

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

無線感測網路之關鍵技術及在社區照護之應用--子計畫
一：高可靠度和節省能源的無線感測網路通訊基礎架構
(3/3)

研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-059-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學電機工程學系暨研究所

計畫主持人：郭斯彥

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：周宏儒、陳威良、王思齊

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96 年 11 月 09 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

高可靠度和節省能源的無線感測網路通訊基礎架構

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2213-E-002-122

NSC 94-2213-E-002-041

NSC 95-2221-E-002-059

執行期間：93 年 8 月 1 日至 96 年 7 月 31 日

計畫主持人：郭斯彥

共同主持人：

計畫參與人員：周宏儒、陳威良、王思齊

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：台灣大學電機系

中 華 民 國 96 年 10 月 21 日

中文摘要

近年來，由於無線感測網路技術的進步，各種應用也相繼於無線環境中實現；然而，對於大規模社區照護的應用，無線網路仍有許多問題需要解決。本研究計畫的重心分三階段執行。第一階段的主題是網路的拓樸控制，以節省能源為設計目標，延長感測網路的存活時間。第二階段的主題是則是研究容錯能力的自我組織機制，透過研發出的分散式隨機演算法，使無線感測網路在相當的程度上具備自我組織的能力，一方面可以簡化網路管理，提高其強固性和復原性，另一方面，這將使它能在處於動態的狀況下還能維持資源分配和網路運作的效率。第三階段則針對無線隨意網路中的同儕通訊模式，提昇資料可讀性，我們提出了資料複製演算法並透過機率分析推導其收斂時間，該演算法能適時的針對網路拓樸的改變而做出相對反應，並可以在有限的記憶體消耗下，提昇資料的可讀性。我們相信這篇報告所提出的觀念與技術，可以與其他子計畫結合，並且助於設計無線網路中同儕通訊的相關應用。

關鍵字：無線感測網路、同儕通訊、拓樸控制、系統容錯、資料複製

Abstract

A wireless sensor/ad hoc network is typically composed of nodes equipped with a transceiver used for transmitting and receiving signals. Moreover, each node has on board memory for data storage. These networks are usually deployed in inaccessible or hostile environments for specific the tasks, such as emergency scenarios and surveillance in battlefield. The unique characteristics of these networks pose various technological challenges. One of the main reasons for their popularity can be attributed to the various applications they enable. The deployed nodes not only originate data but can also act as data forwarders, storing and forwarding data originated by other nodes.

The sub-project focus on dependability issues of wireless sensor/ad hoc networks. More specifically, we first aim to enhance the data accessibility of peer-to-peer communications over an ad hoc network. To achieve this goal, we propose a randomized distributed algorithm for data replication. After that, a probabilistic approach is presented to derive the upper bound of convergence by a novel technique, called path coupling, which gives more insight into factors determining system performance. Our analysis demonstrates that data accessibility can be improved by the proposed approach, with very limited memory consumption.

Furthermore, P2P data accessibility correlates with the packet-routing protocols. Several existing schemes have been proposed to improve fault tolerance. For example, localized route repair has been discussed with regards to ad hoc on-demand distance vector (AODV) and dynamic source routing (DSR); but it has yet to be thoroughly investigated. Due to the fundamental limitations of wireless environments, providing reliable data availability for P2P applications a big challenge. To address the problem, a distributed and randomized scheme based on self-avoiding walks is presented. The scheme concatenates disparate network layers, with the goal of recovering from routing failures that disrupt P2P data accessibility. In addition, a probabilistic approach is presented that explores the tradeoffs between several system parameters. We believe that the concepts and techniques proposed in this sub-project contribute to the design of efficient P2P applications over a wireless sensor/ad hoc networks.

Keywords: Ad hoc networks, Peer-to-Peer, Data Accessibility, Rapid-mixing Markov chain

目 錄

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 錄.....	III
圖 目 錄.....	IV
表 目 錄.....	IV
1. 研究計畫之動機與目的.....	1
2. 研究方法.....	2
2.1. 節能拓樸控制演算法.....	2
2.2. 分散式隨機容錯演算法.....	4
2.3. 分散式隨機資料複製演算法.....	5
2.3.1. 系統模型.....	5
2.3.2. 隨機程序之證明技巧.....	6
3. 研究成果.....	6
3.1. 節能拓樸控制演算法.....	6
3.2. 分散式隨機容錯演算法.....	7
3.2.1. 演算法穩定性及收斂時間分析.....	9
3.2.2. 模擬結果.....	9
3.3. 分散式隨機資料複製演算法.....	11
3.3.1. 系統穩定性.....	12
3.3.2. 演算法收斂時間分析.....	13
3.3.3. 模擬結果.....	16
4. 結論.....	18
參考文獻.....	19
可供推廣之研發成果資料表 I.....	22
可供推廣之研發成果資料表 II.....	23
可供推廣之研發成果資料表 III.....	24

圖 目 錄

圖 1 RELAY REGION 示意圖	3
圖 2 ENCLOSURE 示意圖	3
圖 3 拓撲控制之無線網路示意圖	4
圖 4 拓撲控制在不同密度對傳輸半徑的影響	4
圖 5 拓撲控制減緩能源的消耗率	7
圖 6 拓撲控制延長網路的生命週期	7
圖 7 SRSO 示意圖	8
圖 8 SRSO 之虛擬程式碼	8
圖 9 節點 POPPING 示意圖	8
圖 10 在 D -CONNECTIVITY 網路上執行 SRSO 的情形 ($D=1, 2, 3$)	10
圖 11 在 2-CONNECTIVITY 網路上以三種拓撲比重機制執行 SRSO 的情形	10
圖 12 在 2-CONNECTIVITY 網路上執行以三種拓撲比重機制執行多組 SRSO 情形 ($N=$ 3000, $\kappa=2, 4, \dots, 20$)	11
圖 13 資料複製演算法之虛擬程式碼	11
圖 14 資料複製示意圖 (2-COVERABLE)	12
圖 15 管線執行示意圖	13
圖 16 收斂時間與平均記憶體消耗在不同網路規模下的情形 ($K=5, C=30$)	16
圖 17 平均無法解析比率在不同記憶體設定下的情形 ($ROUND=60, N=500, K=5$)	16
圖 18 收斂時間與平均記憶體消耗在不同 K 值下的情形 ($N=2000, C=120$)	17
圖 19 收平均無法解析比率的變化情形 ($N=100, K=3, C=10$)	17

表 目 錄

表 1 COUPLING 說明 (情形 1: $Y_T = X_T \setminus \{O_P\}$)	15
表 2 COUPLING 說明 (情形 2: $Y_T \setminus \{O_Q\} = X_T \setminus \{O_P\}$, $O_P \neq O_Q$, 省略 $C_X=0$ 及 $C_Y=0$ 的部份)	15

1. 研究計畫之動機與目的

近年來隨著感測器和無線通訊等相關技術的進步，如何將眾多配備無線通訊介面的感測器散佈在特定空間中進行特定的任務，成為相當熱門的研究主題。上述這種由感測器為節點、無線通訊為連線所組成的網路廣泛地被稱為無線感測網路。無線感測網路的相關研究相當的熱門，應用的層面也很廣泛，尤其適合於開發社區醫療照護之類的系統。目前有各式各樣的應用系統和解決方案被提出，雖然對於不同的任務有時需要設計不同的系統架構，但很多關鍵技術對於大部份的應用而言都具有通用性。

無線感測網路為一具有自我組織與自我校調能力之網路架構，感測網路通常具有一個資料中心負責資料的處理與散佈，而感測網路下之感測器則負責資料的蒐集，感測器可將蒐集之資料直接地送回資料中心，這種通訊架構亦稱單次跳躍網路(single-hop wireless network)，然而受限於無線訊號的傳輸距離，這類架構的網路已漸漸不被採用。近年來，一種稱為多重跳躍網路(multi-hop wireless network)的通訊架構被提出，在這類的通訊架構下，感測器可以藉由其它感測器做為中繼點(intermediate node)，透過協調合作的方式，間接地將資料傳遞至資料中心，如此不但可以擴大無線網路的涵蓋範圍，亦可以增加無線網路之傳輸能力。

有研究指出無線節點之點的干擾為限制網路產能與消耗能源的重要因素[1][2]，藉由適當傳輸距離調整，減少鄰近節點數量，可以有效的降低節點之間的干擾問題，這種技術又稱為無線網路拓撲控制(topology control)，因此在第一期的研究中，為了解決無線環境中通訊的干擾問題，我們著重於研究一套無線網路拓撲控制方法，在維持網路連通性(connectivity)的狀況下，儘可能的降低節點之傳輸功率以達到節省能源的目的。

針對應用層面，由於無線感測網路不需要任何預先建立的基礎設施(infrastructure)，網路佈建具有良好的適應性，可以配合各種特殊環境的需求，例如戰場監視(battlefield surveillance)、災難復原(disaster recovery)以及緊急救護(emergency rescue)等應用([3][4][5])。近年來，在無線網路的環境中，基於同儕通訊(peer-to-peer communication)基礎所建立的應用逐漸受到重視；在傳統的有線網路中，同儕應用程式(peer-to-peer application)採用覆蓋(overlay)的架構，但由於無線感測網路環境具高變動性以及節點電力限制的特性，上層的覆蓋並無法即時反應下層無線網路變化，如此除了造成增加拓撲控制的困難度外，系統的可靠度(dependability)¹也會受到影響[6]。原則上，在同儕應用程式上加上容錯的能力可以有效改善資料的可用性(availability)，雖然目前有多針對系統可用性的研究，但大多沒有討論到關於AODV及DSR等區域性修復方法[3]。在第二期的研究中，本計畫著重於設計一個應用層的容錯機制，修復同儕資料傳輸過程中的路徑錯誤問題，以提昇資料的可用性。

考慮社區照護系統中，經常使用同儕通訊作為資料分享的通訊模型，在這種通訊模型中，應用程式的可用性往往因為網路拓撲的切割而造成資料無法存取，降低資料的可

¹ 可靠度(dependability)包含可用性(availability)、可讀性(accessibility)、可靠性(reliability)等。

讀性(accessibility)，因此在第三期的研究中，我們主要的目的研發一個的資料複製演算法，提昇無線環境中資料的可讀性，藉此增強系統的運作效能。

在本計畫中，為了建立高品質的社區救護系統，我們以理論和實作並行方式，發展了低耗電、高效能、高擴充性以及高可靠度的無線感測網路技術，研究成果除有助於提昇高需求照護群體的醫護品質外，更期望藉由無線感測網路關鍵技術上的突破，在無線科技產業研究及應用領域中佔有一席之地，我們相信這份報告中所提出的概念及技術應該可以對於實際的應用有所助益。

2. 研究方法

2.1. 節能拓撲控制演算法

在探討無線網路節省能源之拓撲控制方法之前，必需先了解無線環境下傳輸功率與傳輸距離之關係，相關文獻指出傳輸功率與傳輸距離為多次方的指數關係[7]，一般訊號在無線環境下有幾種衰減模式：

- Free space model：若訊號在傳送器與接收器之間以直線光進行並且無任何障礙，則可以用這一個模型來估計訊號的衰減如下：

$$\text{Pr}(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

其中 P_t 與 P_r 分別代表發送器之功率與訊號至接收器的功率， G_t 與 G_r 則代發送器與接收器之天線增益， λ 代表波長， L 代表系統之衰減係數，這類模型亦表示傳輸區域為以發送器為中心的圓圈範圍，只要接收器落在發送器的圓圈範圍內即可接收到資料。

- Two-Ray ground reflection model：這一種的模型不但考量了訊號直接在媒介的衰減，亦考量訊號在地面上產生反射而造成影響，相較於 free space 模型，此模型更適合用於描述長距離傳輸之訊號衰減。

$$\text{Pr}(d) = \frac{P_t G_t G_r h^2}{d^4 L} \quad (2)$$

在此模型下，當傳輸距離在一個值 $d_c = (4\pi h \sqrt{f})$ 以內，訊號衰減仍遵循著等式(1)所提的 free space 模型，當傳輸距離大於 d_c 值，訊號則遵循等式(2)之衰減模式，Two-Ray ground reflection model 已經廣泛地被接受與使用於無線網路研究，在第一期研究計劃中亦使用此模型為我們的訊號衰減模型。

- Shadowing model：通常無線環境會存在一些障礙或多路徑干擾效應使得傳輸距離為不規則的分佈，亦使得傳輸範圍成為不規則的傘型，此模型加入隨機變數的方法

動態預測傳輸功率的衰減，它也是較接近實際環境的訊號衰減模型，但為了簡化我們的研究方法，我們並不考慮這類的模型於先期的研究計劃當中。

藉由對無線訊號衰減的觀察，Rodoplu等人在文獻[1]提出一套中繼轉播區域(relay region)的概念，這份研究指出間接的使用中繼節點傳輸比直接傳輸有更低的能源消耗，而中繼轉播區域則代表若是傳送節點欲與此區域中的節點進行通訊，則可透過中繼節點，其中繼轉播區域的示意圖如圖 1。

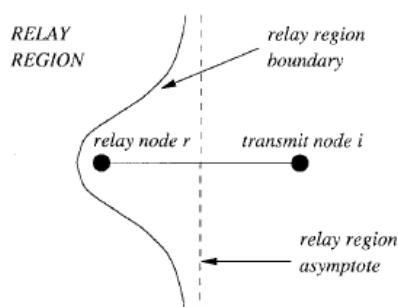


圖 1 Relay Region 示意圖

中繼轉播區域會有一個邊界，若是在一個節點旁邊存在許多中繼節點，則會產生多個中繼轉播區域，則這些區域的邊界則會形成一塊封閉區間如圖 2。這也表示若傳送節點欲與區間外的節點通訊，皆可間接透過中繼節點，於是傳送節點之涵蓋範圍只需要覆蓋中繼轉播區域所形成的封閉區間即可。

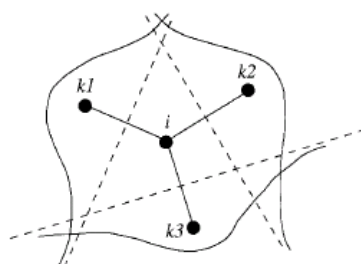


圖 2 Enclosure 示意圖

基於上述的概念，Li Li等人在文獻[2]提出一套網路拓撲控制演算法，稱為 small minimum-energy communication network (SECN)。此演算法目的在於消除一些沒有必要的鄰近節點並嘗試把無線節點之傳輸半徑降到最低而不失網路之連通性，使用其拓撲控制方法之例子展示於下列圖 3，其分別表示尚未做網路拓撲控制與使用SECN拓撲控制演算法之網路，而圖 4則指出當網路的密度增加時，使用拓撲控制方法可以有效的降低整體網路節點的平均傳輸半徑。

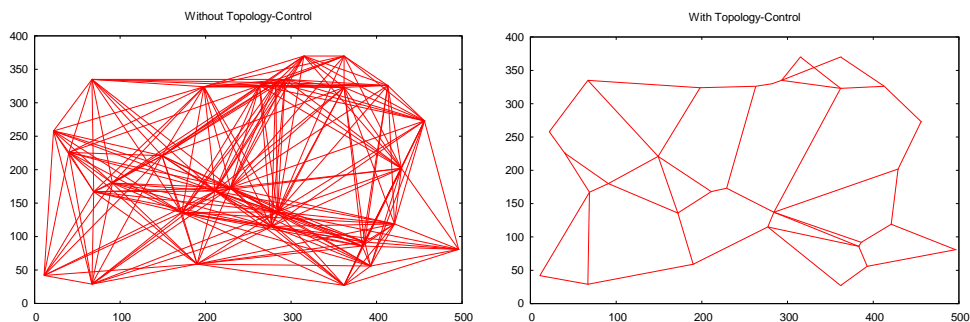


圖 3 拓撲控制之無線網路示意圖

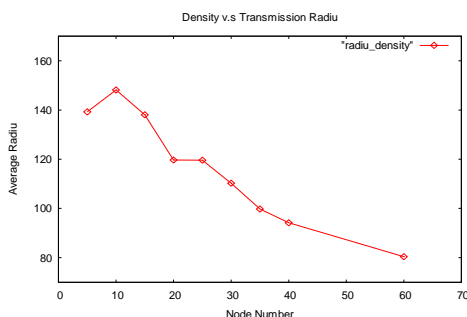


圖 4 拓撲控制在不同密度對傳輸半徑的影響

2.2. 分散式隨機容錯演算法²

考慮大規模且不穩定的無線感測網路，能源消耗會影響整個系統的存活時間及執行效率[8]。為了顧及系統效率及穩定性，我們必須把握住local-control的原則，同時因為身處於無線網路的環境中，系統中的節點只能依靠周圍所蒐集的資料來進行處理，所以分散式演算法也是達成目標的重要條件。在本研究中，我們主要目的在於修復P2P無線網路中，繞送路徑錯誤的情形，由於在無線網路中，隨機行走(random walk)可以有效適應網路的變動性，同時還可以避免不必要的資料流量，增加網路的擴充性[9]。因此我們採用了隨機行走的機制；利用各節點所蒐集到的區域性資訊來實現容錯的能力。

目前關於隨機行走在同儕網路上的研究相當多，不過大多數研究都是針對於傳統的有線網路架構，無法應用於無線環境。在文獻[10][11]中所提出的問題及概念與我們相當類似，其中[10]利用隨意行走來解決同儕應用在無線網路下的資料搜尋及傳輸問題，而[11]則是將該問題進一步的利用布朗運動(Brownian motion)模型來分析；由於單純的隨機行走容易受限於某一個特定區域，造成過多記憶體及能源消耗，為了避免這個問題，在本研究中，使用「不重複行走」(self-avoiding walk)的方式。不重複行走主要的概念在於執行過程中，會自動避免去行走重複的路徑，可以減少不必要的記憶體及能源消耗，使得容錯系統具有更好的執行效能。

²由於二期計畫與三期計畫用到類似的系統模型(單物件繞送路徑修復與多物件複製不同)與隨機證明技巧，為了使報告更為清楚，我們把這兩個部份併入三期計畫中說明。

2.3. 分散式隨機資料複製演算法

我們提出了一個分散式隨機資料複製演算法。演算法的設計概念是希望每一個節點都能根據現有狀態，各自做出複製的決定，藉以達成整體系統的穩定性；另一方面，因為演算法具有隨機的特性，本篇報告中使用了 Path Coupling 來推導系統進入穩定狀態所需的時間，就我們所知，目前還沒有相關研究使用這項證明技巧來推導同儕資料複製系統的收斂特性，因此我們相信這份報告中所提出的概念及技術應該可以對於實際的應用有所助益。

近年來，針對無線隨意網路中同儕應用，已經有許多資料搜尋與複製的研究被提出；文獻[12]的作者提出降低整體通訊成本的演算法；在文獻[13]中，Nuggehalli等人針對資料複製的能源消耗問題，提出了POACH演算法；在文獻[14]中，作者則針對無線節點的移動來分析資料複製對於系統效能的影響；對於網頁快取(web caching)的問題，文獻[15]提出由同儕節點存取資料的概念；在文獻[16]中，Yin以及Gao分析了訊問延遲(query delay)以及資料可讀性平衡的議題，他們也在文獻[17]中提出了一個混合式資料複製演算法，藉由同時儲存資料路徑與資料內容來提昇資料可讀性；文獻[18][19]中，作者除了提出網路環境切割下的資料配置技術，還特別針對資料更新的問題研發相對應的方法；Friedman等人在文獻[20]中提出資料快取的技術，改善資料存取的服務品質以及降低網路通訊成本。

2.3.1. 系統模型

無線網路的傳輸模型本身就具有廣播的特性，也就是說，當節點傳出一個訊息，在其傳輸半徑內的所有節點皆可收到該訊息。假設系統遵循relaxed asynchronous model [21]，意即程序處理速度、訊息傳遞時間延遲以及同步時間的差異上限都可以估算，因此我們可以假設一次成功的訊息廣播可以在常數時間 t_b 內完成。另外，雖然完全同步無法達成，但是相對同步可以藉由其他的措施來達成，例如GPS信號；因此我們做出與文獻[22]類似的假設：所有的節點都能達成回合同步(round synchronization)，一個回合代表可讓節點執行數個傳送或判斷動作的時間長度。

考慮無線隨意網路中有 n 個節點以及 m 個資料物件，這裡假設所有物件(object)的大小皆相同且 $m = O(n)$ ；每個節點 u 有 $\Phi(u)$ 的記憶體空間來儲存這些物件，因此可以當作一個整數值 $\Phi(u)$ 。資料模型中，每個節點 u 儲存兩種資料—原生物件 $INNATE(u)$ 以及複製物件 $REP(u)$ 。當節點 u 需要於物件 o 時，則發出詢問 $q(u, o) \in Q$ 來搜尋該物件，若節點 v 回應其具有物件 o ，則 $q(u, o)$ 稱為一個可解析(resolved)的詢問。假設存在一個解析集合 R ，使得所有 $q(u, o) \in Q$ 都可解析且節點 u 與節點 v 的距離(hop distance) $d(u, v) \leq k$ ，則稱詢問集合 Q 為 k -coverable， R 為 k -covering 解析集合。

在真實的環境中，物件的內容可能隨時間改變而有所不同，因此如何維持原生物件與複製物件的一致性便相當重要，然而為了將問題簡化，我們並不考慮物件更新的問題(相關研究主題可參見文獻[23])，有救是說所有物件在演算法的執行過程中都不會有內

容改變的狀況發生。另一方面，物件搜尋有時並不只會回傳一筆結果，我們假設上層的同儕應用程式會根據目前的狀況(通訊成本、傳輸時間、記憶體消耗等)，自動判斷要取回哪一個物件。

EMC(Efficient Memory Conservation)問題在文獻[24]中提出，其中作者已經證明在上述的模型下，若想以最少的記憶體消耗量，來達成 k -coverable的目標，EMC會成為一個NP-Complete的問題，因此我們並不著重於找出最少記憶體消耗的解，而是利用隨機演算法，使系統儘快進入穩定狀態，表示所有的詢問集合皆為 k -coverable。

2.3.2. 隨機程序之證明技巧

由於我們提出的演算法式隨機式演算法，因此我在這個章節先對隨機證明的概念作個介紹。馬可夫鏈是一個具有無記憶(memoryless)特性的隨機程序，收斂時間(mixing time)代表馬可夫鏈進入到穩定分佈(stationary distribution)所需要的時間，以隨機演算法的觀點，mixing time代表演算法使系統進入穩定狀態(legitimate configuration set L)的時間(請參見文獻[25]， ϵ -absorption time)。傳統上，coupling這個證明技巧經常拿來推導馬可夫鏈在有限狀態空間(以 Ω 表示)中的收斂時間；概念上coupling是在 $\Omega \times \Omega$ 中一組聯合程序 $(X_t, Y_t)_{t=0-\infty}$ ，透過一組預先定義的整數函式 $\varphi(X_t, Y_t)$ 來表示 X_t 與 Y_t 間的分佈差異，並給定 Y_0 適當的初始值(穩定分佈)，若是可讓差異值 $\varphi(X_t, Y_t)$ 降為0， $t < t'$ ，則表示 $X_{t'} = Y_{t'}$ ，意即 $X_{t'}$ 也具有穩定分佈的特性。雖然coupling能夠推導出mixing time，但其證明經常牽涉到組合學問題中的一些過於複雜手法，並不方便使用。Bubley以及Dyer [26]則提出了另一種改良的證明方式，稱為path coupling；path coupling基本概念與coupling相同，但其使用的整數函式 $\delta(X_t, Y_t)$ 可限制在某一個特定子集內，利用該子集特性以及coupling rules證明 $\delta(X_t, Y_t)$ 會逐步降低，系統進入穩定狀態。在下一個章節的演算法收斂證明中，對於coupling的使用，會有更進一步的範例及說明。

3. 研究成果

3.1. 節能拓撲控制演算法

為了證明拓撲控制可有效的節省能源，我們將拓撲控制演算法實驗於柏克萊分校所開發的網路模擬器NS2[27]以及卡內基美隆大學所發展之無線模組[28]，我們利用拓撲控制演算法調整無線網路路由協定AODV[29]之鄰近節點，並利用拓撲控制演算法所計算出之最小傳輸半徑，根據無線訊號衰減模型反推出適當所需的傳輸功率，將之套用於無線網路中的各個節點。再來，我們根據 [30] 所提出的能量消耗模型，將此模型應用對我們的實驗當中，然後進行模擬，我們分別測量拓撲控制對能量消耗率與網路生命週期的影響，如下圖 5及圖 6。

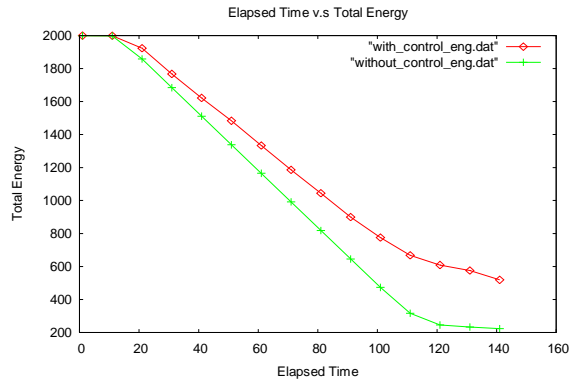


圖 5 拓撲控制減緩能源的消耗率

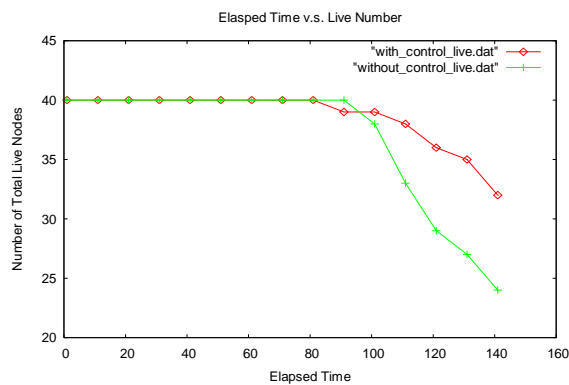


圖 6 拓撲控制延長網路的生命週期

由實驗結果可以觀察到，做網路拓撲控制可以有效的節省能量與提升生命週期，而有相關文獻指出[30][31]，能量消耗並非只是傳送與接收端會耗損能量，在干擾區域之內的節點接受到不必要的封包而丟棄之，亦會產生能量的消耗，於是利用拓撲控制減少傳輸半徑，相對的也減少因受干擾而丟棄封包而產生的不必要能量消耗，達到較佳的能源使用效率。

3.2. 分散式隨機容錯演算法

本研究所提出的修復方法稱為Single-Repair Single-Object (SRSO)，如圖 7所示，在同儕環境中，當節點 u 向節點 v 要求所需物件時，回傳過程中可能會發生錯誤，導致物件無法回傳給 u ，此時我們就必須啟動修復機制；錯誤偵測主要依賴倒數計時的機制，雖然網路環境中無法實現完全同步，但我們仍然可以合理的假設系統中存在某種的同步機制(如同文獻[22]的假設)。當回傳時間超過某一個預設值時(通常與 u, v 的距離成比)，初始節點 u 與發現錯誤節點 r 會同時啟動修復機制，個別執行不重複行走的程序，並且紀錄走過的路徑，當兩個程序交叉或碰撞時，新的繞送路徑就建立完成，此時物件可以從經由節點 r 與節點 u 之間所建立的新路徑傳送。

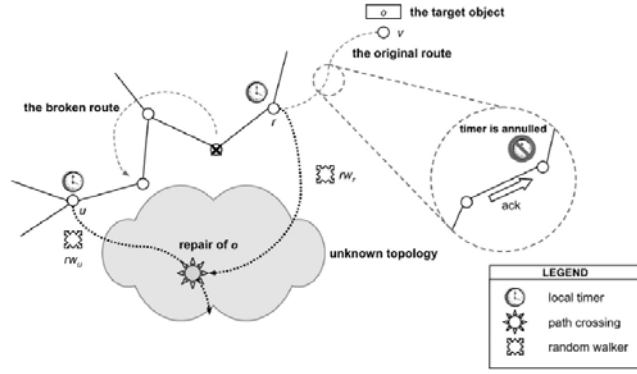


圖 7 SRSO 示意圖

```

Local-Repair Scheme for Random Walker  $rw_i$ 
01. on alarm of  $t_{oi}$  do {
02.   repeat {
03.     for the node on behalf of  $cp(rw_i)$  do {
04.       pick  $c_i \in \{0, 1\}$  and  $r_i \in N^l(cp(rw_i))$  according to  $f_{tw}(cp(rw_i))$ ;
05.       if ( $c_i = 0$ ) then  $rw_i \leftarrow rw_i$ ;
06.       else {
07.         if ( $|r_i \in rw_i|$ ) then  $rw_i \leftarrow \text{pop}(cp(rw_i))$ ;
08.         else {
09.           if ( $|rw_i| < L$ ) then  $rw_i \leftarrow rw_i \cup \{r_i\}$ ;
10.         }
11.         update  $rpc$  if necessary;
12.       }
13.     }
14.   } until (a crossing occurs in  $rpc$ ) /*local-repair successes*/
15. }
16. re-start the local-repair procedure if necessary; /*a failure is detected*/

```

圖 8 SRSO 之虛擬程式碼

圖 8 為 SRSO 修復機制的虛擬程式碼， t_{oi} 表示偵測時間的設定值， $cp(rw_i)$ 表示目前隨機行走的偵測節點， $f_{tw}(cp(rw_i))$ 則代表拓撲比重，用來決定鄰居節點選擇的方式。基本上，每次行走有的 c_i 機率停留在原地不動，而有 $(1 - c_i)$ 的機率會依照 f_{tw} 選定一個鄰節點來行走；為了保持不重複行走的特性，在這裡我們使用了 popping 的動作(如圖 9 所示)，當選擇 $cp(rw_i)$ 到一個已經走過的節點，會將自己彈出，退回到上一個節點重新行走。此外，為了避免過多的能量消耗，隨機行走的最大上限步數設定為 L 。

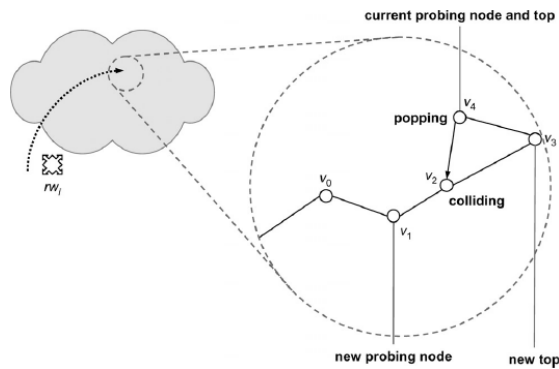


圖 9 節點 popping 示意圖

系統的執行效能可藉由一些虛擬架構(例如 dominating set)或是最佳化(例如重複物件搜尋等)來獲得提昇,然而,為了配合各種不同的應用,在這裡我們並不假設系統有使用任何最佳化的機制。在下一個章節中,將會討論系統參數間的關係以及實驗結果,驗證 SRSO 的可用性。

3.2.1. 演算法穩定性及收斂時間分析

為了簡化分析,我們首先考慮SRSO不使用popping的情形,如此便可以利用傳統的隨機行走來分析SRSO記憶體消耗的情形。假設系統中有 n 個節點,在文獻[32]中分析出 k 個布朗運動間不交叉的機率會隨著時間函數 $(t^{-5/8})^{k/2}$ 降低。另外,由於記憶體消耗只會跟走過的相異節點數有關,假設走過的步數為 n ,可以推得記憶體消耗規模為 $\Theta(n / \log n)$ 。考慮SRSO的情形, L 的設定只需要能夠紀錄走過的相異的節點數即可,當相異節點數為 $O(n / \log n)$ 時,兩條不重複行走的路徑不交叉的機率為 $1/O(n^{5/8})$,當 n 足夠大時,機率則降到0,換句話說,發生錯誤的路徑一定可以藉由SRSO方式修復。

當 $L = O(n / \log n)$ 時,不重複行走的記憶體消耗規模為 $O(n / \log n)$,由於網路訊息傳送是能量消耗的主因,我們必須考慮到通訊的成本。令 E_{lb} 表示成功傳送一個封包所需要傳送次數,而 P_{lb} 則表示傳送單一封包成功的機率(P_{lb} 的相關討論可參見文獻[33]),由於 $E[E_{lb}] \leq \sum_{i=1}^{\infty} i P_{lb} (1 - P_{lb})^{i-1} = P_{lb}^{-1}$,我們可以推得在不重複行走機制中,維持通訊所需要的資訊量為 $O(L / P_{lb})$ 。

除了記憶體消耗以及通訊成本的考量,還需要考慮演算法收斂時間,我們利用path-coupling的方法,來求得演算法收斂時間的上限值。因為與三期研究的演算法類似,在這裡只列出推導後的結論³: SRSO演算法的收斂時間小於 $\ln(2n\varepsilon^{-1}) / (1 - \beta)$,其中 ε 為常數,且 $0 < \beta < 1$ 。

3.2.2. 模擬結果

為了確實瞭解系統參數 L' (平均路徑長度)、平均收斂時間 t' 與系統規模 n 的關係,我們模擬 n 個節點在 1×1 單位大小的方形區域中,執行不重複行走的情形,依照文獻[35]的證明,若要維持 d -connectivity的圖形的,節點的傳輸半徑必須符合以下不等式 $r_n \geq \sqrt{((\log n + (2d - 1)\log \log n + \zeta) / \pi)}$,為了避免關節點的存在,不失一般性,我們設定 $d = 2, \zeta = 0$ 。另外,圖中的實驗結果為1,000,000次不重複行走的平均值。事實上,任何一種隨意行走都會收到網路拓樸的影響,首先我們比較不同拓樸下對系統的參數的影響,如圖10所示,當 d 值越大時,系統參數 L' 可以設定的越低,收斂時間也越短,然而,當 $d = 1$ 時,調和時間卻出現波動情形,這是由於連結度(degree)過低時,隨意行走會被限制在某一個範圍內,造成調和時間的不穩定。為了避免這個問題,我們實驗了三種拓樸比重的機制:隨機制(random)、加權制(weighted)以及平衡制(balanced)。選擇鄰節點時,隨機制

³ 若想瞭解完整的分析過程及 coupling rule,可參見文獻[34]。

任意選擇，每個節點被選到的機率都相等；加權制則是依照鄰居被選過次數的不同，而有比重關係，基本上，被選過越多次的鄰居節點再次被選到的機率越低；而平衡制則與加權制類似，但次數最少的鄰居一定會被選到，這麼作可以盡量使得隨意行走的區域擴大，減少重複選擇的節點。如圖 11 所示，加權制跟平衡制的情形下，收斂時間都比隨機機制要短上許多，不過由於加權制目的在於擴大搜尋範圍，所以會有較大的 L' 值。我們最後做的模擬是關於同時發出 κ 個不重複行走時， L' 及收斂時間的改變情形。如圖 12 所示， L' 的大小以及收斂時間會隨著發出不重複行走的個數增加而呈現指數降低的趨勢，也就是說 $L' \propto e^{d'/\kappa}$ 、 $t' \propto e^{d''/\kappa}$ ，其中 d' 及 d'' 為常數；結合之前的討論，可推得當 κ 個行走同時執行時，維持通訊所需資訊量與 $\kappa e^{d'/\kappa}$ 成正比。

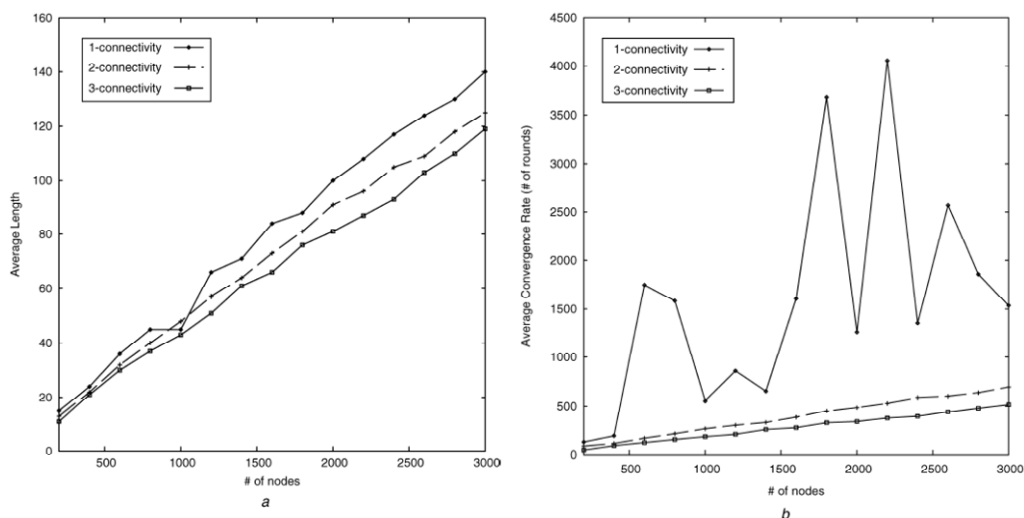


圖 10 在 d -connectivity 網路上執行 SRSO 的情形 ($d=1, 2, 3$)

(a) 平均路徑長度 (b) 平均收斂時間

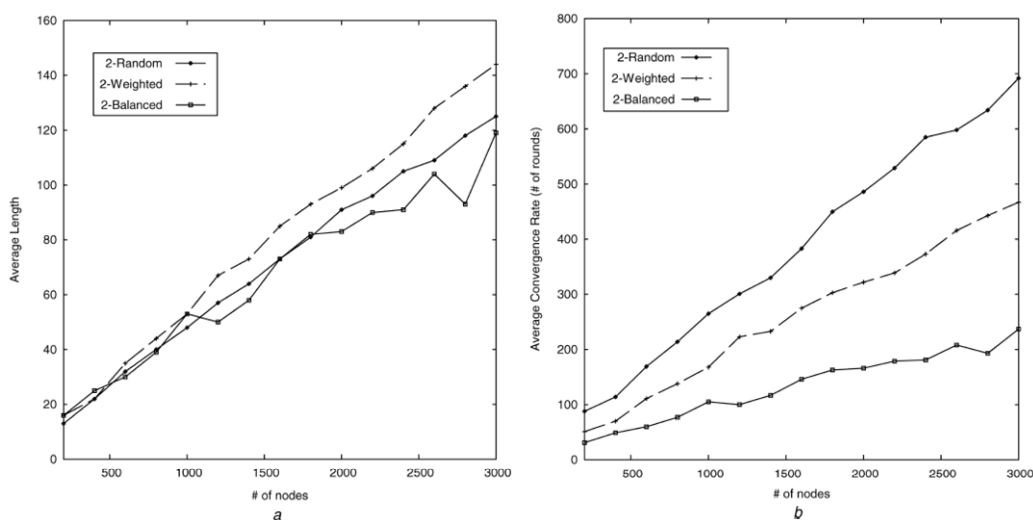


圖 11 在 2-connectivity 網路上以三種拓撲比重機制執行 SRSO 的情形

(a) 平均路徑長度 (b) 平均收斂時間

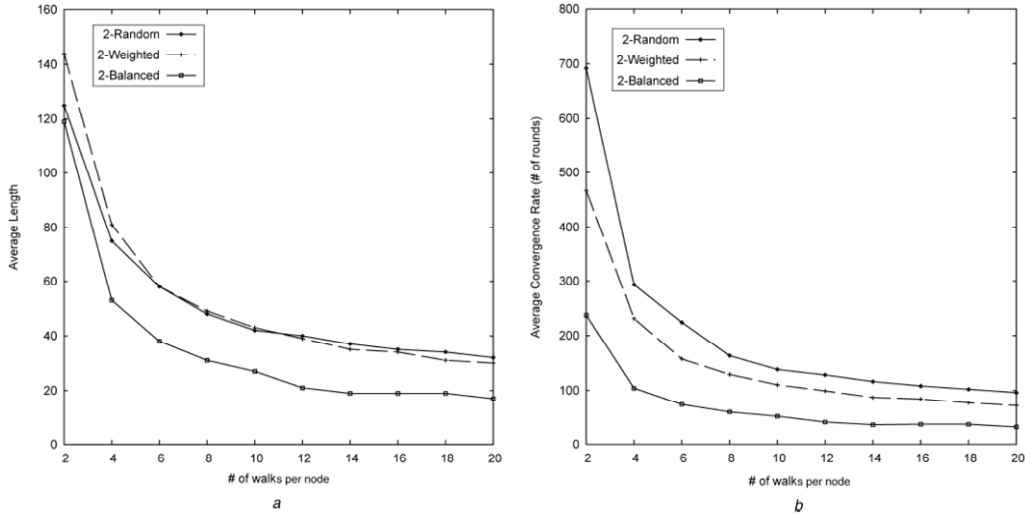


圖 12 在 2-connectivity 網路上執行以三種拓樸比重機制執行多組 SRSO 情形 ($n = 3000, \kappa = 2, 4, \dots, 20$)
(a) 平均路徑長度 (b) 平均收斂時間

3.3. 分散式隨機資料複製演算法

演算法設計的主要目的是確保所有的詢問都能達成 k -coverable 的目標，也就是說對於 m 種物件物件，節點 u 都能從節點集合 $N^k(u) = \{v \in V: d(u, v) \leq k\}$ 中取得。由於集中式或是階層式的資料複製演算法並無法處理大規模的應用，另一方面，同一區域的節點可能欠缺類似的資料物件，若是採用決定型(deterministic)演算法讓節點複製其最需要的物件，可能會造成同一區域存在過多的複本，降低記憶體空間的使用效率。為了克服這些問題，使系統具有擴充性與增強記憶體空間的使用效率，我們使用隨機且分散式的演算法來判斷資料複製的動作，演算法的虛擬程式碼(pseudo-code)如下圖 13 所示，各節點在每回合開始時循序執行，判斷是否需要複製物件到自己的記憶體中。

Randomized Algorithm for Data Replication in node u

```

01. information_exchange( $k$ );
02. if( $\forall i, cost_u(o_i) \leq k$ ) /*  $k$ -coverable */
03.   do nothing;
04. else {
05.   choose object  $o_a$  from the set  $R_l, R_l = \{o_l : cost_u(o_a) > k\}$  u.a.r;
06.   flood the index of object  $o_a$  to  $N^k(u)$ ;
07. }
08. information_receive( $k$ );
09. create the sets  $R_n = \{o_b : o_b \text{ is flooded from } N^k(u)\}$ ;
10. if( $R_l \cup R_n = \{\emptyset\}$ ) /*  $k$ -coverable and no neighbor needs help */
11.   do nothing;
12. else {
13.   with probability  $\alpha$ , do nothing;
14.   with probability  $(1 - \alpha)$  {
15.     choose object  $o_r$  from the set  $R, R = R_l \cup R_n$  u.a.r;
16.     choose object  $o_d$  from the set  $D, D = \{o_j : cost_u(o_j) = 0\}$  u.a.r;
17.     if( $m_u < c$ )
18.       replicate  $o_r$  into local memory;
19.     else
20.       drop  $o_d$  from local memory;
21.   }
22. }

```

圖 13 資料複製演算法之虛擬程式碼

每個節點 u 都有一個大小為 m 距離向量 $cost_u(o_i)$ ，用來紀錄該節點要取得物件 i 所需的距離，開始時若物件 i 屬於 u 的原生物件，則 $cost_u(o_i) = 0$ ，否則 $cost_u(o_i) = \infty$ 。虛擬程式碼第 1 行為週期性的訊息交換程序，在 t_b 的時間內，節點 u 與相鄰節點透過廣播的方式交換距離向量，並執行更新動作 $cost_u(o_i) = \min_{v \in NI(u)} [cost_u(o_i), cost_v(o_i) + 1]$ ，重複此交換更新的動作 k 次，若對於每個物件 i ， $cost_u(o_i) \leq k$ ，則表示節點 u 的詢問集合為 k -coverable，反之則存在某些詢問無法被 $N^k(u)$ 解析。圖(二)為演算法執行的簡單範例，其中 $n = m = 5$ ， $k = 2$ ，原生物件以黑色表示，複製物件則是以白色表示，節點 v_i 開始只有原生物件 o_i ， $\Phi(v_i) = 2$ 。如圖 14(a)所示， $q(v_1, o_4)$ 以及 $q(v_1, o_5)$ 在兩次訊息交換後，仍然無法被解析。

若是節點只根據自己交換後得到的距離向量判斷是否需要複製物件，而不考慮鄰近節點的記憶體狀態，有可能會造成某些詢問永遠無法被解析，如圖 14(b)所示，節點 v_2 及 v_3 因為本身的詢問集合已經 k -coverable，即使仍有空間，也不會複製任何物件，造成 $q(v_1, o_5)$ 永遠不能被解析。為了提昇系統記憶體使用率，鄰近節點必須分擔部份複製物件的工作，因此我們設計讓節點 u 從集合 $R_l = \{o_i: cost_u(o_i) > k\}$ 隨機選定一個物件 o_d ，將其索引以氾濫(flooding)的方式傳送給 $N^k(u)$ ，由於每個節點都執行類似的動作，因此最後可以將收集到的資料建立集合 R_n 。當集合 R_n 建立後，節點 u 可以知道鄰近節點需要哪些物件，若 $R_l \cup R_n = \emptyset$ ，則表示節點 u 暫時進入穩定狀態，這個回合中不需要執行複製動作，否則節點 u 會根據其記憶體狀態 m_u 決定執行複製或丟棄物件。在文獻[16][19]中有提出同一區域的節點應避免複製相同的節點，因此我們讓節點 u 有一定的機率 α 不執行任何動作， $(1-\alpha)$ 的機率執行複製或丟棄物件的動作。在 14-20 行的程式中，從集合 $R = R_l \cup R_n$ 與 $D = \{o_j: cost_u(o_j) = 0\}$ 中隨機(uniformly at random)選定物件 o_r 及 o_d 作為複製及丟棄的預定物件，若 u 的記憶體已滿，則丟棄物件 o_d ，不然就將物件 o_r 複製到本身的記憶體中，圖 14(c)是一個簡單的複製範例，其中所有的詢問集合皆為 2-coverable。

由於訊息交換、索引氾濫及物件複製丟棄等決定都是分散式的執行，各節點判斷丟棄物件並不考慮其他節點的狀態，因此節點即使進入穩定狀態，還是有可能會因為所需物件被丟棄而重新執行演算法。在下一個章節中，將會說明當系統有足夠的記憶體空間時，整個系統一定會進入穩定狀態。

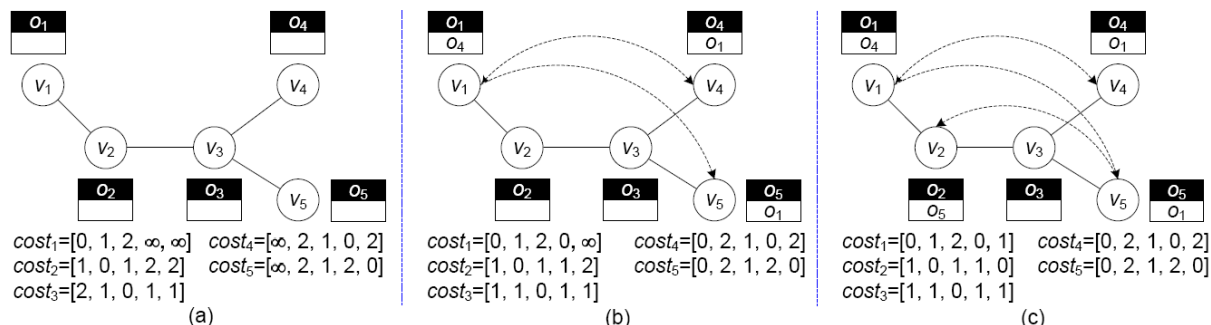


圖 14 資料複製示意圖(2-coverable)

3.3.1. 系統穩定性

要建立一個有效率的資料複製演算法，除了需要兼顧擴充性與記憶體使用效率外，系統進入穩定狀態所需的時間也是重要的考量。為了增加演算法的收斂速度，可以在加入兩種輔助的技巧：(i)浮動參數 α ，(ii)管線執行(pipelined execution)。因為參數 α 代表自我循環(self-loop)的機率，以浮動的方式調整參數 α 可以平衡記憶體使用效率與收斂時間，舉例來說，開始時由於有充足的記憶體空間，而將 α 設定為 1，隨著剩餘記憶體空間的降低而逐漸縮小 α 的值可以加速收斂時間，卻不會造成過多的記憶體消耗。另一方面，本質上鄰近的節點的記憶體具有共用的特性，也就是說，對於任何節點 u ，其記憶體空間 c 所需大小取決物件數與鄰近節點數， $c = \lceil m / \min_{u \in V} |N^k(u)| \rceil$ ，考慮極端範例，網路拓樸為 n 個節點排成一直線，此時 $|N^k(u)| \geq k+1$ ，我們可以推得 $c \leq \lceil m / k+1 \rceil$ 時，系統有很大的機率可進入穩定狀態。因為 $|N^k(u)|$ 與網路拓樸有關且不易推導，真實的環境中， $|N^k(u)|$ 更是遠大於 $k+1$ ，我們將在下面的章節中，以模擬驗證 n 、 c 、 k 的關係，模擬結果證明實際所需要的記憶體空間大小，遠小於 $\lceil m / k+1 \rceil$ 。

我們使用回合數來作為執行時間的判斷單位，所以若能有效的縮短單一回合的時間，對縮短系統的收斂時間也有幫助。考慮一個簡單的環境，物件傳送皆透過最短路徑且不需要重傳，令 T_R 表示一個回合的時間， T_{IE} 與 T_F 分別表示訊息傳送與索引氾濫所需時間， T_{RD} 則表示物件複製或丟棄所需最大時間，觀察 $T_{RD} \geq T_{IE} + T_F$ 的情形，可以發現訊息交換與索引氾濫可以不用在前一回合的物件複製完成前開始執行，如圖 15 所示，由於 t_3 時所要複製的物件一定會傳回來，在 t_1 時即可預先更新距離向量的狀態，這樣節點 u 可以在 t_2 就開始執行下一回合的訊息交換動作，這種狀況中， T_R 與 T_{RD} 的長度相同。

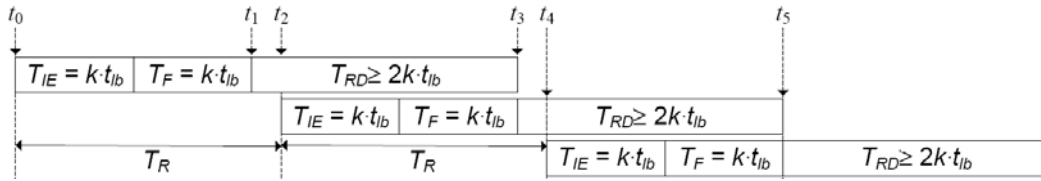


圖 15 管線執行示意圖

3.3.2. 演算法收斂時間分析

考慮上述資料複製演算法，系統狀態的變化只跟目前的狀態有關，因此演算法滿足無記憶(memoryless)特性，可以將整個系統看成一個馬可夫鏈的運作，狀態集合為 Ω 。接下來我們利用 path coupling 推導演算法的收斂時間，或是說系統何時會進入穩定狀態集合(legitimate configuration set \mathcal{L})中；根據演算法的定義， \mathcal{L} 包含了所有可以使得詢問集合變成 k -coverable 的設定， \mathcal{L} 同時也代表馬可夫鏈進入穩定分佈的機率。在下面的分析中，我們假設記憶體空間足夠讓系統進入穩定狀態，另外，為了維持馬可夫鏈的非週期性(aperiodicity)， α 設定為 $1/2$ 。

每個節點 i 的狀態可以表示為集合 $s_i = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ ，其中 $o_j \in \{0, 1\}$ ， $1 \leq i \leq n$ ， $1 \leq j \leq m$ ， $o_j = 1$ 代表物件 j 被存在 i 的記憶體中， $o_j = 0$ 則代表節點 i 沒有物件 j 的複本。我們可以發現，集合 s_i 中出現1的次數絕對不會超過記憶體大小 c ，所以每個節點的可能狀態有 C 種， $C < 2^m$ 。若是將 s_i 編碼為整數，則整體系統狀態空間 Ω 可以用 s_i 的組合表示，在 Ω 中的每一個狀態為 (s_1, s_2, \dots, s_n) ，其中 $s_i \in \{0, 1, \dots, C\}$ 。若收斂時間

(ε -approximate mixing time)能與 $\ln(\varepsilon^{-1})$ 與狀態大小呈現多項式關係，則的馬可夫鏈被稱為快速收斂(rapid-mixing)，接下來我們會證明演算法具有快速收斂的特性，為了維持 path coupling 的某些特性，有些部份我們仍以英文呈現。

定理 1 For the proposed algorithm, there exist a subset S of $\Omega \times \Omega$, an integer-valued metric δ on $\Omega \times \Omega$ that takes the value in $\{0, 2, 4, \dots, 2cn\}$, and a coupling defined on S , such that for all $(X_t, Y_t) \in S$, $E[\delta(X_{t+1}, Y_{t+1})] \leq \beta \delta(X_t, Y_t)$, where $\beta = 1 - (1/4 \lceil m/k+1 \rceil)$.

證明：在這裡我們用到的證明技巧與文獻[36]類似，定義節點 x 與節點 y 分佈差異函數 $\varphi(x, y) = |x \oplus y| + |x| - |y|$ ，當 x 狀態與 y 不同時， $2 \leq \varphi(x, y) \leq 2c$ ；另外定義系統 X 與 Y 之間的分佈差異函數 $\delta(X, Y) = \sum_{i=1 \sim n} \varphi(x_i, y_i)$ ，很明顯的，當狀態 X 與 Y 不同時， $2 \leq \delta(X, Y) \leq 2cn$ 。討論的 path coupling 的子集範圍 $S = \{(X, Y) : X, Y \in \Omega, \delta(X, Y) = 2, N^k(x_i) = N^k(y_i), \forall 1 \leq i \leq n\}$ ，不難驗證 S 能滿足 path coupling 的要求；由於我們特別設定的函數，可以發現對於所有 $(X_t, Y_t) \in S$ ，只存在一組 (x_t, y_t) 使得 $\varphi(x, y) = 2$ 。對於兩組馬可夫鏈 X 以及 Y ，節點 x 與 y 選定物件 $\{rep_x, drop_x\}$ 以及 $\{rep_y, drop_y\}$ 來執行相對應的動作，考慮 $\varphi(x_t, y_t) = 2$ 的兩種情形：

情形 1： $|x \oplus y| = ||x| - |y|| = 1$ ，表示節點 x 比節點 y 多一個物件 o_p (節點 y 比 x 多一個物件的情形為對稱狀態，可套用類似的方式)，令 $y_t = x_t \setminus \{o_p\}$ ，集合 $R = R_l \cup R_n$, $D = \{o_j: cost_x(o_j) = 0\}$ ，coupling rule 定義如下(維持原文)：

- (a) Select $c_x \in \{0, 1\}$, $rep_x \in R$, and $drop_x \in D$ u.a.r. (i) If $m_x = c$ and $drop_x = o_p$, then $c_y = 1 - c_x$; else $c_y = c_x$. (ii) If $drop_x \neq o_p$, then $rep_y = o_p$; else $rep_y = rep_x$. (iii) If $drop_x = o_p$, then $drop_y = \emptyset$; else $drop_y = drop_x$.
- (b) If $c_x = 0$, $x_{t+1} = x_t$. Otherwise, if $m_x = c$, $x_{t+1} = x_t \setminus \{drop_x\}$; else $x_{t+1} = x_t \cup \{rep_x\}$.
- (c) If $c_y = 0$, $y_{t+1} = y_t$. Otherwise, if $m_y = c$, $y_{t+1} = y_t \setminus \{drop_y\}$; else $y_{t+1} = y_t \cup \{rep_y\}$.

情形 2： $|x \oplus y| = 2$ 且 $||x| - |y|| = 0$ ，表示節點 x 與節點 y 有共有兩個不同的物件，但總物件數相同。令 $y_t \setminus \{o_q\} = x_t \setminus \{o_p\}$ ， $o_p \neq o_q$ ，集合 $R = R_l \cup R_n$, $D = \{o_j: cost_x(o_j) = 0\}$ ，coupling rule 定義如下(維持原文)：

- (a) Select $c_x \in \{0, 1\}$, $rep_x \in R$, and $drop_x \in D$ u.a.r. (i) $c_y = c_x$. (ii) If $rep_x = o_q$, then $rep_y = o_p$; else $rep_y = rep_x$. (iii) If $drop_x = o_p$, then $drop_y = o_q$; else $drop_y = drop_x$.
- (b) If $c_x = 0$, $x_{t+1} = x_t$. Otherwise, if $m_x = c$, $x_{t+1} = x_t \setminus \{drop_x\}$; else $x_{t+1} = x_t \cup \{rep_x\}$.
- (c) If $c_y = 0$, $y_{t+1} = y_t$. Otherwise, if $m_y = c$, $y_{t+1} = y_t \setminus \{drop_y\}$; else $y_{t+1} = y_t \cup \{rep_y\}$.

為了讓報告呈現較為清楚，我們將兩種情形在 coupling rule 的限制下後產生的可能性列在表 1 及表 2 中。

表 1 Coupling 說明 (情形 1 : $y_t = x_t \setminus \{o_p\}$)

c_x	$(rep_x, drop_x)$	m_x	x_{t+1}	c_y	$(rep_y, drop_y)$	m_y	y_{t+1}	$\varphi(x_{t+1}, y_{t+1})$
0	(o_r, o_p)	$= c$	x_t	1	(o_r, \emptyset)	$< c$	$y_t \cup \{o_r\}$	2
		$< c$	x_t	0	(o_r, \emptyset)	$< c$	y_t	2
	(o_r, o_d)	$= c$	x_t	0	(o_p, o_d)	$< c$	y_t	2
		$< c$	x_t	0	(o_p, o_d)	$< c$	y_t	2
1	(o_r, o_p)	$= c$	$x_t \setminus \{o_p\}$	0	(o_r, \emptyset)	$< c$	y_t	0
		$< c$	$x_t \cup \{o_r\}$	1	(o_r, \emptyset)	$< c$	$y_t \cup \{o_r\}$	2
	(o_r, o_d)	$= c$	$x_t \setminus \{o_d\}$	1	(o_p, o_d)	$< c$	$y_t \cup \{o_p\}$	2
		$< c$	$x_t \cup \{o_r\}$	1	(o_p, o_d)	$< c$	$y_t \cup \{o_p\}$	2

表 2 Coupling 說明 (情形 2 : $y_t \setminus \{o_q\} = x_t \setminus \{o_p\}$, $o_p \neq o_q$, 省略 $c_x = 0$ 及 $c_y = 0$ 的部份)

c_x	$(rep_x, drop_x)$	m_x	x_{t+1}	c_y	$(rep_y, drop_y)$	m_y	y_{t+1}	$\varphi(x_{t+1}, y_{t+1})$
1	(o_r, o_d)	$= c$	$x_t \setminus \{o_d\}$	1	(o_r, o_d)	$= c$	$y_t \setminus \{o_d\}$	2
		$< c$	$x_t \cup \{o_r\}$			$< c$	$y_t \cup \{o_r\}$	2
	(o_r, o_p)	$= c$	$x_t \setminus \{o_p\}$		(o_r, o_q)	$= c$	$y_t \setminus \{o_q\}$	0
		$< c$	$x_t \cup \{o_r\}$			$< c$	$y_t \cup \{o_r\}$	2
	(o_q, o_d)	$= c$	$x_t \setminus \{o_d\}$		(o_p, o_d)	$= c$	$y_t \setminus \{o_d\}$	2
		$< c$	$x_t \cup \{o_q\}$			$< c$	$y_t \cup \{o_p\}$	0
	(o_q, o_p)	$= c$	$x_t \setminus \{o_p\}$		(o_p, o_q)	$= c$	$y_t \setminus \{o_q\}$	0
		$< c$	$x_t \cup \{o_q\}$			$< c$	$y_t \cup \{o_p\}$	0

對於情形 1，只有一種狀況可讓 $\varphi(x_{t+1}, y_{t+1}) = 0$ ，推得 $E[\varphi(x_{t+1}, y_{t+1})] = \beta_1 \cdot \varphi(x_t, y_t)$ ，其中 β_1 表示為

$$\beta_1 = 1 - \Pr\{c_x = 1\} \cdot \Pr\{drop_x = o_p, m_x = c\} \quad (3)$$

同樣的，對於情形 2，有四種狀況可讓 $\varphi(x_{t+1}, y_{t+1}) = 0$ ，推得 $E[\varphi(x_{t+1}, y_{t+1})] = \beta_2 \cdot \varphi(x_t, y_t)$ ，其中 β_2 表示為

$$\beta_2 = 1 - \Pr\{c_x = 1\} \cdot (2\Pr\{drop_x = o_p, m_x = c\} + 2\Pr\{rep_x = o_q, m_x < c\}) \quad (4)$$

結合等式(3)及(4)可以得到

$$\begin{aligned} \beta &\leq (1 - \Pr\{c_x = 1\} \cdot \Pr\{drop_x = o_p, m_x = c\}) \\ &= 1 - (1/2) \cdot \Pr\{drop_x = o_p \mid m_x = c\} \cdot \Pr\{m_x = c\} \\ &= 1 - (1/2c) \cdot \Pr\{m_x = c\} \\ &\leq 1 - (1/2 \lceil m/k + 1 \rceil) \cdot \Pr\{m_x = c\} \end{aligned}$$

$$E[\varphi(x_{t+1}, y_{t+1})] \leq (1 - (1/2 \lceil m/k + 1 \rceil) \cdot \Pr\{m_x = c\}) \cdot \varphi(x_t, y_t)$$

由於所有 $(X_t, Y_t) \in S$ ， $\delta(X, Y) = \sum_{i=1}^n \varphi(x_{it}, y_{it}) = \varphi(x_t, y_t)$ ，另外，當 $t \geq c$ 時， $\Pr\{m_x = c\} \approx 1/2$ 因此我們可以推得下列結果：

$$E[\delta(X_{t+1}, Y_{t+1})] \leq (1 - 1/4 \lceil m/k + 1 \rceil) \cdot \delta(X_t, Y_t) \quad \square$$

由定理 1 並配合文獻[37]，我們可以直接推得定理 2

定理 2 分散式隨機資料複製演算法收斂時間上限為 $4 \lceil m/k + 1 \rceil \ln(2cn\epsilon^{-1})$ 。

3.3.3. 模擬結果

為了評估 k 、 c 、 n 之間的關係，我們假設物件個數與節點個數相同($m = n$)，執行各種不同的模擬程式，所有模擬都在連通且隨機產生的網路拓樸上執行 100 次並取其平均值。首先，我們評估網路規模 n 對收斂時間的影響，如圖 16 所示，當 k 及 c 固定時， n 成長到 500，此時收斂時間會成長到 56，平均記憶體消耗量則緩慢成長到 16。因為當系統有足夠的記憶體空間時，一定可以進入一個穩定狀態，因此我們並不模擬 $c > 30$ 的狀況，相反地，我們想瞭解當記憶體空間不足時，平均每個節點無法解析的詢問會有多少比率。觀察圖 16 的結果，可發現當 $n = 500$ 時，平均收斂時間不會超過 60，因此選定 60 作為觀察的停止時間，判斷無法被解析的比率；如圖 17 所示，當 $c > 20$ 時，無法解析的平均比率均低於 0.05%，然而當 c 逐漸降低時，無法解析的平均比率快速地爬升到 0.42%，雖然比率仍然很低，但系統有可能永遠無法進入穩定狀態，造成過多的電力消耗。我們相信以上的結果能在真實的環境設定中，作為一個參考的指標。

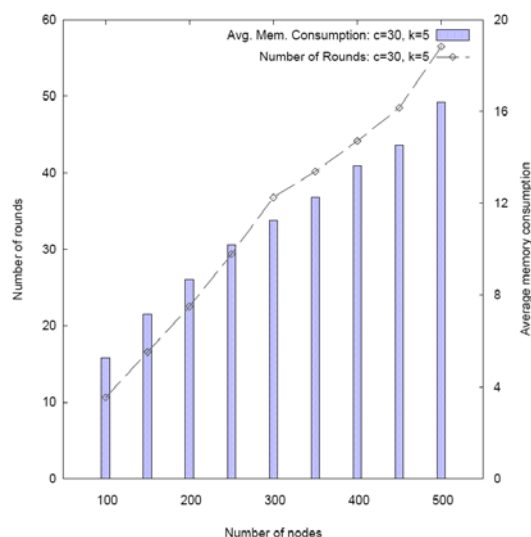


圖 16 收斂時間與平均記憶體消耗在不同網路規模下的情形 ($k = 5, c = 30$)

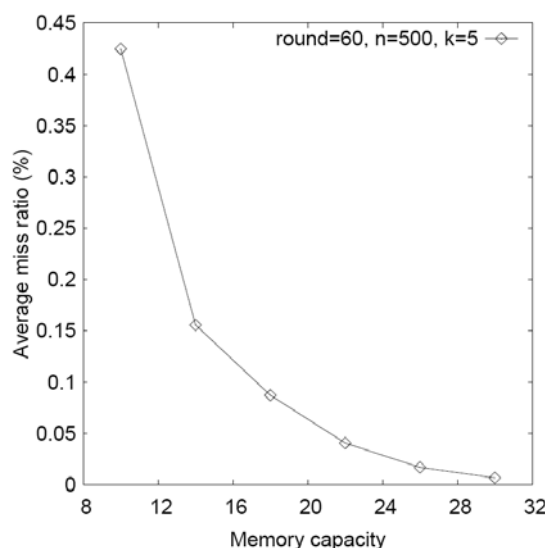


圖 17 平均無法解析比率在不同記憶體設定下的情形 ($round = 60, n = 500, k = 5$)

原則上，在大規模的網路中，當 k 值增加，收斂速度會隨之增加，每個節點的記憶體消耗量也會降低，因此在下面的模擬中，我們測試收斂時間與記憶體消耗在不同 k 值設定下的狀況，如圖 18所示，當 k 值增加，執行時間與記憶體消耗量都隨之降低，這個實驗可以用來評估真實應用中，設定的 k 值與收斂時間的關係。此外， $k=5$ ， $n=2000$ 時，平均記憶體消耗量只有 34，也證明了演算法並不會消耗過多的記憶體使用量。

最後，我們以不同的觀點驗證演算法的效率，圖 19為一次演算法執行過程中，平均無法解析的比率變化狀態($n=100$ ， $k=3$ ， $c=10$)，可以發現平均無法解析的詢問比率以非常快的速度降低，在 20 回合時即降低到 1%左右。這個實驗可以驗證演算法可以有效的提昇資料的可讀性，另外，因為通訊成本會隨著回合數的增加而成長，由這個實驗我們也可判斷是否需要因為 1%的可讀性而浪費 70 回合的通訊成本。

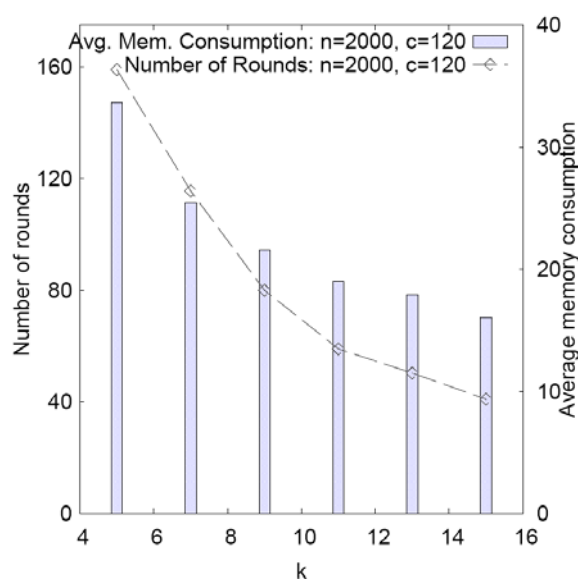


圖 18 收斂時間與平均記憶體消耗在不同 k 值下的情形 ($n=2000$, $c=120$)

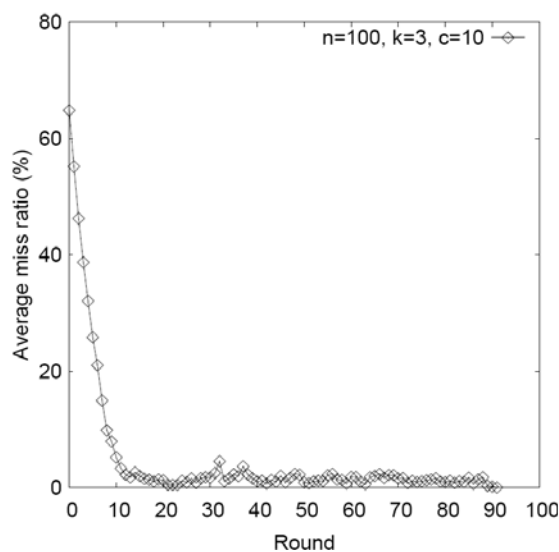


圖 19 收平均無法解析比率的變化情形($n=100$, $k=3$, $c=10$)

4. 結論

在先期的研究中，我們探討無線感測網路的拓撲控制方法，並將其方法成功的整合於無線網路模擬器中進行實驗，進而驗證拓撲控制之成效性。二期的研究中，我們則針對在無線感測網路環境下的同儕應用程式，利用隨機行走的方式，建立新的繞送路徑，使物件能成功送達，提昇系統可用性。此外，我們還利用數學模型及實際模擬來驗證記憶體消耗、通訊成本及系統收斂時間。我們得知該方法除了可以有效的修復錯誤的路徑，提高可靠度外，同時亦具有良好的擴充性，可以應用於動態網路的應用環境。三期研究中，為了讓社區照護能在無線隨意網路有良好的資料可讀性，我們同樣針對同儕通訊模式，提出了一個分散式隨機資料複製演算法，分散式的特性可以維持系統的擴充性，而隨機的特性又可以有效率地使用記憶體空間；此外我們使用了 path coupling 來推導系統的收斂時間上線，並透過模擬結果來驗證系統特性。

考慮目前現有的環境來說，由於無線設備相當普及，未來可嘗試將拓撲控制方法整合至感測器的作業系統當中，配合上層應用程式，提供節能的運作環境。另外，由於隨機演算法的簡單的特性，在實際的分散式系統中經常被拿來應用，然而針對演算法的機率分析，往往非常複雜[38]。在這篇報告中，利用機率分析來推導演算法的收斂時間；原則上，我們若是能將 path coupling 設計的更好，例如更適合的 δ ，或是更嚴謹的 coupling rule，則可以得到更好的上限值。另外，若是節點可以獲得較多的資訊，不論是在容錯能力，或是複製物件工作皆會更有效率。舉例來說，容錯系統若是能知道附近節點的電力狀態，在隨機行走時可以避開某些電力不足的節點，降低再次發生錯誤的機率；資料複製方面，若知道鄰節點所要複製的物件，則可避開複製相同的物件。不過有雖然這些機制可以提昇系統效率，伴隨而來的卻是通訊成本的增加，如何在兩者之間取得平衡，是一個相當重要的議題。另一方面，在設計同儕應用的相關程式時，同儕應用的畢需要考慮到物件的普及性(popularity)及節點的移動問題，為了使整個系統更有效率，演算法設計必須朝線上演算法(online algorithm)或是跨層設計的目標前進，以破除現有設計的障礙。

總的來說，在這個計畫中我們研發了低耗能、高可靠度的解決方案，除了可以與其他子計畫結合，應用於社區照護系統之外，我們相信這裡所提出的技術與概念，還可以更進一步地套用在其他無線隨意網路的相關應用中。

参考文献

- [1] V. Rodoplu and T. H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks," *IEEE J. Sel. Areas Comm. (J-SAC)*, 17(8): 1333-1344, 1999.
- [2] Li Li; Halpern and J.Y, "A Minimum-Energy Path-Preserving Topology-Control Algorithm," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 3(3): 910-921, 2004.
- [3] A. C. Valera, W. K. G. Seah, and S. V. Rao, "Improving protocol robustness in ad hoc networks through cooperative packet caching and shortest multipath routing," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 4(5): 443-457, 2005.
- [4] R. Ramanathan, "Challenges: a radically new architecture for next generation mobile ad hoc networks," *Proc. ACM MobiCom*, pp. 132-139, 2005.
- [5] A. Deshpande, C. Guestrin, and S. R. Madden, "Model-driven data acquisition in sensor networks," *Proc. Int. Conf. Very Large Databases (VLDB)*, Toronto, Canada, 2004.
- [6] D. P. Agrawal, M. Lu, T. C. Keener, M. Done, and V. Kimar, "Exploiting the Use of Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring," *EM Magazine*, pp. 27-33, August 2004.
- [7] Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications: principles & practice," publish by Prentice Hall, 2002.
- [8] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Commun.*, 7(5): 16-27, October 2000.
- [9] S.-J. Yang, "Exploring complex networks by walking on them," *Physical review E* 71, 016107.
- [10] David Braginsky and Deborah Estrin, "Rumor Routing Algorithm For Sensor Networks," *WSNA*, September 2002.
- [11] S. Shakkottai, "Asymptotic of Query Strategies over a Sensor Network," *IEEE INFOCOM*, pp. 557-566, 2004.
- [12] J. Zheng, Y. Wang, X. Lu, and K. Yang, "A dynamic adaptive replica allocation algorithm in mobile ad hoc networks," *Proc. IEEE PerCom*, pp. 65-69, 2004.
- [13] P. Nuggehalli, V. Srinivasan, and C.-F. Chiasserini, "Energyefficient caching strategies in ad hoc wireless networks," *Proc. ACM MobiHoc*, June 2003.
- [14] J. L. Huang and M. S. Chen, "On the effect of group mobility to data replication in ad hoc networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 5(5): 492-507, 2006.
- [15] F. Sailhan and V. Issarny, "Cooperative caching in ad hoc networks," *Proc. Int. conf. Mobile Data Management (MDM)*, pp. 13-28, 2003.
- [16] L. Yin and G. Cao, "Balancing the tradeoffs between data accessibility and query delay in ad hoc networks," *Proc. IEEE SRDS*, pp. 289-298, October 2004.
- [17] L. Yin and G. Cao, "Supporting cooperative caching in ad hoc networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 5(1): 77-89, 2006.
- [18] T. Hara, "Replica allocation methods in ad hoc networks with data update," *ACM/Baltzer Mobile Netw. Appl. (MONET)*, 8(4):343-354, 2003.
- [19] T. Hara and S. K. Madria, "Data replication for improving data accessibility in ad hoc

- networks,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 5(11): 1515-1532, 2006.
- [20] R. Friedman, M. Gradinariu, and G. Simon, “Locating cache proxies in MANETs,” *Proc. ACM MobiHoc*, pp. 175-186, Tokyo, Japan, May 2004.
- [21] M. Bawa, H. Garcia-Molina, A. Gionis, and R. Motwani, “The price of validity in dynamic networks,” *Proc. ACM SIGMOD*, pp. 515-526, Paris, France, June 2004.
- [22] K. Kothapalli, C. Scheideler, M. Onus, and A. W. Richa, “Constant density spanners for wireless ad hoc networks,” *Proc. ACM SPAA*, pp. 116-125, 2005.
- [23] T. Hara and S. K. Madria, “Consistency Management among Replicas in Peer-to-Peer Mobile Ad Hoc Networks,” *Proc. IEEE SRDS*, pp. 3-12, 2005.
- [24] S.-C. Wang, H.-Z. Chou, D. S. L. Wei, and S. Y. Kuo, “On the Fundamental Performance Limits of Peer-to-Peer Data Replication in Wireless Ad Hoc Networks,” *IEEE J. Sel. Areas Comm. (J-SAC)*, 25(1): 211-221, January 2007.
- [25] L. Fribourg, S. Messika, and C. Picaronny, “Coupling and self-stabilization,” *Distrib. Comput.*, 18, (3): 221-232, 2006.
- [26] R. Bubley and M. Dyer, “Path-coupling: a technique for proving rapid mixing in Markov chains,” *Proc. IEEE FOCS*, pp. 223-231, 1997.
- [27] VINT Group, “UCB/LBNL/VINT network simulator ns (version 2),” (available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>)
- [28] The CMU Monarch Project, “Wireless and Mobility Extension to ns,” (available at <http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html>)
- [29] C. Perkins, E. Royer, and S. Das, “Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,” IETF RFC 3561, July 2003.
- [30] A. Savvides, S. Park, and M. Srivastava, “On Modeling Networks of Wireless Microsensors,” *Proc. ACM SIGMETRICS*, pp. 318-319, 2004.
- [31] L. M. Feeney, M. Nilsson, “Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment,” *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1548-1557, 2001.
- [32] S. Shakkottai, “Asymptotic of Query Strategies over a Sensor Network,” *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 557-566, 2004.
- [33] X. Zhang, N. F. Maxemchuk, “A generalized energy consumption analysis in multihop wireless networks,” *Proc. IEEE WCNC*, pp. 1476-1481, 2004.
- [34] H.-Z. Chou, S.-C. Wang, S.-Y. Kuo, I.-Y. Chen and S.-Y. Yuan, “Randomized and distributed methods for reliable peer-to-peer data communication in wireless ad hoc networks,” *IET Communications*, accepted as a full paper.
- [35] P.-J. Wan and C.-W. Yi, “Asymptotic critical transmission radius and critical neighbor number for k-connectivity in wireless ad hoc networks,” *Proc. ACM MobiHoc*, pp. 1-8, 2004.
- [36] V. Guruswami, “Rapidly mixing markov chains: A comparison of techniques,” May

2000. (available at <http://cs.washington.edu/homes/venkat/pubs/papers.html>)
- [37] D. Randall, “Mixing,” *Proc. IEEE FOCS*, 2003.
- [38] G. Norman, “Analysing randomized distributed algorithms,” *Validation of Stochastic Systems: A Guide to Current Research, LNCS 2925*, August 2004.

可供推廣之研發成果資料表 I

可申請專利

可技術移轉

日期：94年5月31日

國科會補助計畫	計畫名稱：無線感測網路之關鍵技術及在社區照護之應用 計畫主持人：郭斯彥 計畫編號：NSC 93-2213-E-002-122 學門領域：資訊一
技術/創作名稱	高可靠度和節省能源的無線感測網路通訊基礎架構
發明人/創作人	台大電機系
技術說明	中文： 由於無線感測器通常不具備固定的電力支援，一旦網路中有感測器的電力耗盡，會降低感測網路之效能，同時亦會降低網路的生命週期，換句話說，如此將會使醫療系統的效能與可靠性降低，但是如此在醫療系統是不太允許的，於是本計劃擬研究一套可節省能量的通訊協定，以大幅減低能量的消耗率和延長網路生命週期。
	英文： Because the sensors usually do not have fixed power supply, when some sensors in the network exhaust their energy, it will lower the network performance and lifetime. On the other words, this will lower the efficient and reliability, but it is not allowed by health system. This plan studies a communication protocol which can significantly lower the energy drain rate and extend the network lifetime.
可利用之產業 及 可開發之產品	可利用於自動化醫療系統。
技術特點	減少感測器中電池的更換速度，增加感測網路可靠性與生命週期。
推廣及運用的價值	可應用成一套自動化社區看護系統，由於使用感測器這類的行動裝置，病患並不願意經常性的更換電池，況且在更換電池的期間，病患與醫護中心會暫時性失去連線，這類情況若過於頻繁對醫療系統是非常不佳的，於是將節省能源的技術應用於醫療系統亦是相當重要的考量。

※ 1.每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

※ 2.本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

※ 3.本表若不敷使用，請自行影印使用。

可供推廣之研發成果資料表 II

可申請專利

可技術移轉

日期：95年5月21日

國科會補助計畫	計畫名稱：無線感測網路之關鍵技術及在社區照護之應用 計畫主持人：郭斯彥 計畫編號：NSC 994-2213-E-002-041 學門領域：資訊一
技術/創作名稱	無線網路下環境下之高可靠性點對點資料通訊應用
發明人/創作人	台大電機系
技術說明	中文： Peer-to-Peer 在無線感測網路下的應用通常不具有容錯的機制，由於無線感測網路的變動性及能源消耗問題，一旦節點或是連結發生錯誤，系統的可用性就會大大降低，為了解決這個問題，本研究計畫設計出一套分散、隨機且節省能量消耗之容錯演算法，以大幅增加 Peer-to-Peer 的系統效能及可用性。
	英文： Peer-to-peer applications in wireless sensor ad hoc networks are usually executed without fault-tolerant mechanism. However, system performance and availability are apt to suffer from the characteristics of wireless ad hoc network, such as high dynamics, node/link failures. In this report, we propose a distributed randomized and energy-efficient algorithm that can efficiently repair P2P routing failures. As a consequence, performance and data availability of P2P applications in a wireless environment can be enhanced.
可利用之產業及可開發之產品	可利用於緊急救援系統、軍事監控系統。
技術特點	在有限能量消耗下，可修復資料傳輸因不明原因而無法傳送至目的地的問題，有效提昇 P2P 應用程式在無線感測網路環境的可用性。
推廣及運用的價值	在無線感測網路的環境下，Peer-to-Peer 應用程式(如醫療系統)往往因為不穩定的網路狀態及電力支援的問題，使得其效能及可用性受到限制。因此，如果能在該環境的下應用容錯機制，提昇系統的可靠度，會使得 Peer-to-Peer 在無線感測網路下的應用更有發展性。

※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。

可供推廣之研發成果資料表 III

可申請專利

可技術移轉

日期：96年10月14日

國科會補助計畫	計畫名稱：無線感測網路之關鍵技術及在社區照護之應用 計畫主持人：郭斯彥 計畫編號：NSC 95-2221-E-002-059 學門領域：資訊一
技術/創作名稱	無線隨意網路下同儕資料複製之分散式隨機演算法
發明人/創作人	台大電機系
技術說明	中文： Peer-to-Peer 在無線隨意網路下的應用通常有延遲限制的要求，由於無線隨意網路的變動性及能源消耗問題，花費過多的時間或能源存取資料會大幅降低系統的可用性就會大大降低，為了解決這個問題，本研究計畫設計出一套分散、隨機且節省記憶體空間消耗之資料複製演算法，以大幅增加 Peer-to-Peer 的系統效能及可用性。
	英文： Peer-to-peer applications in wireless sensor ad hoc networks are usually executed with low-latency requirements. However, system performance and availability are apt to suffer from the characteristics of wireless ad hoc network, such as high dynamics, memory/power consumptions. In this report, we propose a distributed randomized and memory-efficient algorithm for data replication. As a consequence, performance and data availability of P2P applications in a wireless environment can be enhanced.
可利用之產業及可開發之產品	可利用於緊急救援系統、軍事監控系統。
技術特點	在有限的記憶體消耗下，可提昇資料可讀性，有效提昇 P@P 應用程式在無限隨意網路環境下的可用性
推廣及運用的價值	在無限隨意網路的環境下，Peer-to-Peer 的應用程式往往會有延遲限制的要求，使其效能及可用性受到影響。因此，若在該環境中提供分散式資料複製機制，可以有效降低資料存取的延遲，增加資料可讀性，並減少不必要的能源消耗，可使 Peer-to-Peer 在無限隨意網路的環境下更有發展性。

※ 1.每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

※ 2.本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

※ 3.本表若不敷使用，請自行影印使用。