

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.1.109>

JIIBC 2013-1-16

수중 무선 센서 네트워크에서 에너지를 고려한 데이터 병합 기반 라우팅 프로토콜

Routing Protocol based on Data Aggregation with Energy Efficiency in Underwater Wireless Sensor Networks

허준영*, 민홍**

Junyoung Heo, Hong Min

요약 수중 무선 센서 네트워크에서 센싱 데이터는 수온과 염도 등 평균 계산 등을 사용하여 병합이 가능한 경우가 많다. 데이터 병합은 수중 무선 센서 네트워크에서 패킷의 수를 줄이고 에너지를 절약하는 데 큰 도움이 된다. 하지만 데이터 병합으로 인해 지연이 발생할 수 있고, 불필요하게 긴 경로나 싱크 방향이 아닌 경로를 통해 패킷이 전달되는 단점이 있다. 본 논문에서는 이런 문제를 완화할 수 있는 데이터 병합 기반의 새로운 경로 결정 알고리즘을 제안한다. 제안 논문은 간섭 없이 지연을 줄이고 싱크 방향이 아닌 경로를 제거하여 에너지 효율성을 최대화 한다. 실험 결과를 통해 제안 알고리즘이 에너지 효율과 패킷 지연 면에 있어 우수함을 알 수 있다.

Abstract In underwater wireless sensor networks, sensing data such temperature and salinity can be merged by averaging them. Data aggregation is a good choice to reduce the amount of packets and save energy in underwater wireless sensor networks. However, data aggregation could bring about packet delay and non-directional transmission to the sink. In this paper, we propose a new path building algorithm based on data aggregation to mitigate these problems. The paper reduces the delay without wireless interferences and maximizes the energy efficiency by removing the non-directional transmission to the sink. Experimental results show that the proposed algorithm outperforms in terms of the energy efficiency and the packet delay.

Key Words : 수중 무선 센서 네트워크, 클러스터, 헤드 노드, 오류 복구 기법

1. 서론

수중 무선 센서 네트워크는 음향 통신을 사용하는 무선 센서 네트워크로 수중 환경에서 데이터를 수집하기 위한 네트워크이다. 수중 무선 센서 네트워크는 음향 통신을 사용하기 때문에 통신 지연 시간이 크다. 그리고 노드의 가격이 고가이기 때문에 노드를 무작위로 뿌려서

배치하는 대신 고정 위치에 지정하여 배치하는 경우가 많다. 또한 육상과 같이 대규모로 노드를 배치하기 보다는 소수의 노드로 네트워크를 구성하는 것이 일반적이다. 수중 환경에서 배터리를 교환하기가 매우 힘들고 비용이 많이 들기 때문에 지상의 센서 네트워크 이상으로 에너지 효율성이 중요하다. 이런 이유로 특히 수중 센서 네트워크에서는 에너지 소비를 줄이고 라우팅 방법이 비교적

*정희원, 한성대학교 컴퓨터공학과

**정희원, 호서대학교 컴퓨터공학부

접수일자 2013년 1월 2일, 수정완료 2013년 1월 31일

게재확정일자 2013년 2월 8일

Received: 2 January 2013 / Revised: 31 January 2013 /

Accepted: 8 February 2013

*Corresponding Author: jyheo@hansung.ac.kr

Dept of Computer Engineering, Hansung University

간단한 클러스터 기반의 계층적 라우팅 기법이 주로 연구되고 있다^[1]. 클러스터 기반의 알고리즘은 기본적으로 데이터 병합을 가정으로 한다.

수중 무선 센서 네트워크는 기존의 지상에서 사용하는 무선 센서 네트워크와는 달리 몇 가지 고유한 특징들을 가지고 있다. 먼저 지상에서는 다양한 스펙트럼의 무선 주파수를 사용하여 빠른 속도로 통신을 하지만, 수중에서는 무선 주파수의 반사 또는 감쇄가 심각하기 때문에 제한된 대역폭의 음파를 통해 낮은 속도로 통신을 한다^[2]. 또한 무선 주파수 신호에 비해 음파의 전달 속도가만 배 정도 느리기 때문에 노드 간 통신에 대한 지연 시간이 길다. 다음으로 수중 노드의 경우 지상에서 사용하는 센서 노드에 비해 제작비용이 높기 때문에 고사양의 하드웨어를 탑재하고 있지만 많은 수의 노드를 조밀하게 배치할 수 없고 노드의 위치를 모두 파악이 가능하도록 배치하게 된다^[3,9,10].

본 논문에서는 이런 수중 무선 센서 네트워크에 적합한 라우팅 경로 결정 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 기존 데이터 병합 기반의 경로 알고리즘의 단점인 지연 시간과 싱크 노드와 반대 방향으로 전송하는 경로 문제를 해결하였다. 결과적으로 지연 시간은 줄고 에너지 효율 면에서는 더 좋은 결과를 보였다.

본 논문은 구성은 다음과 같다. 2장에는 기존 연구에 대해 설명하고 3장에서는 제안 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 제안 알고리즘의 실험 및 결과를 보이고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

많은 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 라우팅에 대한 연구가 있다. 이 중 수중 무선 센서 네트워크에 특화된 알고리즘에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 수중 무선 센서 네트워크는 기존 무선 센서 네트워크와 달리 수중 음향 통신의 사용으로 지연 시간이 큰 문제가 있다. 또한 에너지에 대한 민감도가 더 크기 때문에 클러스터링 기반의 알고리즘을 많이 사용한다.

일반적인 에너지 기반 라우팅 알고리즘으로는 Shah 등이 제안한 EAR^[4]이 있다. 이는 라우팅 경로가 최적 경로만으로 구성될 경우 핫-스팟이 생겨서 특정 노드가 급속하게 에너지를 소모하는 문제를 해결한 것이다.

클러스터링 형태를 제안한 알고리즘으로는 LEACH가 있다^[6]. 이 알고리즘은 클러스터링 구성을 지역적으로 하여 전체 노드 구성을 알 수 없는 경우에도 적용이 가능하다. 이는 노드들이 랜덤한 수를 생성하여 수의 크기를 주변 노드와 비교하여 클러스터 헤드를 선정하는 방식이다. 선정된 클러스터 헤드는 자신의 클러스터 내에 속한 다른 노드들의 데이터를 수집하여 병합한 후에 싱크로 전송하게 된다.

LEACH와 달리 전체 노드의 위치를 알 수 있는 경우 더 좋은 성능을 낼 수 있는 알고리즘으로 Lindsey 등이 제안한 기법^[6]이 있다. 이 기법은 전체 노드의 위치를 알고 최적의 경로를 찾게 된다. 그리고 데이터 패킷 전송 수를 최소화하기 위해 모든 노드를 하나의 체인으로 묶어서 경로를 구성한다. 하지만 이로 인해 지연 시간이 커지게 되고 특히 수중 음향 통신을 사용하는 경우에는 지연 시간이 훨씬 크게 되며 중간에 패킷 손실이 발생할 가능성이 큰 수중에서는 전체적으로 손실 가능성이 매우 높아진다. 이 단점을 개선하여 체인을 여러 그룹으로 나누는 방법이 제안되었지만 이 방법은 다른 노드 간 전송으로 인한 간섭을 고려하지 않은 문제가 있다.

III. 경로 결정 알고리즘

본 장에서는 본 논문에서 가정하고 있는 네트워크 모델과 제안 알고리즘을 기술한다.

1. 네트워크 모델

본 논문에서 가정하고 있는 수중 무선 센서 네트워크는 다음과 같은 특성을 갖는다.

- * 모든 센서 노드는 제한된 에너지 소스(배터리)를 갖고 소스 교환이나 충전이 불가능하다.
- * 링크는 대칭적이다. 즉 두 노드간의 링크에서 서로 데이터를 전송하는데 드는 비용은 동일하다.
- * 모든 센서 노드는 동일한 성능을 갖는다. 데이터 처리, 무선 통신, 배터리 파워 등이 동일하다.
- * 모든 센서 노드는 다양한 전송 파워를 조절할 수 있다. 즉, 전송 거리에 따라 파워를 조절할 수 있다.
- * 모든 센서 노드는 네트워크의 모든 다른 노드의 위치를 알고 있다. 수중 무선 센서 네트워크에서는 노드가 고정 위치에 설치되는 것이 일반적이기 때문에 다

큰 노드 위치 파악이 용이하다.

수중 환경에서 통신에 필요한 에너지를 천해 (수심 100m 이하)와 심해 (수심 100m 이상)로 구분하여 모델링 할 수 있다[7]. 본 논문에서는 천해에서 사용하는 에너지 모델을 사용하였다. 천해에서 수중 환경에서 두 노드 간 통신에 필요한 에너지는 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

$$E_{tx} = S \cdot T_{tx} \cdot K, S = 2\pi \cdot H \cdot I \quad (1)$$

여기에서 S 는 송신 출력(dBm), T_{tx} 는 통신 시간, K 는 전송할 패킷의 크기, H 는 수심(m), I 는 음파 전달 손실률을 나타낸다.

2. 라우팅 경로 결정 문제

데이터 병합을 기반으로 한 라우팅 경로 결정 문제는 센서 노드 체인을 만드는 문제로 볼 수 있다. 모든 센서 노드를 한 줄로 엮어서 줄을 따라 데이터를 전송 하는 것이다. 특정 노드에서 줄의 앞쪽 노드로부터 데이터를 받은 후 자신의 데이터와 병합한 후 뒤쪽 노드로 전송한다. 줄의 가장 첫 번째 노드는 데이터를 보내기 시작하는 리더 노드이고, 가장 마지막 노드는 데이터를 받는 싱크 노드이다. 그림 1은 이와 같은 센서 노드 체인의 예를 보여 준다.

Lindsey 등^[6]이 제안한 센서 노드 체인 구성은 전통적인 그리디(Greedy) TSP(Traveling Sales Person) 알고리즘을 이용하여 체인을 구성한다. 이 알고리즘을 통해 구성된 체인에는 긴 지연 시간과 에너지 비효율적인 긴 구간의 무선 전송, 싱크와 반대 방향으로의 전송과 같은 문제가 있을 수 있다. 이러한 문제는 센서 네트워크에서 중요한 자원인 에너지 사용을 비효율적으로 만든다. 특히 수중 센서 네트워크와 같이 에너지 소스 교체가 어려운 환경에서는 더욱 큰 문제가 된다.

이 문제를 해결하기 위해 Lindsey 등^[6]은 체인을 여러 개로 분리하여 지연 시간을 줄이는 방법을 제안하였다. 하지만 이 방법의 경우 노드 간의 무선 통신 간섭을 고려하지 않고 체인을 임의로 분리하여 의도하지 않은 채널 간섭이 발생하는 문제가 있다. 또한 체인 간의 연결을 단일 홉 통신으로 하여 매우 긴 구간의 통신이 발생하는 경우가 생긴다. 이 경우 에너지 소모 뿐 아니라 채널 간섭 가능성도 높이는 문제가 있다.

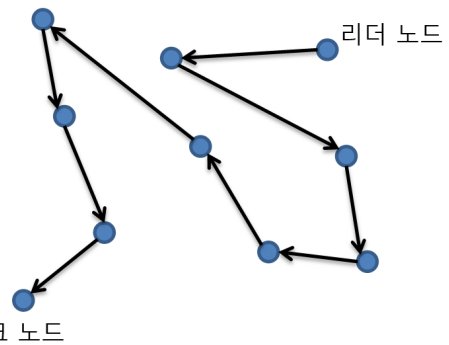


그림 1. 센서 노드 체인
Fig. 1. Chain of sensor nodes

본 논문에서 제안하는 센서 노드 체인 알고리즘은 앞의 문제를 해결하기 위해 다른 노드 간의 통신 간섭을 줄이고 패킷을 싱크 방향으로 보내는 경로를 우선으로 하여 체인을 구성하도록 한다. 알고리즘 기술을 위해 표 1과 같은 기호를 정의한다.

표 1. 기호
Table 1. Notation

N_{Sink}	싱크 노드
N_i	i 번째 센서 노드
$N_i.next$	체인에서 다음 센서 노드
$N_i.order$	전체 송신 스케줄상의 순서
$N_i.distance(N_{dest})$	N_i 부터 N_{dest} 까지 거리

그림 2는 체인을 구성하기 위해 각 노드에서 수행하는 전체 송신 스케줄을 계산하는 알고리즘이다. 먼저 각 노드 N_i 에서 $N_i.order=0$ 으로 초기화를 한다(라인 2). 그리고 N_i 는 자신 보다 N_{Sink} (싱크 노드)에서 더 멀리 떨어진 노드를 탐색한다(3-6 라인). 라인 7에서 N_k 가 의미하는 것이 바로 이 노드이다. 이제 N_k 보다 싱크 노드에 더 가까운 노드를 탐색한다(7-9라인). 여기에서 찾은 노드 N_p 가 $N_k.next$ 보다 가깝다면 $N_k.next$ 를 N_p 로 변경한다. 그 다음 $N_k.next$ 가 N_i 와 같고 $N_k.order$ 가 $N_i.order$ 보다 크거나 같다면 $N_i.order$ 값을 $N_k.order$ 보다 1 증가 시킨다(16-20라인).

이 알고리즘을 통해 계산된 $N_i.order$ 에 따라 노드들은 데이터 전송을 수행 한다. 즉 전송 스케줄이 시작되면 $N_i.order$ 가 0인 노드들이 센싱 데이터 전송을 가장 먼저 한다. 즉 이 노드가 각 체인의 리더 노드가 된다. 중간 노

드들은 데이터를 수신하면 자신 보다 $order$ 가 1 높은 다음 이웃 노드에게 받은 센싱 데이터와 자신의 센싱 데이터를 병합하여 전송한다.

```

1: for all nodes  $N_i$  do
2:  $N_i.order \leftarrow 0$ 
3: for all nodes  $N_k$  do
4:    $N_k.next \leftarrow N_{Sink}$ 
5:   if  $N_k.distance(N_{Sink}) > N_i.distance(N_{Sink})$ 
6:   then
7:     for all nodes  $N_p$  do
8:       if  $N_p.distance(N_{Sink}) < N_k.distance(N_{Sink})$ 
9:       then
10:        if  $N_k.distance(N_k.next) > N_k.distance(N_p)$ 
11:        then
12:           $N_k.next \leftarrow N_p$ 
13:        end if
14:      end if
15:    end for
16:    if  $N_k.next = N_i$  then
17:      if  $N_k.order \geq N_i.order$  then
18:         $N_i.order \leftarrow N_k.order + 1$ 
19:      end if
20:    end if
21:  end if
22: end for
23: end for
    
```

그림 2. 체인 구성을 위한 전송 스케줄 계산
Fig. 2. Transmission schedule for chain construction

이 알고리즘의 복잡도는 $O(n^3)$ 인 단점이 있지만, 수중 무선 센서네트워크에서 일반적으로 노드의 수가 수십 개 내외임을 고려하면 실제 사용이 어려운 수준은 아니다. 또한 이 스케줄 계산을 데이터 전송 스케줄마다 하는 것이 아니라 최초로 네트워크가 구성 된 후에 한번만 수행하거나 네트워크가 변경될 때에만 수행하면 된다.

확률적으로 센서 노드가 100개라면 $N_i.order$ 는 10에서 14 사이의 값을 갖고, 노드의 수가 200개라면 25에서 31 사이의 수를 갖게 된다^[8]. $N_i.order$ 의 최댓값이 한 체인의 노드 수, 곧 지연 시간을 나타내기 때문에 지연 시간이 크게 줄 수 있음을 알 수 있다.

IV. 실험 및 결과

제안 기법의 성능 측정을 위해 시뮬레이션을 사용하여 실험을 수행하였다. 시뮬레이터는 C언어로 작성하였

고, 앞에서 설명한 에너지 모델과 가정을 사용하였다. 전송 지연에 가장 큰 영향을 주는 수중에서 음향 속도는 수온, 염도, 수심과 상관관계를 갖는 다음 모델^[7]을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 C = & 1448.96 + 4.59T - 5.3 \times 10^{-2}T^2 \\
 & + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.34(S-35) + 1.63 \times 10^{-2}D \\
 & + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S-35) \\
 & - 7.139 \times 10^{-13}TD^3 \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기에서 C는 음향 속도(m/s), T는 수온(섭씨), S는 염도(‰), D는 수심(m)이다.

본 실험에서는 최고 수심 100m, 사방 10km x 10km 영역에 노드 100개를 무작위로 위치시킨 후 실험 하였다. 염도(35‰)와 수온(10°C)은 편의상 모두 동일하다고 가정하였다. 그리고 한 번에 보내는 데이터의 크기는 256비트로 고정하였고, 각 노드의 초기 에너지는 0.1J로 가정하였다. 최대 통신 반경(R)은 1km와 2km로 두 가지로 실험하였다. 두 노드의 수심이 다른 경우 더 깊은 수심의 노드를 기준으로 음향 속도(C)를 계산하였다.

비교를 위해 기존 기법인 Lindsey 등이 제안한 알고리즘^[4]을 제안 기법과 비교 실험하였다. 기존 기법은 기본 Lindsey 알고리즘이고 기존 기법2는 체인을 여러 개로 분리하는 개선 알고리즘이다.

총 500번의 데이터 전송을 수행 한 후, 지연 시간의 평균과 노드의 에너지 잔량 평균을 측정하였다. 그림 2는 평균 지연 시간을 나타낸 그래프이고 그림 3은 평균 에너지 잔량을 나타낸 그래프이다.

그림 3에서 기존 기법은 기존 기법2와 제안 기법에 비해 매우 큰 지연 시간을 보인다. 이는 앞서 말했던 것과 같이 하나의 체인으로 모든 노드가 연결되어 데이터 전송을 하기 때문에 발생하는 문제이다. 반면에 기존 기법2와 제안 기법은 비슷한 수의 체인으로 분리하기 때문에 지연 시간에 큰 차이가 없다.

그림 4에서는 기존 기법과 기존 기법2보다 제안 기법의 평균 에너지 잔량이 훨씬 많음을 알 수 있다. 기존 기법2의 경우 간섭이 많이 발생하여 에너지 소모가 큼을 알 수 있다. 반면에 제안 기법은 기존 기법보다 간섭 가능성을 줄이고 싱크의 반대로 전송하는 경로를 줄임으로써 에너지 소모를 크게 줄일 수 있었다. 전송 반경이 큰 경우 기존 기법2에서 에너지 소모가 더 심한 이유는 간섭이 더 자주 발생했기 때문이다.

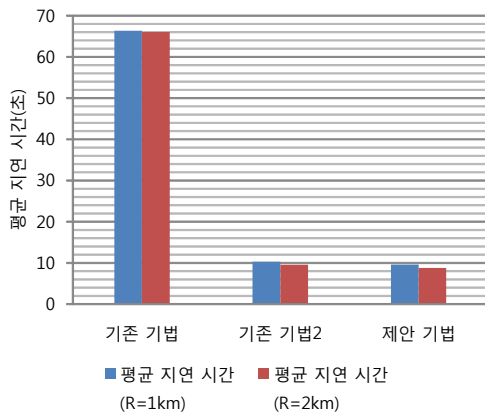


그림 3. 평균 지연 시간
Fig. 3. Average delay in seconds

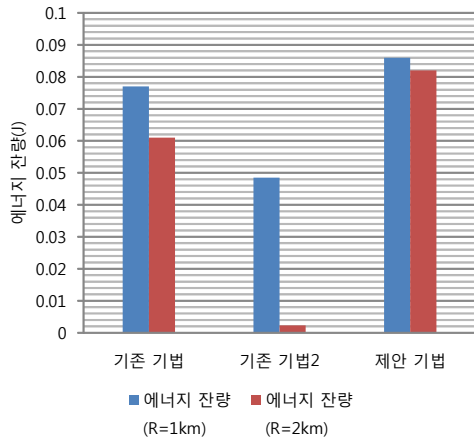


그림 4. 평균 에너지 잔량
Fig. 4. Average residual energy in J

V. 결론

수중 무선 센서 네트워크에서 센싱 데이터는 수온과 염도 등 평균 계산 등을 사용하여 병합이 가능한 경우가 많다. 데이터 병합은 수중 무선 센서 네트워크에서 패킷의 수를 줄이고 에너지를 절약하는 데 큰 도움이 된다. 하지만 데이터 병합으로 인해 지연이 발생할 수 있고, 불필요하게 긴 경로나 싱크 방향이 아닌 경로를 통해 패킷이 전달되는 단점이 있다. 본 논문에서는 이런 문제를 완화할 수 있는 데이터 병합 기반의 새로운 경로 결정 알고리즘을 제안한다. 제안 논문은 간섭 없이 지연을 줄이고

싱크 방향이 아닌 경로를 제거하여 에너지 효율성을 최대화 한다. 실험 결과를 통해 제안 알고리즘이 에너지 효율과 패킷 지연 면에 있어 기존 기법에 비해 우수함을 알 수 있었다.

향후 제안 알고리즘에 최적화한 노드의 위치를 결정하는 방법을 추가하여 수중 무선 센서 네트워크에서 에너지를 최소화할 수 있는 전송 방법을 연구할 계획이다.

참고 문헌

- [1] Erdal Cayirci, Hakan Tezcan, Yasar Dogan, Vedat Coskun, "Wireless sensor networks for underwater surveillance systems", *Ad Hoc Networks*, 4(4), pp.431-446, 2006.
- [2] Mari Carmen Domingo, Rui Prior, "A Distributed Clustering Scheme for Underwater Wireless Sensor Networks", *Proc. of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp.1-5, 2007.
- [3] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges", *Ad Hoc Networks*, 3(3), pp.257-279, 2005.
- [4] Shah, R., Rabaey, J. "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks," *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2002.
- [8] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 2000.
- [6] Lindsey, S., Raghavendra, C., Sivalingam, K.M. "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 13, pp.924-935, 2002.
- [7] Mari Carmen Domingo, Rui Prior, "Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks", *Computer communications*, 31(6), pp.1227-1238, 2008.

- [8] Hong Min, Sangho Yi, Junyoung Heo, Jiman Hong, Yookun Cho, "Energy-Efficient Data Aggregation Protocol for Location-Aware Wireless Sensor Networks", Proc. of International Workshop on Intelligent Systems Techniques for Ad hoc and Wireless Sensor Networks, pp751-756, 2008.
- [9] S. U. Kim, S. Y. Park, "A Study on the Energy Efficient Routing Method for Underwater Wireless Sensor Networks", Journal of Korean Institute of Information Technology, vol. 9, issue 9, pp. 95-104, Sep 2011.
- [10] J. S. Kim, "An Energy Efficient Group-Based Cluster Key Management for Large Scale Sensor Networks", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, v.13, no.11, pp. 5487-5495, 2012.

※ 본 연구는 한성대학교 연구장려금 지원과제임.

저자 소개

허 준 영(정회원)



- 1998년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사).
- 2009년 : 서울대학교 컴퓨터공학부 졸업(박사).
- 2009년 ~ 현재 : 한성대학교 컴퓨터공학과 조교수.

<주관심분야 : 운영체제, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 결합허용 시스템>

민 흥(정회원)



- 2004년 : 한동대학교 전산학과 졸업(학사).
- 2011년 : 서울대학교 컴퓨터공학부 졸업(박사).
- 2012년 : Northwestern University (박사후연구원).
- 2013년 ~ 현재 : 호서대학교 컴퓨터공학부 전임강사.

<주관심분야 : 운영체제, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 결합허용 시스템>