

Tour Planning for AUV Data Gathering in Underwater Wireless Sensor Networks

水下無線感測網路中資料收集器路徑規劃研究

Yen-Da Chen (陳彥達) Chen-Hsien Yang (楊承憲) Kuei-Ping Shih(石貴平)
 龍華科技大學資網系 淡江大學資訊工程系 淡江大學資訊工程系
ydchen@mail.lhu.edu.tw ytsyang@gmail.com kpsih@mail.tku.edu.tw

摘要

隨著無線感測網路的發展，孕育生命的海洋探測也逐漸被重視。本論文透過水下移動式資料收集器收集感測資訊。但因為移動式資料收集器的電量有限，無法將感測器的資訊一次性收集，本論文加入充電站讓移動式資料收集器可以做充電的動作。而在水下環境中考量到水中傳輸高延遲性的問題。因此在本篇論文提出一個在水下無線感測網路中路徑規劃策略，利用移動式資料收集器將水下佈建的感測器做資料收集動作，避免移動路徑過長導致收集的時間過多。最後將與廣為人知的水下蒐集資料的路徑做法 UDMP 做比較。而實驗結果顯示在移動路徑長度與收集時間這兩項評估因子都表現得比 UDMP 較好。

關鍵詞：傳輸延遲、路徑規劃問題、水下充電站、資料收集、水下移動式資料收集器。

Abstract

Recently, with the advance in wireless communication and sensing technology, the ocean exploration has attracted great attention for underwater acoustic sensor networks (UASNs). Sensors are deployed for data sensing. Due to the energy limitation, the sensing hole may happen in UASNs. Therefore, the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) is used for sensing data gathering. The docking station is also applied to recharge the energy of AUVs. However, acoustic transmission will lead to huge propagation delay such that it is much difficult to plan the tour path of AUVs. In this paper, a tour planning algorithm is proposed for data gathering in UASNs. The simulation results show that the proposed protocol perform better than UDMP in tour length and data collection time.

Keywords: *Autonomous Underwater Vehicle, Propagation Delay, Tour Planning Problem, Docking Station, Data Gathering.*

一、導論

近年來水下無線感測網路的發展已經相當成熟，目前有很多關於感測的應用，其中如軍事偵測、預防災害以及環境感測。上述應用都是利用感測器佈建於水下並將所收集到的資料如 Figure 1(a)所示，以多步轉傳方式回傳至 Sink。然而感測器可能會因為一直代傳資料使得電量耗盡導致感測器死去。如 Figure 1(b)所示，網路將造成感測空洞與傳輸連結的斷裂。因此如 Figure 1(c)所示在相關文獻中提到可透過移動式資料收集器(AUV)分別拜訪網路內的感測器，以收集所感測資訊。

然而水下與傳統陸上無線感測網路截然不同，陸地上的無線網路利用電磁波以光速(3×10^8)進行資料的傳送。由於介質的因素，電磁波在海洋當中無法有效的進行資料的傳輸，因此只能使用聲波進行資訊的傳播，而聲波的傳輸速度平均只有 1500 m/s，造成水下聲波網路擁有高傳播延遲的特性。此外因為感測器位於水深深度不同且聲波傳輸速率隨著深度有所改變以至於有著傳輸延遲的特性，進一步導致 AUV 在拜訪收集資料的位置上完整傳輸一筆資料的時間會有所差異。然而考量 AUV 的電量有限，在行徑的過程中面臨電量不足的情況產生，這時可以利用水下佈建水下充電站(Docking Station) [1~6]，將 AUV 做充電動作並繼續將範圍內的感測器資訊做收集動作回傳至 Sink。但是在挑選感測器與充電站的移動路徑方式組合很多種，此一問題是 TSP 問題(Travelling Salesman Problem)。如 Figure 2 所示，當場景中有 13 個點供挑選，路徑的限制是每個點只能拜訪一次，而且最後要回到原來出發的點。那麼挑順序上就會有 $13!$ 種，6227020800 組合。這會是一個 NP(NP-hard)的問題。因此在資料收集的移動路徑上勢必要找出較短的移動方式，將是本篇論文所探討之重點。因此在本篇論文提出一個在水下無線感測網路中路徑規劃策略，利用移動式資料收集器將水下佈建的感測器做資料收集動作，避免移動路徑過長導致收集的時間過多。

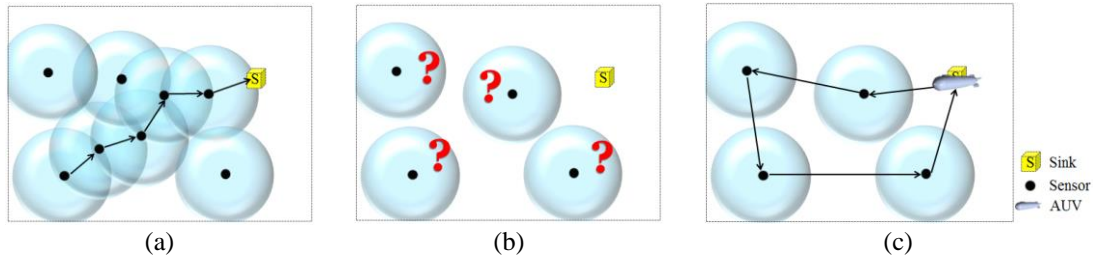


Figure 1.(a)傳統利用代傳方式將資料做回傳動作，(b)感測器電量耗盡導致資料無法順離回傳至 Sink 示意圖，(c)利用移動式資料收集器將場景中感測器資訊收集。

本篇論文剩餘的部分如下。第二章節介紹相關文獻。第三部分背景知識介紹與論文的場景以及面臨的挑戰，並且介紹面臨到的傳輸延遲問題，再進一步介紹本論文所提出方法的基本概念。第四部份將詳細介紹本論文所提出作法以及規則。第五部分為實驗模擬，第六部分為本論文的結論。

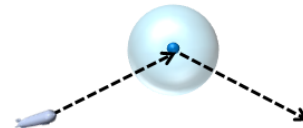


Figure 3. Docking Visit

另一種稱之為 Wireless Visit。此收集方式是指移動式資料收集器到達感測器的傳輸範圍上就可以將資料作收集動作，而在 Wireless Visit 收集方式底下再分為兩種，一種稱之為 Point Cover，當移動式資料收集器到達感測器的傳輸範圍時就可以將資料收集如下圖 Figure 4 所示。而一種稱之為 Line Cover，如下圖 Figure 5 所示，指的是當移動式資料收集器在行進的過程當中到達下一個目標感測器時，在行進的過程路徑上就可以將行徑路徑中感測器做資料收集的動作。

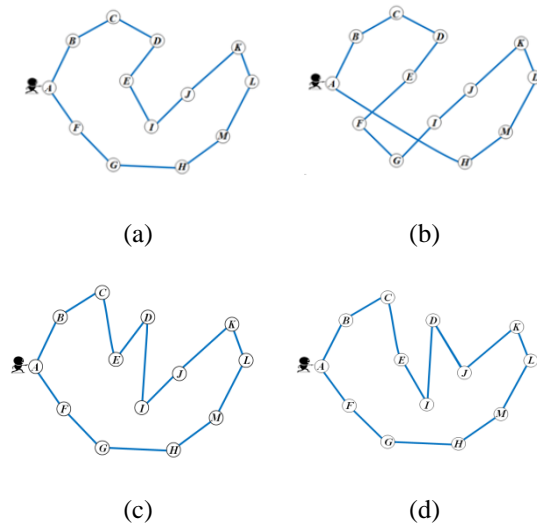


Figure 2. Travelling Salesman Problem, 13 個節點共有 13! 的拜訪可能性。圖(a)至圖(d)為其中四種可能性的組合。

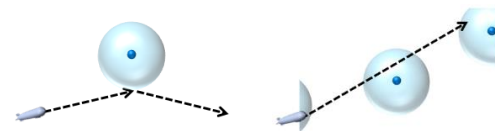


Figure 4. Point Cover Figure 5. Line Cover

二、相關文獻

現今在水下感測網路中水下移動式資料收集器的蒐集路徑研究已有相關文獻，本論文將介紹其 AUV 如何進行感測器所感測到的資料收集，並介紹 UDMP[3]所提出的 AUV 繞行路徑演算法。

2.1 Types of Visit and Cover

在收集方式上分為兩種: Docking Visit 是指移動式資料收集器到達要收集的感測器上方將資料作收集動作如下 Figure 3 所示。

2.2 Underwater Data Muling Problem

論文[3]中提出 UDMP 的作法，其核心概念是如 Figure 6 所示。Figure 6(a)，首先感測器計算感測器一步鄰居內的數量作計算，接下來如 Figure 6(b)將感測範圍內感測器數量較高的優先挑選作為拜訪點。如 Figure 6(c)所示，回程路徑當中納入感測範圍內感測器數量較高的代表點於路徑中。最後如 Figure 6(d)，考量範圍內是否可以加入更多感測器資料收集。因此在 UDMP 的做法當中，在資料收集的部分將會遇到範圍內的感測器在往返的一次路徑當中，無法將路徑上的感測器做資料收集動作，而必須要在充電站與充電站之間重複拜訪，進一步影響整體收集完範圍內感測器的路徑長以及時間，本篇論文的核心概念是將提出改善的方式。

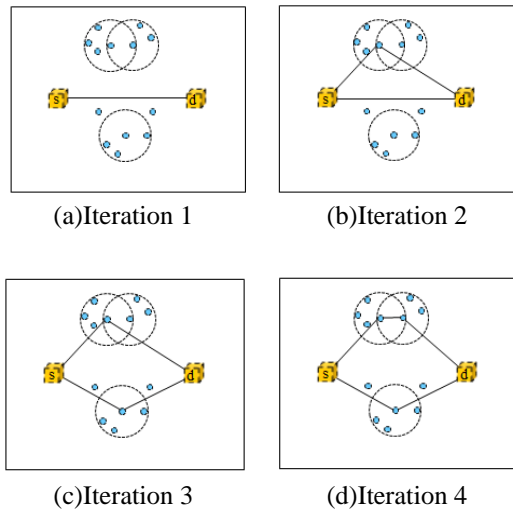


Figure.6 UDMP 示意圖

三、背景知識

3.1 場景架構

本篇論文提出一個在水下無線網路環境當中利用移動式資料收集器將範圍內的感測器做資料收集動作如論文[11~15]，而場景中將會擺放 Sink，是用來將移動式資料收集器出發的起點與終點，也是將資料回傳的目的地，另外場景中將會擺放充電站，作為移動式資料收集器電量不足的情況下進行充電之工作，場景表示圖如下 Figure.7 所示。

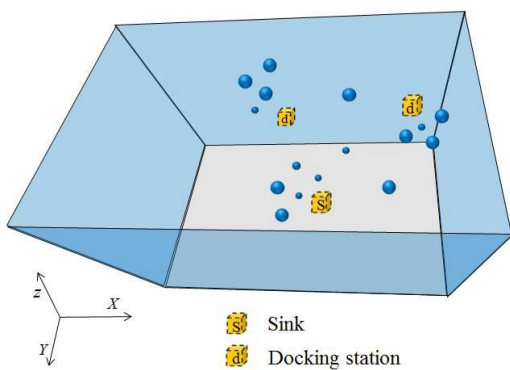


Figure.7 無線水下感測網路場景示意圖

3.2 挑戰

在水下無線感測網路環境當中與陸地上的做法最大不同在於水下無線感測網路考量的因素有很多，像是資料收集的延遲問題、場景考量是三度空間、移動式資料收集器的移動速度比陸地上較慢等問題，因此要找出一套收集範圍內感測器的移動方法，將是本篇論文所

探討的重點。

3.3 水下傳輸延遲

水下無線感測網路利用聲波進行資料的傳輸，與陸地上之無線感測網路的主要差異，如表一所示。

表一、水下無線感測網路與無線感測網路之差異

	UWSN	WSN
傳播方式	聲波	電磁波
傳播速度	約 1500 m/s	3×10^8 m/s
傳輸速度	約 10 kbps	250 kbps
通訊距離	1 至 10 km	100 m
傳輸耗電	2 W	50 Mw

由表一可知，因為使用聲音作為傳輸的媒介，傳播的速度只有大約 1500m/s，因此水下無線聲波感測網路在進行封包的傳輸時，相較於陸上無線電波 3×10^8 m/s 的傳輸，會有極大的傳播延遲。然而，聲音在水下的速度並非為一定值，而是會隨著溫度、壓力與鹽度的不同而有所改變。聲速的變化如公式(1)所示：

$$C = 1449.2 + 4.623 * t - 0.0546 * t^2 + 1.3191 * (S - 35) + 0.017 * d \quad (1)$$

其中， t 為溫度， d 為深度，而 S 為鹽度。此外，全球海水的平均深度約為 4 公里，在海平面至水下一公里的範圍被稱為斜溫層，溫度從海平面平均的 22°C ，隨著深度降至 5°C 。

$$V(d) = -0.0000176904 * d^2 - 0.0229708 * d + 1524.4796 \quad (2)$$

其中， d 為深度。在斜溫層中，聲速主要隨著溫度變化，當溫度越高，聲速越快，反之，則越慢。而水下一公里至海底的範圍則被稱為深水層，此層的溫度大約都維持在 4°C 左右，因此，此層之聲速的計算可以被簡化如下：

$$V(d) = 1483.8354 + 0.017 * (d - 1000) \quad (3)$$

在深水層中，聲速主要隨著壓力變化，當壓力越大，則聲速越快，反之，則越慢。聲速隨深度的變化如 Figure. 8 所示，以深度一公里為界，此時聲速無論在較深或是較淺的海域，都會逐漸上升。接下來在做法部分將利用水下延遲之特色設計出一套挑選拜訪點的依據，並納入作法加以表現出水下無線網路環境中之特色。

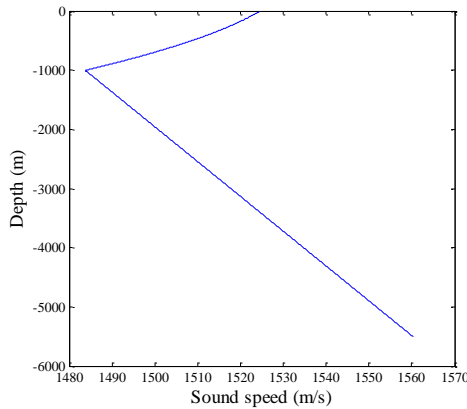


Figure 8 水中聲速示意圖

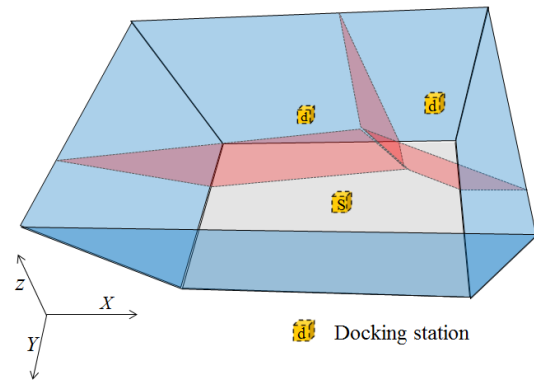


Figure 10 3D Voronoi Diagram

3.4 Voronoi Diagram

本論文將藉由 Voronoi Diagram 將場景畫分成若干等份。然而現今的 Voronoi Diagram 是為 2D 平面狀態，故本論文接下來將敘述 2D Voronoi Diagram 與 3D Voronoi Diagram。

3.4.1 平面 Voronoi Diagram

本論文所提出的做法是利用 Voronoi Diagram 的特性將場景分割，而所謂的 Voronoi Diagram 的意思是在平面上散布許多點。如 Figure 9(a)所示，每個點與其相鄰的點畫出中垂線，並將如 Figure 9(b)所示的，其多餘的線段擦去，平面上每一處，各自歸類於最近的點；自然而然的，形成了分界線。

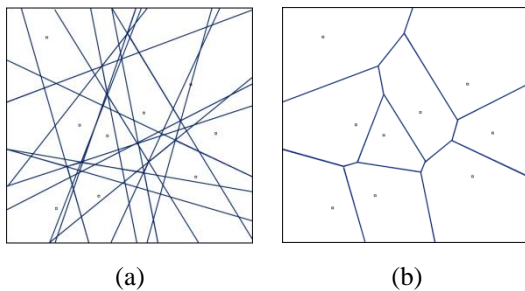


Figure 9 Voronoi Diagram 示意圖

3.4.2 3D Voronoi Diagram

3D Voronoi Diagram 如同 2D Voronoi Diagram 一樣。平面上散布許多點，點與點間用中垂線分出來。如 Figure.10 所示，然因為任兩點間的中垂線有無數多條，這些中垂線可以集成一個面。如此任兩個點間所形成的面如 Figure 9(b)概念加以修飾改，即可成為 3D Voronoi Diagram。

四、The Proposed Heuristic Algorithm

本篇做法中先將利用 3D Voronoi Diagram 把場景中的充電站做區域責任的工作劃分，在此作法底下可以避免移動式資料收集器，在充電站與充電站之間重複拜訪，導致移動路徑過長，因此本論文所提出的做法先將網路上的感測器作分群。兩兩一群，進而擴展群裡面的感測器個數。其中每一群的感測器皆須找出其代表點供 AUV 作為探索的參考點。以下將敘述如何在水下無線感測網路中挑選代表點。

4.1 挑選代表點

在 UDMP 的做法當中是利用感測器的傳輸範圍內有其他感測器做為挑選的依據，但是忽略的感測器與感測器之間可以利用交集區域處就能將資料做收集動作，使得移動式資料收集器在行進過程中不會花費較長的移動距離如下圖 Figure.11 所示。

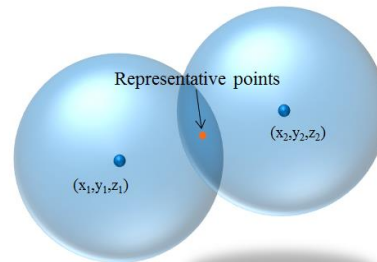


Figure.11 代表點找法

如何找出代表點首先得知感測器的 xyz 軸座標，就可以求出一個正立方體長寬高各是為兩倍感測器傳輸範圍的邊長，恰可包覆於感測器，如下圖 Figure.12 所示。

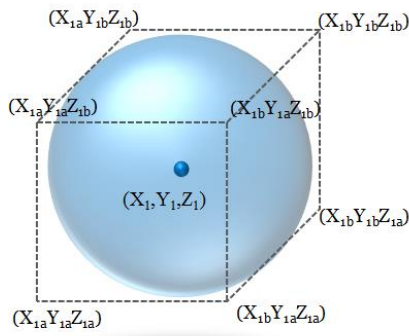


Figure .12 求出立方體座標

在得知立方體座標之後可以推算交集傳輸範圍的區域，利用公式如下(4):

$$\begin{aligned}
 x_{ia} &= (x_i - r) & x_{ma} &= \max(x_{1a}, x_{2a}, x_{3a}, \dots, x_{ia}) \\
 x_{ib} &= (x_i + r) & x_{mb} &= \min(x_{1b}, x_{2b}, x_{3b}, \dots, x_{ib}) \\
 y_{ia} &= (y_i - r) & y_{ma} &= \max(y_{1a}, y_{2a}, y_{3a}, \dots, y_{ia}) \\
 y_{ib} &= (y_i + r) & y_{mb} &= \min(x_{1b}, x_{2b}, x_{3b}, \dots, x_{ib}) \\
 z_{ia} &= (z_i - r) & z_{ma} &= \max(x_{1a}, x_{2a}, x_{3a}, \dots, x_{ia}) \\
 z_{ib} &= (z_i + r) & z_{mb} &= \min(x_{1b}, x_{2b}, x_{3b}, \dots, x_{ib})
 \end{aligned} \quad (4)$$

利用公式(4)計算多個立方體的交集區域，並由立方體的八個座標且由 x_{ia} 、 x_{ib} 、 y_{ia} 、 y_{ib} 、 z_{ia} 、 z_{ib} 六個變數組成，並且將立方體編號如 x_{1a} 表示為編號 1 的立方體，而 a 、 b 則表示為任一立方體邊長的兩個相對位置，再利用 \max 與 \min 將編號 1 至編號 i 個立方體進行推算動作，當多個立方體找出交集區域內的立方體時，左側座標的 x 值為 x_{ia} 可以利用 \max 將編號 1 至 i 個球體求出最大值為交集區域的左側座標位置，而交集區域內的右側座標 x 值為 x_{ib} 利用 \min 將編號 1 至 i 個球體求出最小的值為交集區域內右側座標位置，依此算出交集區域的上下左右前後方向六個變數的值，找出交集區域的立方體的各頂點座標，就可以求出八個頂點的座標位置，以利於之後求出代表點座標。

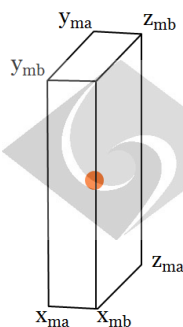


Figure.13 代表點求法

在求出交集區域範圍後將要求出一個代表點 Representative points(RP)必定座落在交集區域內且是傳輸範圍的交集區域如下圖 Figure.13，求得公式如下(5):

Representative Points

$$= \left(\frac{Xma+Xmb}{2}, \frac{Yma+Ymb}{2}, \frac{Zma+Zmb}{2} \right) \quad (5)$$

接下來考量範圍內有多個感測器互相交集的情況底下避免移動式資料收集器重複拜訪收集的情況參考圖示 Figure.14 如下。

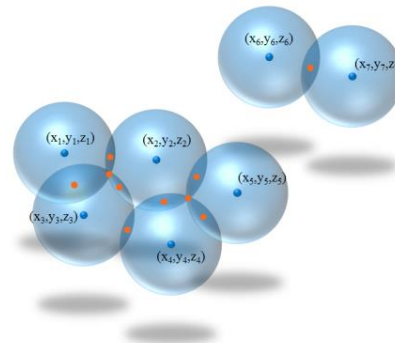


Figure .14 多個代表點求法

如圖 Figure.14 所示避免代表點在收集時重複收集到範圍內感測器的資訊且考量傳輸延遲的因素，所以將提出利用 Weight 值得方式做計算，公式如下(6):

$$\text{Weight} = \frac{N_i}{\max_{j \in [1, N_i]} D_j^i * V_i^{-1}} \quad (6)$$

N_i 表示到達代表點上所可收集到的感測器資料個數， D_j^i 表示從感測器到達代表點的直線距離， V_i 表示感測器的水深不同所造成的聲波傳遞時間也會不同，公式(7)和公式(8)計算在水深不同情況底下，水中傳輸速度 V 變化。

$$\begin{aligned}
 V(d, T) &= 1448.96 + 4.591T \\
 &- 5.304 \times 10^{-2} T^2 + 2.374 \times 10^{-4} T^3 \\
 &- 5.01532 \times 10^{-3} Td + 4.357152 \\
 &\times 10^{-7} Td^2 + 1.06813 \times 10^{-11} Td^3 \\
 &+ 7.139 \times 10^{-16} Td^4 + 1.089288 \\
 &\times 10^{-4} T^2 d - 5.87376 \times 10^{-8} T^2 d^2 \\
 &- 2.8488 \times 10^{-12} T^2 d^3 - 7.122 \times 10^{-7} T^3 d \\
 &+ 7.122 \times 10^{-10} T^3 d^2 + 2.374 \\
 &\times 10^{-13} T^3 d^3 + 3.4664 \\
 &\times 10^{-2} d - 6.8114 \times 10^{-7} d^2 \\
 &- 1.51936 \times 10^{-11} d^3 \\
 &- 2.8556 \times 10^{-15} d^4
 \end{aligned} \quad (7)$$

此時考量水深不同資料的傳輸速度也會

不同，因此分為兩部分探討，在水深 0 公尺至 1000 公尺時傳輸延遲時間由公式(7)計算場景中聲速變化所造成傳輸延遲時間，當感測器資料傳輸到代表點時，因為水深不同，在資料延遲上將 V_i 表示為 $V(d)$ 。

$$V(d) = 1466.4905536 + 1.63 \times 10^{-2} d + 1.675 \times 10^{-7} d^2 - 2.8556 \times 10^{-12} d^3 \quad (8)$$

而在水深 1000 公尺至 8000 公尺時的傳輸延遲時間利用公式(8)計算動作。

在挑選時將 Weight 值較高的作為挑選的依據，挑選後前一步收集到的感測器，再做移除動作，依序找完範圍內的代表點。

4.3 拜訪代表點的移動路徑規劃

在本作法底下考量場景中範圍內的代表點與充電站之間的移動方式並且因為利用 3D Voronoi Diagram 將場景劃分，使得移動式資料收集器在電量有限的情況底下，可以將場景中所有代表點內的感測資料做收集動作，並且可以找出較短移動路徑符合資料的即時性問題，所以在下面兩步驟中將把資料收集的移動路徑劃分為兩步驟規劃。

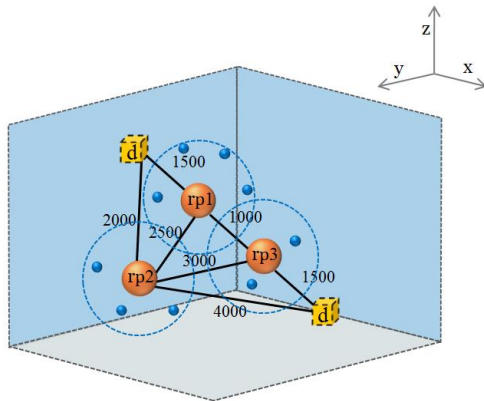


Figure.15 代表點移動路徑規劃

首先第一步先考慮充電站與充電站之間的代表點收集路徑如論文[16][17][18][19]，作法利用已知的充電站位置資訊與代表點位置資訊如論文[20][21][22]，並可推出代表點與代表點之間的直線距離和代表點與充電站的直線距離，並利用路徑長分之拜訪資料數 $\frac{N_i}{D_i}$ 從值較大的開始挑選，藍色虛線圓形表示當代表點上可以收集到的感測器範圍大小，當圖中 $rp1$ 、 $rp2$ 、 $rp3$ 經過計算並以 $rp1$ 為例，求得收集四個感測器資料後除以移動路徑 1500 公尺，而 $rp1$ 、 $rp2$ 、 $rp3$ 分別是 0.0026、0.0015、0.0008，此時說明 $rp1$ 的 Weight 值最大，表示收集到的感測器資料除以路徑長最佳，因此將 $rp1$ 挑

選並檢查存在一條較短的移動路徑，而剩餘的 $rp2$ 和 $rp3$ 再次考量 Weight 值的大小，依序檢查包含充電站與代表點之間所有移動路徑的存在，作為之後移動挑選的考量，最後在移動式資料收集器行走過程中，挑選並納入移動路徑，如果再相鄰兩充電站之間，代表點的感測器資訊無法一次收集動作收集完成，沒有收集到的代表點感測器資料，將在第二步驟中規劃移動路徑並收集完成，如圖 Figure .15 所示。

在第二步驟中考量利用 3D Voronoi Diagram 將場景做工作責任劃分之後可以將場景中代表點資料收集上有較短的收集時間，首先將場景中所有代表點與充電站之間所有路徑找出，求出之後將已知的代表點位置資訊利用路徑長分之資料收集個數 $\frac{N_i}{D_i}$ 從值較大的依序開始挑選，藍色虛線圓形表示當代表點上可以收集到的感測器範圍大小，以圖中 $rp4$ 、 $rp5$ 、 $rp6$ 為例，經過計算在收集到四個感測器資料後所移動的路徑長是一百公尺，而 $rp4$ 、 $rp5$ 、 $rp6$ 分別是 0.03、0.003、0.004，這時可以說明 Weight 最大的是 $rp4$ 的話，表示在 $rp4$ 中收集的感測器資料數量除以路徑長最佳，且在滿足移動路徑中存在符合電力有限的情況下找出移動路徑較短，然而由於電量有限所以當一次移動路徑中無法將場景中劃分的區域內代表點收集完的情況底下，再規劃出兩趟以上的移動路徑，在步驟一和步驟二底下將場景中所有感測器資料做收集動作，如 Figure.16。

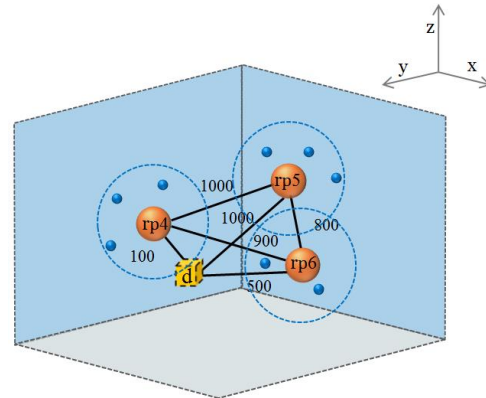


Figure.16 代表點移動路徑規劃

4.4 多個充電站挑選之規劃

在此考量當多個充電站之間移動方式可能充電站與充電站之間距離過長，導致移動式資料收集器在電量充足底下還是無法到達下一個充電站，因此本篇提出利用 3D Convex Hull 找出一個多面體，且多面體上面的節點是充電站或是 sink，並可以找出一條移動路徑，而當存在此多面體內的節點沒有被多面體包覆時，將利用最短路徑演算法求出一條移動路徑，舉

例如下圖 Figure.17 當路徑 L_3 沒有被此多面體包覆時可以利用最短的 L_5 與 L_7 作為取代的移動路徑。

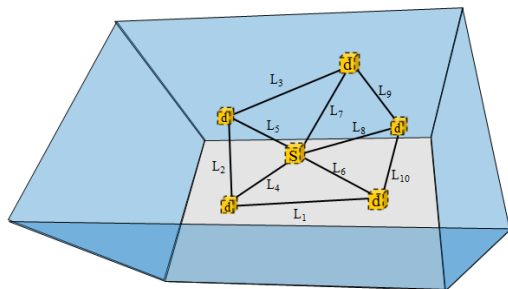


Figure.17 充電站移動路徑規劃

五、實驗模擬

表二、實驗參數

Parameter	Value
Area Size	1000 * 1000 * 1000 m^3
Data Rates	10 kbps
Tr. Range	500~1200m
Tr. power	50 dB
Frequency	25 kHz
Data packet size	1000 bits
Node density	50 ~60 nodes/ km^3

本實驗將與 UDMP 的水下感測器路徑找法進行比較，考量在不同數量感測器底下所找的移動路徑長度，當場景長寬高大小為 1000 公尺、1000 公尺、1000 公尺底下傳輸範圍大小從 500 公尺到 1200 公尺之間，資料大小為 1000 bits，其他的實驗參數列於圖表二。

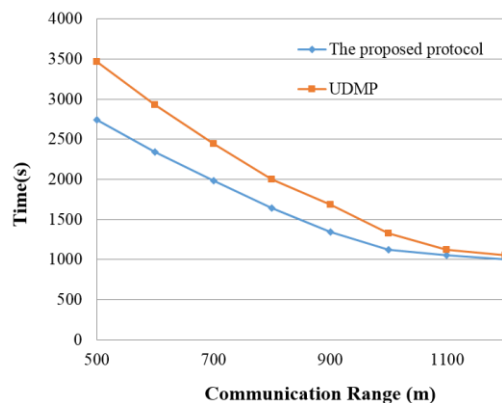


Figure.18 傳輸範圍與時間

首先我們將在收集時間上與 UDMP 進行比較，而考量感測器的傳輸範圍越大的情況 UDMP 的作法會較趨向於我們的做法，原因在於當場景中感測器的傳輸範圍較大時，移動式資料收集器拜訪的代表點數量越少，導致移動路徑長變短，進一步讓整體收集時間變短，如圖 Figure.18 所示。再比較當場景中佈建了 50

顆感測器與 60 顆感測器時，移動式資料收集器所走的路徑長與傳輸範圍大小從 500 公尺到 1200 公尺，如圖 Figure.19 所示，當感測器傳輸範圍較大時，所拜訪的代表點數量越少，而移動式資料收集器所走的移動路徑越短。

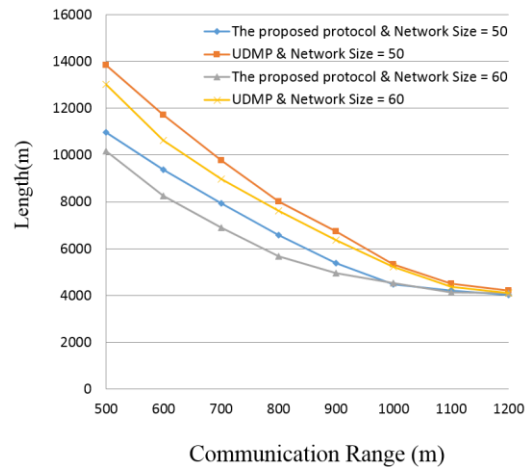


Figure.19 傳輸範圍與路徑長

六、結論

在本論文中，我們提出一個移動路徑演算法，利用移動式資料收集器將水下場景中的感測器做資料收集動作，並在感測器的傳輸範圍大小與收集路徑長度底下和 UDMP 的做法進行模擬比較，由模擬的實驗結果得知在傳輸範圍較大的情況底下，我們提出的做法較優於 UDMP，在於收集完範圍內的感測器所耗費的時間與路徑長都會來的比較短，因此在資料的即時性上，進一步可以得到資料收集上有較快的資料更新。

致謝

本研究感謝中華民國行政院國家科學委員會計劃經費補助 (NSC 101-2628-E-032-001-MY3, NSC 102-2627-E-119-001 和 NSC 102-2221-E-262 -012 -)

參考文獻

- [1] R. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data mules: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," in *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA)*, pp. 30-41, May 2003.
- [2] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, and L. shiuan Peh, "Energy Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet," in *International Conference on Architectural Support for Programming Lan-*

- guages and Operating Systems (ASPLOS-X)*, San Jose, CA, USA, October 2002, pp. 96–107.
- [3] K. Li, C.-C. Shen, and G. Chen, “Energy-constrained Bi-objective Data Muling in Underwater Wireless Sensor Networks,” *IEEE Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)*, pp. 332-341, 2010.
- [4] D. Jea, A. A. Somasundara, and M. B. Srivastava, “Multiple Controlled Mobile Elements (Data Mules) for Data Collection in Sensor Networks,” in *IEEE/ACM International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Marina del Rey, CA, USA, June 2005.
- [5] B. Yuan, M. Orłowska, and S. Sadiq, “On the optimal robot routing problem in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 1252–1261, 2007.
- [6] J. Rao, T. Wu, and S. Biswas, “Network-Assisted Sink Navigation Protocols for Data Harvesting in Sensor Networks,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Las Vegas, NV, USA, March 31-April 3 2008, pp. 2887–2892.
- [7] B. Yuan, M. Orłowska, and S. Sadiq, “On the optimal robot routing problem in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 1252–1261, 2007.
- [8] J. Rao, T. Wu, and S. Biswas, “Network-Assisted Sink Navigation Protocols for Data Harvesting in Sensor Networks,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Las Vegas, NV, USA, March 31-April 3 2008, pp. 2887–2892.
- [9] C. S. Hollinger, G.A. and et.al, “Underwater data collection using robotic sensor networks,” *IEEE J. Sel. Areas. Comm.* vol. 30, no. 5, pp. 899–911, Jun. 2012.
- [10] M. Zhao and Y. Yang, “Bounded relay hop mobile data gathering in wireless sensor networks,” in *IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)*, Macau SAR, China, October 12-15 2009, pp. 373–382.
- [11] K. Tian, B. Zhang, K. Huang, and J. Ma, “Data Gathering Protocols for Wireless Sensor Networks with Mobile Sinks,” *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2010.
- [12] Y.-C. Tseng, W.-T. Lai, and C.-F. Huang, “Using Mobile Mules for Collecting Data from an Isolated Wireless Sensor Network,” *International Conference on Parallel Processing (ICPP)*, 2010.
- [13] Wen-Hwa Liao ,Ssu-Chi Kuai, “An Energy-Efficient Data Collection Mechanism with a Mobile Sink for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Ubiquitous Intelligence & Computing and 9th International Conference on Autonomic & Trusted Computing (UIC/ATC)*, Fukuoka, Japan, Sept. 2012, pp.210-216.
- [14] Y. Gu, Y. Ji, J. Li, and B. Zhao, “ESWC: Efficient scheduling for the mobile sink in wireless sensor networks with delay constraint,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, no. 7, pp. 1810–1820, 2013.
- [15] Y. Wang, F. Wu, and Y. Tseng, “Mobility Management Algorithms and Applications for Mobile Sensor Networks,” *Wireless Comm. Mobile Computing*, vol. 12, pp. 7-21, 2012.
- [16] E. Guney, N. Aras, I.K. Altinel, and C. Ersoy, “Efficient Integer Programming Formulations for Optimum Sink Location and Routing in Heterogeneous Wireless Sensor Networks,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 11, pp. 1805-1822, 2010.
- [17] W. Liang and J. Luo, “Network Lifetime Maximization in Sensor Networks with Multiple Mobile Sinks,” *Proc. IEEE 36th Conf. Local Computer Networks*, Oct. 2011.
- [18] Y. Yun and Y. Xia, “Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks with Mobile Sink in Delay-Tolerant Applications,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 9, no. 9, pp. 1308-1318, Sept. 2010.
- [19] G. Keung, Q. Zhang, and B. Li, “The Base Station Placement for Delay-Constrained Information Coverage in Mobile Wireless Networks,” *Proc. IEEE Int’l Conf. Comm.*, May 2011.
- [20] G. Keung, B. Li, and Q. Zhang, “Message Delivery Capacity in Delay-Constrained Mobile Sensor Networks: Bounds and Realization,” *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 10, no. 5, pp. 1552-1559, May 2011.
- [21] Y. Gu, Y. Ji, J. Li, and B. Zhao, “Delay-Bounded Sink Mobility in Wireless Sensor Networks,” *Proc. IEEE Int’l Conf. Comm. (ICC ’12)*, June 2012.
- [22] Y. Gu, Y. Ji, J. Li, H. Chen, B. Zhao, and F. Liu, “Towards an Optimal Sink Placement in Wireless Sensor Networks,” *Proc. IEEE Int’l Conf. Comm. (ICC ’10)*, May 2010.