

센서 네트워크에서 배터리 특성을 고려한 실시간 태스크 스케줄링

홍승기⁰, 김대영, 김재언
 한국정보통신대학교 공학부
 {white⁰, kimd, jekim}@icu.ac.kr

Real-time Task Scheduling exploiting Battery Characteristics in Sensor Networks

Seungki Hong⁰, Daeyoung Kim, Jae-eon Kim
 Real-time and Embedded Systems Lab.
 Information and Communications University

요 약

센서 네트워크를 구성하는 대부분의 센서 노드들은 제한된 용량의 배터리로부터 전력을 공급받는다. 그러한 센서 노드들의 수명은 장착된 배터리의 수명에 의해 결정되기 때문에 배터리의 수명을 최대화시키는 것이 센서 네트워크 응용 설계에서 중요한 고려 사항이 된다. 한편, 배터리는 전력 소모 패턴에 따라 전지가 제공할 수 있는 총 용량이 일정하지 않으며 방전이 진행됨에 따라서 비선형적인 특성을 보이기 때문에, 배터리의 수명은 연결된 로드의 특성에 따라서 항상 다르게 결정된다. 본 논문에서는 그러한 배터리의 방전 특성을 고려한 실시간 태스크 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 실험을 통하여 얻은 결과는 제안된 배터리의 특성을 고려한 태스크 스케줄링 알고리즘이 그렇지 않은 태스크 스케줄링 알고리즘에 비해 배터리 수명을 향상시킴을 보인다.

1. 서 론

MEMS 기술의 발전과 저전력 무선 모듈들의 극소형화는 센서 네트워크의 출현에 큰 기여를 하였다. 무선 센서 네트워크를 구성하는 각각의 센서 노드들은 제한된 용량의 배터리를 통해 전력을 공급받는다. 센서 네트워크는 수백 수천 개 이상의 센서 노드들로 구성이 될 수 있기 때문에 그러한 센서 노드들의 배터리를 일일이 교체하는 것은 힘든 일이다. 따라서 제공된 배터리를 최대한 활용하여 센서 노드의 수명을 극대화 시키려는 노력이 필요하다. 한편, 배터리의 수명은 동일한 배터리 총 용량이라 하더라도 방전되는 동안 여러 다양한 외부 요인에 따라서 다르게 결정된다. 최근 센서 네트워크는 군사, 의료, 유통, 감시, 자동차, 비행기 등 다양한 분야에서의 사용을 목적으로 개발되고 있다. 그러한 분야들에서의 태스크들은 시간 제약성을 갖고 수행되기도 한다. 즉, 주기적으로 실행되는 태스크들은 주어진 데드라인 전에 처리되어야 한다. 따라서 센서 네트워크 분야에서 이러한 태스크의 실시간 요구사항을 만족시켜야 한다. 본 연구에서는 실시간 태스크를 수행하는 마이크로 센서 시스템의 배터리의 수명 향상을 위해 배터리의 방전 특성을 고려한 정적 실시간 태스크 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

2. 배터리 특성

배터리의 총 용량은 배터리의 전압이 차단전압까지 떨어질 동안 배터리가 제공한 총 전력량을 의미한다. 총 용량의 크기에 따라서 배터리의 수명이 결정되게 된다. 그러한 배터리의 총 용량에 가장 큰 영향을 끼치는 방전 특성은 (1)Rate Capacity Effect, 와 (2)Recovery Effect 이다. Rate Capacity Effect는 큰 전류가 흐를 경우 이온의 확산 속도가 필요보다 늦고, 환원 반응에 의한 침전물이 빨리 생성되어 이로 인해 추가적인 산화 환원 반응을 방해하여 배터리 전압이 차단 전압으

로 일찍 감소 하여 발생 가능한 전하의 양이 줄어들어 제공할 수 있는 전력량이 줄어드는 것을 말한다. 반면 Recovery Effect는 방전 전류의 크기가 줄어들거나 없어질 경우, 이온의 확산 정도가 충분해져 전지전압이 증가되어 배터리가 제공할 수 있는 용량이 늘어나는 것을 말한다.

3. 센서 네트워크에서의 실시간 태스크 모델

3.1 태스크 정의

그림 2 에서 보여진 것과 같이 실시간 태스크가 정의된다. 태스크(T)의 명세는 (1)실행주기(P), (2)실행시간(E), 그리고 (3)방전전류(C)로 구성된다. 여기서 태스크의 방전 전류는 해당 태스크가 실행되는 동안 배터리로부터 소모되는 전류로서 그 태스크의 실행시간 동안 일정하다고 가정한다.

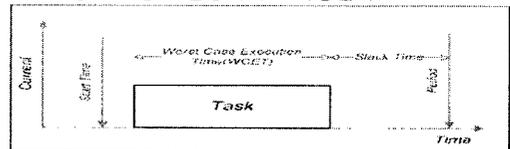


그림 2 태스크 정의

3.2 태스크 분류

마이크로 센서 시스템에서 태스크들의 분류는 시스템의 자원과 매핑하여 이루어진다. 그림 3에서 보여진 마이크로 센서 시스템(ANTS-H2)은 메인 보드(그림 3-(a))에서 8비트 ATmega128L 마이크로 컨트롤러(MCU)와 RF통신 모듈로서 Chipcon사의 CC2420를 장착하고 있고, 센서 보드(그림 3-(b))에는 가스, 적외선, 가속도, 조도, 온도, 마이크, 그리고 자성 센서를 장착하고 있다. 본 논문에서는 그들 중에 가스 센서와 적외선 센서만을 채택하여 그림 4에서 보여지는 것처럼 마이크로 센서 시스템을 기술하였다. 우리는 센서 네트워크에서 각 태스크의 프로파일을 체계적으로 획득하기 위해 마이크로 센서 시스템 안에서 수행

되는 태스크들을 테이블 1 에서 보여지는 것처럼 휴지 태스크를 포함하여 다섯 개의 종류로 구분하였다. 여기서 휴지 태스크는 마이크로 센서 시스템에서 수행할 작업이 없는 경우 에너지 절약 측면에서 수면 모드로 전환된 상태를 가리키며 휴지 태스크의 방전전류는 MCU 의 Sleep 모드 상태에서의 방전 전류 값이 된다.

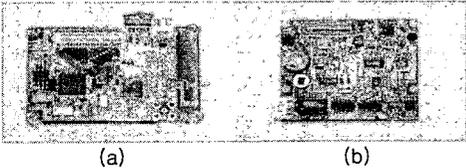


그림 3 ANT-S-H2 하드웨어 플랫폼: 메인 보드 (a), 센서 보드 (b)

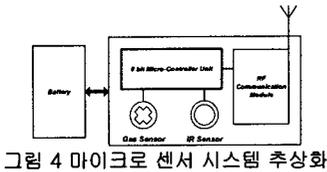


그림 4 마이크로 센서 시스템 추상화

테이블 1 태스크 분류

| 태스크 | 기술 |
|-----------|---|
| 계산 - (Tc) | MCU를 제외한 모든 모듈들이 작동을 하지 않는 상태에서 MCU가 내부 메모리 접근을 포함한 인스트럭션을 실행 |
| 전송 - (Tt) | RF 통신 모듈이 전송 모드에서 패킷을 보냄 |
| 수신 - (Tr) | RF 통신 모듈이 수신 모드에서 패킷을 수신 |
| 센싱 - (Ts) | 센서에 전력이 공급되는 동안 센서를 통해 값을 획득 |
| 휴지 - (I) | 센서 시스템이 휴지 모드에 머물러 있는 상태 |

3.3 태스크 명세

앞에서의 태스크 분류에 기반하여 각 태스크가 수행되는 동안 배터리로부터의 방전 전류 값이 정의된다. 테이블 2에서 보여진 것처럼 우리의 마이크로 센서 시스템(ANTS-H2) 내부의 각각의 자원들에 대한 작동 모드에 따라서 상이한 소모 전류 값을 보인다. 각각의 자원에 따른 그리고 관련된 작동 모드에 따른 소모 전류를 바탕으로 각 태스크의 방전 전류 값을 테이블 3에서 처럼 구할 수 있다. 예를 들면, 가스 센싱 태스크 (Ts_gas)의 방전 전류는 ADC Noise Reduction 작동 모드의 MCU와 가스 센서의 소모 전류 값을 더한 것과 같다.

테이블 2 마이크로 센서 시스템에서의 자원과 작동 모드

| 자원 | 작동 모드 | 근사 (측정) 소모 전류(mA) |
|-------------------|-----------------------------|-------------------|
| Atmega128L - (R1) | Active - (Ac) | 12 (11.7) |
| | ADC Noise Reduction - (ADC) | 5 (5.3) |
| | Power-Save - (Sleep) | 0 (0.008) |
| CC2420 - (R2) | Transmitting - (Trans) | 18 (18.4) |
| | Receiving - (Recv) | 20 (20.1) |
| | Power-off - (Off) | 0 |
| 가스 센서 - (R3) | Power-on - (On) | 170 (168.9) |
| | Power-off - (Off) | 0 |
| 적외선 센서 - (R4) | Power-on - (On) | 10 (8.7) |
| | Power-off - (Off) | 0 |

각 태스크의 실행시간은 테이블4에서 보여지는 것처럼 매핑된 자원의 특성에 따라서 결정된다. 예를 들면, 전송 태스크(Tt)는 전송하는 데이터의 크기에 따라서 실행시간이 결정된다.

테이블 3 태스크 종류에 따른 방전 전류 분석

| 태스크 | 연관된 자원과 작동 모드 | | | | 방전 전류 (mA) |
|------------------|---------------|------|-------|--------|------------|
| | MCU | RF | 가스 센서 | 적외선 센서 | |
| 계산 - (Tc) | Ac | Off | Off | Off | 12 |
| 전송 - (Tt) | Ac | Tran | Off | Off | 30 |
| 수신 - (Tr) | Ac | Recv | Off | Off | 32 |
| 가스 센싱 - (Ts_gas) | ADC | Off | On | Off | 175 |
| 적외선 센싱 - (Ts_ir) | ADC | Off | Off | On | 15 |
| 휴지 - (I) | Sleep | Off | Off | Off | 0 |

테이블 4 태스크의 실행시간 분석

| 태스크 | 실행시간 결정 요인 |
|-----------|-------------------|
| 계산 - (Tc) | 인스트럭션의 수 |
| 전송 - (Tt) | 전송하는 데이터의 크기 |
| 수신 - (Tr) | 수신하는 데이터의 크기 |
| 센싱 - (Ts) | 센서의 (안정화 + 작동) 시간 |

여기까지 주어진 태스크의 실행 주기와 스케줄러에게 입력으로써 요구되는 각 태스크의 실행시간과 방전 전류 값이 획득되었다. 다음 장에서는 얻어진 태스크 명세를 기반으로 본 논문에서 제안하는 배터리 특성을 고려한 실시간 태스크 스케줄링 알고리즘에 대하여 설명한다.

4. 배터리 특성을 고려한 실시간 태스크 스케줄링

제안된 태스크 스케줄링 알고리즘은 그림 5에서 보여지는 것처럼 3단계로 구성 되어 있다.

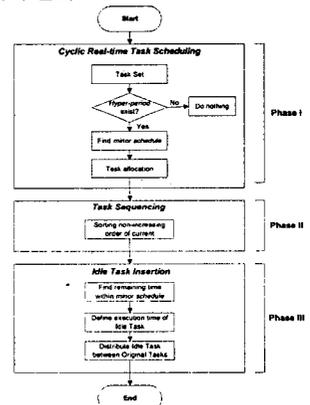


그림 5 제안된 스케줄링 알고리즘

4.1 단계 1: 주기적인 태스크들을 위한 시간 기반 스케줄

본 논문에서 모든 태스크들은 독립적이고 주기적으로 수행되며, 또한 태스크들간의 거리 제약(Distance Constraint)이 없다고 가정한다. 제안된 태스크 스케줄링 알고리즘은 시간 기반이기 때문에, 우선 모든 태스크들의 실행 주기에 대한 최소 공배수 값, 즉 Hyper-period를 찾는다. 그런 다음, 그러한 Hyper-period는 또한 한 개 이상의 minor schedule로 구성되게 된다 [1]. 예로써, 테이블 5에서 정의된 3개의 주어진 태스크들에 대한 단계 1을 거쳐 얻

은 스케줄링 결과 프로파일은 그림 6 에서 보여진다.

테이블 5

| 태스크 | 주기 (ms) | 실행 시간(ms) | 소모 전류 (mA) |
|-----|---------|-----------|------------|
| T1 | 100 | 10 | 12 |
| T2 | 150 | 10 | 30 |
| T3 | 200 | 60 | 175 |

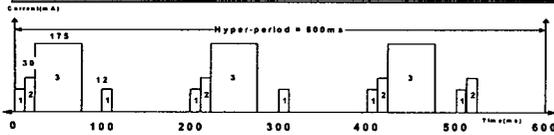


그림 6 시간 기반 태스크 스케줄링

4.2 단계 2: 방전 전류 크기에 따른 태스크 순서 결정

단계 1로부터 얻은 스케줄링 결과 프로파일을 가지고 단계 2에서는 각 minor schedule 안에서 태스크들의 실행 순서를 결정 짓는다. 이때 태스크의 방전 전류의 크기에 대한 내림차순으로 배열한다. [2]에서 그들은 배터리로부터 방전 전류의 크기를 내림차순으로 정렬하여 태스크를 수행하였을 때 배터리 수명 연장 효과를 얻는다는 것을 보였다.

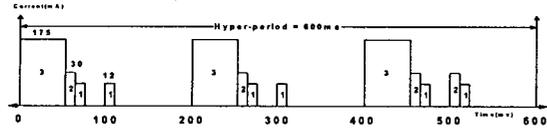


그림 7 방전 전류 크기에 따른 태스크 정렬

4.3 단계 3: 휴지 태스크 삽입

스케줄링의 마지막 3단계에서는 앞서 2장에서 설명한 배터리의 Recovery Effect를 이용하여 위하여 의도적으로 휴지 태스크를 2단계에서 얻은 스케줄 결과에서의 태스크들 사이에 삽입한다. 휴지 태스크는 본래의 태스크(T_k)의 수행 바로 뒤에 삽입되어진다. 이때 휴지 태스크(\tilde{T}_k)의 실행 시간(ΔE_k)은 minor schedule 안에서 태스크 수행을 마치고 남은 시간(ΔRT)을 본래 태스크의 방전 전류(C_k)와 실행 시간(ΔE_k)을 곱하여 얻은 값의 비율에 따라 분배한다.

$$\Delta E_k = \frac{C_k \cdot \Delta E_k}{\sum_{i=1}^j C_i \cdot \Delta E_i} \times \Delta RT \text{ for from } \Delta E_{i1} \text{ to } \Delta E_{ij}, \text{ where}$$

j is the number of original tasks within a Minor schedule (1)

단계 2로부터 얻은 스케줄링 결과 프로파일을 가지고 단계 3에서의 휴지 태스크 삽입 절차를 거쳐 획득한 스케줄링 결과 프로파일은 그림 8에서 보여진다.

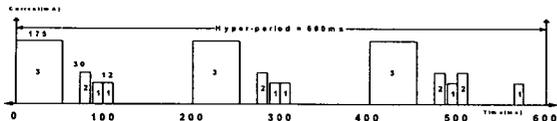


그림 8 휴지 태스크 삽입

5. 성능 평가

제한된 배터리 특성을 고려한 실시간 태스크 스케줄링 알고리즘에 대한 평가는 정확한 배터리 수명 예측 모델인 High-Level Analytical Model[3]를 통하여 이루어졌고, 공식 (2)로 표현되어진다. 여기서 α 는 주어진 배터리의 총 용량을 가리키며, β 는 배터리의 비선형적인 특성을 의미한다. 그리고 L 는 배터리의 수명을 가리킨다. 우리의 실험에서는 α 와 β 는 각각 40375 (mA-min)와 0.2로 결정하였다.

$$\alpha = \int_0^L i(\tau) d\tau + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^L i(\tau) e^{-\beta^m i^{(m-1)}} d\tau \quad (2)$$

앞서 4장의 테이블 5에서 주어진 태스크 집합에 대한 제한된 스케줄링 결과 프로파일(1)을 우리의 실험에서 사용된 배터리 모델에 입력으로 하여 얻은 배터리 수명과 마찬가지로 같은 태스크 집합에 대하여 배터리의 방전 특성을 고려하지 않고 단지 태스크의 실시간 요구만을 만족시킨 스케줄링 결과 프로파일(2)을 비교하여 얻은 결과는 테이블 6에서 보여진다.

테이블 6 실험을 통한 배터리 수명 비교

| 태스크 스케줄 프로파일 | 배터리 수명(분) |
|---------------------|-----------|
| (1) Proposed Scheme | 281.5 |
| (2) Non Scheme | 273.2 |

또한, 우리의 실험에서 제안된 스케줄링 알고리즘을 통해 얻은 결과 프로파일의 평균 방전 소모 값과 배터리의 Recovery Effect와의 상호 관계를 조사하기 위하여 추가적으로 C^{avg} 를 정의 하였다.

$$C^{avg} = \frac{\sum C_i E_i}{\sum E_i} (mA), \text{ where}$$

C_i is the current and E_i is the execution time of Task i (4)

제한된 스케줄링 알고리즘을 통해 얻은 세 개의 프로파일, 즉, Profile A($C^{avg} \approx 40$), Profile B($C^{avg} \approx 80$), Profile C($C^{avg} \approx 120$)에 대하여 Duty Cycle의 값을 0.1에서 0.83의 범위 안에서 각각 단계 2와 3을 거치지 않은 Non-Scheme 프로파일과 비교하여 측정된 배터리 수명 향상 정도는 그림 9에서 보여진다.

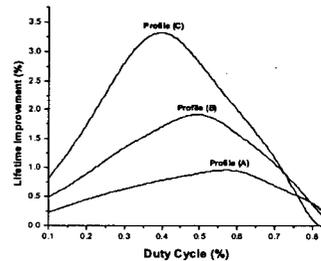


그림 9 Non-Scheme과 비교하여 배터리 수명 향상 정도

6. 결론

본 논문에서 우리는 센서 네트워크에서 배터리 수명 연장을 위한 배터리의 방전 특성을 고려한 정적 실시간 태스크 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 같은 에너지를 소모하는 태스크 스케줄 프로파일임에도 불구하고 태스크의 실시간 요구를 만족시킴과 동시에 배터리의 방전 특성(특히 Recovery Effect)을 고려함으로써 배터리의 수명을 연장시켰다는 것은 에너지 제약적인 센서 네트워크 분야에서 고무적이다.

7. 참고 문헌

[1] T.P.Baker and Alan Shaw, "The cyclic Executive Model and Ada," in Proc.Real-Time Systems Symposium, pp. 120-129. IEEE, Dec. 1988.
 [2] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, "Energy Management for Battery-Powered Embedded Systems," ACM Trans. Embedded Computing Systems, vol. 2, no. Mar. 2003, pp. 277-324.
 [3] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D. A. Wallach, "Battery Lifetime Prediction for Energy-Aware Computing," in Proc. Int' l Symp. Low Power Electronics and Design, ACM Press, 2002, pp. 154-159.