

無線感測網路上一個兼具能源與時間效益的多重行動代理人資料收集機制

黃志銘
逢甲大學
資訊工程學系
e-mail :
jmhuang@fcu.edu.tw

許昂焜
逢甲大學
資訊工程學系
e-mail :
m9948262@fcu.edu.tw

戴嬋玲
逢甲大學
資訊工程學系
e-mail :
dai@fcu.edu.tw

摘要

在無線感測網路的研究中，以行動代理人(Mobile Agent, MA)為基礎的資料收集機制，已被證實在資料傳輸效率與網路節能效果上，均優於傳統的主從式架構。然大多數的相關文獻幾乎都著墨在如何規劃出一條或數條較節能的路徑，反而忽略考慮因 MA 收集大量資料所造成的傳輸延遲，故並不適於即時性的應用。本論文提出一個兼具網路節能效果與時效性的多重行動代理人資料收集機制，稱之為 MMADCS (Multiple Mobile Agent based Data Collection Scheme)。MMADCS 以經濟的樹狀傳輸結構為基礎，再透過結構的剪裁調整，平衡每條傳輸路徑的資料處理量，藉以平均節點耗能，延長網路壽命，縮短網路整體傳輸延遲時間，滿足即時性的應用需求。模擬比較證實，透過我們所提的 MMADCS 機制收集資料，比起現有的一些多重行動代理人資料收集機制，確實有較佳的 Energy*Delay 成本。

關鍵詞：無線感測網路、行動代理人、延遲時間、能源消耗、路徑規劃。

Abstract

In wireless sensor networks, it has been proven that mobile agent based data collection schemes are superior to the counterparts that were performed with traditional client/server architectures, in terms of data transmission latency and network energy consumption. However, most of previous related researches always target at how to seek one or more energy-conserved paths to collect data, they instead ignore the network latency issue caused by a large amount of data transmissions. As a consequence, they are not very suitable for real-time applications. In this paper, we thus propose an energy- and time-efficient multiple mobile agent based data collection scheme,

termed as MMADCS (Multiple Mobile Agent based Data Collection Scheme). Based on provided minimum cost trees, MMADCS further prunes them to equalize the data processing quantity on each path tree, and thus reduces overall transmission latency, meets the timely requirements, balances node energy consumption, and consequently lengthens the network lifetime. Simulation results show that the proposed MMADCS scheme is indeed with the better Energy * Delay cost, comparing to some existing multiple mobile agent based data collection schemes.

Keywords: Wireless Sensor Network, Mobile Agents, Latency Time, Energy Consumption, Itinerary Planning.

1. 前言

無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)通常是由數以百計個資源有限(如記憶體、計算能力、電池能源、通訊頻寬)、體積小、成本低，但具感測與無線傳輸能力的感測節點(Sensor node)所自我組態(Self-organization)建構而成[1][2]。感測節點於配置感測環境後，即負責將其所偵測到的周遭環境事件資訊傳回基地台(Base Station, BS)，以支援後端人員分析與決策之用。目前常見的應用包括：戰場情資蒐集、生態環境監控，健康醫療照護、或居家保全系統等[3]。

傳統上，無線感測網路對於節點感測資料的傳輸協定設計，大都建立在主從式架構(Client/Server, C/S)基礎上[4]，由節點採直接或多步(multi-hop)接續的傳輸方式，將資料集中送往基地台進行處理。然而大量資料的回傳，卻往往造成網路流量壅塞、訊息的不斷重傳(retransmission)，不僅嚴重影響資料處理的即時性，更迅速消耗掉節點的能源，縮短了網路壽命(lifetime)。以行動代理人(Mobile

Agent, MA)為基礎的分散式感測網路架構(MA-based Distributed Sensor Network, MADSN)[4]於是被提出。在此種架構下,基地台針對若干必須拜訪的節點,規劃出一條最佳資料收集路線後,再派出一個行動代理人(MA),依序將感測資料攜回基地台,以達到降低網路流量負載,減少節點耗能的目的。MADSN 雖能有效達到快速且節能的資料收集效果[6],但當網路節點數目龐大,且分散在大規模感測範圍時,單靠使用一個 MA 循序拜訪所有節點來收集資料,將嚴重導致資料傳輸延遲時間(delay time)增長,不但不適合具即時性的相關應用,亦欠缺網路擴充性(scalability)。多重行動代理人(Multiple Mobile Agents, MMAs)資料收集機制[9][10],即是針對上述問題所提出的解決方式。它們藉由平行與分散式處理的觀念,透過規劃網路中多條不同的資料收集路徑,分別賦予每條路徑一個 MA 來同時進行收集資料,以縮短資料傳輸延遲時間。

過去一些以 MA 為基礎的無線感測網路資料收集機制之研究,不論是單一代理人路徑規劃(Single-agent based itinerary planning, SIP)[7]或多重代理人路徑規劃(Multi-agent based itinerary planning, MIP),大多著墨在如何規劃出一或數條省能的資料收集路線,而忽略考慮 MA 收集大量資料所造成的傳輸延遲。此種設計並不利於即時性的應用環境。因此,本篇論文即針對此項缺點,提出一個能同時兼具能源與時間效益的多重行動代理人資料收集機制,稱之為 MMADCS (Multiple Mobile Agent based Data Collection Scheme)。MMADCS 仍以多數相關研究文獻所偏愛的樹叢(forest)結構為路徑規劃基礎,優先建構出數棵傳輸成本低廉的子樹(sub-tree),但為了避免不同子樹間傳輸資料量差異過大,導致整體傳輸延遲時間增加,故更進一步剪裁、調整各子樹的資料量,使彼此間更接近平衡,如此來縮短整體傳輸延遲時間、分攤節點耗能,延長網路壽命。模擬比較證實,我們所提的方法不論在節點能源耗損上、傳輸延遲時間上、以及兩者相乘效果上,均優於現存的單一行動代理人或多重行動代理人資料收集機制。

本論文的其餘架構安排如下:下一節將先簡述一些與本文相關的研究背景。第三節則詳細介紹我們所提的多重行動代理人資料收集機制 MMADCS。實際模擬與比較結果則於第四節中說明、展示。最後為本論文的結論。

2. 相關文獻研究

在進入探討本文所提多重行動代理人資料收集機制 MMADCS 之前,本章節則先簡述過去一些相關研究的作法,並分由單一行動代理人與多重行動代理人兩種資料收集機制切入。

2.1 單一行動代理人的資料收集機制

單一行動代理人的資料收集機制,主要應用於平面網路(flat network)架構,它試圖於網路節點間規劃出一條最短(佳)的資料收集路線,再以單一 MA 循序拜訪節點,收回感測資料。局部最近節點優先(Local Closest First, LCF)路徑規劃[8],由基地台開始,選擇距離當前節點最近的鄰點,將它視為規劃路徑的下一個拜訪節點,如此重複,最後建構出一條 MA 的回收路線。雖然 LCF 路徑規劃方式相當簡單,但由於僅依賴單一 MA 拜訪節點,路徑過長,最終將會形成較高的資料傳輸成本與傳輸延遲。

全域最近節點優先(Global Closest First, GCF)路徑規劃[8],則是選擇距離感測區域中心最近的節點,作為下一步(next hop)的目的地,以建構出 MA 回收路徑。GCF 路徑規劃機制雖亦簡單,但在路徑的建立過程中,可能因為所選擇節點的上下左右雜亂擺動,產生較 LCF 更混亂、且距離更長的路線,更不適合大量資料的收集。

2.2 多重行動代理人的資料收集機制

多重行動代理人的方法,是為了解決單一代理人的擴充性問題(scalability),透過多代理人的平行處理觀念,進行分散式的資料收集。早期提出的研究有以中心位置為基礎,有以方位為基礎,以及以基因演算法為基礎的路徑規劃機制。目前大多數多重行動代理人資料收集機制的設計,則建構在如何規劃省能的樹狀傳輸路徑上。

2.2.1 早期多重行動代理人之研究

以中心位置為基礎的多重行動代理人(Centre location-based multiple MA itinerary planning, CL-MIP)機制[9],是第一篇提出多重行動代理人概念的研究。CL-MIP 藉由中心拜訪位置 (Visiting Central Location, VCL)的觀念分批選定中心節點,並由中心節點將定義半徑內的鄰點納入同一群組。之後利用單一行動代

理人進行群組資料收集；如次重複以達成整體網路資料收集的目的。CL-MIP 因只簡單依據節點地理資訊分群，並未考慮每一個群組資料收集時的負載平衡，作法上屬貪婪法(greedy method)，故僅能得到局部最佳解。除此之外，群組半徑大小的選擇亦將影響整體效能，作者亦未對其最佳值作進一步探討。

以方位為基礎的角度間隙多重代理人(angle gap-based MIP, AG-MIP)資料收集機制[10]主要在改善前述CL-MIP的缺點。其假設前題在於資料的來源節點可能會集中位於相同的方位上。AG-MIP計算來源節點與基地台連線所形成的夾角(Angle Gap Factors, AGF)大小，用以表示來源節點彼此間地理相關程度的高低，並以具最小AGF值的兩點當成中心拜訪位置，配合設定的角度，由基地台劃出扇形資料收集區域。AG-MIP最後會將所有同方向的來源節點，劃入個別的群組中，代理人在各自區域的拜訪則仍採用單一代理人路徑規劃作法。方向性來源分群的多重代理人(directional source grouping based MIP, DSG-MIP)[11]提出了類似的作法；基地台首先計算資料來源節點的中心拜訪位置，並以特定半徑內的鄰近節點為起始點，朝著選定的中心拜訪位置，以某一角度規畫出扇形區域的群組。DSG-MIP依然採用現有單一代理人路徑規劃作法拜訪同區域的來源節點。AG-MIP和DSG-MIP雖都提供了以角度為考量的分群方法，但對於嚴重影響效能的角度值的選定卻一直未深入探討。

以基因演算法為基礎的多重代理人路徑規劃(Genetic Algorithm based MA Itinerary Planning, GA-MIP)使用了兩層式編碼(two-level coding) [12]方式，透過代表節點分群和代理人繞徑結果的起始基因，多次操作兩層式編碼模擬進化程序的交配和變異，搭配健身函數(Fitness function)來達到近似解。GA-MIP直接採用基因演算法分群，有較佳的性能、延遲時間和能源消耗，但相對地卻存在較高的計算複雜度。此外，健身函數本身也攸關收斂的速度，不利於講求時間效益的應用。

2.2.2 樹狀結構多重行動代理人之研究

近似最佳路徑規劃(Near-Optimal Itinerary Design, NOID)機制[13]，透過計算約束最小生成樹(constrained minimum spanning tree)的成本，得到近似最佳路徑，並且建議適當數量的MA，來使得整體資料融合成本(data fusion)達到最小化。NOID 為了能優先將離基地台較遠

的節點納入路線規劃，以節省資料收集成本，透過配合使用 *trade-off* 函式，考慮MA攜帶資料累積量與傳輸距離，每次選擇成本最小的節點，加入各別生成樹所屬的集合，以建構成傳輸路線。模擬結果雖顯示 NOID 在資料融合成本(data fusion cost)與整體回覆時間(overall response time)均明顯優於 LCF 和 GCF 兩機制，但它卻存在較高的計算複雜度。

避免壅塞的路徑規劃(Jamming Avoidance Itinerary Design, JAID)機制[14]，是為改善 NOID 的缺點而提出。JAID 採用類似貪婪的演算法，由基地台開始，以深度優先(depth first)的方式，嘗試尋找出近似最佳(near-optimal)的資料收集路線。並於建樹完成後，採用後序(post-order)拜訪方式收集節點資料。JAID 的設計除了考慮正常網路資料融合的問題外，亦同時探討小區域(small scale)傳輸壅塞或節點故障時之路線調整措施，兼具了安全(security)與強韌(robustness)的特性。但仍不適合應用於大量節點連續遭受干擾的網路環境。

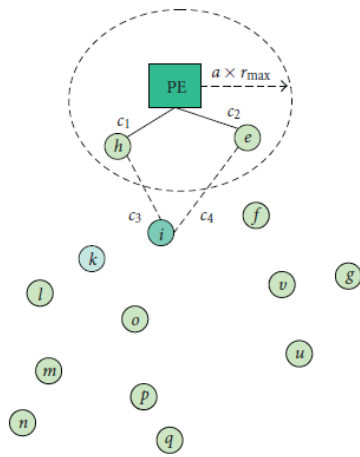
以樹為基礎的路徑規劃(Tree-based Itinerary Design, TBID)[16]同樣為樹狀結構的資料收集機制。它將無線感測區域切割成若干個以基地台為中心的同心圓，並由內向外建構出多條 MA 的資料收集路徑。TBID 的演算法雖類似 JAID，但設立了門檻值以平衡每一棵樹的成長。除此之外，TBID 更輔以適當的資料結構來降低其演算法的計算複雜度。TBID 雖能產生低負載量的 MA 路徑，但因仍以後序方式拜訪資料節點，對縮短資料傳輸延遲時間並沒有太大的幫助。

以 MA 複製增生為基礎的路徑規劃(Clone-based Itinerary Design, CBID)機制[15]，利用複製增生原始 MA 的功能，來平行進行樹上節點的資料收集。CBID 仍採用深度優先(depth first)的建樹方式，計算連接成本(Connection Cost, CC)最小的節點，逐步加入到現階段的生成樹。如圖一(a)基地台(PE)先以 $\alpha \times r_{max}$ 的範圍，決定生成樹的數量，其中 r_{max} 為節點最大傳輸半徑， α 為調整係數，其值介於 0 到 1 之間。範圍內的節點(h 和 e)則擔任生成樹的樹根。之後，由樹根開始，進行連接成本的計算比較，選擇加入後整體路徑傳輸總成本最小的節點來加入已建構完成的生成樹。舉例而言，若圖一(a)中路徑總成本 $C1+C3 < C2+C4$ ，則考慮將節點 i 連接至生成樹 h 上。至於生成樹連接成本的計算，則考慮 MA 攜帶累積資料量的傳輸成本。如圖一(b)顯示了節點

u 連接節點 v 後(參考圖一(c)), 生成樹 e 的連接總成本。其中 s 為 MA 的大小, d 為節點資料量, f 為資料融合係數, $C_{i,j}$ 代表節點 i, j 間的連線(距離)成本。

CBID 於樹狀傳輸結構建立完成後, 便由基地台開始, 沿各生成子樹分別送出 MA 以進行資料收集。MA 傳送過程中, 如遇分支節點, 便會再透過複製增生功能, 產生多個 MA (如圖一(c)), 如此重複, 直送到葉節點(leaf node)後, 才開始進行資料回收的動作(如圖一(d))。除此之外, CBID 在 MA 回收資料的過程中, 每個內部節點(internal node)都將等待融合其下所有子節點的資料後才會往回傳輸。

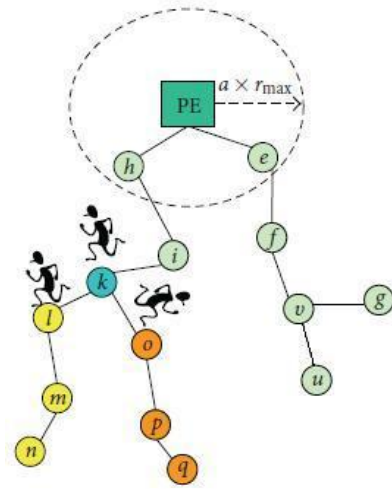
CBID 雖能以較高平行度的方式來收集資料, 但對於生成樹的建構成長, 卻未加以控制, 如此極易造成傳輸路徑上 MA 欲回收的節點資料過於龐大, 不但嚴重消耗節點能源, 縮減網路壽命, 更影響基地台資料處理的時效性。因此本篇論文即針對此項缺失, 提出了改良式機制, 詳細作法則在下一章說明。



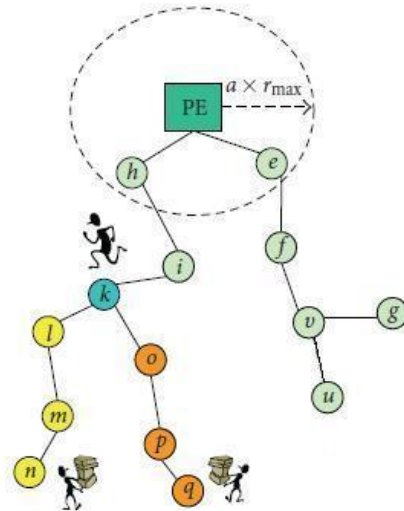
(a) 節點連接成本計算比較

$$\begin{aligned}
 CC_{(u,v)} &= s \cdot (C_{PE,e} + C_{e,f} + C_{f,v} + C_{v,u}) \\
 &+ (df + s) \cdot C_{u,v} + (2df + s) \cdot C_{v,g} \\
 &+ (3df + s) \cdot (C_{g,v} + C_{v,f}) \\
 &+ (4df + s) \cdot C_{f,e} + (5df + s) \cdot C_{e,PE}.
 \end{aligned}$$

(b) 節點 u 連接節點 v 的連接成本



(c) MA 的複製



(d) MA 平行處理, 進行資料收集。

圖一. CBID 資料收集機制 [15]

3. MMADCS 資料收集機制

本節將詳述所提多重行動代理人資料收集機制 MMADCS 的作法。由於 MMADCS 資料收集理念仍建立在樹叢結構上, 因此將分別由路徑規劃(即建樹)與資料收集兩階段來作說明。說明之前, 我們首先對網路環境做如下的假設:

3.1 網路環境假設

1. 基地台可視為擁有無限能源, 且廣播範圍足以涵蓋整個感測區域的特殊節點。
2. 其餘感測節點皆為同質性(homogeneous), 能源有限, 但具有可調變的無線傳收器(transceiver), 能以最經濟的方式傳輸資料。

3. 節點採隨機分佈建置在感測環境中。
4. 隨著 MA 拜訪的節點數增加，其所攜帶的資料量亦隨之成線性遞增。(亦即資料融合率為 1)
5. 基地台已知所有節點的地理資訊[7]。

3.2 路徑規劃(建樹)階段

由於MMADCS資料收集機制希望兼顧節點節能與即時傳輸的效果，故在路徑規劃上必須同時考慮節點最適傳輸距離與傳輸資料量的多寡。因此，對建立樹狀傳輸路徑的作法，基本上仍採用與CBID相同的理念，由基地台根據節點地理資訊計算，考慮最佳的連接成本來完成。但不同於CBID的是：由於CBID在建立樹狀傳輸結構時，並未考慮各子樹的平衡問題，如此極易造成節點數量龐大的子樹，因累積資料傳輸量過大，導致傳輸延遲時間遠遠落後其他子樹，反而影響整體效能。因此，MMADCS資料收集機制即希望進一步改善此缺點，於初步樹狀傳輸結構完成後，再一次進行各子樹的平衡度檢驗，讓各子樹的節點數差異不至於太大。如此，在MA回收資料時，即可有效降低整體的傳輸延遲時間，並平衡節點的能量消耗。實際效果會於模擬一節中展示。以下則先針對MMADCS如何進行必要的樹狀傳輸結構調整做說明。

3.2.1 樹狀傳輸結構的調整

誠如上述，MMADCS 會於初步樹狀傳輸結構完成後，進一步檢驗相鄰子樹的節點資訊，以尋求平衡各子樹的資料傳輸量，縮短網路的傳輸延遲時間。其作法是將符合以下五項條件的節點進行結構調整：

- (1) 該節點與鄰點分屬於不同子樹時。
- (2) 該節點距離基地台之步數(hop)與鄰點距離基地台的步數差值，需大於或等於1時。
- (3) 該節點所在子樹樹根(root)的資料累積量，扣除以該節點為樹根的子樹資料累積量，仍大於鄰近節點的樹根資料累積量時。
- (4) 該節點與鄰近節點的距離，小於該節點至其父節點(parent node)之距離時。
- (5) 該節點未曾被調整過時。

條件(1)主要確保僅考慮相鄰子樹的調整。條件(2)保證子樹調整後，資料傳輸的步數

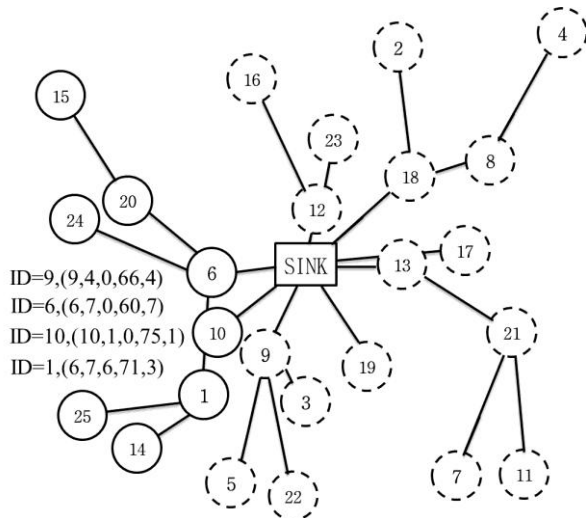
會變少，不至於偏離基地台，路徑越走越长。條件(3)則企圖使兩子樹的節點數量差距縮小，如此即可降低傳輸延遲之差異。條件(4)則希望節省調整後節點的傳輸耗能。條件(5)則是避免進行子樹調整時，產生乒乓效應(ping-pong effect)。

以下我們即以圖二為例來說明MMADCS如何進行樹狀傳輸結構的調整。假設圖二(a)表示經由CBID演算法初步建立完成的樹狀傳輸結構，且已知各節點的相關建樹資訊。為清楚表達MMADCS機制如何進行樹狀傳輸結構之調整，圖中僅就部份相關參與調整之節點列出其資訊內容。例如節點6之資訊表示為：Id=6,(6, 7, 0, 60, 7)，括號前之數字代表節點之編號，括號內第一個訊息表示該節點所屬子樹識別碼(亦即樹根節點之編號)；第二個訊息則為該子樹樹根的資料累積量，亦即該子樹的總節點數。第三個訊息代表該節點之父節點編號；0表示基地台。第四個值則是該節點與其父節點的傳輸距離。最後則代表含該節點及其子成員的資料累積量(節點數)。

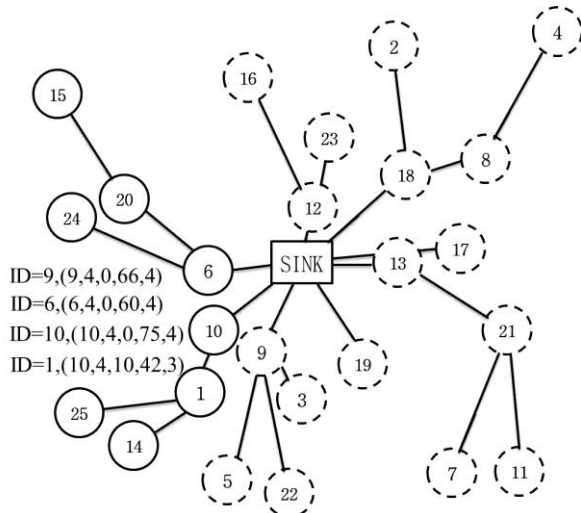
基地台根據各節點的初步建樹資訊，將節點與相鄰子樹節點一一進行比較；假設圖二(a)中節點1：Id=1,(6, 7, 6, 71, 3)的鄰樹節點分別為節點9和10(符合規則(1))，節點1距離基地台的步數為2，與兩鄰樹節點距離基地台的步數均為1相減，已符合規則(2)。此時再藉由規則(3)比較該樹與鄰樹的資料累積量差異，決定是否將節點1之子樹調整至鄰樹節點上；計算節點1連同其子樹節點資料累積量為3(子節點編號分別為14和25)，而該節點所在子樹樹根(節點編號為6)的資料累積量則是7，兩者相差資料累積量為4，大於節點10的樹根資料累積量1，故可考慮將節點1移接至節點10的鄰樹上，以縮減兩樹資料累積量的差異(節點9因樹根資料累積量為4，並未滿足條件(3))。最後，考慮規則(4)以確保節點1連接到新父節點10的距離是否小於與原父親節點6的距離即成。

經過上述規則篩選，我們確實發現，調整前，節點6的子樹資料累積量為7，是所有子樹中成員數量最多的一支，而節點10單獨為一棵子樹之樹根，資料累積量僅有1。比較兩子樹調整前原本資料差異量為6；調整後差距變為0。同時，節點6的子樹成員減少，也不再是成員數最多的子樹，各子樹資料處理量接近相同，將使得整體收集資料的延遲時間縮短。後續的模擬比較，將證實我們MMADCS機制利用樹狀結構的再調整，確實增加了時間與能源效

益。



(a)調整前(以 CBID 方式建立之樹狀傳輸結構)



(b)調整後(以 MMADCS 調整後之樹狀傳輸結構)

圖二.樹狀結構之調整

3.3 資料收集階段

MMADCS在樹狀路徑規劃調整完成後即可進入資料收集階段。由於CBID是以MA增生複製為基礎的多重行動代理人資料收集機制，並未考慮如何快速由MA收集資料帶回基地台，因此並不適合於即時性的應用。本文的MMADCS機制則改善了上述缺點，利用基地台全域廣播的特性，將MA一次送往各個節點。節點於收到MA後，即可先進行區域性(local)資料收集，之後，再由葉節點(leaf node)開始，循樹狀結構收集送至根節點，直至基地台為

止。過程中，所有中繼節點(internal node)都必須等待融合處理其所含子節點的資料後，方可再往回傳輸。

以圖二(b)為例，當基地台廣播MA後，各節點即可先進行區域性資料收集，之後，假設節點編號為18與8的子樹，會分別收到其子節點2與4的資料並進行融合，但節點18則仍需等待融合處理節點8所傳來的資料後，才能再往回傳送至基地台。

4. 模擬與比較

為了證明本文所提MMADCS資料收集機制有其實用價值，本節中我們將展示與過去一些作法進行模擬與比較的結果。模擬環境與參數說明如下：

4.1 模擬環境與參數設定

一切模擬均透過C#程式實作，在400*400平方公尺的感測區域內，以隨機方式部署不同數量(100~700個)的感測節點，並於每一模擬環境下，取其50次模擬的平均值為最後結果。

比較對象則同時選擇單一代理人與多重代理人兩種協定來對照。在單一代理人方面我們僅以LCF為代表，此乃因先前之研究已證實LCF較優於GCF[9][13]，故本文不再作比較。至於多重代理人方面，除了與原始JAID[14]及CBID[15]機制互相比較之外，為了更確定本文所提樹狀調整之功用，我們另以CBID為基礎，增加兩種機制的模擬：其一為於CBID演算法所建立之樹狀結構下，加入本文的結構調整條件後，再以CBID增生複製MA的方式來收集資料(模擬結果圖中以CBID+樹調整代表之)。其二則直接在CBID所建立之原始樹狀結構下(不經樹狀調整)，經由基地台以全域廣播方式送出MA來同時收集資料(模擬結果圖中以CBID+廣播MA代表之)。

模擬比較重點則以傳輸延遲(transmission latency)時間、能源消耗量、以及是否兼顧前述兩項因素(即EDP, Energy Delay Product)來評斷機制的優劣。傳輸延遲時間的計算則自基地台初始化MA開始，至所有的MA收集完各節點資料返回基地台為止。能源消耗的計算包括資料傳輸、接收、融合(aggregation)，以及節點感測資料存取所需耗能之總和。至於能源模式則參考採用[17]所提模式。基本上採用自由空間(free space)模式計算，但當兩節點距離大於門

檻值(約87.7公尺)，則改以多路徑(multi-path)傳輸模式。至於節點資料融合係數/則設為1，亦即MA收集資料量隨著拜訪過的節點數增加而呈線性成長。表一綜合了本文模擬所需的各項參數值。以下則為節點能源計算模式：

$$E_{TX}(k,d) = E_{Tx-elec} * k + E_{Tx-amp}(d) * k$$

$$E_{RX}(k,d) = E_{Rx-elec} * k$$

$$E_{Tx-amp}(d) = \begin{cases} \epsilon_{fs} * d^2, & d \leq d_0 \\ \epsilon_{mp} * d^4, & d > d_0 \end{cases} \text{ where } d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}}$$

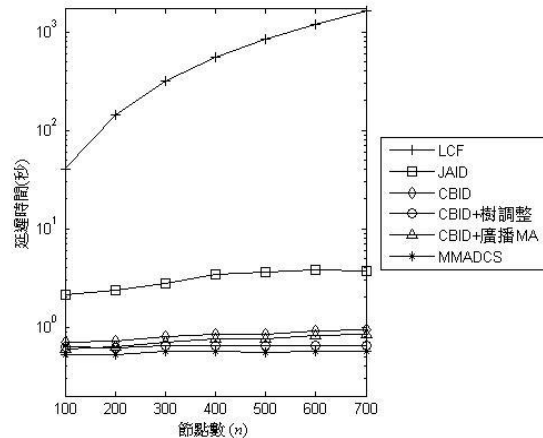
表一 參數設定

定義	數值
感測區域大小	400*400m ²
節點數目	100~700
節點傳輸範圍	100 m
節點能源	1 J
傳輸耗能(per byte)	50 nJ
接收耗能(per byte)	10 nJ
資料融合耗能(per byte)	5 nJ
感測資料存取耗能(per byte)	2 nJ
資料傳輸速率	250 Kbps
MA 在節點處理資料的延遲	50 msec
初始產生 MA 的延遲	10 msec
MA 的大小	1000 bytes
節點感測資料大小	200 bytes
資料融合係數 f	1
自由空間傳輸放大係數 ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
多路徑傳輸放大係數 ϵ_{mp}	0.0013pJ/bit/m ⁴

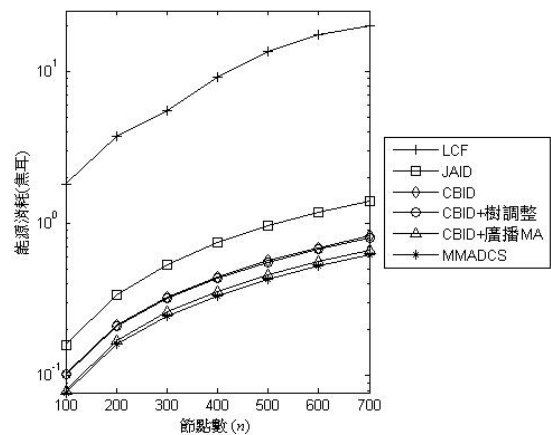
4.2 模擬與結果比較

圖三顯示了上述各種資料收集機制的平均傳輸延遲時間。其中 LCF 的延遲時間遠超過其他五種方法，主要原因乃是因其只透過單一代理人負責拜訪所有節點，故所需傳輸延遲時間自然比其他多重代理人的方法要來得長。而 JAID 延遲時間之所以大於 CBID，主要原因則是因為 CBID 得利於以複製 MA 為基礎的資料收集方式，資料處理的平行度增加，延遲時間相對縮短。至於與 CBID 相關的不同方式比較，我們發現，即使透過廣播 MA(CBID+廣播 MA)所節省下來的 MA 增生複製時間，亦沒有透過結構之調整(CBID+樹調整)所獲得的效益來得大。究其原因乃是 CBID 若未經樹的結構調整，時間皆消耗在等候節點較多的分支資料處理上；CBID+樹調整，即使多花一些 MA 增

生複製的時間，由於 MA 平行處理較少的資料量，補償後整體延遲時間仍可縮短。更遑論與 MMADCS 不但做了結構之調整也同時採用全域廣播 MA 的方式之比較了。MMADCS 平均減少延遲時間約 33%。

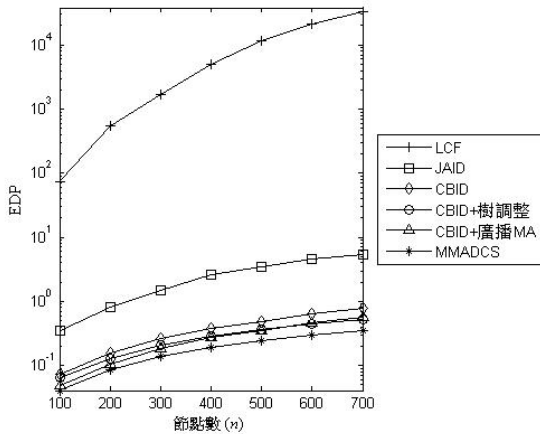


圖三 各機制傳輸延遲時間之比較



圖四 各機制能源消耗之比較

圖四則顯示各機制的能源消耗比較。LCF 仍將因其為單一代理人的劣勢，而付出較高能源的浪費。CBID 因 MA 的複製關係，使得複製後的 MA 僅會帶著少量的資料回傳；而 JAID 的 MA 則累積收集樹叢所有節點的資料，不斷遞增資料量的結果，快速消耗了節點能源。另外，CBID 透過廣播 MA 的方式，將能省下節點傳遞 MA 的耗能，故能源消耗低於原始的 CBID 機制。至於 CBID 使用樹調整的方法，由於樹彼此間整體結構差異變動不大，能源消耗也相差不大。但若同時考慮 MMADCS 的兩種措施(MA 廣播與樹狀結構調整)，則節能效果較明顯，可省下約 25%的能源。



圖五 各機制 Energy*Delay 之比較

圖五說明了各種機制的 EDP 成本 (energy*delay cost)。顯然地，本文所提的 MMADCS 多重行動代理人資料收集機制，相較於 CBID，其改善幅度約 51%，確實可兼顧網路節能效果與回收資料的即時性。

5. 結論

本論文中，我們提出一個兼具網路節能效果與回收時效性的多重行動代理人資料收集機制 MMADCS。MMADCS 以 CBID 機制規劃的樹狀收集結構為基礎，透過進一步的子樹剪裁調整，儘可能平衡每條傳輸路徑的資料處理量，藉以平均節點耗能，延長網路壽命；更配合以廣播 MA 的方式，來縮短整體資料傳輸延遲時間，以求滿足即時應用。模擬比較證實，結合兩者的作法，相較於現有的一些單一行動代理人或多重行動代理人機制，確實有較佳的 Energy*Delay 成本。

參考文獻

- [1] Romer, K., and Mattern, F., "The Design Space of Wireless Sensor Networks," *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 11, No. 6, pp. 54-61, 2004.
- [2] Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., and Pottie, G.J., "Protocols for Self-Organization of A Wireless Sensor Network," *Personal Communications, IEEE*, Vol. 7, No. 5, pp. 16-27, 2000.
- [3] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E., "Wireless Sensor Networks: A survey," *Computer Networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, 2002.
- [4] Akkaya, K., and Younis, M., "A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks," *Elsevier Ad Hoc Network Journal*, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, 2005.
- [5] Qi, H., Iyengar, S.S., and Chakrabarty, K., "Multiresolution Data Integration Using Mobile Agents in Distributed Sensor Networks," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 31, No. 3, pp. 383-391, 2001.
- [6] Xu, Y., and Qi, H., "Distributed Computing Paradigms for Collaborative Signal and Information Processing in Sensor Networks," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 64, No. 8, pp. 945-959, 2004.
- [7] Chen, M., Kwon, T., Yuan, Y., Leung, V.C., "Mobile Agent Based Wireless Sensor Networks", *Journal of Computers*, Vol. 1, No. 1, pp. 14-21, 2006.
- [8] Qi, H. and Wang, F., "Optimal Itinerary Analysis for Mobile Agents in Ad Hoc Wireless Sensor Networks," *International Conference on Communications, IEEE*, Vol. 1, pp. 147-153, 2001.
- [9] Chen, M., Gonzalez, S., Zhang, Y., Leung, V.C.M., "Multi-Agent Itinerary Planning for Wireless Sensor Networks," *Springer, LNCS 22*, pp. 584-597, 2009
- [10] Cai, W., Chen, M., Wang, X., Kwon, T., and Choi, Y., "Angle Gap (AG) Based Grouping Algorithm for Multi-Mobile Agents Itinerary Planning in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of Korea Information and Communications Society Fall Conference '09*, 2009.
- [11] Chen, M., Gonzalez, S., Leung, V., "Directional Source Grouping for Multi-Agent Itinerary Planning in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the International Conference on ICT Convergence (ICTC)*, pp. 207-212, 2010.
- [12] Cai, W., Chen, M., Hara, T., Shu, L., "GA-MIP: Genetic Algorithm Based Multiple Mobile Agents Itinerary Planning in Wireless Sensor Network," *Proceedings of 5th International Conference on Wireless Internet. (WICON)*, pp. 1-8, 2010.
- [13] Gavalas, D., Mpitziopoulos, A., Pantziou, G., Konstantopoulos, C., "An Approach for Near-Optimal Distributed Data Fusion in Wireless Sensor Networks," *Springer, Wireless Network*, Vol. 16, No. 5, pp. 1407-1425, 2009.
- [14] Mpitziopoulos, A., Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Pantziou, G., "JAID:

An Algorithm for Data Fusion and Jamming Avoidance on Distributed Sensor Networks,” *Pervasive and Mobile Computing*, pp. 135–147, 2009

- [15] Mpitziopoulos, A., Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Pantziou, G., ”CBID: A Scalable Method for Distributed Data Aggregation in WSNs,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2010, pp. 1-14, 2010.
- [16] Konstantopoulos, C., Mpitziopoulos, A., Gavalas, D., Pantziou, G., ”Effective Determination of Mobile Agent Itineraries for Data Aggregation on Sensor Networks,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, Vol. 22, No. 12, pp. 1679–1693, 2010.
- [17] Muruganathan, S.D., Ma, D.C.F., Bhasin, R.I. and Fapojuwo, A.O., “A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, No. 3, pp. 8-13, 2005.