

# 無線感測網路圓碟覆蓋旅途問題

## The Disk Covering Tour Problem for Wireless Sensor Networks

Jia-Jiun Yang (楊家俊)

國立中央大學資訊工程所

kingmaykou1@gmail.com

Jehn-Ruey Jiang (江振瑞)

國立中央大學資訊工程所

jrjiang@csie.ncu.edu.tw

### 摘要

本論文探討圓碟覆蓋旅途問題(disk covering tour problem, DCTP)以減少行動裝置在無線感測網路(wireless sensor network, WSN)中移動的電量成本。DCTP 問題討論如何在給定起始點及若干平面點的條件下，找出一條最小成本(cost)的旅途(tour)，此旅途由起始停駐點(tour stop)出發經過多個停駐點(tour stop)後回到起始停駐點。停駐點不需要在給定的點上，但每一個給定的點至少要能與旅途中的某個停駐點的距離在給定的圓碟半徑內。由於行動裝置移入與移出停駐點時會耗掉較多電量，因此停駐點個數越少越能減少旅途成本，我們將如何減少停駐點個數視為圓碟覆蓋問題(disk covering problem, DCP)，提出 decreasing k-means (Dk-means)演算法嘗試找出近似(nearly)最少圓碟來覆蓋所有給定點，再透過得到的停駐點以 Lin-Kernighan heuristic(LKH)找出近似最短的旅途。我們透過實驗模擬比較本論文提出的方法與其他相關方法(covering salesman problem 的求解演算法與 Qi-Ferry 方法)找出的最短旅途，我們發現本論文所提的方法具有旅途成本較小的優勢。

**關鍵字：**圓碟覆蓋問題、無線感測網路、k-means 演算法、圓碟覆蓋旅途問題

### Abstract

This paper addresses the Disk Covering Tour Problem (DCTP) to reduce the energy consumption of mobile devices

in Wireless Sensor Networks (WSNs). The DCTP problem is concerned with how to find the minimum cost tour to cover a given set of points in the Euclidean plane, where the tour starts at a starting tour stop, passes through several tour stops, and goes back to the starting tour stop. A tour stop is not necessary on a given point, but every given point should be covered by a tour stop within a specific disk radius. Since a mobile device consumes more energy when it reaches and leaves a tour stop, a smaller number of tour stops is preferred. We propose the Decreasing K-means (DK-means) algorithm to find the nearly minimum number of tour stops to cover all given points and then find a nearly shortest tour passing through all tour stops with the Lin-Kernighan Heuristic (LKH). We simulate the proposed algorithm and compare it with related methods, the algorithm to solve the covering salesman problem and the Qi-Ferry method. The simulation results show that the tour returned by the proposed algorithm has a cost lower than those returned by the related methods.

**Keywords:** Disk Covering Tour Problem, Wireless Sensor Network, K-means algorithm, Covering Salesman Problem

### 一、簡介

隨著越來越多成熟的行動裝置(mobile devices)，許多議題也透過利用行動裝置到無線感測網路進行不同的應用，例如：資料收集(data collection) [1]、使用移動匯集點

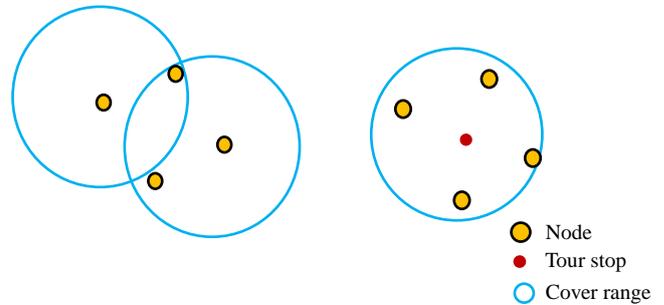
(mobile sink) [2]等等，由於行動裝置的功能和應用的環境都大不相同，且行動裝置的運作能力限制於自身電量，所以探討如何有效的控制行動裝置的電量消耗是很重要的議題。

行動裝置電量消耗主要由行動裝置提供服務和移動耗電量所組成，前者即為行動裝置對感測器所提供的服務，如：無線充電、蒐集資料等，後者則為行動裝置在提供服務過程中所移動的耗電量，而在此篇文章中又稱作旅途成本 (tour cost)。旅途成本為行動裝置行加速、減速以離開或進入停駐點，以及定速經過兩個旅途中相鄰停駐點所耗費的電量，一般而言，停駐點個數與旅途長度均會影響旅途成本。本篇文章主要探討減少行動裝置的旅途成本以減少其電量消耗，亦即選擇適當的變形旅行商問題來減少行動裝置移動耗電量。

在本篇文章中，我們提出圓碟覆蓋旅途問題(Disk Covering Tour Problem, DCTP)，此問題定義為在給定平面點及起始點的條件下，找出一條最小成本(cost)的旅途(tour)，此旅途由起始點出發經過多個停駐點(tour stop)回到起始點。停駐點不需在給定的點上，但每一個給定的點至少要能與旅途中的某個停駐點的距離在給定的範圍內。此問題較符合較一些無線感測網路，例如利用行動資料驢(data mule)蒐集資料，或利用行動無線充電器(wireless mobile charger)進行無線充電等，主要目的是減少行動裝置的旅途成本。

我們認為停駐點個數越少則旅途成本越有減少的趨勢，所以我們探討在已知演算法中，得知存在著許多可以用來減少停駐點個數的問題，像是集合覆蓋問題(Set Covering Problem, SCP)、圓碟覆蓋問題(Disk Covering Problem, DCP)、部分覆蓋問題等等，其中大部分的方法都以節點作為停駐點的候選人，所以停駐點個數並不是最佳的，我們以圖一為例，得知停駐點須在節點上(左)比起可以在其他位置(右)的停駐點個數還多。我們將減少停駐點個數問題視為圓碟覆蓋問題，然而以往解決 SCP 和 DCP 的方法中，都需要事先給定固定資訊，如：關係集合、圓集合，然而會導致演算法複雜度較高，就 DCP 而言，能覆蓋一個節點且半徑為  $r$  的圓至多有  $4\pi r^2$  個(圓心座標為整數

的觀點)，若將所有節點產生的圓都探討將導致計算的成本過高。



圖一：停駐點位置覆蓋範例

我們提出 Decreasing K-means Algorithm (DK-means) 來解 DCTP，先參考[7]提出貪婪演算法(greedy algorithm) 並將其修改成作完全覆蓋問題，將得到的圓個數作為初始 K-means 的分群個數，執行 K-means 做圓碟覆蓋問題並取得群集關係，再經由探討 Smallest Enclosing Circle Problem 來修改原始群集中心並作為停駐點，配合 LKH 演算法找到近似最短的旅途(tour)，透過迭代得到不同的旅途和遞減方法以嘗試找出近似最少圓碟覆蓋所有點，於每回合選取較佳的解以找出較小的旅途成本。雖然減少停駐點個數可能會增加旅途長度或旅途成本，但我們透過模擬結果應證當停駐點個數越少時，DK-means 得到旅途長度和旅途成本大多都有減少的趨勢，而且 DK-means 的另一好處為雖然得到的停駐點個數不一定是最少，但是也可能選出一條較小的旅途成本，我們透過模擬 DK-means 並比較 Qi-Ferry、CSP，發現我們的方法具有旅途成本較小的優勢，而且當給定點個數越多時，我們方法的優勢會越來越明顯。

## 二、相關研究

旅行推銷員問題(Traveling Salesman Problem, TSP)是現今最有名的組合最佳化問題之一，簡而言之，就是在給定已知的點下，找到從一個節點開始，訪問其他每個節點一次之後再返回起始節點的最短旅途。近幾年來，許多新的變形旅行推銷員問題不斷被引入研究，像是群集旅行推

銷員問題(Clustered Traveling Salesman Problems, CTSP)、有收益之旅行推銷員問題(Traveling Salesman Problems with Profits)等等。

文章[3]提出一種啟發式的方法來解決覆蓋推銷員問題(Covering Salesman Problem, CSP)，覆蓋推銷員問題為一種變形旅行推銷員問題，其定義為在給定的  $n$  個點中，每個點  $p$  都有各自事先給定的覆蓋距離  $d_p$ ，在給定的  $n$  個點中找到一個子集，子集中的點作為停駐點並形成一個最小成本的旅途，每一個不是停駐點的點  $i$  都至少與一個停駐點的距離在  $d_i$  以內。此問題可用於在真實世界中，如路由的農村醫療衛生服務團隊的訪查行為，假設拜訪每個城市是沒有必要的，因為服務團隊可以只在某些城市設置停駐站，而不在停駐站城市的人民只需前往最近的停駐站。作者先透過找出集合覆蓋問題(Set Covering Problem, SCP)的所有解，再從所有解形成的旅途中選出一條最短的旅途，我們在本論文中將此篇的方法簡稱為 CSP。

文章[4]探討在環境為透過無線行動充電器幫無線感測網路中的感測器(節點)充電，其中作者在文章中用到覆蓋推銷員問題中覆蓋的概念，但停駐點卻並不需要在節點的位置上，進而找到一個停駐點組合使旅途為最短，以減少行動充電器在無線感測網路中的移動耗電量，最終目的為增加能被充電的感測器數量，作者提出一種啟發式的方法，透過粒子群演算法決定停駐點位置，並配合 LKH[5]演算法得到近似最佳解的旅途，透過不斷的修正停駐點位置來找出最佳的旅途路線，在模擬部分則與 CSP 比較旅途的長度，我們在本論文中將此篇的方法簡稱為 Qi-Ferry。然而文章內卻沒考慮的停駐點個數會在現實環境中造成額外的電量消耗。從文章[6]中得知行動裝置從靜止行加速至定速或從定速行減速至靜止時，其花費的電量比固定速率所消耗的電量還多，所以當行動裝置在旅途中經過的停駐點個數越多，所需要消耗在這些行為的電量就越多，在本篇論文中我們在最後模擬章節會參考到[6]文章的數據。

文章[8]中利用[7]提出貪婪演算法(greedy algorithm)來做部分覆蓋問題(Partial Covering Problem, PCP)，文章內透過所有任意兩節點產生半徑為  $r$  的圓集合，以貪婪選擇的

方式在這些圓集合中重複選出覆蓋節點最多的圓，直到得到事先給定可以存在圓的個數，來增加網路中節點覆蓋率，其方法的好處是簡單且圓是由兩相異節點所產生，可以大幅減少候選圓的個數。文章中作者研究幾種演算法來探討部分覆蓋問題，其中包含 Dominating Set (DS)、Connectivity Algorithm (CA)和文章[7]中的三種方法，我們從結果得知[7]的貪婪演算法在覆蓋率結果會是最佳的，所以我們將[7]提出的貪婪演算法做適當的修改，使所有節點都被覆蓋到時所需的圓個數(即為停駐點個數)，利用其值當作我們演算法的重要參數。

### 三、問題定義與應用場景

#### 3.1 圓碟覆蓋旅途問題(Disk Covering Tour Problem, DCTP)

以下為 DCTP 問題定義， $G = (V, E)$  是一個在歐氏空間(Euclidean space)的完全圖，頂點集合  $V = \{d\} \cup Z$ ，其中  $d$  是起始位置，而  $Z$  則是一般需要被覆蓋的點集合，讓非負函數  $C(i, j)$  相當於在歐氏空間任意兩個位置之間的歐氏距離(Euclidean distance)，而其目的是找到一條最低成本的旅途(Tour)  $T = \langle t_1, t_2, \dots, t_{|T|} \rangle$ ，其中  $t_i$  稱為有序停駐點(Tour Stop)，而非負函數  $X(i)$  則為停駐點  $i$  的成本，需滿足下列條件

1. 每個停駐點  $t_i \in T$  的位置都不相同，而  $d$  為路線的起始和結束位置，即  $t_1 = t_{(|T|+1)} = d$ 。
2. 所有在點集合  $Z$  中的點，都至少與一個停駐點  $t_k$  之間的距離小於給定覆蓋距離  $r$ 。

目的函數如方程式 1，其中  $w$  為旅途長度的成本加權值。

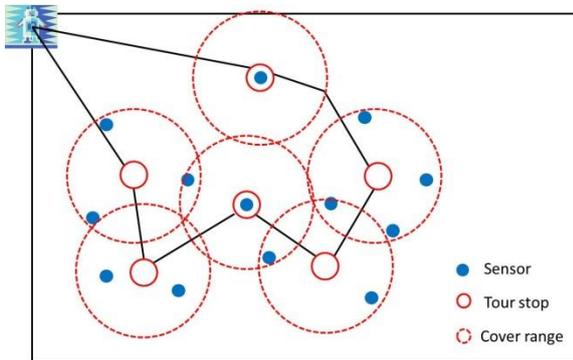
$$\text{Minimize } Z = w * \sum_{i=1}^{|T|} C(t_i, t_{i+1}) + \sum_{i=1}^{|T|} X(i) \quad (1)$$

#### 3.2 應用無線感測場景

DCTP 適用現今許多使用行動裝置在無線感測場景的議題，如圖二，佈置方法採取隨機佈置(random deployment)，透過行動裝置移動至停駐位置，而感測器必須在停駐點運

作的覆蓋範圍內，透過抉擇適當的旅途，來減少行動裝置在運作過程中的旅途成本，其中停駐點函數成本即為行動裝置行加速、減速以進入或離開停駐點消費的電量，以及定速經過兩旅途中相鄰停駐點所消耗電量(加權值  $w$  即對應到行動裝置定速移動一公尺的耗電量)，可應用在的議題如下：

1. 無線充電: 如 Qi-Ferry 的無線充電環境，行動充電裝置以固定充電距離  $r$  替感測器充電，作者假設若感測器位於行動充電裝置的充電範圍則接收到的充電效益都為相同，然而實際的充電技術效益大多與距離平方成反比，如:射頻(Radio Frequency, RF)，所以我們可以假設在充電範圍內的感測器獲得的充電電量效益足以滿足自身要求(充電效益因充電技術而異)。
2. Data Mule: 透過行動裝置到無線感測網路上收集節點資訊，而無線通訊距離則為覆蓋範圍。



圖二: DCTP 應用場景

#### 四、Decreasing K-means Method

我們認為若停駐點個數越少，則旅途成本可能有越來越少的趨勢，所以我們透過使用 K-means 分群演算法並配合遞減的觀念以嘗試找到最少的停駐點個數，我們將 K-means 得到的每個群集關係使用最小包含圓(Smallest Enclosing Circle Problem, SECP)的概念，嘗試是否能用一個小於覆蓋範圍大小的圓碟來覆蓋其群集成員，得到最小包含圓的圓心即為停駐點位置，再透過得到的停駐點以 Lin-Kernighan Heuristic (LKH)找出近似最短的旅途，並以

迭代遞減的方法來增加更多不同停駐點組合所形成的旅途。

圖三為我們提出的 DK-means 方法的演算法，其中  $S$  為點集合和  $R$  為覆蓋距離， $T$  為迴圈執行次數根據觀察實驗的結果而設置，Step 1:我們透過執行 Greedy Algorithm 得到  $K$  值，我們利用此  $K$  值當作可行解，以便從較低的  $K$  值開始尋找適合的覆蓋結果，Step 2:我們透過迭代法以得出更多由不同停駐點組合所形成的旅途，每一回合執行 K-means Algorithm 得到群集關係，將每一個群集關係分別在引用最小包含圓概念(參考  $O(n^2)$ -time Algorithm[9]解法)得到的圓中心作為新的群集中心，如果修正後的群集中心都能覆蓋其所有節點成員，則我們將群集中心作為停駐點並透過執行 LKH 演算法得到旅途資訊並計算旅途成本，在比較區域(對應  $K$  值目前最好的結果)最佳結果，如果比區域最佳值少則取代區域最佳結果，最後當迴圈次數執行到給定次數  $T$ ，且存在區域最佳解(代表可以用  $K$  個圓碟覆蓋所有節點)，則我們將  $K$  減 1，返回 Step 2 嘗試得到是否存在更小的  $K$  值，否則執行 Step 3:在所有區域最佳的結果中，找出旅途成本最少的旅途路線，並且令 BestTour 表示最後結果。

Algorithm: DK-means method for DCTP
<b>Input:</b> $S$ 、 $R$ 、 $T$
<b>Output:</b> $BestTour$
<pre> 1: Execute Greedy Algorithm[8] set initial K 2: For t=1 to T 2.1: Execute K-means Algorithm get all cluster relation 2.2: For each cluster       Execute O(n2)-time Algorithm to update cluster center 2.3: If the distance of all the cluster center and it's cluster       members are within the R       Execute LKH get TSP tour T and calculate moving costs       Ck       If Ck &lt; bestCostk then           bestTourk= T ; bestCostk =Ck 2.4: If t == T and [ bestTour ] _k≠∅ then           K=K-1 , goto Step2 </pre>

```
3: Index=min(bestCostk)
BestTour= bestTourIndex
```

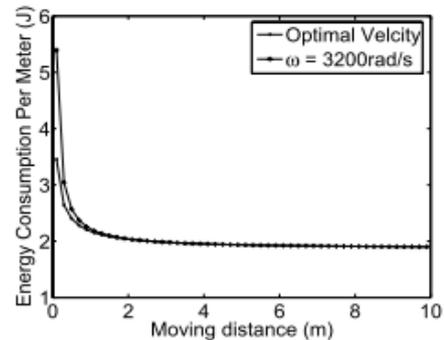
圖三: DK-means method for DCTP

## 五、實驗模擬

### 5.1 模擬環境

我們使用 Matlab 作為模擬的工具，將我們的方法應用在使用行動裝置的無線感測網路，我們分別將 30 至 120 個不同個數感測器隨機佈置於 100m x 100m 的模擬場景中，並分別對應到演算法中的執行次數為 3000、5000、8000、10000，圓碟覆蓋半徑長度為 10m，K-means 以隨機的方法選取初始群集中心，並將行動裝置的起始位置設置於左上角落，由於起始位置可以為基地台或其他設備，因此在起始位置附近的感測器可以在第一個時間內被行動裝置服務到，行動裝置藉由演算法決定旅途的路線並依序服務無線感測網路上的節點。

我們目前以行動裝置的移動行為來衡量停駐點的成本，為了實際評估行動裝置在加、減速到固定速率時所需額外消耗的電量，我們使用[6]內實際測試的數據作為依據，我們根據文章內給予的公式和圖四內的結果作為數據，在圖中我們參考  $w$  即馬達的角速度設為 3600 rad/s 的結果，橫軸座標為目前行動裝置移動的距離，縱軸座標為對應到當下的移動每公尺的消耗電量，由圖中可推得行動裝置從靜止加速到固定的速率的過程中所需額外的耗電量和距離約 2 公尺，而加速和減速所消耗的電量相同。然而兩點之間的距離可能小於其加速到固定速率和從固定速率減速到靜止的距離和，所以我們在計算停駐點額外電量的消耗需將兩兩停駐點之間的距離代入參考文獻的公式和參數。



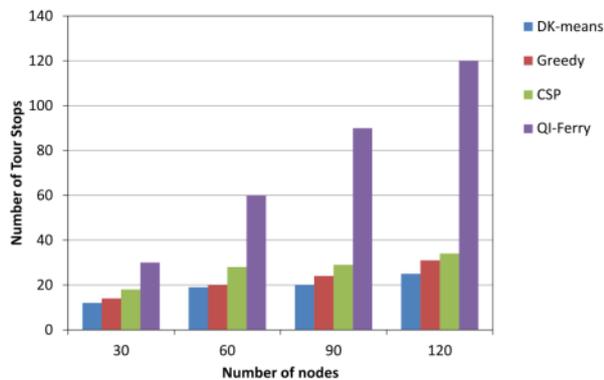
圖四: 行動裝置從靜止加速至固定速率之耗電量關係圖 (擷取[6])

### 5.2 效能分析

為了評估我們的效能，我們考慮主要三種度量分別為停駐點個數、旅途長度和旅途成本，雖然本論文在演算法圖三中，原本我們以旅途成本取向為目的，但考量行動裝置在停駐點的耗電量可能小到足以忽略，我們將演算法分為旅途長度和旅途成本兩種目的取向，也就是在原本的演算法 Step2-3 判斷區域最佳解的條件會根據不同的度量標準而有所改變(原本以旅途成本考量)。

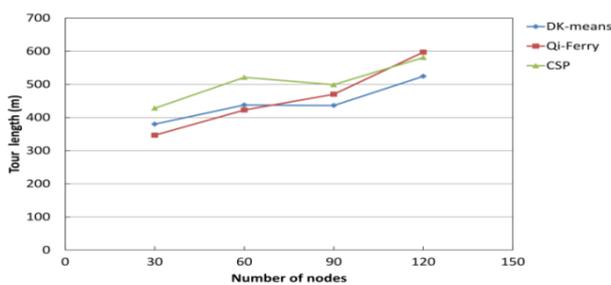
### 5.3 效能評估

從圖五中得知我們的方法比起 Greedy[8]具有較少個停駐點個數，原因是我們的方法參數是根據 Greedy 方法得到的停駐點個數往下遞減，以嘗試找出最少近似最少圓碟來覆蓋所有節點，然而 CSP 停駐點只能在節點做選擇，所以停駐點個數較多，Qi-Ferry 每個節點位置都會選一個停駐點，停駐點個數幾乎會與節點個數相同。

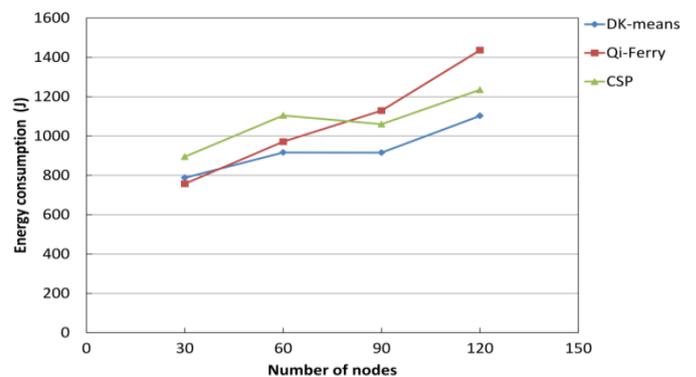


圖五：比較不同演算法之停駐點個數

在圖六，當網路節點個數為 30、60 時，我們方法比較 Qi-Ferry 其旅途長度都稍微多出一點，因為 Qi-Ferry 透過粒子群演算法不斷的修正而得到其旅途路線，然而當網路節點個數為 90、120 時，由於 Qi-Ferry 使用最基本的粒子群演算法有收斂至區域最佳解的缺點，所以其旅途長度比起其他方法優勢會慢慢的減少，而 CSP 擁有旅途路線選擇的問題(如:圖六例子)所以效果比我們的方法還差。圖七中，只有當節點個數為 30 時，我們的方法旅途成本稍微多出 Qi-Ferry，原因是因為節點個數過少，使得我們透過減少停駐點個數的優勢不顯著，然而隨著節點個數增加，我們的方法其旅途成本相較 Qi-Ferry 和 CSP 其結果都比較好，也再次證明可透過減少停駐點個數來減少旅途成本的耗電量。



圖六：行動裝置在不同網路節點個數之旅途長度比較



圖七：行動裝置在不同網路節點個數之旅途成本取向比較

## 六、結論

在本篇論文中我們提出 DCTP 並應用在無線感測網路場景中，不同於 Covering Salesman Problem 中停駐點需從節點位置選擇和 Qi-Ferry Problem 沒考慮停駐點個數對行動裝置可能會有不可忽略的電量消耗，我們提出 DK-means 方法，透過嘗試找出近似最少停駐點個數的過程中，求得較少的旅途長度和旅途成本。本論文透過模擬比較 CSP、Qi-Ferry 兩種相關方法，結果顯示我們的方法有較小旅途成本的優勢，且當網路節點個數越多時，DK-means 效能比起其他兩種方法優勢會越來越明顯。

在未來的工作中，我們希望先透過改進我們的方法，先求得較佳的停駐點個數和位置，並透過利用適當的演算法如基因演算法、蟻群演算法等，修正較佳的停駐點位置，以求得更少旅途成本。並且探討本文中利用 K-means 藉由最小包含圓修正群集中心的方法並調整參數對部分覆蓋問題的改善。

## 參考文獻

- [1] T.-S. Chen, P.-W. Wu, "On Data Collection Using Mobile Robot in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.41, pp. 1213-1224, 2011.
- [2] A.M. Zungeru, L.-M. Ang, K. P. Seng, "Termite-Hill: Routing towards a Mobile Sink for Improving Network Lifetime in Wireless Sensor Networks," *2012 Third International*

*Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS)*, pp. 622–627, 2012.

- [3] J. Current, D. Schilling, “The Covering Salesman Problem,” *Transportation Sciences*, vol. 23, pp. 208–213, 1989.
- [4] K. Li, H. Luan, C.-C. Shen, “Qi-Ferry: Energy-Constrained Wireless Charging in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 2515–2520, 2012.
- [5] K. Helsgaun, “An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic,” *European Journal of Operational Research*, vol. 126, no. 1, pp. 106–130, 2000.
- [6] G. Wang, M. J. Irwin , P. Berman , H. Fu , and T. L. Porta, “Optimizing Sensor Movement Planning for Energy Efficiency,” in *Proceedings of the 2005 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 215–220, 2005.
- [7] B. Xiao, J. Cao, Q. Zhuge, Y. He, and E. H.-M. Sha, “Approximation algorithms design for disk partial covering problem, ”in *Proceedings. 7th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks*, pp.104– 109, 2004.
- [8] L.-W. Chen, and C.-C. Chen, “The partial coverage problems in wireless sensor networks,” *The Fourth Workshop on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, pp. 95–102, 2008.
- [9] J. Elzinga, and D. W. Hearn, “The Minimum Covering Sphere Problem,” *Management Science*, Vol. 19, 96–104, 1972.