

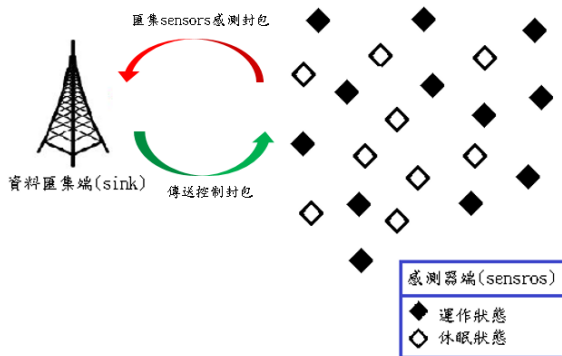
劇烈變動環境之無線感測網路服務品質控制方法

王皓立^a、田耀東^a
國立嘉義大學資訊工程學系^a

摘要—在無線感測網路中，感測器可能因為毀損或新增，造成感測器數量不固定，導致監測資訊接收不足或過多。為了讓無線感測網路能有穩定的服務品質(Quality of Service, QoS)，前人提出服務品質控制方法，控制資訊接收過多或不足。在惡劣的環境下，感測器可能因為電量耗盡或天災等意外因素而死亡，為了避免感測器死亡多而無法維持 QoS，系統會定期的新增感測器。在此變動劇烈的環境下，本研究提出一套調整感測器休眠比例的方法，來維持服務品質控制。

一、簡介

無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由一個資料匯集端(sink)和多個感測器(sensors)所組成，如圖一所示。在此環境中資料匯集端具有較好的資料處理能力，以及電量無限制等特性；而感測器則具有微型化、低成本、感測、電量有限及較低計算功能等特性。當感測器處於運作狀態時，感測器會將其感測範圍內所感測到的環境資訊，如溫度、濕度、照度、壓力或氣體濃度等資訊，透過無線網路傳輸協定將資訊封包傳給資料匯集端；資料匯集端收集到感測器端傳送的感測封包後，會根據需求傳送控制封包給感測器端，以調整感測器的運作狀況，藉此達到收集資料的目的。



圖一：無線感測網路架構圖

表 I
感測器各元件功能

元件類別	元件功能
中央處理元件	資料的運算及處理，各元件間的控制與協調，如感測元件及無線通訊元件的啟動或關閉。
感測元件	負責感測環境資訊，如溫度、濕度、照度、壓力與氣體濃度。
無線通訊元件	負責控制封包或資訊封包的接收與發送。
電力供應元件	負責感測器各元件的電力供應，其電力來源通常為電池，故電力資源有限。

無線感測網路常應用於人類無法長時間監控的環境中，如高風險性的森林、軍事戰爭區域、工業系統安全。在感測器電量有限的條件下，為了讓無線感測網路的網路存活週期在上述環境中盡可能的達到最大值，必須將處於運作狀態的感測器控制在特定數量，使其能達到提供足夠的資訊及維持系統運作的兩個目的。因此控制感測器參與的數量就能控制無線感測網路的服務品質(Quality of Service, QoS)[1]。在極端惡劣的環境中，感測器除了會因為電量耗盡而無法使用外，更可能因為天災、人為及其他意外因素造成感測器喪失功用。因此，本研究針對此環境，訂定了一個可以在劇烈變動環境之無線感測網路中維持服務品質控制的方法。

本文的架構如下：第二章介紹無線感測網路在服務品質控制及省電等其他相關研究；第三章介紹本研究所提出的劇烈變動環境之無線感測網路服務品質控制方法；第四章為本研究提出的方法與相關研究中方法的比較實驗模擬結果；最後為本研究結論。

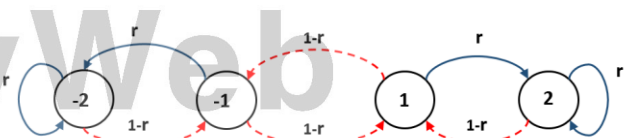
二、相關研究

本章將討論無線感測網路中服務品質控制以及電量消耗議題的相關研究，並劃分為三小節。第一節將介紹 Gur Game 演算法[1]及 Shuffle 控制法[2]，第二節將討論快速收斂的服務品質控制方法，第三節則討論減少電量消耗的服務品質控制。

2.1 Gur Game 演算法與 Shuffle 控制法

2.1.1 Gur Game 演算法

為了在感測器總數未知且感測器間不互相通訊的情況下維持服務品質，前人提出了 Gur Game 演算法[1]來克服此問題。在 Gur Game 演算法的環境中，使用者須先設定一個 QoS 目標值，而所有感測器在網路初始階段會隨機選擇其運作狀態，並分布於記憶體大小為 2 的有限狀態機中，其中分布於狀態 1 及 2 的感測器為運作狀態，而分布於狀態 -1 及 -2 的感測器為休眠狀態，有限狀態機如圖二。運作狀態的感測器會開啟所有元件進行感測及傳送資訊的功能，休眠狀態的感測器則會關閉感測元件不進行感測作業，僅執行接收來自資料匯集端封包的無線通訊元件功能。



圖二：記憶體空間為 2 的有限狀態機

Gur Game 演算法為了讓整個無線感測網路環境達到使用者所設定的 QoS 目標值，會藉由目前運作的感測器數量及 QoS 目標值而設定一個獎勵函式(1)，資料匯集端再由此獎勵函式計算出要廣播給所有感測器的機率值 r ，其中 kt 為目前運作的感測器數量， n 代表 QoS 目標值。

$$r(t) = 0.2 + 0.8 \exp(-0.002(kt-n)^2) \quad (1)$$

感測器接收到資料匯集端所廣播的 r 值後，會產生一個隨機的機率值與 r 值做比較，並依照感測器當下所在的狀態，選擇是否改變狀態。當感測器本身的機率值小於 r 值時，感測器狀態則依圖二中的實線方向移動，反之則依虛線方向移動。Gur Game 演算法經過長時間的調整震盪之後，運作的感測器數量能逐漸收斂至使用者設定的 QoS 目標值。但也因為調整震盪的時間過長，進而衍伸出電量消耗不均、收斂時間過長等問題。

2.1.2 Shuffle 控制法

Gur Game 演算法執行一段時間後，其轉換機率會越接近 1，即感測器保持原來狀態的機率越大，此時感測器的狀態多數會處於邊緣的狀態(即圖二中的 2 和 -2 狀態)，造成運作狀態的感測器會持續運作制電量耗盡。而 Shuffle 控制法會在經過固定的回合數後，讓處於 2 和 -2 狀態的感測器狀態交換，及運作感測器轉換至休眠狀態，休眠感測器轉換至運作狀態，狀態交換後再利用 Gur Game 演算法讓運作感測器數量調整至目標值。由此週期性交換的方式可以分散感測器消耗的電量，避免只有部分感測器持續消耗電量，達到省電的效果，並延長網路的生命週期。

2.2 快速收斂的服務品質控制方法

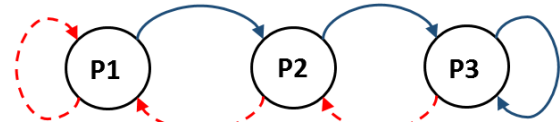
Gur Game 演算法每次的實驗約需 4000 回合左右的時間，運作的感測器數量才能達到 QoS 目標值，在尚未達到收斂的期間，感測器持續地在休眠及運作狀態間轉換，使得感測器的電量大量的消耗。為了克服此問題，前人的研究提出了 RCQC[3]此方法，透過調整機率值的方法來達到快速收斂的目的。在原始的 Gur Game 演算法中，若運作的感測器數量越接近 QoS 目標值時，獎勵函式產生的機率值 r 則會越接近 1，讓運作的感測器數量達到穩定不再變動。但是 Gur Game 演算法卻無法判別運作的感測器數量接近 QoS 目標值時是運作感測器數量過多的情形，抑或是運作感測器數量過少的情形，所以調整時會將所有運作及休眠的感測器皆進行調整，導致收斂時間過長，增加額外的電量消耗。而 RCQC 法增加了判別目前運作感測器數量是否過多(過少)，當運作感測器數量過多時，則只針對目前處於運作狀態的感測器進行調整，休眠狀態的感測器維持原狀態不進行調整；反之，當運作感測器數量過少時，則只針對目前處於休眠狀態的感測器進行調整，運作狀態的感測器維持原狀態不做改變。此外，RCQC 法亦針對收斂期間廣播的機率值 r 進行調整，RCQC 法將機率值 $r = r-x$ 的方式調整機率值大小，其中 x 為介於 0~1 的值，以此方式讓收斂期間各感測器轉換狀態的機率值相對增加，進而加快收斂速度達到減少電量消耗的目的。

2.3 減少電量消耗的服務品質控制方法

Gur Game 演算法在感測器大量死亡的情形下，便無法維持 QoS 目標值，且感測器即使處於休眠狀態，依舊需要接收來自資料匯集端的控制封包資訊，無法真正的休眠，造成多餘的電量消耗。為此，前人提出了 ACK 控制法[4]與 Gureen Game 演算法[5]以不同的方式避免感測器消耗多餘的電量，達到真正的休眠。

2.3.1 ACK 控制法

ACK 控制法捨棄了 Gur Game 演算法的獎勵函式機制，並將有限狀態機改成 P1、P2 及 P3 三個機率狀態，如圖三所示，其中這三個機率狀態的關係為 $P1 < P2 < P3$ 。

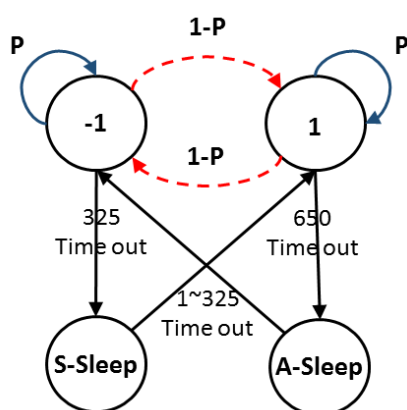


圖三：ACK 控制法的有限狀態機

在 ACK 控制法的環境下，所有感測器會隨機分布於三個機率狀態中，並決定感測器在當下的回合是否處於運作狀態，其中分布於機率值越大的狀態機中的感測器則越容易處於運作狀態，反之則否。此時處於運作狀態的感測器會立即傳送資訊封包給資料匯集端，資料匯集端則會立即統計目前收到運作感測器資訊封包數量是否達到 QoS 目標值，若收到的資訊封包數量大於 QoS 目標值時，資料匯集端會回傳一個懲罰 ACK 封包給感測器，要求感測器沿著圖三中的虛線方向移動，使感測器在下一回合持續運作的機率降低；若資料匯集端收到的資訊封包數量小於 QoS 目標值時，資料匯集端則會回傳一個獎勵 ACK 封包給感測器，要求感測器沿著圖三中的實線方線移動，讓感測器在下一回合保持運作狀態的機率提高，藉此來維持網路的 QoS。而休眠的感測器則在此回合徹底的休眠，不必開啟感測元件，也不必傳送或接收資訊封包，避免電量的消耗，直到下一回合再依機率值決定是否繼續休眠。

2.3.2 Gureen Game 控制法

Gureen Game 法將感測器的狀態分為 Active、Standby 和 Sleep 三種狀態，其中 Standby 狀態與 Gur Game 的休眠狀態相同，而 Sleep 狀態則關閉了感測器大部分功能，且不須接收來自資料匯集端的控制封包。Gureen Game 法還能依據感測器數量過多或過少的情況調整獎勵機率(P 值)，當運作感測器數量過少時，獎勵機率值會調整為負值，並依據獎勵機率值轉換處於 Standby 狀態的感測器，反之，當運作感測器數量過多時，獎勵機率值會調整為正值，並依據獎勵機率值轉換處於 Active 狀態的感測器。Gureen Game 法中每個感測器皆擁有各自的計時器，當計時器倒數結束時，感測器會從原本的狀態轉換至下一個狀態，藉此來達到電量平衡與省電的效果，如圖四。



圖四：Gur Game 的有限狀態機

三、劇烈變動環境之無線感測網路服務品質控制方法

如第一章所提及的，無線感測網路常應用於人類無法長時間監控的環境，其中在一些極端的環境中，經常會發生感測器因天災或一些意外因素故障無法使用，且短時間內又無法將故障的感測器修復或更替。本研究針對此劇烈變動的環境設計了一套無線感測服務品質控制方法，並將此方法分成：快速收斂、休眠比例判斷與深睡上鎖機制三個部分於接著的三個小節中說明。

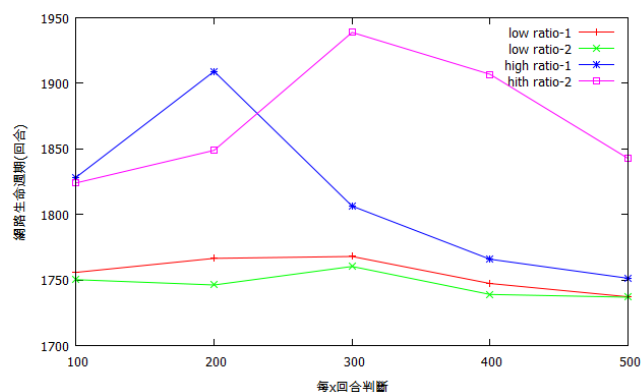
3.1 快速收斂

在無線感測網路中，感測器可能會因為損壞或新增而導致感測器的總數不固定，因此本方法承襲 Gur Game 法能在總數未知的情況下達到收斂，將感測器狀態分成運作(狀態 1、狀態 2)與休眠(狀態-1、狀態-2)四種狀態。而 Gur Game 法在調整獎勵機率值的機制上有調整幅度太小，且無法依照環境所需準確調整獎勵機率值的問題，最後導致收斂速度太長，增加電量消耗。因此，本方法參考前人所提出的 RCQC 法[3]，每回合資料匯集端會統計感測器所傳回的封包數，判斷目前運作的感測器數量是過多還是過少，調整獎勵機率值，縮短達到目標 QoS 值所需的時間，達到減少電量消耗的目的。

3.2 休眠比例判斷

當系統達到收斂後，本方法會將部份處於休眠狀態的感測器轉換至深睡狀態，其餘的休眠感測器則繼續維持在淺睡狀態，讓系統在運作感測器數量不足時，能及時喚醒淺睡狀態的感測器來補充系統所需。而休眠感測器中深淺睡比例與深睡時間的取捨，又有其優缺點。圖五是系統在 4 種不同深睡比例在不同深睡時間模擬 2000 回合的結果，圖中 X 軸為每幾回合判斷一次深淺睡，即深睡時間，Y 軸為網路生命週期，low ratio-1 和 low ratio-2 分別代表兩種較低的深睡比例，high ratio-1 和 high ratio-2 則代表兩種較高的深睡比例。由圖中可以看出三個現象，第一個現象是深睡比例較高的線段，網路生命週期都比深睡比例低的線段還要長，造成此現象的原因是深睡比例越高，深睡的感測器越多，節省的電力越多，因此生命週期越長。第二個現象是四條線段都約略呈現山形，判斷回合數較短時，感測器切換深淺睡的

次數就越多。舉例來說，若每 100 回合切換一次深淺睡，則 2000 回合需切換 20 次；若每 300 回合切換一次深淺睡，則 2000 回合需切換 6 次，以此類推，每次切換就會造成一段時間的震盪，震盪越多次消耗的電量越多，進而影響網路生命週期；但並非判斷週期越長，生命週期就會越長，當判斷週期越長，則處於深睡階段的感測器深睡的時間越長，直到模擬後期從深睡階段甦醒的感測器數量已不足系統所需的 QoS 目標值，而造成網路生命週期縮短。第三個現象則是線段中最高值與最低值間的落差，從圖中可以看出深睡比例高的線段其最高值與最低值間的落差，比深睡比例低的線段還要明顯，而造成此現象的原因與判斷網路生命週期的方式有關，本研究對網路生命週期的定義為：能維持 QoS 目標值的最後一個回合。在模擬末期感測器電量耗盡無法達到 QoS 值的時機都差不多，這時只能依靠處於深睡狀態的感測器甦醒來補足 QoS 值。判斷回合週期較短的，深睡感測器就會比較早甦醒，反之，判斷回合週期較長的，深睡感測器就會較晚甦醒。而深睡比例越大，則一次甦醒的感測器就越多，因此能維持的網路生命週期就越長，深睡比例較小的，甦醒的感測器數量會較少，能延長的網路生命週期也會較短。



圖五：網路運作流程圖

本研究由圖 3.2 的三個現象發現，休眠感測器在深淺睡比例與深睡時間兩者間的取捨，並沒有絕對的關係，必須隨著環境的不同而選擇最佳的組合，才能達到最佳的結果。

3.3 深睡上鎖機制

在原始的 Gur Game 法中，處於休眠狀態的感測器依舊會接收來自資料匯集端的控制封包，而造成額外的電量消耗，因此，本方法會在系統達到收斂時，將部分的休眠感測器轉換至深睡狀態，即如同 Gureen Game 法[5]中的 Sleep 狀態，感測器會關閉大部分功能，也不需要接收資料匯集端的控制封包。本方法在系統第一次達到收斂時，會依照資料匯集端所統計的感測器死亡率，計算出相對應的比例，再依據此特定比例將部分感測器轉換至深睡狀態。轉換至深睡狀態的感測器會經過固定的睡眠時間後重新轉換至休眠狀態，並重新判斷是否要維持深睡狀態或休眠狀態；而未轉換至深睡狀態的休眠感測器則繼續運行 Gur Game 演算法維持系統平衡。在轉

換過程中，為了避免系統達到收斂後會持續將休眠狀態的感測器轉換至深睡狀態，造成系統無法維持服務品質，本方法在此過程中會將所有判斷過的休眠感測器加入上鎖的機制，讓未轉換至深睡狀態的休眠感測器不會全部轉換至深睡狀態，使系統有足夠的休眠感測器可以隨時替補喪失功能的感測器。

四、實驗模擬結果

本研究實驗分成兩個部分，第一部分針對 QoS 達成率進行比較，第二部分針對剩餘電量的部分進行比較。本研究劇烈變動的環境是參考[1]中所提及的生死模型，環境中所有的感測器壽命由平均值 100 的指數分布產生，系統初始的感測器總數為 100，目標值區間為 $35 \pm 10\%$ (即 32~38)。

表 II
模擬實驗參數

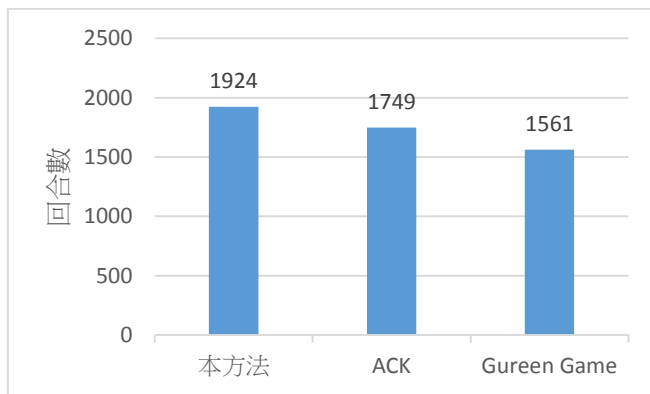
感測器初始總數	100
新增數量/回和數	50 個/每 200 回合
目標值區間	$35 \pm 10\%$
執行回合數	2000
初始電量	20000 單位

4.1 QoS 達成率比較

此部分的實驗為比較本方法與 ACK 法及 Gureen Game 三種方法在運作 2000 回合後的 QoS 達成率。QoS 達成率的計算方式為：

$$\text{QoS 達成率} = \frac{\text{達到目標值區間的回合數}}{\text{總回合數}} \quad (2)$$

圖六為 2000 回合中，本方法與 ACK 法及 Gureen Game 法達成目標值區間的回合數，圖中可看出本方法達成率為 96.2%，而 ACK 法及 Gureen Game 法達成率分別為 87.45% 與 78.01%。



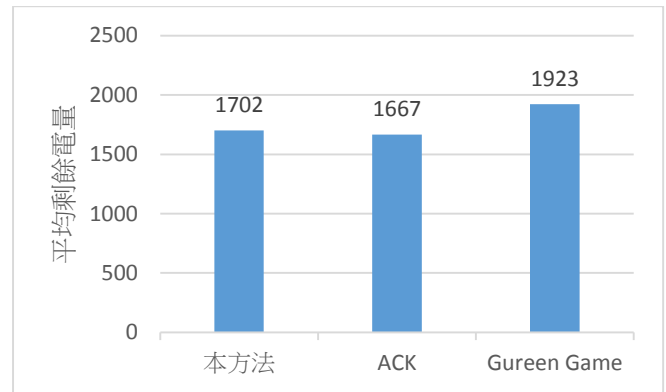
圖六：QoS 達成率

由於本方法收斂時間較快，且考慮到環境的變化，適時的調整休眠感測器的數量。ACK 法在執行過程運作感測器的數量會持續震盪，而無法維持穩定。Gureen Game 法在原始的環境中，感測器不會因天災等意外因素死亡，所以運作感測器的數量不會快速減少，而在此變動劇烈的環境下，Gureen Game 法則無法配合運作感測器死亡的速度，造成系統來不及回復平衡。故在 QoS

達成率方面本方法的模擬結果會優於 ACK 法與 Gureen Game 法。

4.2 剩餘電量比較

此部分的實驗為比較本方法與 ACK 法以及 Gureen Game 法在執行 2000 回合後，所有存活感測器的平均剩餘電量。本實驗的電力消耗模型參考自[6]，此電力消耗模型目前被廣泛地運用於無線感測網路中，在[6]中提及感測器在接收或傳送封包時所消耗的電量是幾乎相同的。



圖七：感測器平均剩餘電量

從圖七可以明顯看出 Gureen Game 法的平均剩餘電量高於其他兩個方法，原因是因為 Gureen Game 法比其他兩個方法有更多的時間無法達到收斂，而此時 Gureen Game 法的多數感測器都處於 Sleep 狀態，因此能保留較多的電量。

結論

本研究針對無線感測網路中劇烈變動的環境，提出了一套服務品質控制方法。快速收斂的部分可以避免感測器在劇烈環境中死亡速度快的問題，深淺睡鎖定機制可適時的調整感測器的休眠數量，減少額外的電量消耗，輪替運作則可避免「睡者恆睡，醒者恆醒」的問題，平均電量消耗，延長生命週期。

參考文獻

- [1] R. Iyer, L. Kleinrock, "QoS Control for Sensor Networks," *IEEE International Conference on Communication (ICC)*, vol. 1, 2003, pp. 517-521.
- [2] R.-G. Tsai, H.-L. Wang, "Shuffle: An Enhanced QoS Control by Balancing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks," *International Conference on Grid and Pervasive Computing (GPC)*, 2010, pp. 603-611.
- [3] Y.-L. Hsu, R.-G. Tsai, H.-L. Wang, "Rapid Convergence QoS Control in Wireless Sensor Networks," *Taiwan Academic Network Conference*, Oct. 2010.
- [4] J. Frolik, "QoS Control for Random Access Wireless Sensor Networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2004.
- [5] M. Ayers, Y. Liang, "Gureen Game: An Energy-Efficient QoS Control Scheme for Wireless Sensor Networks," *Green Computing Conference and Workshops*, 2011.
- [6] "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 (LR-WPANs)," *IEEE Computer Society*, 2006.