

무선 센서 네트워크를 위한 네트워크 환경에 적응하는 신뢰성 있는 전송규약

임근수^o 박정태 고 건
서울대학교 컴퓨터공학부
{ksyim^o, kernkoh}@oslab.snu.ac.kr

A network condition adaptive reliable transport protocol for wireless sensor networks

Keun Soo Yim^o Jeong Tea Park Kern Koh
School of Computer Science and Engineering, Seoul National University

요 약

본 논문에서는 편재 컴퓨팅 (ubiquitous and pervasive computing) 환경에 입력 시스템으로 사용하는 센서 네트워크에서 측정된 데이터의 품질 (sampling rate and quantization depth) 을 보증하며 네트워크 트래픽 또는 소모전력과 같은 비용을 최소화하기 위한 방법으로, 휴리스틱 알고리즘에 의한 비주기적 샘플링과 신뢰성 있는 전송규약을 사용하는 비주기적 전송방식을 제안한다. 그리고 제안한 비주기적 전송방식에 핵심기술인 신뢰성 있는 전송규약의 비용을 최소화하기 위한 방법으로 ACK 방식과 NACK 방식을 패킷 에러율과 동일한 라우터를 사용하는 이웃 노드의 수와 같은 네트워크 상황에 따라 상보적으로 사용하는 상보적 방식 (alternative method) 을 제안하고, 전체 통신규약을 설계하며, 해석을 통해 성능을 분석하고, 네트워크 상태에 따라 두 방식의 성능상의 우열이 전환되는 전환점을 유도한다. 제안하는 상보형 신뢰성 있는 전송규약은 전체 센서 네트워크에서 처리되는 패킷의 비트 수를 최소화해, 각 노드의 총 전력소모의 20-60% 를 차지하는 통신모듈의 소비전력을 줄일 수 있어 전력소모를 크게 개선할 수 있다. 나아가서 다양한 센서 네트워크에서 설계한 전송규약을 바탕으로 하는 제안하는 비주기적 전송방식을 활용한다면 최적의 비용으로 측정하는 데이터의 품질을 보증할 수 있다.

1. 서론

센서 네트워크는 물리공간의 빛, 소리, 온도, 그리고 물체의 움직임과 같은 아날로그 데이터를 공간상에 다양하게 분포한 센서 노드에서 측정하여 중앙의 기지 노드 (base station or sink) 로 전달하기 위해 센서 노드를 사용해 자체적으로 구성하는 네트워크를 말한다 [1, 2]. 각각의 센서 노드는 일반적으로 수 MHz 클럭을 사용하는 마이크로 컨트롤러, 수 십 KB 크기의 EEPROM, 수 KB 크기의 SRAM, 수 백 KB 크기의 플래시 메모리, 센서 소자 (온도, 소리, 빛, 물체의 가속도, 자기장), 출력 소자 (LED, 스피커), 그리고 통신모듈 (라디오 주파수) 로 구성한다.

센서 네트워크는 물리공간에서 측정된 아날로그 데이터를 디지털 신호로 변환해 인터넷과 같은 전자공간에 연결된 기지 노드로 전달하는 입력시스템이다. 측정된 데이터를 기지 노드로 전송하는 방법에는 크게 주기적 방식과 비주기적 방식 두 가지가 있다. 주기적 전송방식은 일반적으로 사용하는 방식으로, 주기적으로 데이터를 측정하여 측정된 데이터 값의 변화유무에 무관하게 기지 노드로 전달하는 방식으로 통신방식이 간단하고 네트워크 트래픽 양이 일정하다는 장점이 있다. 하지만 측정주기보다 빠르게 변화하는 데이터를 효율적으로 측정할 수 없고 측정치에 변화가 없을 때 중복해서 데이터를 전송해야 하며 이렇게 전달한 데이터가 중간에 유실될 수도 있다.

반면에 본 논문에서 제안하는 비주기적 전송방식은 휴리스틱 (heuristic) 을 사용해 학습에 의하여 측정치의 변화가 큰 경우에는 측정 주기를 짧게하고 변화가 작은 경우에는 측정 주기를 길게하

는 방식으로 데이터를 측정하여, 측정된 데이터가 이전 측정치와 기지 노드에서 명시한 형태의 양자화 (quantization) 를 거쳤을 때 값이 다른 경우에만 신뢰성 있는 전송규약을 사용해 전달하는 것이다. 비주기적 전송방식은 상대적으로 적은 양의 패킷을 사용해 보다 정확한 측정이 가능하다는 장점을 가진다. 그림 1 은 이 두 방식을 비교한 것으로 비주기적 전송방식이 적은 횟수의 전송을 통해 보다 정확한 데이터를 전달하는 예를 제시한다.

본 논문의 2 장에서는 이와 같은 비주기적 전송방식을 위해 필요한 신뢰성 있는 전송규약을 설계하고, 3 장에서는 성능을 해석적 방식으로 분석한다. 그리고 4 장에서는 결론을 맺는다.

2. 제안하는 전송규약

일반적으로 센서 네트워크는 초기화 시에 그리고 일정한 주기를 가지고 라우팅 경로를 설정하는데, 제안하는 전송규약은 라우팅 경로 설정과정에 양자화 정보전달을 추가해 모든 센서 노드에 전달한다. 양자화 정보를 전달받은 각 센서 노드들이 n 번째 측정된 측정치를 $s[n]$ 이라고 하면 n 번째 측정 이후 $n+1$ 번째 측정까지

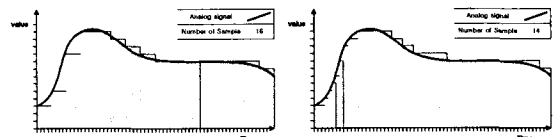


그림 1. 주기적 전송방식(좌)과 비주기적 전송방식(우).

의 지연시간 $d[n]$ 은 수식 (1) 과 같으며 $d_{\min} \leq \forall d[n] \leq d_{\max}$ 를 만족한다. 수식 (1) 에서 α 는 학습률을 나타내는 상수이다.

$$\begin{aligned} \text{Let } \Delta s[n] &= s[n] - s[n-1] \text{ and } d[1], d[2] : \text{const.} \\ d[n] &= d[n-1] + \alpha(\Delta s[n] - \Delta s[n-1]) \\ &= d[n-1] + \alpha(s[n] - 2s[n-1] + s[n-2]) \end{aligned} \quad (1)$$

위와 같은 휴리스틱 알고리즘을 사용하여 측정된 데이터가 이전에 전송한 데이터의 값과 양자화를 거쳐 비교했을 때 차이가 있으면 라우팅 경로를 사용해 측정치를 전송한다. 이때 센서 노드에서 사용하는 라디오 주파수 통신모듈의 경우 전달 범위가 수 미터에서 수십 미터로 제한되며 이 범위에서 평균 비트 에러율 (e) 이 0.5% 이다 [3]. 길이가 20 bytes 인 패킷의 패킷 에러율은 수식 (2) 를 사용해 계산해보면 약 55% 로 일반적인 유선 통신망과는 다른 통신망임을 알 수 있다. 그리고 송신 노드와 수신 노드 사이에도 장애가 놓여 있으면 에러율이 높아지며 송수신 노드 사이에 거리가 가까우면 에러율은 낮아지게 되어, 동일한 센서 네트워크에서도 각각의 센서 노드의 시간에 따른 네트워크 상태에 따라 에러율은 다양하게 분포한다.

$$e_p(L) = \sum_{i=1}^L \{L C_i e^i (1-e)^{L-i}\} \quad (2)$$

이와 같은 에러율이 높은 물리층에서 효율적으로 데이터를 전송하기 위하여 대표적인 신뢰성 있는 전송규약인 TCP 와 같은 종단간 에러복원 (end-to-end error recovery) 방식 대신에 홉간 에러복원 (hop-by-hop error recovery) 방식을 사용해 에러가 발생한 패킷이 전달 (error propagation) 되는 것을 방지한다 [4]. 두 센서 노드사이에서 패킷을 신뢰성 있게 전달하는 방법에는 크게 양성 회신방식 (positive acknowledgement system) 과 음성 회신방식 (negative acknowledgement system) 이 있다. 양성 회신방식 (이하 ACK 방식) 은 그림 2(좌) 와 같이 패킷을 수신해 에러가 발생하지 않은 경우 ACK 패킷을 전송하고 송신 측에서는 전송 타이머를 사용해 타이머가 만료되기 전까지 ACK 패킷을 수신하지 못하면 패킷을 재전송하는 방식이다. 음성 회신방식 (이하 NACK 방식) 은 그림 2(우) 와 같이 패킷을 수신해 에러가 발생한 경우 라우팅 경로상 하위에 있는 모든 노드에 대해 현재까지 수신한 세그먼트의 번호를 기록해 NACK 패킷으로 생성하여 브로드 캐스트 (broadcast) 형태로 전송하는 방법으로 인접한 노드들은 NACK 패킷을 수신하면 현재까지 전송한 세그먼트와 값을 비교해 필요할 경우 재전송하는 방식이다 [5]. 또한 NACK 패킷이 유실될 수도 있으며 재전송한 데이터 패킷이 유실될 수도 있기 때문에 일정한 시간을 두고 원하는 세그먼트를 수신할 때까지 NACK 패킷을 재전송한다. 그리고 낮은 확률로 패킷의 전송을 수신지에서 감지하지 못할 수 있기 때문에 다른 타이머보다는 상대적으로 긴 시간간격으로 (Proactive) NACK 패킷을 전송한다.

간단하게 회신 패킷의 수를 고려해보면, 패킷 에러율이 50% 보다 높으면 ACK 방식의 회신 패킷 수가 NACK 방식보다 적으며 50% 보다 낮으면 반대이다. 실제로는 ACK 패킷은 유니 캐스트 (uni-cast) 되고 NACK 패킷은 브로드 캐스트되어 인접한 모든 노드들에 의해 처리되기 때문에 동일한 개수의 패킷이 사용되어도 전체 네트워크에 있는 노드들이 처리하는 패킷의 수에는 차이가 있는데, 이를 고려한 성능분석은 3 장에 기술한다.

이처럼 기존의 유선 통신망에 비하여 패킷 에러율이 50% 대에 이르는 무선 센서 네트워크에서는 ACK 방식과 NACK 방식이 패

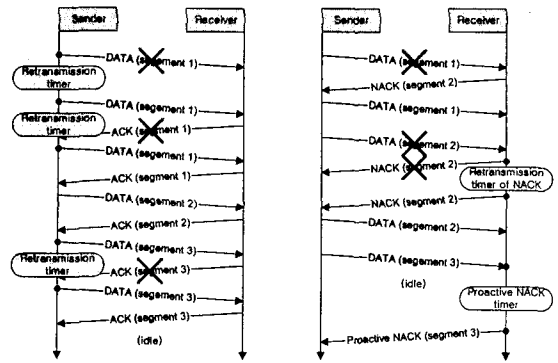


그림 2. ACK 방식(좌)과 NACK 방식(우)

킷 에러율과 인접한 노드의 수에 따라 상호 보완적인 성능상의 특성을 갖는다. 우리는 이러한 상보적 관계를 사용하여 패킷의 헤더에 방식을 명시해 전송하는 형태로 네트워크의 상태에 따라 효율적인 신뢰성 있는 전송규약을 사용하는 방식을 제안한다.

일반적으로 데이터 패킷에 비해서 ACK 패킷과 NACK 패킷은 길이가 짧기 때문에 패킷 에러율이 낮다. 따라서 제안하는 방식에서는 ACK 패킷과 NACK 패킷을 물리층의 패킷 에러율 계산 시에 고려하지 않는다. 그리고 모든 데이터 패킷의 길이는 고정되어 있다고 가정한다. 만약 패킷 에러율에서 패킷 길이를 사용해 비트 에러율을 구해내고 여기에 전송하려는 패킷의 길이를 적용해 전송하려는 패킷의 패킷 에러율을 추정하는 방식을 사용한다면 정확도는 높을 수 있지만 센서 노드와 같은 소형 시스템에는 상대적으로 많은 계산량이며 전력소모를 증가시킨다.

제안하는 방식은 ACK 과 방식 NACK 방식 모두 다음 세그먼트를 전달하는 시점에서 이전 패킷을 재전송한 횟수를 고려해 패킷 에러율을 추정하는 방식을 사용한다. 그리고 상위 라우팅 경로에 있는 센서 노드를 라우터로 사용하는 노드의 수를 고려해 3 장에서 유도한 전환점 (conversion point) 에 따라 ACK 방식과 NACK 방식을 선택적으로 사용한다. 초기에는 비교적 균일한 성능을 보이는 ACK 방식을 사용하며, 전송방식은 일정한 횟수 이상 패킷 에러율을 추정된 이후에 전환할 수 있다. 그리고 모든 패킷의 헤더에는 전송방식을 명시하며, 이를 수신한 노드는 수신 시점부터 해당 노드에 대한 회신방식을 전환한다.

3. 성능 분석

성능 분석과정에서는 모델을 간단하게 하기 위해서 라우터 노드 ($R=n_0$) 와 이를 라우터로 사용하는 센서 노드의 집합 $S=\{n_i | 1 \leq i \leq N\}$ 로 구성된 통신망 $N=\{R, S\}$ 을 고려하며, 분석 결과를 재귀적으로 확장해 여러 홉으로 구성된 센서 네트워크의 성능도 추정할 수 있다. 이때 패킷의 헤더 길이로 유니 캐스트 패킷을 수신하였을 때 수신 노드의 주소를 확인하기 위해서 처리하는 길이를 $b_0=16(\text{bits})$, 데이터 패킷의 길이를 b_d , ACK 패킷의 길이를 b_a , 그리고 NACK 패킷의 길이를 $b_n=b_0+(b_d-b_0)$ 라고 가정한다.

임의의 노드 (n_i) 가 1 개의 세그먼트를 라우터 노드에 전달하기 위해서 평균적으로 전체 센서 네트워크의 노드들이 처리한 총 비트의 수는 ACK 방식의 경우 다음과 같다. 한번 데이터 패킷을 송신했을 때 전체 센서 네트워크에서 처리되는 비트의 수는

$$A_d = b_d + (1 - e_p(b_d))(b_d + b_u + b_r(S-1)) + (1 - e_p(b_d))(1 - e_p(b_a))(b_a + b_u(S-1)) \quad (3)$$

이고, 전송에 실패해 재전송해야 할 확률은

$$A_r = e_p(b_d) + (1 - e_p(b_d))e_p(b_a) \quad (4)$$

이기 때문에 하나의 세그먼트를 포함하고 있는 데이터 패킷을 완전히 전달하기 위해서는

$$ACK = A_d + A_d A_r + A_d A_r^2 + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} A_d A_r^i = \frac{A_d}{1 - A_r} \quad (5)$$

만큼의 비트가 평균적으로 전체 센서 네트워크의 노드들에서 처리된다. NACK 방식의 경우 동일하게

$$N_d = b_d + (1 - e_p(b_d))(b_d + b_u(S-1)) + e_p(b_d)b_n\{\delta + 1 + |S|\} \quad (6)$$

$$N_r = e_p(b_d) \quad (7)$$

$$NACK = \sum_{i=0}^{\infty} N_d N_r^i = \frac{N_d}{1 - N_r} \quad (8)$$

과 같이 모델링 할 수 있다. NACK 방식 모델링에서는 모든 송신된 패킷의 에러 유무를 수신 노드가 판단할 수 있다고 가정하며, δ 는 하나의 NACK 패킷을 완전하게 전달하기 위한 평균 전송 횟수로

$$\delta = \sum_{i=1}^{\infty} i(1 - e_p(b_n))e_p(b_n)^{i-1} = \frac{1}{1 - e_p(b_n)} \quad (9)$$

이다.

그림 3 은 위의 모델을 바탕으로 전체 센서 네트워크의 센서 노드들이 한 세그먼트를 완전하게 전송하기 위해 각각 ACK 방식과 NACK 방식을 사용할 때 처리한 비트 수를 계산해 본 결과로, 사용한 파라미터는 $e=0.5\%$, $b_d=80(\text{bits})$, $b_s=32(\text{bits})$ 이다. $|S|$ 값이 증가함에 따라 전환점이 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 ACK 방식과 NACK 방식의 성능이 일치하는 전환점을 $|S|$ 값과 b_d 값에 따라 계산한 결과는 그림 4 와 같다. 전환점은 $|S|$ 값에 반비례하고 데이터 패킷의 길이에는 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 편재 컴퓨팅환경에 입력 시스템으로 사용하는 센서 네트워크에서 측정된 데이터의 품질을 보증하며 네트워크 트래픽을 최소화하기 위한 방법으로, 휴리스틱 알고리즘에 의한 비주기적 샘플링과 신뢰성 있는 전송규약을 사용하는 비주기적 전송방식을 제안하였다. 그리고 제안한 비주기적 전송방식에 핵심기술인 신뢰성 있는 전송규약의 최적화하기 위한 방법으로 ACK 방식과 NACK 방식을 패킷 에러율과 동일한 라우터를 사용하는 이웃 노드의 수와 같은 네트워크 상황에 따라 상보적으로 사용하는 상보적 방식을 제안하고, 전체 통신규약을 설계하였으며, 해석을 통해 성능을 분석하였으며, 네트워크 상태에 따라 두 방식의 성능상의 우열이 전환되는 전환점을 유도하였다.

기존의 우선 통신망과 고성능 무선 통신망에서는 비트 에러율이 10^{-9} - 10^{-6} 이하이고 브로드 캐스팅 방식의 사용을 줄여 인접 노드와의 간섭을 최소화하도록 설계되었기 때문에 본 논문에서 제안한 방식과 같은 네트워크 환경에 적용하는 방식의 전송규약이 필요하지 않았다. 그러나 센서 네트워크와 같은 소형 라디오 주파수 통신모듈을 사용하는 통신망에서는 패킷의 평균 에러율이 50% 대 에이를 정도로 높고 주위 환경에 의해 에러율의 변화가 클 뿐만 아

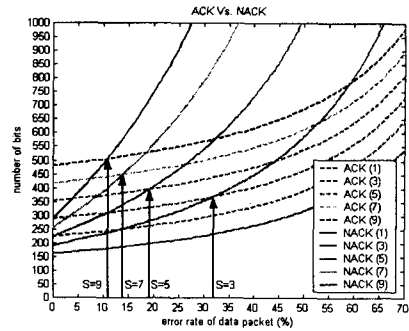


그림 3. 패킷 에러율과 $|S|$ 값에 따라 전체 노드들이 처리한 비트수.

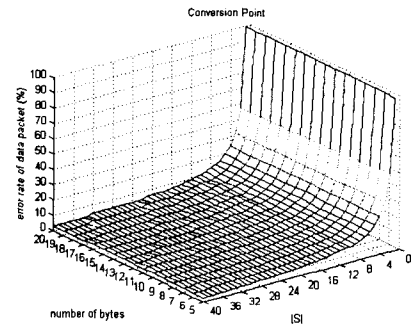


그림 4. $|S|$ 값과 b_d 값에 따른 전환점.

니라 계산능력이 낮아 처리하는 네트워크 트래픽의 양과 전력소모를 최소화해야 한다. 따라서 센서 네트워크는 제안하는 전송규약을 적용할 수 있는 대표적인 분야이다.

본 논문에서 제안하는 상보적 방식에 기반한 신뢰성 있는 전송규약은 네트워크 환경에 적용해 항상 전체 센서 네트워크에서 처리하는 비트의 수를 최소화하기 때문에 전체 전력소모의 20-60%를 차지하는 통신모듈의 소비전력을 최소화할 수 있다 [6]. 나아가서 다양한 센서 네트워크에서 설계한 전송규약을 바탕으로 하는 제안하는 비주기적 전송방식을 활용한다면 최적의 비용으로 측정하는 데이터의 품질을 보증할 수 있다.

참고 문헌

- [1] TinyOS Website, <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>.
- [2] Smart-Its Website, <http://www.smart-its.org/>.
- [3] R. Rubin, "Analysis of Wireless Data Communication," UC Berkeley Technical Report, August 2000.
- [4] J. Postel (ed.), "Transmission Control Protocol - DARPA Internet Program Protocol Specification," RFC 793, USC/Information Sciences Institute, September 1981.
- [5] C.-Y. Wan, A.T. Campbell, L. Krishnamurthy, "PSFQ: A Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, September 28, 2002.
- [6] J. Hill, D. Culler, "A wireless-embedded architecture for System Level Optimization," UC Berkeley Technical Report, March 2002.