

# 可充電無線感測網路最佳化充電器佈置

## Optimized Charger Deployment for Wireless Rechargeable Sensor Networks

Ji-Hau Liao (廖基豪)

國立中央大學資訊工程所  
jigoxd@gmail.com

Wei-Ting So(索維廷)

國立中央大學資訊工程所  
985402001@cc.ncu.edu.tw

Jehn-Ruey Jiang(江振瑞)

國立中央大學資訊工程所  
ncujjr@gmail.com

### 摘要

可充電無線感測網路(Wireless Rechargeable Sensor Network, WRSN)中,可適時利用無線充電技術(Wireless Charging Technology)補充感測節點(Sensor Node)的電力,使整個感測網路得以持續運行,而具有永續性(Sustainability)。在WRSN中,有兩個重要問題(1)如何有效的佈置充電器而能以最少的充電器覆蓋所有的感測節點;(2)如何制定合宜的充電器工作週期(Duty Cycle)。本論文針對可佈置於固定高度格子點(Grid Point)上具指向性天線(Directional Antenna)的無線充電器(Wireless Charger),提出解決上述問題的三個演算法:(1)基於節點的貪婪圓錐選擇 NB-GCS (Node Based Greedy Cone Selecting)演算法:嘗試以個別節點相關聯圓錐為基礎,以貪婪方式選擇最小數量的充電器。(2)基於點對的貪婪圓錐選擇 PB-GCS (Pair Based Greedy Cone Selecting)演算法:嘗試以每對節點相關聯圓錐為基礎,以貪婪方式選擇最小數量的充電器。(3)DCS(Duty Cycle Scheduling)演算法:為了節省無線充電器的電力消耗,我們以感測節點的工作資訊來推算其耗電率,並根據感測節點回報的充電效益來制定出各個無線充電器的工作週期。

藉由模擬與時間複雜度分析,藉以比較PB-GCS演算法與NB-GCS演算法的效能,結果顯示PB-GCS演算法最佳化充電器數量的效果優於NB-GCS演算法,但NB-GCS有較低的時間複雜度。

**關鍵字:** 充電器佈置、工作週期、永續性

### 一、簡介

無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSN)是由多個感測節點(Sensor Node)、一個資料匯集節點(Sink)與一個基地台(Base Station, BS)所組成。感測節點的體積小,成本低廉,以電池供給電力,具備基本的計算能力與無線通訊能力,並且能感知如溫度、濕度等等環境資訊。使用者將感測節點佈置於監測區域內,當感測節點偵測到事件時,感測資料在感測節點之間以多跳(Multi-Hop)的方式回傳到資料匯集節點,再由資料匯集節點回傳給基地台,以便使用者掌握監測環境的情形。近年來,由於硬體和無線通訊技術發展成熟,無線感測網路已經有許多應用場景,如阻障覆蓋(Barrier Coverage)[1]、室內外

環境監測、災害警報系統等等。儘管無線感測網路已有許多應用場景,但是在各種應用場景之下,皆會面臨一個共同問題,由於無線感測網路的規模龐大,當感測節點的電池耗盡時,則難以將這些沒電的感測節點回收再使用,而造成資源的浪費與環境汙染等問題。

有學者提出了可充電無線感測網路(Wireless Rechargeable Sensor Network, WRSN)[2]的概念,它利用能量收集(Energy Harvesting)的技術將太陽能、風力、射頻(Radio Frequency, RF)等能量,經由轉換器(Converter)將收集到的能量轉換成直流電(DC),藉此補充感測節點的電量。一般而言,能量收集可大致區分為兩類:

I. 集約式能量收集(Intensive Energy Harvesting):先將電力先送到無線充電器(Wireless Charger),再由無線充電器將能量發送到電力接收器(Power Receiver),此過程稱為無線充電(Wireless Charging) [3]。

II. 粗放式能量收集(Non-Intensive Energy Harvesting):直接將感測節點裝上能量收集裝置,如太陽能板[4],使其獨立進行能量收集。

由於粗放式能量收集容易受天氣等環境因素影響,其能量收集的過程較難控制,反觀集約式能量收集,事先將電力送到無線充電器,然後由無線充電器將能量發送到電力接收器,因此易於人為控制,而具有「當省則省,當用則用」的優勢。基於上述原因,本論文針對集約式能量收集進行探討,針對無線充電器的佈置,嘗試最佳化(Optimize)無線充電器的數量以降低成本,另外我們制訂每個無線充電器的工作週期(Duty Cycle),以降低無線充電器的電力消耗,並確保所有的感測節點在每個時間點皆有足夠其運作的電量,使得WRSN具有永續性(Sustainability)。

在集約式能量收集的領域裡,常見的無線充電技術有使用線圈的磁力共振(Magnetic Resonance)[5]與射頻無線充電[6]。在符合美國聯邦通信委員會(Federal Communications Commission, FCC)[7]的規範下,磁力共振的充電距離不到2公分,且無線充電器與接收器的線圈必須互相對準才能有效充電,所以充電器通常被做成平板狀,其充電模式為一對一充電,此技術常用於手機的無線充電上;而射頻無線充電的充電距離可達數公尺,當感測節點的密度高時,其充電範圍可涵蓋多個感測節點,因此比較適合用於無線感測網路上。

許多探討 WRSN 的文獻其場景是在二維平面上討論，如[8][9]等等，但實際上 WRSN 的場景是在三維空間中，此外，充電效益的評估多基於福利斯傳輸方程式(Friis Transmission Equation)[10]，但實際上無線充電會受到屏蔽效應(Shadowing Effect)、多重路徑效應(Multipath Effect)、其他射頻干擾(Interference)等因素，導致實際充電效益與基於理論得出的值有所出入。

由於充電效益會受到屏蔽效應、多重路徑效應、其他射頻干擾，而另一方面 FCC 的規範限制了無線充電器的電力輸出功率，就現有的設備 Powercast 研發的 P2110-EVAL-02 而言，其無線充電器採用天線增益(Antenna Gain)較高、穿透性較佳的指向性天線(Directional Antenna)盡量降低上述不利於無線充電的因素。考慮研究的合理性與可行性，本論文採用裝設指向性天線的無線充電器。為了最佳化成本並達到無線感測網路的永續性，我們的目標可分成下列兩個：

目標一：最佳化無線充電器的數量。

目標二：制定出各個無線充電器的工作週期，以節省電力。

其中，目標一為建立永續 WRSN 事前的規劃；目標二是建立永續 WRSN 事後的維護。

本論文的其他部分將分成以下章節：第二章為背景知識；第三章為假設與解法；第四章為模擬結果；最後在第五章提出結論與未來展望。

## 二、背景知識

能量收集是一種收集環境中的能量並轉換成電能的機制，一般而言，能量收集的機制可分為以下三個部分，其示意圖可參考圖 1[11]。

- I. 能量收集器(Energy Harvester): 負責收集能量，如天線、太陽能板等等。
- II. 電力管理機制(Power Management): 負責能量轉換過程的控制與轉換後電能的分配。
- III. 能量儲存裝置(Energy Storage): 負責儲存電能，如電池、大容量電容等等。

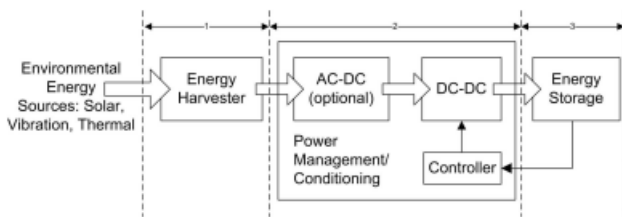


圖 1: 能量收集機制示意圖[11]

若將能量收集依照其來源做分類，可分為熱能(Thermal Energy)、輻射能量(Radiant Energy)和機械能(Mechanical Energy)三大類，圖 2 為文獻[11]中所整理的樹狀圖，而最底層為這三大類中常見的能量收集技術，本論文所採用的射頻無線充電屬於輻射能量的範疇，因此以下介紹幾個常見的輻射能量收集技術。

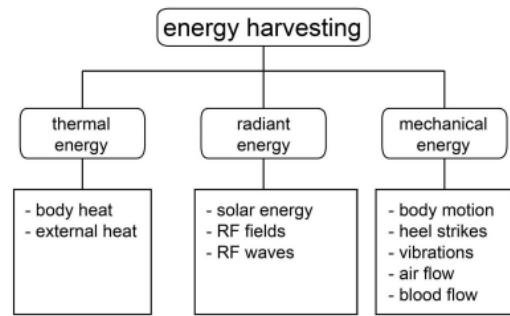


圖 2: 依照來源將能量收集做分類[11]

太陽能(Sola Power)能量收集: 太陽能是利用光生伏特效應(Photovoltaic Effect)將光能轉換為電能。所謂的光生伏特效應，是指在光線照射下的光伏半導體，其內部會產生電子-電洞對，電子和電洞因光伏半導體的 P-N 界面產生的內建電場作用而分離，朝相反方向移動，因而形成了正負兩極的現象。太陽能的優點在於能量來源為太陽，故取之不盡用之不絕，在室內環境中可以利用日光燈、氬氣燈等人為的光源，而太陽能主要的缺點在於易受天氣、障礙物等環境因素干擾，另外，太陽能板的製造高，製作過程易造成環境汙染。環境射頻(Ambient RF)能量收集: 這類的能量收集技術是收集環境中的射頻能量例如 Wi-Fi 訊號、手機基地台的訊號等等[12]，並將其轉換成電能，射頻能量收集其主要原理類似老式礦石收音機的收音原理，礦石收音機本身沒有直流電源，它利用天線接收廣播電台發送的電磁波，經過檢波後產生音頻電流。由於射頻的穿透性較可見光強，因此相較於太陽能，射頻能量收集較不易受障礙物、天氣等環境因素干擾。蓄意的射頻(Intentional RF)能量收集: 蓄意的射頻[3]是指射頻的來源是人刻意提供的，如 Powercast 所開發的射頻無線充電技術，其能量來源為射頻無線充電器、被動式 RFID，其能量來源為讀取器所發出的射頻等等，而前面所提到的環境射頻其能量來源是本來就存在於環境之中，無須刻意提供。

## 三、假設與解法

### 3.1 假設與問題定義

不失一般性地將 WRSN 的分佈空間視為長方體，其長為  $L$ 、寬為  $W$ 、高為  $H$ ，為了盡量避免因障礙物的屏蔽效應導致充電效益降低之情形發生，我們將無線充電器佈置於高度為  $H$  之網格(Grid)上的格子點(Grid Point)上，網格的邊長為  $G$ ，每一個格子點可佈置數個無線充電器，而感測節點可位於地面或物體表面，所有的感測節點皆為同質性(Homogeneity)，圖 3 為場景的示意圖。

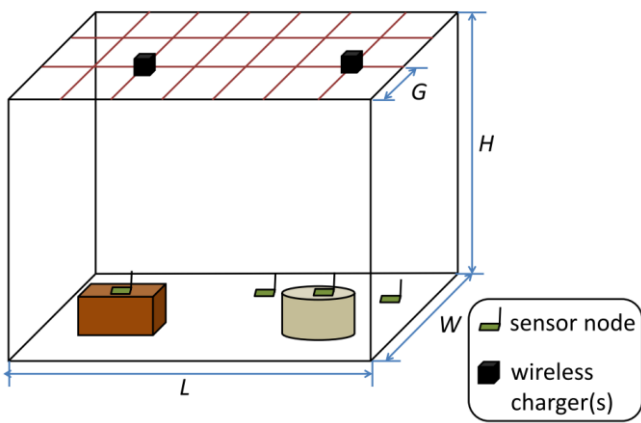


圖 3: 場景示意圖

不失一般性地假設無線充電器的有效充電區域 (Effective Charging Area), 為圓錐形 (Cone), 取一法向量  $\vec{N}$ , 其方向平行於圓錐的對稱軸、長度為有效充電距離  $R$ , 令角度門檻值 (Threshold)  $\theta$  為對稱軸與圓錐側面所夾的銳角, 如圖 4。

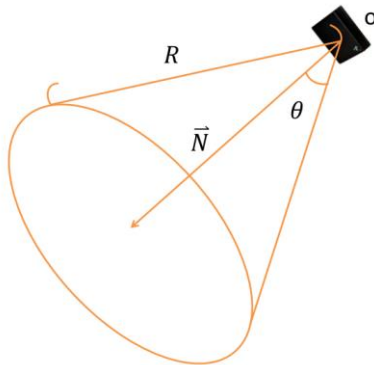


圖 4: 有效充電區域及其參數

假設 BS 知道每個無線充電器的有效充電距離  $R$  與角度門檻值  $\theta$ 、每個感測節點的位置及其工作負載。感測節點以週期性的方式偵測環境資訊, 並回報資訊給 BS, 每個感測節點的電池容量皆為  $B$ 。無線充電器、感測節點和 BS 能彼此交換資訊。每個感測節點可以測量自己被充電後的電量增加率。

本論文要解的問題為:

問題一: 如何有效的佈置充電器盡可能以最少的充電器覆蓋所有感測節點。

問題二: 如何制定合宜的充電器工作週期 (Duty Cycle)。

為了最佳化建立永續的 WRSN 之成本, 我們的目標可分成下列兩個:

目標一: 最佳化無線充電器的數量。

目標二: 制定出各個無線充電器的工作週期, 以節省電力。

其中, 目標一為建立永續 WRSN 事前的規劃; 目標二是建立永續 WRSN 事後的維護。

### 3.2 最佳化無線充電器的數量

本節分成兩個小節, 首先於 3.2.1 小節分析出網絡邊長的限制, 然後於 3.2.2 小節提出兩個貪婪的啟發演算法,

分別為基於節點的 NB-GCS (Node Based Greedy Cone Selecting) 演算法與基於點對的 PB-GCS (Pair Based Greedy Cone Selecting) 演算法嘗試最佳化無線充電器的數量。

#### 3.2.1 網絡邊長的限制

對於任意感測節點  $s$  而言, 取其座標位置  $(x, y, z)$  為球心, 有效充電距離  $R$  為半徑, 可得一球體  $S$ , 而  $S$  與佈置平面截出一半徑為  $r = \sqrt{R^2 - (H - z)^2}$  之截圓  $o$ , 則根據球體在集合論的定義可得知, 對於截圓  $o$  所包含的任意一點  $P$  而言,  $\overline{OP} \leq R$  皆成立, 所以只要確保截圓  $o$  至少包含一個格子點  $g$ , 因為  $\overline{og} \leq R$ , 所以只要在  $g$  上取適當方位佈置無線充電器,  $s$  就能有效被充電。若  $z = 0$ , 則  $r$  有最小值  $r_m$ , 即  $r_m = \sqrt{R^2 - H^2}$ , 此時截圓  $o$  的面積最小, 故包含格子點的數目最少, 為最差情形, 參考圖 5。

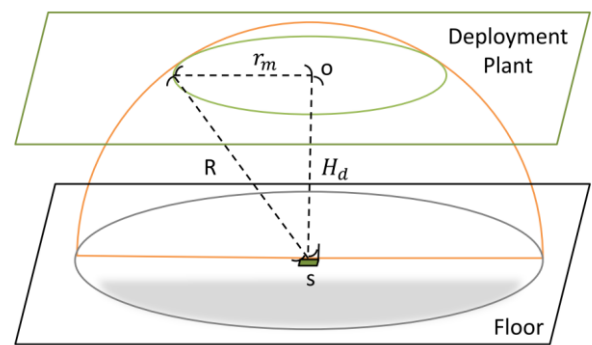


圖 5: 截圓面積最小的情形

接著我們以上一段的最差情形來分析網絡邊長的限制, 對於網絡中的任意一點  $P$  而言,  $P$  與格子點的最長距離為  $\frac{G}{\sqrt{2}}$ , 可參考圖 6, 所以若不等式  $G \leq \sqrt{2}r_m$  成立, 則意味著網絡中至少存在一個格子點  $g$  落在截圓  $o$  裡面, 所以對於任意一感測節點  $s$  皆至少存在一個格子點  $g$ , 只要在  $g$  上取適當方位佈置充電器,  $s$  便能有效被充電。

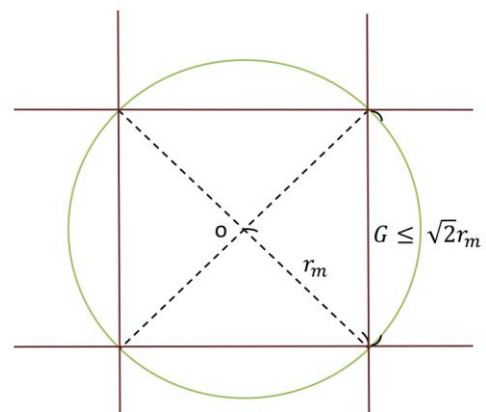


圖 6: 網絡邊長的條件限制

然而對於某些感測節點而言, 可能因為環境因素或工作量龐大, 而需要超過一個無線充電器才能滿足其充電效益的需求, 而不等式  $G \leq \sqrt{2}r_m$  成立僅能滿足截圓  $o$

至少包含一個格子點，因此我們進一步討論最小截圓半徑  $r_m$  與網格邊長  $G$  的關係，最小截圓半徑  $r_m$  必須滿足不等式  $G \leq r_m$  才能使截圓  $o$  包含至少兩個格子點，其證明在定理 1，當  $G$  的值夠小時，截圓所含蓋的格子點數量夠大，可利用計算矽晶圓上的晶粒數的公式[13]計算出每個截圓至少包含  $\frac{\pi r_m^2}{G^2} - \frac{2\pi r_m}{\sqrt{2}G}$  個格子點。

Theorem 1: 球體  $S$  與佈置平面的最小截圓  $o$  的半徑  $r_m$  必須滿足不等式  $G \leq r_m$  才能使截圓  $o$  包含至少兩個格子點。pf:

因為滿足  $G \leq r_m$  即滿足  $G \leq \sqrt{2}r_m$ ，所以最小截圓  $o$  至少包含一個格子點  $g$ ，如圖 7，以  $g$  為圓心  $r_m$  為半徑可得一圓  $g$  (為方便起見，以圓心命名此圓)，與最小截圓  $o$  相交於兩點  $A$  與  $B$ ，因為圓  $o$  與圓  $g$  的半徑相等，所以圓  $g$  上的小圆弧  $\widehat{AB}$  所對應到的圓心角  $\angle AgB \geq 120^\circ$ ，因為在方形網格中，橫邊與縱邊的夾角為  $90^\circ$ ，所以在小扇形區域  $gAB$  中(包含邊界)至少存在一個格子點  $g'$ ，證明完畢。

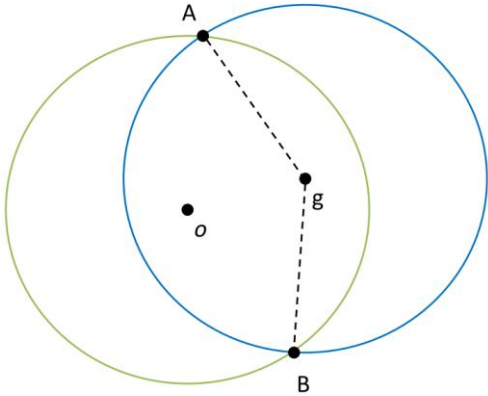


圖 7: 最小截圓與格子點

### 3.2.2 無線充電器的佈置

以佈置平面上的格子點為圓錐頂點，以  $m$  個圓錐覆蓋所有的感測節點，此問題為集合覆蓋問題(Set-Covering Problem, SCP)的一種，故此問題為 NP-hard。我們在本小節中，提出兩個貪婪的啟發演算法，分別為基於節點的 NB-GCS (Node Based Greedy Cone Selecting) 演算法與基於點對的 PB-GCS(Pair Based Greedy Cone Selecting)演算法嘗試最佳化無線充電器的數量。

令  $n$  個感測節點的集合為  $SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ，令  $p$  個格子點所形成的集合為  $GP = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ ，其中  $p = (\lfloor \frac{L}{G} \rfloor + 1) \times (\lfloor \frac{W}{G} \rfloor + 1)$ 。為了利於 NB/PB-GCS 的執行，我們事先分別提出兩個產生候選圓錐的演算法 NB/PB-CCG(Node Based/Pair Based Candidate Cone Generating)，所謂的候選圓錐係指由數個圓錐所構成的集合  $C = \{c \mid \exists s \in SN, s \text{ is covered via } c.\}$ ，而 NB/PB-GCS 演算法以貪婪法於每次迭代(Iteration)時自  $C$  中選出包含最多尚未被覆蓋的感測節點之圓錐，並得出其解集合  $C^* \subseteq C$ ，以下我們分別說明 NB-CCG 與 PB-CCG 的運作。

#### Algorithm : Node Based Candidate Cone Generating (NB-CCG)

- Input:  $SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, g, R, \theta$
- Output:  $C$

以  $g$  為球心  $R$  為半徑得一球體  $S$ ，以下分成兩大情形討論：

- Case 1: 球體  $S$  中沒包含任何感測節點，不需要產生候選圓錐，結束。
- Case 2: 若球體包含  $k$  個節點  $s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_k}$ ，則分別取  $k$  個單位向量  $\vec{u}_1 = \frac{\vec{gs}_{i_1}}{\|\vec{gs}_{i_1}\|}, \vec{u}_2 = \frac{\vec{gs}_{i_2}}{\|\vec{gs}_{i_2}\|}, \dots, \vec{u}_k = \frac{\vec{gs}_{i_k}}{\|\vec{gs}_{i_k}\|}$ ，並令這  $k$  個單位向量為候選圓錐對稱軸的方向向量，然後依序從  $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, k$ ， $\phi(\vec{u}_i, \vec{u}_j) \leq \theta, j \neq i$ ，則  $\vec{u}_i = \vec{u}_i + \vec{u}_j$ ， $\vec{u}_i = \frac{\vec{u}_i}{\|\vec{u}_i\|}$ ，反覆進行，直到以  $\vec{u}_i$  為對稱軸方向向量的候選圓錐所覆蓋的感測節點數量不再增加或  $s_{i_k}$  不再圓錐中(退回上一個圓錐的法向量並結束)。

分析:

- 對於任意格子點  $g$  而言，以  $g$  為球心  $R$  為半徑得一球體  $S$ ，假設  $S$  包含  $k$  個感測節點，因為在 NB-GCS 演算法中取  $k$  個方向向量  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_k$  作為候選圓錐的方向向量，所以以  $g$  為頂點所產生的候選圓錐，其數量的量級為  $O(k)$ 。
- 假設分別以  $p$  個格子點為球心， $R$  為半徑所得出的  $p$  個球體  $S_1, S_2, \dots, S_p$  分別覆蓋了  $k_1, k_2, \dots, k_p$  個感測節點，顯然  $\sum_{i=1}^p k_i = n$ 。我們由 I. 可得知，分別以此  $p$  個格子點為頂點所產生的候選圓錐，其數量的量級為  $O(k_1), O(k_2), \dots, O(k_p)$ ，因此由 NB-CCG 演算法所產生的候選圓錐，其數量的量級為  $\sum_{i=1}^p O(k_i) = O(\sum_{i=1}^p k_i) = O(n)$ 。

#### Algorithm : Pair Based Candidate Cone Generating (PB-CCG)

- Input:  $SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, g, R, \theta$
- Output:  $C$

以  $g$  為球心  $R$  為半徑得一球體  $S$ ，以下分三大情形來討論候選圓錐的產生方式：

- Case 1: 該球體沒包含任何感測節點，不需要產生候選圓錐，結束。
- Case 2: 該球體恰包含一個感測節點  $s$ ，則令圓錐對稱軸的法向量  $\vec{N} = \vec{gs}$ ，結束。
- Case 3: 該球體恰包含  $k$  個感測節點  $s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_k}$ ，則任兩相異感測節點  $s_i, s_j$ ，依照  $\vec{gs}_i$  與  $\vec{gs}_j$  的夾角  $\phi_{ij}$  可分為三種情形，而為了方便表示，我們以單位球面上的情形來探討之，參考圖 8、圖 9， $\vec{gs}_i$ 、 $\vec{gs}_j$  與圓錐在單位球面分別上截出點  $i, j$  與半徑為  $r$  的截圓，令  $d_{ij}$  表示  $i$  與  $j$  的直線距離，而我們依照圖 10 的方式產生候選圓錐，並將它們加入  $C$ ，反覆迭代到所有的感測節點皆被  $C$  中的候選圓錐覆蓋。

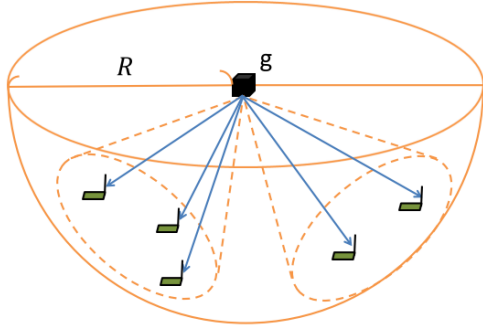


圖 8: 原本的情形

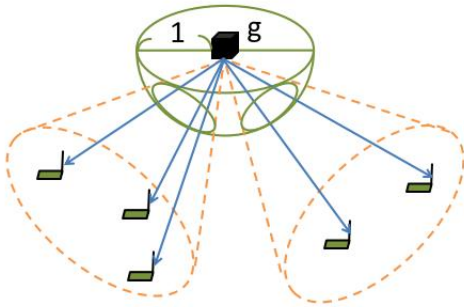


圖 9: 以單位球面解析之

(i)  $d_{ij} = 2r$       (ii)  $d_{ij} > 2r$       (iii)  $d_{ij} < 2r$

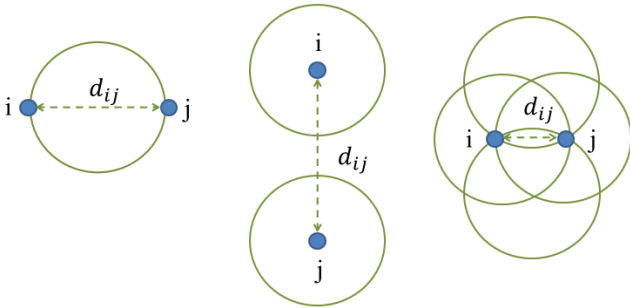


圖 10: 依照單位球面上的情形產生候選圓錐

● 分析:

- I. 對於任意格子點  $g$  而言，以  $g$  為球心  $R$  為半徑得一球體  $S$ ，假設  $S$  包含  $k$  個感測節點，因為在 PB-GCS 演算法中是以點對與  $g$  兩條連線之間的夾角關係產生候選圓錐，所以以  $g$  為頂點所產生的候選圓錐，其數量的量級為  $O(k^2)$ 。
- II. 假設分別以  $p$  個格子點為球心， $R$  為半徑所得出的  $p$  個球體  $S_1, S_2, \dots, S_p$  分別覆蓋了  $k_1, k_2, \dots, k_p$  個感測節點，顯然  $\sum_{i=1}^p k_i = n$ 。我

們由 I. 可得知，分別以此  $p$  個格子點為頂點所產生的候選圓錐，其數量的量級為  $O(k_1^2), O(k_2^2), \dots, O(k_p^2)$ ，因此由 PB-CCG 演算法所產生的候選圓錐，其數量的量級為  $\sum_{i=1}^p O(k_i^2) \leq O((\sum_{i=1}^p k_i)^2) = O(n^2)$ 。

有了 NB/PB-CCG 演算法之後，接著我們設計 NB/PB-GCS 演算法，假設  $SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  中每個感測節點有與其相對應的最小覆蓋需求  $CN = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ，意即對於感測節點  $s_i$  而言，其覆蓋度數 (Covering Degree)  $k_i$  必須滿足  $k_i \geq c_i$  才算被有效覆蓋，而此一參數可透過 BS 使用無線充電器的參數取最差情形的充電效益，與感測節點工作負載估算得出。

Algorithm : NB/PB-GCS (Pair Based Greedy Cone Selecting)

- Input:  $SN = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, CN = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, GP = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}, n, p$
- Output:  $C^*, m$

- Step 1: 將  $SN$  中所有的感測節點初始化為未標記。
- Step 2: 對於每個格子點  $g \in GP$  同時執行 NB/PB-CCG( $SN, g, R, \theta$ )，並將所產生的候選圓錐加入集合  $C$  中。
- Step 3: 從  $C$  中挑選出包含最多未達有效覆蓋的感測節點之候選圓錐，將該圓錐所包含的節點的覆蓋度數加 1，並將該圓錐加入  $C^*$  中。
- Step 4: 反覆 Step 3，直到  $SN$  中所有的感測節點皆被標記，並取  $m = |C^*|$ 。

● 分析:

- I. 當 NB-GCS 挑選候選圓錐時，因為 NB-CCG 產生的候選圓錐數量的量級為  $O(n)$ ，所以從這  $O(n)$  個圓錐中，以貪婪法選出圓錐並標記該圓錐所覆蓋的感測節點，每一次迭代前，必須先將候選圓錐依照其包含未達有效覆蓋的感測節點數量進行排序(由大到小)，故其時間複雜度為  $T \cdot O(n \log n) = O(Tn \log n)$ ，其中  $T$  為迭代次數。
- II. 當 PB-GCS 挑選候選圓錐時，因為 PB-CCG 產生的候選圓錐數量的量級為  $O(n^2)$ ，所以從這  $O(n^2)$  個圓錐中，以貪婪法選出圓錐並標記該圓錐所覆蓋的感測節點，每一次迭代前，必須先將候選圓錐依照其包含未達有效覆蓋的感測節點數量進行排序(由大到小)，故其時間複雜度為  $T \cdot O(n^2 \log n) = O(Tn^2 \log n)$ ，其中  $T$  為迭代次數。

3.3 制定無線充電器的工作週期

當無線充電器佈置完成後，開始制定各個無線充電器的工作週期，而為了方便討論，我們任取其中一個無線充電器  $WC$  來說明其運作，假設  $WC$  覆蓋  $k$  個感測節點，並且  $WC$  在週期  $T$  裡的工作時間(Duration)為  $t$ 。

- 感測器的耗電可以分成四種狀態：

- I. 睡眠狀態(Sleep mode): 於此狀態, 感測節點會將不必要的元件完全關閉, 只剩一小部分電量供給計時器(Clock), 到了特定時間, 感測節點便喚醒其他電路。
- II. 處理狀態(Process Mode): 於此狀態, 感測節點的工作包括收集感測資料與資料整合(Data Aggregation)。
- III. 傳輸狀態(Transmission Mode): 將資料傳送到其他感測節點。
- IV. 接收狀態(Reception Mode): 從其它感測節點接收封包。

因此, 感測節點的平均耗電量可經由下列式子計算:

$$I = C_{sleep}I_{sleep} + C_{proc}I_{proc} + C_tI_t + C_rI_r, \text{ 其中 } C_* \text{ 為各狀態所佔的比例, } I_* \text{ 為每個狀態的平均耗電率。}$$

根據 3.1 的假設, BS 知道所有感測節點的工作負載, 故能計算出每個感測節點的耗電率, 記為  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ , 另一方面, 感測節點的電量增加率  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ , 由於環境因素的干擾與電力接收器的性質, 而無法直接求得精確值, 故採取以感測節點回報給其所屬的無線充電器的方式, 方能求出較為精確的電量增加率。

基於上述的前提下, 我們由以下步驟求出 WC 的工作週期  $\frac{t}{T}$ 。

Algorithm 3: DCS (Duty Cycle Scheduling)	
●	Input: $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\}, T$
●	Output: $\frac{t}{T}$
➤	Step 1: BS 告知 WC 所覆蓋的感測節點 ID 及其工作負載。
➤	Step 2: 一開始, WC 打開 $T$ 時間, 而被充電的感測節點計算出平均電量增加率, 並在 $T$ 結束後回報給 WC。
➤	Step 3: WC 依照感測節點所回報的平均電量增加率取 $\alpha = \min\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$ 與 $\beta = \max\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\}$ , 為了使每個感測節點的電量不會出現負成長, 所以必須滿足不等式 $\alpha t + \beta(T - t) \geq 0$ , 故 $\frac{t}{T} \geq \frac{\beta}{\alpha + \beta}$ , 所以取工作週期 $\frac{t}{T} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$ 。

週期  $T$  的制定也須注意, 當週期  $T$  太長時,

$T - t = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}T$  也會隨著比例關係而變長。假設感測節點的電池容量為  $B$ , 若  $T - t$  太長, 則會出現感測節點的電量耗盡的情形, 因此必須滿足  $B \geq (T - t)\beta = \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta}T$ , 故  $T$  的制定必須滿足  $T \leq \frac{\alpha + \beta}{\alpha\beta}B$ 。

## 四、模擬結果

### 4.1 模擬參數設定

- 表 1: 模擬參數設定

場地大小	20 × 15 m <sup>2</sup>
感測節點數量	50~250
有效充電距離	3.0 m
角度門檻值	30°

佈置平面高度	2.3 m
網格邊長	1~1.8 m

- 無線充電器的參數是依照實驗結果所制定出來, 而網格邊長的上限則是依照 3.2.1 小節的分析結果, 為了確保每個感測節點至少有 2 個格子點可以佈置無線充電器的狀況下而制定出來的。
- 感測節點在 x-y 平面上遵守波松點過程(Poisson Point Process), 在 z 軸的座標是從 0 到 2.0 m 的亂數分布。
- 本章模擬皆採用 C++ 撰寫, 其原始碼可被 Linux 的 g++ 編譯。

### 4.2 理想情形與仿真情形的比較

圖 11 為在網格邊長  $G$  為 1 m 的前提下, 每個節點只需要 1-coverage, 此為理想情形, 從 50 個感測節點到 250 個感測節點, 分別使用 PB-GCS 與 NB-GCS 所需要的無線充電器平均數量, 並分別記作 1-PB-GCS 與 1-NB-GCS。

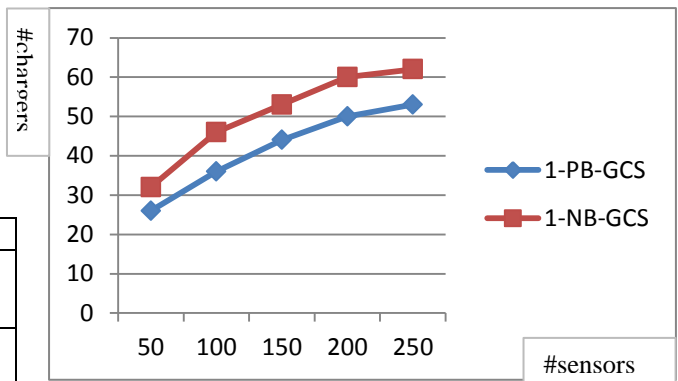


圖 11: 1-PB-GCS 與 1-NB-GCS

從圖 11 可看出, 當感測節點數量低時, 1-PB-GCS 與 1-NB-GCS 所需的無線充電器平均數量之差明顯, 但隨著感測節點數量的增加, 兩者之差逐漸趨於穩定。當感測節點的數量到 200 以上, 兩條折線其斜率逐漸趨於平緩, 此乃當節點密度高時, 每台無線充電器平均可覆蓋到較多個感測節點。

在網格邊長  $G$  為 1 m 的前提下, 有 80% 的感測節點僅需要 1-coverage 即可滿足其充電效益的需求, 而剩下 20% 的感測節點則至少需要 2-coverage 才能滿足其充電效益的需求, 此為仿真情形。圖 12 所表示的為仿真情形下, 從 50 個感測節點到 250 個感測節點, 分別使用 PB-GCS 與 NB-GCS 所需要的無線充電器平均數量。

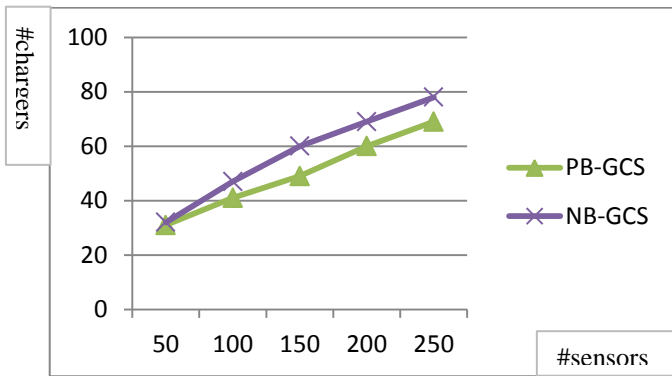


圖 12: PB-GCS 與 NB-GCS

從圖 12 可發現，PB-GCS 與 NB-GCS 的曲線隨著感測節點數量增加，其成長趨勢趨近於線性，由於至少需要 2-coverage 的感測節點數量占總數的 20%，所以當感測節點的數量增加時，至少需要 2-coverage 的感測節點數量也隨之增加，故所需要的無線充電器平均數量也隨之增加，因而消弭了原本應該隨感測節點數量增加而發生的收斂現象。

圖 13 為圖 11 與圖 12 的整理，為了避免折線交錯使人眩目，故採用長條圖來表示 50 到 250 個感測節點對應到所需之無線充電平均數量。

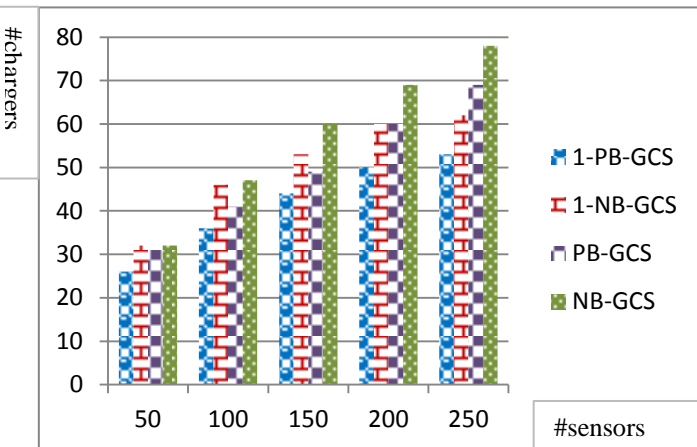


圖 13: 理想情形與現實情形的整理

從圖 13 可發現有時候使用 PB-GCS 所得出的無線充電器平均數量甚至比使用 1-NB-GCS 所得出的結果還要多，因為假設有  $n$  個感測節點 PB-GCS 的候選圓錐數量的量級為  $O(n^2)$ ，而 NB-GCS 的候選圓錐數量的量級為  $O(n)$ ，所以相較之下 PB-GCS 有較多的選擇，因此選出較佳的候選圓錐其可能性高於 NB-GCS。

## 五、結論與未來展望

無線感測網路(WSN)中，感測節點的存活時間受限於有限的電池電量，隨著能量效益研究的精進，延長了感測節點的平均存活時間，更增添了 WSN 的實用性，以致其應用場景日趨廣泛，然而無論感測節點如何有效率地使用電力，仍然無法改變電池電量一點一滴地被耗盡之窘境，實為 WSN 之一大缺憾。後來有學者提出了可充電無線感測網路(WRSN)的概念，它利用能量收集的技術，

如太陽能、風力等，將能量轉換器裝設於感測節點上，使其電量得以補充，此乃繼能量效益之後，感測節點生存時間的另一波突破，然而利用太陽能、風力等能量收集的方式易受環境因素的影響，故不易控制其能量的獲取及分配，隨著無線充電技術的發展，改善了以往能量收集技術易受環境因素影響而較難控制的缺點，進而使電力供應易於人為管理，更進一步令人期盼有一天 WRSN 能永續運行。

本研究採用現有的射頻無線充電技術，針對 WRSN 中無線充電器佈置前的規劃提出了貪婪啟發式基於節點的 NB-GCS 演算法與基於點對的 PB-GCS 演算法，用以最佳化無線充電器的數量，以降低佈置成本，無線充電器佈置完成後，我們基於感測節點的工作負載與實際的充電效益提出了制定無線充電器工作週期的方法，節省無線充電器的電力消耗，以降低運作成本。

在未來展望的部分，希望能提出更為精進的演算法，在合理的時間複雜度之下求得比 PB-GCS 演算法更好結果，更進一步提出新的充電器佈置架構，以突破本研究僅適用於靜態環境與充電器被限於佈置於固定高度格子點上的限制，為 WRSN 的發展貢獻一份心力，另一方面也會持續注意使用低頻電磁波的射頻無線充電對人體的危害，並在提出新的電力補給機制時將此因素納入考慮。

## 參考文獻

- [1] A. Chen, Z. Li, T.-H. Lai, and C. Liu, "One-Way Barrier Coverage With Wireless Sensors," *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 626-630, 2011.
- [2] S. He, J.-M. Chen, F. Jiang, D. Y. Yau, G. Xing, and Y.-X. X. Sun, "Energy Provisioning in Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Proc. IEEE IFONCOM*, pp. 2006-2014, 2011.
- [3] A. M. Zungeru, L.-M. Ang, SRS. Prabaharan, and K. P. Seng, "Radio Frequency Energy Harvesting and Management for Wireless Sensor Networks," *Green Mobile Devices and Networks: Energy Optimization and Scavenging Techniques*, pp. 341-368, 2012.
- [4] S. Escobar, S. Chessa, and J. Carretero, "Optimization of Quality of Service in Wireless Sensor Networks Powered by Solar Cells," *Proc. 2012 IEEE 10th International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA)*, pp. 269-276, 2012.
- [5] Fu Da Tong website: <http://www.rfidpower.com.tw/chinese/index.htm>
- [6] PowerCast website: <http://www.powercastco.com/>
- [7] FCC website: <http://www.fcc.gov/>

- [8] T.-C. Chiu, Y.-Y. Shih, A.-C. Pang, J.-Y. Jeng, and P.-C. Hsiu, "Mobility-aware charger deployment for wireless rechargeable sensor networks," *Proc. Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pp. 1-7, 2012.
- [9] K. Li, H. Luan, and C.-C. Shen, "Qi-Ferry: Energy-Constrained Wireless Charging in Wireless Sensor Networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 2515–2520, 2012.
- [10] J. A. Shaw, "Radiometry and the Friis Transmission Equation," *American Journal of Physics (AJP)*, Vol. 81, pp. 33-38, 2012.
- [11] Y. K. Tan, and S. K. Panda, "Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable Wireless Sensor Network," *Sustainable Wireless Sensor Networks*, In *Y.K. Tan (Ed.)*, pp. 15-43. InTech Publishing, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, Dec. 2010.
- [12] W. Haboubi, H. Takhedmit, O. Picon, and L. Cirio, "A GSM-900 MHz and WiFi-2.45 GHz dual-polarized, dual-frequency antenna dedicated to RF energy harvesting applications," *Proc. European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 3959 – 3961, Apr. 2013.
- [13] J. L. Hennessy, and D. A. Patterson, Computer Architecture: A Quantitative Approach, Morgan Kaufmann, 4/e, 2007.