

無線感測網路中無需地理資訊之低成本堅韌路由

Low-Cost Resilient Routing without Geographic Information in Wireless Sensor Networks

吳亦超
Y.-C. Wu

段裘慶
C.-C. Tuan

顏嘉鋒
C.-F. Yen

國立台北科技大學 電腦與通訊研究所

t5419001@ntut.edu.tw

cctuan@ntut.edu.tw

t5418016@ntut.edu.tw

摘要

微型無線感測節點受限於供應電量、運算與儲存能力以及網路通信頻寬。感測節點常需以感測資料併同節點位置資訊做為相對處理。然而位置的取得雖可透過全球定位系統，但感測節點上若攜帶定位系統，其硬體成本的提升與電量的消耗，都不符合小體積與低成本的設定。

本研究提出 LCRR(低成本堅韌路由協定)。可透過虛擬座標系統的建置，於資料回傳時記錄各節點資訊，以達到事件定位之效果。訊息傳遞由外圍節點向內圍節點轉送，藉由多路徑選擇來分散負載，增加路徑的強健性。虛擬座標的路由維護因易於一般路由，可降低網路維護的成本。

關鍵詞：無線感測網路、虛擬座標、堅韌路由、幹道、事件定位。

一、簡介

無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSN)是一種無基礎建設之網路架構，由部署在監測地區內的大量微型感測節點(Sensor Node, SN)所組成，透過無線通訊的方式形成無線網路系統。常見應用於環境監控、醫療照護、居家保全、交通監視以及軍事偵測等方面上，而其應用的多樣性，近年來也受到廣泛的討論。

微型的 SN，在硬體上有許多限制：感測器電源由有限電池電能供給、通信受

限於較低的傳送速率與距離、處理器的計算能力與儲存空間有限。有鑒於上述特性，如何有效利用有限的硬體資源尚能持久得使網路正常運作，為目前無線感測網路的研究目標之一。

由於 SN 通常大量部署於廣大的監測地區，往往是高山險境惡劣氣候，非人力所及之處，須搭乘飛行載具，在感測區域上空灑下大量感測節點，隨機佈署於感測環境。由於節點需大量使用，對於感測節點的成本就得要求低廉。當狀況發生回傳訊息時，若無法得知所傳資料是由感測區內何處傳回時，則所得資訊變得沒有價值和意義。

一般而言，若為人工佈署 SN，則節點所在位置可於佈署時得知；反之，若為非人工部署，則 SN 的位置可透過全球定位系統(Global Positioning System, GPS)獲得。然而，不論是人為佈署或是透過 GPS 來得知地理資訊，都將花費大量的建置成本。

若感測節點攜帶 GPS 情況下，學者提出 GAF[8]與 GHT[6] 路由協定，以不同的路由架構來節能，使網路能延長運作的壽命。或是利用節點休眠機制令 SN 作最有效的發揮，但資料收集端周圍的轉送節點，還是得轉送其它遠處所傳的封包，往往不能藉由休眠來延長存活時間。因此如何降低因為地理資訊所付出的成本，將是 WSN 發展的要點之一。

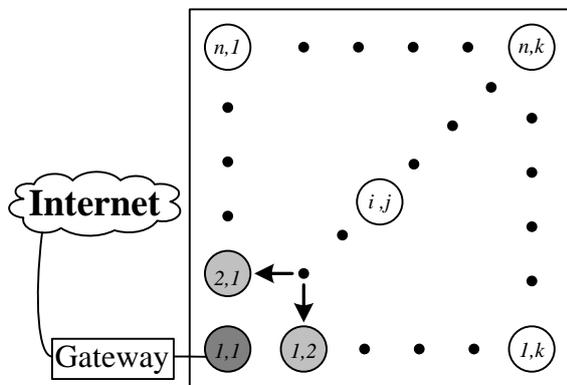
在 WSN 不需人工部署且不用具地理

資訊的 SN，並使用有限的運算能力及儲存空間之條件下，本研究提出無需地理資訊之低成本堅韌路由機制 (Low-Cost Resilient Routing, LCRR)。此路由協定包含網路拓撲的初始建立，封包訊息的傳送方法，路徑的維護，到套用事件定位的機制。透過本 LCRR 路由協定，除了減少能量的消耗外，更不需要使用 GPS 等高成本的硬體來獲取地理資訊。

二、相關文獻探討

地理位置路由 GEM (Geography EMbedding)[4]、GHT[6]與 GAF[8]，皆提出透過虛擬極座標或是網格的地理路由法，但訊息最終還是得傳送至資料收集端。如此，資料收集端周圍的節點往往需轉送比其它節點更多的封包，而造成 SN 能量的快速消耗，以致於形成網洞[7]。假使資料收集端周圍節點失效，將使得感測訊息無法傳達至後端作處理，有效的解決方式可在資料收集端周圍部署較多的 SN 來分散周圍節點的轉傳負載。

[1](Node-link-failure resilient routing) 提到資料收集端周圍的 Critical nodes 若失效，可能迫使整個網路失去作用。如圖 1 所示，節點以網格方式作佈署，左下角為閘道節點或稱資料收集端，其周圍節點負載。而在傳輸資料方面，採用輪流傳送方式，網路中每一節點只能往下或往左轉傳，藉以分散網路負載於下游各節點。



(i, j) : node at i -th row, j -th column

圖 1 網格中利用輪替轉送分散負載

而 GEM[4]與 DV-Hop[5]根據節點至資料收集端的跳躍數(hop)來估算 SN 與 Sink 的距離。GEM[4]建立一虛擬極座標系統(Virtual Polar Coordinate Space, VPCS)來建構網路拓撲，進而發展出與樹狀結構相似的虛擬極座標路由，以 Sink 為樹幹父節點擴散至網路各子節點，同時利用 hop 數與自定義的虛擬角度來作節點定位。訊息傳遞上，父節點擁有的角度包含子節點所有角度，而訊息由子節點傳送至該父節點。

DV-Hop[5]建立網路拓撲是由資料收集端開始，向周圍廣播封包尋找路徑，凡節點距離資料收集端為一個 hop 數稱做第一層，距離資料收集端兩個 hop 數則為第二層，由此方法擴張至整個感測區域各個節點，則每一節點都可得知自己與資料收集端距離多少 hop 數，再利用三邊測量法(trilateration)來作網路節點的定位。

在定位技術的路由法中(Ad hoc Positioning System, APS)[3]，指出 GPS 雖為目前應用最廣泛最成熟的定位系統，但對於低成本的 WSN 而言，卻顯得不適用。而利用少數具有仿似 GPS 定位系統的信標節點(beacon node)，來節省成本，再套用定位演算法來達到 SN 定位。

以上所述之 GEM[4]、DV-Hop[5]與 APS[3]皆為求 SN 成本考量，而不使用 GPS 模組。而本研究的目標與其相同，擬出一套定位機制，盡可能降低計算與儲存量，同時可節能，亦可成為一強健的路由。

三、LCRR 路由協定

低成本堅韌路由 LCRR 適用於大量部署感測節點的無人廣大監測區域，或是人們難以到達的嚴酷惡劣環境，利用高空灑下大量感測節點，隨機佈署於感測環境。當有事件被偵測到時，感測訊息由外圍節點轉送至內圍節點，再到資料彙集端處理。資料在轉送時，則經由多路徑傳送。

訊息回傳時，透過虛擬座標系統，記錄所經過的節點，由資料彙集端分析，即

可達到事件定位的效果。

LCRR 路由協定主要的相關環境設定如下：

1. 感測區域內節點部署為隨機且均勻的分佈。
2. 每個節點皆無 GPS 或其他定位系統以獲知本身的地理位置資訊。
3. 節點皆為靜止無移動性，感測半徑為傳輸半徑的一半。
4. 每一節點有各自的路由表，其記錄內圍節點，以供選擇下一傳遞點。
5. 節點間具雙向通訊鏈結，且傳輸半徑固定不變。
6. 資料彙集端沒有電量限制。
7. 感測節點具有下列欄位資訊，見表 1。

表 1：感測節點記錄欄位

Level	Trunk	Branch	Cross Trunk
<i>i-th</i>	<i>k-th</i>	<i>l-th</i>	<i>m-th (m≠i)</i>

Level：階層數，相當於跳躍數。

Trunk：幹道，為虛擬坐標的主軸。

Branch：幹道分支，此 *l* 為零，則為幹道。

Cross Trunk：相交幹道，非自身的其它幹道（第二次接收的路徑請求封包）。

3.1 虛擬座標系統之建構

在虛擬座標系統的建置上，LCRR 路由協定的建構方法與 DV-Hop[5]、GEM[4] 相似，皆由資料彙集端向鄰居節點廣播路徑請求，進而擴張至整個感測區域，計算網路中各節點與資料彙集端的跳躍數，同時給予各節點虛擬座標值。

3.1.1 階層數之設定

首先，由資料彙集端先設定自身 hop 數為 0，再向周圍鄰居節點廣播路徑請求封包，距離資料彙集端為一個 hop 數的鄰居節點，在自己的 Level 欄位註記為 1(Level₁)。Level₁ 節點在回傳路徑回覆的同時，Sink 端也可藉此得知 Level₁ 的節點總

數。

Level₁ 節點也以同樣方式向周圍廣播路徑請求，即可找到 Level₂ 節點。同樣地，尚未註記 Level 之節點在接收到路徑請求封包後，若經查封包內的 Level 數為 *i*，則註記自己的 Level 為 *i+1*，以此方式擴展至整個感測區域，則以跳躍為基礎的階層式網路拓撲形成。而當已設定 Level 數為 *i* 之節點，若接收到封包內 Level 數為 *j* 之重複路徑請求時，以下列三種狀態與方法處理：

- a. $j + 1 > i$ ：捨棄該封包，不予理會。
- b. $j + 1 = i$ ：記錄於路由表，增加內圍節點的傳遞選擇。
- c. $j + 1 < i$ ：修改自身 Level 數為 $j + 1$ 。

3.1.2 幹道與分支之建立

在 3.1.1 中，Sink 端得知 Level₁ 的總節點數，同時也為總幹道數。每一個 Level₁ 之節點皆為幹道節點，其欄位記錄為：Level = 1；Trunk = *k*；Branch = 0；Cross Trunk = *X*，簡寫成：1-*k*-0-*X*。

記錄節點各欄位資訊與階層數設定是同時填入的。換言之，在尋找外圍節點的同時，階層數的設定、幹道、分支與相交幹道也同時完成。其它欄位則作以下設定：

- a. 幹道節點(Branch = 0)有能力選擇外圍節點為下一層幹道節點(設定下一層外圍節點的各欄位值)；而 Branch ≠ 0 之節點只能給予 Level 值。
- b. 為確保幹道延伸性，在選擇外圍的下一層幹道節點時，以最慢回傳路徑回覆者為幹道節點。在設定外圍節點各欄位時，需保留 Branch (= 0) 欄位之設定。
- c. 為能更準確定位出事件發生的所在地區，避免幹道相交的情形出現。被指定為幹道之節點，不可重複接受其它內圍幹道節點之請求；且身為幹道之節點，須令其鄰居節點不可為幹道節點。
- d. 幹道節點有賦予外圍幹道節點的能力，所以需對外圍幹道節點週期性的維護；若外圍幹道節點失效，則從外圍節點再次選出，而對於內圍幹道節點則不

需去維護。

欄位設定的步驟，如圖 2 所示：

- Step 1.** 圖 2(a)所示虛線為節點間存在通訊連結的情形。
- Step 2.** 圖 2(b)所示Level₁已完成連結，各欄位也設定成功。
- Step 3.** 圖 2(c) 所示Level₂完成連結，粗黑線為幹道線。Trunk欄位為第一次接收到路徑請求封包的幹道；Cross Trunk為第二次所接到的封包。
- Step 4.** 圖 2(d) 所示Level₃可知LCRR路由協定的欄位設定規則。幹道節點其Branch欄位為“0”，且有設定下一層外圍節點各欄位的權力。在未與幹道節點相臨的節點(Level₃最左邊兩個)，所能得知的資訊只有自己所在階層數，故表為3-X-X-X。

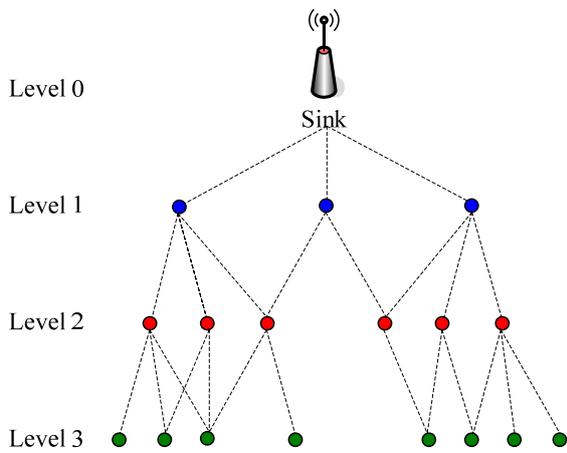


圖 2(a) WSN 初始狀態

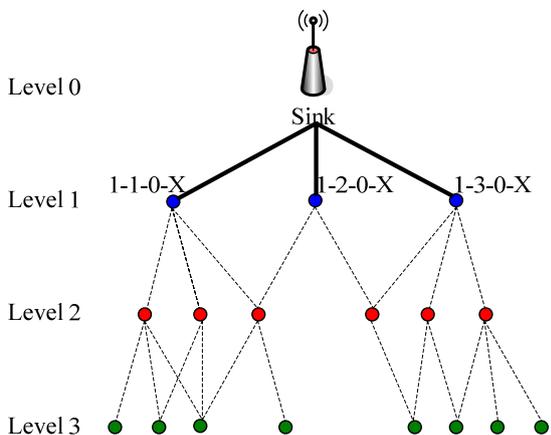


圖 2(b) Level₁節點設定

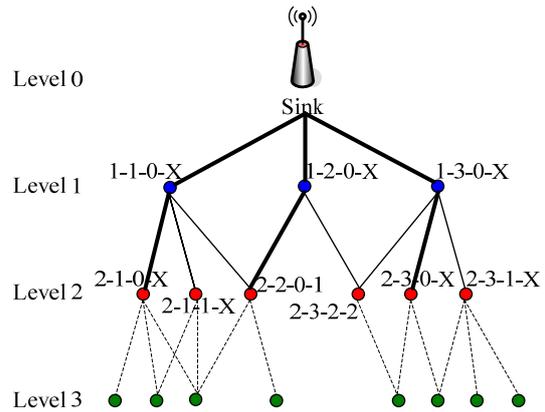


圖 2(c) Level₂節點設定

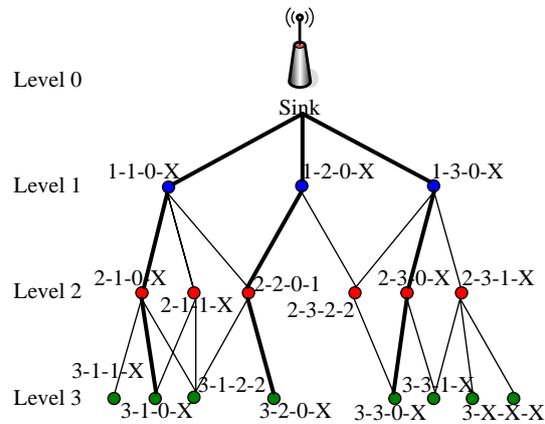


圖 2(d) Level₃節點設定

3.2 訊息回傳方法

訊息回傳原則為外圍節點朝內圍節點轉送(high Level → low Level)。待傳送封包之節點，只須將資料封包傳送至 Level 數比自身還小的內圍節點即可，並無特定路徑，不需另交給幹道節點轉送，避免幹道額外耗費能量。

內圍節點的選擇，則以隨機選擇或是輪流傳遞等轉送機制。若可得知節點之剩餘電量，則可依據內圍節點的電量多寡作傳遞的選擇；或若節點間距離可獲知，也可選擇較近的節點為傳送目標。

當有事件發生時，來源節點將會傳送事件封包，同時也註記自身的欄位資料予事件封包內，封包傳遞時所經過的各節點欄位資料，皆記錄於回傳封包內，當封包成功傳送至資料彙集端時，即可作分析判

讀。

3.3 事件定位判讀

藉由虛擬座標系統的建置與回傳事件封包所提供的訊息，將可解析事件發生的所在地區。資料彙集端可先由 Level 欄位判別此事件發生地點與資料彙集端相距的 hop 數，得知距離；再由其它欄位預估來源節點與資料彙集端的相對方向。

事件定位判別時，以 Level 最高的欄位訊息為第一優先分析依據，再依 Level 由高至低作判別。也可統計所經幹道的次數，做為事件方位的預估。對於所回傳的 Level₁ 節點方向，資料彙集端可藉由多個超音波接收器或是天線陣列，找出 Level₁ 節點相對於 Sink 的方位。

如圖 3(a)所示當回傳封包成功傳送至資料彙集端，可得到的資訊如下：

1. **3-1-2-2**：為 Level₃ 之訊息，距離資料彙集端為 3 個 hop 數，且位於在幹道 1 與 2 之間。
2. **2-2-0-1**：經過 Level₂ 的幹道節點，此發生地區較接近幹道 2，且所經此節點與幹道 1 的 Level₁ 節點只有一個 hop 數。
3. **1-1-0-X**：綜合以上可得，此事件封包由幹道 1 的 Level₁ 節點所送達，但發生區域位於幹道 1 與 2 之間，兩幹道距離相近。

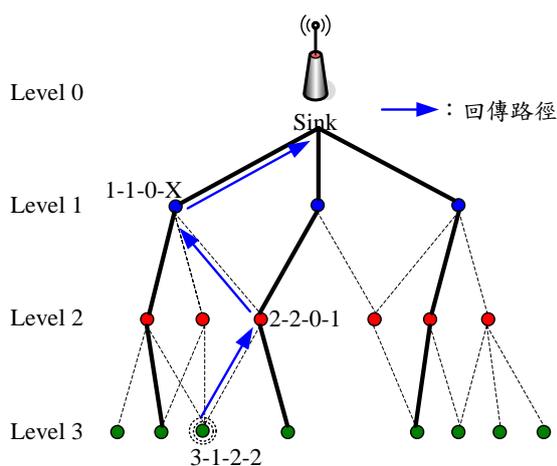


圖 3 事件發生回傳圖示

3.4 網路拓撲比較

利用理想的節點佈署於感測區域(見

圖 4)，感測節點位於六角形中心，相鄰兩節點可互相溝通，相距為傳輸半徑，節點感測半徑為傳輸半徑的二分之一，完全覆蓋整個六角形感測區域。比較 LCRR 協定與樹狀結構 GEM[4]的拓撲路徑數。

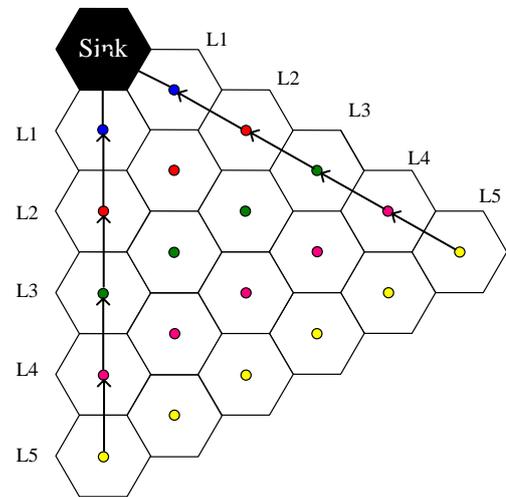


圖 4 六角形中理想網路節點部署

用下式(1)表示每層節點的平均路徑數：

$$P_{avg}^i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} P_j^i}{N_i}, \quad 1 \leq i \quad (1)$$

數學式(1)中， P_{avg}^i 表第 i 階層的平均路徑數； N_i 為第 i 階層總節點數； P_j^i 表第 i 階層至第 j 個節點擁有的路徑路； L_i 表第 i 階層。

在樹狀架構中，子節點只有一個父節點，父節點有多個子節點連結，當有事件封包傳送時，只有單一選擇、單一路徑，由父節點代為轉送，套用式子(1)可得

$P_{avg}^i = 1$ 。而 LCRR 網路拓撲，外圍節點選擇可連結的內圍節點，使其代為轉送，故可選擇的節點數量必定大於樹狀架構。理想六角形節點部署，在最左與最右邊兩個路徑上的節點只有單一路徑可傳送，其它節點越靠近中間，所擁有的路徑量越多，

由式子(1)可得 $P_{avg}^i = \frac{2^i}{i+1}$ 。

由圖 5 可看出，雖然隨著網路階層越多，但樹狀架構還是只有單一路徑，路徑選擇的彈性相當地小；而 LCRR 協定則有更多的路徑選擇，必能改善路徑的強健性，平均分散路徑的負載量，減少網路擁塞的情形。

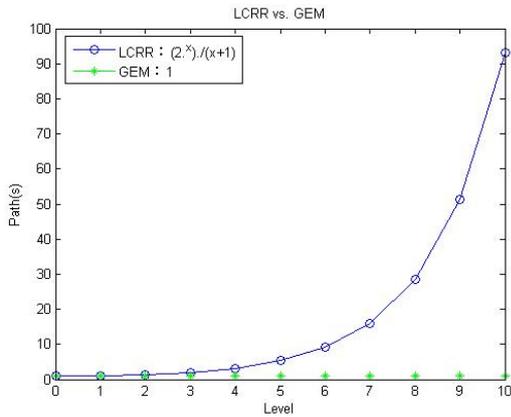


圖 5 節點部署與路徑數量比較

四、虛擬座標系統之路由維護

LCRR 路由協定建構於虛擬座標系統上，而系統是一個邏輯拓撲，故當實際的網路拓撲發生異動時，對於虛擬座標系統的影響並不大，只需更新局部虛擬座標位址。網路拓撲變化主要有：路徑失效與節點加入。

4.1 路徑失效

路徑失效的發生，主要是當該節點的周圍節點之 Level 數等於或高於自身 Level 數，則無法連結至內圍節點，表示其內圍節點皆不存在。

而應對的方法，如下三步驟：

- Step 1.** 非幹道節點(Branch \neq 0)先清除自己的各欄位資訊；而幹道節點(Branch = 0)需保留自己的幹道資訊(Trunk 保留)，其它欄位清除。
- Step 2.** 向周圍鄰居節點，發出路徑請求封包，等待回覆。當周圍節點接收到未註記 Level 之路徑請求封包時，判定為路徑失效或是新節點加入發生，則回傳路徑回覆封包，給

予該節點 Level 值或欄位。

- Step 3.** 當接收到路徑回覆封包後，優先選擇 Level 數 i 較低之節點為內圍節點，並設立自身 Level 為 $i+1$ 。

4.2 節點加入

當新節點要加入虛擬網路座標時，對於整個虛擬網路系統並無太大的影響，新節點只需找到其內圍節點，即可加入整個網路的運作。所需的步驟與 4.1 中的 Step 2 與 3 相似，只需兩個步驟即可完成新節點加入。

- Step 1.** 向周圍鄰居節點，發出路徑請求封包，等待回覆。當周圍節點接收到未註記 Level 之路徑請求封包時，判定為路徑失效或是新節點加入發生，則回傳路徑回覆封包，給予該節點 Level 值或欄位。
- Step 2.** 當接收到路徑回覆封包後，優先選擇 Level 數 i 較低之節點為內圍節點，並設立自身 Level 為 $i+1$ 。

LCRR 路由協定對於網路的動態變化的有著相當大的適應性，相信對於整個網路成本的降低有很大幫助。

五、結論與未來工作

在本文所提 LCRR 路由協定，無需 GPS 或是其它節點定位系統，仍可預測事件發生的區域，可大量節省節點硬體與部署節點所需的成本。在無線網路拓撲中，若採用樹狀結構，對於資料融合機制的運用，相信可達到很好的成效，但其父節點必須轉送其子孫節點所傳之封包，尤其是資料彙集端周圍節點的消耗勢必增大，恐會加速網洞的形成。

而 LCRR 路由協定建構一個虛擬座標系統，每個節點可知自己與 Sink 的跳躍數，再藉由訊息的傳遞，只需記錄各項資訊予封包內，可減少節點的運算負擔；傳送時，只要周圍有 Level 數比自己小的節點即可轉送封包，再配合轉送機制以選擇有利的節點代為轉送，達到分散負載的效

果，避免資料彙集端周圍熱點的產生，而形成網洞。

由於網路拓撲採用虛擬座標的方式建立，當網路拓撲發生異動時，可快速做調變以節省其它節點的電量消耗。在幹道節點的電量使用上，除了須周期性維護其外圍幹道節點外，其運作方式與其它節點一樣，故能量的花費並不會太大。

LCRR 路由協定有較強韌的路由，以有效降低路徑失效的頻率，減少路徑維護的多餘能量的消耗。但隨著網路的擴張，所衍生的問題使得事件定位的精確度可能會比 GEM[4]來得低，此有待利用網路模擬器做分析比較。

為求更為準確的預測事件發生地區，在感測節點部署上，第一層為可為人工部署，此改進方法可分散Level₁過大的負載消耗。當Level₁節點越多，感測區域的分割越多，對於事件定位，將更為準確，但需避免幹道的相斥。節點間距離的計算，可利用平均跳躍距離，更準確的預測資料彙集端與事件來源節點的距離，或是加入其它可與本LCRR相融的距離計算機制。

在 LCRR 下，當節點只有單一內圍節點可轉傳以及其外圍節點也只有一個內圍節點可轉傳時，若發生路徑失效，路徑的維護就變得複雜，網路拓撲需經過一段時間才會變得穩定，所需的維護的代價就會相對升高。

WSN 的模擬可透過網路模擬軟體 J-Sim[2]來做驗證，與其它路由協定做網路模擬的比較。對於 LCRR 路由協定所預測之地區與正確發生事件區域的誤差比較，網路的運作生存時間或是 Sink 周圍節點的生存時間。

另外，目前 WSN 的應用上，感測節點大多屬於固定式或是移動緩慢，但還是有些許應用於感測節點須大幅度移動，由於 LCRR 路由協定尚未支援節點移動性，故未來針對節點的移動性仍可待加以探討。

六、誌謝

本論文研究獲國科會計畫「無線感測網路中代理節點解決能量洞問題」(NSC-96-2221-E-027-007)經費贊助，特此致謝。

七、參考文獻

- [1] A. H. Akbar, W. Mansoor, S. A. Chaudhry, A. Kashif, and Ki-Hyung Kim, "Node-link-failure resilient routing architecture for sensor grids," *Advanced Communication Technology, ICACT 2006. The 8th International Conference*, Vol. 1, pp. 131-135, Feb. 2006.
- [2] A. Sobeih, J. C. Hou, Lu-Chuan Kung, Ning Li, Honghai Zhang, Wei-Peng Chen, Hung-Ying Tyan, and Hyuk Lim, "J-Sim: a simulation and emulation environment for wireless sensor networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 13, Issue 4, pp. 104-119, Aug. 2006.
- [3] D. Niculescu and Badri Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," *IEEE INFOCOM 2003*, Vol. 3, pp. 1734-1743, 2003.
- [4] J. Newsome and D. Song, "GEM: Graph embedding for routing and data-centric storage in sensor networks without geographic information," in *Proc 1st ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 76-88, 2003.
- [5] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices," *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, Issue 5, pp. 28-34, Oct. 2000.
- [6] S. Ratnasamy, B. Karp, L. Yin, F. Yu, D. Estrin, R. Govindan and S. Shenker, "GHT: a geographic hash table for data-centric storage," in *Proc. of the First ACM International Workshop on*

- Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2002)*, Atlanta, GA, Sept. 2002.
- [7] Y. T. Hou, Yi Shi, H. D. Sherali, and S. F. Midkiff, "On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 4, Issue 5, pp. 2579-2590, Sept. 2005.
- [8] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for Ad Hoc routing," *International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 70-84, Jul. 2001.