

無線感測網路中具能源效率之移動機器人資料收集之研究

杜威慶、陳宗禧

國立臺南大學資訊工程學系

qaz33338@gmail.com, chents@mail.nutn.edu.tw

摘要

以往在 Wireless Sensor Network(WSN)資料收集上，在一個 sensor 分布稀疏的地區而言，無法使用 multi-hop 進行資料的傳輸。所以本研究主要才需要探討，如何增進行動機器人(mobile robot)在分布稀疏的環境中收集資料的效益。本研究將提出減少 mobile robot 在 WSN 移動路徑的方法。讓 mobile robot 能有效率的移動去收集資料，一開始利用每個節點的位置規劃 TSP 路徑。本研究將會建立新的路徑方式，可以讓 mobile robot 移動的更為有效率和 Sensor 可根據調整後的路徑，改變自己的通訊半徑。透過模擬分析本研究提出的方法，能讓 mobile robot 在新建立的路徑上收集資料。最終，達到本研究的目的讓總消耗能量能夠最小化以及縮短移動路徑。

關鍵詞：資料收集、能量效率、行動機器人、路徑規劃、無線感測網路。

Abstract

In recent years, Wireless Sensor Network (WSN) data collection in the sensor sparse area, which can't use multi-hop for data transmission. Therefore, this study will need to explore how to enhance the benefits of mobile robot data collection in the WSN distribution sparse environment. This study used the mobile robot and implement method of reducing the movement path in the WSN. Let mobile robot move on the path to collect data by the TSP with sensor's location. We planned on the new path in this study. The new path, where mobile robot can move more efficiently, and the sensor can change its communication radius according to the new path. Eventually, the total energy consumption of mobile robot which including the sensor communication and the robot movement can be minimized. We simulated our method in this study, which can learn about mobile robot collect data efficiently on the new path. Finally, according to the results, the method that we proposed in this thesis, which the total energy consumption of mobile robot that including the sensor communication and the robot movement can be minimized.

Keywords: Data Collection, Energy Efficiency, Mobile Robot, Path Planning, Wireless Sensor Networks.

一、緒論

近年來科技不斷進步，網路通訊也跟著多元的發展，並且也越來越成熟。尤其在物聯網(Internet of Things, IoT) 的無線網路通訊中，無線感測網路(Wireless sensor Networks)，提供人們許多應用上的便利性與應用服務。物聯網的無線感測網路相關研究成為一項重要的討論議題。

物聯網一詞最早來自 1999 年 Kevin Ashton 所提出連結 RFID 的訊息到網際網路上，透過物聯網可將真實物體上網連結，以達到控制、偵測、識別，依目前物聯網的發展趨勢，應用在智慧程式、環境監控、物流管理以及工業控制等。物聯網其中包含了無線感測網路是由多個感測器(sensor)所組成，感測器通常可以被隨意(Random)或規則(Regulation)被分布在人們有興趣的區域(例如:輻射區域、氣體與火災監控等)。在感測器的發展上朝向微小化(Tiny)、低功耗(Low Power)、有儲存(Storage)、無線傳輸(Wireless Communications)、感測(Sensing)與運算(Computing)功能，且價格越來越低;效能也跟著提高。在無線感測網路中是由數百或數千的感測器所組成。這些感測器在感測環境中的資料後，利用本身具備的無線通訊的能力，傳送到應用端的地方。無線傳輸方面可以使用 ZigBee、BLE(Bluetooth Low Energy)、Wi-Fi 等傳輸技術，所以在感測器中的感測單元，能感測環境中的訊(例如:溫度、溼度等)，感測資料將經由微型控制單元(Micro Control Unit)處理計算與儲存。

除了上述的應用之外，在無線感測網路還有一項重要的研究議題就是能量(Energy)。在 WSN 中，又以多點傳輸(multi-hop)方式最為常見，每一個 sensors 都需接收前 sensors 的資料。因為 sensor 布置很多都是用靜態(static)的方式，為靜態感測器(Static Sensor)，sensor 大多部屬在人沒辦法進入的區域。如果又加上環境中 sensor 分布太稀疏[5]，而造成無法建構出一個能讓資料連通到 Base Station 的網路傳輸路徑。所以本研究才採用 mobile robot 移動性的特性，來收集 sensor 的感測資料，解決 sensor 資料無法傳輸的情況，同時也可降低 sensor 通訊上的能量消耗，mobile robot 因為需要移動到 Sensor 的通訊範圍收集資料。本論文將專注在如何縮

短 mobile robot 移動路徑，會先以 TSP 演算法規劃中一條路徑。在 sensor 分布稀疏的環境裡，由於 sink 是在固定的位置上，利用 mobile robot 去收集 sensor 所感測的資料，就可以解決此問題。

還得考慮 mobile robot 移動時所耗損的能量，因為當移動路徑越長，mobile robot 所消耗的能量越多。如何透過簡短移動路徑而達到節能，是本研究一個很重要的部分，以及調整 Sensor 通訊的能量消耗。

透過本研究裡的方法，利用挑選 Anchor Point 的方式，讓 mobile robot 停留收集 sensor 資料的點或者到達 Anchor Point 前就可以收集資料，建構較短的路徑後，再加上 sensors 新找出來的路徑進行通訊範圍調整。mobile robot 只需要能經過 sensor 通訊半徑就可以收集資料。最終能達到，優化整體網路的能量消耗。

接下來章節分佈如下，第二章為相關文獻，主要介紹有關 mobile robot 路徑規劃的相關研究，第三章系統模型與問題定義，提出符號的定義和主要研究的問題，第四章 mobile robot 資料收集，提出一些假設並說明本論文提出的方法。第四章實驗結果，將透過實驗模擬，驗證本論文中方法的優劣。第五章結論，會總結本論文的方法與實驗後的結果，接著會提出本論文的未來展望。

二、 相關研究

在文獻[10]中，可以看到許多建立 mobile robot 移動路徑在無線感測網路中收集 sensors 感測資料的方法，如：多點傳輸、格子等結構。接下來，來介紹不同的路徑規劃的方法。

第一介紹固定路徑的方法，在文獻[1]中，作者為了讓 mobile collector 在一個大範圍的無線感測網路(Large-Scale WSN)省電地收集 sensor 的資料，此文獻方法主要分成兩種：1. data collection using data mule(MULE)與 2. sensor network with mobile access point (SENMA)，在 MULE 中，主要先將無線感測網路內的 sensors 做分群(Cluster)，再將每一群作群組(Group)，在每群中挑出中心點為 Anchor Point，mobile collector 依照這些 Anchor Point，可以到每一群都屬於該群的 sensors 的資料。在 SENMA 中，利用 access point, AP collector (無人機, UVA)，每一個群都會對應到一個 AP，這樣好處是每一群的 sensor 只要 one-hop 可將資料傳給 AP，只是這樣會讓 sensor 傳送耗能增加。

第二會介紹多點傳輸，在文獻[11]中，在無線感測網路中 mobile robot 負責接收節點的事

件訊息，感測事件的節點為 source node，利用多點傳輸的方式，透過 relay nodes 給 mobile robot，作者考慮到 mobile robot 的移動路徑，先利用 mobile robot 速度與從 source node 收集資料的時間，構出 visiting area 的圓，其中的圓心為 Anchor Point 讓 relay node 可轉傳資料到 mobile robot，可以減少 relay node 使用的個數。

第三會介紹格子架構，在文獻[7]中，作者提出一個虛擬網格架構，在無線感測網路下，在網格中的 Sensor 動態建出一條，到離最近 Mobile Sink 最近的資料傳送路徑。主要目的為了減少 Mobile Sink 在無線感測網路移動下，Sensor 必須不斷重建路徑，把資料傳給 Mobile Sink 所花費的成本。在本論文中，是考慮到 Sensor 的通訊半徑。在此篇論文中，在每格子(Cell)裡會挑選一個 Sensors 為 Head，主要 Head 負責收集 Cell 中 Sensor 的資料，Mobile Sink 會在周圍四邊移動，Mobile Sink 會傳送自身的資訊，Head 收到資訊會轉送到鄰居 Head，這時候鄰居 Head 會檢查發送端，是否為前一個 Head，是的話，丟棄封包，否則，路徑指向發送端。

最後介紹 TSP 路徑，在文獻[12]中，作者研究如何減少 Mobile Sink 在無線感測網路下，資料傳輸的延遲，作者提出一開始先用 TSP 演算法規劃出一條路徑，本研究一開始也是利用 TSP 演算法作為初始路徑。此篇論文提出 Point Substitution (PS)點置換與 Line Substitution(LS)線段置換。在點置換(PS)裡利用 Inter-Line 進去的線段與 Outer-Line 線段，與該 Sensor 的通訊半徑所構成的弧，再從弧上中間挑 Anchor Point。

在文獻[3]中，作者要避免無線感測網路，因多點的傳輸方式，而造成的大量的能量消耗。一開始作者先用 TSP 演算法規劃出一條路徑，發現 Sensor 的通訊範圍，會有所謂的重疊區域(Overlapping Area)。意思就是說讓 Mobile Sink 在 Overlapping Area，就可以一次收集到 Overlapping Area 裡的 Sensors 的感測資料。在 Overlapping Area 中挑出 Visiting Points，也就是本研究裡的 Anchor Points。可以降低 Mobile Sink 原本拜訪節點的數量。

三、 系統模型與問題定義

本研究主要討論 TSP 路徑得問題，因為 TSP 路徑問題是 NP-hard[2]，所以本研究提出 heuristic 的方法。mobile robot 在經由本研究方法所建構的路徑下，能減少 mobile robot 移動時會耗損能量，代表能夠縮短 mobile robot 整

個移動路徑。文章使用到的符號定義請參閱表 1。

表 1：符號定義

Notation	Definition
r_c	Sensor 的通訊半徑。
r_s	Sensor 感測半徑。
S	Sensor 的集合, $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, where $n= S $ 。
p_{s_i}	Sensor s_i 的位置, $i=0$ to n
D	為 mobile robot 的起始位置, (x_D, y_D) 。
$L_{i,j}$	射線的編號, 為 s_i 第 j 條射線。
A	Anchor Point 的集合, $A=\{a_1, a_2, \dots, a_\alpha\}$, where $\alpha = A $ 。
$Slope(x,y)$	計算 x 點到 y 點之間的斜率。
$Plan(S)$	利用節點位置做 TSP 路徑。
φ	mobile robot 移動路徑, $\varphi = (<D, a_1>, <a_1, a_2>, \dots, <a_\alpha, D>)$, $m= \varphi $ 。

當路徑可以達到越來越短時, mobile robot 能量耗損會跟著減少, 再加上 sensor 通訊半徑可以調整, 意思就是說可以降低 sensor 的發送功率, 減少 sensor 電量上的消耗, 綜合以上能最小化總能量消耗, 其代表減少 mobile robot 能量耗損, 加上減少 sensor 電量上的消耗, 縮短路徑如式子(1)。 V_i^n 為 Sensor 是否有被 mobile robot 拜訪, 若當 mobile robot 經過 sensor 的通訊半徑為 1, 否則為 0, 確保 mobile robot 都能夠收集到 sensor 的資料。

$$\min_{\forall j \in \varphi} (\sum_j^n \varphi_j) \quad (1)$$

$$\prod_{i=1}^n V_i^n > 0 \quad (2)$$

四、Mobile Robot 資料收集

本論文將提出縮短 mobile robot 移動路徑的方法為：Area-Shrinking Anchor Selection Scheme(ASAS)。

4.1、Area-Shrinking Anchor Selection Scheme

Step 1: 以 Mobile Robot 位置 D 為 Source, 根據 n 的 Sensors 的位置 $p_S=\{p_{s_1}, p_{s_2}, \dots, p_{s_n}\}$, 建構一條 TSP 路徑($Plan(S)$), 然後再回到 Source 位置 D 。

Step 2: 根據 Step 1 所找到的 TSP, 由 Source 位置 D 到下一個 Sensor s_i , 一步一步找到最適當的 Anchor Point, 方法如下:

- 首先根據三點的位置依序為 Sensors s_i, s_{i+1}, s_{i+2} , 連接 s_i, s_{i+1} 與 s_{i+2} , 建構一個內角($\leq 180^\circ$)的弧, 找出 $L_{i,1}$ 為 $Slope(A_i, p_{s_i})$ 與 $L_{i,2}$ 為 $Slope(A_i, \text{using Equ. (7)})$ 。

- 接下來依序檢查下一個 Sensor, 是否能讓 $L_{i,1}$ 與 $L_{i,2}$ 所交集的區域會涵蓋下個 Sensor 弧, 若會經過, 則 Goto Step 2.ii, 繼續往下一個 Sensors, 該區域會愈來愈小; 若沒有經過該區域, Goto Step 3, 決定錨點(Anchor Point)。

Step 3: 決定錨點(Anchor Point)的兩種機制, 分別為:

- Backward-Area-Shrinking Anchor Selection Scheme (B-ASAS)。
- Forward-Area-Shrinking Anchor Selection Scheme (F-ASAS)。

Step 4: 假如 $L_{i,1}$ 與 $L_{i,2}$ 最後一點為 Source 位置 D 則結束挑選, 依錨點建構一條 TSP 路徑; 若不是, Goto Step 2。

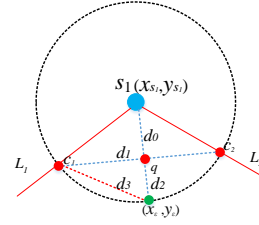


圖 1 弧的中心點

$$(x_\varepsilon - x_{s_1})^2 = d_3^2 - (y_\varepsilon - y_{s_1})^2 \quad (7)$$

where

$$x_q = \frac{x_1 + x_2}{2}, y_q = \frac{y_1 + y_2}{2}, \text{where}$$

$$c_1 = (x_1, y_1), c_2 = (x_2, y_2) q = (x_q, y_q)$$

$$d_3 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}$$

$$d_2 = r_c - d_0, \text{where}$$

$$d_0 = \sqrt{(y_q - x_{s_1})^2 + (x_q - y_{s_1})^2}$$

$$y_\varepsilon = \frac{(x_\varepsilon - x_1)^2 - (x_\varepsilon - x_q)^2 + y_\varepsilon^2 + y_q^2 - d_3 + d_2}{-2 \times y_1 \times 2 \times y_q}$$

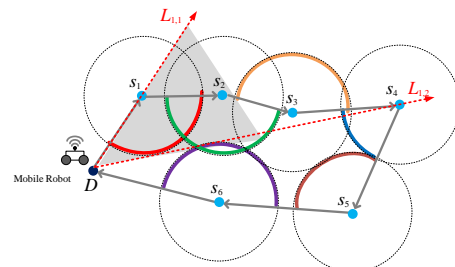


圖 2.一開始D上所形成的射線

此例子是表示為 B-ASAS 與 F-ASAS 方法, 在圖 2 中一開始 D 為 mobile robot 的起始位置。第一步在 D 上會形成兩條射線 $L_{1,1}$ 與 $L_{1,2}$, $L_{1,2}$ 與 s_1 上紅色的弧相切, $L_{1,1}$ 與 $L_{1,2}$ 形成區域可包含第一個 s_1 紅色的弧, 代表在這兩條射線

範圍內，mobile robot 一定可以經過 s_1 上的弧。接下來透由調整射線 $L_{1,1}$ 與 $L_{1,2}$ 間的涵蓋灰色區域，往下一個 s_2 前進，檢查是否還可包含，下一個 s_2 綠色的弧。

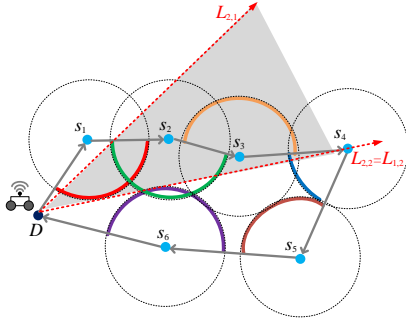


圖 3. 形成新的 $L_{2,1}$ 與 $L_{2,2}$ 射線

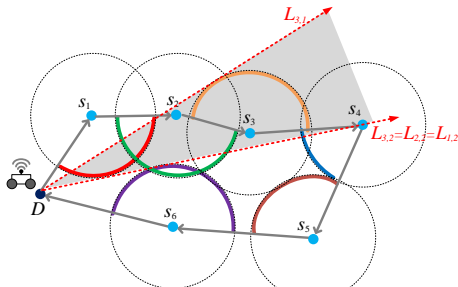


圖 4. 產生新的兩條射線 $L_{3,1}$ 與 $L_{3,2}$

在圖 2 中， $L_{1,1}$ 與 $L_{1,2}$ 兩條射線間的灰色區域涵蓋 s_2 綠色的弧，所以可以調整為兩條新的射線，這兩條射線在 s_2 綠色的弧上稱為 $L_{2,1}$ 與 $L_{2,2}$ 。 $L_{2,2}$ 為原本的 $L_{1,2}$ 因為此射線已經涵蓋 s_2 綠色的弧，所以不需要再移動。 $L_{2,1}$ 與 $L_{2,2}$ 區域可以涵蓋 s_2 綠色的弧，這也代表著 mobile robot 在 $L_{2,1}$ 與 $L_{2,2}$ 兩條射線包含的範圍內，一定能通過 s_1 與 s_2 弧內，如圖 3 所示。再來檢查，是否可以在調整射線涵蓋灰色區域後，是否還可以包含 s_3 橘色的弧。

在圖 3 中， $L_{2,1}$ 與 $L_{2,2}$ 兩條射線涵蓋灰色區域是可以調整的，因此調整成新的兩條射線 $L_{3,1}$ 與 $L_{3,2}$ ， $L_{3,1}$ 與 $L_{3,2}$ 構成的灰色區域可以包含 s_3 橘色的弧， $L_{3,1}$ 與 $L_{3,2}$ 為原本的 $L_{2,1}$ 與 $L_{2,2}$ ，因為 $L_{2,1}$ 與 $L_{2,2}$ 射線都有涵蓋 s_3 橘色的弧，所以不需要移動。也代表著 mobile robot 在 $L_{3,1}$ 與 $L_{3,2}$ 兩條射線，所包含的範圍內一定能通過 s_1 、 s_2 與 s_3 弧內，如圖 4 所示。再來檢查，是否可以調整 $L_{3,1}$ 與 $L_{3,2}$ 涵蓋灰色區域，再讓兩條射線能包含 s_4 藍色的弧。

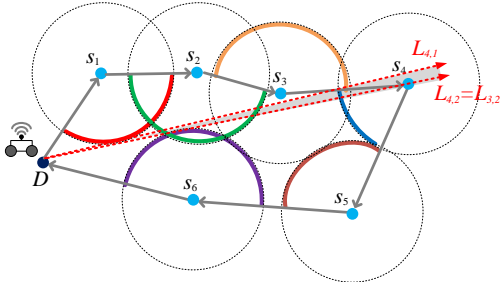


圖 5. 重新建立兩條射線 $L_{4,1}$ 與 $L_{4,2}$ 。

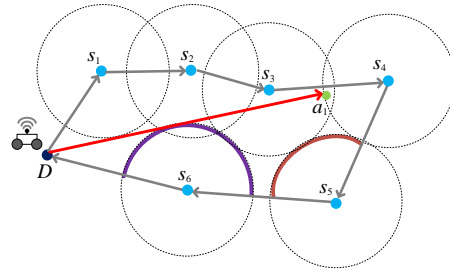


圖 6. 挑選 Anchor Point a_1

在原本圖 4 中，會檢查是否還能夠涵蓋 s_4 藍色的弧，調整射線間涵蓋灰色區域後，還可以繼續包含下一個 s_4 藍色的弧，經由調整後的射線為 $L_{4,1}$ 與 $L_{4,2}$ ， $L_{4,2}$ 為原先圖 4 中的 $L_{3,2}$ 也已經包含了 s_4 的弧，所以不需要做調整。 $L_{4,1}$ 與 $L_{4,2}$ 灰色區域可以涵蓋 s_4 藍色的弧，這也代表著 mobile robot 在 $L_{4,1}$ 與 $L_{4,2}$ 兩條射線包含的範圍內，一定能通過 s_1 、 s_2 、 s_3 與 s_4 弧內。接下來，再次調整兩條射線涵蓋灰色區域，是否可以包含 s_5 咖啡色的弧。

發現是不行的，所以可以開始找 Anchor Point，一開始會先找射線 $L_{4,1}$ 與 $L_{4,2}$ 構成的灰色區域與 s_4 藍色的弧所涵蓋的範圍內，其中一點與前一個 anchor point 較近的點為 anchor point a_1 ，因為沒有前一個 Anchor Point，所以以 D 為代表，此為 B-ASAS 的作法。F-ASAS 做法為射線 $L_{4,1}$ 與 $L_{4,2}$ 構成的灰色區域與 s_4 藍色的弧所涵蓋的範圍內，其中一點與離 s_5 比較近，較近的點為 a_1 。如圖 5 所示。

圖 5 中，Anchor Point a_1 被挑選，這時候 mobile robot 到 a_1 前，中間經過 s_1 、 s_2 與 s_3 。 D 到 a_1 過程中會經過 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 的通訊範圍，能讓 mobile robot 可以在這中間移動的過程中收集感測資料，如圖 6 所示。

接下 a_1 在建立新的射線，重複圖 2 至圖 6 的步驟，最後圖 7 中，新的路徑為 $\varphi=(\langle D, a_1 \rangle, \langle a_1, a_2 \rangle, \langle a_2, D \rangle)$ ，mobile robot 透由拜訪 a_1, a_2 即可收集所有 sensors 的資料。在依照新的路徑 φ 將 sensor 的通訊範圍調整至路徑相切，目的為減少通訊耗能。

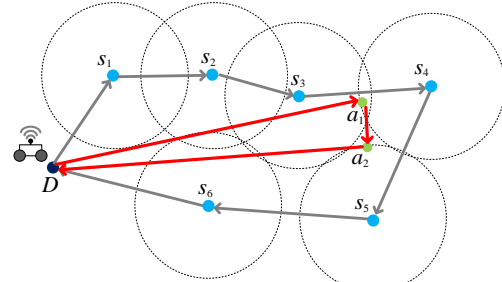


圖 7. 依錨點建立的 TSP 路徑

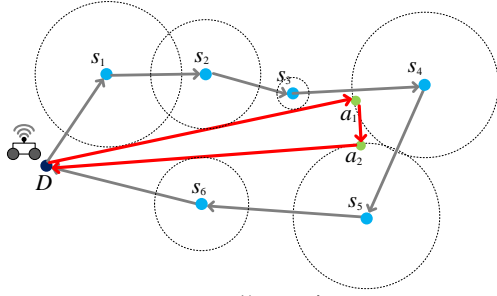


圖 8. 調整通訊半徑

五、模擬結果

我們從本論文所提到簡化 mobile robot 移動路徑，透過模擬實驗結果從中觀察出優勢。

5.1、實驗環境設置

將我們提出的方法利用 Java 語言，來開發環境實際模擬分析效能，實驗環境參數如表 2。我們依照文獻[12]以及文獻[3]來與本研究的方法做比較。感測節點皆以隨機的分佈的方式。

1. 總能量消耗

因為 mobile robot 不論在移動時與接收資料時，都會產生耗能，因此使用總能量消耗，包括 sensor 的感測與傳接收的耗能。mobile robot 能量消耗如式子(3)以及 sensor 能量消耗如式子(6)、式子(7)。

$$MR_j = E_{move} + E_{comm} \quad (3)$$

$$E_{move} = \alpha \times \varphi_j \quad (4)$$

$$E_{comm} = \beta \times \gamma_j \quad (5)$$

$$SN_{comm_{i,j}} = (e_t + e_d \times r_{c_i}^{n_{loss}}) \times B \quad (6)$$

$$SN_{sensing_i} = (e_{sensing} + e_{calcu}) \times T_{active} \quad (7)$$

式子(3)、(4)、(5)中，MR 為 mobile robot 完成收集資料的任務時的花費能量，計算 mobile robot 完成收集資料時，接收資料的能量花費總其分別為： E_{comm} 和 E_{move} ， α 為每秒移動的能量花費， φ 為移動路徑、 β 為每秒接資料能量花費以及 γ 為每秒的接收的資料量，以及每當 mobile robot 抵達 sensor 通訊半徑接收資料所花費的能量[8]。

式子(6)中 SN_{comm} 為 sensor 進行通訊所耗費的能量， e_t 定義為每秒傳送一個 bit 所需耗費的能量。 e_d 定義為能量在傳輸耗損， r_{c_i} 為每個 sensor 的可調整通訊半徑， n_{loss} 定義為天線的路徑損失，通常值為二或四， B 定義為資料的傳輸速率。請參考調整後的能量花費[6]。在式子(7)中 $SN_{sensing}$ 為 sensor 感測資料所花費的能量[9]， $e_{sensing}$ 為感測一次的能量消耗， e_{calcu}

為 sensor 的 CPU 在計算時所消耗的能量， T_{active} 為 sensor 的 active time。

2. 路徑長度

上述提到 mobile robot 移動時會產生移動耗能，所以移動路徑的長短對於能量消耗是有影響。

3. Anchor Points 數量

Anchor Point 是讓 mobile robot 停留的位置或 mobile robot 到達 Anchor Point 之前就能收集資料。移動路徑(φ)就由起始位置(D)與 Anchor Point(A)所組成。

表 2：實驗環境參數

參數	數值
區域大小	950m*560m
機器人電力	6V
感測器電力	1.5V
感測器數量	10~100
感測器通訊範圍	10m~70m
起始位置 (x_D, y_D)	(100,100)
Sensor 通訊耗能	50×10^{-9} J/bit, 100×10^{-12} J/bit, 2, 250k
Sensor 感測耗能	0.775mJ, 8mJ, 200ms
Mobile Robot 耗能	1J, 1J/bit, 250k

5.2、實驗模擬結果

在 5.2.1 中，會比較在最大的通訊範圍 70 公尺 10 到 100 個節點，觀察消耗、路徑長度以及 Anchor Points 數量，以及比較在最大的通訊範圍 70 公尺 1 到 10 節點表示為分佈稀疏的狀況，觀察消耗、路徑長度以及 Anchor Points 數量。在 5.2.2 中，會比較節點數為 60 個通訊範圍 10 至 70 公尺觀察消耗、路徑長度以及 Anchor Points 數量。在本實驗的數據都執行 1000 次取平均

5.2.1、不同節點數

在圖 9 中可以發現，當節點數越多時 Anchor Point 數量也跟著增加，TSP 路徑原本的節點位置就為一個 Anchor Point。除了 TSP 除外，其他皆有減少 Anchor Point 數量的特性。CTR 因為重疊區數量多，所以 Anchor Point 數量減少方面比我們的方法好一些。

在圖 10 中可以發現，當節點數越多時 Anchor Point 數量也跟著增加。本論文方法 F-ASAS 在稀疏的節點環境下 Anchor Point 數量會跟 B-ASAS 差不多。在節點數少時造成 CTR 有較少重疊區，同樣也影響到 SHA 的 Anchor Point 數量少的原因，造成每次都要挑選 Anchor Point，所以數量接近 CTR。本論文方法在稀疏的節點環境下時，雖然射線能涵蓋的

sensor 有限，但 Anchor Point 數量會比 SHA、CTR 來得少。

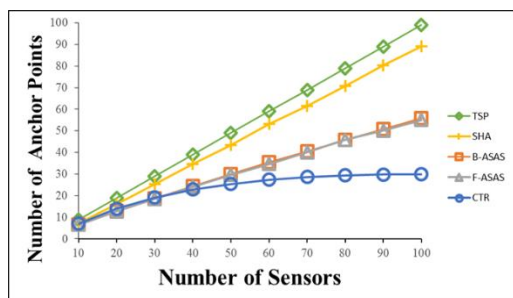


圖 9. 節點數分布密集，Anchor Point 數

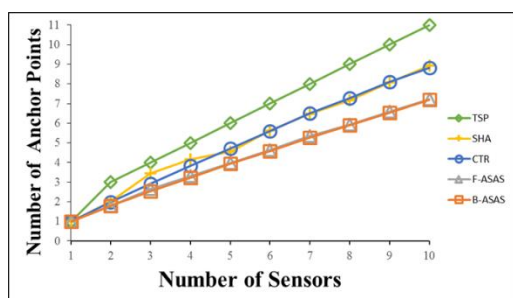


圖 10. 節點數分布稀疏，Anchor Point 數

在圖 11 中可以發現當節點數越多時移動路徑也會越長，TSP 路徑跟節點越多而越長，本論文方法 B-ASAS、F-ASAS 比其他方法移動路徑來得較短。SHA 與 CTR 在 50 到 60 個節點以後，CTR 開始會比 SHA 短，因為重疊區域開始增加，比起 SHA 可以少走部分的路徑。在本研究的方法，不會受到重疊區域的限制，只要再射線範圍內，即可讓 mobile robot 收集 sensor 的資料。F-ASAS 會隨著節點數增加，而縮短移動路徑。

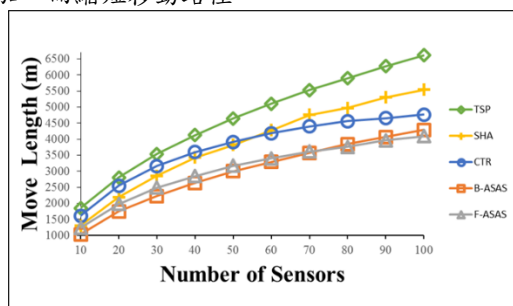


圖 11. 節點數分布密集，移動路徑

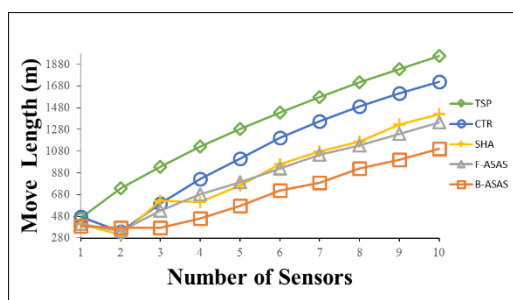


圖 12. 節點數分布稀疏，移動路徑

在圖 12 中，觀察 mobile robot 的移動路徑在 1 至 10 個節點的變化，在數量為一個節點時，本論文方法與其他方法，路徑長度相差不大，因為 mobile robot 只需要拜訪一個節點。從第三個節點開始，移動路徑隨著節點數增加而越長，本論文的方法比起其他方法在分佈稀疏環境，有較短的移動路徑。B-ASAS 因為在節點數量少的时候，離前一個 anchor point 比較近，所以路徑長度比 F-ASAS 短。

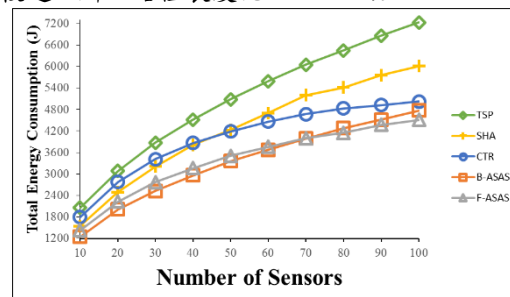


圖 13. 節點數分布密集，能量消耗

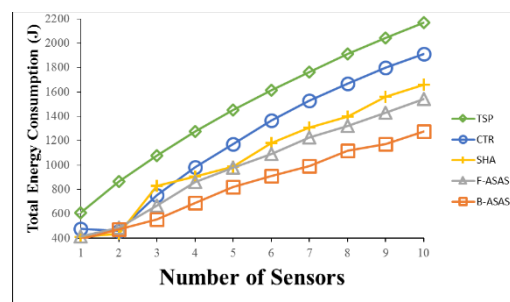


圖 14. 節點數分布稀疏，能量消耗

圖 13 中一樣當節點數越多時移動路徑也會越長，因為在圖 11 中的路徑長度對於整個能量消耗是有影響力，所以當路徑越來越長，能量消耗也會跟著增加。在第 50 個節點以後，CTR 因為較多的重疊區，可降低路徑長度，所以能量消耗跟著減少。在本研究裡 sensor 可以跟著路徑調整通訊範圍，整體來看，比起其他的方法，能量消耗是較低的。F-ASAS 能量消耗會因為路徑變短，而使得能量消耗跟著減少。

在圖 14 中，先從圖 12 可得知數量為 1 的節點，再移動路徑上是很相近的，所以在能量消耗上，也會跟移動路徑一樣的情況。從數量為 3 的節點開始，當節點數量越多時能量消耗也會跟著增加。B-ASAS 在路徑比 F-ASAS 來得短，所以能量消耗相對來講會比較少。本論文可以調整 sensor 通訊範圍以及縮短移動路徑，能量消耗比起其他方法來得更節能。

5.2.2、不同通訊範圍

在圖 15 中 CTR、本論文方法 B-ASAS 與 F-ASAS 隨著通訊範圍而讓 Anchor Point 數量下降。除了 TSP 不受通訊範圍增加而有所影響之外，其他方法皆可以減少 Anchor Point 數

量，本論文比起其他方法，可以減少較多的 Anchor Point 數量。

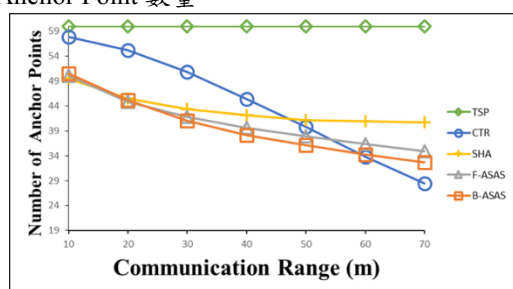


圖 15. 10 到 70 公尺範圍 Anchor Point 數

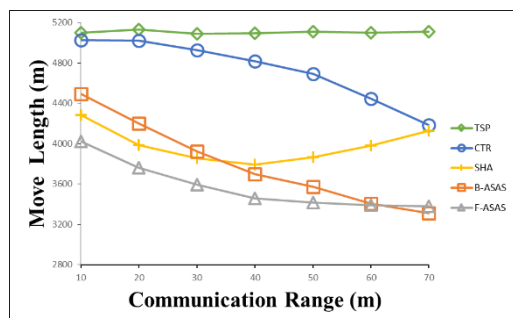


圖 16. 10 到 70 公尺範圍移動路徑

在圖 16 中可以觀察到 TSP 不會因為訊範圍增加，而增加或減少移動路徑。在 10m 範圍與 30m 時，本論文方法 F-ASAS 在通訊範圍小，移動距離來得 B-ASAS 與 SHA 短一些，因為 Anchor Point 離下一個節點較近。但 B-ASAS 在 30m 範圍後可以減少移動的路徑，所以範圍增加會有影響。在 60m 範圍與 70m 之間 CTR 因通訊範圍的增加，而讓重疊區域增加使得移動路徑比 SHA 來得短。SHA 因為通訊範圍增加，而造成 Anchor Points 之間的距離增加。

圖 17 中由圖 16 可以觀察到路徑是會影響能量消耗，當通訊範圍讓大時本論文的方法 B-ASAS 與 F-ASAS 能量消耗會跟著減少。在範圍 10m 與 30m 時，SHA 的 Anchor Point 都在弧中心點，SHA 的能量消耗隨著路徑減少，但在 30m 之後因為通訊範圍的增加而造成的路徑變長，使得 SHA 的能量消耗增加。本論文的方法裡的射線可以隨著通訊範圍增加而涵蓋較多的 sensor，使得路徑長度降低，讓能量消耗比起其他方法來得更節能。

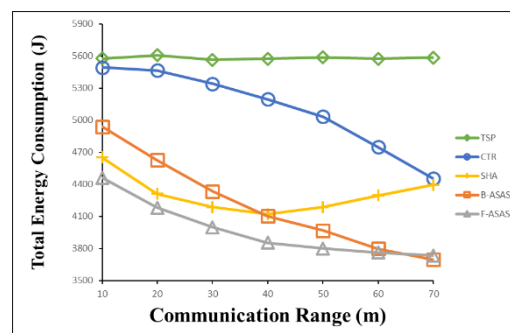


圖 17. 10 到 70 公尺範圍能量

六、結論

本研究利用 mobile robot 的可移動性並且收集整個網路的資料，克服因為分布稀疏的因素，而造成資料無法傳送到固定的 sink 或者 base station。利用本研究中方法使得 mobile robot 在簡化後的移動路徑，能在稀疏環境裡收集 sensor 資料並且每個 sensors 以及 mobile robot 的能量消耗能夠被降低。

未來，我們將利用麻省理工學院所推出的機器人(Duckietown[5])實作 mobile robot 以及相關應用。

致謝

科技部研究計畫，計畫編號：MOST-105-2221-E-024-008。

參考文獻

- [1] K. L. M. Ang, J. K. P. Seng, A. M. Zungeru, "Optimizing Energy Consumption for Big Data Collection in Large-Scale Wireless Sensor Networks With Mobile Collectors," *IEEE Systems Journal*, vol. PP, no. 99, pp. 1-11, 23 May 2017.
- [2] R. Asorey-Cacheda, A.J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, J. Garcia-Haro, "A survey on non-linear optimization problems in wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 82, pp.1-20, 15 March 2017.
- [3] C. F. Cheng and C. F. Yu, "Data Gathering in Wireless sensor Networks: A CTR&-TSP-Reduce Approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2309-2324, April 2016.
- [4] W. Du, Z. Li, J. C. Liando, M. Li, "From Rateless to Distanceless: Enabling Sparse sensor Network Deployment in Large Areas," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 4, pp. 2498-2511, August 2016.
- [5] Duckietown Engineering Co, *Massachusetts Institute of Technology*, February-April 2016, <<http://duckietown.mit.edu/>>.

- [6] Q. Gao, K. J. Blow, D. J. Holding, I. W. Marshall, and X. H. Peng, "Radio Range Adjustment For Energy Efficient Wireless sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 1, pp. 75–82, January 2006.
- [7] A. A.W. Khan, A. H. Abdullah, M. A. Razzaque, and J. I. Bangash, "VGDR: A Virtual Grid-Based Dynamic Routes Adjustment Scheme for Mobile Sink-Based Wireless sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 526–534, January 2015.
- [8] W. H. Liao and S. C. Kuai, "An Energy-Efficient Data Collection Mechanism with a Mobile Sink for Wireless sensor Networks," in *2012 9th International Conference on Ubiquitous Intelligence & Computing and 9th International Conference on Autonomic & Trusted Computing (UIC/ATC)*, Fukuoka, Japan, pp. 210–216, 4-7 September 2012.
- [9] A. Riker, E. Cerqueira, M. Curado, E. Monteiro, "Controlling Data Aggregation and communication periodicity in Energy Harvesting networks," in *2015 IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm)*, Piscataway, NJ, USA, pp.72-77, 10-12 November 2015.
- [10] F. Ruan, Z. Fan, Y. Gong, J. Hou, P. Mei, and T. Li, "Energy Efficient Strategies with Mobile Sink for WSNs: A Survey," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 9, no. 8, pp.235-244, September 2016.
- [11] F. Tashtarian, K. Sohraby, A. Varasteh, "Multihop data gathering in wireless sensor networks with a mobile sink," *International Journal of Communication Systems*, vol. 30, no. 4, 8 February 2017.
- [12] J. Tang, H. Huang, S. Guo, and Y. Yang, "Dellat: Delivery Latency Minimization in Wireless sensor Networks with Mobile Sink," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 83, pp. 133–142, September 2015.