

센서 네트워크의 에너지 균형을 고려한 분산 컴퓨팅 모델

김종화 최종무

단국대학교 정보 컴퓨터 과학과
{zcbm4321, choijm}@dankook.ac.kr

Energy-Balanced Distributed Computing Model for Sensor Network

Jonghwa Kim

Jongmoo Choi

Division of Information and Computer Science

Dankook University

요 약

센서 네트워크를 구성하는 각 노드는 AA형 건전지를 사용하여 2년 6개월 이상 동작하는 것을 목표로 하며, 따라서 저전력을 고려하여 설계되어야 한다. 본 논문에서는 저전력 센서 네트워크를 위한 분산 컴퓨팅 모델을 제안한다. 제안된 모델은 우선 센서 노드에서 처리를 위한 에너지 소비와 통신을 위한 에너지 소비의 크기를 분석한다. 그리고 처리 에너지 비용을 지불하여 통신 에너지 감소라는 이득을 얻을 수 있음을 보인다. 한편, 이 기법은 특정 센서 노드의 에너지를 집중적으로 소비할 수 있음을 보이고, 이를 해결할 수 있는 에너지 균형 분산 컴퓨팅 모델을 제안한다. 시뮬레이션 기반 실험 결과 제안된 모델이 전체적인 에너지 소비를 낮추었을 뿐 아니라 센서 노드들 간에 에너지 균형도 이루고 있음을 알 수 있었다.

1. 서 론

무선 센서 네트워크는 주변 환경에 대한 데이터를 수집할 수 있는 센서와 저전력형 마이크로 컨트롤러, 그리고 커뮤니케이션을 위한 RF 모듈과 AA형 건전지 두 개로 이루어진 작은 embedded 시스템이 많게는 몇 백 개가 설치되어 몇 해 동안 동작해야 되는 시스템이다. 이러한 센서 네트워크는 재사용을 고려하지 않고 고장에 대한 수리가 없으며 건전지 교체가 없다는 것을 가정한다. 때문에 센서 디바이스의 에너지 운용은 전체 센서 네트워크의 수명에 직결되므로 효율적인 에너지 운용이 어느 네트워크보다 더욱 더 큰 관심사이다.

센서 네트워크의 에너지 사용은 크게 처리 에너지와 통신 에너지로 나눌 수 있다. 처리 에너지는 마이크로 컨트롤러에서 수집된 데이터에 대한 처리나 네트워크

서비스, 어플리케이션 관리 등 전반적인 센서 운용을 위한 에너지이며, 통신 에너지는 하나의 센서 노드에서 다른 센서 노드까지 RF 모듈을 이용하여 데이터 전송하는 데 드는 에너지이다.

이 두 가지의 에너지 비용은 차이가 매우 큰데 보통 1kB의 데이터를 100m거리로 전송하는데 드는 비용은 3백만 명령어를 처리하는데 드는 비용과 같다[1]. 따라서 센서 네트워크에서는 데이터 전송에 드는 비용을 줄이기 위해 많은 노력을 기울여왔다.

이 논문에서는 통신 에너지와 그것을 줄이기 위한 처리 에너지에 대한 관계를 분석하고 전체적인 센서 네트워크의 수명을 늘리기 위한 에너지의 적절한 분산에 대해 연구한다.

2. 센서 노드 에너지 모델

센서 네트워크에서 사용되는 마이크로 컨트롤러의 종류는 매우 다양하다. 대표적인 것으로 ATMEL에서 만들어진 atmega128칩을 사용한 mica, mica2, micaz가 있으며 Texas Instruments에서 만든 msp430칩이 사용된 Tmote가 있다. 본 논문에서는 여러 대학에서 무선 센서 네트워크 논문에 사용된 Tmote를 대상으로 연구하였으며[6], 연구 결과는 mica 계열에도 일반적으로 적용된다.

표 1. Tmote SKY 하드웨어 특징

CPU	
Bus speed	8 MHz
RAM	10 kB
Program Space	48 kB
External Flash	1024 kB
Serial Communications	DIO,SPI,I2C,UART
Current (active w/ Radio on)	19 mA
Current (sleep)	5.1 uA
Current (active mode/normal)	330uA at 1 MHz
MCU on, Radio RX	21.8 mA
MCU on, Radio TX	19.5 mA
Startup Time	6 us
Voltage	1.8 - 3.6 V
Radio	
Frequency	2400-2483 MHz
Data rate	250 kbps
Output Power	-25 to 0 dBm
Startup Time	580 us
Antenna Type	Inverted-F or SMA Coax
Humidity Sensor	
Humidity Accuracy	3.5% RH
Temperature Accuracy	0.5 °C
Sampling Rate	90 Hz

표 1은 Tmote SKY의 하드웨어 특징이다[6]. 앞으로 계산하게 될 데이터는 위의 표를 기준으로 하였다. 즉,

본 논문에서는 센서 네트워크의 구성 요소인 각 센서의 데이터 처리 에너지 비용과 데이터 통신 에너지 비용을 계산할 때 표 1의 데이터 시트 값을 기반으로 하였다.

그림 1은 일반적인 센서 네트워크 구조를 보여준다. 그림에서 원은 센서 노드를 의미하며, 화살표는 데이터의 전송을 의미한다. 이 그림은 노드 1(N_1 로 표시)이 습도나 온도 등의 데이터를 센싱하고 그것을 N_2, N_3, N_4, N_5 를 거쳐 호스트 시스템으로 전송하는 예이다. 이때 i 번째 노드 (N_i)의 에너지 소비는 다음 수식과 같다.

$$N_i = C_i + RX_i + TX_i \quad (1)$$

C_i : 데이터 처리를 위한 에너지 비용

TX_i : 데이터 송신을 위한 에너지 비용

RX_i : 데이터 수신을 위한 에너지 비용

이제부터 처리를 위한 에너지 소비량인 C_i 를 계산해보자. Msp430의 데이터시트를 보면 한 instruction 당 평균 5 cycle 걸린다는 것을 알 수 있다[5]. Msp430은 Active mode일 때 2.2V가 인가되면 normal상태인 경우 1 MHz 당 330uA의 전류가 소모된다[5]. 즉 330uA / 1024 x 1024 cycle 이므로 1 cycle당 0.000314 uA를 소모한다. 결국 한 instruction이 사용하는 전류는 0.00157 uA라고 유추가 가능하다.

통신을 위한 에너지 소비량인 RX_i 와 TX_i 는 다음과 같이 구할 수 있다. RX power는 21mA, TX는 19mA이다. 2.4GHz의 250kbps환경에서 한 비트당 에너지를 구한다면 RX는 $21 / 250 \times 1024 = 0.082uA/bit$ 의 전류를 소모한다. TX는 $0.074uA/bit$ 의 전류를 소모한다.

1 instruction이 수행하는 데에 사용되는 전류는 1 bit를 수신하는 데 사용되는 전류의 약 2% 정도이다. 즉, 통신을 위한 데이터를 1 bit 줄이면, 50개의 instruction을 수행할 수 있는 에너지를 얻을 수 있을 것이다.

3. 센서 네트워크에서 분산 처리

2절에서 우리는 처리 에너지는 통신 에너지에 비해

매우 적다는 것을 알 수 있으며 처리 에너지가 들더라도 통신 에너지를 줄이는 것이 좋다는 것을 알 수 있다.

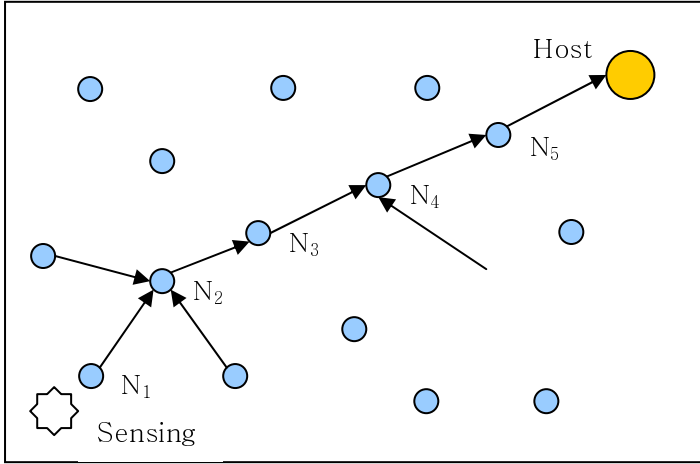


그림 1. 무선 센서 네트워크의 구조

예를 들어 온도를 센싱하여 전송하는 센서 네트워크를 가정해 보자. 온도가 $-50 \sim +70$ 의 범위를 갖는다면 전송 패킷의 데이터는 7bit로 인코딩 가능하다. 그런데 만일 온도 데이터를 전송할 때 이전에 전송한 데이터와 차이를 인코딩하면 어떻게 될까? 만일 그 차이가 $-16 \sim +16$ 이라면 5bit로 인코딩 가능하다. 7 bit 에서 5 bit로 패킷 크기가 감소하면 그만큼 전송 에너지를 줄일 수 있다. 이때 소비해야 할 처리 에너지는 기존 온도의 저장, 센싱된 온도와 기존 온도의 차이 계산, 예외 처리 등으로 구성된다.

그림 1의 i 번째 노드에서 데이터를 처리하여 전송 패킷의 크기를 줄였다고 가정하자. 그림 식 (2)와 같은 에너지를 각 노드에서 소비하게 된다.

$$\begin{aligned}
 N_j &= C_j + RX_j + TX_j & j \leq i-1 \\
 N_i &= C'_i + RX_i + TX'_i & (2) \\
 N_j &= C_j + RX'_j + TX'_j & j \geq i+1
 \end{aligned}$$

이때 C_i 는 원래의 처리 에너지이며 C'_i 은 패킷 크기 줄이기 위한 추가적인 연산을 추가한 처리에 소모된 에너지이다. ($C'_i > C_i$)

그리고 TX_i, RX_i 는 원래 패킷의 송신, 수신 에너지이며, TX'_i, RX'_i 은 줄어든 패킷의 송신, 수신 에너지이다. ($TX'_i < TX_i, RX'_i < RX_i$)

i 번째 노드에서 처리를 수행 했으므로 i 보다 작은 번호의 노드에서는 기존의 에너지 비용을 그대로 갖는다. 반면에 i 번째 노드는 C_i 대신에 C'_i 을, TX_i

대신에 TX'_i 을 갖는다. 그리고 i 번째 이후 노드는 TX_i, RX_i 대신 TX'_i, RX'_i 의 에너지를 소비한다.

이때 시스템 전체적인 에너지 이득은 식 (3)과 같다.

$$E_{save} = C_i - C'_i + \sum_{j=i}^N (TX_j - TX'_j) + \sum_{j=i+1}^N (RX_j - RX'_j) \quad (3)$$

식 (3)에서 $(C'_i - C_i)$ 은 추가적인 처리에 따른 비용이며 $\sum_{j=i}^N (TX_j - TX'_j) + \sum_{j=i+1}^N (RX_j - RX'_j)$ 은 전송 에너지 감소에 따른 이득이다. 이때 비용은 i 에 독립적으로 항상 일정하며 이득은 i 가 작을수록 커진다. 즉 최대 이득은 $i=1$ 일 때 발생한다.

그림 2는 기존의 추가적인 처리가 없을 때 (No Computation)와 패킷을 줄이려는 추가적인 처리를 노드 1에서 수행 했을 때 (Computation in Node 1), 각 노드의 에너지 소비량을 그린 것이다. 이 그림에서 추가적인 처리를 통해 패킷 크기가 7 bit 에서 5 bit 로 감소 시켰으며, 이 처리를 위해 300의 인스트럭션이 필요하다고 가정하였다. 결국 TX 와 RX 는 0.157uA 줄어들고 C 는 0.471uA이 더 증가한다.

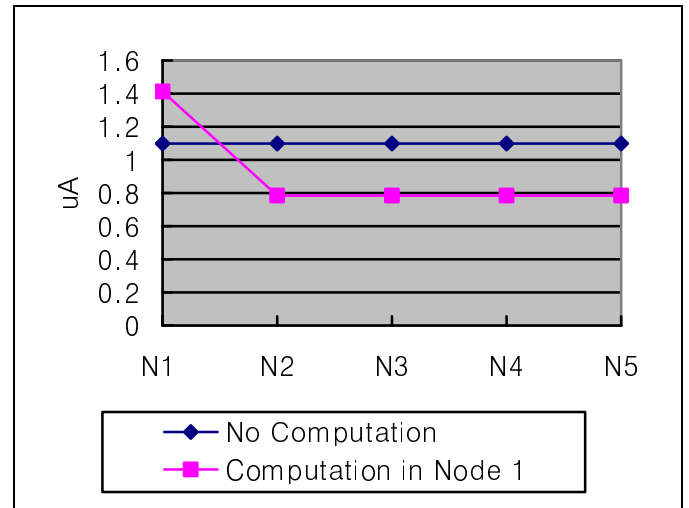


그림 2. Trade-off between computation and communication

그림 2에서 추가적인 처리가 없을 경우 (No Computation) 모든 센서 노드에서 에너지 소비가 1.099 uA이다. 실제로 N_1 의 경우 RX_1 이 없다. 그 대신 데이터 센싱을 위한 에너지 비용 (S_1)이 필요하다. 본 논문에서는 논의의 편의상 $RX_1 = S_1$ 으로 가정하였다. 반면, 노드 1에서 비트 수를 줄이기 위한 추가적인 연산을 수행할 경우 N_1 의 처리 비용은

0.471uA 증가한다. 반면 TX_i 이 0.157uA 감소하며 S_i 가 고정 에너지를 갖기 때문에 결국 0.314uA 증가한다. 다른 노드들에서는 처리 비용은 변화가 없으며 TX_i 와 RX_i 가 감소한다. 따라서 각 노드마다 0.314uA 의 에너지 소비가 줄었다. 결국 처리 비용을 추가하면 전체적으로 1.256uA 에너지 소비를 줄일 수 있다.

그림 2에서는 추가적인 처리 비용 (C_i') 이 TX_i 보다 큼을 가정하였다. 컴파일러 최적화나 센서 노드의 마이크로 컨트롤러 성능 향상에 따라 추가적인 처리 비용이 TX_i 보다 작다면 노드 1에서도 분산 처리에 의한 소비 에너지 감소를 얻을 수도 있다.

하지만, 그림 2의 방법은 노드 1의 에너지 소모가 다른 노드에 비해 불균형하게 증가하는 단점이 있다.

다음 절에서는 각 노드의 에너지 소비가 균등해지는 새로운 분산 처리 방법을 제안한다.

한가지 언급할 것은, 실제 센서 네트워크에서는 노드 1에 비해 노드 2, 3, 4, 5 등 호스트에 가까운 노드들이 라우터(router)나 중개자(coordinator)의 역할까지 수행하는 경우가 많으며, 따라서 더 많은 패킷을 전송하기 때문에 노드 1의 에너지 소비가 많은 것이 그리 큰 문제가 아닐 수 있다라는 것이다. 이를 모델링 하기 위해서는 노드 2, 3, 4, 5 등의 중간 노드가 노드 1에 비해 평균적으로 몇 배의 패킷을 전달하며, 결국 패킷 전달이 1:1 환경이 아닌 1:m 환경으로 시스템을 모델링 해야 한다. 이 내용은 본 논문의 범위를 벗어나며 지속적으로 연구할 계획이다.

4. 에너지 균형을 고려한 분산 처리

그림 2에서 노드 1이 다른 노드에 비해 에너지 소비가 많음을 알 수 있었다. 이는 노드 1의 수명이 다른 노드에 비해 상대적으로 짧음을 의미하고 결국 전체 센서 네트워크의 수명에 영향을 준다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 2가지 에너지 균형 분산 처리를 제안한다.

첫 번째 방식은 라운드 로빈 정책에 따른 분산 처리(Computation with Round Robin)이다. 이 방법은 각 노드들이 한번씩 순서대로 패킷을 줄이는 처리를 수행한다. 단 식(3)의 전체적인 이익이 없는 경우에는

그 노드에서 처리를 수행하지 않는다. 예를 들어 그림 1의 노드 5의 경우 추가적인 처리에 따른 에너지 소모 ($C_5'-C_5$) 가 패킷 전달에 필요한 에너지 감소 ($TX_5'-TX_5$) 보다 크다면, 그 이후에 전송이 없기 때문에 더 이상의 에너지 감소가 없게 되고 이러한 경우 처리를 수행하지 않는 것이다.

두 번째 방식은 잔류 에너지를 고려한 분산 처리(Energy-Aware Computation)이다. 이 방법은 각 노드의 잔류 에너지를 파악하고 가장 많은 에너지를 보유한 노드가 처리를 수행한다. 물론 이때에도 식(3)의 이익이 없는 경우에는 수행하지 않는다.

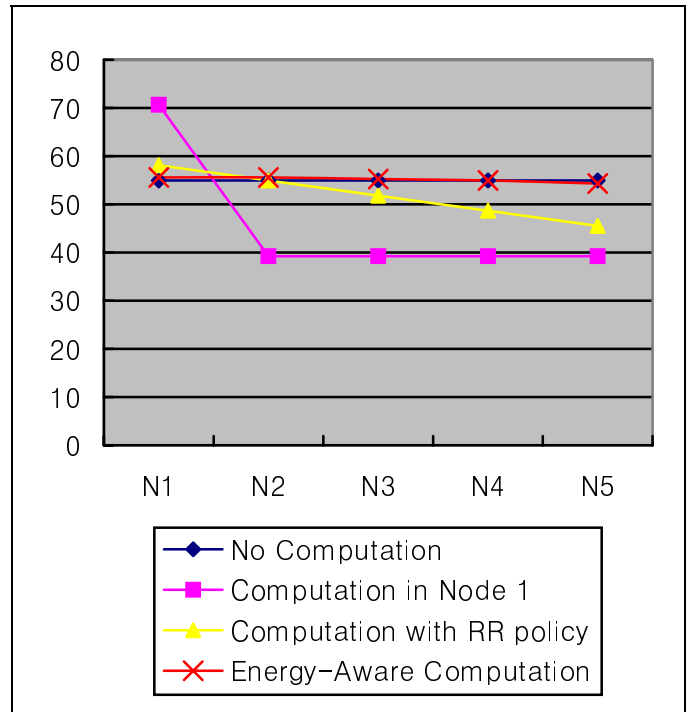


그림 3. 여러 정책에 따른 누적된 에너지 사용량

그림 3은 각 기법의 에너지 소비량을 보여준다. 라운드 로빈 정책에 따른 분산 처리 방법은 노드 1에서 처리 방법에 비해 전체적인 이익은 줄었지만, 노드 1과 다른 노드들 간에 에너지 소비량 차이가 줄었음을 알 수 있다. 반면, 우리의 예상과 다르게 에너지를 고려한 분산 처리 방법은 처리를 하지 않는 방법(No Computation)과 유사한 결과를 보였다. 이는 호스트에 가까운 노드들 (결국 번호가 큰 노드들)이 에너지 이익을 많이 얻고 결국 이 노드들이 처리를 빈번하게 되는데, 이 경우 전체적인 에너지 이익이 적어지기 때문이다. 결국 이것은 에너지만을 고려한 단순한 접근 방법은 전체적인 이익을 보기 어려움을

보여주며, 오히려 라운드 로빈 이나 호스트에 가까운 정도, 그리고 각 노드의 패킷 전달 개수 등을 체계적으로 고려해야 효과적인 에너지 균형 분산 처리 기법을 만들 수 있음을 보여준다.

한편, 그리드(GRID) 방식으로 분할 처리를 하면 에너지 균형을 이루는데 더 효과적일 것이다. 이때 분할 처리란 처리의 일부분은 노드 1에서 처리하고 다른 부분은 노드 2에서 처리하는 방식의 분산처리이다. 이것은 각 노드가 통신 에너지보다 적은 크기의 에너지를 소비할 수 있도록 로드 균형을 맞출 수 있어 전체적인 에너지 절약과 노드들 간에 에너지 균형을 동시에 얻을 수 있다. 본 연구진은 향후 이 내용을 연구할 것이다.

5. 결 론

유비쿼터스 센서 네트워크는 환경 정보 인식이나 위치탐색 등 여러 용도로 사용되고 있으며 단순한 정보 전달 뿐만 아니라 각종 서비스를 제공하는 것도 가능하다. 따라서 센서 네트워크에서 할 수 있는 여러 서비스들이 실현 가능하기 위해서는 에너지 효율을 고려해야 한다.

따라서 처리 에너지도 통신 에너지 못지 않게 중요하며, 이러한 환경에서 효과적인 센서 노드들의 에너지 소비 균형을 이루기 위해 앞으로 에너지 균형 분산 처리 관점에서 연구를 진행 할 것이다.

6. 참고 문헌

- [1] G.J. Pottie and W.J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensor", Communication of the ACM, Vol.43, No. 5, May 2000.
- [2] J.Pouwelse, K.Langendoen, and H. Sips. "Dynamic Voltage Scaling on a Low-Power Microprocessor" Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pages 251-259, ACM Press, Rome, Italy, July 2001.
- [3] R.Min and A. Chandrakasan, "A Framework for Energy-Scalable Communication in High-Density Wireless Networks", In Proceedings of ISLPED '02,

pages 36-41, Monterey, CA, 2002.

[4] Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and David Culler, "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research", 0-7803-9201-9/05 IEEE, 2005.

[5] msp430x1xx Family User's Guide, Texas Instruments product documentation, 2006.

[6] Tmote sky datasheet, Moteiv Corporation, 2006

[7] Holger Karl, Andreas Willig, "Protocols and Architectures For Wireless Sensor Networks" John Wiley&Sons.