

# 無線感測可充電網路充電器佈置之粒子群最佳化

## Particle Swarm Optimization for Charger Deployment in Wireless Rechargeable Sensor Networks

Yen-Chung Chen (陳彥仲)  
國立中央大學資訊工程所  
bruce88995@gmail.com

Jehn-Ruey Jiang (江振瑞)  
國立中央大學資訊工程所  
jrjiang@csie.ncu.edu.tw

在可充電無線感測網路(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSNs)中，無線充電器(Wireless Charger)使用無線充電技術適時補充網路中感測節點的電力，讓所有感測節點持續運作，而使 WRSN 具有永續性(Sustainability)。由於無線充電器價格昂貴，因此如何以較少的充電器覆蓋所有感測節點以達成 WRSN 的永續性成為一個非常重要的議題。本論文提出 PSCD (Particle Swarm Charger Deployment) 演算法，嘗試最佳化 WRSN 充電器的佈置。PSCD 根據充電器與感測節點的距離及角度，估算出感測節點的充電效益，再利用粒子群最佳化(Particle Swarm Optimization)的粒子記憶性，將充電器視為粒子，透過粒子個體記憶及群體記憶調整充電器位置及天線方向，找尋充電效益最好的方式進行充電器佈置，以達成利用最少數量的充電器覆蓋所有感測節點並使 WRSN 具有永續性的目標。我們使用 Powercast P2110-EVAL-02 無線充電器設備進行充電效益實測，用以求得充電器對感測節點在不同距離、不同角度的充電效率數據，並進行模擬實驗以比較 PSCD 與兩個啟發式貪婪演算法，即 Pair Based Greedy Cone Selection (PB-GCS)演算法與 Node Based Greedy Cone Selection (NB-GCS)演算法的效能。實驗結果顯示 PSCD 確實能以較少的充電器滿足所有感測節點充電需求，而使 WRSN 具有永續性。

**關鍵字:** 可充電無線感測網路、粒子群最佳化、永續性、無線充電器佈置

In Wireless Rechargeable Sensor Networks (WRSNs), wireless chargers can recharge batteries of sensor nodes so that they can operate sustainably to provide WRSNs with the property of sustainability. Since wireless chargers are costly, how to apply as few as possible chargers to cover all sensor nodes to make WRSNs sustainable is thus an important problem. This paper proposes the PSCD (Particle Swarm Charger Deployment) algorithm trying to optimize WRSN charger deployment. PSCD estimates charging efficiency according to the distance and angle between chargers and sensor nodes and then utilizes individual memory of the local optimum and group memory of global optimum to adjust locations and antenna orientations of chargers to make WRSNs sustainable. We perform experiments by using Powercast P2110-EVAL-02 wireless chargers to obtain charging efficiency for different distances and angles between chargers and sensor nodes. Based on the charging efficiency data, we simulate PSCD and two related heuristic greedy algorithms, namely the Pair Based Greedy Cone Selection (PB-GCS) algorithm and the Node Based Greedy Cone Selection (NB-GCS) algorithm. The simulation results show that PSCD indeed outperforms the other two algorithms in sense that it uses fewer chargers to fulfill the charging requirements of all sensor nodes to make WRSNs sustainable.

**Keywords:** *Wireless Rechargeable Sensor Network, Particle Swarm Optimization, Sustainability, Wireless Charger Deployment*

## 一、緒論

無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSN)由大量感測器(sensor)(也稱感測節點)所組成,通過無線通訊能力形成一個自我組織網路系統,其目的是感知周遭環境資訊,如溼度、振動、光度、磁場強度、溫度、壓力、聲音等,並將資料以多跳(multi-hop)無線傳輸的方式傳送到匯聚節點(sink),讓使用者可準確掌握監測區域內的相關環境資訊。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,如屏障覆蓋(Barrier Coverage)、室內外環境監測、災害警報系統等等。感測器多半體積較小並仰賴電池供給電力。當感測器電池能量耗殆盡時,若無法即時更換電池或補充電池能量,則會導致感測器無法使用而使無線感測網路會無法達到永續性(sustainability)。

為了解決感測器電量不足的問題,有學者提出可充電無線感測網路(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSN) [2][4][8]的概念,透過能量收集(energy harvesting)技術[10][11],將太陽能、風力、環境射頻(Ambient Radio Frequency)等各種形式的能量經由轉換器轉換成直流電(Direct Current, DC),作為無線感測網路感測器的電量補充並維持感測器永續性的運作。

可充電無線感測網路之感測節點通常是固定不動且均勻分布在觀測範圍中。無線充電器可分為移動式和固定式,移動式的充電器是將無線充電技術的設備搭載於可移動的自走車,僅需較少的充電器就可對感測節點進行充電,但由於充電器攜帶的能量有限,且能量大多消耗在頻繁地來回移動上,造成不必要的能量浪費,真正將電力能量供給於感測節點的比例較少。固定式對無線充電器的數量的需求相較於移動式要比較多,但佈建完成後能隨時對覆蓋範圍內的感測器進行電力的補給,真正將電力能量供給於感測節點的比例較高,較容易維持所有感測節點的永續運作。就充電器能量

消耗觀點來看,長期運作下來移動式充電器的能量消耗相當可觀,故本論文採用固定式的充電器,以充電器的整體耗能最小化進行電力補給為目標,佈建在無線感測網路中。

由於無線充電器價格昂貴,佈置安裝也需花費較高的成本,因此本論文以最小的無線充電器佈置成本達到 WRSN 的永續性為目標,讓每個 WRSN 的感測器都能滿足充電需求,而得以永續運作。

本論文將無線充電器佈置視為全域最佳化問題,也就是將佈置空間視為解空間,充電器給予所有感測節點的充電能量總和為一組目標函數,將充電器佈置位置及充電器方向視為一組解,在所有的可行解當中找尋一組解使得目標函數取得最大值,視這組解為最佳解,並透過粒子群演算法找尋全域最佳解位置進行無線充電最佳化佈置。

本論文的其他部分將分成以下章節:第二節為背景知識;第三節為假設與解法;第四節為模擬結果;最後第五節則為結論。

## 二、背景知識

### 2.1 無線充電技術

現今常見無線充電技術有電磁感應(magnetic induction)[3]、磁耦共振(magnetic resonance) [5]與無線電波射頻[12]。

電磁感應充電技術是利用法拉第電磁感應定律,電流通過發送端的線圈產生磁力,而接收端的線圈感應到磁力,再將磁力轉換成電力,接收端越靠近發送端的線圈中心,接收端所接收的能量越強。電磁感應缺點是充電距離不超過 10 公分,便利性較不足。

磁耦共振充電技術,其原理來自音叉共振,線圈通電後會產生特定頻率的磁場,若周圍有相同頻率的金屬或線圈則會產生震盪,並產生電流,當發送端與接收端的線圈共振頻率都要相同才能傳遞能量。磁耦共振的缺點是雙方頻率容易受到線圈圈數、電流等影響,造成雙方頻率無法相同。

無線電波射頻充電技術是透過類似 RF

射頻原理，將電力透過無線電波的方式傳導，充電距離可達數公尺，射頻的穿透性高不易受環境中障礙物影響，且充電器的充電範圍涵蓋多個接收器並同時進行充電動作。

本論文探討耗電量較低的感測網路，感測節點眾多且四處分布，由於電磁感應及磁耦共振充電距離較短，因此本論文使用無線電波射頻的充電機制，並採用 Powercast 公司[12]的無線電波射頻充電設備。Powercast 的充電設備包含電能充電器(charger)及電能接收器(harvester)。充電器透過 915MHz 無線電波射頻頻段將能量傳送給接收器，接收器將接收的無線電波能量轉成直流電，儲存於電容中；充電器到接收器的有效傳輸距離大約為 5 到 6 公尺，可涵蓋多個接收器同時進行充電動作。

## 2.2 粒子群最佳化演算法

粒子群最佳化(Particle Swarm Optimization, PSO)，是由 J. Kennedy 和 R. C. Eberhart[6] 於 1995 年觀察小鳥飛行族群習性，開發的一種進化型演算法，其主要概念是基於鳥群覓食的行為所發展出來的(模擬鳥群覓食行為衍生的)，一群鳥會各自在隨機的區域裡尋找覓食地點，鳥群會各自根據自己的經驗尋找覓食地點，鳥群中有找到覓食地點會通知彼此，過了一段時間後，鳥群會聚集在最佳的覓食地點。

由上述的鳥群覓食的行為轉化到粒子群演算法就是將解空間中每個粒子視為類似鳥類族群中單一個體，能夠在解空間中搜尋讓適應函數(fitness function)成為最大適應值或最小適應值(因問題而定)的最佳解位置。粒子並具有記憶性，可以將個別粒子搜尋到的區域最佳解(local optimal)記錄在本身的個體記憶中，以此決定下一次搜尋最佳解的移動速度及位置(以上過程稱為「Cognition mode」)。另外，每個粒子會互相交換其搜尋到的最佳解，並將粒子群體中的全域最佳解(global optimal)記錄在本身的群體記憶中，以此做修正下一次搜尋最佳解的移動速度及位置(以上過程稱為「Social mode」)。每個粒子透過

Cognition mode 與 Social mode 這兩種模式進行修正下一次搜尋最佳解的移動速度及位置，經過一段時間後，大多數的粒子會漸漸移向全域最佳解的附近，因而得到近似最佳解。

以下為粒子群演算法的步驟：

Step 1: 進行粒子初始化，以隨機的方式產生  $m$  個粒子在  $n$  維空間裡的位置及速度。

Step 2: 依照設計的適應函數計算每個粒子的適應值。

Step 3: 將粒子目前位置的適應值與個體最佳位置的適應值做比較，若目前粒子的適應值優於個體最佳適應值時，則更新個體最佳訊息，以粒子目前的位置及其適應值來取代之前個體最佳的位置及其適應值。

Step 4: 將粒子目前位置的適應值與群體最佳位置的適應值做比較，若目前粒子的適應值優於群體最佳適應值時，則更新群體最佳訊息，以粒子目前的位置及其適應值來取代之前群體最佳的位置及其適應值。

Step 5: 每一個粒子的速度更新：

$$\begin{aligned} v_i(t+1) = & w \times v_i(t) + c1 \times rand() \\ & \times (P\_x_i - x_i(t)) + c2 \times rand() \\ & \times (G\_x - x_i(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

在式(1)中， $v_i(t+1)$  表示粒子  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 在第  $t+1$  迭代的的速度， $v_i(t)$  表示粒子  $i$  在第  $t$  迭代的的速度， $P\_x_i$  表示粒子  $i$  個體區域最佳解的位置， $G\_x$  表示群體最佳解的位置， $x_i(t)$  表示粒子  $i$  在第  $t$  迭代的的位置。另外， $w$  表示慣性權重(inertia weight)，較大的慣性權重使粒子具有較大的運動慣性，而使最佳解搜尋傾向較大範圍的全面搜索；而較小的慣性權則抑制粒子的運動慣性，使最佳解搜尋傾向較小範圍局部搜索；一般建議的  $w$  值介於 0.8 與 1.2 之間。 $c1$  與  $c2$  為學習因子(learning factor)，其中  $c1$  為認知係數(cognitive parameter)， $c2$  為社會係數(social param-

eter)，一般建議的  $c1$  與  $c2$  的值介於 0 與 4 之間，常用的數值為 2，並且設定  $c1=c2$ 。最後， $rand()$  表示介於 0 與 1 之間的亂數。

Step 6: 更新每一個粒子的位置：

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2)$$

在式(2)中， $x_i(t+1)$  表示粒子  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 在第  $t+1$  迭代的位置， $x_i(t)$  表示粒子  $i$  在第  $t$  迭代的位置， $v_i(t+1)$  表示粒子  $i$  在第  $t+1$  迭代的的速度。

Step 7: 檢查是否到達最大迭代次數，若是的話則輸出全域最佳解為問題解答並停止演算法執行；反之則跳回步驟 2 繼續執行演算法。

### 2.3 充電器佈置貪婪演算法

論文[7]提出兩個貪婪演算法，解決室內環境中的可充電無線感測網路的無線充電器佈置問題(wireless charger deployment problem)，規範無線充電器使用指向性天線(directional antenna)，並且都佈置於天花板的格點上，而感測節點則可散布在地面上或任意物體上。由於無線充電器以指向性天線傳輸無線電波的能量，因此論文[7]將充電器的有效充電空間為為一個圓錐(cone)，如圖 1 所示。

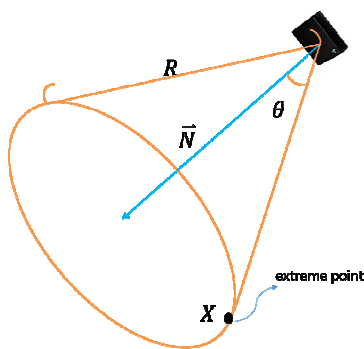


圖 1. 無線充電器的有效充電空間[7]

在圖 1 中，黑色長方形代表充電器的板形(patch)指向性天線，其有效充電範圍為圓錐之內。板形指向性天線的法向量為  $\vec{N}$ ，其方向平行於圓錐的對稱軸(symmetry axis)。有效

充電距離  $R$  為圓錐的斜高(lateral height)或側邊長，角度門檻值  $\theta$  為圓錐斜高與對稱軸所夾的角度。為簡化之故，論文[7]以圖 1 中圓錐面上極端點(extreme point)的充電效益為基準，以代表整個圓錐中所有點的充電效益進行貪婪演算法的執行。

論文[7]提出 Node Based Greedy Cone Selecting (NB-GCS) 演算法和 Pair Based Greedy Cone Selecting (PB-GCS)演算法，利用貪婪策略，嘗試使用最少的充電器為給定的感測器節點充電，以滿足所有感測器的充電需求，達到充電量不小於耗電量的條件，因而使 WRSN 具有永續性。以下我們說明這兩個演算法的大略作法。

NB-GCS 與 PB-GCS 演算法都是針對每個天花板的格點(grid point)，以格點為充電器的安裝位置，分析感測節點與格點的相對位置與相對方向來產生數個候選圓錐，每個候選圓錐所對應的就是一個充電器指向性天線的方向。兩個演算法都會針對每個格點  $g$  求出以  $g$  為球心， $R$  為半徑的一個在天花板平面下方的半球體  $S$ 。

NB-GCS 以向量合成(composition)的方式修正圓錐對稱軸來增加候選圓錐可以覆蓋到的感測節點數量，其具體做法描述如下。若  $S$  僅包含 1 個感測節點  $s_{a_1}$ ，則將  $\text{Cone}(\overrightarrow{gs_{a_1}})$  加入候選圓錐集合中，其中  $\text{Cone}(\overrightarrow{gs_{a_1}})$  代表頂點(apex)為  $g$ ，對稱軸為  $\overrightarrow{gs_{a_1}}$ ，斜高為  $R$ ，斜高與對稱軸夾角為  $\theta$  的圓錐。若  $S$  包含  $k$  ( $k > 1$ ) 個感測節點  $s_{a_1}, s_{a_2}, \dots, s_{a_k}$ ，則分別取  $k$  個單位

$$\text{向量 } \vec{u}_1 = \frac{\overrightarrow{gs_{a_1}}}{\|\overrightarrow{gs_{a_1}}\|}, \vec{u}_2 = \frac{\overrightarrow{gs_{a_2}}}{\|\overrightarrow{gs_{a_2}}\|}, \dots, \vec{u}_k = \frac{\overrightarrow{gs_{a_k}}}{\|\overrightarrow{gs_{a_k}}\|}, \text{ 並令}$$

這  $k$  個單位向量為候選圓錐的暫時對稱軸方向向量，然後依照雙層迴圈  $i = 1, 2, \dots, k$  及  $j = 1, 2, \dots, k$  的次序修正候選圓錐的暫時對稱軸方向向量。修正程序為計算是否  $\phi(\vec{u}_i, \vec{u}_j) \leq \theta, j \neq i$ ，其中  $\phi(\vec{u}_i, \vec{u}_j)$  代表  $\vec{u}_i$  與  $\vec{u}_j$  的夾角。若條件成立的話，則檢查  $\text{Cone}(\vec{u}_i + \vec{u}_j)$  是否能覆更多的感測節點而且依然覆蓋

$s_{a_j}$ ，若是的話則執行  $\vec{u}_i = \vec{u}_i + \vec{u}_j$  及  $\vec{u}_i = \frac{\vec{u}_i}{\|\vec{u}_i\|}$  修正候選圓錐對稱軸方向向量，反之則不修正候選圓錐對稱軸方向向量。在雙層迴圈結束之後，NB-GCS 則將  $Cone(\vec{u}_1), \dots, Cone(\vec{u}_k)$  加入候選圓錐集合中。

PB-GCS 則根據感測節配對為基礎來產生候選圓錐，其具體作法描述如下。若半球體  $S$  僅包含 1 個感測節點  $s_{a_1}$ ，則將  $Cone(\vec{g}s_{a_1})$  加入候選圓錐集合中。若  $S$  包含  $k$  ( $k > 1$ ) 個感測節點  $s_{a_1}, s_{a_2}, \dots, s_{a_k}$ ，則分別取  $k$  個單位向量  $\vec{u}_1 = \frac{\vec{g}s_{a_1}}{\|\vec{g}s_{a_1}\|}, \vec{u}_2 = \frac{\vec{g}s_{a_2}}{\|\vec{g}s_{a_2}\|}, \dots, \vec{u}_k = \frac{\vec{g}s_{a_k}}{\|\vec{g}s_{a_k}\|}$ 。然後根據這  $k$  個感測節點的所有配對  $(s_{a_i}, s_{a_j})$  進行分析，其中  $1 \leq i, j \leq k$  且  $i \neq j$ 。分析方式為求出  $\vec{u}_i$  及  $\vec{u}_j$  與以格點  $g$  為球心，半徑為 1 的單位球  $U$  的交點  $i$  與  $j$ ，如圖 2 所示。令代表有效充電範圍的圓錐與單位球面的交集為一個半徑為  $r$  的圓，令  $d_{ij}$  表示  $i$  與  $j$  的直線距離。如圖 3，PB-GCS 根據  $d_{ij}$  與  $r$  的三種關係係分別產生 1、2 及 4 個候選圓錐。請注意，圖 3 中的圓代表候選圓錐與單位球  $U$  的交集。

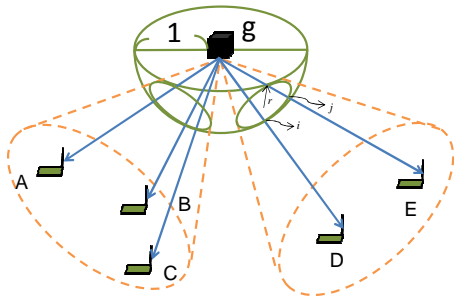


圖 2. 單位球與圓錐及向量的交點

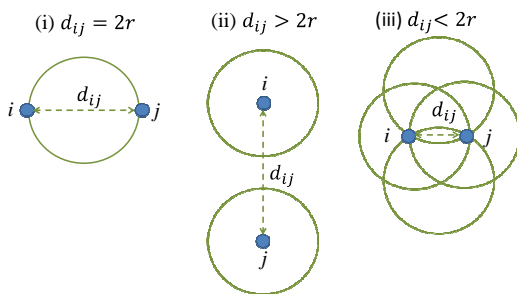


圖 3. 依照單位球面上  $d_{ij}$  與  $r$  的三種關係係產生候選圓錐

產生完候選圓錐之後，NB-GCS 與 PB-GCS 都為每個感測器根據圖 1 圓錐面上的極端點的充電效益估計能滿足其能源需求的充電器數量。當一個感測器能源需求被滿足時，則演算法會標記該感測器。NB-GCS 與 PB-GCS 都以貪婪的方式挑選能夠覆蓋最多未標記感測器的候選圓錐來佈置充電以滿足感測器的能源需求，候選圓錐會持續進行直到所有感測節點都被標記，演算法才會停止，並輸出充電器個數與所有充電器佈置位置(也就是被挑選的圓錐)。

### 三、所提演算法

#### 3.1. 環境假設與問題定義

假設可充電無線感測網路的佈建空間為一個長、寬、高分別為  $L$ 、 $W$ 、 $H$  的長方體，而無線充電器則被限制佈置於高度為  $H$  之天花板上。論文[7]假設充電器僅能佈置在天花板的格點上；而與論文[7]不同的是，本論文假設充電器可以佈置在天花板的任何位置而且其指向線天線可以朝向任何方向。與論文[7]相同，本論文假設感測節點佈置於地面或物體上(如圖 4 所示)，而且其能源需求為已知。論文[7]以圓錐面上的極端點的充電效益估計能滿足感測節點能源需求的充電器數量，而在本論文則以依據感測器與充電器的距離及充電角度精準計算充電效益。如圖 5，無線充電器指向性天線的方向為單位向量  $\vec{N}$ ，充電器與感測器的距離為  $D$  (稱為充電距離)，充電器與感測節點的連線與指向性天線的方向夾角(稱為充電角度)為  $\theta$ ，我們可以根據  $D$  與  $\theta$  精確算出感測節點從充電器獲得多少能量。

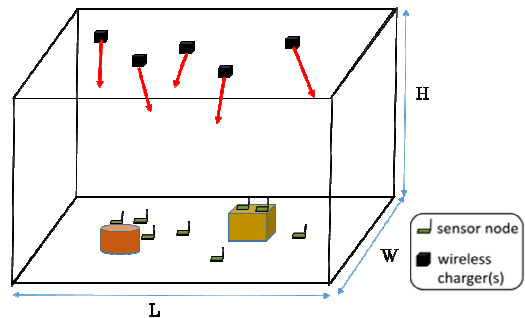


圖 4. 充電器與感測節點佈建環境示意圖

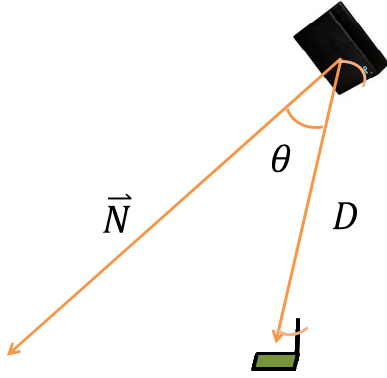


圖 5. 充電器與感測器的距離與充電角度示意圖

### 3.2. PSCD 演算法

本論文提出 PSCD(Particle Swarm Charger Deployment)演算法進行充電器最佳化佈置，將充電器視為粒子群演算法的粒子，在固定的迭代(iteration)後挑選一個最佳的充電器對感測節點進行充電，並調整所有受到該充電器影響的感測節點的能源需求。然後再進行粒子群演算法，在固定的迭代(iteration)後挑選一個最佳的充電器對感測節點進行充電，...，直到所有感測器的能源需求都滿足為止。

在運算粒子群演算法之前，需先定義三個重要的函數：適應函數、速度函數、位置更新。本節分成四個小節，首先 3.2.1 小節先定義粒子群演算法的適應函數，3.2.2 小節描述粒子更新速度和位置，最後 3.2.3 說明 PSCD 演算法的細節。

#### 3.2.1. 適應函數

我們定義適應函數為一個充電器在目前的位置及指向性天線的方向給予所有感測器充電能量總和，其目的為評估一個充電器在目前的位置及指向性天線方向的充電效益，因此適應值越高代表充電器充電效益越好。

由於充電器對感測器充電能量是依據充電距離與充電角度精確算出感測節點從充電器獲得多少能量，因此我們以式(3)定義適應函數  $f$ 。令  $n$  個感測節點所形成的集合為  $SN = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ，令  $n$  個充電器所形成的集合為  $CN = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。

$$f_i = \sum_{k=1}^n \text{Calculate\_CE}(d_k, \phi(\vec{N}_i, \overline{C_1 S_k})) \quad (3)$$

以下我們說明式(3)中的記號：

- $i$ : 表示第  $i$  個粒子。
- $k$ : 表示第  $k$  個感測節點。
- $d_k$ : 表示第  $k$  個感測節點與第  $i$  個充電器的距離。
- $\vec{N}_i$ : 表示第  $i$  個粒子指向性天線方向的單位向量。
- $\overline{C_1 S_k}$ : 表示第  $i$  個充電器與第  $k$  個感測節點連接的向量
- $\phi(\vec{N}_i, \overline{C_1 S_k})$ : 表示第  $i$  個充電器與第  $k$  個感測節點的充電角度。
- $\text{Calculate\_CE}$ : 根據充電距離與充電角度計算充電器給予感測器充電能量。

如圖 6 舉例，在圖 6 場景總共有 4 個感測器 S1、S2、S3、S4 及一個充電器 C1，充電器 C1 指向性天線方向為單位向量  $\vec{N}_1$ ，感測器 S1 與充電器 C1 距離為  $d_1$ ，感測器 S2 與充電器 C1 距離為  $d_2$ ，感測器 S3 與充電器 C1 距離為  $d_3$ ，感測器 S4 與充電器 C1 距離為  $d_4$ ，在此場景充電器 C1 的適應值，依照公式(3)計算為  $f_1$ ：

$$f_1 = \sum_{k=1}^4 \text{Calculate\_CE}(d_k, \phi(\vec{N}_1, \overline{C_1 S_k}))$$

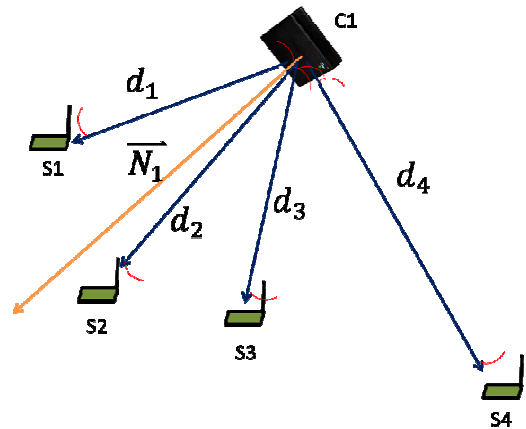


圖 6. PSCD 演算法應用場景範例

### 3.2.2. 粒子速度及位置更新

充電器依據與感測節點的充電距離及充電角度進行對感測節點充電，因此本論文定義粒子的速度與位置為以下三個式子：

$$X_i(t) = (C\_xy_i(t), N_i(t)) \forall i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$\begin{cases} C\_xy_i = (X_i, Y_i) \\ N_i = (x_i, y_i, z_i) \end{cases} \quad (5)$$

$$V_i(t) = (V\_C\_xy_i(t), V\_N_i(t)) \quad (6)$$

$$\forall i = 1, \dots, n$$

充電器是佈置在固定 z 軸的 x-y 平面上，其佈置位置可視為二維空間中，因此式(5)中充電器佈置位置表示  $C\_xy_i = (X_i, Y_i)$ ，其中， $C\_xy_i$  為充電器  $i$  佈置位置， $X_i$  為充電器  $i$  佈置位置的 x 座標位置， $Y_i$  為充電器  $i$  佈置位置的 y 座標位置。

式(5)中充電器的指向性天線方向表示為一個三維單位向量  $N_i = (x_i, y_i, z_i)$ ，其中， $x_i$  為充電器  $i$  指向性天線方向的 x 分量， $y_i$  為充電器  $i$  指向性天線方向的 y 分量， $z_i$  為充電器  $i$  指向性天線方向的 z 分量，因此我們可以將式(5)中充電器佈置位置與指向性天線方向變數結合至式(4)，粒子的位置定義在五維空間，

式(6)為粒子的速度，其中  $V\_C\_xy_i$  為充電器  $i$  佈置位置的速度， $V\_N_i(t)$  為充電器  $i$  指向性天線方向的速度。依照式(7)和式(8)來更新速度和位置。

$$V_i(t+1) = w \times V_i(t) + c1 \times rand() \times (P\_C\_xy_i - C\_xy_i(t), P\_N_i) + c2 \times rand() \times (G\_C\_xy_i - C\_xy_i(t), G\_N) \quad (7)$$

$$X_i(t+1) = (C\_xy_i(t), (0,0,0)) + V_i(t+1) \quad (8)$$

以下我們說明式(7)中的記號：

- $i$  表示第  $i$  個粒子。
- $V_i(t+1)$  : 表示粒子  $i$  第  $t+1$  迭代

(iteration) 的速度。

- $V_i(t)$  : 表示粒子  $i$  第  $t$  迭代(iteration) 的速度。
- $C\_xy_i(t)$  : 表示粒子  $i$  第  $t$  迭代(iteration) 的充電器佈置位置。
- $P\_C\_xy_i$  : 表示粒子  $i$  個體最佳充電器佈置位置。
- $G\_C\_xy$  : 表示群體最佳位置的充電器佈置位置。
- $P\_N_i$  : 表示粒子  $i$  個體最佳位置的指向性天線方向。
- $G\_N$  : 表示群體最佳位置的指向性天線方向。
- $c1, c2$  : 學習因子。
- $w$  : 慣性權重。
- $rand()$  : 0~1 之間的亂數。
- 

### 3.2.3. PSCD 演算法細節

圖 7 為 PSCD 演算法流程圖，其流程細節說明如下：

1. 粒子隨機產生位置與速度進行初始化:  
粒子的位置與粒子的速度是以隨機的方式產生，進行粒子初始化。
2. 依照設計的適應函數計算每個粒子的適應值:  
根據 3.2.1 小節式(3)定義的適應函數計算每一個粒子的適應值。
3. 更新粒子個體最佳資訊:  
將粒子目前位置的適應值與個體最佳位置的適應值做比較，若目前粒子的適應值大於個體最佳適應值時，則更新個體最佳訊息，以粒子目前的位置及其適應值來取代之前個體最佳的位置及其適應值。
4. 更新群體最佳資訊:  
將粒子目前位置的適應值與群體最佳位置的適應值做比較，若目前粒子的適應值大於群體最佳適應值時，則更新群體最佳訊息，以粒子目前的位置及其適應值來取代之前群體最佳的位置及其適應值。

5. 判斷群體最佳位置的適應值是否為零:  
檢查群體最佳位置的適應值是否為 0，其適應值等於 0 代表沒有一個感測節點在充電器的有效電範圍，若此時粒子互相學習會造成大多數粒子聚集在群體最佳位置的適應值等於 0 的位置附近無法脫離局部最佳解，因此當群體最佳位置的適應值為 0 時，執行步驟 6.進行粒子速度以隨機產生的方式做更新，否則執行步驟 7。
6. 粒子速度以隨機產生方式做更新:  
粒子的速度以隨機方式產生數值做更新。
7. 更新粒子速度:  
根據 3.2.2 小節定義式(7)更新每一個粒子的速度。
8. 更新粒子位置:  
根據 3.2.2 小節定義式(8)更新每一個粒子的位置。
9. 判斷是否到達迭代次數:  
檢查是否到達一定迭代次數，假如尚未到達迭代次數則回步驟 2 重複執行
10. 對感測器進行充電，並標記滿足需求的感測器:  
充電器在群體最佳的位置對感測器進行充電，若感測器滿足充電需求則標記此感測器並在下一個迭代無視於存在此空間。並將佈置充電器的個數數值累加一。若群體最佳位置的適應值為 0 則不進行對感測器充電。
11. 檢驗所有的感測節點是否全被標記:  
回步驟 2 重複執行，直到標記所有的感測節點停止演算法。
12. 輸出充電器個數與所有充電器佈置位置:  
輸出充電器個數與所有充電器佈置位置。

表 1. 模擬參數設定

場地大小	$20 \times 15m^2$
感測節點數量	50, 100, 150, 200, 250
佈置平面高度	2.3m
網格邊長	1.8m
感測節點電能消耗率	0.6mW, 0.6~1.4mW
粒子個數	200
w	2
c1	2
c2	2
iteration	100
rand()	0~1

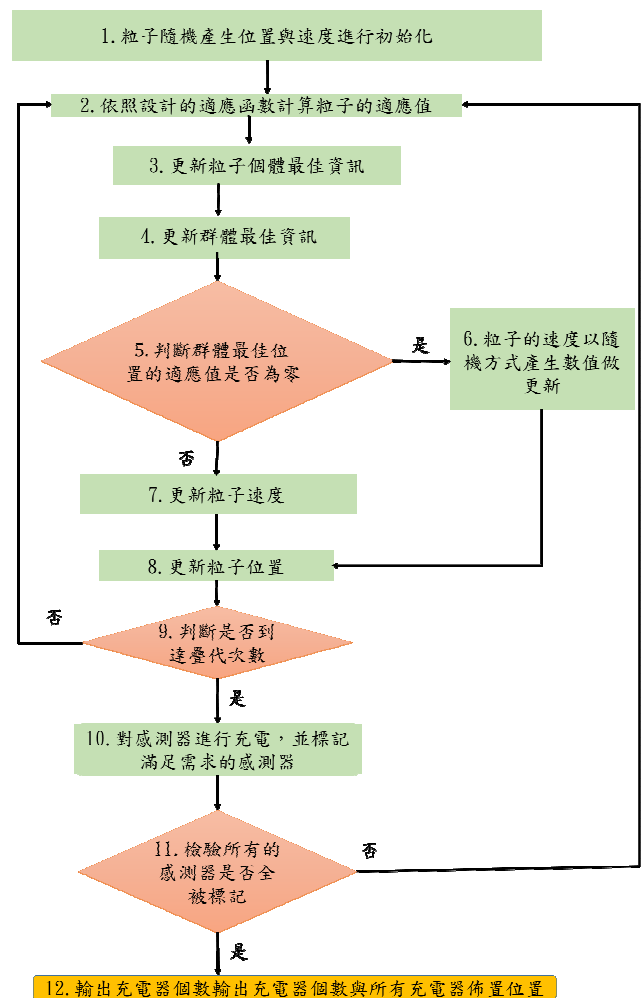


圖 7. PSCD 粒子群演算法流程圖

#### 四、模擬與分析

我們在本節中描述 PSCD 演算法的模擬實驗結果，並將之與 PB-GCS 演算法與 NB-GCS 演算法的實驗結果進行比較。

#### 4.1. 模擬參數設定

表 1 中所列是一些模擬參數設定，除了這些參數設定之外，尚有以下的設定：

1. 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。

2. 每一個粒子在 x-y 平面上位置, 其 x 軸的座標與 y 軸的座標以隨機亂數的方式產生數值。
3. 每一個粒子的指向性天線方向在 x-y-z 空間上, 其產生方式為隨機產生一個點在 x-y-z 空間上並與粒子連接為單位向量。
4. 本模擬採用 C++ 語言撰寫。
5. 執行模擬 30 次後取平均得到結果。
6. 表 2 為 Powercast P2110-EVAL-02 無線充電器充電效率實驗數據。

表 2. Powercast P2110-EVAL-02 無線充電器充電功率(mW) 實驗數據(橫列為充電距離、直行為充電角度)

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.5 m	149.46	141.46	113.25	95.34	53.76	17.64	10.58
1.0 m	32.84	32.21	20.38	12.35	7.77	2.10	0.01
1.5 m	18.95	15.07	12.59	8.34	2.28	--	--
2.0 m	11.70	9.94	8.57	6.03	--	--	--
2.5 m	5.50	4.02	2.29	0.93	--	--	--
3.0 m	2.10	1.05	0.70	--	--	--	--
3.5 m	0.76	--	--	--	--	--	--

## 4.2 模擬結果

NB-GCS 和 PB-GCS 參數設定取自論文 [7], 在相同場景下, 其充電器有效充電範圍為充電距離 3.0m 與角度門檻值為 30 度的圓錐, 以圓面上的極點為充電效益基準點。

圖 8 表示為當所有感測節點電能消耗率皆為 0.6mW, 對 NB-GCS 和 PB-GCS 而言, 每個感測節點僅需要 1-coverage 就能滿足其充電效益的理想情形下, 從 50 個感測節點到 250 個感測節點, 分別使用我們所提的 PSCD 演算法和其他演算法 NB-GCS 和 PB-GCS, 比較其所需要充電器數量的需求。

圖 8 顯示由於 NB-GCS 和 PB-GCS 的充電器佈置受限於格點間距大小以及角度門檻值為 30 度的有效充電範圍, 而相較於 PSCD 演算法, 其充電效益是根據充電器與感測節點之

間的充電距離與充電角度, 由表 2 可以得知當感測器在與充電器之間距離越近時, PSCD 演算法有效充電範圍會比 NB-GCS 和 PB-GCS 大, 充電器一次可以覆蓋感測器數量較多, 因此 PSCD 演算法以較少的充電器進行佈置。

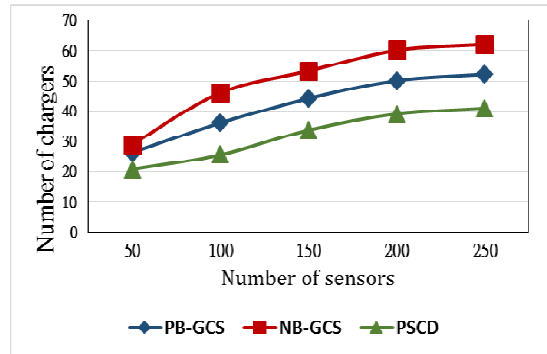


圖 8.相同耗電率挑選充電器個數比較

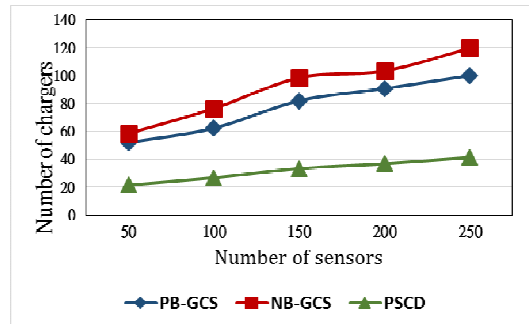


圖 9.不同耗電率挑選充電器個數比較

圖 9 為感測節點電能消耗率 0.6~1.4mW 挑選充電器個數比較。圖 9 顯示由於 NB-GCS 和 PB-GCS 以圓錐圓面上的極點為充電效益基準點, 當感測節點電能消耗率大於 0.7mW 時, 感測節點需要兩個充電器覆蓋進行充電才能滿足其充電需求, 因此造成 NB-GCS 和 PB-GCS 演算法需要更多的充電器才能滿足所有感測節點充電需求。而 PSCD 演算法是以充電器與感測節點之間的充電距離與充電角度精確計算充電效益, 因此大多數感測節點只需要一個充電器覆蓋就能滿足感測節點充電需求。因此充電器個數與圖 8 相差不多。

## 五、結論

本論文提出的 PSCD 演算法，以粒子群演算法為核心，可以有效地優化 WRSN 充電器佈置，使佈置結果優於相關的 NB-GCS 和 PB-GCS 演算法。實驗模擬結果顯示 NB-GCS 和 PB-GCS 受限於固定的格點、固定有效充電範圍並以充電效益最差為基準點進行充電，需要較多的充電器數量才能滿足感測節點充電需求，而 PSCD 的充電效益根據充電器與感測器距離與角度準確計算充電效益，並以粒子群演算法特有的個體記憶及群體記憶進行粒子移動修正位置找尋全域最佳解，在可充電無線感測網路裡以最少的充電器佈置就可滿足所有感測器充電需求並達到永續性。

## 致謝

本報告為科技部計畫編號 103-2221-E-008-085-之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] M. I. Afzal, W. Mahmood, and A. H. Akbar, "A Battery Recharge Model for WSNs using Free Space Optics (FSO)," in *Proc. of IEEE International Multi-topic Conference (INMIC)*, pp. 272-277, 2008.
- [2] 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," in *Proc. of Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pp. 1-7, 2012.
- [3] Gopinath, Ashwin (August 2013), *All About Transferring Power Wirelessly*, Electronics For You E-zine (EFY Enterprises Pvt. Ltd.): 52-56. Retrieved January 16, 2015.
- [4] S. He, J.-M. Chen, F. Jiang, D. Y. Yau, G. Xing, and Y.-X. X. Sun, "Energy Provisioning in Wireless Rechargeable Sensor Networks," in *Proc. of IEEE IFONCOM*, pp. 2006-2014, 2011.
- [5] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power

transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, July 2007.

- [6] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995.
- [7] J.-H. Liao, and J.-R. Jiang, "Wireless Charger Deployment Optimization for Wireless Rechargeable Sensor Networks," in *Proc. of the 7th International Conference on Ubi-Media Computing (UMEDIA 2014)*, 2014.
- [8] K. Li, H. Luan, and C.-C. Shen, "Qi-Ferry: Energy-Constrained Wireless Charging in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 2515-2520, 2012.
- [9] T. S. Lin and C. C. Weng, "Using a Quadratic Gaussian Function to Describe the Accumulated Charging Energy of a Lithium-Ion Battery," *Hwa Kang Journal of Engineering*, Vol. 27, pp. 141-147, 2011.
- [10] Y. K. Tan, and S. K. Panda, "Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable Wireless Sensor Network," *Sustainable Wireless Sensor Networks*, pp. 15-43, 2010.
- [11] E. Popovici, M. Magno, and S. Marinkovic, "Power Management Techniques for Wireless Sensor Networks: a Review," in *Proc. of the 5th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*, pp. 194-198, 2013.
- [11] A. N. Parks, A. P. Sample, Yi Zhao, and J. R. Smith, "A Wireless Sensing Platform Utilizing Ambient RF Energy," in *Proc. of the 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)*, pp. 69-74, 2011.
- [12] PowerCast website: <http://www.powercastco.com>