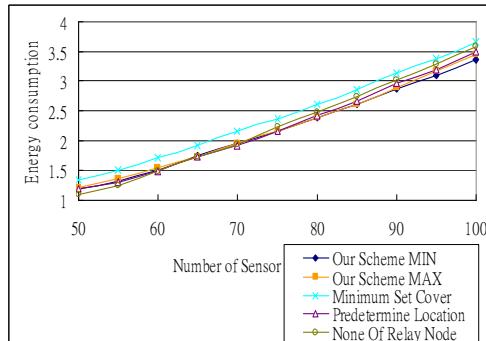


圖 12 Energy consumption-total

### 4.3.3 Delay time

我們定義 delay time 為從 sensor 傳出封包到 sink 收到為止所經過的時間，模擬結果如下圖 13 所示。可以發現由於 minimum set cover 演算法的特性造成 sensor 間的競爭十分激烈，因此 delay time 一直居高不下，而 none of relay node 則是當節點數增加，某些較接近 sink 的節點將會造成嚴重的 collision，導致 delay time 的快速上升。Predetermined location 演算法則是有 relay node 分擔流量，delay time 較 none of relay node 要來得低，而 our scheme MIN 法則可以更為有效的分擔流量，於 sensor 節點數 100 時較 none of relay node 降低 4.93% 的回傳時間，當節點數增加依舊能有效降低 delay time。

### 4.3.4 Average Link Length

下圖 14 顯示在不同 sensor 數之下，節點間連結長度的平均值，但由於隨機分佈 sensor，使得數據分佈結果有點不穩。其中可看出 none of relay node 隨著節點增加，平均的連結長度會隨著增加，這是由於範圍內出現較接近 sink 節點的機率提高所導致的結果，而 Predetermined location 演算法由於也是以 sensor 為主要轉傳對象，因此平均連結長度也會隨節點數增加。其它的演算法則是以 relay node 為主要轉傳對象，因此平均連結長度不會因 sensor 數目而有較大改變，但依舊可看出隨節點增加而有下降的趨勢，是由於節點分佈密度提高的結果。

## 5 結論

我們所提出的演算法利用 Voronoi diagram 的特性來佈置中繼點，能夠有效降低回傳的電力損耗，our scheme MAX 雖能以較低數目的中繼點建構網路，但較 our scheme MIN 法有較高的能量消耗及 delay time，在不考慮數量成本之下，使用 our scheme MIN 法來建構網路是較適當的。在提高 lifetime 下提供低延遲的中繼機制，更能提供較高的 throughput，在偵測資料的傳遞上給予高度的保障。另外由於較低的電力消耗，使得電力使用上更有效率。未來將會繼續思考改善演算法及測試網路效能，並在過程中逐步研究、改善架構上的缺失，以提升在偵測網路上的競爭力。

## 參考文獻

- [1] A. Kashyap, S. Khuller, M. Shayman, "Relay Placement for Higher Order Connectivity in Wireless Sensor Networks", IEEE INFOCOM 2006, Barcelona, Spain
- [2] A. Kashyap, F. Sun, M. Shayman, "Relay Placement for Minimizing Congestion in Wireless Backbone Networks", WCNC 2006, Las Vegas
- [3] David Culler, Deborah Estrin, Mani Srivastava, "Overview of sensor networks," IEEE Computer, Special Issue in Sensor Networks, Aug 2004
- [4] Jukka Suomela, "Approximating relay placement in sensor networks", Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks, October 2006, Pages: 145 – 148
- [5] K. Xu, Q. Wang, H. Hassanein, G. Takahara, "Optimal Wireless Sensor Networks (WSNs) Deployment: Minimum Cost with Lifetime constraint", IEEE WiMob 2005, Montreal, QC, Canada, August 22-24, 2005, pp. 454-461
- [6] Maulin Patel, R. Chandrasekaran, S. Venkatesan, "Energy efficient sensor, relay and base station placements for coverage, connectivity and routing", IPCCC 2005, 24th IEEE International, April 2005, page(s): 581- 586
- [7] Quanhong Wang, Kenan Xu, Takahara, G. Hassanein, H, "On lifetime-oriented device provisioning in heterogeneous wireless sensor networks: approaches and challenges", Network, IEEE, May-June 2006, page(s): 26- 33
- [8] S. Coleri Ergen and P. Varaiya, "Optimal placement of relay nodes for energy efficiency in sensor networks.", IEEE ICC2006
- [9] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, October 2002, pp. 660-670

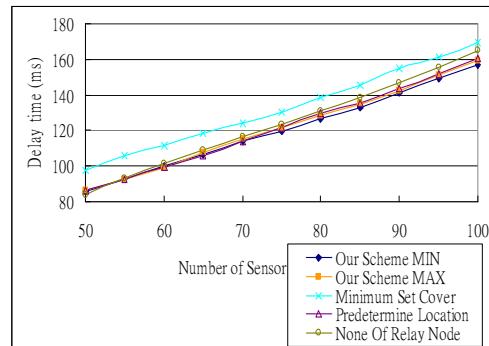


圖 13 Delay time

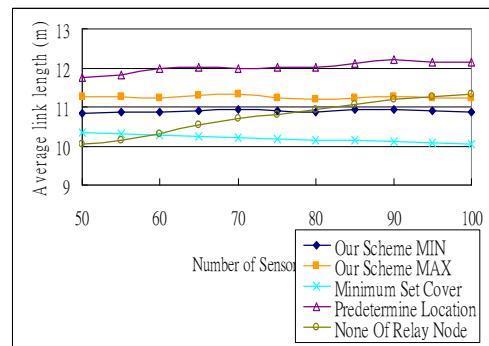


圖 14 Average Link Length