

部份覆蓋感測器網路之冗餘感測器偵測問題

吳茂成

亞洲大學資工系

program1988@hotmail.com

呂威甫

亞洲大學資工系

weifu.lu@gmail.com

袁賢銘

交通大學資工系

smyuan@cis.nctu.edu.tw

摘要

無線感測網路是由許多無線感測器所組成的無線網路，特性是體積小、低耗電、低成本。由於感測器的感應、無線通訊皆有一定的有效範圍，為使監控環境均為感測器所感測，感測器必須在監控環境中大量的重複散佈。大量重複的感測器散佈非常耗費成本，尤其耗費感測器網路運作時所需使用的能源。因此，減少運作的感測器數目，使監控環境能為最少的感測器所感測是一個重要的研究問題。本論文考慮在網路覆蓋率維持 95% 以上的條件下，消除網路中之冗餘的感測器，以減少網路的能源消耗，延長整個系統的使用壽命。

關鍵詞：感測器網路、部份覆蓋、系統壽命、冗餘感測器、Voronoi 圖。

Abstract

Sensor networks are dense wireless networks consisting of small, low-power, low-cost sensors. Due to the limitation of sensing range and communication distance, sensors need to duplicate deploy in the monitoring environments with a great quantity, such that the whole monitoring environments are controlled by the sensor network. The cost of a large number of duplicate deployments is very expensive, especially the energy consumption of the operation of sensor network. Thus, eliminating the number of active sensors, such that monitored environment could be controlled with minimum number of sensor, is a very important research problem. In this paper, we consider the problem of detecting and eliminating redundancy in a partial coverage sensor network. If the coverage within a sensor's sensing range is greater than 95%, such sensor is considered as a redundancy sensor. And then turn off these redundant sensors to prolong the life time of the sensor network.

Keywords: sensor networks, partial coverage, system lifetime, redundant sensors, Voronoi diagram.

1. 前言

無線感測器網路係由一群體積小、價格便宜、低功率的感測器所組成。這些感測器具有感測模組、通訊模組、記憶體，以及一個有限的電源來源如小型電池，能夠有效率的監控並分析許多未知與未測試的環境，例如監控森林火災、空氣品質、水源污染、溫度等。監控的方法是將幾百萬個感測器佈署於所要監控的環境中，每一個感測器都可以監控所能感測的範圍，藉由彼此溝通訊息而形成無線感測器網路(Wireless Sensor Networks) [1]。一般而言，感測器是以隨機散佈的方式配置於所欲監控的環境中，其位置無法事先決定。由於感測器的感測、無線通訊皆有一定的有效範圍，因此在所欲監控的環境中必須重複散佈許多感測器，使得所有範圍都能受到感測。在所欲監控的環境中可以為感測器所感測的比例稱為感測器網路的覆蓋率(coverage)。圖1為感測器網路的覆蓋範例，圓代表感測器的感測範圍，白色區域是不為任何感測器所覆蓋的部份。覆蓋率對於感測器網路的品質是個重要評量標準，通常我們希望覆蓋率越高越好，而所謂的完全覆蓋(full coverage)，即是要求監控環境全部為感測器所感測，這個問題近年來已經受到廣泛的討論，並有許多的研究成果 [2, 3, 5, 11, 14]。

在完全覆蓋的要求下網路必須滿足所有區域都為感測器所監控，但這並不是一個必要的要求，因為有許多的監控環境中，例如森林火警，只要網路的覆蓋率大於 90%，系統即可正常監控。此外感測器的配置大部分使用隨機散佈的方式，要達到完全覆蓋往往也是不可能的事。因此對於感測器網路的相關問題，考慮覆蓋率只要達到 θ ，不需完全覆蓋監控區域，稱為部分覆蓋(partial coverage)，成為近年來新的研究方向[8]。

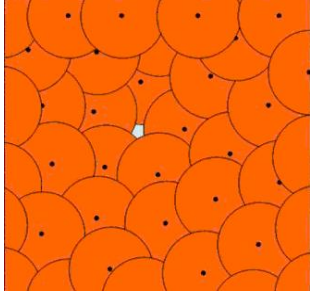


圖 1. 感測器網路的覆蓋範例。

由於感測器是由電池供應運作所需能量，沒有持續的電力來源，因此網路架構與通訊協定如何在維持網路覆蓋率的前提下，有效節約能源消耗，延長系統的使用壽命，是無線感測器網路設計的重點。然而保持足夠的覆蓋率，與延長系統的使用壽命，是無線感測網路兩個矛盾的設計因素。為了維持系統覆蓋率，感測器多以隨機方式大量重複散佈於監控環境，因此感測器的覆蓋範圍會彼此重疊，甚至有感測器其感測範圍皆為其他的感測器所覆蓋的情形。我們可以在系統覆蓋率維持 θ 的條件下，關閉感測範圍已為其他感測器所覆蓋的感測器，減少網路中運作的感測器數目，分散能源消耗，增加整體系統的平均壽命。我們將關閉之後不會影響網路覆蓋品質的感測器稱為冗餘感測器，也就是，當感測器的感測範圍內已有 θ 以上為其他感測器所感測時，即稱為冗餘感測器，見圖2。考慮系統在維持 θ 的覆蓋率，相較於完全覆蓋，更能大量減少感測器使用數目，有助於系統使用壽命的延長。

本論文討論部份覆蓋感測器網路之冗餘感測器偵測問題，判別網路中的感測器是否為冗餘。Voronoi圖是冗餘感測器判別一個基礎而重要的方法[4, 9]，而前人研究主要是將此方法應用於完全覆蓋的感測器網路，對於部份覆蓋的感測器網路並無探究。因此，本研究改進前人的研究成果，利用Voronoi圖判別滿足部分覆蓋條件下的冗餘感測器，藉由冗餘感測器的休眠延長系統的使用壽命。

本論文後續的章節組織如下。第2節介紹感測器網路覆蓋率的相關研究。第3節研究方法介紹Voronoi圖，定義本研究所討論的問題，並提出冗餘感測器判別演算法。第4節實驗結果與討論，對我們所提出的演算法進行相關的實驗分析，瞭解我們演算的執行效能。最後是結論與未來研究，對我們的研究做一個總結，並提出未來的研究方向。

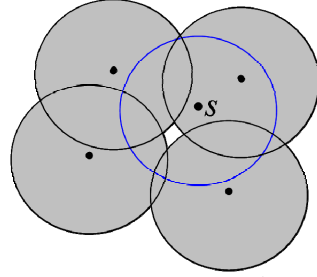


圖 2. 冗餘感測器的範例。

2. 相關研究

覆蓋率的維持是感測器網路的重要問題，近年來已有許多研究致力於減少系統能源消耗並保證整個監控的完整覆蓋。相關文獻回顧請參考[6, 11]。

對於感測器網路，Meguerdichian 等人以覆蓋率評估網路服務的品質[9]。他們定義了最大破壞路徑(MBP)和最大支持路徑(MSP)，分別具有路徑上任何一個點與其最近的感測器距離為最大及最小的性質。他們觀察發現 MBP 位於 Voronoi 圖的線上，而 MSP 位於 Delaunay 三角化的線上，使 Voronoi 圖在感測器網路的研究上有重要的應用。對於提升完全覆蓋網路生命週期，Slijepcevic 與 M. Potkonjak [10]首先考慮將感測器分成最多的互斥集合(disjoint set)，使得每一個互斥集合中的感測器均能完全覆蓋整個感測區域。Cardei 等人[5]考慮將感測器區分成最大數目的互斥支配集合(disjoint dominating sets)，之後 Cardei 與 Du [3] 也利用了將感測器區分成最多的互斥集合覆蓋(disjoint set covers)的概念，提供了一個有效率的方法延長感測網路的運作時間。由於上述問題皆為 NP-complete，故其僅可由近似演算法或經驗法則得到近似解。除了覆蓋率之外網路的連通性(connectivity)也是個重要的考慮因素。Gupta [2]提出了連通感測器覆蓋的概念，探討了完全覆蓋網路的連通性問題。Zhou [18]等人提出了連通性 k -覆蓋問題(*connected k -coverage*)，其目的是要在保持網路的 k -覆蓋性與連通性的情形下，減少系統的總能源消耗。根據所需的覆蓋程度，覆蓋問題可以區分成單一覆蓋與多重覆蓋問題。也就是考慮每一個偵測範圍內的點必須為單一個感測器所偵測，或為多個感測器所偵測。對於多重覆蓋的問題(也稱為的 k -覆蓋問題)，Huang 與 Tseng [7]定義一個 k -圓周覆蓋定理驗證目標區域中的每一個點是否至少為 k 個感測器所覆蓋。他們所討論的感測器感測範圍可以是固定半徑，也可以是非固定半徑。Cărbunar 等人考慮

由 Voronoi 圖的觀點，減少網路中的冗餘感測器數目，使系統以最少的感測器數目運作，以延長系統使用壽命[4]。

以上所考慮的覆蓋問題稱為完全覆蓋問題(*full coverage problem*)，必須保證整個監控區域皆為感測器的感測範圍完全覆蓋。然而完全覆蓋並非必要的要求，近年來部分覆蓋(*partial coverage*)，也就是只需要系統覆蓋率達到某個程度的要求，已經成為感測器網路新的研究方向。Liu 與 Liang [8]提出了 θ -coverage 的概念，考慮系統覆蓋率只要達到 θ 即可，並提出一個經驗法則演算法，選取最少數目的感測器滿足部份覆蓋率與網路連通性。Zhang 與 Hou [17] 考慮在最少能源需求下將網路使用壽命最大化的部份覆蓋問題，稱為 α -lifetime 問題。他們探討了滿足 k -覆蓋條件的 α -lifetime 問題，也就是監控範圍內有 α 以上的比例至少為 k 個感測器所覆蓋。他們的方法根據先前所發表的感測器網路的系統壽命上界[16]，提出了一個最大化 α -lifetime 的集中式演算法。Wang 與 Kulkarni[12]提出部份覆蓋問題的分散式演算法，稱為 pCover，假設所有感測器皆知曉其所在位置。Yan 等人[15]提出了可以根據問題需求調整覆蓋率的適應性演算法(*adaptive algorithm*)。他們考慮監控範圍中不同區域有不同的覆蓋率，也就是在重要監控區域必須維持較高的覆蓋率，而次要區域則僅需維持較低的覆蓋率。Zorbas 等人[19]討論連通性部份目標物覆蓋問題(*connected partial target coverage problem*)，提出將所有感測器區分為不同的連通覆蓋集合的演算法，使每一個覆蓋集合均能覆蓋監控範圍中某個比例的目標物，且覆蓋集合中的感測器形成連通網路。Yardibi 與 Karasan [13]出了部份覆蓋感測網路的分散式休眠排程適應演算法(DASSA)，其計算網路連通性與滿足覆蓋率要求，不需感測器的位置資訊。

目前有關部份覆蓋問題的演算法，在計算網路的覆蓋率時皆以覆蓋範圍內的目標物或格子點進行覆蓋率的評估。然而目標物或格子點的覆蓋率無法代表整個網路真正的覆蓋率。因此本研究以計算幾何之Voronoi圖為基礎進行網路覆蓋率的評估，以此判別其休眠仍使系統維持 θ 的覆蓋率的冗餘感測器。

3. 研究方法

本節說明我們的研究方法，首先介紹 Voronoi圖的相關知識，接著定義本論文所討論

的問題，最後提出冗餘感測器判別演算法。

3.1 Voronoi 圖介紹

Voronoi 圖是一個應用於幾何問題的分析工具，對於幾何空間上所給定的 n 個點，將幾何空間依據與 n 個點距的離遠近作分割，使得每一個點能夠劃分得到一個區域，在區域內的任意點和該點的距離皆比其它點要來得近。圖 3 是一個 Voronoi 圖的範例。詳而言之，我們將 Voronoi 圖定義如下。令 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$, $2 \leq n \leq \infty$ 是一個在二維歐式幾何平面上的點所成的集合，而 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 這些點則稱為位置點。將二維歐式幾何平面上所有的點，依照距離它最近的位置點將此平面做分割，使得與 P_i 距離最近的點都在同一個分割內，稱為 Voronoi 格子 $V(P_i)$ ，也就是， $V(P_i) = \{x : d(P_i, x) \leq d(P_j, x) \forall j \neq i\}$ 。所有 Voronoi 格子所組成的圖 $V(P)$ 稱為 Voronoi 圖，即 $V(P) = \{V(P_1), V(P_2), V(P_3), \dots, V(P_n)\}$ 。空間中的點不一定只跟一個位置點有著最小距離，而將這些同時屬於多個 Voronoi 格子的點將形成的在 Voronoi 圖上的線段或射線稱為 Voronoi 邊，而 Voronoi 邊的交點稱為 Voronoi 頂點。

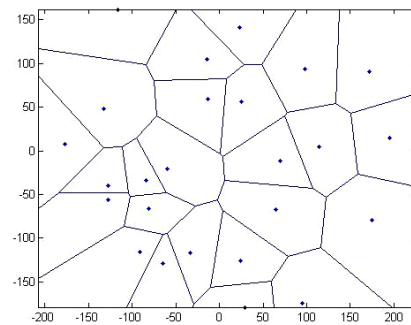


圖 3. Voronoi diagram 例圖

3.2 問題描述

本論文討論部份覆蓋感測器網路之冗餘感測器偵測問題，考慮系統覆蓋率的最低要求為 95%。我們所討論的問題可以定義如下：

定義 1. 若感測器 s 位於座標 (x, y) 且其感測距離為 r ，則我們以圓心座標 (x, y) 半徑為 r 的圓 $C(s)$ 表示感測器 s 的感測範圍。我們稱在感測器 s 感測範圍內的點為感測器 s 所覆蓋。感測器 s 感測區域的面積，即圓 $C(s)$ 的面積，以 $A(C(s))$ 表示。

定義 2. 感測器網路的覆蓋範圍，指的是監控範圍中至少為一個感測器所覆蓋的區域。感測網路覆蓋範圍於監控範圍中所佔比例稱為感

測器網路的覆蓋率(coverage)。若監控範圍完全涵蓋於覆蓋範圍內，此網路稱為完全覆蓋(full coverage)；而監控範圍只有部分包含於網路覆蓋範圍，則此網路稱為部分覆蓋(partial coverage)。

定義 3. 對於系統正常運作的覆蓋率要求為 θ 的感測器網路，若感測器 s 的覆蓋範圍有 θ 以上部份亦屬於其他感測器的覆蓋範圍，則此感測器為冗餘感測器(redundant sensor)。一般而言， θ 可以為90%或95%等。

定義 4. 若感測器 s 所對應的圓 $C(s)$ ，其圓周上的點皆為其他感測器所覆蓋，則稱感測器 s 為其他感測器圓周覆蓋。

定義 5. 感測器網路的 Voronoi 圖指的是以網路中所有感測器的座標做為位置點所畫出的 Voronoi 圖。在這個 Voronoi 圖中與感測器 s 共有 Voronoi 邊的感測器稱為 s 的鄰居。

定義 6. 由感測器 s 的鄰居所畫出的 Voronoi 圖，稱為感測器 s 的 2-Voronoi 圖。在 2-Voronoi 圖中的 Voronoi 頂點且與 $C(s)$ 圓心距離小於 r 的點稱為 2-VV (Voronoi vertex)，Voronoi 邊與 $C(s)$ 圓周的交點稱 2-VIP (Voronoi intersection point)。圖 4 為 2-VV 與 2-VIP 的範例，sensor s 共有 5 個鄰居，圖上有 2 個 2-VVs 以及 3 個 2-VIPs。

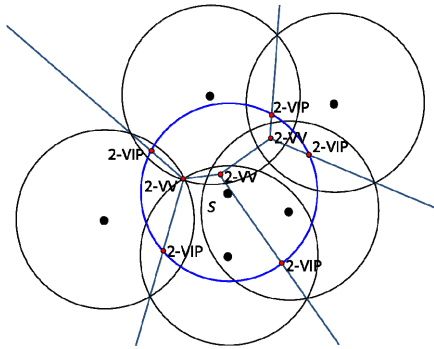


圖 4. 2-VV 與 2-VIP 例圖。

3.3 冗餘感測器判別演算法

本節描述我們的冗餘感測器判別演算法，我們的演算法依據感測器 s 的鄰居所形成的 2-Voronoi 圖，決定 s 的感測範圍內是否已有 95%以上區域為 s 的鄰居所覆蓋，若是即判別感測器 s 為冗餘感測器。Cărbunar 等人[4]提出由感測器 s 鄰居所形成的 2-Voronoi 圖判別感測器 s 是否為其鄰居完全覆蓋，判別方式根據如下定理。

定理 1 感測器 s 的感測範圍為其鄰居完全覆蓋，若且唯若其 2-Voronoi 圖上所有的 2-VVs 與 2-VIPs 點皆為感測器 s 的鄰居所覆蓋[4]。

如圖 4 之 2-VVs 與 2-VIPs 點皆為感測器 s 的鄰居所覆蓋，故 s 的感測範圍完全為其鄰居所完全覆蓋。由此定理可知，若感測器 s 的覆蓋範圍內存在不為其他感測器所覆蓋的區域，則此區域一定會包含 2-Voronoi 圖上的 2-VVs 或 2-VIPs 點。因此我們以 2-VVs 與 2-VIPs 點進行感測器 s 的覆蓋率評估。令圓 c 為以 2-VVs 或 2-VIPs 點為圓心的小圓，且 $A(c)=\alpha A(C(s))$ ，若小圓 c 為感測器 s 的鄰居圓周覆蓋，則感測器 s 包含此小圓圓心的無感測器覆蓋區域面積至多 $A(c)$ （取 $\alpha = 0.2$ ， α 的取法將於實驗部分討論）。我們的演算法以如下步驟判別感測器 s 是否為冗餘感測器：

步驟 1: 考慮 sensor s 的感測範圍，找出 sensor s 的鄰居。

步驟 2: 畫出 sensor s 的 2-Voronoi 圖，並求出 Voronoi 圖上的 2-VVs 或 2-VIPs 點。

步驟 3: C_s 為以 s 之 2-VVs 與 2-VIPs 為圓心 $\sqrt{\alpha}r$ 為半徑的小圓的集合。若 C_s 中的小圓皆為 s 的鄰居圓周覆蓋，則判別 s 為冗餘感測器，如圖 5。

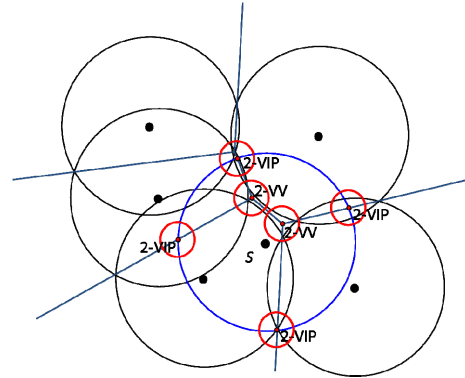


圖 5. 以 2-VVs 與 2-VIPs 為圓心之小圓集合判別感測器 s 是否為冗餘。

接著說明演算法如何判別小圓 c 是否為 sensor s 的鄰居圓周覆蓋。令大圓 $C(s_i)$ 為 sensor s 的鄰居，其圓心為 (x_i, y_i) ，半徑為 R ，小圓 c 的圓心為 (x, y) 半徑為 r 。則小圓 c 與大圓 $C(s_i)$ 圓周相交的情形有以下兩種可能：

Case1: 小圓與大圓的圓周沒有交點或交於 1 點。若 $R > r + d((x_i, y_i), (x, y))$ ，此時小圓完包含於大圓之內，可判斷此小圓已被圓周覆蓋，如圖 6(a)所示。否則小圓完全位於大圓之外，此大圓無法

造成小圓的圓周覆蓋，見圖 6(b)。

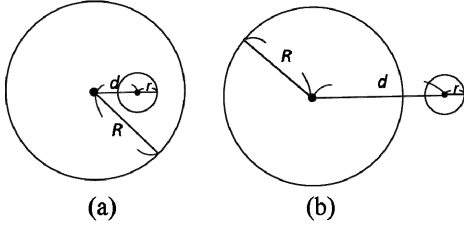


圖 6. 小圓與大圓的圓周沒有交點或交於 1 點。(a)小圓完包含於大圓之內；(b)小圓完全位於大圓之外。

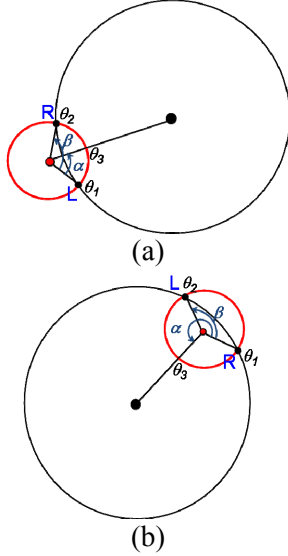


圖 7. 決定大圓覆蓋小圓的圓周區間。(a) $\beta = 2\alpha$, $L = \theta_1$, $R = L + \alpha$ 。(b) $\beta \neq 2\alpha$, $L = \theta_2$, $R = L + (2\pi - \alpha)$ 。

Case2: 小圓與大圓相交於兩點。我們以角度 $[L, R]$ 標記小圓 c 的圓周為大圓 $C(s_i)$ 所覆蓋的區間，表示小圓 c 圓周上角度 $L \leq \theta \leq R$ 的點都在 $C(s_i)$ 的覆蓋範圍內，其中 $0 \leq L < 2\pi$, $L \leq R$ 。 $[L, R]$ 的計算方式如下：將大圓與小圓的兩個交點與大圓圓心以小圓圓心為原點的極座標表示，其極座標表示角度分別為 θ_1 , θ_2 與 θ_3 。令 $\alpha = (\theta_3 - \theta_1) \bmod 2\pi$, $\beta = (\theta_2 - \theta_1) \bmod 2\pi$ 。若 $\beta = 2\alpha$ ，則 $L = \theta_1$, $R = L + \alpha$ ；否則 $L = \theta_2$, $R = L + (2\pi - \alpha)$ 。(見圖 7)。

此外，小圓 c 可能有部分位於感測器 s 的感測範圍 $C(s)$ 之外，如以 2-VIP 點為圓心的小圓。此時，位於 s 的感測範圍之外的圓周區間可視為已被覆蓋，因為此圓周之外的區域不屬於感測器 s 的感測範圍，見圖 8。

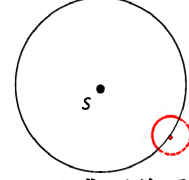


圖 8. 小圓位於 s 的感測範圍之外的圓周區間（虛線部份）可視為已被覆蓋。

以下為判別小圓圓周覆蓋的演算法，演算法只需考慮與小圓交於兩點的大圓是否形成小圓的圓周覆蓋。

步驟 1： 令 c 為小圓，圓 $C(s_1), C(s_2), \dots, C(s_n)$ 為 sensor s 的鄰居且皆與小圓交於兩點，令 $[L_i, R_i]$ 為圓 $C(s_i)$ 對小圓 c 圓周的覆蓋區間。若 $R_i > 2\pi$ ，則以 $[0, 2\pi - R_i]$ 與 $[L_i, 2\pi]$ 取代 $[L_i, R_i]$ 。若小圓 c 與 sensor s 有兩個交點，以 $[L_0, R_0]$ 表示小圓 c 在 $C(s)$ 外的圓周區間。

步驟 2： 將步驟 1 所得的左右端點依角度由小到大排序（左右端點角度相同時左端點在前），令排序完的序列為 A 。

步驟 3： 若 $A_1 \neq 0$ 則小圓不為 s 的鄰居所圓周覆蓋。令 $\text{coverage} = 0$ ，由 A_1 開始依序檢查，若 A_i 為左端點，則 coverage 加 1，否則 coverage 減 1，當 $\text{coverage} = 0$ 時終止。若終止時所對應的端點角度為 2π ，則小圓為 s 的鄰居所圓周覆蓋，否則小圓不為 s 的鄰居所圓周覆蓋。

接下來我們以兩個範例說明演算法判別冗餘感測器的執行過程。

範例 1： Sensor s 的 2-Voronoi 圖以及 2-VVs, 2VIPs 如圖 9(a)所示。圖中以 2-VVs, 2VIPs 的小圓皆為 s 的鄰居圓周覆蓋。我們以圖 9(a)上的小圓 c 說明演算法判別圓周覆蓋的過程。圖 9(b)為小圓 c 及與其相交的 s 的鄰居，其圓周覆蓋區間如圖 9(c)。其中 $R_3 > 2\pi$ ，以 $[L_4, R_4] = [0, 2\pi - R_3]$ 與 $[L_5, R_5] = [L_3, 2\pi]$ 取代 $[L_3, R_3]$ 。將覆蓋區間的左右端點由小到大排序得圖 9(d)的端點順序。令 $\text{coverage} = 0$ ，演算法依排序完之端點依序檢查，遇左端點加 1，遇右端點減 1，當 coverage 為 0 時的端點為 R_4 ，此時 $R_4 = 2\pi$ ，因此演算法判別小圓為 s 的鄰居圓周覆蓋。因演算法判別圖上小圓皆為 s 的鄰居圓周覆蓋，故 s 為冗餘感測器。

範例 2： Sensor s 的鄰居所形成的 2-Voronoi 圖以及 2-VVs, 2VIPs 如圖 10(a)所示。圖 10(b)與圖 10(c)分別為小圓 c 及與其相交的 s 的鄰

居，以及其圓周覆蓋區間。同理 $R_3 > 2\pi$ ，以 $[L_4, R_4] = [0, 2\pi - R_3]$ 與 $[L_5, R_5] = [L_3, 2\pi]$ 取代 $[L_3, R_3]$ 。區間之左右端點由小到大排序的結果如圖 10(d)。演算法依排序完之端點依序檢查，遇左端點加 1，遇右端點減 1，當 coverage 為 0 時的端點為 R_2 ，此時 $R_2 \neq 2\pi$ ，因此演算法判別小圓不為 s 的鄰居圓周覆蓋，故 s 不為冗餘感測器。

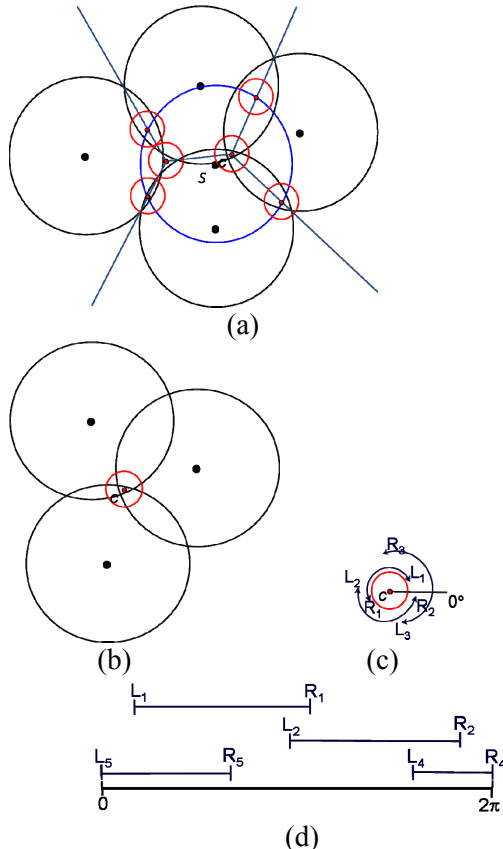


圖 9. 演算法判別 s 為冗餘感測器的範例。(a) s 的鄰居所形成的 2-Voronoi 圖以及 2-VVs, 2VIPs; (b) 小圓 c 及與其相交的 s 的鄰居; (c) 圓周覆蓋區間; (d) 區間之左右端點由小到大排序的結果。

4. 實驗結果與討論

本節進行演算法的實驗模擬，分析演算法判別冗餘感測器的正確率，並討論其中 α 值的取法。

4.1 覆蓋率分析

我們考慮將覆蓋範圍內有 95% 為其他感測器所覆蓋的感測器稱為冗餘。為了瞭解所決定的 95% 具有的意義，我們做了如下的實驗，使我們知道當在偵測範圍內及使增加所散佈的 sensor 數目，整體的覆蓋率難以大於 95%。

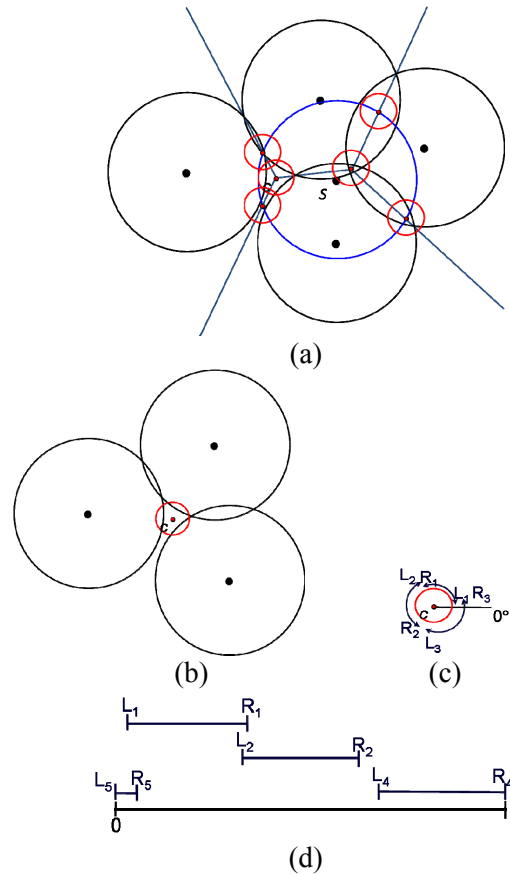


圖 10. 演算法判別 s 為冗餘感測器的範例。演算法判別 s 為冗餘感測器的範例。(a) Sensor s 的鄰居所形成的 2-Voronoi 圖以及 2-VVs, 2VIPs; (b) 小圓 c 及與其相交的 s 的鄰居; (c) 圓周覆蓋區間; (d) 區間之左右端點由小到大排序的結果。

實驗結果如圖 11 所示，圖中 X 軸為散佈在偵測範圍內的 sensor 數目，Y 軸為偵測範圍之 sensor 覆蓋率。圖中的棕線、棕綠線、紫線、橙線與淡藍線分別代表 5 種不同的實驗條件，棕線表示在邊長為 400 的矩形範圍內，隨機散佈感測半徑為 5 的感測器，經過 500 次重複實驗，計算其平均覆蓋率。而棕綠線、紫線、橙線、淡藍線則分別代表將感測半徑為 5 的感測器散佈於 800、1000、1600、2000 的矩形範圍內，計算 500 次所得的平均覆蓋率。當所得的覆蓋率與前一次覆蓋率相較，增加小於 0.005 即終止實驗。由以上的實驗結果可以知，在 $L = 800, 1000, 1600, 2000$ 的這幾種情形，sensors 數目的增加都無法使覆蓋率超過 92%。因此我們瞭解當感測器的配置是使用隨機散佈的方式配置，則很難要求系統達到完全覆蓋的條件，故我們考慮網路部份覆蓋，並將覆蓋範圍內有 95% 為其他感測器所覆蓋的感測器稱為冗餘為合理之假設。

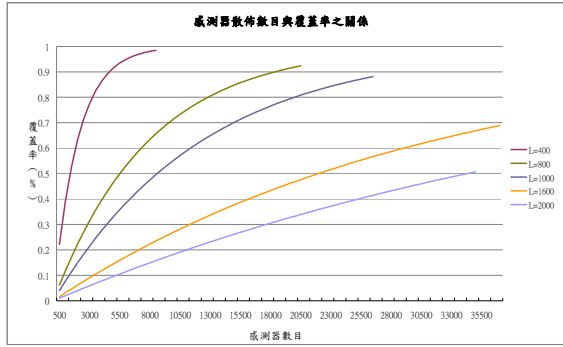


圖 11. 偵測範圍內增加散佈之 sensor 數，覆蓋率難以大於 95%。

4.2 冗餘感測器判別演算法執行效能分析

以下實驗分析演算法判別冗餘感測器的正確率。考慮感測器 s 的感測範圍為 r ，共有 n 鄰居。我們在距 $C(s)$ 圓心 $2r$ 的範圍內，隨機散佈 n 個感測器，以實際的點數計算方式，求得感測器 s 範圍內為其鄰居所覆蓋的真實覆蓋率，並將其與演算法所執行的結果做一比較，比較結果分成四種：

1. True Positive (TP)：感測器 s 範圍內為其鄰居所覆蓋的覆蓋率 $\geq 95\%$ 且演算法判別為冗餘。
2. True Negative (TN)：感測器 s 範圍內為其鄰居所覆蓋的覆蓋率 $< 95\%$ 且演算法判別不為冗餘。
3. False Positive (FP)：感測器 s 範圍內為其鄰居所覆蓋的覆蓋率 $< 95\%$ ，但演算法判別為冗餘。
4. False Negative (FN)：感測器 s 範圍內為其鄰居所覆蓋的覆蓋率 $\geq 95\%$ ，但演算法判別不為冗餘。

我們的實驗分別考慮 sensor s 鄰居的數目 $n = 4, 6$ 與 8 這三種情形，每一個情形各取小圓的大小為 $C(s)$ 的 α 倍， $\alpha = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ ，重複 500 次實驗。實驗結果如下表：

表 1 演算法判別冗餘感測器的正確率分析。
 $n = 4, \alpha = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ 。

$n=4$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.15$	$\alpha=0.2$
TP	0.04	0.056	0.066	0.058
TN	0.856	0.85	0.838	0.862
FP	0.002	0	0.002	0
FN	0.102	0.094	0.094	0.08

表 2. 演算法判別冗餘感測器的正確率分析。
 $n = 6, \alpha = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ 。

$n=6$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.15$	$\alpha=0.2$
TP	0.13	0.162	0.17	0.186
TN	0.676	0.654	0.648	0.644
FP	0.002	0.002	0	0.004
FN	0.192	0.182	0.182	0.166

表 3. 演算法判別冗餘感測器的正確率分析。
 $n = 8, \alpha = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ 。

$n=8$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.15$	$\alpha=0.2$
TP	0.3	0.294	0.31	0.336
TN	0.438	0.406	0.424	0.454
FP	0	0	0	0
FN	0.262	0.3	0.266	0.21

在 $n = 4$ 的 case 中，演算法大部分都能夠做正確的判斷。其中有極少數情形出現 FP, FN 則均小於 0.102 且隨著 α 增加而變小。同 $n = 4$ 的 case，當 $n = 6$ 時，演算法大部分都能夠做正確的判斷。其中有極少數情形出現 FP, FN 則均小於 0.192 且隨著 α 增加而變小。當 $n = 8$ ，演算法大部分仍能夠做正確的判斷。其中並無 FP，而 FN 則均小於 0.26 且隨著 α 增加而有變小的趨勢。由實驗結果可知，為我們演算法判別為冗餘的感測器，實際上的確為冗餘，只有極少數的情形會判斷錯誤，同時若取 $\alpha = 0.2$ 則 FN 最多大約 0.25 的感測器實際上為冗餘卻被演算法判別不是冗餘。這表示我們演算法判別的標準相當嚴格，雖然有些是冗餘的感測器未被演算法判別為冗餘，但這樣表示系統的整體覆蓋率在我們演算法的冗餘感測器判別下，不會有錯誤判別而造成系統覆蓋率低於 95%。

此外，演算法判別的冗餘感測器數目對於覆蓋率的分佈情形，如圖 12~14 所示。圖中的 X 軸為感測器 s 為鄰居所覆蓋的覆蓋率，Y 軸為演算法判別為冗餘的感測器數目，其中覆蓋率 95 所對應的感測器數目，表示我們統計覆蓋率介於 94.75~95.25 間的感測器數目。圖 12 為鄰居數目 $n = 4$ 的情形，其中 $\alpha = 0.05$ 與 $\alpha = 0.15$ 分別有 1 個覆蓋率低於 0.95 的例子演算法誤判為冗餘，其他例子演算法均能做正確的判斷。圖 13 為鄰居數目 $n = 6$ 的情形，其中 $\alpha = 0.05$ 與 $\alpha = 0.1$ 分別有 1 個覆蓋率低於 0.95 的例子，演算法誤判為冗餘；而 $\alpha = 0.2$ 則有兩個例子演算法誤判為冗餘，而這兩個例子的覆蓋率分別為 0.9485 與 0.9494，均非常接近 0.95。圖 14 為鄰居數目 $n = 8$ 的情形，演算法均能做正確的判斷。

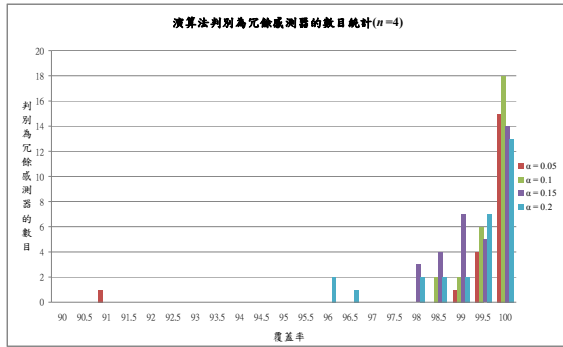


圖12. 演算法判別為冗餘感測器的數目統計($n = 4$)

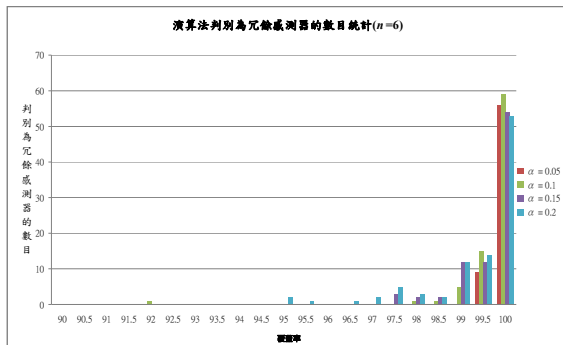


圖13. 演算法判別為冗餘感測器的數目統計($n = 6$)

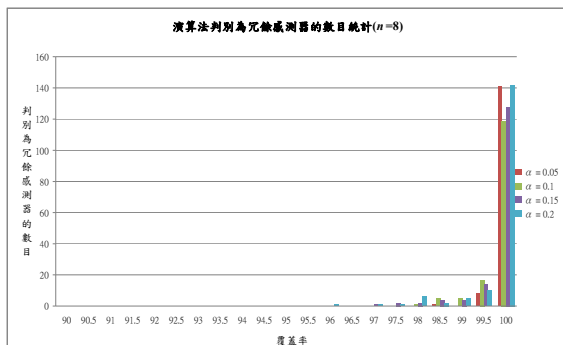


圖14. 演算法判別為冗餘感測器的數目統計($n = 8$)

根據以上的實驗分析可知，在各種情形下FP只出現在極少數的例子，而FN的數目會隨著 α 值增加而減少，因此我們將演算法的 α 值取為0.2，以獲得最佳之正確率。

5. 結論與未來研究

本研究討論了滿足部份覆蓋的感測器網路之冗餘感測器判別問題。我們的演算法能夠在滿足網路覆蓋率至少為95%的條件下，判別冗餘感測器。未來我們也將進一步討論在滿足部份覆蓋的條件下，將感測器分群、排程，降低整個感測系統的能源消耗，並延長整個系統的使用壽命。

參考文獻

- [1] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E., "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, August, pp. 102-114, 2002.
- [2] Gupta, H., Das, S. R. and Gu, Q., "Connected sensor cover: Self-organization of Sensor Networks for Efficient Query Execution," *Proc. of ACM MobiHoc'03*, pp. 189-200, 2003.
- [3] Cardei, M. and Du, D.-Z., "Improving Wireless Sensor Network Lifetime through Power Aware Organization," *ACM Wireless Networks*, Vol.11, No.3, pp. 333-340, 2005.
- [4] Cărbunar, B., Grama, A., Vitek, J., "Coverage preserving redundancy elimination in sensor networks," *Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)* 2004, pp. 377-386, 2004.
- [5] Cardei, M., MacCallum, D., Cheng, X., Min, M., Jia, X., Li, D., and Du, D.-Z., "Wireless Sensor networks with energy efficient organization," *Journal of Interconnection Networks*, Vol. 3, No. 3-4, pp. 213-229, 2002.
- [6] Cardei, M. and Wu, J., "Energy-Efficient Coverage Problems in Wireless ad-hoc Sensor Networks," *Computer Communications*, Vol. 29, No. 4, pp. 413-420, 2006.
- [7] Huang, C.-F. and Tseng, Y.-C., "The Coverage Problem a Wireless Sensor," *Mobile Networks and Applications*, Vol. 10, No. 4, pp. 519-528, 2005.
- [8] Liu, Y. and Liang, W., "Approximate Coverage in Wireless Sensor Networks," *The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05)*, pp. 68-75, 2005.
- [9] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., and Srivastava, M., "Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks," *Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001)*, pp.1380-1387, 2001.
- [10] Slijepcevic, S. and Potkonjak, M., "Power Efficient Organization of Wireless Networks," *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, pp. 472-476, 2001.
- [11] Wang, B., *Coverage Control in Sensor Networks*, 1st ed., Springer, 2010.
- [12] Wang, L. and Kulkarni, S. S., "Sacrificing a

- little coverage can substantially increase network lifetime,” *Ad Hoc Netw.*, Vol. 6, No. 8, pp. 1281-1300, 2008.
- [13] Yardibi, T. and Karasan, E., “A distributed activity scheduling algorithm for wireless sensor networks with partial coverage,” *Wireless Networks*, Vol. 16, No. 1, pp. 213–225, 2010.
- [14] Yang S., Dai, F., Cardei, M., and Wu, J. and Patterson, F., “On Connected Multiple Point Coverage in Wireless Sensor Networks,” *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 13, No. 4, pp. 289-301, 2006.
- [15] Yan, T., He, T., and Stankovic, J. A., “Differentiated surveillance for sensor networks,” *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 51-62, 2003.
- [16] Zhang, H. and Hou, J. C., “On the upper bound of α -lifetime for large sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, Vol. 1, No. 2, pp. 272-300, 2005.
- [17] Zhang, H. and Hou, J. C., “Maximising α -lifetime for wireless sensor networks,” *Int. J. Sen. Netw.*, Vol. No. 1/2, pp. 64-71, 2006.
- [18] Zhou, Z., Das, S. and Gupta, H., “Connected K-Coverage Problem in Sensor Networks,” *Proc. of Intl. Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 373-378, 2004.
- [19] Zorbas, D., Glynos, D. and Douligeris, C., “Connected partial target coverage and network lifetime in wireless sensor networks,” *IEEE Wireless Days Conference (The 2nd IFIP)*, 2009.