

模擬退火演算法改善方案於無線充電器佈署

簡暉哲^{a,1}、卓信宏^{b,2}、趙涵捷^{a,3}、施國琛^{b,4}

^a 國立宜蘭大學資訊工程系、^b 國立中央大學資訊工程學系

¹b9944006@gmail.com、²awp.boom@gmail.com、³hcc@niu.edu.tw

、⁴timothykshih@gmail.com

摘要

可充式無線感測網路技術(Wireless Rechargeable Sensor Network, WRSN)為解決無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)生命週期(Life time)的一個方法，大部分的研究著重於室外環境的 WRSN 規劃，對於室內環境的充電器(Charger)佈署卻少有人研究，事實上，WSN 於室內環境是非常實用的，原因是感測器(sensor)可以協助工廠控管產品的品質以及良率、室內環境也需要佈署感測器來預防或進行救災工作，只要這些感測器能量不會耗盡，我們的生活將會變得更加方便，WRSN 越來越受歡迎的主要原因為有許多低成本佈署充電器的演算法已經被提出，然而這些方法大部分都有可能落入區域最佳解，因此本研究將提出一個針對充電器佈署的演算法，此演算法結合 Layoff Algorithm 以及 SA-Based Charging Algorithm(SABC)，模擬結果證明了此方法能夠有效地降低充電器佈署的數量並且運算時間少於 SABC。

關鍵詞：無線感測網路、無線可充電感測網路、網路佈署、模擬退火演算法

1. 前言

近年來，由於 IoT (Internet of Things)的發展使得所有設備漸漸地皆可透過網路進行通訊，人類為了得到更多的資訊，廣泛的使用無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)的技術[1][2][3]，舉例來說，遠離家鄉孩子們為了照顧父母，使用不同種類的感測器來接收心跳、血壓、睡眠品質等等的資訊以應變突發狀況[4]，另外一個例子，在戰爭中一個錯誤的情報會導致許多士兵傷亡，因此軍隊需要利用感測器來獲取更多有用的資訊，如地形等等，對於一些人類無法到達的艱困環境[5][6]，如火山[7]，水下環境[8]，資料搜集是很困難的一件事，而感測器可以完全的勝任這個工作，由此可見 WSN 的確有能力影響人們的生活。

雖然 WSN 讓人們對於資訊的取得更為便利，但仍然有一些固有的問題，WSN 主要由感測節點以及中繼節點所構成，每個感測節點將蒐集各種訊息並且把這些訊息轉傳至中繼節點，而這些動作皆需要消耗能量，但感測節點的能量是有限的，如果感測節點位置處於險峻的環境並且能量耗盡，將會造成 WSN 運作上的障礙，如果能量耗盡的為中繼

節點甚至會造成整個 WSN 網路癱瘓，有鑑於此，有學者開始提出一些方法解決網路生命週期的問題(Life time)，在[9]中，作者認為在相同時間內，感測節點不應該同時運行，因為這樣會造成不必要的浪費，因此提出藉由規劃感測節點工作的順序來達到能源的有效利用，但 WSN 的生命週期最終還是取決於電池的容量[10]。

隨著無線充電技術的發展[12]，許多學者開始研究可充式無線感測網路(Wireless Rechargeable Sensor Network, WRSN)[11]，WRSN 主要由充電器、感測節點以及中繼節點所構成，充電器為能源供應的主要來源，如圖 1 所示，由於環境的不同，充電設備也有所差異，因此使用者必須考量環境因素來進行充電設備的選擇，不同的充電器也有不同的充電技術，例如手機無限充電技術使用電磁感應。

WRSN 的環境可大致分為兩大類：室內環境與室外環境。對於這兩種不同的環境，充電器佈署需要考慮的因素也不同，在我們的研究中主要針對室內環境進行探討，由於充電器佈署需要考量感測節點位置、RF 射頻的干擾、充電效率等等的指標，需要平衡各個指標才能達到好的充電器佈署結果並且確保不落入區域最佳解，在先前的研究中，我們使用模擬退火演算法(Simulate Anneal, SA)來進行充電器佈署的設計，雖然結果不錯但仍然有改善的空間，事實上任何啟發式演算法皆有機會找到好的解，但過程中需要花費大量的時間進行迭代，因此我們認為在迭代過程中如果排除不必要解可以節省運算時間，但必須保證每一次迭代中所有感測節點皆被充電器覆蓋，因此我們對於編碼進行的修正以及提出改善的方法，藉由模擬結果得知我們提

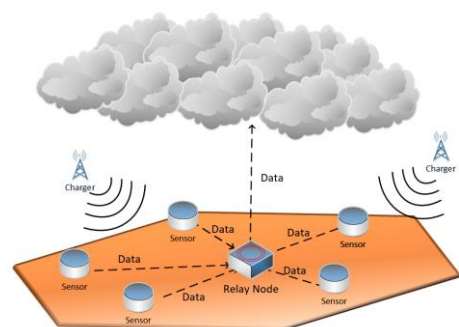


圖 1. 可充式無線感測網路

出的方法確實可以有效的幫助 SA 避免快速落入區域最佳解以及提供 WRSN 更穩定的工作環境。

本研究結構如下，第 2 節將介紹 WRSN 及相關研究，第 3 節描述本研究的問題定義，第 4 節介紹我們提出改善 SA 對於 WRSN 充電器佈署問題的方法，第 5 節呈現模擬結果，最後討論本研究的貢獻與結論。

2. 背景及相關研究

為了更清楚呈現研究內容，我們將介紹 WRSN 的背景知識以及一些之前的研究，如下：

2.1 可充式無線感測網路

目前無線充電技術可以分為四大類別，第一類為電磁感應(Magnetic Induction)，主要原理是利用線圈產生磁場，磁場變化會產生電流，藉由不斷地變換磁場產生電流進行充電，但此方法有一個限制，只要充電距離超過 5 公釐，隨著距離增加，電能損耗會變大，第二類為磁共振技術(Magnetic Resonance)，主要原理利用充電器與待充物相同頻率的共振原理產生能量的傳遞，只要接收端與發送端以相同的頻率震盪，接收端便能將發送端所產生的電磁場轉換成能源進行充電，以上兩種技術最常見的應用為手機無線充電，第三種為雷射光感應，此技術概念類似太陽能轉換，雷射光原本就具備能量，只要把能源轉換為電能便可提供充電，相較於其他充電技術，雷射光感應的充電距離最遠，但是高能量的雷射光會造成人類身體的危害，因此這一類技術目前還未廣泛的使用，最後一種技術為微波轉換(Mico-wave Conversion)，此類型主要利用 RF 射頻進行能量的傳輸，傳輸技術可大致區分為指向型傳輸(Directional Transmission)與全向型傳輸(Omni-directional Transmission)，指向型傳輸的能量集中，傳輸距離較長，全向型傳輸恰好相反，全向型傳輸的技術適用於室外或者一些高流動性的環境，因為它可以提供比較多的覆蓋面積，只向型傳輸通常適用於靜態的環境，因為目標無法移動以便充電器能夠集中能源充電。

2.2 Movable-Charger-Based Algorithm

在先前的研究中[14]，我們提出一個(Movable-Charger-Based Algorithm, MCBA)方法解決充電器的佈署問題，充電設備使用指向型傳輸，為了擴大充電的區域，我們在每個指向型傳輸的充電器上加裝馬達，所有的充電器皆放置於天花板，感測節點將透過充電器發出的 RF 射頻進行充電，透過這種方式不僅能減少許多佈線成本還能增加靈活性，更重要的是把充電器放置於天花板上能夠有效地避開障礙物的干擾。

MCBA 有兩個步驟，第一個步驟是找出充電器候選節點，我們可以藉由 aGPS 得知每個感測節點的位置，接著我們利用充電器的充電距離與感測節點位置算出充電器合適的佈署範圍並且投影至天花板，只要有重疊的區域代表至少可以覆蓋兩個以上的充電器，這些重疊的區域便是候選充電器節表

1. 重要符號對照表

參數	定義
$P_{ij}^S(d)$	第 <i>i</i> 個感測節點從第 <i>j</i> 個充電器所接收到的能量
P_{ij}^C	第 <i>j</i> 個充電器發送到第 <i>i</i> 個感測節點的能量
G_c	充電器的天線增益
G_s	感測節點的天線增益
d_{ij}	第 <i>i</i> 個感測節點到第 <i>j</i> 個充電器之間的距離
θ_i	充電器可以旋轉的角度
η	整流效率
λ	RF 的波長
β	室內環境中可調整的參數
L_p	極化損失
R	有效充電距離
N	感測節點數量
N_c	候選充電器數量
V_c	候選充電器的子集合
V_s	感測節點的子集合
V_e	最終充電器佈署位置的子集合

點，第二步驟是從這些候選充電器節點中找出最適合位置，只要重疊區域越多代表覆蓋的感測節點越多，根據這樣的標準我們可以找到有效的佈署位置。

2.3 SA-Based Charging Algorithm

雖然 MCBA 是一個有效減少充電器佈署成本的方法，但他的概念也屬於貪婪的方法，這種方法的缺點在於很容易落入區域最佳解，因此很難找到好的解，為了減少更多的佈署成本，我們必須找到更好的充電器佈署方法以及避免快速落入區域最佳解，在這些前提下，啟發是演算法(Metaheuristic Algorithm)是一個很好的選擇，先前的研究中[15]，我們使用模擬退火演算法(simulated annealing, SA)的概念進行充電器佈署的設計稱為(SA-based charging algorithm, SABC)，大多數的啟發是演算法需要很多的運算時間，但是 WRSN 的環境可能時常更動，因此我們選擇 SA 演算法，因為 SA 的收斂速度比大多數的啟發式演算法快，SABC 主要的概念為他可以接受覆蓋感測器數量較少的充電器候選節點，這種方法有更多的尋解方向，因此有更高的機會找到好的解。

3. 問題定義

WRSN 的議題可大致需分為室內環境與室外環境，不同的環境會影響問題定義以及編碼的方式，本研究著重於室內的環境的充電器佈署，為了減少障礙物的干擾，我們把充電器佈署在天花板上，每個指向型傳輸的充電器會發送 RF 射頻對感測節點進行充電，每顆充電器都有它的有效充電距離，當感測節點越接近充電器充電效果越好，反之亦然，為了確保所有的感測節點皆可有效的進行充電，我們假設室內環境的高度必須小於有效充電距離，在本研究中，我們將利用 MCBA 所找出的充電器的候選節點，為了避免快速落入區域最佳解，我們使用模擬退火演算法找出合適的充電器佈署位置，但仍然存在一些問題，例如運算時間太長以仍然有機會落入區域最佳解，因此我們主要目標為改善原本 SABC 的演算法，為了保證他的準確性和公平性，兩者個實驗環境以及編碼方式皆相同，感測節點會

隨機佈署於三維空間，並且每個充電器上皆加裝馬達增加充電距離。

根據上述的目標，我們利用線性規劃模型(linear programming model)定義我們的問題，如下：

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } F_e \\
& \text{s.t.} \\
& \sum_{j=1}^m P_{i,j}^S(d) \geq W_i^S \\
& P_{i,j}^C > P_{i,j}^S \\
& d_{i,j} < E \\
& 0^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ
\end{aligned} \quad (1)$$

在確保所有感測節點皆被覆蓋的前提下，我們主要的目標是最小化充電器佈署的數量，對於佈署問題來說，太多的充電器需要花費很多的佈署成本，太少充電器會造成感測節點的癱瘓，因此平衡這兩個指標是很重要的一點，我們定義了一些限制式讓佈署結果兼顧以下條件：為了確保感測節點不會癱瘓，第一項限制為感測節點皆收到的總能量必須大於消耗的能量，因為 RF 射頻在傳輸的過程中能量會衰減，因此第二個限制式為感測節點接收的能量必須小於充電器給的能量，第三個限制式為充電器與感測節點的距離必須小於有效充電距離才能進行有效的充電，本研究將充電器裝置於天花板，因此馬達能轉動的角度為 0 度到 180 度，請參照第四條限制式。

4. 研究方法

4.1 無線充電模型

每個感測節點與充電器的距離不同、能量轉換的效率也不同，因此每個感測節點所接收到的能源不同，因此我們必須計算每個感測節點所接收到的能源[14]

$$P_{i,j}^S(d) = \frac{G_c G_s \eta}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_{i,j} + \beta)} \right)^2 P_{i,j}^C \quad (2)$$

$P_{i,j}^S(d)$ 代表第 i 個感測節點從第 j 個充電器得到的能量， $P_{i,j}^C$ 代表第 j 個充電器給予第 i 個感測節點的能量， G_c 為充電器的天線增益， G_s 表示感測節點的天線增益， λ 表示 RF 的波長， L_p 是極化損失， η 表示整流效率， β 是室內環境中可調整的參數，有效充電距離(Effectual charging distance, ECD)在我們的研究中是重要參數，有效充電距離的意思為感測節點與充電器在這個距離內可以進行有效的充電，為了確保所有感測節點皆能順利進行充電，我們定義了有效充電距離的公式如下：

$$R = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{\frac{W_{Max} L_p}{G_c G_s \eta P_{i,j}^S(d)}}} - \beta \quad (3)$$

公式 3 的 R 為 ECD， W_{Max} 表示所有感測節點中，耗電量最多的感測節點， n 為耗電量最多的感測節點需要的充電器數量，我們假設 $P_{i,j}^S(d) = W_{Max}$ ，表示耗電量最多的感測節點所接收到的能源會等於他所消耗的，根據這個假設， $R = d_{i,j}$ ，我們可以利用公式 2 算出公式 3，為了更好的公平性，我們假設所有充電器能提供的能源相同，透過這個假設，本研究能大略模擬真實的環境，許多感測節點需要超過一個以上的充電器進行充電，當感測節點和充電器的距離小於 R 代表有好的充電效率，反之亦然。

我們把充電器候選集合定義為 $V_c = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ，感測節點表示為 $V_s = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ，最後充電器佈署位置表示為 $V_e = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ ，第 i^{th} 感測節點的耗電量表示為 W_i ，主要目標是從 V_c 中找到好的佈署位置，減少佈署成本，詳細的參數設置請參照表 1。

4.2 裁員演算法(Layoff Algorithm)

在上一章節提到 SABC 需要很長的運算時間而且仍然有機會落入區域最佳解的，原因是 SABC 在求解的方向會依照覆蓋最多感測節點的充電器進行覆蓋，這會產生一個矛盾的現象，因為充電器佈署是有順序性的，一開始的充電器位置容易得到比較好的解，但後來選擇的充電器位置會越來越差，因此啟發是演算法將會重複迭代直到好的解被發現，換句話說，SABC 為了確保解的品質，會花很多時間進行迭代，這意味著如果減少迭代次數 SABC 仍有很大的機會落入區域最佳解，基於這個觀點，我們推測只要在每次迭代都考慮覆蓋所以感測節點，對於解的品質與速度都會更好，為了實現這個構想，我們首先由編碼方面著手。

裁員演算法這個構想類似於公司在裁員的情形，在一間公司裡，每位員工都是經過態度、表現等等的考核才能勝任這個職務，就像 MCBA 衡量感測節點位置與有效充電距離找出的候選充電節點，當公司營運有困難時需要裁員，裁員的方式也會依照員工的績效表現，這點類似於 MCBA 與 SABC，但區別是 MCBA 與 SABC 就算把員工裁員的，這個員工還是有機會回來，而我們的方法認為既然他無法再對公司有貢獻，因此裁員後就永遠剔除，因此我們稱為這個方法為裁員演算法，主要的構想為每類候選充電器節點類似於一位員工，對於不需要使用的充電器候選節點我們直接把他剔除，當然如何裁員將會是本研究中重要的部份，我們將定義適應函數(Fitness Function)就像每間公司有自己裁員的基準。

適應函數是依據線性規劃模型所設計，如下：

$$F(x) = S_{coverd} / S_{overlapping} \quad (4)$$

S_{coverd} 表示感測節點被覆蓋的數量， $S_{overlapping}$ 表示感測節點重複覆蓋的數量，在裁員演算法中，我們必須確認所有感測節點在每一次迭代中皆被覆蓋，因此我們修正公式 4 為公式 5

$$F(x) = 1 / S_{overlapping} \quad (5)$$

在裁員演算法中，第一步驟是計算 N_c 大小， N_c 代表候選充電器的數量，接下來隨機選擇一個候選 C_i 並且計算適應函數請參照演算法 1 的 4-5 行，適應函數 $f(x)$ 可以由演算法 2 計算，裁員的標準取決於候選充電器與適應函數，舉例來說，如果 $f(x)$ 如果沒有比之前的解還要好，我們就恢復 C_i ，換句話說 C_i 將不會裁員，請參照演算法 1 的第 6-8 行，接著重複迭代直到終止條件滿足，裁員演算法僅能提供塞選的方案和刪除候選節點，但無法單獨執行，需要與啟發是演算法結合，下一小節將介紹裁員演算法結合 SABC。

4.3 Layoff SA-Based Charging Algorithm

LSABA 與 SABC 不同的地方在於 LSABC 在每一次迭代中會把不必要的候選節點進行裁員，後續的迭代過程中，被裁員的充電器候選節點將無法被恢復，在一開始的迭代中，所有的充電器候選節點皆被雇用，相比之下，SABC 不能保證在每一次迭代中可以覆蓋所有的感測節點，因為一開始充電器佈署的狀態是隨機產生，此外一些沒有被選中的候選充電節點還是有機會被選到，因此會造成計算上的浪費。

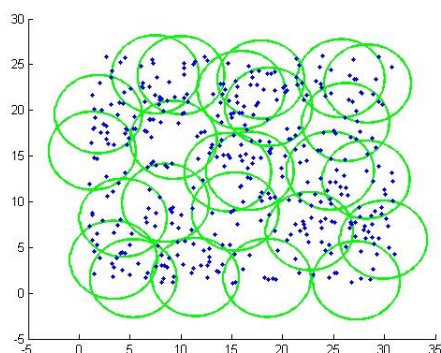


圖 2. SABC 充電器佈署圖

演算法 1 裁員演算法(Layoff Algorithm)

輸入： V_c, V_s

輸出： V_e

1. 計算 N_c 的大小
2. 計算原始的適應函數 $f(x)$
3. **While** 終止條件不滿足
4. 隨機產生一個候選充電節點 C_i
5. 計算適應函數 $f(x)$
6. **If** $f(x)$ 不比之前的好
7. 恢復 C_i
8. **End If**
9. **End While**

演算法 2 適應函數 $f(x)$

輸入： N_c, C_i

輸出： $f(x)$

1. 將第 C_i 個充電器候選節點進行裁員
2. S_{coverd} = 計算覆蓋感測節點的數量
3. **If** $S_{coverd} = N$
4. $S_{overlapping}$ = 計算感測器被重複覆蓋的數量
- 5.
6. **End If**
7. $f(x) = 1 / S_{overlapping}$

演算法 3 Layoffs SA-Based Charging Algorithm

輸入： V_c, V_s

輸出： V_e

1. 根據退火規則設定初始溫度
2. 產生 N_c 個位元的解空間
3. **While** 終止條件不滿足
4. 隨機產生一個候選充電節點 C_i
5. 適應函數 $f(N_c, C_i)$
6. **If** $f(x)$ 不比之前的好並且溫度不符合
7. 恢復 C_i
8. **End If**
9. **End While**

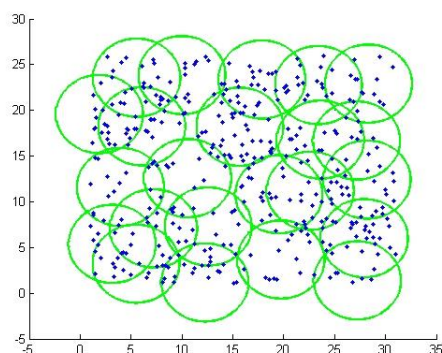


圖 3. LSABC 充電器佈署圖

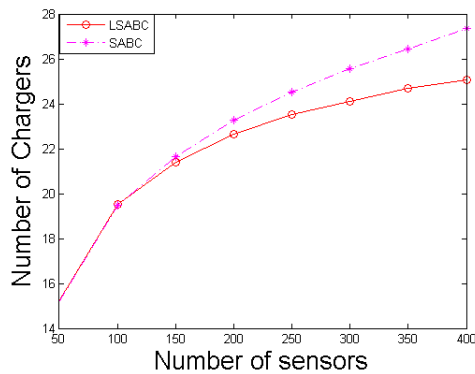


圖 4. 比較充電器數量

LSABC 的演算法流程，第一步驟必須根據退火規則設置初始溫度以及產生 N_c 個位元的解空間，在我們的研究中，每一個位元為布林值，0 代表充電器候選節點不被佈署，1 代表佈署，接著每個位元的值皆設置為 1，意思代表一開始所以充電器候選節點皆被雇用，請參照演算法 3 的 1 到 2 行，接著隨機選擇第 C_i 個充電器候選節點進行裁員，並且計算適應函數 $f(x)$ ，請參照演算法 3 的 4 到 5 行，接著如果裁員後的適應函數 $f(x)$ 如果沒有比原本的還要好而且退火溫度不符合，則恢復 C_i ，反之如果 $f(x)$ 結果比較好並且符合退火溫度， C_i 將永久被裁員，這個為模擬退火演算法的精神，就算結果比較好，如果退火溫度不符合也不會進行裁員，如此一開能夠避免快速落入區域最佳解，請參照演算法 3 個的 6 到 8 行，重複迭代直到符合終止條件。

5. 研究結果

這一小節我們將利用 MATLAB (Version 7.11, R2010b) 進行實驗模擬，實驗的環境為 $30 \times 25 \times 3$ 的室內空間，感測節點隨機的佈署，有效充電距離為 4 公尺，感測節點數量為 50 顆至 400 顆，詳細的參數設定請參照表 2。

圖 2 跟圖 3 呈現 SABC 與 LSABC 的充電器佈署圖，綠色範圍為充電器佈署個範圍，藍色部分為感測節點位置，我們可以看到 SABC 可以覆蓋大部份感測節點，但仍然有感測節點被忽略，如圖 2

表 2. 重要符號對照表

名稱	參數
場地大小	$30 \times 25 \times 3 (m^3)$
感測節點數量	50-400 顆
有效充電距離	4(m)
感測節點高度	0-1(m)

的左上方，這意味著 SABC 仍然不能有效的避免落入區域最佳解，在圖 3，LSABC 能覆蓋所有的感測節點，並且重疊覆蓋的地方小於 SABC，這也代表最後的佈署結果 LSABC 優於 SABC。

圖 4 呈現感測節點從 50 顆增加至 400 顆所需

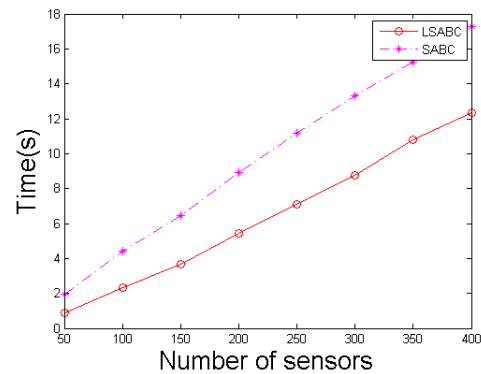


圖 5. 比較運算時間

充電器數量的比較圖，X 軸代表感測節點的數量，Y 軸代表充電器的數量，為了確保實驗結果的客觀性，每一個方法我們跑 1000 次並且取平均值，我們可以明顯看出 LSABC 所需的充電器數量比 SABC 還要低，而且這個現象會越來越明顯，因為 LSABC 在每一次迭代的過程中都確保所有感測節點皆被覆蓋，因此有效的避免落入區域最佳解。

圖 5 呈現的模擬時間比較圖，由結果得知，SABC 花費的運算時間比 LSABC 還要多，因為 LSABC 會把不必要的充電器候選節點剔除，因此解空間將會越來越小，一般的情況下，大多數的計算時間花費於適應函數的計算，因此一旦解空間縮減便可以減少大量的時間，因此我們可以明顯看到這兩條線之間的成長差異。

6. 結論

近年來，有許多學者著手研究室外環境的 WRSN 規劃，但對於室內環境的議題卻很少被討論，我們以先前的研究試圖去探討這個議題，首先我們定義室內場景的充電器佈署問題並且提出以貪婪為基底的演算法解決，後來為了減少更多的佈署成本，我們進一步提出基於啟發式演算法的方法，但是仍然存在著一些問題，例如運算時間過長而且無法有效的避免落入區域最佳解，因此我們提出了裁員演算法來改善先前研究所提出的 SABC。

由模擬結果可以看出 LSABC 確實能夠減少充電器佈署成本並且確保 WRSN 正常運作，更重要的是 LSABC 能夠減少運算時間因為運算時間一直是啟發式演算法需要考量的問題，在日後的研究中，我們會考慮更多真實環境的因素，如動態的目標或是動態的充電器佈署，由於感測節點之間的交互作用會更加複雜，因此這個問題會變得相當困難。

誌謝

本研究感謝國科會 104 年度計畫計畫編號 NSC 104-2221-E-197 -014 -的資助，謹此誌謝。

參考文獻

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Society*, vol. 40, pp. 102–114, 2002.
- [2] Y.-L. Sun, X.-Q. Qiao, B. Cheng, S.-D. Xue, and J.-L. Chen, "Cpa: A cluster-based packet acknowledgement approach in wsns," *Journal of Internet Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 203–214, 2014.
- [3] W. Guo, N. Xiong, H.-C. Chao, S. Hussain, and G. Chen, "Design and analysis of self-adapted taskscheduling strategies in wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 11, no. 7, pp. 6533–6554, 2011.
- [4] C.-F. Lai, S.-Y. Chang, H.-C. Chao, and Y.-M. Huang, "Detection of cognitive injured body region using multiple triaxial accelerometers for elderly falling," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 736–770, 2011.
- [5] L. Liu and H. Ma, "On coverage of wireless sensor networks for rolling terrains," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 118–125, 2011.
- [6] H.-H. Cho, T. K. Shih, and H.-C. Chao, "A robust coverage scheme for uwsns using the spline function," *IEEE Sensors Journal*, vol. PP, no. 99, p. 1, 2015.
- [7] R. Lara, D. Benitez, A. Caamano, and M. Zennaro, "On real-time performance evaluation of volcano-monitoring systems with wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 6, pp. 3514–3523, 2015.
- [8] H.-H. Cho, C.-Y. Chen, T. K. Shih, and H.-C. Chao, "A survey on underwater delay/disruption tolerant wireless sensor network routing," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 4, pp. 112–121, 2014.
- [9] F.-H. Tseng, H.-H. Cho, L.-D. Chou, and H.-C. Chao, "Efficient power conservation mechanism in spline function defined wsn terrain," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, pp. 853–864, 2014.
- [10] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang, "Peas: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'02)*, Paris, France., 2002, p. 200.
- [11] S. He, J. Chen, F. Jiang, D. Yau, G. Xing, and Y. Sun, "Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 12, pp. 1931–1942, 2013.
- [12] C. Hu and Y. Wang, "Minimizing energy consumption of the mobile charger in a wireless rechargeable sensor network," *Journal of Internet Technology*, vol. 16, no. 6, pp. 1111–1119, 2015.
- [13] W.-C. Chien, H.-H. Cho, C.-Y. Chen, H.-C. Chao, and T. K. Shih, "An efficient charger planning mechanism of wrsn using simulated annealing algorithm," in *IEEE International Conference on Systems*, 2015.
- [14] W.-J. Jian, H.-H. Cho, C.-Y. Chen, H.-C. Chao, and T. K. Shih, "Movable-charger-based planning scheme in wireless rechargeable sensor networks," in *IEEE International Workshop on MobiWorld*, hong kong, 2015.
- [15] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.