

異質性無線感測網路中 群組管理者選派及分群機制之建立

嚴國慶
朝陽科技大學
企業管理系所
kqyan@cyut.edu.tw

王淑卿*
朝陽科技大學
資訊科技研究(聯絡人)
scwang@cyut.edu.tw

董育萍
朝陽科技大學
資訊管理系
s9514617@cyut.edu.tw

陳昱東
大葉大學
資訊管理系
fred@goldenwell.com.tw

摘要

由於感測器硬體技術的快速發展,使得無線感測網路的應用愈來愈廣泛。而感測器因受限於電力及其他計算資源有限,因此過去的學者提出以階層式分群法來減少無線感測網路電力的消耗。透過階層式分群法,可以增加網路的延展性與生存時間。然而過去相關的研究大都是在同質性感測器的環境中進行,無法滿足實際的應用。因此,本研究將在異質性分群無線感測網路的環境下,探討群組管理者的選派,冀望透過適合的群組管理者選派以降低網路整體訊息交易量並能增加其有效訊息的傳輸量。本研究在網路初始狀態時,提出一個不需透過廣播大量的封包,且能提供穩定的分群與群組管理者選派的機制;在一般運行階段時,亦考慮無線感測網路中感測器節點的新增與離開;最後,為避免因群組管理者失效,需不斷重新分群而造成網路拓撲的不穩定,提出備援管理者選派的機制。

關鍵詞: 異質性、無線感測網路、分群、群組管理者選派、穩定的網路拓撲。

Abstract

In recent years, people are more inclined to depend on wireless network services so that they may obtain latest information at any time anywhere. However, the energy of sensor node is limit, and therefore the hierarchical clustering model is a key technique to reduce energy consumption. It can increase scalable and network lifetime. In this research, the hierarchical clustering model is adopted to decrease the quantity of messages in the whole network and to raise the effective of traded messages. In this paper, a mechanism for the

designation of clustering and cluster manager is given in a heterogeneous wireless sensor network. The mechanism is a kind of processing mechanism under considering in multi-network service, such as processing mode of initial state in the network system, processing mode of access of sensor nodes in the cluster, and the processing mode concerned on failing to manage the cluster when the cluster manager is fault. Beyond that, we also propose a backup cluster manager to take works of cluster manager when the cluster manager is fault.

Keywords: Heterogeneous, Wireless Sensor Network, Clustering, Cluster Manager Election, Stable Network Topology.

1. 前言

無線感測網路(Wireless Sensor Network: WSN)的應用愈來愈廣泛[2,7]。無線感測網路的應用範圍很廣,例如:在環境觀察(Environmental Observation)中無線感測網路可用來偵測環境,例如,用來偵測化學工廠附近的水質是否有受到污染,森林火災的警報,空氣污染,取得生態環境中的溼度、壓力、與溫度,追蹤動物的行蹤等。在軍事監控(Military Monitoring)上的應用,對於戰場上的任何交通工具的位置與敵蹤,皆可用無線感測網路來持續監控觀察。在建築物監控(Building Monitoring)方面的應用,無線感測網路可用以感測建築物結構上有無發生問題。在健康監控(Healthcare Monitoring)方面的應用,感測器可以植入人體用來掌握個人的身體狀況及變化[2,3,11,13,21]。

由於,微機電硬體技術(Micro Electro Mechanical Systems: MEMS)的進步,使得無線感測網路由各式各樣的感測器構成,稱之為異

質性的無線感測網路(Heterogeneous Wireless Sensor Networks: HWSN) [4,5,6,8,15,17-19]。在HWSN中,有許多不同電力、計算能力、感測能力及不同的通訊頻寬的各種感測節點[4,5,6,8,15,17-19]。因此,如何在各種異質性的感測節點環境中建構網路拓撲是一個重要的議題。而在異質性無線感測網路中,感測節點仍受限於電力及其他計算資源,為了提昇無線感測網路之效能並延長網路存活的時間,減少電力消耗成為維持無線感測網路生命週期首要考量的因素,其次為通訊能力、記憶體大小、處理能力等影響因素亦需納入考慮。因此,如何提供一個網路拓撲使無線感測網路整體的電力消耗得以降低,並延長網路拓撲的存活時間是相當重要的議題。

無線感測網路是一個分散式的架構,且在無線網路中屬於無基礎建設(Non-infrastructure) [11,13]。無線感測網路中每個節點都是一個獨立的個體,無需透過如AP(Access Point)等有基礎建設(Infrastructure)來進行運作。無線感測網路能自我組態成網路,達到資料的傳輸與共享。圖1為無線感測網路的示意圖[2,3],感測器部署於感測區域內,並自我組態成一無線感測網路。當A要傳送資料給資訊收集中心或資訊收集中心要對A提出查詢時,透過多躍程無線連結(Multi-hop)從A←E或A→E的路徑傳送訊息。而資訊收集中心是與真實世界網路做一連結的橋樑,將感測到的資料融合(Data Aggregation)而成的資訊傳送給任務管理節點做各種應用。

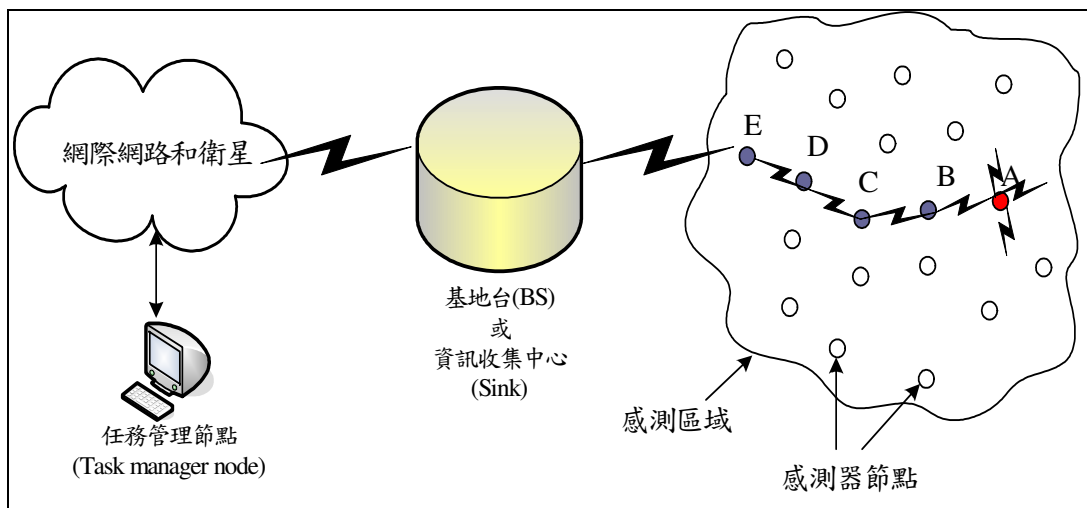


圖 1. 無線感測網路的示意圖

由過去學者的研究成果可知階層式分群(Hierarchical Cluster)技術是用於無線感測網路以減少電力消耗的關鍵技術之一,透過階層式分群技術可以增加無線感測網路的延展性與生存時間[2,3,6,15-17,23]。因此,在本研究中將採用階層式分群架構來降低整體網路訊息的交易量,藉此延長電力的使用時間與無線

感測網路拓撲的生存時間。在階層式分群架構中,群組管理者(Cluster Manager: CM)負責傳送與接收所有群組成員的資料、資料融合、及傳送接收融合過後的資訊到資訊收集中心或基地台等[10,12,16,20]。由圖 2 所呈現的示意圖中,可得知群組管理者在群內(Intra-cluster)與對群外(Inter-cluster)所負責的工作。

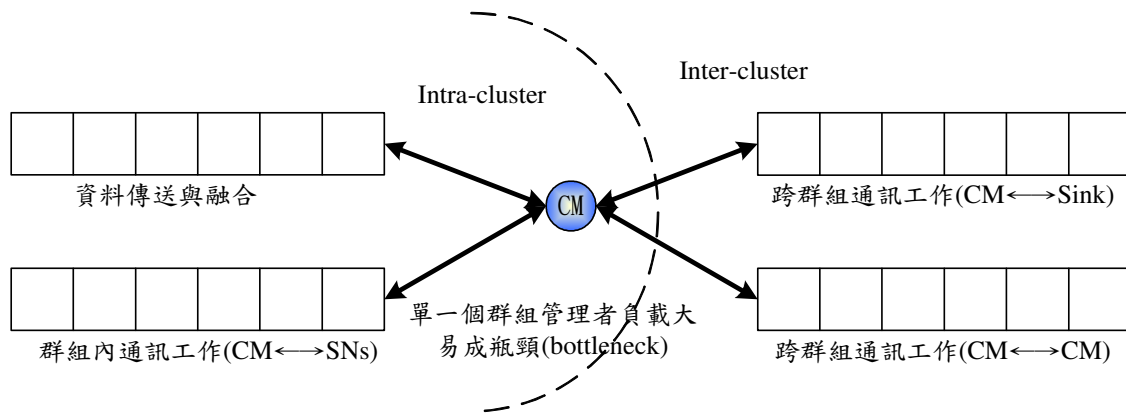


圖 2 群組管理者負責工作

由上可知，群組管理者的工作較一般感測節點負擔大，如何選擇一個能力高且穩定的群組管理者是相當重要的議題。因此選擇適當的群組管理者，並搭配分群原則機制，來架構分群式無線感測網路，是本研究的目標之一。

而依據群組管理者產生方式的不同，可以把群組管理者產生的分群演算法分為分散式與集中式兩種模式[2,3,16]分散式與集中式分群演算法最大的區別在於分散式分群演算法是以局部性資訊來選出群組管理者；集中式分群演算法則透過資訊收集中心或基地台集中整體網路資訊後再選擇出最適合的感測節點擔任群組管理者[2,3]。

反之，分散式分群演算法則不需要大量的資訊來選出群組管理者，只需透過局部性的資訊來挑選出此範圍中適合的管理者，可避免高成本缺點。但，透過局部性資訊選出的群組管理者有可能會因為無線感測網路隨機佈署(Random Deployment)[2,3]的特性，感測節點分佈並不均勻而造成部分群組管理者的負載過重。然而，目前實際的應用仍以分散式分群演算法較為接近無線感測網路的環境現況。因此，本研究將建構在一個在分散式分群環境中進行。

因此，本研究將在一個異質性的無線感測網路中，運用分散式分群的演算法，來建構分群網路拓撲。在本研究中的章節如下，第二章為文獻探討，說明過去研究在異質性無線感測網路中分群演算法的探討，第三章則為研究假設與本研究所提的分群與選派機制，第四章則為結論與未來工作。

2. 文獻探討

在 HWSN 中，由於各個感測節點的電力、計算能力、感測能力、或通訊頻寬可能各不相同。在 Cardei 等人的研究中曾提及，若能正確部署感測節點，並善用異質性無線感測網路中節點的特性，則可能會增加三倍的資料平均傳送率，甚至可提昇五倍的網路生存時間[5]。除此之外，在無線感測網路的實際應用中，所採用的環境大都為 HWSN，亦即透過 HWSN 可獲致更多元的應用。由過去的研究結果，可將異質性的感測節點依其感測能力、計算能力、通訊能力、或電力等四種特性進行分類[5,6,8,15,17-19]。

然而，當愈來愈多的異質性感測節點佈署於網路中時，如何整合這些異質性的感測節點，並組態成一個實用的網路拓撲則是一個重要的議題。由於異質性無線感測網路中的感測節點目前仍有電力不可恢復的特性，因此如何建構一個節省電力的網路拓撲，以延長網路的生命週期，亦是值得探討的重要議題。

在 Cardei 等人的研究中，是將三種型態的異質性進行分類，包括：計算能力的異質(Computational Heterogeneity)、連結性的異質(Link Heterogeneity)、及電力異質(Energy Heterogeneity)[5]。Shih 等人的研究，則是以感測元件的異質性來進行涵蓋率的問題的探討，例如溫度、光度、聲音、及振動等感測能力配備上的異質[18]。而 Han 等人則是說明感測節點會有不同的傳輸半徑，甚至有單向與雙向的通訊路徑，因此著眼於通訊(Link)上的異質性[8]。而 Wang 等人則從位置資訊來探討分散式的涵蓋控制策略，並且考慮各個節點各有不同的感測半徑之異質性[19]。

LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[9]是在無線感測網路中最具代表性的階層式分群演算法，其屬於分散式分群演算法。作法是週期性的選擇一個群組管理者，透過節點角色的循環替代群組管理者來達到電力的平均消耗。因此，使用 LEACH 每個節點都有機會擔任群組管理者。如公式(1)所示：每個感測節點會先行產生一個機率值，如果這個機率值小於門檻值 $T(n)$ ，則代表該感測節點被選為群組管理者，於是廣播自己是群組管理者的公告訊息。在每個回合中，如果節點已經擔任過群組管理者，則會把自己的 $T(n)$ 設為 0。未擔任過群組管理者的節點則會隨著回合數，門檻值會愈大，則小於門檻值的機會就會提昇，到最後如果只剩一個節點未擔任過群組管理者，此時的 $T(n)=1$ ，即一定會被選上群組管理者。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times [r \bmod (1/P)]}, & n \in G \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

因此在每個回合中單純使用機率來挑選群組管理者，讓每個節點都有機會成為群組管理者來達到電力的均衡消耗。但 LEACH 並沒有考慮電力消耗、處理器忙碌程度、與通訊狀態等相關因素。主要原因是 LEACH 的研究環境是一個由同質性感測節點所構成的同質性無線感測網路，因此在異質性的環境中，LEACH 並不適用[6,17,18]。

SEP(A Stable Election Protocol) 演算法[17]是以 LEACH 為基底延伸其異質性的概念。SEP 將感測節點依據電力能力高低分為 Advanced Node 和 Normal Node，並將 Advanced 節點的機率依據電力來放大，使 Advanced Node 擔任群組管理者的機率提昇；而 DEBC(Distributed Energy Balance Clustering Protocol) [6] 與 DEEC(Distributed Energy Efficient Clustering Algorithm)[15] 則將

Advanced 節點依據電力又分為多種層級，讓機率以電力大小來放大，能讓電力強大的節點來擔任群組管理者而不造成電力浪費。

這三個演算法都是依據電力的異質性來選派群組管理者。然而在實際的應用時，各個感測節點的異質性參數及這些參數對網路的影響，是必須進行探討的，因此在本研究中將考慮感測節點電力、處理器之計算能力、通訊頻寬、及與網路重心的距離，藉以找到較適當的群組管理者，期能使無線感測網路拓撲的生命週期更長，使網路更為穩定。

3. 群組管理者分群與選派

不論是靜態或動態的感測器網路，為了節省電力消耗，資料融合(data aggregation)是無可避免的功能。為能進行資料融合，一定數量的鄰近感測器會形成一個小組進行資料融合[2,3]。因此無線感測網路可看成一群一群感測器的組成，多個群組可能再組成更大的群組，整個網路形成階層式的架構。階層式的分群管理架構是一能有效降低電力負擔的架構[2,20]，除了可以降低整體網路的訊息傳輸量並可提升有效訊息的傳輸量。因此在本研究中，將以階層式的分群管理模式進行探討。真實的無線感測網路中常是動態的網路拓撲。動態的網路環境需考慮節點的移動性及異質性，因此本研究中亦將探討異質性節點新加入群組時與離開時的機制。

3.1 研究假設

表 1 所示為在實際應用中，常見的三種異質性感測器的硬體配備規格，本研究將以這三種感測器做為本研究的感測節點，分別是 Tmote SKY、BTnode、與 MicaZ [4,22-24]。

表 1、常見的三種異質性感測器硬體規格

	Tmote SKY	BTnode	MicaZ
Microcontroller	MSP430F149 from Texas Instruments	ATMegal 128L from Atmel	ATMegal 128L from Atmel
微處理器 運算速度	0-8 MHz	0-8 MHz	0-8 MHz
Radio	CC2420,2.4GHz IEEE 802.15.4	CC1000 315, 433, 868, 915 MHz	CC1000 315, 433, 868, 915 MHz
Battery supply	2AA cells	2AA cells	2AA cells
Battery capacity	2000mah	2900mah	2900mah

感測器上的硬體資源除了電力是運作的主要資源外，其它包括通訊頻寬、記憶體、及處理能力等都會影響該群組管理者的能力表現。因此本研究在選派群組管理者時考慮了多重因子的影響，其中也包含了群組管理者在群組中是否靠近通訊較佳的重心位置。而為了簡化研究的複雜性，研究中假設每一個感測節點的配備電力、通訊頻寬…等的硬體配備條件為可獲知的，並且為異質性，並參考[4,22-24]中的硬體條件規格，如表 1 所示。除此之外，因考慮節點與群組中重心的相對位置，因此研究中假設每個節點都能得知自己的座標位置，即感測器上具有定位裝置。

而在網路形成及運作的過程中，本研究將其分為三個階段，分別為：初始階段(Initial Phase)、一般階段(Active Phase)、與失效階段(Inactive Phase)。初始階段即為網路尚無群組及群組管理者的階段，此時將運用分群及選派群組管理者機制建立群組架構；一般階段，則為網路拓撲中的群組建置完成，並且開始執行任務、蒐集資訊的階段，也稱為穩定狀態(Steady Phase)。而失效階段，則是該群組之管理者即將發生失效時所產生的網路不穩定之狀態。在失效階段時，本研究將藉由備援管理者(Backup Manager：BM)來進行換手處理(Handoff)以避免影響整體網路的穩定。因此在節點角色上可分為三種，即為一般節點(Sensor Node：SN)、群組管理者(CM)、及備援管理者(BM)等三種角色。

在本研究中節點之角色共分為一般節點、群組管理者以及備援管理者等三種角色。一般節點為無線感測網路中每個群組中的成員，受到群組管理者的管理；而群組管理者則是負責將一般節點所傳送的資料做資料融合以及在群組與群組之間做為溝通的橋樑，並且

將融合後的高階資料傳送給資訊收集中心做各式的資料運用；備援管理者則是在群組中的一般節點集合中，挑選一個能力值最佳的節點做為備援管理者，以防群組管理者因故無法於該群組運作時，藉由備援管理者的機制避免群組的解構，造成網路的不穩定，而能力值的計算將在第 3.2 節中說明。另外，本研究考慮了初始狀態階段與一般正常運作階段的分群。因而每個節點會有兩種狀態：一為初始狀態，即節點尚未分配到任何群組當中；另一為一般狀態，當節點已屬於某一個群組時，則會由初始狀態進入到一般狀態階段。

3.2 群組管理者選派

針對無線感測網路群組管理者選派及分群方法各分成三種情況做探討，分別為初始狀態階段、一般狀態階段以及備援管理者選派階段。

3.2.1 初始狀態階段

在無線感測網路初始狀態階段，由於尚未有任何的群組管理者，因此每個節點在此時都是一般節點的类型。為了避免在初始階段使用大量廣播訊息的方式交換資訊，以進行分群與群組管理者選派[14]。本研究採用計數值遞減機制(Count Down)[20]，在初始狀態開始時，讓網路中的每個節點自行以隨機方式產生一個計數值，每經過一單位時間後該計數值減一，當有節點的計數值為零時，就會向鄰近的節點(至少一個以上)要求比較能力值。使用計數值遞減的機制，可以分散當所有節點同時提出要求進行能力值之比較時，可能產生的過量訊息傳送。

而能力比較的公式(5)中，本研究考慮感

測節點的剩餘電力值(e)、處理器目前可運用之計算能力(c)、通訊剩餘頻寬(b)、及與重心距離(d)等來計算出每個異質節點的能力值。首先利用公式(2)、(3)與(4)計算該群組的重心位置與節點與該重心的距離，而依四個因子在不同環境中的重要程度，安排不同的權重值轉換出四個因子在每個節點上的能力值(p)。這四個因子分別對群組管理者的穩定有一定的重要性，例如電力是不可或缺的運作資源；而一個較接近群組重心的節點，其涵蓋網路的範圍就愈佳，因此也較適任通訊角色；另外處理器若過於忙碌或頻寬過小都將影響群組管理者的運作。

$$CX_j = \frac{\sum_i X_{ji}}{i} \quad (2)$$

$$CY_j = \frac{\sum_i Y_{ji}}{i} \quad (3)$$

$$d_{ji} = \sqrt{(X_{ji} - CX_{ji})^2 + (Y_{ji} - CY_{ji})^2} \quad (4)$$

$$p = (e) * w_1 + (b) * w_2 + (c) * w_3 + (1/d) * w_4 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 w_i = 1$$

當新的群組管理者產生時，其將會紀錄該群組內各感測節點之相關資訊，如感測節點的編號及計算後的能力值等，此時群組管理者會由這些感測節點中挑選能力值最高之感測節點作為其備援管理者。而備援管理者挑選後將進行身份的註記，並由群組管理者自動發送公告訊息告知其所管理的感測節點，以作為將來群組管理者失效時，備援管理者進行接替之依據。

本研究運用四個在感測節點上的重要因素進行評估，包括：剩餘電力(e)、處理器計算能力(c)及通訊剩餘頻寬(b)、與重心距離(d)四個參數，來選派群組管理者。由於(e)、(c)及(b)這三個參數在不同的硬體配備上具有不同的實際數值，因此採用實際的目前數據(Value at the Moment)來衡量其感測節點的能力。另外，與重心距離(1/d)所表達的僅是位置(Location)的資訊，不列入異質性考量中。由於本研究使用感測節點各個因素的目前實際數值，因此在同質性感測節點中亦適用。換言之，本研究所提出的方法亦適用於同質性的無線感測網路。其中，電力以焦耳(Joule)為單

位、處理器計算能力以 MHz 為單位，而為了簡化研究的複雜度，本研究採以 IEEE 802.15.4-2006[1]為基準的四種通訊頻寬為基準，分別在 20、40、100、及 250kbps 的範圍內。

3.2.2 一般狀態階段

當所有節點都被分配到各群組後即進入一般階段，在此階段由於節點皆在群組內，若非是群組管理者就是一般節點，因此節點不會主動進行能力比較，避免一再更替群組管理者。此種作法可以讓網路保持在一個穩定的狀態，更能避免不必要的比較而節省頻寬、電力及避免碰撞等相關的問題發生。一般階段持續進行，直到群組管理者失效時才會有所變動。

3.3 分群機制

在階層式分群無線感測網路的環境下，節點將被分派到各個不同的群組之中，每個節點都由所歸屬的某個群組管理者所管理，任一個節點不會重覆出現在兩個不同的群組中。本研究所提出之分群機制分為三個步驟探討，包含了：(一)無線感測網路初始狀態時分群的建立；(二)節點因具移動性，因此產生節點之加入或離開時的處理；(三)群組管理者失效時的處理。以下將在各小節中分別說明。

3.3.1 初始狀態階段分群

在無線感測網路初始狀態，本研究使用計數值遞減機制的方式，讓某些節點主動請求與鄰近節點做能力值的比較，能力值較佳者會成為該群中的群組管理者，而其他能力值較低的節點，則歸群組管理者管理，也形成了一個小群組。這個小群組內的所有節點都從初始狀態轉換為一般狀態，並等待其他鄰近的節點主動要求加入。當有節點要求加入群組時，並不主動進行能力比較，而採取直接加入群組，以避免因過多的比較讓網路處於不穩定的狀態。在圖 3(d)與(e)中說明初始分群時的原則：圖 3(d)中的節點 F 向鄰近節點要求加入群組時並不會主動比較能力，而是直接加入群組當中，在節點 F 附近有兩個群組，此時則隨機選其一加入；而圖 3(d)中，節點 D 的周圍有一個群組和一個未分群的節點 E，此時將選擇與尚在初始狀態的節點 E 進行能力比較，讓未分群的節點 E 優先分群。

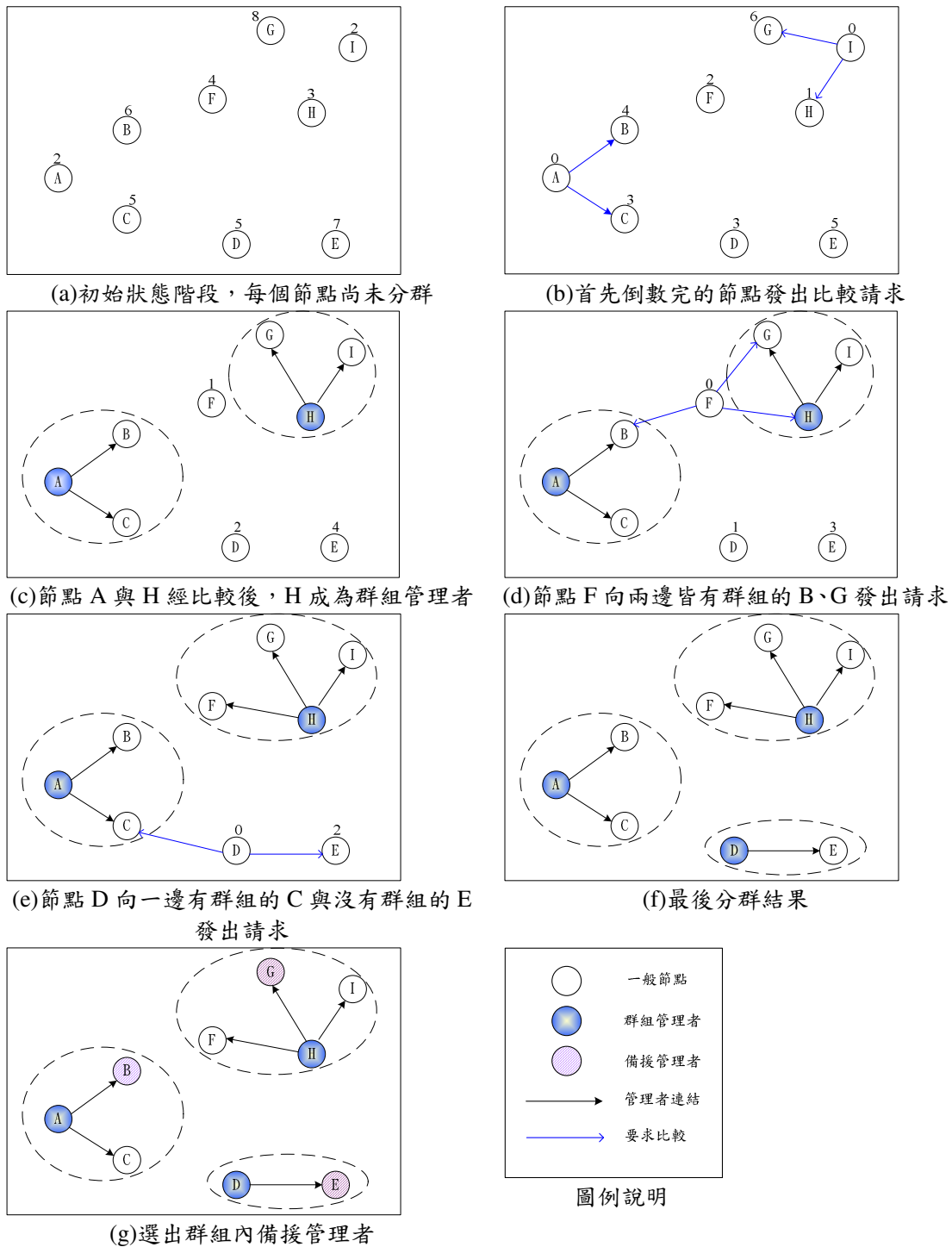


圖 3、為一初始階段選派與分群的範例和選出備援管理者

3.3.2 節點的移動性

以圖 4 說明節點移動性的分群原則，在節

點加入群組的部分，圖 4(b)中節點 J 向節點 I 發出比較請求，而節點 I 屬於管理者 H 所管理，故告知管理者 H 而不進行比較，直接將

節點 J 加入，並以被動方式更新目前群組的重心位置與群組內節點之能力值，並重新選派備援管理者，由圖 4(d)中發現更適合之備援管理者節點 J，因此備援管理者節點 G 轉換成節點

J。另外，節點若離開群組或是節點損壞失效，群組管理者無法與其通訊，如圖 4(e)中所示，那麼視節點為離開群組，管理者會予以記錄來改變群組資訊。

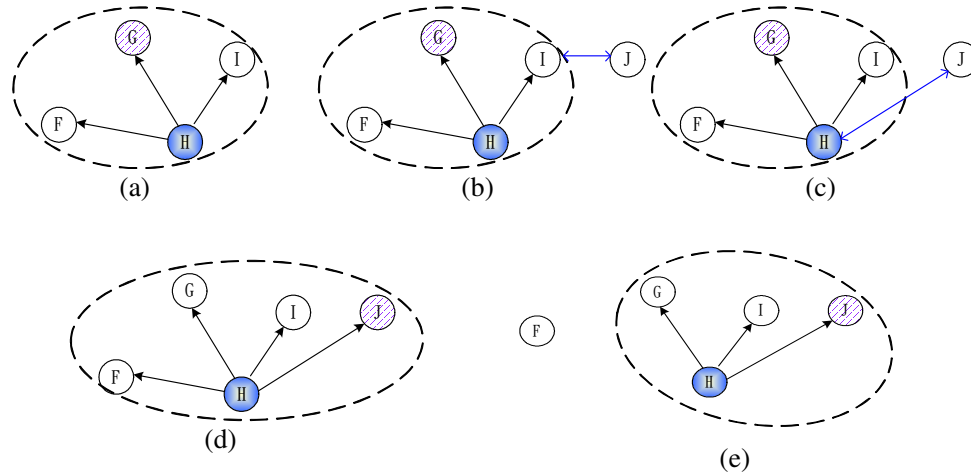


圖 4、新加入節點與節點離開的分群示意圖

3.3.3 失效階段

接著將說明在群組管理者發生失效時的分群機制。當群組管理者因為電力不足、移動出通訊範圍、損壞、錯誤失效、或是其他因素使得子節點無法與之進行溝通時，這時群組內的子節點會互相溝通訊息並聯絡上記錄為備援管理者的節點，如圖 5(b)中所示。若順利與備援管理者達成溝通，則備援管理者成為新的

群組管理者，而新的群組管理者再依原本群組管理者所傳遞的節點資訊，從中挑選能力值最佳的備援管理者。反之，若無法順利聯絡上備援管理者，則經過一定的錯誤嘗試(Try and Error)次數後，該群組即自動解構，每個節點再度回到初始階段，依初始階段的分群原則重新分群。

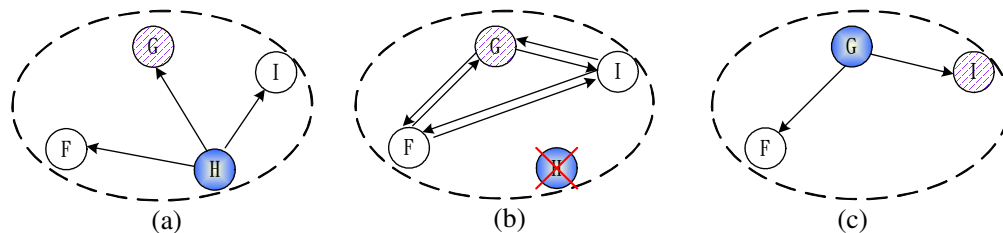


圖 5、群組管理者失效處理的示意圖

4. 結論與未來工作

在無線感測網路實際的應用中[4,5]，通常是由多種不同的感測節點之部署來建構其網路拓撲，藉此配合實際應用並延長網路的存活時間。而在過去異質性無線感測網路的相關研

究中，網路拓撲的建構大多是將異質性節點分類並進行探討[5,6,15,17]，主要著重於電力因子的考量[6,15,17]。

在本研究中，則除了以電力因子進行考量外，並根據無線感測網路中的處理器計算能力、通訊剩餘頻寬、與重心距離等參數的實際

資料來選派管理者，在實行上能更簡單、且能適用於多元化的異質性無線感測網路特性。另外，在多種參數選擇下將使群組管理者更為穩定，更能延長網路的存活時間。

本研究中亦考量無線感測網路中各個不同的網路階段的分群機制，包含了初始階段(Initial Phase)、一般運行階段(Active Phase)的節點新增、移出的動態狀態、與群組管理者無法運作時的失效階段(Inactive Phase)的因應之道。在初始階段中，排除初始狀態分群與選派時容易發生大量廣播風暴而引起網路不穩定的問題，以分散式分群的方式來快速收斂群組建構的時間與通訊成本。並且探討分群的機制來處理無線感測網路中因節點的移動性所產生節點的新加入與離開。

最後，為避免因群組管理者失效而產生網路拓撲的不穩定，須不斷重新分群而造成網路拓撲的不穩定，因此提出備援管理者選派的機制。在選派群組管理者能力的比較上，本研究選用了感測節點剩餘電力、處理器計算能力、通訊剩餘頻寬、離群組重心位置的距離等因子作為能力比較的依據。

在未來工作中，擬將本研究提出之管理者選派與分群機制以實驗模擬的方法驗證其效能。規劃以網路模擬工具 NS2 建構其無線感測網路環境。期透過實驗所得之數據與其他現有較具代表性的方法進行模擬比較以驗證本研究提出之機制可達到預期的目標。

參考文獻

- [1] 802.15.4-2006 IEEE Standard for Information Technology-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.
- [2] K. Akkaya, and M. Youngish, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Network*, Vol. 3, Issue 3, pp. 325-349, 2005.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," *Computer Networks*, Vol. 38, Issue 4, pp. 393-422, 2002.
- [4] M. Anwander, G. Wagenknecht, and T. Braun, "Energy-efficient Management of Heterogeneous Wireless Sensor Networks," <http://www.iam.unibe.ch/publikationen/techreports/2007/iam-07-00>
- [5] M. Cardei, S. Yang, and J. Wu, "Algorithms for Fault-Tolerant Topology in Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2007.
- [6] C. Duan and H. Fan, "A Distributed Energy Balance Clustering Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp. 469-2473, 2007.
- [7] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar, "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks," *the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 263-270, 1999.
- [8] X. Han, X. Cao, E. L. Lloyd, and C. Shen, "Fault-Tolerant Relay Node Placement in Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1667-1675, 2007.
- [9] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, Issue 4, pp. 660-670, 2002.
- [10] G. Indranil, D. Riordan, and S. Srinivas, "Cluster-head Election using Fuzzy Logic for Wireless Sensor Networks," *the 3rd Annual Conference on Communication Networks and Services Research*, pp. 255-260, 2005.
- [11] K. V. Laerhoven¹, et al., "Medical Healthcare Monitoring with Wearable and Implantable Sensors," *the 3rd International Workshop on Ubiquitous Computing for Pervasive Healthcare Applications*, 2004.
- [12] G. Y. Lazarou, J. Li and J. Picone, "A Cluster-Based Power-Efficient MAC Scheme for Event-Driven Sensing Applications," *Ad Hoc Networks*, Vol. 5, Issue 7, pp. 1017-1030, 2007.
- [13] Benny P.L. Lo, S. Thiemjarus, R. King, and G. Yang, "Body Sensor Network-A Wireless Sensor Platform for Pervasive Healthcare Monitoring," *the 3rd International Conference on Pervasive*

- Computing*, pp. 77-80, 2005.
- [14] S.Y. Ni, Y.C. Tseng, Y.S. Chen, J.P. Sheu, "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network," *the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, pp. 151-162, 1999.
 - [15] L. Qing, Q.X. Zhu and M. W. Wang, "Design of a Distributed Energy-Efficient Clustering Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Computer Communications*, Vol. 29, Issue 12, pp. 2230-2237, 2006.
 - [16] B. Shen, S.Y. Zhang, and Y.P. Zhong, "Cluster-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Journal of Software*, Vol.17, No.7, pp. 1588-1600, 2006.
 - [17] G. Smaragdakis, I. Matta, and A. Bestavros, "SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks," *the Int'l Workshop on SANPA*, 2004.
 - [18] K. P. Shih, H. C. Chen, and B.J. Liu, "Integrating Target Coverage and Connectivity for Wireless Heterogeneous Sensor Networks with Multiple Sensing Units," *the 15th IEEE International Conference on Networks (ICON 2007)*, 2007.
 - [19] H. Wang, B. Dong, P. Chen, Q. Chen and J. Kong, "LATEX DSL: A Coverage Control Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Second International Conference on Systems and Network Communication (ICSNC 2007)*, pp. 2, 2007.
 - [20] Yan, K. Q. Wang, S. C. and Tung, Yu-Ping, "Efficient Load-Balance Clustering Mechanism for Wireless Sensor Network," *International Journal of Advanced Information Technologies (IJAIT)*, Vol. 1, pp. 2-20, 2007.
 - [21] "Building Automation," Dust Networks, <http://www.dustnetworks.com/applications/building.shtml>.
 - [22] "The Sensor Network Museumtm - MicaZ," <http://www.btnode.ethz.ch/Projects/MicaZ>.
 - [23] "The Sensor Network Museumtm - Tmote SKY," <http://www.btnode.ethz.ch/Projects/TmoteSky>.
 - [24] "The Sensor Network Museumtm - BNode rev3," <http://www.btnode.ethz.ch/Projects/BNodeRev3>.