특정 응용을 위한 수중센서네트워크에서 에너지 효율적인 데이터통합 방법 연구

김성운^{*}, 박선영^{**}, 유흥식^{***}

요 약

수중센서네트워크 응용은 적용 대상 및 지역적 범위에 따라 효과적인 모델링이 필요하고 이러한 특정화된 응용 모델 기반에서 에너지 효율적인 데이터통합 방법이 필요하다. 본 논문에서는 수중에 고정된 닻으로 좌우 움직임이 가능한 센서노드들로 구성된 3차원 육각기둥 벌집모델에 기초하여 오염 및 침투 감시용 응용 모델링 및 이를 기초로 한다. 이 모델에서는 층별 구성 셀들의 이벤트 감지 데이터와 해당 층 위치 데이터를 수면까지국까지 효율적으로 전송하면 그 목적이 달성된다. 여기서 기존의 데이터통합 방법을 적용하면 최소 경로나 멀티캐스트 트리에 기반된 관계로 과정이 복잡하여 에너지 비효율적이다. 본 논문에서는 층별 셀들에서 발생하는 이벤트 데이터를 해당 층 헤드노드로 효과적으로 전달하기위한 클러스터 내부에서 클러스터 기반의 에너지 효율적인 세 가지 가능한 데이터통합 방법을 제시한다. 그리고 층별 클러스터 헤드노드에서 수집된 데이터를 기지국까지 효율적으로 전달하기위한 클러스터 간 세 가지 데이터통합 방법도 제시한다. 제시된 데이터통합 방법들은 주어진 영역 침투 감시등과 같은 특정화된 응용 대상으로 동작의 단순성과 에너지 효율화 측면이 주된 고려 요소이다. 마지막으로 시뮬레이션과 성능 비교분석을 통해 제시된 클러스터 층별 및 층간 데이터통합 방법의 조합 중 가장 우수한 에너지 효율적인 데이터통합 방법을 도출한다.

A Study on the Energy Efficient Data Aggregation Method for the Customized Application of Underwater Wireless Sensor Networks

Sung-Un Kim^{*}, Seon-Yeong Park^{**}, Hyung-Cik Yu^{***}

ABSTRACT

UWSNs(Underwater Wireless Sensor Networks) need effective modeling fitted to the customized type of application and its covering area. In particular it requires an energy efficient data aggregation method for such customized application. In this paper, we envisage the application oriented model for monitoring the pollution or intrusion detection over a given underwater area. The suggested model is based on the honeycomb array of hexagonal prisms. In this model, the purpose of data aggregation is that the head node of each layer(cluster) receives just one event data arrived firstly and transfer this and its position data to the base station effectively in the manner of energy efficiency and simplicity without duplication. Here if we apply the existent data aggregation methods to this kind of application, the result is far from energy efficiency due to the complexity of the data aggregation process based on the shortest path or multicast tree. In this paper we propose three energy efficient and simple data aggregation methods in the domain of cluster and three in the domain of inter-cluster respectively. Based on the comparative performance analysis of the possible combination pairs in the two domains, we derive the best energy efficient data aggregation method for the suggested application.

Key words: Underwater Wireless Sensor Networks(수중센서네트워크), Hexagonal Prism Models(육각기둥 벌집모델), Energy Efficiency(에너지 효율성), Data Aggregation Method(데이터 통합 방법)

※ 교신저자(Corresponding Author): 김성운, 주소: 부산광역시 남구 대연 3동 599-1 부경대학교(608-810), 전화: 051)619-6235, FAX: 051)629-6235, E-mail: kimsu@pknu.ac.kr

접수일: 2011년 8월 4일, 수정일: 2011년 9월 23일

완료일: 2011년 10월 4일

^{*} 중신회원, 부경대학교 정보통신공학과

^{**} 준회원, 부경대학교 정보통신공학과
(E-mail: parksy_@pknu.ac.kr)

^{***} 정회원, 부경대학교 정보통신공학과
(E-mail: minjung.tiger.yu@gmail.com)

※ 이 논문은 2008년도 부경대학교 연구년교수지원사업에 의하여 연구되었음(PS-2007-022).

1. 서 론

수중센서네트워크(UWSNs: Underwater Wireless Sensor Networks)는 수중에 설치된 한정된 에너지를 갖는 소용량 센서노드를 이용하여 오염 또는 침투 감시, 재해 예측, 해양자원 탐사 및 전략적인 감시 등을 수행하는 센서네트워크를 말한다[1-3]. 일반적으로 수중센서네트워크 응용은 적용 대상 및 지역적 범위에 따라 효과적인 모델링이 필요하고[4,5], 또 이러한 특정화된 응용 모델 기반에서 에너지 효율적인 데이터통합 방법이 필요하다[6].

본 논문에서는 수중에 고정된 닻으로 좌우 움직임이 가능한 센서노드들로 구성된 3차원 육각기둥 벌집모델[4,6]을 활용하여 새로운 형태의 오염 또는 침투 감시용 응용 모델링을 제안한다. 또한 제안된 특정화된 응용 모델에서 해당 층 클러스터 내부 및 층간 즉 클러스터 간 각각 세 가지 데이터통합 방법을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 제시된 데이터통합 방법들의 가능한 조합 중에서 성능 비교분석을 통해 가장 에너지 효율적인 데이터통합 방법을 도출한다.

먼저 다음 그림 1과 같이 오염 또는 침투 감시용 응용 모델링을 위해 계획된 지역을 대상으로 각각의 3차원 육각기둥 벌집모델의 모든 셀 당 좌우 움직임이 가능한 수중 닻에 매달린 센서노드가 하나씩 위치시킨다.

여기서 각 층별 구성을 위해 본 논문에서는 가장 효율적인 높이로 전체 수심은 해당 응용에 적합한 100m[5]로 가정하고 각 층의 셀의 센서노드에서 오염이나 침투 등의 이벤트가 탐지될 경우 층별 선택된 클러스터 헤드노드에서 수집하여 무선 음파 링크를 통해 수면에 있는 수면기지국까지 전송한다. 이와 같

이 응용 범위에 따라 3차원 육각기둥 수를 수중에 여러 개 배치하거나 수심을 변화시키면 더욱더 광범위한 영역을 대상으로 탐지가 가능하고, 또한 해당 층별 이벤트 감지에 대한 유무와 해당 층 위치 데이터를 수면기지국까지 중복 없이 가장 효율적으로 전송하면 그 목적이 달성된다. 그러나 기존의 데이터통합 방법[7-13]을 적용하면 최소경로나 멀티캐스트 트리에 기반된 관계로 중복된 데이터 전송을 피하기 위한 계산과정의 복잡성과 가장 적은 수의 데이터 전송을 보장하지 않으므로 에너지 비효율적이다.

본 논문에서는 층별 발생되는 이벤트 데이터를 해당 층 헤드노드로 효율적으로 전송하기 위해 저자들이 이미 제안한 육각 모자이크 모델[6]을 응용하여 클러스터 기반의 에너지 효율적인 세 가지 가능한 데이터통합 방법(하이브리드, 다중 홉, 직접전송)을 제시한다. 그리고 층별 클러스터 헤드노드에서 수집된 데이터를 기지국까지 효율적으로 전달하기 위해 저자들이 이미 제안한 3차원 육각기둥 벌집모델[4]을 응용한 세 가지 데이터통합 방법도 제시한다.

제시된 데이터통합 방법들은 주어진 영역 침투 감시등과 같은 특정화된 응용 대상으로 동작의 단순성과 에너지 효율화 측면을 고려하여 제안한다. 마지막으로 시뮬레이션과 성능 비교분석을 통해 제시된 클러스터 층별 및 층간 데이터통합 방법의 조합 중 가장 우수한 에너지 효율적인 데이터통합 방법을 도출한다.

본 논문의 2장에서는 기존 데이터통합 방법의 분석과 본 논문에서 제안하는 방법의 개념을 제시하고, 3장에서는 제안 응용이 지상에서 활용하는 전파(RF)가 아닌 수중 음향(acoustic)을 사용하는 통신이라 수중환경에서 사용하는 전송관련 에너지 수식 모델을 정의하고 또한 클러스터 내부 및 클러스터 간에 제시된 데이터통합 방법들에 대해 기술한다. 그리고 4장에서 제시된 방법들의 시뮬레이션 및 성능 비교분석을 통해 층별 및 층간 데이터통합 방법의 조합 중 가장 에너지 효율적인 데이터통합 방법을 도출한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 기술한다.

2. 센서네트워크에서 데이터통합 방법 분석

일반적으로 수중센서네트워크에서 적용되는 데이터통합 방법은 지상 센서네트워크를 위해 연구된

그림 1. 육각기둥 벌집모델에 기초한 응용

방법들을 응용하여 적용하는 형태이다[7]. 기존에 연구된 무선센서네트워크의 데이터통합 방법으로는 MST(Minimum Steiner Tree)[8], CNS(Center at Nearest Source)[9,10], SPT(Short Path Tree)[10], GIT(Greedy Incremental Tree)[10], DAUCH(Data Aggregation algorithm Using DAG rooted at the Cluster Head)[11] 등이 있고 이들의 특성은 다음 표 1과 같다.

이들을 분석하면 최소경로나 멀티캐스트 트리에 기반된 관계로 중복된 데이터 전송을 피하기 위한 프로토콜 및 계산의 복잡성과 최소 개수의 데이터 전송을 보장하지 않으므로 에너지 비효율적이다. 그 외 최근에 연구된 방법들로 DCTC(Dynamic Convoy Tree-Based Collaboration)[12], SFEB(Structure-Free and Energy-Balanced data aggregation protocol)[13] 등이 있으나 이들 방법들은 대부분 위에서 언급된 방법들을 경우에 따른 효율화로 요약된다.

본 논문의 서론에서 기술한 것처럼 일반적으로 수중센서네트워크 응용은 적용 대상 및 지역적 범위에 따라 효과적인 모델링이 필요하고 이러한 특정화된 응용 모델 기반에서 에너지 효율적인 데이터통합 방법이 요구된다. 제안되는 오염 또는 침투 감시용 수중센서네트워크 응용은 해당 층별 이벤트 감지에 대한 유무와 해당 지역 위치 데이터를 수면기지국에 효율적으로 전송하면 목적이 달성되므로, 라우팅기법에서 적용되는 여러 개념들이 함께 고려하면 가장 간단한 형태이고 에너지 효율적이어야 가장 효과적인 데이터통합을 달성할 수 있다[4,6].

이러한 이유로 플러딩이나 다수 경로를 활용하는

라우팅기법에 비해 불필요한 데이터전송이 적은 클러스터에 기반한 라우팅 개념[3,14,15]을 제안하는 데이터통합 방법에 응용한다. 결과적으로 본 논문에서는 오염 또는 침투 감시용 응용 모델에서 각각의 3차원 육각기둥 벌집모델의 각 층에서 클러스터 개념과 층별 클러스터 개념을 활용하여 대량응용에 최적화된 새로운 에너지 효율적인 데이터통합 방법을 모색한다.

제안되는 데이터통합 방법은 다음 3장에서 클러스터 내부 데이터통합 방법과 클러스터 간 데이터통합 방법으로 구분하여 설명한다.

3. 데이터통합 방법 제안

3.1 응용 모델링 및 관련 수식 정의

3.1.1 응용 모델 동작 개념

그림 1에서 제안된 오염 및 침투 감시용 응용 모델에서 각각의 3차원 육각기둥 벌집모델을 자세히 설명하면 아래 그림 2와 같이 도식화할 수 있다. 여기서 응용모델의 높이는 수심 H 로 정하고 층마다 구성된 단위 정육각기둥(변의 길이와 단위 깊이가 s 인)에 수중 바닥의 닻에 연결된 하나의 센서노드가 위치한다. 그리고 같은 층의 단위 정육각기둥들은 하나의 클러스터를 구성한다. 특히 각 센서 노드들은 좌우 움직임의 범위를 단위 정육각기둥 셀의 범위로 정한다.

그림 2에서 셀별로 감지된 데이터는 층별로 형성된 클러스터 헤드노드로 전송되고 층별 클러스터 헤드노드에서 수신된 감지 데이터는 주기별 가장 빨리

표 1. 센서네트워크에서 데이터통합 방법

방 법	데이터통합 과정	단 점
MST [8]	센서노드들 간 최소 edge 수의 멀티캐스트 트리 구성 및 데이터통합	최적의 데이터통합은 NP-hard 문제임
CNS [9,10]	모든 노드들은 싱크(수면기지국 역할)와 가장 가까운 노드(데이터통합 지점)로 데이터 전송, 해당 노드에서 데이터통합	통합 지점과 노드 간 거리 클수록 에너지 소모 많음
SPT [10]	모든 노드들은 싱크까지 최소경로 설정하여 데이터 전송, 중첩 전송경로를 활용 통합 트리 형성 후 데이터통합	최소 경로 설정 시 중첩 경로 적을수록 에너지 소모 큼
GIT [10]	싱크와 인접 노드 간 최소경로 트리 구성, 해당 트리 및 인접 노드의 연결로 순차적 트리 생성 활용 데이터통합	데이터통합으로 지연시간 발생, 라우팅 측면에서 비효율적
DAUCH [11]	DAG (Directed Acyclic Graph) 활용 클러스터링 후 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 라우팅기법에 기반하여 데이터통합	LEACH 라우팅기법 적용 경우에만 최적화된 데이터통합 방법

그림 2. 3차원 단위육각기둥 벌집모델

도착한 하나만 층 간 클러스터 헤드노드를 통해 수면 기지국으로 전송된다. 여기서 층별 클러스터 헤드노드 선출, 세부적인 데이터통합 및 전송의 동작은 3.2

절 및 3.3절에서 설명되는 각 데이터통합 방법에 따라 다르게 수행된다.

결과적으로 모든 층별 클러스터 헤드노드는 자신의 위치 데이터와 해당 클러스터 내에서 오염이나 침투 여부의 데이터를 함께 전송하여 해당 지역의 상태를 알리게 된다. 여기서 해당 지역의 범위를 더 넓히거나 좁히는 선택은 3차원 육각기둥 개념에서의 s 값의 조정과 3차원 육각벌집 기둥 수를 늘려 달성이 가능하다. s 값 계산에 대한 자세한 내용은 본 논문의 식 (3)을 참조한다.

3.1.2 수중 환경에서 데이터전송관련 수식 정의

본 논문에서 먼저 표 3은 에너지 효율 분석을 위해

표 2. 표 3에서 사용되는 수식 기호 정의

기 호	설 명
SNR [dB]	신호대잡음비 (수신기 목표 SNR 은 15dB)
SL [dB]	소스 신호레벨
TL [dB]	전송손실
NL [dB]	노이즈레벨 (일반적인 평균 NL 은 70dB)
DI [dB]	지향성지수 (무지향성 청음기의 DI 는 0dB)
d [m]	전송거리
α [dB/km]	주파수 의존형 흡수계수
f [kHz]	전송주파수
$I(d)$ [W/m^2]	소스와 dm 떨어진 지점에서의 단위 m^2 당 송신전력의 세기 (송신신호 강도)
D [m]	센서노드가 위치한 지점의 수심
$e_t(d, D)$ [W]	전송거리가 dm 이고 수심이 Dm 일 때, 패킷 하나 당 소비되는 송신에너지
$e_r(d, D)$ [W]	전송거리가 dm 이고 수심이 Dm 일 때, 패킷 하나 당 소비되는 수신에너지

표 3. 수중 환경 데이터 전송 관련 에너지 수식 모델

수 식	설 명	참고문헌
$SNR = SL - TL - NL + DI$ [dB]	수중에 방사된 신호의 SNR	[16] [17]
$SL = TL + 85$ [dB]	SL 과 TL 의 관계 (표1 참고: $SNR = 15dB$, $NL = 70dB$, $DI = 0dB$)	[18]
$TL(d) = 10\log d + \alpha d \times 10^{-3}$ [dB]	전송거리 및 전송주파수에 따른 전송손실	[18]
$\alpha = 0.0601 \times f - 11.2$ [dB/km] $35 \leq f \leq 50$	4~20℃ 수온에서 전송주파수에 따른 주파수 의존형 흡수계수	[18]
$I(d) = 10^{\frac{SL(d)}{10}} \times 0.67 \times 10^{-18}$ [W/m^2]	송신신호 강도	[18]
$e_t(d, D) = 2\pi \times d \times D \times I(d)$ [W]	패킷 하나 당 소비되는 송신에너지	[18]
$e_r(d, D) = \frac{1}{5} e_t(d, D)$ [W]	패킷 하나 당 소비되는 수신에너지	[19]

데이터 송수신과 관련된 에너지 수식 모델이며, 표 2는 에너지 수식에 사용되는 기호 정의로 제안 응용이 지상에서 활용하는 전파가 아닌 수중 음향을 사용하는 통신으로 Urlick 등이 정의한 것을 응용한 것이다[2,16-19].

표 2에 정의된 기호들을 활용하여 데이터 송수신 에너지 관련 수식들은 다음 표 3과 같이 요약되고 향후 본 논문에서 제안하는 데이터통합 방법들의 에너지 효율 비교분석을 위한 계산에 활용된다.

3.2 클러스터 내부 데이터통합 방법

클러스터 개념을 활용한 데이터통합 방법은 클러스터 내에서 데이터를 통합하는 방법과 클러스터 간 데이터를 통합하는 방법으로 구분할 수 있다.

본 논문에서 제시하는 클러스터 내부 데이터통합 방법은 세 가지인데, 즉 하이브리드 데이터통합 방법, 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법, 직접 전송 기반 데이터통합 방법이 그것이다. 이들에 대한 자세한 개념은 본 소절에서 상세히 기술한다.

3.2.1 하이브리드 데이터통합 방법

제안된 하이브리드 데이터통합 방법은 각 클러스터의 가장 중앙 셀에 클러스터 헤드노드가 고정된 형태이며, 클러스터 헤드노드에 가까운 클러스터 멤버노드의 트래픽 과부하 방지를 위해 그림 3과 같이 임계 고리 k 를 기준으로 다중 홉 전송 및 직접 전송을 적용하여 센서노드에서 소비되는 송수신 에너지의 효율을 달성하는 개념이다.

- 만약 $k < a$ 이면(a : 임의의 고리), 다중 홉 전송으로 임계 고리 k 까지 데이터를 전송

그림 3. 클러스터 내의 하이브리드 데이터통합

- 만약 $a \leq k$ 이면(a : 임의의 고리), 클러스터 헤드노드로 데이터를 직접 전송

임의의 클러스터 멤버노드에서 오염물질 감지 등의 이벤트가 발생할 경우, 다중 홉 전송 및 직접 전송을 적용하여 그림 3과 같이 클러스터 헤드노드까지 데이터를 송신한다. 여러 클러스터 멤버노드로부터 감지 데이터를 수신할 경우 클러스터 헤드노드는 가장 먼저 도착하는 데이터만 수신하고 나머지는 무시하는 형태로 데이터통합을 수행한다. 그 후 해당 클러스터 헤드노드는 감지된 데이터와 자신이 관장하는 영역의 위치 데이터를 함께 증별 클러스터 간 데이터 통합을 위해 전송하게 된다.

임의의 고리 a 에서 다중 홉 전송을 적용하는 경우와 직접 전송을 하는 경우에 따라 그림 4와 같이 전송 범위가 다르며 이는 표 3에서 제시한 송수신 에너지 수식에 영향을 미친다.

그림 4의 다중 홉 전송 범위 및 직접 전송 범위를 수식으로 나타내면 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$r_{CMm} \leq s\sqrt{14} \quad (1)$$

$$r_{CMd}(a) \leq s\sqrt{3(a+1)^2 + 2} \quad (2)$$

위 식 (1) 및 식 (2)에서의 s 값은 본 논문의 저자들이 이미 발표한 내용을 참조하여, 네트워크 모델의 네트워크 반경 R 및 총 고리 수 q 의 조건에서 다음 식 (3)에 의해 도출된다[6].

$$\begin{cases} \frac{(3q+1)s}{2} = R & \text{if } q \text{ is odd} \\ \frac{s\sqrt{(3q+1)^2 + 3}}{2} = R & \text{if } q \text{ is even} \end{cases} \quad (3)$$

다음 식 (4)는 위의 식 (1), (2) 및 표 3의 수식을 활용하여 클러스터 내에 하이브리드 데이터통합 방법을 적용할 경우 클러스터 멤버노드에서 소모되는

그림 4. 클러스터 내에서 데이터 전송 범위

송수신 에너지를 나타낸 것이며, 이 때 q 는 클러스터 헤드노드와 가장 멀리 떨어진 마지막 고리 수를 의미한다.

$$\begin{cases} a = q: \\ E_a(D) = e_t(r_{CMm}, D) \\ k < a < q: \\ E_a(D) = e_t(r_{CMm}, D)(q-a+1) + e_r(r_{CMm}, D)(q-a) \\ a = k: \\ E_a(D) = e_t(r_{CMd}(k), D)(q-k+1) + e_r(r_{CMm}, D)(q-k) \\ \text{otherwise:} \\ E_a(D) = e_t(r_{CMd}(a), D) \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서 $e_t(r_{CMm}, D)$ 는 마지막 고리의 다중 홉 전송에 대한 송신에너지이며 $e_t(r_{CMm}, D)(q-a+1)$ 및 $e_r(r_{CMm}, D)(q-a)$ 는 각각 임의의 고리 a 에서 다중 홉 전송으로 소비되는 송신 및 수신에너지이다. 또한 $e_t(r_{CMd}(k), D)(q-k+1)$ 는 임계 고리 k 의 직접 전송에 대한 송신에너지이고 $e_t(r_{CMd}(a), D)$ 는 임계 고리 내 임의의 고리 a 에서 직접 전송으로 소비되는 송신에너지를 나타낸다.

한편 클러스터 헤드노드에서 소비되는 데이터 수신에너지의 범위는 다음 식 (5)와 같다.

$$E_{CHr}(D) \leq e_r(r_{CMd}(k), D) \quad (5)$$

각 층의 클러스터 헤드노드는 임계 고리 k 이내의 클러스터 멤버노드로부터 가장 먼저 도달하는 데이터 하나를 직접 수신하므로 클러스터 헤드노드의 데이터 수신에너지는 식 (5)의 범위를 갖는다.

3.2.2 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법

두 번째로 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법은 클러스터 내 센서노드의 효율적인 소비에너지 분배를 위해 클러스터 헤드노드를 랜덤하게 선출하며, 그림 5와 같이 클러스터 멤버노드에서 클러스터 헤드노드까지 다중 홉으로 데이터를 송신한다. 여러 클러스터 멤버노드가 동시에 데이터를 송신할 경우, 클러스터 헤드노드는 가장 먼저 도착하는 데이터만 수신하는 형태로 데이터를 통합한다.

해당 데이터통합 방법의 데이터 전송 범위 수식에 해당하는 식 (1)을 활용하여 클러스터 멤버노드의 송수신 소비에너지를 식 (6)과 같이 정의할 수 있고, 식 (6)의 각 항들은 식 (4)에서와 동일하다.

$$\begin{cases} a = q: \\ E_a(D) = e_t(r_{CMm}, D)N_q \\ \text{otherwise:} \\ E_a(D) = e_t(r_{CMm}, D)(q-a+1) + e_r(r_{CMm}, D)(q-a) \end{cases} \quad (6)$$

그림 5. 클러스터 내의 다중 홉 전송 기반 데이터통합

또한 클러스터 헤드노드에서 소비되는 데이터 수신에너지의 범위는 다음 식 (7)과 같다.

$$E_{CHr}(D) \leq e_r(r_{CMm}, D) \quad (7)$$

다중 홉 전송을 기반으로 하기 때문에 클러스터 헤드노드는 항상 첫 번째 고리의 클러스터 멤버노드로부터 데이터를 수신하므로 클러스터 헤드노드의 데이터 수신에너지는 식 (7)의 범위를 갖는다. 이 방법에서 층별 클러스터 헤드노드 선출은 매 라운드마다 잔여 에너지가 가장 많은 노드를 선택하는데 구체적인 선택 방법은 본 논문의 범위를 벗어난다.

3.2.3 직접 전송 기반 데이터통합 방법

클러스터 내에서 직접 전송 기반 데이터통합 방법은 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법에서처럼 클러스터 헤드노드를 랜덤하게 선출하며, 그림 6과 같이 클러스터 멤버노드에서 클러스터 헤드노드까지 직접 데이터를 송신한다. 클러스터 헤드노드는 여러 클러스터 멤버노드가 동시에 데이터를 송신할 경우 가장 먼저 도착하는 데이터만 수신하는 형태로 데이터

그림 6. 클러스터 내의 직접 전송 기반 데이터통합

통합을 수행한다.

해당 데이터통합 방법의 전송 범위는 식 (2)와 같고, 이를 활용하여 해당 데이터통합 방법에서 클러스터 헤드노드가 소비하는 송수신 에너지를 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a(D) = e_t(r_{CHd}(a), D), \quad 1 \leq a \leq q \quad (8)$$

클러스터 헤드노드에서 소비되는 데이터 수신 에너지 범위는 다음 식 (9)와 같다.

$$E_{CHr}(D) \leq e_r(r_{CHd}(q), D) \quad (9)$$

식 (9)는 클러스터 헤드노드에서 가장 멀리 떨어진 센서노드로부터 데이터를 직접 수신하는 경우에 수신에너지가 가장 많이 소비됨에 근거한다. 이 방법에서 층별 클러스터 헤드노드 선출은 매 라운드마다 잔여 에너지가 가장 많은 노드를 선택하는데 구체적인 선택 방법은 본 논문의 범위를 벗어난다.

3.3 클러스터 간 데이터통합 방법

본 논문에서 제시하는 클러스터 간 데이터통합 방법은 세 가지인데, 즉 하이브리드 데이터통합 방법, 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법, 직접 전송 기반 데이터통합 방법이 그것이다. 이들에 대한 자세한 개념은 본 소절에서 상세히 기술한다.

3.3.1 하이브리드 데이터통합 방법

클러스터 간 데이터를 통합하는 첫 번째 방법인 하이브리드 데이터통합 방법은 클러스터 헤드노드들 간 데이터전송에서 다중 홉 전송 및 직접 전송을 적절하게 적용하여, 깊이(D)에 따라 다르게 소비되는 클러스터 헤드노드 간 송수신 에너지를 효율적으로 분배하는 방법이다. 여기서 수신 및 송신되는 데이터의 내용은 각 층별 오염 및 탐지 유무데이터 하나와 층별 감시 영역에 대한 위치데이터이다.

각 클러스터 헤드노드가 자신의 클러스터 멤버노드로부터 감지 데이터를 수신하면 그림 7과 같이 경계층 m 을 기준으로 직접 전송 및 다중 홉 전송을 적용하여 수면기지국까지 데이터를 송신한다.

- 만약 $m < l$ 이면(l : 임의의 층), 수면기지국에 도달할 때까지 다중 홉 전송으로 바로 위층의 클러스터 헤드노드로 데이터전송을 계속 반복
- 만약 $l \leq m$ 이면(l : 임의의 층), 경계층인 m 층의 클

그림 7. 클러스터 간 하이브리드 데이터통합

러스터 헤드노드로 직접 데이터전송

제안된 데이터통합 방법의 송수신 에너지 계산을 위해 송수신 에너지 수식에 적용되는 클러스터 헤드노드 간 전송 범위를 그림 8로 도식화하였다.

그림 8의 전송 범위들을 수식으로 표현하면 다음 식 (10)~(13)과 같다. 식 (10), (11)은 클러스터 헤드노드가 고정된 위치인 경우의 다중 홉 전송 및 직접 전송 범위이며, 식 (12), (13)은 클러스터 헤드노드가 랜덤하게 선출되는 경우의 다중 홉 전송 및 직접 전송 범위를 의미한다.

$$r_{CHm} \leq 2\sqrt{2}s \quad (10)$$

$$r_{CHd} \leq s\sqrt{(m-l+1)^2 + 4} \quad (11)$$

$$r_{CHm} \leq s\sqrt{3(2q+1)^2 + 5} \quad (12)$$

$$r_{CHd} \leq s\sqrt{3(2q+1)^2 + (m-l+1)^2 + 1} \quad (13)$$

다음 식 (14)는 클러스터 간 하이브리드 데이터통합 방법을 적용할 경우에 각 클러스터 헤드노드에서

그림 8. 클러스터 헤드노드 간 데이터 전송 범위

소모되는 송수신 에너지를 나타낸다.

$$\begin{cases} l < m : \\ E_l = e_t(r_{CHd}(l), D) + E_{CHr}(D) \\ l = m : \\ E_l = e_t(r_{CHm}, D) + \sum_{n=1}^{m-1} [e_r(r_{CHd}(n), D)] + E_{CHr}(D) \\ otherwise : \\ E_l = e_t(r_{CHm}, D) + e_r(r_{CHm}, D)(l-1) + E_{CHr}(D) \end{cases} \quad (14)$$

식 (14)에서 $e_t(r_{CHd}(l), D)$ 는 임의의 층 l 에서 경계층 m 으로 데이터를 직접 송신하는데 소비되는 에너지이며, $e_t(r_{CHm}, D)$ 는 임의의 층 l 의 다중 홉 송신에 대한 소비에너지이고 $\sum_{n=1}^{m-1} [e_r(r_{CHd}(n), D)]$ 는 경계층 m 의 직접 수신에 대한 소비에너지이다. 그리고 $e_r(r_{CHm}, D)(l-1)$ 은 임의의 층 l 에서 다중 홉 수신으로 소비되는 에너지를 나타내며 마지막으로 $E_{CHr}(D)$ 는 각 클러스터 내에서 소비되는 클러스터 헤드노드의 수신에너지이다.

3.3.2 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법

클러스터 간에 다중 홉 전송을 기반으로 데이터를 통합하는 방법은 그림 9와 같이 단순히 가장 깊이 위치한 1층 클러스터 헤드노드부터 수면기지국까지 다중 홉으로 통합된 데이터를 전송하는 데이터통합 방법이다.

해당 데이터통합 방법의 전송 범위는 클러스터 헤드노드 선출 방법에 따라 식 (10) 또는 식 (12)에 해당한다.

다음 식 (15)에서 층별 각 클러스터 헤드노드 간 소모되는 송수신 에너지를 수식으로 나타내었으며 각 항들은 식 (14)에서 설명한 것과 동일하다.

그림 9. 클러스터 간 다중 홉 기반 데이터통합

$$\begin{cases} l = m : \\ E_l = e_t(r_{CHm}, D) \\ otherwise : \\ E_l = e_t(r_{CHm}, D) + e_r(r_{CHm}, D)(l-1) + E_{CHr}(D) \end{cases} \quad (15)$$

3.3.3 직접 전송 기반 데이터통합 방법

클러스터 간에 직접 전송을 기반으로 데이터를 통합하는 방법은 그림 10과 같이 각 클러스터 헤드노드가 클러스터 내에서 통합한 데이터를 수면기지국으로 직접 전송하는 데이터통합 방법이다.

송수신 에너지 계산을 위한 클러스터 간 직접 전송 기반 데이터통합 방법의 전송 범위는 다음 식 (16)과 같고, 여기에서 p 는 전체 네트워크에서 최고 층수를 의미한다.

$$r_{CHd} \leq s\sqrt{3(2q+1)^2 + (p-l+2)^2 + 1} \quad (16)$$

위의 식 (16)을 활용하여 층별 각 클러스터 헤드노드의 송수신 에너지를 다음 식 (17)과 같이 정의할 수 있으며, 각 항들은 식 (14)에서와 같다.

$$E_l = e_t(r_{CHd}(l), D) + E_{CHr}(D) \quad (17)$$

그림 10. 클러스터 간 직접 전송 기반 데이터통합

3.4 데이터통합 알고리즘

위에서 설명한 클러스터 내부 데이터통합(본 논문 3.2절) 및 클러스터 간 데이터통합(본 논문 3.3절) 방법을 적용한 전체 데이터통합 과정은 다음의 알고리즘과 같다.

- (1) 각 센서노드들을 그림 2와 같이 층 별로 클러스터를 형성한다.
- (2) 센서네트워크에서 적용하는 클러스터 내부 데이터통합 방법(하이브리드, 다중 홉 전송 기반 또는

직접 전송 기반)에 따라 클러스터 헤드노드를 선출한다.

- (3) 클러스터 멤버노드들이 이벤트(오염 또는 침투 등)를 감지하여 클러스터 내부 데이터통합 방법(하이브리드, 다중 홉 전송 기반 또는 직접 전송 기반)에 따라 이벤트 관련 데이터를 클러스터 헤드노드로 송신한다.
- (4) 클러스터 헤드노드는 가장 먼저 도착하는 데이터만 수신한다.
- (5) 데이터를 수신한 클러스터 헤드노드는 센서네트워크에서 적용하는 클러스터 간 데이터통합 방법(하이브리드, 다중 홉 전송 기반 또는 직접 전송 기반)에 따라 통합한 단일 감지데이터 및 위치데이터를 수면기지국까지 전송한다.

위에서 기술한 알고리즘에 의해 가장 에너지 효율적인 데이터통합 방법의 도출은 다음 식 (18)의 값을 최소화하는 데이터통합 방법조합을 찾는 것이다.

앞의 3.2절 및 3.3절에서 설명한 클러스터 내부 및 클러스터 간 적용하는 데이터통합 방법에 따라 식 (1)에서 식 (17)을 활용하여 응용모델 전체에서 소비되는 송수신 에너지를 다음 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{Total} = \sum_{i=1}^p \left[E_i + \sum_{a=1}^q E_a(D) \right] \quad (18)$$

식 (18)에서 E_i 는 개별 클러스터 헤드노드의 송수신 에너지이며 $\sum_{a=1}^q E_a(D)$ 는 해당 층 클러스터 멤버노드들의 송수신 에너지를 의미한다.

소비되는 송수신 에너지에 대한 식 (18)의 값을 최소화하는 가장 에너지 효율적인 데이터통합 방법의 조합은 다음 장의 시뮬레이션을 통한 성능 분석 결과 비교로 도출한다.

4. 시뮬레이션 및 성능평가

4.1 시뮬레이션 환경

제안된 데이터통합 방법들의 송수신 소비에너지 효율을 비교분석하기 위해 matlab으로 시뮬레이션을 수행하였고, 그림 2와 같은 육각기둥 벌집 기반 3차원 수중센서네트워크 응용을 모델링하였다. 여기서 네트워크의 반경 R 은 100m이고 4~20℃의 수온 조건을 만족하며 50kHz의 전송주파수를 사용한다고 가정한다. 그리고 벌집 모델 육각기둥의 수심(H)은

일반적으로 잠수함이나 침투 감지 등의 군사적 감시 응용을 고려하여 약 109.09m로 시뮬레이션 하였다 [5]. 한편 해당 모델에서 층 고리 수 q 는 7로 계산하여 적용하고, 전체 층의 수(p)는 12개 그리고 정육각기둥 셀의 한 변의 길이 s 는 9.091m로 계산하여 적용하였다. 또한 기존의 연구를 참고하여 임계 고리 k 는 4로, 경계층 m 은 10으로 선택하였다[4,6].

제안된 각 데이터통합 방법들의 정확한 비교분석을 위해 시뮬레이션은 센서네트워크에서 송수신 에너지가 최대 소모되는 경우 즉, 모든 센서노드가 이벤트를 감지하는 경우를 대상으로 하였다.

4.2 성능평가

본 시뮬레이션에서의 성능평가는 4.1절에서 모델링한 3차원 수중센서네트워크 모델에 적용하는 클러스터 내부 및 클러스터 간 데이터통합 방법에 따라 구분하여 그 결과를 비교분석한다.

먼저 그림 11은 클러스터 헤드노드가 클러스터 멤버노드로부터 가장 먼저 도착한 데이터만을 수신하는 제안된 데이터통합 방법들을 적용한 경우와 데이터통합 방법을 적용하지 않은 경우의 층 당 송수신 에너지를 비교한 것이다. 참고로 클러스터 내부의 데이터통합 방법에 따른 결과가 비슷한 형태로 도출되어 클러스터 내부에서 하이브리드 데이터통합 방법을 적용한 경우의 그래프를 대표로 제시하였다.

그림 11에서 제안된 데이터통합 방법 적용 경우들 간 층 당 송수신 소비에너지 차이가 1mW 단위로 매우 근소하여 그래프가 거의 일치하게 나타났고, 제안된 방법 모두 데이터를 통합하지 않은 경우보다

그림 11. 데이터통합 방법 적용 및 데이터통합 방법 미적용 경우 층 당 송수신 에너지 비교

송수신 에너지가 훨씬 적게 소모되었다.

다음 그림 12는 클러스터 내의 데이터통합 방법에 따라 각 층의 클러스터에서 소비되는 송수신 에너지의 평균을 나타낸 것으로, 비교 결과 모든 층에 대해 클러스터 내에서 하이브리드 데이터통합 방법을 적용하는 경우, 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법을 적용하는 경우, 직접 전송 기반 데이터통합 방법을 적용하는 경우의 순으로 송수신 에너지가 적었으며, 깊은 곳에 위치한 클러스터일수록 송수신 에너지의 차이가 더 크게 나타났다.

한편 그림 13은 제안된 각 데이터통합 방법에 따라 전체 송수신 에너지를 비교한 것이다. 그림 13에서와 같이 전체 송수신 에너지측면에서 클러스터 내에 하이브리드 데이터통합 방법을 적용하는 경우가 다중 홉 전송 및 직접 전송 기반 데이터통합 방법을 적용하는 경우에 비해 각각 평균적으로 40.02%, 64.48%의 에너지효율을 보였다.

또한 클러스터 내에서 동일한 데이터통합 방법을 적용할 경우 각 클러스터 간 데이터통합 방법에 따라 결과 값들은 10mW 단위의 차이를 가지며, 하이브리드-다중 홉 전송 데이터통합 방법이 0.9781W로 에너지 효율 측면에서 가장 우수함을 보였다.

결과적으로 제안된 데이터통합 방법들 모두 데이터를 통합하지 않은 경우보다 송수신 에너지를 훨씬 적게 소모하며, 응용모델 전체 에너지 효율 측면에서 가장 우수한 결과를 보인 하이브리드-다중 홉 전송 데이터통합 방법은 송수신 에너지를 크게 감소시켜 제안된 방법들 중 네트워크 생존시간을 최대로 연장할 수 있다.

그림 12. 클러스터 내의 데이터통합 방법에 따른 층 당 송수신 에너지 비교

그림 13. 데이터통합 방법에 따른 응용모델 전체 송수신 에너지 비교

5. 결 론

본 논문의 서론에서 기술한 것처럼 일반적으로 수중센서네트워크 응용은 적용 대상 및 지역적 범위에 따라 효과적인 모델링이 필요하고 이러한 특정화된 응용 모델 기반에서 에너지 효율적인 데이터통합 방법이 요구된다.

결과적으로 본 논문에서는 오염 및 침투 감시용 응용 모델을 위해 육각기둥 벌집 모델을 활용하였고, 적용된 각각의 3차원 육각벌집기둥의 각 층에서 클러스터 개념과 층별 클러스터 개념을 활용하여 대상 응용에 최적화된 새로운 에너지 효율적인 데이터통합 방법을 제시하였다.

시뮬레이션을 통해 제안된 데이터통합 방법들의 성능을 비교분석하였으며, 분석 결과로는 제안된 방법들 중 클러스터 내부와 층 간 클러스터들을 위해 하이브리드 및 다중 홉 전송 기반 데이터통합 방법을 각각 적용한 경우가 에너지 효율 측면에서 가장 우수한 결과를 보였다.

결론적으로 해당 데이터통합 방법을 오염 및 침투 감시용 특정 응용 모델에 적용하면 센서노드들의 송수신 에너지를 크게 감소시킴으로써 네트워크 생존시간을 최대로 연장할 수 있다. 또한 응용 해당 지역의 범위를 더 넓히거나 좁히는 선택은 3차원 육각기둥 개념에서의 s 값의 조정과 3차원 육각벌집 기둥 수를 늘이거나 줄임으로 융통성 있게 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] D. Pompili, T. Melodia, and I. F. Akyildiz, "Deployment Analysis in Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks," in *Proc. of ACM International Workshop on Underwater Networks, Los Angeles, CA*, pp. 48-55, 2006.
- [2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "State of the Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks," *ACM Mobile Computing and Communication Review*, Vol.11, No.4, pp. 7-16, 2007.
- [3] Uichin Lee, Paul Wang, Youngtae Noh, Luiz F. M. Vieira, Mario Gerla, and Jun-Hong Cui, "Pressure Routing for Underwater Sensor Networks," *IEEE INFOCOM*, pp. 1-9, 2010.
- [4] 김성운, 박선영, "수중 센서네트워크를 위한 에너지 효율적인 라우팅 방법 연구," 한국정보기술학회 논문지, 제9권, 제9호, 2011.
- [5] 이성용, 권순목, 김치하, "잠수함 위치 파악을 위한 수중 음향 센서 네트워크," 한국정보과학회 하계 컴퓨터 통신 워크샵, Summer Workshop on Computer Communications(SWCC), 2007.
- [6] 김성운, 박선영, 천현수, 김근호, "2차원 및 3차원 수중 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 데이터전송 알고리즘," 한국멀티미디어학회 논문지, 제 13권, 제 11호, pp. 1657-1666, 2010.
- [7] Z. Wu, C. Tian, H. Jiang, and W. Liu, "Minimum-Latency Aggregation Scheduling in Underwater Wireless Sensor Networks," *In Proceedings of IEEE ICC*, 2011.
- [8] K. Makki and N. Pissinou, "The Steiner Tree Problem with Minimum Number of Vertices in Graphs," *VLSI, 1992., Proceedings of the Second Great Lakes Symposium on*, pp. 204-206, 1992.
- [9] Hong-Hsu Yen, Frank Yeong-Sung Lin, and Shu-Ping Lin, "Efficient Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks," 2005 IEEE International Conference on Communications, Vol.5, pp. 3025-3029, 2005.
- [10] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, and Stephen Wicker, "Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks," *IEEE INFOCOM 2002*, 2002.
- [11] Suk-Jin Lee, Chun-Jai Lee, You-Ze Cho, and Sung-Un Kim, "A New Data Aggregation Algorithm for Clustering Distributed Nodes in Sensor Networks," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.3262, pp. 508-520, 2004.
- [12] W. Zhang and G. Cao, "DCTC: Dynamic Convey Tree-Based Collaboration for Target Tracking in Sensor Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, Vol.3, pp. 1689-1701, 2004.
- [13] Chih-Min Chao and Tzu-Ying Hsiao, "Design of Structure-Free and Energy-Balanced Data Aggregation in Wireless Sensor Networks," *HPCC '09. 11th IEEE International Conf. High Performance Computing and Communications*, pp. 222-229, 2009.
- [14] Pu Wang, Cheng Li, and Jun Zheng, "Distributed Minimum-Cost Clustering Protocol for UnderWater Sensor Networks (UWSNs)," *IEEE International Conference on Communications ICC50T5*, pp. 3510-3515, 2007.
- [15] M. C. Domingo and R. Prior, "Design and Analysis of a GPS-free Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks in Deep Water," *International Conference on Sensor Technologies and Applications Sensor Comm*, pp. 215-220, 2007.
- [16] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," *Journal of Ad Hoc Networks, Elsevier*, Vol.3, No.3, pp. 257-279, 2005.
- [17] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, Mcgraw-Hill, 1983.
- [18] R. Jurdak, et al, "Battery Lifetime Estimation and Optimization for Underwater Sensor Networks," *IEEE Sensor Network Operations*, pp. 397-420, 2004.
- [19] Underwater Acoustic Modem. Available: www.link-quest.com.

김 성 운

1982년~1985년 한국전자통신 연구소 연구원
1985년~1995년 한국통신연구 개발원 선임연구원 실장
1989년~1993년 프랑스 파리 7대학 석박사

1995년~현재 부경대학교 정보통신공학과 교수
2000년~2001년 미국 NIST 초빙연구원
2003년~현재 한국 ITU-T SG15 의장
2003년~현재 TTA PG201 프로젝트그룹 의장
관심분야: 센서 네트워크, 수중 센서 네트워크, 센서 노드 이동성 지원 기술, USN, DWDM, RWA 알고리즘

박 선 영

2007년~2011년 현재 부경대학교 전자정보통신공학과 학사
2011년~현재 부경대학교 정보통신공학과 석사과정
관심분야: 수중 센서 네트워크, 센서 노드 이동성 지원 기술, RWA 알고리즘

유 흥 식

1993년~1997년 경성대학교 전산통계학과 학사
1997년~1999년 경성대학교 전산학과 석사
1999년~2011년 부경대학교 정보통신공학과 박사 수료

2000년~2002년 12월 Nexternet Inc.(San Jose, CA)
2003년~2006년 11월 (주)주흥정보통신 연구개발 이사
2004년~현재 IEEE BTS Member
2006년 12월~현재 (주)유노믹 대표이사
관심분야: 수중 센서 네트워크, 센서네트워크, 이동통신, 방송기술