

무선 센서 네트워크상에서 다목적 라우팅 기법

(Multi-objective Routing Scheme for Wireless Sensor Networks)

김민우[†] 김승욱^{**}
(Minwoo Kim) (Sungwook Kim)

요약 본 논문에서는 수정된 게임이론 기법과 ϵ -제약식법을 이용하여 무선 센서 네트워크상에서 에너지 효율적인 라우팅 기법을 제안하였다. 수정된 게임 이론 기법을 이용하여 정보를 전달하기 위한 노드간의 링크 값을 측정하는 후 이를 바탕으로 효율적인 라우팅 경로를 설정하여, 센서 노드 간의 통신에 있어서 에너지 소비를 줄일 수 있었다. 시뮬레이션을 통하여 성능을 평가한 결과 본 논문에서 제안하는 기법을 이용하였을 때 기존에 존재하는 방법들에 비해 약 28% 각 노드의 에너지 소모가 감소하였으며, 전체 네트워크 에너지 측면에서도 약 1.3배 성능 향상이 있음을 확인할 수 있었다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 다목적 최적화, 라우팅, 에너지효율

Abstract In the paper, we propose an energy efficient sensor network management scheme. In the proposed scheme, the modified game theory and ϵ -constraint techniques are sophisticatedly combined to establish energy efficient routing paths. Simulation results indicate that the proposed scheme can strike an appropriate performance balance between conflicting requirements while other existing schemes cannot offer such an attractive performance.

Key words : Wireless Sensor Network, Multi-object Optimization, Routing, Energy Efficiency

1. 서론

센서 노드는 저가, 저전력의 제한적인 용량을 가지며 특정한 환경에 무작위로 설치된 다음 노드들끼리 데이터 송수신을 통해 스스로 네트워크를 구축하여 통신하게 된다. 따라서, 각 센서 노드는 한번 설치된 뒤에는 에너지 충전이나 교체가 어려운 일회용 소모품의 성격을 지닌다[1]. 그러므로, 이와같은 노드들의 단점을 극복하고 효율적으로 에너지를 이용하여 네트워크의 성능을 향상시키는 방법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 센서노드에서는 전송에 소모되는 에너지량이

감시 기능을 수행할 때나 데이터를 처리할 때 소모되는 에너지의 양보다 훨씬 많은 양의 에너지를 필요로 한다 [1]. 따라서 데이터 전송에서 사용되는 전력 소모가 센싱이나 데이터 처리에 소모되는 것보다 크기 때문에 전력 소모를 줄일 수 있는 무선 통신 프로토콜이 네트워크 성능에 가장 큰 영향을 미치게 된다[1].

본 논문에서는 위에서 언급한 에너지 효율 문제를 해결하기 위해 효율적인 경로 설정을 위한 링크 비용 산출 및 경로 설정 알고리즘과 데이터 전송 과정 중에 노드간의 균형적인 에너지 소모를 위한 에너지 균형 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방식은 다목적 최적화 기법을 이용하여 거리에 따른 전송세기와 남아 있는 에너지량을 동시에 고려하여 라우팅 경로를 설정하게 된다. 먼저, 동적인 무선 센서 네트워크 상황에서 수정된 게임이론(MGT)을 이용한 다목적 최적화 방법을 사용하여 링크 비용 산출한 후, 가장 효율적인 라우팅 경로를 설정한다. 또한, 경로가 설정된 후, 특정 노드에 통신 과부하로 인한 일방적인 에너지 소모를 피하기 위해 에너지의 균형적인 소비를 위해 ϵ -제약식법을 사용하여 에너지 균형을 이루도록 한다.

[†] 비회원 : 서강대학교 컴퓨터공학과
ysreal@naver.com

^{**} 종신회원 : 서강대학교 컴퓨터공학과 교수
swkim01@sogang.ac.kr

논문접수 : 2009년 12월 22일
심사완료 : 2010년 9월 7일

2. 제안된 센서 네트워크 관리 기법

2.1 링크 비용 산출 알고리즘

무선 센서 네트워크의 경로 설계를 위한 다목적 최적화 기법에 대한 연구가 진행되어 왔다[2]. 다목적 최적화를 통하여 얻은 최적해의 집합은 설계안의 최종 결정자가 어느 설계안을 채택할 것인가 하는 선택에 중요한 자료로 이용될 뿐 아니라 각 목적함수의 변화가 어느 정도 민감한지를 알 수 있게 해준다. 이러한 필요성으로 인해 다목적 최적화를 위한 효율적인 해석 기법이 요구된다. 기존의 다목적 최적화를 위한 해석 기법중에 수정된 게임이론(MGT)을 이용한 방법과 제약식법(ϵ -constraint Method)이 여러 가지 장점으로 인해 널리 이용되고 있다[2].

본 논문에서는 다목적 최적화 기법 중 수정된 게임이론(MGT)[3]을 이용하여 네트워크의 링크 비용을 계산하여 최적 경로를 설정한다. 수정된 게임이론은 여러 목적함수 개개의 최적 값을 이용해 이 값들 사이의 적절한 타협에 의해 최종설계 값을 선정하는 방법으로 일반적인 게임이론의 계산적인 복잡성을 개선한 장점을 가지고 있고, 제안된 이론으로 다목적 최적화 문제를 풀기 위한 파레토 최적해를 구할 수 있다. 수정된 게임이론을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F(X) &= FC - S_n \\ \text{s.t. } f_i(X_i^*) &\leq f_i(X) \leq f_{iw}, i=1, \dots, r \end{aligned} \quad (1)$$

위의 식에 $f_i(X)$ 는 FC , S_n 속에 들어가는 목적함수로서, 최적값의 값인 $f_i(X_i^*)$ 값과 최악의 값인 f_{iw} 사이의 값으로 정의된다. 또한 FC 는 앞서 설명한 파레토 최적해를 나타내며, S_n 는 상대적인 효율성을 비교하기 위한 목적으로 사용된 표준함수를 나타낸다. 이 값은 0에서 1사이의 값으로 정의한다.

본 논문에서는 기존의 식 (1)을 기반으로 다중 홉 라우팅 경로를 설정하기 위해 각 노드를 연결하는 링크 비용을 계산하여, 해당 경로의 링크 비용이 최소화 되는 경로를 따라 트리를 구성하게 된다. 링크 비용은 센서 네트워크에서 가장 중요한 사항인 에너지 효율성을 고려하기 위하여 센서 노드의 전송 세기($CC(i,j)$)와 현재 이웃 노드의 소모된 에너지량(RE_i)으로 이루어지며, 두 가지 조건을 동시에 고려할 수 있는 효용 함수를 사용하여 각 링크에 대한 통신 효율성의 정도를 측정할 수 있게 하였다.

본 논문에서 제안하는 기법에서는 위에서 설명한 현재 노드 i 로부터 이웃 노드 j 로 정보를 전송하는데 사용되는 값($CC(i,j)$)를 다음과 같이 정의하도록 한다. 일반적으로 전송 시 소모되는 에너지는 거리의 제곱에

비례한다. 거리가 가까울수록 더 적은 에너지를 소모하므로 보다 가까운 거리에 있는 노드를 이용해서 보내야 한다. 그러므로 $CC(i,j)$ 값은 전송하려는 두 노드(본 논문에서는 노드와 노드) 간의 거리에 따라 정해진다. $CC(i,j)$ 값을 정규화 하기 위해 노드가 최대 보낼 수 있는 거리(MAX_PWR)에 비해 현재 노드에서 이웃 노드로 전송시 사용하려는 전파세기(PWR_{ij})가 얼마나 되는가 하는 비율로 계산된다.

$$CC(i,j) = (PWR_{ij}/MAX_PWR)^2 \quad (2)$$

정보를 받게 되는 이웃 노드의 소모된 에너지량(RE_j) 값은 초기에 비해 현재 얼마만큼의 에너지가 남았는지에 따라 정해진다. 초기에 비해 많은 에너지가 남아 있을수록 더 오래 쓸 수 있고, 같은 상황이면 더 균형적으로 에너지를 소모해야 전체적인 네트워크 지속시간이 길어진다. 따라서 적은 에너지를 소모 했을수록 남은 에너지가 많기 때문에 식의 값이 적을수록 유리하게 반영 되도록 한다. 이웃 노드의 초기에너지(F_E_j)와 현재 소모된 에너지량(R_E_j)을 기반으로 정규화를 통하여 계산된다. 위 두 식은 정규화 과정을 통하여 0에서 1사이의 값으로 나타내어진다.

$$RE_j = [(F_E_j) - (R_E_j)] / (F_E_j) \quad (3)$$

제안된 기법에서는 링크 비용을 구하기 위해 고려되는 전송 세기($CC(i,j)$)와 정보를 받게 되는 이웃 노드의 소모된 에너지량(RE_j)의 적절한 조화를 위해 전송 세기($CC(i,j)$) 함수와 이웃 노드의 소모된 에너지량(RE_j) 함수를 한 개의 함수로 변형시킨다.

첫 번째로 다목적 최적화 기법의 상대적인 효율성을 비교하기 위한 목적으로 표준함수(Super-Criterion(S))를 식 (4)로 정의하였다. 표준함수(S)는 다목적 최적화 설계에서 특정 목적함수가 최적의 값에 얼마나 가까운가를 나타내는 척도 역할을 한다. 그러므로 표준함수(S)의 값이 높으면 높을수록, 목적함수 간의 절충점(파레토 최적해)에 가까운 설계를 할 수 있다. 따라서 위의 표준함수(S)를 최대화함으로써 최적의 해를 구할 수 있다. 본 논문에서는 위 식에서 사용된 2개의 목적함수 $f_1(X)$, $f_2(X)$ 는 각각 전송세기($CC(i,j)$)와 이웃 노드의 소모된 에너지량(RE_j)을 나타낸다. 따라서 식(4)에서 최악의 상황을 가정했을 때 얻을 수 있는 값 (1)에서 두 목적 함수(이웃 노드의 소모된 에너지량과 데이터를 전송하는데 사용되는 전송 세기 에너지 값)의 차를 계산한 후, 얻어진 값들의 곱을 통해 표준함수(S) 값을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} S &= \prod_{k=1}^2 [1 - f_k(X)] \\ \text{where } 0 &\leq f_k(X) \leq 1, k=1,2 \end{aligned} \quad (4)$$

두 번째로 FC 는 주어진 각각의 목적함수에 가중치를 고려하여 얻어지게 되며, 이를 통해 얻게 된 해를 목적함수공간에 배열하면 파레토 최적 해를 얻을 수 있다.

$$FC = \text{Minimize} \sum_{k=1}^2 \alpha_k f_k(X) \quad (5)$$

$$s.t \alpha_1 = 1 - \alpha_2$$

본 논문에서는 목적함수가 전송 세기에 따른 에너지량($CC(i,j)$)과 이웃 노드의 소모된 에너지량(RE_i) 두 개이므로 이를 각각 $f_1(X), f_2(X)$ 라 정의하였고, 각각의 목적함수에 α 값을 이용하여 가중치 부여를 조절하였다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 두 목적함수에 해당하는 가중치를 동일하게 0.5로 설정하였다. 이는 전송 세기에 따른 에너지량과 이웃 노드의 소모된 에너지량을 동일하게 고려하기 위함이다.

마지막으로, 식 (4),(5)에 따라서 노드 i 의 다목적 최적화 함수 ($F_{mo}(i)$)는 식 (6)로 표현될 수 있다.

$$\text{Minimize } F_{mo}(i) = FC_{ij} - S_{ij}, j \in N_i \quad (6)$$

$$\text{where } 0 \leq f_k \leq 1, k=1,2$$

2.2 경로 설정 알고리즘

센서 네트워크에서 한 개의 싱크 노드는 각각의 노드들로부터 정보를 수집하는 역할을 한다. 그러므로 라우팅 토폴로지는 싱크 노드를 루트로 하여 트리 구조로 형성 되어 트리의 루트 노드는 싱크 노드가 될 것이고, 루트의 자식 노드들은 센서 노드들이 된다. 본 장에서는 앞장에서 제안된 방법을 통하여 계산된 링크 값에 따라 각 노드들이 정보를 전달하기 위한 에너지 효율적인 경로 설정 알고리즘을 제안하였다. 첫 번째로 싱크 노드는 route_setup 메시지를 브로드캐스팅 해준다. 노드의 전송 파워 범위 안에서 메시지를 받은 각 노드들은 위의 식 (6)을 이용하여 링크 값을 계산하게 된다. 그리고 route_setup 메시지를 이웃 노드들에게 반복해서 전달하게 된다. 만약에 특정 노드가 여러 이웃 노드들로부터 다중의 route_setup 메시지를 받게 될 경우, 이 노드는 싱크 노드로 정보를 전달하기 위하여 이 중에 하나의 route_setup 메시지를 선택하게 된다. 이 route_setup 메시지 선택을 위하여, 본 논문에서는 비용 매개 변수 (C)를 싱크 노드에서 현재 노드까지 설정된 경로 링크들의 $F_{mo}(i)$ 값의 합으로 정의한다. 만약에 센서 노드 i 가 다중의 메시지를 받게 될 경우, 중계 노드는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$Rnode = \arg \min \{node j | C_i + (FC_{ij} - S_{ij}), j \in N_i \quad (7)$$

위 식에서 N_i 는 이웃 노드들의 집합을 나타내며, 노드 j 는 route_setup 메시지를 보내는 이웃 노드들 중에

하나이다. $Rnode$ 는 선택된 릴레이 노드이다. 따라서 다중의 메시지를 받게 된 노드 i 는 $C_i + (FC_{ij} - S_{ij})$ 로 구해지는 C_j 값의 최소화하도록 중계 노드를 선택하게 된다. 제안된 hop-by-hop 경로 설정 절차는 모든 남아있는 노드들이 연결될 때까지 연속적으로 반복되게 된다. 앞 과정을 통하여 마침내 트리 모양의 라우팅 토폴로지가 구성된다.

2.3 노드간의 에너지 균형 소비 기법

앞서 제안된 라우팅 알고리즘은 센서 네트워크에서 가장 중요시 여기는 최소한의 에너지 소비를 목적으로 제안되었다. 그러나 실제 안정적인 네트워크 동작을 위해 에너지 균형적인 소비도 고려해야만 한다. 그러므로 노드들 사이의 에너지 균형은 선호되는 특징이며, 효율적인 에너지 소비에 이어 또 다른 하나의 중요한 사항으로 여겨진다. 본 논문에서 다루고 있는 주요한 목적은 센서 노드간의 에너지 균형 소비를 위하여 앞서 제안한 라우팅 알고리즘을 진행해 나갈 때, 센서 노드들이 가져야 할 최소한의 에너지량을 ϵ -제약식법(ϵ -constraint method)을 이용하여 정의하였다. ϵ -제약식법은 수정된 게임이론(MGT)과 같은 복잡한 단계를 거치지 않고도 다목적 최적화를 수행할 수 있다는 장점으로 인해 실제 네트워크 관리에서 유용하게 쓰일 수 있다.

이 방법은 여러 목적함수 중 가장 중요하다고 여겨지는 주목적함수를 제외한 나머지 부목적함수를 제약식법으로 변환하여 최적화를 수행하는데 이를 통해 최적해의 집합을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. m 개의 목적함수를 포함하는 다목적 최적화 문제는 다음 식 (8)로 표현된다.

$$M \in F(X) = \{f_1(X), \dots, f_m(X)\} \quad (8)$$

이와 같이 표현된 다목적 최적화 문제를 풀기위해 가장 중요한 목적함수 하나를 선택하여 이를 주목적함수라 하고 나머지 $m-1$ 개의 목적함수를 부목적함수라 하여 다음 식 (9)와 같은 일차원 최적화 문제로 재구성한다.

$$\text{Min } f_p(X)$$

$$\text{where } f_i(X) \leq \epsilon_i, i=1,2,\dots,m(\neq p) \quad (9)$$

즉 $m-1$ 개의 부목적함수에 대해 미리 상한치를 설정하여 이 상한치를 넘지 않도록 제약을 둔 후 주목적함수 하나만을 고려한 일차원 최적화 문제만을 풀면 된다. 여기서 i 번째 부목적함수의 상한치 ϵ_i 가 다르면 얻어지는 최적해도 달라지는데, 이 때 ϵ_i 를 적절한 범위 내에서 변화시키면서 파레토 해를 구할 수 있다. 부목적함수 $f_i(X)$ 를 최소화하는 설계벡터를 X_i^* 라 하고 주목적함수를 최소화하는 설계벡터를 X_p^* 라 하면, ϵ_i 는 다음 식 (10)의 범위에서 변화시킨다.

$$f_i(X_i^*) \leq \varepsilon_i \leq f_i(X_p^*) \quad (10)$$

$$i=1,2,\dots,m(m \neq p)$$

계약식법을 사용하여 본 논문에서 구하고자 하는 경로를 트리로 구성했을 시에 센서 노드가 가져야 할 최소한의 에너지량을 정의하게 된다. 일반적으로, 특정 지역의 부모 노드 에너지가 자식 노드의 에너지량보다 아래로 떨어지게 되면, 자식 노드들의 정보 전달을 위해 많은 에너지를 필요로 하는 부모 노드의 수명이 다하여 해당 지역의 정보 전달이 끊어지게 되는 상황이 발생하게 된다. 따라서, 제안된 기법에서는 ε 값은 부모 노드에 연결된 자식 노드들의 남아있는 에너지량의 평균값으로 정의하였다. 그러므로 자식 노드들의 남아 있는 에너지량의 평균값이 ε 값 아래로 떨어지게 되면, 경로 재설정 알고리즘이 다시 작동하게 된다. 본 논문에서는 f_1 을 앞서 제안된 링크 값 계산 방법을 통하여 구해진 각 링크에 대한 비용($LC(i,j)$)에 대한 함수로, f_2 는 부모 노드가 유지해야 하는 최소한의 에너지량에 대한 함수로 정의한다. 따라서 우리가 고려할 문제는 f_1 과 f_2 를 2개의 목적함수로 가지는 다목적 최적화 문제이다. 이때 네트워크에서 센서 노드들은 효율적인 라우팅을 위해 센서 노드의 남아있는 에너지량보다 자신의 정보 전달을 먼저 생각하는 이기적인 플레이어이므로, 여기서는 f_1 을 주목적 함수, f_2 를 부 목적 함수로 정한다. 따라서 f_2 의 한계 값인 ε_2 의 값을 얼마로 결정하느냐에 따라 최적 값이 달라지게 된다. 이를 식으로 정의하면 다음 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(Y) \\ & \text{Subject to } f_2(Y) \leq \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (11)$$

원래의 다목적 최적화 문제는 이 범위 내에서 모든 파레토 최적해를 구하는 것이지만 본 논문에서는 가장 적당한 하나의 값만 구하면 된다. 따라서 가장 적당한 ε_2 값을 결정하는 것이 이 문제의 목표가 된다. ε_2 값은 부모 노드가 가져야 할 에너지량으로서 다음 식 (12)과 같다.

$$\varepsilon_2 \geq \frac{SN_1 + SN_2 + \dots + SN_n}{n} \quad (12)$$

위의 식에 따라 자식 노드들의 에너지 값이 ε_2 값 아래로 떨어지면, 부모 노드는 자식 노드들이 연결된 경로를 해제하게 된다. 각 노드들은 식 (12)을 만족하는 부모 노드를 찾아 다시 연결하게 된다. 만약 ε -계약식법을 만족하는 적당한 노드가 없다면, 식 (11)을 통하여 새로운 부모 노드를 찾게 된다. 이러한 동적인 실시간 접근법을 기초로 하여, 본 논문에서 제안된 기법은 센서 네트워크의 부하를 분산시키고 센서 노드들 사이의 에너

지 소비를 균형적으로 만들었다.

본 논문에서는 수정된 게임이론 기법과 ε -계약식법을 이용하여 센서 네트워크상에서 라우팅을 보다 에너지 효율적으로 수행하도록 디자인하였다. 이를 위해, (2)와 (3)의 식을 제안하였고 이를 기반으로 각 노드의 다목적 최적화함수 (6)를 구할 수 있었다. 또한, 노드간 에너지의 균형소비를 위해 ε -계약식법을 이용하였고 제안된 (12)번 식을 이용해 ε 의 값을 실시간으로 구하였다.

4. 성능평가

이 장에서는 본 논문에서 제안한 라우팅 알고리즘과 균형적인 에너지 소비 알고리즘을 통한 효율적인 에너지 사용 기법의 성능을 기존에 존재하는 타 기법들과 비교, 분석하였다.

- 모든 센서 노드는 배치된 이후로 움직이지 않고 고정되어 있다.
- 모든 센서 노드의 에너지는 제한되어 있으며, 각 노드가 가지고 있는 에너지와 통신 능력은 모두 동일하다.
- 센서 노드들은 자발적으로 무선 통신이 가능하며 싱크 노드와 직접 통신도 가능하다.
- 싱크 노드는 1개이며 외부에서 에너지를 공급받기 때문에 에너지 제약이 없다.
- 센서 노드는 전송 세기의 단계를 조절할 수 있다. 즉, 전송 세기를 이용하여 전송 거리를 조절할 수 있다.
- 각 센서 노드의 위치를 알지 못한다.

제안 기법의 성능을 평가하기 위해서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 노드와 시뮬레이션 필드 환경을 표 1과 같이 설정하였다.

표 1 네트워크 파라미터

| Parameters | Value |
|-------------------------|------------------|
| 시뮬레이션 시간 | 50 sec / 200 sec |
| 네트워크 크기 | 500M × 500M |
| 노드의 수 | 50 |
| 데이터 송신 소모 에너지량 | 8 uJ/bit |
| 데이터 수신 소모 에너지량 | 8 uJ/bit |
| 패킷 사이즈 | 30byte |
| route_setup 메시지 소모 에너지량 | 3 uJ/bit |
| 데이터 전송률 | 3~40 |
| 초기 노드 에너지 | 1J |

성능 평가는 제안하는 알고리즘의 성능을 비교하기 위해서 GCR 기법[4]과 OEA 기법[5]을 같은 조건에서 수행하여 노드의 지속 시간, 에너지 소모량, 효율성 등을 비교 대상으로 고려하였고, 각 실험은 시뮬레이션을 50번씩 반복 수행하여 그 평균값을 사용하였다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 기법을 노드의 평균

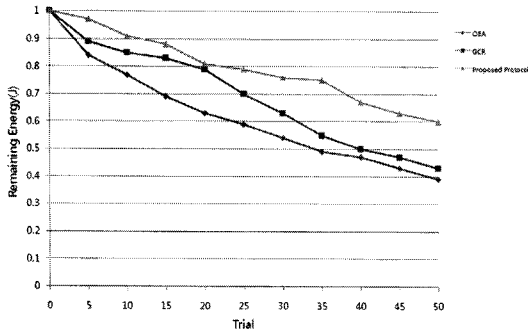


그림 1 노드의 지속 시간

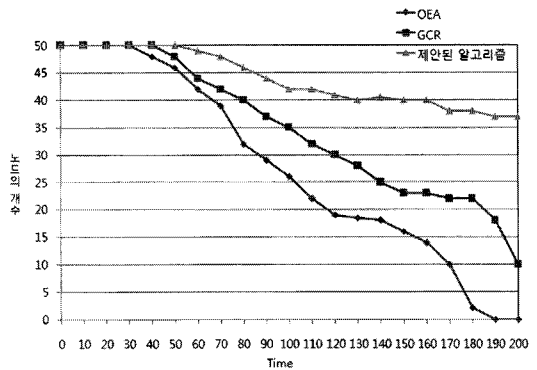


그림 4 살아 있는 노드의 개수

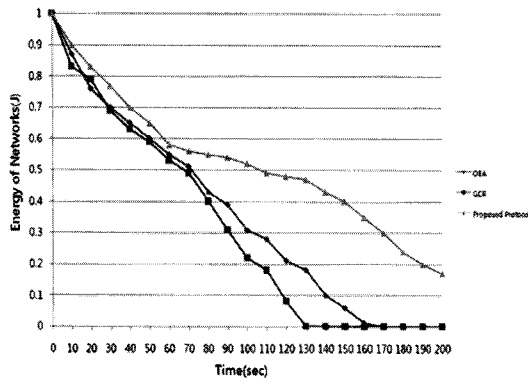


그림 2 네트워크 총 에너지 소모량

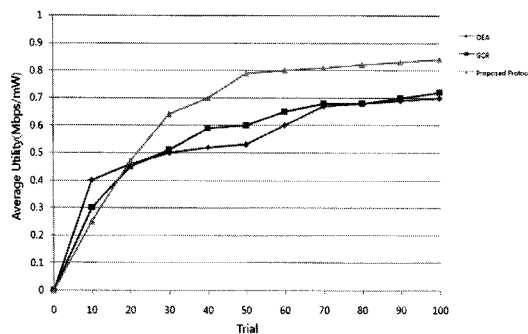


그림 3 네트워크의 평균 효율성

에너지량을 보여준다. 시간이 흐름에 따라 제안 기법이 기본 기법보다 안정적으로 에너지를 소비하는 것을 볼 수 있다.

그림 2는 네트워크 총 에너지 소모량을 보여준다. 제안하는 알고리즘의 경우에는 OEA 기법보다 전체 네트워크의 평균 총 에너지가 더 완만하게 감소하여 230 초를 전후하여 네트워크로서의 기능을 상실한다.

그림 3은 센서 네트워크를 운용함에 있어 얼마나 많은 데이터를 전송하고 처리할 수 있는지를 측정함으로써 제안된 에너지를 얼마만큼 효율적으로 사용했는지 비교하였다.

그림 4는 시간이 경과함에 따라 네트워크상에 존재하는 동작 가능한 노드의 수를 측정한 결과이다. 제안된 알고리즘의 경우 일정한 시간이 흐른 후 경로의 재설정 에 의해 노드의 생존량이 다른 기법에 비해 많은 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소인 에너지 효율성을 보장하기 위한 새로운 라우팅 기법을 제안하였다. 먼저 다목적 최적화 기법을 이용하여 거리에 따른 전송세기와 남아 있는 에너지량의 정규화한 값을 가지고 노드간 무선링크의 비용을 산출한 후, 이를 바탕으로 가장 적합한 경로 설정을 하였다. 따라서 제안된 기법은 실시간으로 운영되는 센서네트워크에서 위해 안전성과 에너지 효율성을 동시에 고려할 수 있는 장점을 가진다. 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘을 적용한 기법이 에너지 효율을 높여 네트워크의 생존시간을 연장시키고 전송 데이터 량을 증가시키는 효과적인 방법임을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] C. Intanagonwivat, R. Govindan, and D. Estrin, "Wireless Sensors and Integrated Wireless Sensor Networks," *Frost & Sullivan*, pp.125-152, 2002.
- [2] M. Sunar and R. Kahraman, "A Comparative Study of Multi-objective Optimization Techniques in Structural Design," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol.25, pp.69-78, 2001.
- [3] S. S. Rao and T. I. Freiheit, "A Modified Game Theory Approach to Multi-objective Optimization," *ASME of Mechanical Engineering*, vol.113, pp.286-278, 1991.
- [4] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocols for wireless microsensor networks," *Hawaian Inter-*

national Conference on Systems Science, pp.59-80, 2000.

- [5] Chandrakasan, A. Amirtharajah, R. Cho, S. H. Goodman, J. Konduri, G. Kulik, J. Rabiner, and W. Wang, "A. Design Considerations for Distributed Microsensor Systems," *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, pp.279-286, 1999.



김민우

2008년 2월 경희대학교 컴퓨터공학과 학사. 2010년 2월 서강대학교 대학원 컴퓨터공학과 석사. 현재 KT ds 네트워크 운영팀. 관심분야는 QoS, 실시간 라우팅, 무선 센서 네트워크, 다목적 최적화, 에너지효율

김승욱

정보과학회논문지 : 정보통신
제 37 권 제 2 호 참조