

以拓樸規畫延長移動式感測網路壽命之研究

林世育
逢甲大學 通訊工程學系

朱嘯秋
助理教授
逢甲大學 通訊工程學系
e-mail : hchu_1@yahoo.com.tw

摘要

假設在佈署的感測網路環境中，佈置的感測器節點具有相同的感測、通訊、移動能力及能源。在指定的目標區域內，使用石頭丟入水中所產生的漣漪而衍生的觀念，當感測網路內有感測器節點故障時，其鄰近的感測器節點，將以漣漪直線的方式來針對感測漏洞作遞補，為了節省能源的消耗，最多只會進行兩層的感測器節點移動。

關鍵詞：感測網路使用壽命、覆蓋率、漣漪直線遞補法

Abstract

We assumed that in an wireless sensor network, each sensor node has identical sensing, communicating, moving capability, and energy amount. If multiple of these sensor nodes are deployed in the target area, and few of them are mal-functioned after the network is stable, then it is possible to move neighboring sensor nodes to fill in for the faulty ones and reduce the impact of faulty nodes to minimal level. In this project, we proposed a ripple filling method to handle few faulty sensor nodes. To reduce the energy consumption, we only move sensor nodes that are within two layers of faulty ones.

Keywords: sensor networks lifetime, coverage rate, ripple filling method

1. 前言

受限於感測器節點(sensor nodes)本身大部分是使用電池來供應有限的能源，同時無線電傳輸的距離亦受到限制(一般而言傳輸距離從數公尺到一百公尺不等)。為了節省傳輸時的能量消耗以及距離限制的問題，因此感測器節點如果距離基地台太遠時，就需要藉由多重跳躍代傳機制(multiple-hop relay)建立網

路路由將資料經由多個感測器節點組成的路徑傳回基地台。[2, 7]

由於感測器節點網路的節點個數從數十至數百個皆有可能，使得網路的管理非常困難，每個感測器節點都是獨立的個體，形成一個複雜的分散式環境(distributed environment)，加上感測器節點的電池可能無法置換，因此能源控制(energy control)幾乎是所有行動感測網路設計及網路管理首要考慮的重點。再加上感測器節點若為嵌入式系統的裝置，它們故障的機會相形提高，因此容錯(fault tolerant)機制於感測網路的設計及管理上亦不可或缺[8]。

由於當散佈在感測區域內的感測器節點故障時，在成本及人員安全考量下不可能在第一時間置換新的感測器節點，因此在佈署感測網路的同時，也應考慮當有感測器節點發生故障時，感測網路如何做出容錯機制，將現有的感測器節點進行移動遞補覆蓋漏洞，且仍然可以維持效能較佳的覆蓋率，以延長其感測網路的使用壽命。

2. 移動式感測網路[3,4]

感測網路是網點狀無線網路(ad-hoc networks)的進一步延伸應用，感測網路的應用目的是希望能夠以微小的感測裝置來蒐集環境四週的資訊，並可由一後端的伺服器來彙整資料並加以分析。感測網路的整體架構除了網點狀分佈的感測器節點用以感測環境資訊外，還可透過一個額外的匯集節點(sink node)將感測器節點蒐集的資料傳輸至負責處理的伺服器上，整個感測網路之網路架構如圖 2-1 所示。

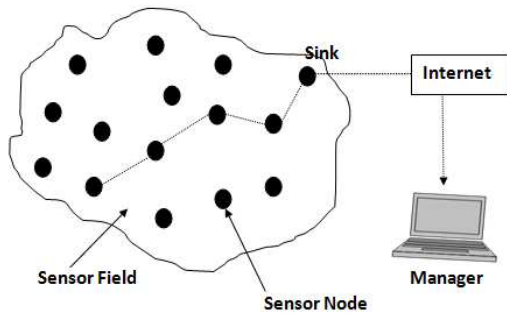


圖 2-1：感測網路架構圖

移動式感測網路 (mobile sensor networks) 是由可移動的感測器節點所組成，通常感測器節點大多數是利用隨機散佈，例如：將感測器節點散佈於森林中，以對森林火災地點的判定提供最快的訊息。這表示一個移動式感測網路的協定或演算法應該擁有自我組織的能力，才能有效率的將蒐集到的資訊傳播到有線網路上。移動式感測網路的另一項特點是合作運算，例如：一個感測器節點可以透過無線傳輸，收集鄰近感測器節點的資料，並發送經過整合計算過的資料給後端，以減少能源消耗。

一個完整的感測網路，使用者在所需監測區域中通常將感測器節點隨機散佈，此區域稱為監測區域 (sensor field)。感測網路開始運作後，每當有事件發生時，感測到事件的感測器節點便會將收集的資料整合，透過一個額外的匯集節點 (sink node) 將感測器節點蒐集的資料傳輸至負責處理的伺服器上。

2.1 感測網路設計考量

感測網路在設計的時候往往有以下幾點需要考量[9]：

2.1.1 網路的容錯能力 (fault tolerance)

由於感測器節點本身構造簡單且能使用的能源有限 (目前感測器節點多半是以電池來供應電源)，再加上感測器節點受到環境因素的侵蝕與毀損，因此容易損壞或是耗盡電源而喪失設計之功能，所以在設計感測網路的時候，必須避免因為少數感測器節點損壞而造成整個網路癱瘓的情形。

2.1.2 網路的擴展性 (scalability)

無線感測網路在設計上，一般都是考量感測器節點數量極為龐大的情形；感測器節點的

數量，少則可以是數十至數百個，多則可達到數千個。因此，如何在這個龐大的網路下，設計一套有效率的傳輸協定 (routing protocol)，以及分散式的運算 (distributive computation) 模式，讓感測器節點所收集的資料能夠順利傳回給後端伺服器，則是決定這個無線感測網路是否能夠成功運作的重要關鍵。

2.1.3 感測器節點的價格 (sensor costs)

由於感測器節點必須大量的使用，因此為了考量整體的成本，對於如何降低感測器節點本身硬體及設計上的價格，也是十分重要的議題之一。

2.1.4 感測網路的拓樸 (sensor network topology)

一般感測網路的建立與維護可細分為三個階段：[5, 6]

a. 規劃與部署階段 (planning and deployment phase)。

感測器節點的部署可以事先精心規劃，再依據所規劃的藍圖逐一擺放感測器節點。然而在某些特殊環境下，例如：海洋、戰場或是森林等，感測器節點的佈置是無法十分精確的，因此在這種情況下，感測器節點往往以非常大量的方式，透過船隻、飛機或是其他機械等，隨意散佈在感測環境中。

b. 後部署階段 (post-deployment phase)。

理論上，在感測器節點部署完成後，就已經形成一個完整的無線網路架構，但是感測器節點的位置容易受到環境因素，例如水力、風力或是人為移動等因素而改變，或是當感測器節點電力耗弱或故障損壞時，造成網路拓樸的改變；這時候，系統就必須對拓樸的改變做出即時反應，並迅速對殘缺的網路拓樸做出修正。

c. 新增感測器節點階段 (redeployment of additional phase)。

在經過一段時間後，許多感測器節點可能由於電力嚴重不足或是損壞的緣故，造成整個感測網路中，可以偵測環境以及傳輸資料的節點個數不足。此時，系統已經無法自動對整個網路架構做出修補的動作，所以這時候必須依靠外力 (人員、機械等) 在這個網路中新增一些額外的感測器節點，以彌補感測器節點數量不足的問題。

題。有了這些新增的感測器節點之後，原先殘缺不堪的網路彷彿注入了新生命，可以再自動重新組態(auto-configuration)網路架構，以繼續執行任務。

2.1.5 感測環境(environment)

感測器節點所感測的環境，除了可以是居家、農田、溪流、森林、建築物，甚至是草坪等與生活息息相關的地區，也可能是危險的戰場、人類未知的太空、海洋的最深處、以及酸性與鹼性的化學環境等。因此，感測器節點必須能夠根據不同的感測環境而有不同設計，以便能夠因應環境，蒐集各種不同的環境資料。

2.1.6 傳輸介質(transmission media)

無線感測網路的傳輸介質與一般常見的無線網路相同，包括可以利用紅外線、無線電波、以及光纖介質等作為傳輸媒介，而最常用的傳輸介質是無線電波。舉例來講， μ AMPS的感測器節點是強調採用 2.4GHz 頻帶，和藍芽(bluetooth)介面相容的傳輸裝置；而另一種低功率的感測器節點裝置則是使用 916MHz 頻帶、單一頻帶的電波傳送裝置。

2.1.7 省電機制(power consumption)

感測器節點本身能夠攜帶的電源十分有限，然而，感測器節點在偵測環境、資料運算、以及將資料傳輸給後端的無線資料感應器時，往往都會耗費為數可觀的電力，倘若沒有特別的省電機制，感測器節點本身的使用壽命勢必會大幅縮短，造成更換感測器節點時耗費更多的成本，甚至在某些環境下(例如戰場)，感測器節點的更換並不是那麼容易。因此，如何提供一個良好的省電機制，可以說是無線感測網路所需要考量的重要課題。

2.2 感測網路架構考量

目前現有的無線臨時網路(wireless ad-hoc networks)的架構是為最接近感測網路的架構。雖然它們同為無固定基礎結構

(infrastructure)型的網路，但現有的無線臨時網路協定及演算法大多無法直接應用到感測網路上。其中導致此結果最主要的幾個原因如下：

(1). 感測網路的節點數常是無線臨時網路的數十倍至數千倍。

- (2). 感測網路的感測器節點密度高而感測器節點十分容易故障。
- (3). 感測網路的網路拓撲(topology)時常改變。
- (4). 感測器節點的能量、運算能力及記憶體受到極大的限制。

由於感測器節點數量非常大且很多節點可能進行同樣的偵測及任務，加上感測器節點可能沒有類似 IP 網路中路由能力，所以無法直接應用無線臨時網路的演算法與路由設計。

3. 感測網路之建構

本研究最主要假設為感測器節點具有移動能力(mobile sensor)，也就是說感測器節點能移動到演算法所指定的適當位置。假設具有相同的感測、通訊、移動能力及能源的感測器節點以均勻隨機的方式散佈在二維平面的區域上，感測器節點的通訊半徑至少為感測半徑的兩倍，以及感測器節點知道感測區域的邊界座標。以前述的假設條件，我們將以程式模擬的方式來研究如何設定感測器節點之間的距離，使得當少數節點失效的時候，可以依照簡單的演算法指引其他感測器節點移動來填補感測區域出現的空缺，並達成效能較佳的覆蓋率。首先要先介紹在二維空間上的完美排列法。

3.1 完美排列法[1]

我們將感測器節點的感測範圍看成大小相同的圓，並證明出以三個大小相同的圓，形成覆蓋面積最大，重疊面積最小，且中間沒有漏洞的感測器節點排列方法。就是將三個圓的圓心放在邊長 $\sqrt{3}r$ 的正三角形的頂點上。(r表示感測器節點的感測半徑)如圖 3-1 所示：

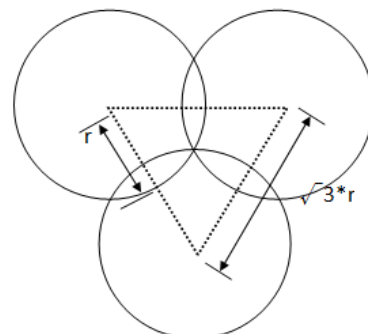


圖 3-1：OGDC 演算法-完美排列法

由以上圖 3-1 方式排列多個感測器節點可得

下圖 3-2：

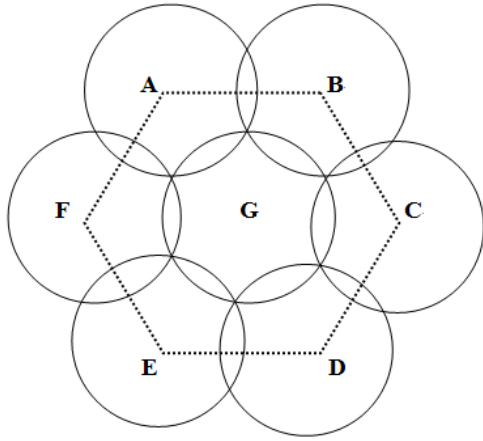


圖 3-2：完美排列法之六角形頂點位置

3.2 容錯與容錯評估

失效的感測器節點的數量及失效感測器節點的分布位置，都會影響覆蓋率的降低程度。以下將就這兩方面來探討：

3.2.1 錯誤感測器節點的數量

若感測器節點的損壞數量越多，此感測區域內剩餘的感測器節點數量所能提供的覆蓋率即會下降，這種情況下所能提供的覆蓋率頂多為相同初始佈置感測器節點數量的效能。可將問題分類為 one-fault 狀況、與 multi-fault 狀況。one-fault 狀況指感測地圖上在演算法的進行過程中，只有一個感測器節點發生錯誤。multi-fault 狀況指感測地圖上在演算法過程中，有一個以上感測器節點發生錯誤。

3.2.2 錯誤感測器節點的分布情形

感測區域內感測器節點分佈的越均勻，演算法提供的覆蓋效果越好。若我們以 uniform distribution 的方式模擬平均散佈感測器節點的行為，但仍有機會在感測區域內，某一故障感測器節點搜尋不到鄰居感測器節點。也就是說，即使散佈 100 個感測器節點，但感測區域內某區域的感測器節點數量不足，使得故障感

測器節點無法再通訊範圍內找到足夠的鄰居感測器節點時，此故障感測器節點無法找到完整的鄰居感測器節點來提供感測覆蓋。若發生在邊界時，情況最嚴重，因為沒有其他感測器節點能進行補救。這種情況下，演算法就無法為整個感測區域提供 100% 的覆蓋率。

3.2.3 漣漪直線遞補法 (ripple filling method)

本研究所採取的遞補方法為漣漪直線遞補法。其演算法十分簡單，當一個感測器節點發生故障而失效的時候，周圍的感測器就會朝向失效的感測器地點進行直線的移動，同時這些移動的感測器也會通知其鄰居朝向自己原來的位置進行移動，因此，一但有感測器節點失效，就像石子投入水中造成的漣漪，使得周圍的感測器拓撲發生改變。演算法會限制最多只有兩層的感測器進行移動，以避免大範圍的感測器拓撲改變造成的能量消耗。

4. 感測網路模擬

本研究的模擬方法，將使其覆蓋漏洞的遞補機制更為有效率，例如：遞補覆蓋漏洞的路徑將採漣漪遞補，而使其距離覆蓋漏洞較遠者不受其影響，不會像部分演算法中，整個感測網路節點都在做移動；並且本篇模擬方法採直線遞補的方式，以防會有遞補感測器節點走回頭路的狀況，而使能源耗損率增加，造成其感測網路的使用壽命減少；另外，也將考慮其布點時會造成的誤差，因為當布點者在危險的地點(例如：戰場)布點時，一定會有布點誤差，而且布點誤差也會影響感測網路的使用壽命，所以本研究模擬方法將把所有條件交叉考慮，同時模擬在完美布點以及誤差布點的環境下，漣漪直線遞補法的對於感測網路的使用壽命會有甚麼改變。

4.1 程式模擬

參數	數值
地圖大小	依感測器節點間距布點變動
感測器節點數量	451
感測半徑	r
通訊半徑	2r~3r

最大移動距離	$2\sqrt{3}r$
漣漪移動距離	依感測器節點間距布點變動

表 4-1：實驗參數設定

每個感測器節點的感測範圍為 r ，通訊範圍分別為 2~3 倍的 r ，作交叉模擬，感測器節點遞補覆蓋漏洞移動方式則以漣漪方式直線移動。我們先在相同條件設定下進行 30 次的模擬平均，來探討是否每次模擬實驗數據會出現極大誤差。以下圖 4-2 則是設定初始狀況在感測器節點間距為 $1.6*r$ 布點情況下，當發生感測器節點故障時，其周遭感測器節點遞補覆蓋漏洞，所呈現出當在 5 次、10 次、15 次直到 30 次模擬實驗平均數值，觀察後可發現其平均值誤差皆在小數點後兩位，代表其誤差差異不大，並不會影響其模擬實驗數據。

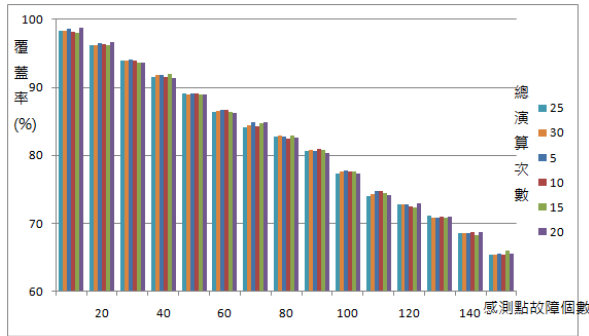


圖 4-2：模擬實驗覆蓋率平均值比較

下圖 4-3 是以完美方式布點(感測器節點間距為 $1.7*r$)，當感測網路出現覆蓋漏洞時，故障感測器節點周遭感測器節點以距離覆蓋漏洞的遠近，來做遞補的移動依據，距離越近移動越多，距離越遠則移動越少甚至不作移動，就是我們所稱的漣漪方式，以本模擬實驗設定來說， r 的數值為 5m，而漣漪移動距離分別為，第一層紅色框線範圍移動 $2/3*r$ ，第二層黑色框線範圍移動 $1/3*r$ 作覆蓋漏洞遞補。當覆蓋漏洞完成遞補動作時，覆蓋面積將呈現下圖 4-4。

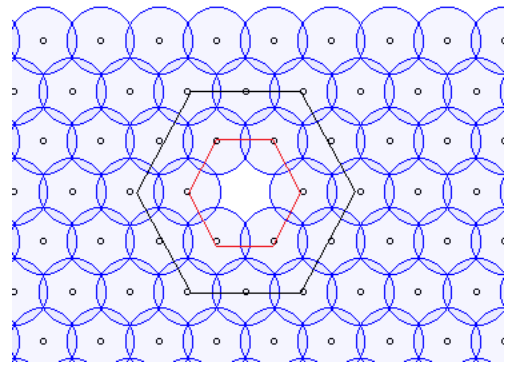


圖 4-3：完美布點出現覆蓋漏洞

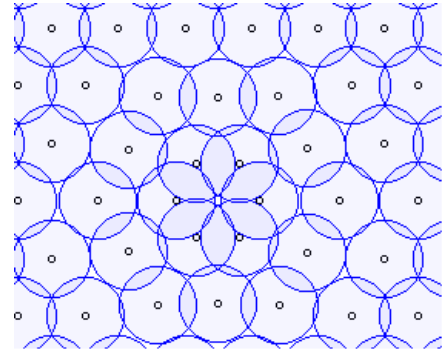


圖 4-4：覆蓋漏洞完成遞補

由模擬實驗結果中我們可以發現，當感測器節點故障個數增加時，覆蓋率將與之呈現正比，也就是感測器節點故障個數增多，則覆蓋率將隨之下降，由下圖 4-5 可以看出初始設定在完美布點情況下，其感測器節點故障個數對覆蓋率的影響，而在實際現場布點的同時，一定會發生布點誤差，如在戰場上，所以下圖 4-6 則是初始設定在感測器節點間距為 $1.7*r+10\%$ 誤差布點情況下， r 的數值為 5m，而漣漪移動距離分為，第一層通訊範圍移動 $2/3*r$ ，第二層通訊範圍移動 $1/3*r$ 作覆蓋漏洞遞補，其感測器節點故障個數對覆蓋率影響，而我們設定覆蓋率到達臨界值 60% 時，將失去其感測網路布點的意義。

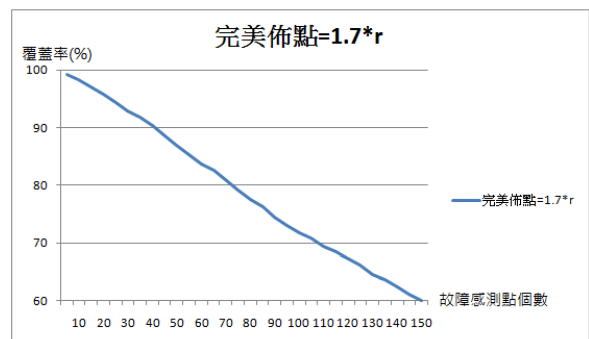


圖 4-5：感測器節點故障個數對覆蓋率影響

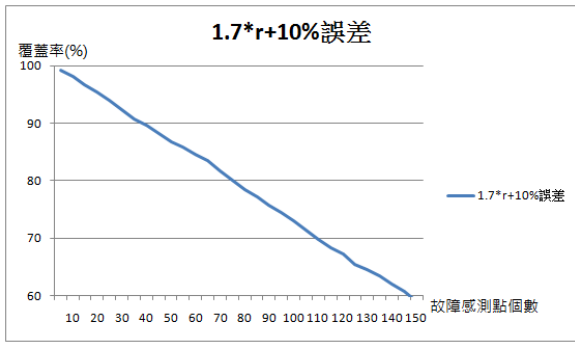


圖 4-6：誤差布點之感測器節點故障覆蓋率

由下圖4-7我們可以發現，由於完美布點的原則是感測器節點彼此感測範圍重疊面積最小、覆蓋面積最大，所以當出現感測器節點故障時，初始狀況設定為感測器節點間距為 $1.7*r+10\%$ 誤差布點情況下的覆蓋率，會比完美布點($1.7*r$)的情況好一點。這是由於感測器節點間距為 $1.7*r+10\%$ 誤差布點的情況下，感測器節點彼此間的距離拉近，感測範圍重疊面積增加，就會使其覆蓋率較不易喪失，感測器節點彼此間距離拉近也使的漣漪移動距離變短，進而減少其能源消耗，增加其感測網路的使用壽命。

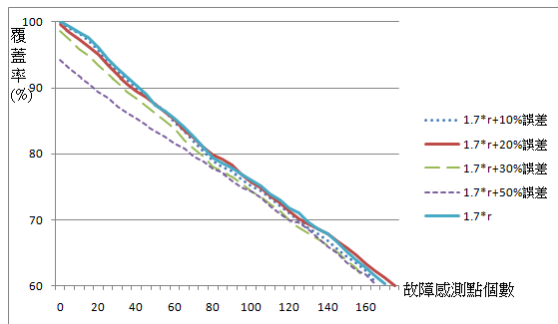


圖 4-7：完美布點與誤差布點之覆蓋率比較

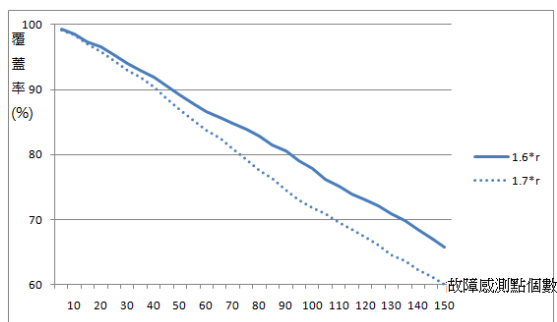


圖 4-8： $1.7*r$ 與 $1.6*r$ 布點之覆蓋率比較

$1.6*r$ 布點(感測器節點彼此的感測範圍重疊面積增加)情況下的覆蓋率會比完美布點($1.7*r$)好；而初始設定在感測器節點間距為 $1.6*r+10\%$ 誤差布點情況下，相對會比 $1.7*r+10\%$ 誤差布點之覆蓋率好。

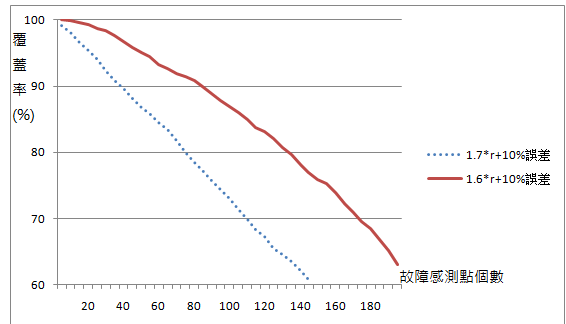


圖 4-9： $1.7*r$ 與 $1.6*r$ 皆+10%誤差覆蓋率比較

由下圖 4-10、圖 4-11 與圖 4-12 則呈現，當感測器節點間距為 $1.6*r$ 、 $1.2*r$ 與 $0.9*r$ 分別加上 10%、20%、30%及 50%誤差來進行布點時，當其初始設定之誤差值越來越大時，則其覆蓋率就會越來越小。

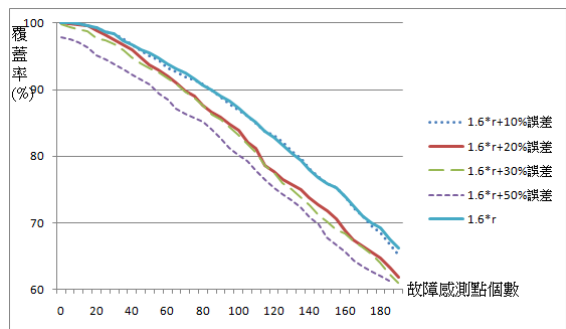


圖 4-10： $1.6*r$ 加上不同誤差之覆蓋率比較

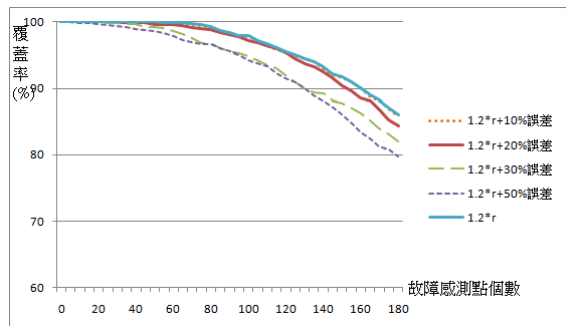


圖 4-11： $1.2*r$ 加上不同誤差之覆蓋率比較

由上圖4-8或者下圖4-9我們都可以發現，同樣基於完美布點的原則(感測範圍重疊面積最小、覆蓋面積最大)，所以當出現感測器節點故障時，初始設定為感測器節點間距為

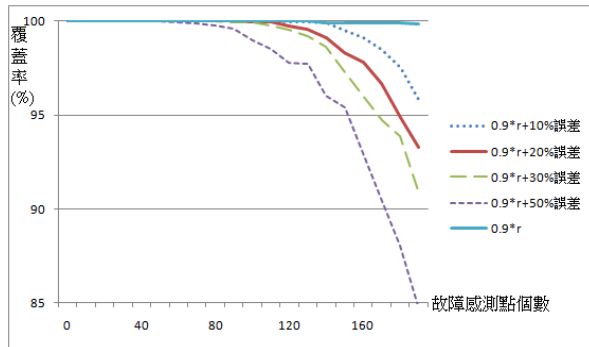


圖4-12：0.9*r加上不同誤差之覆蓋率比較

從上列模擬實驗數據我們可以發現，有兩個主要因素與覆蓋率的效能有關，第一是感測器節點的數量多寡，第二則是感測器節點的初始分布情況。同樣的，感測器節點故障的數量及故障感測器節點的分布位置，也會使覆蓋率效能的降低。另外，當故障感測器節點周遭找不到足夠的感測器節點遞補時，或是故障感測器節點分佈在邊界時，其覆蓋率效能影響最大。而在模擬實驗數據中我們可以得知，初始設定在感測器節點間距為越近且沒有誤差的布點情況下，故障感測器節點通訊範圍內的鄰近感測器節點，進行漣漪直線遞補覆蓋漏洞，其覆蓋效率最好進而能延長其感測網路的使用壽命，但成本相形較高。而在初始設定在感測器節點間距為較遠加上有誤差的布點情況下，其遞補的覆蓋效能最差。

5. 結論

本研究使用 Microsoft 的 Visual Studio 2008 軟體撰寫模擬計算平台，主要對於在各種不同的誤差比例、不同的初始設定的搭配模擬、不同的故障感測器節點與考慮成本的花費情況下，模擬每個實驗是否都能夠在布點的區域中得到穩定的覆蓋效能。

經由模擬實驗在二維的平面地圖上作布點，本研究所探討的是以延長感測網路使用壽命為基礎的情況下，由發生故障感測器節點周遭感測器節點作遞補覆蓋漏洞的漣漪直線移動，同時也要考慮會有布點不均勻或誤差...等的情況發生。由模擬數據來推測一個布點區域的覆蓋效能，並針對不同條件設定下來做進一步布點的工作。

程式模擬的結果可以給予需要設置大型感測網路的公司或是政府一個參考的數值，給予一些基本需要的感測器節點數目、基本環境設定與覆蓋效能之間數值的參考。

6. 參考文獻

- [1] Estrin D., Culler D., Pister K., Sukhatme G., "Connecting the physical world with pervasive networks", *Pervasive Computing, IEEE*, Jan.-March 2002, vol. 1, issue 1, pp. 59-69.
- [2] Heo N. and Varshney P. K., "A distributed self spreading algorithm for mobile wireless sensor networks", *Proc. 2003, IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, New Orleans, Louisiana, USA, pp.1597-1602, March, 2003.
- [3] Howard A., Matari'c M. J., and Sukhatme G. S., "An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks", *Autonomous Robots*, vol. 13 no. 2, pp.113-126, 2002.
- [4] Niculescu D., "Positioning in ad hoc sensor networks", *IEEE Network*, vol. 18, issue 4, pp.24-29, July-Aug., 2004.
- [5] Pottie J. and Kaiser W. J., "Wireless integrated network sensors", *Commun. ACM*, May 2000, vol. 43, pp.51-58.
- [6] Wang G., Cao G., and La Porta T., "Proxy-based sensor deployment for mobile Sensor networks", *Proc. 2004 IEEE*, International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, Fort Lauderdale, FL, USA, pp. 493-502, October 2004.
- [7] Xu Y., Heidermann J., and Estrin D., "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing", *Proc.,of ACM*, MOBICOM'01, Rome, Italy, vol.1, pp.70-84, July 2001.
- [8] Zhang H. and Chou J., "Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks", *Technical Report*, Dept. of Computer Science, University of Illinois at Urbana Champagne, UIUCDCS-R-2003-2351, 2003.
- [9] http://www.antd.nist.gov/wahn_home.shtml