

# WSNs에서 견고한 적응형 시간 제어 프로토콜 설계

박재복\*, 김현태\*\*, 조기환\*

\*전북대학교 전자정보공학부

\*\*BK21 전북 전자정보 고급인력양성 사업단

e-mail:camelk@dcs.chonbuk.ac.kr

## Design of an Adaptive and Robust Timing Control Protocol in WSNs

Jae-Bok Park\*, Hyun-Tae Kim\*\*, Gi-Hwan Cho\*

\*Division of EIE, Chonbuk National University

\*\*Advanced Graduate Education Center of JEIT-BK21

### 요 약

데이터 병합은 무선 센서 네트워크에서 발생하는 통신량 축소로 에너지 소비의 최소화를 달성하기 위해 적용되는 기법이다. 이런 데이터 병합의 시간 제어는 종단간 지연시간을 최적화하면서 병합 시간의 적응적인 조절로 WSNs의 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 따라서 본 논문은 WSNs에서 데이터 정확성과 종단간 지연시간 사이에 발생하는 상충조건의 최적화를 위해 무선 손실을 고려한 적응성 있는 타이밍 제어 프로토콜을 설계하였다. 이 프로토콜은 무선 손실의 변화에 적응성을 있는 데이터 병합을 수행할 수 있도록 선택적 참여율과 중요도를 결정함으로써 네트워크 전체에 패킷 전송 횟수를 균등하게 분배하여 전체 네트워크 안정성을 높일 수 있도록 하였다.

### 1. 서론

최근 무선 센서 네트워크(WSNs)의 대규모 성장과 센서 기술, 정보처리 기술, ad hoc 토폴로지 등의 급속한 발전으로 분산 데이터의 측정 및 수집을 위한 수많은 응용의 활용기회가 증가되고 있다[1][2]. 이러한 네트워크에서 각 센서 노드들은 데이터 지역적으로 수집하고 협업을 통하여 응용의 목적을 달성할 수 있게 한다.

에너지 효율적인 병합은 WSNs에서 데이터의 정확성과 네트워크의 수명에 중요한 기술이다. 병합 데이터 트리(DAT) 구조는 통신의 상당한 부분을 줄일 수 있기 때문에 데이터 질의 과정에서 에너지 소비, 정보 정확성, 지연시간에 대한 효율성을 높이기 위해 많이 사용된다. 그림 1은 수집 데이터를 병합하고 중계하여 결과응답을 싱크 노드에 전달하기 위한 DAT 구조의 예이다.

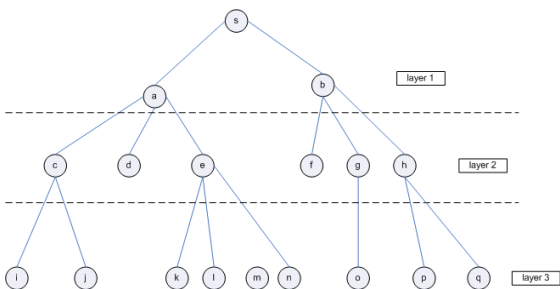


그림 1. 데이터 병합 트리 구조

대규모 WSNs의 데이터 병합을 통해 최소의 통신비용과 응용의 최대 지연시간을 모두 만족시킬 수 있는 유포

및 데이터 수집은 네트워크 전체의 안정성을 직접적으로 위협한다. 또한 실시간 응용은 센서필드에서 생성되는 데이터를 싱크 노드에 적시성 있게 전달하기 위해 통신 횟수를 증가시킨다면 에너지 소비가 가중되고 패킷 손실로 인한 혼잡이 발생될 수 있다..

본 논문은 응용의 데이터 손실 허용도와 최대 지연시간을 따라 의도적인 패킷손실로 적시성을 높이고 에너지 소비를 저하시키는 선택적 참여 기법을 설계하였다. 또한 각 노드의 병합시간과 참여율 결정을 네트워크 상태에 적응적으로 수행하는 적응형 타이밍 제어 프로토콜을 제시하였다. 이러한 기법들을 적용한 데이터 병합은 노드의 비참여로 인한 에너지 보존과 각 노드의 병합시간의 계층적 할당으로 최대 지연시간을 만족하는 데이터 수집을 제공할 수 있다.

따라서 제시한 두 기법에 의해 센싱 값들의 근사화 및 예측 기법은 데이터 정확성(data accuracy)의 손실부분을 최소화 할 수 있을 것이다. 응용 요구 품질에 따라 데이터 정확성의 제한적인 손실을 허용함으로써 데이터 병합과 시간 제어는 각 노드들에서 에너지 소비와 전송횟수를 상당히 줄이는 결과를 낳고, 그에 따라 전체 네트워크의 수명시간을 연장하게 만든다.

본 논문의 구성은 2장에서 관련 연구를 기술하고 3장에서는 견고성을 제공하는 데이터 병합 위한 적응형 타이밍 제어 기법을 기술한다. 마지막으로 4 장에서 결론 및 향후 연구를 기술한다.

이 연구에 참여한 연구자는 2단계 BK21사업의 지원비를 받았다

## 2. 기존 연구

### 2.1 시간 제어

최근 데이터 병합의 효율성의 높이기 위하여 시간 제어(timing control)에 관한 기법이 제안된 바 있다[3][4][5]. 시간 제어는 주기성 있는 데이터 수집 응용에서 센싱값을 싱크로 전송할 때 DAT에 따라 병합시간을 설정하고, 각 노드는 모든 자식 노드의 데이터를 병합하여 전송하는 시간을 결정하는 기법이다. 이 기법은 데이터 병합의 효율성을 상당히 개선하면 데이터 정확성과 적시성을 측면에서 효율성을 제공한다. 대표적으로 [3]에서는 노드 전체에 정적인 병합 시간의 할당으로 통신충돌을 유발하고 그로 인한 전체 지연시간의 증가시키는 문제가 있고, [4]은 중단간 지연시간을 최적화로 병합시간을 적응적으로 조절하는 저비용의 제어 기법이지만 빈번한 병합 시간의 조절로 인한 최대 지연시간의 보장이 어렵고 데이터 완벽한 정확성을 보장하기 위한 빈번한 통신으로 네트워크 혼잡을 일으킨다. [5]에서는 데이터 전달에 관한 최대 지연시간을 유지하면서 에너지 소비를 최소화하는 데이터 통신 및 병합 프레임워크를 제시하였지만, 병합의 실시간 보장을 위한 수학적 모델링은 적시성, 병합도, 에너지 등을 종합적으로 고려하기 때문에 복잡성이 높고 비효과적인 근사화로 네트워크 상태를 부정확한 예측은 과도한 전송제어로 불필요한 에너지 소비를 일으킨다.

### 2.2 패킷 손실

일반적으로 무선 센서 네트워크는 20% 이상의 전송오류(transmission error)가 발생하는 열악한 환경이다. 이런 환경에서 주기적인 데이터의 수집은 응용수준의 데이터 정확성과 적시성을 모두 만족시키는 것은 어렵다. 만약 통신 오류로 인한 패킷 손실에 관한 어떤 제어도 하지 않는다면 전체 지연시간은 최소화될 수 있지만 응용의 데이터 품질은 보장할 수 없다. 이런 데이터의 정확성은 최종 사용자에게 정보의 의미를 판단할 수 있는 최저의 기준이 필요하다.

감시용 응용의 주기성 데이터의 수집 및 전송 과정에서 전송오류(transmission errors)가 데이터 정확성과 중복 전송에 어떤 영향을 미치는지와 데이터 특성에 따라 허용 가능한 정확성 손실도(accuracy loss)가 전체 각 노드의 데이터 전송 주기에 어떤 영향을 미치는지 결정하는 모델 및 분석이 필요하다.

이를 위해 패킷손실 사건이 독립적이고 손실 확률( $p$ )이 모든 링크들에서 일정할 때 패킷의 전송확률은  $(1-p)$ 라는 간단한 패킷 손실 모델(loss model)을 가정한다. 이러한 가정에서 허용 가능한 손실 패킷수가  $n_{accept}$ 이고 네트워크의 손실확률이  $p$ 일 때  $l = a \times p^t$ 와 같은 관계를 가진다.  $a$ 는 한 패킷의 병합된 센싱값(readings)의 개수이고  $t$ 는 전송 횟수이다. 따라서 병합도와 데이터 정확성의 손실 허용도에 의한 중복전송 가능한 패킷의 개수는

$t = \log_p(l/a)$ 이다.  $t$ 은 최대 지연시간을 보장할 수 있도록 패킷 손실의 허용 정도를 데이터 수집 단계에서 각 계층의 참여율을 결정하는 파라미터로 적용된다.

## 3. 적응형 타이밍 제어 프로토콜 설계

### 3.1 병합 네트워크 모델

병합 네트워크( $G$ )는 센서 노드의 집합( $V$ )과 무선 링크의 집합( $E$ )으로 구성된  $G = (V, E)$ 로 가정한다. WSN의 전체 노드 수가  $|V|$ 라면  $|V| = N, N > 1$ 이 된다. 이런 네트워크에서 DAT의 생성은 네트워크 상태, WSN의 토폴로지, 싱크의 위치(location), DAT를 생성하는 알고리즘 등에 의해서 결정한다. DAT에서 노드  $v$ 의 계층은  $layer(v)$ , 두 노드 간의 경로는  $path(v_i, v_j)$ 이다. DAT의 최대 전송 길이는  $depth$ 라고 하자.

이러한 네트워크 모델에 따라 응용은 최대지연시간( $T_{max}$ )과 정보의 정확성, 즉 가능 데이터 손실도( $d_{loss}$ )가 입력으로 주어질 때 최소의 에너지 소비와 중단간 지연시간을 만족시킬 수 있는 각 노드들의 전송 스케줄을 제공하도록 한다.

### 3.2 견고한 타이밍 제어 프로토콜

DAT의 부모 노드들은 기본적으로 자식 노드의 모든 응답 메시지를 수집하고 병합하여 단일 메시지를 상위노드에게 전송한다. 이 과정에서 부모노드의 모든 자식노드들은 서브트리의 깊이가 다르기 때문에 동일한 시간에 병합을 수행할 수 없다. 이러한 차이로 응용의 요구조건( $T_{max}, d_{loss}$ ), DAT의 깊이, 노드 위치에 의해 기본 병합시간을 계산한다. 또한 이 과정에서 각 계층의 노드는 손실확률( $p_{current}$ )을 기반으로 한 계층별 참여율과 중요도를 결정한다. 노드의 중요도는 동일한 계층에서 자식 노드의 수에 의해 결정된다. 데이터 수집 단계에서는 다음 라운드의 전송 스케줄을 결정하기 위한 파라미터( $p_{expect}, d_{loss}, r_{sample}$ )와 병합값을 생성한다.

### 가. 설정 단계

설정단계는 DAT의 깊이, 노드의 계층, 네트워크의 상태를 결정한다. 이를 위해 싱크 노드는 트리 정보 요청 메시지( $m_{request}$ )를 전체 센서 노드에 전송한다.  $m_{request}$ 를 받은 노드들은 자식의 홉 카운트( $c_{hop}$ )와 계층( $layer(v)$ )을 계산하고 다음 자식 노드들에게 전달한다. 이 과정은 싱크 노드가 전체 트리에 관한 정보를 완성하면 종료된다. 이와 같이 싱크노드가 트리에 관한 충분한 정보를 전달받았다면 네트워크의 트리의 깊이(depth), 최대 지연시간, 최적의 응답률, 손실확률 등을 기반으로 다음 라운드를 위한 병합시간과 참여율의 기본값을 결정한다.

## 나. 데이터 수집 단계

데이터 수집은 병합데이터 요청과 네트워크 상태 및 DAT 정보를 수집하기 위해 네 단계로 구성한다. 첫째, 싱크노드는 네트워크 토폴로지를 기반으로 계산된 기본 병합시간 구간, 응용의 최대 지연시간, 참여율을 포함하는 데이터 요청 메시지(data\_request)를 전송한다. 둘째, 데이터 요청 메시지가 DAT의 각 leaf 노드로 전달되는 과정에서 각 병합노드들은 DAT상의 자신의 계층과 자식 노드에 따른 중요도를 결정한다. 셋째, leaf 노드에서 센싱 값의 전송이 초기화되면 역 전송경로를 따라 병합 시간과 참여율에 데이터 수집을 시작한다. 또한 각 병합 노드들은 병합시간 동안 수신된 데이터의 개수 정보를 포함하는 패킷형태로 전달한다. 넷째, 이런 병합과정은 다음 라운드의 데이터 수집의 병합시간과 참여율 계산을 위해 사용된다. 그림 2는 데이터 병합 과정에 관한 의사 알고리즘이다.

Data_collection_phase
STEP 1: the sink broadcasts data requests
$request := \langle t_{aggr\_time}, max\_aggr\_period, n_{opt}, T_{max}, d_{loss} \rangle$
STEP 2: WHILE ( all of the subtrees)
calculate(aggr_time and $r_{participation}$ )
STEP 3: IF ( sensed data of leaf nodes is available)
WHILE ( $T_n$ ) {
aggregate the all $m_{response}$ and calculate extra infor.;
send the result + extra bits to their parents. }
STEP 4. this cycle repeats itself for the next round

그림 4 데이터 수집 의사 알고리즘

제안된 타이밍 제어 프로토콜은 응용 수준의 허용 가능한 데이터의 정확성과 종단간 지연시간(end-to-end delay)에 따라 에너지 소비, 데이터 정확성, 종단간 지연시간의 등의 최적화를 위해서 병합시간과 참여율의 조정을 네트워크 상태에 따라 적응적으로 결정하여 응용의 요구 품질을 만족시킬 수 있도록 설계하였다.

### 3.3 적응형 참여율 선택 기법

적응형 참여율 선택기법은 응용의 데이터 손실 허용도와 패킷 손실 허용도의 관계에 따라 이용한 각 노드의 참여율을 계층적으로 결정하는 메커니즘으로써 동일 계층의 각 노드에 적용되는 상이한 중요도에 따라 패킷 전송률을 결정하도록 한다. 이처럼 각 노드마다 상이한 전송률은 각 노드의 상이한 시간에 서로 다른 전송으로 네트워크의 전송 오류의 발생확률을 사전에 저하시키고, 참여하지 않는 노드들은 주기에 비례적인 에너지 소비가 절약되고, 불필요한 재전송으로 인한 지연시간의 증대와 추가 에너지 소비를 억제할 수 있다. 이러한 기법은 WSNs와 같은 손실의 발생이 쉬운 네트워크 환경에서 수집 데이터의 특정 신뢰도를 요구하는 응용에 적합하다. 또한 각 노드의 중요도를 기반으로 한 참여율 할당으로 전체 네트워크의 부하를 분산시키는 효과를 가지며, 데이터 마감시간의 적중률

을 높인다.

그림 3은 그림 1의 좌측 서브트리에 적용된 적응형 참여율 선택 기법의 예로써 허용 가능 패킷 손실률을 적용한 의도적 비참여 과정이다.

## 4. 결론 및 향후 연구

본 논문은 높은 전송 오류가 발생하는 환경에서 적응적 타이밍 제어를 통한 견고한 데이터 병합 프로토콜을 설계하였다. 이 기법은 노드의 선택적인 비참여를 통한 응답률의 차별적인 전송으로 전송오류의 발생확률을 저하시키고 노드의 에너지 소비를 절약할 수 있도록 하였다. 제시된 프로토콜과 기법의 성능 검증을 위해서 실험 및 분석을 통하여 우수성을 입증할 계획이다.

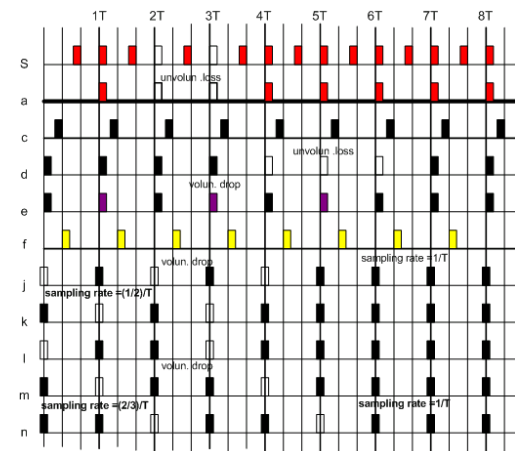


그림 3. 적응성 있는 선택적 참여기법의 예

## 참고문헌

- [1] C. Intanagonwiwa, R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks", In Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 56-67, Aug. 2000
- [2] S. Madden, M. J. Franklin, W. Hong, "TAG: A Tiny Aggregation Service for Ad-hoc Sensor Networks", In Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, pp. 131-146, Dec. 2002.
- [3] I. Solis, K. Obraczka, "In-Network Aggregation Trade-offs for Data Collection in Wireless Networks", <http://inrg.cse.ucsc.edu/techreports/tr-102.pdf>, INRG Technical Report 102, 2003.
- [4] F. Hu, C. May, X. Cho, "Data Aggregation in Distributed Sensor Networks: Towards an Adaptive Timing Control", In Proceedings of the 3rd International Conference on Information Technology: New Generations, pp. 256-261, 2006.
- [5] T. Abdelzaher, T. He, J. Stankovic, "Feedback Control of Data Aggregation in Sensor Networks", In 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 2004.