

해수운동의 특성을 활용한 수중 무선 네트워크 시각 동기화

김 성 렬*, 박 성 진*, 유 영 환^o

Time Synchronization with Oceanic Movement Pattern in Underwater Wireless Networks

Sungryul Kim*, Seongjin Park*, Younghwan Yoo^o

요 약

많은 기존 연구들에서 수중 환경에 적합한 시각 동기화를 제안하고 있으나 동기화의 정확도에 영향을 미치는 높은 채널접근지연이나 노드 간의 상대적 위치에 대한 고려가 없었다. 또한 양방향 메시지 교환 방식을 사용하는 기존 연구에서는 많은 수의 송수신 및 불필요한 오버히어링이 발생하여 네트워크 수명과 처리량이 감소하는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 수중환경의 특성을 반영한 향상된 시각 동기화 방법을 제안한다. 특히 제안 방법에서는 해수운동과 센서노드가 배치되는 환경의 특성을 활용한 메시지 전송 시점 조절 기법을 소개한다. 또한 채널접근지연이 제거된 타임스탬프를 사용하여 동기화의 정확도를 높인다. 더불어 전원공급 및 교체가 어려운 수중환경에 더욱 적합한 시각 동기화를 위해 제안 방법은 기존 방법보다 적은 수의 송수신으로 시각 동기화를 수행한다. 마지막으로 실험결과를 통해 제안 방법이 비교대상인 TSHL(Time Synchronization for High Latency)과 MU-Sync에 비해 각각 2.5ms, 0.56ms의 시각 동기화 오차를 줄이는 동시에 68.4%의 소비 에너지를 절감하였음을 보인다.

Key Words : Linear-regression, Oceanic movement, Sensor network, Time synchronization, Underwater network

ABSTRACT

Time synchronization in underwater environment is challenging due to high propagation delay and mobility of sensor nodes. Previous researches do not consider practical issues affecting on the accuracy of time synchronization such as high-channel access delay and relative position between sensor nodes. Also, those protocols using bidirectional message exchange shorten the network lifetime and decrease the network throughput because numerous transmission, reception and unnecessary overhearing can be occurred. Therefore, in our research, we suggest enhanced time synchronization based on features of underwater environment. It controls the instant of transmission by exploiting the feature of an oceanic movement and node deployment. Moreover, the protocol uses more accurate time information by removing channel access delay from the timestamp. The proposed scheme is also practical on the underwater sensor network requiring low-power consumption because the scheme conducts time-synchronization with smaller transmission and reception compared with previous works. Finally, simulation results show that the proposed protocol decreases time error by 2.5ms and 0.56ms compared with TSHL and MU-Sync respectively, reducing energy consumption by 68.4%.

* 본 논문은 지식경제부 산업융합원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(No.10043907)

• 주저자 : 부산대학교 컴퓨터공학과 유비쿼터스컴퓨팅 연구실, xmfhx12@pusan.ac.kr, 학생회원

o 교신저자 : 부산대학교 컴퓨터공학과 유비쿼터스컴퓨팅 연구실, ymomo@pusan.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2013-03-114, 접수일자 : 2013년 3월 4일, 최종논문접수일자 : 2013년 5월 7일

I. 서 론

해양 자원의 활용 가능성과 그에 따른 막대한 기대효과로 인해 해양 플랜트와 같은 해양 기반시설에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 해수의 온도, 적조현상, 오염유출과 같은 해양 생태계에 치명적인 영향을 미치는 요인에 빠르게 대처하기 위해 지속적인 해양환경 감시의 필요성이 나타나고 있는 추세이다. 최근 이러한 요구사항을 위해 해양 기반시설을 원격으로 제어하고 해양 생태계를 감시, 관리하는 수중환경용 센서 기술이 각광받고 있다^[1]. 그러나 음파를 이용한 수중통신채널은 지상과 달리 신호에 영향을 주는 가변적인 요인이 많으므로 기존의 통신기술을 수중환경에 곧바로 적용하기 어렵다. 특히, 수중에서 배치된 노드들 간의 시각 동기화는 다양한 응용의 지원과 저전력 통신 MAC(Medium Access Control) 프로토콜 설계를 위한 필수적인 요구사항임에도 불구하고 긴 전파지연과 지속적인 센서노드의 움직임으로 인해 구현하기가 힘들다.

계층에서 다양하게 사용되는 시각 동기화의 중요성으로 인해 이미 많은 연구자들이 수중환경에서의 시각 동기화 기법을 제안하였으나 이들은 수중환경이 통신에 미치는 영향을 구체적으로 고려하고 있지 않다. 특히 수중에서 진행되는 음파의 속도는 현저히 낮기 때문에 높은 전파지연을 야기한다. 다시 말해, CSMA(Carrier Sensing Medium Access)와 같이 경쟁기반 MAC 프로토콜을 사용할 경우, 높은 채널 접근지연이 발생함을 의미하며 이는 시각 동기화 과정에서 심각한 오차요인이 된다. 또한 송신기의 위치와 자세에 따라 수신기에 도달하는 경로가 다중으로 발생할 경우 타임스탬프를 사용하는 시각 동기화에서 불확실한 시간 값을 제공하게 된다.

이에 본 논문에서는 수중환경의 특성을 고려한 새로운 시각 동기화 방법을 제안하고 있다. 특히 해수운동에 의해 발생하는 노드의 움직임은 어느 정도의 주기성을 가진다는 사실에 기반을 두어 시각 동기화 과정에서 메시지를 교환할 때 송신시점을 조절하고 이를 통해 가변적인 전파지연으로 인해 발생하는 오차를 최소화 한다. 또한 추가적인 한 번의 전송을 통해 채널접근지연을 타임스탬프에서 제거하는 방법을 소개할 것이다. 그리고 저전력 통신을 지향하는 수중 센서 네트워크의 특성을 반영하여 메시지 교환 시 동기화의 대상이 되는 노드의

송수신 횟수를 절감하여 에너지 소비를 줄인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 제안 방법의 이해를 돕기 위해 기존에 개발된 수중 환경용 시각 동기화 방법들을 살펴본다. III장에서는 선형회귀분석 기반 시각 동기화에서 오차요인을 정의하고 수학적 분석을 통해 동기화의 정확도에 미치는 영향을 파악한다. 이를 바탕으로 IV장에서 오차요인을 억제하는 새로운 시각 동기화 방법을 제안한다. V장에서 실험을 통해 제안 방법이 기존의 방법이 사용하는 에너지의 약 31.8%만을 사용하여 더욱 정확한 시각 동기화를 수행함을 보이며 결론 및 향후 과제를 통해 마무리한다.

II. 관련연구

센서노드들 사이에 시각 차이를 발생시키는 요인은 클럭스큐와 옵셋이다. 센서노드 내부에서 작동하는 오실레이터는 온도, 전압, 압력에 따라 진동수의 미세한 차이가 나타나게 되는데 이로 인해 발생하는 시간 차이가 클럭스큐이다. 또한 각각의 센서노드가 시스템을 시작하는 시점이 다르기 때문에 발생하는 시간차이를 옵셋이라고 한다. 이미 많은 연구자들은 수중환경에서 노드 사이에 발생하는 클럭스큐와 옵셋을 보정하기 위한 방법들을 제안하였다. TSHL(Time Synchronization for High Latency)은 수중환경을 고려한 최초의 시각 동기화 방법이다^[2]. 표준시간으로 동작하는 참조노드와 동기화의 대상이 되는 목적노드가 타임스탬프를 포함하는 메시지를 교환하고 수집된 시간 정보를 바탕으로 선형회귀를 수행하여 클럭스큐와 옵셋을 보정한다. 그러나 TSHL에서는 메시지 교환 시, 두 노드의 움직임이 없다고 가정하였기 때문에 해수운동으로 인해 지속적으로 센서노드의 위치가 변하는 수중환경에 적합하지 않다. 이를 극복하기 위해 MU-Sync는 움직임이 있는 수중환경을 고려한 시각 동기화 방법을 제안하고 있다^[3]. 첫 번째 선형회귀를 통해 예측된 스큐와 옵셋을 이용하여 수집된 시간 데이터에서 전파지연을 제거하였고 이후, 더욱 정확해진 데이터 샘플을 사용하여 두 번째 선형회귀에서 최종적으로 시각 동기화를 수행하였다. 그러나 MU-Sync는 전파지연 시간을 패킷 왕복시간의 평균으로 간주하므로 메시지 교환 시 노드가 일정한 방향으로 이동할 경우 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 한편, 송수신기의 상대속도에 따라 전송 신호의 주파수가 천이되는 도플러 효과를 이용한 시각 동기화를 제안하

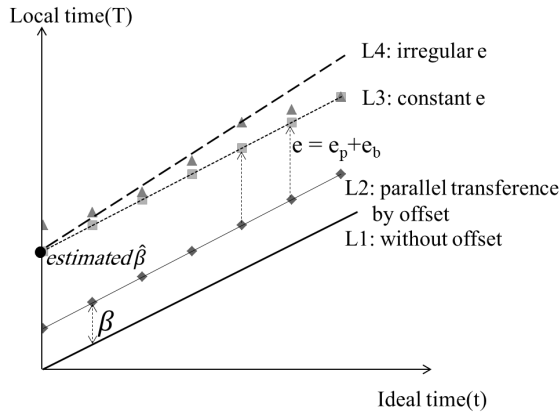


Fig. 1. Illustration of clock drift and impact of measured timestamp on the linear regression

는 연구들도 있었다^[4-5]. 도플러 기반 시각 동기화 기법은 이전 메시지 교환 시점과 현재 메시지 교환 시점 동안 두 노드가 이동한 상대거리를 이용하여 시각 동기화를 수행한다. 그러나 제안 방법은 메시지 교환 시 지속적인 도플러 효과가 발생해야 하는 제약 사항이 있으며 송수신기가 이루는 각도가 고려되지 않았기 때문에 정확한 주파수 천이를 감지하기 힘들다. 게다가 두 노드 사이의 이동거리는 노드들의 속도뿐만 아니라 노드 간의 상대적 위치에 따라 달라지므로 노드의 절대위치를 알 수 없는 상황에서 제안 방법은 한계를 가진다. 또한 수중에서 진행되는 음파는 공간에 따라 가변적이기 때문에 동기화의 정확도가 떨어질 수밖에 없다.

III. 오차분석

제안하는 방법은 선형회귀분석을 기반으로 하고 있다. 이에 본 장에서는 시각 동기화를 위한 선형회귀분석에서 오차를 발생시키는 요인을 분석한다.

선형회귀분석은 직선의 식으로 표현될 수 있는 두 변수간의 관계성을 파악하는 수학적 도구이다. 다시 말해, 두 변수 x와 y가 선형적인 관계를 가진다고 판단될 때 이들의 관계를 $y=ax+b$ 로 나타낸 뒤, 주어진 데이터 집합과의 거리의 합을 최소로 하는 a와 b를 도출하는 방법이다. 만약 참조노드와 목적노드의 시간을 각각 x, y라 하고 노드 간 스쿠와 오프셋을 각각 a, b라 하면 선형회귀분석을 통해 구해진 a와 b를 기반으로 하여 두 노드간의 시각 동기화가 가능하다.

시간정보를 얻기 위해 참조노드와 목적노드 사이에서 발생하는 메시지 교환 과정을 살펴보도록 하

자. 참조노드는 메시지 전송시점을 타임스탬프에 기록하여 시각 동기화의 대상이 되는 목적노드에 전송하고 이를 수신한 목적노드는 수신 시점을 기록한다. 위와 같은 단방향 메시지 교환을 총 n번 수행하여 시간정보를 획득하며 n은 예측하는 스쿠와 오프셋의 오차가 수렴하기에 충분한 값이 되어야 한다. i번째 타임스탬프 교환 시 참조노드의 송신시점과 목적노드의 수신시점을 각각 t_i, T_i 라 하고 스쿠를 α , 오프셋을 β 라 하면 수신시점 T_i 는

$$T_i = \alpha t_i + \beta \tag{1}$$

로 표현할 수 있다. 그러나 실제 메시지 전송과정에서는 음파의 속도와 송수신기 사이의 거리에 의해 결정되는 전파지연과 채널점유를 위해 임의의 시간 동안 전송을 대기하는 채널접근지연이 발생하게 된다. 기존연구에서는 전파지연에 의한 오차를 보정하기 위해 많은 노력을 하였으나 전파속도가 느린 수중통신에서는 채널접근지연이 타임스탬프의 정확도에 미치는 영향 또한 상당히 크기 때문에 이를 고려한 시각 동기화가 필요하다. 더욱이 채널을 점유하기 위해 경쟁하는 노드의 수가 많을수록 예측오차는 커지기 때문에 타임스탬프에서 채널접근지연을 제거하는 메커니즘이 필수적으로 요구된다. 총 n번의 메시지 교환 중 i번째 메시지 송수신에서 발생하는 전파지연과 채널접근지연을 각각 $e_{p,i}, e_{b,i}$ 라 하고 이들의 합을 e_i 라 할 때 식(1)은 다음과 같이 재정의 될 수 있다.

$$T_i = \alpha t_i + \beta + \alpha e_i \tag{2}$$

그러나 e_i 가 선형회귀에 미치는 영향을 파악하는 것이 목적이므로 식(2)에서 αe_i 를 e_i 로 단순화 하면

$$T_i = \alpha t_i + \beta + e_i \tag{3}$$

로 재정의 할 수 있다.

이해를 돕기 위해 Fig1을 살펴보도록 하자. 만약 노드 사이에 오프셋이 존재하지 않을 경우 송신과 수신 시간 사이의 관계는 직선 L1과 같이 나타나며 L1의 기울기가 스쿠에 해당한다. 여기서 두 노드 사이에 β 만큼의 오프셋이 발생하게 되면 L1은 L2의 직선으로 평행이동을 하게 되고 직선 L2의 T절편이 β 에 해당한다. 그러나 실제 타임스탬프 교환 과정

에서는 위에서 언급한 e_i 의 영향으로 인해 직선 L4와 같은 형태의 직선회귀식이 구해지게 된다. 여기서 주목할 점은, 비록 e_i 가 존재하더라도 만약 그 크기가 일정하다면 선형회귀를 통해 직선 L3과 같이 정확한 스큐를 가지는 직선식을 구할 수 있다는 것이다. 엄밀히 말해 전파지연과 채널접근지연 자체가 스큐 예측에 오차요인이 아니라 전송 때마다 그 값의 크기가 달라지는 것이 스큐예측의 오차요인이다. 기존연구에서는 e_i 를 제거하기 위한 많은 노력을 해왔으나 이는 긴 전파지연과 채널접근지연을 가지는 수중 통신환경에서 상당히 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 e_i 가 매 전송마다 동일한 크기로 발생하게 하는 방안을 모색한다. 한편 Fig1과 같이 e_i 의 평균의 크기가 클수록 평행이동의 폭이 커지는 것을 확인 할 수 있으며 이는 예측 윗셋의 오차는 e_i 의 평균에 비례하여 증가한다는 것을 의미한다. 다시 말해, 선형회귀 방정식에서 스큐의 예측은 n 번의 전송 동안 발생한 전파지연과 채널접근지연의 편차에 영향을 받고 윗셋의 예측은 그 평균에 비례하여 증가한다. α 와 β 를 예측하기 위해 식(1)을 최소제곱법으로 표현하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho(\alpha, \beta) = \sum_i^n (T_i - (\alpha t_i + \beta))^2 \quad (4)$$

$\rho(\alpha, \beta)$ 를 최소로 하는 α 와 β 를 추정하기 위해 식(4)를 α 와 β 로 각각 편미분하여 α 와 β 에 관한 식으로 정리하면

$$\hat{\alpha} = \frac{n \sum t_i T_i - \sum t_i \sum T_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum t_i^2 \sum T_i - \sum t_i T_i \sum t_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (6)$$

와 같다.

또한 식(3)을 최소제곱법으로 표현하면

$$\rho(\alpha, \beta) = \sum_i^n (T_i - (\alpha t_i + \beta + e_i))^2 \quad (7)$$

와 같고 위와 동일한 방법으로 예측된 스큐와 윗셋은 각각

$$\hat{\alpha} = \frac{n \sum t_i T_i - \sum t_i \sum T_i + \sum t_i \sum e_i - n \sum t_i e_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (8)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum t_i^2 \sum T_i - \sum t_i T_i \sum t_i - \sum e_i \sum t_i^2 + \sum t_i e_i \sum t_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (9)$$

이다.

식 (5)와 (8)의 비교를 통해 알 수 있듯이 e_i 로 인한 스큐 예측의 오차는

$$\hat{\alpha} - \hat{\alpha} = \frac{\sum t_i \sum e_i - n \sum t_i e_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (10)$$

이며 송신시점과 전송 시 발생하는 e_i 에 따라 스큐 예측의 오차가 결정된다. 그러나 만약 참조노드가 I 간격만큼 일정하게 메시지를 송신하고 위에서 언급한 것처럼 매 전송 마다 발생하는 e_i 가 상수인 e 로 일정하다고 가정하면 식(10)의 분자는

$$\hat{\alpha} - \hat{\alpha} \approx \frac{n^2(n+1)}{2} eI - \frac{n^2(n+1)}{2} eI = 0 \quad (11)$$

이 된다. 즉, 비록 e_i 가 존재하더라도 그 크기가 일정한 상수 값을 가지면 e_i 는 스큐 예측에 어떠한 영향도 주지 않음을 의미한다.

한편 e_i 가 윗셋 예측의 정확도에 미치는 영향을 파악하기 위해 $\hat{\beta} - \hat{\beta}$ 를 구하면

$$\hat{\beta} - \hat{\beta} = \frac{\sum t_i e_i \sum t_i - \sum e_i \sum t_i^2}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (12)$$

이고 위와 동일한 가정 하에 식(12)의 분자를 전개 하면

$$\hat{\beta} - \hat{\beta} = \left(\frac{n^2(n+1)^2}{4} - \frac{n^2(n+1)(2n+1)}{6} \right) Ie \quad (13)$$

이다. $n > 1$ 인 경우 식(13)은 항상 음수를 가지므로 만약 e_i 를 고려하지 않을 경우 예측된 윗셋 $\hat{\beta}$ 는 실제 윗셋 β 와 식(13)이 더해진 결과이다. 이는 e 가 크면 클수록 예측되는 윗셋이 실제보다 점점 더 커짐을 의미한다.

IV. 제안 방법

4.1. 시스템 구성

제안하는 시각 동기화 방법이 적용되는 시스템 구성은 Fig2와 같다. 시각 동기화 과정에서 참조노드의 역할을 하는 센서는 부표에 부착되어 수표면에 배치되며 센서에 설치된 GPS모듈을 통해 표준 시간을 부여 받는다. 수중에 배치되는 센서노드들은

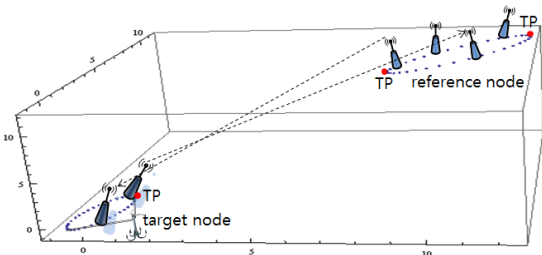


Fig. 2. System design

자이로 센서와 가속도 센서가 부착되어 있어 자신의 움직임을 실시간으로 측정 가능하다. 센서들을 수중에 배치하는 것은 또 하나의 연구주제로서 응용의 특징과 관련이 깊지만 본 연구에서는 I. F. Akyildiz이 제안한 노드 배치와 동일하게 닳이나 선을 이용하여 해저 지형이나 해양시설에 고정시킨 환경을 가정한다⁶⁾. 따라서 센서노드의 움직임은 일정한 반경 내에서만 허용된다. 그리고 해양 유체역학적 분석과 노드움직임의 실제적 측정결과는 해수운동이 물체에 주기적인 힘을 가한다는 것을 증명한다⁷⁻⁹⁾. 따라서, 수중에 떠있는 물체는 일반적으로 생각하는 것처럼 무작위로 움직이는 것이 아니라 어느 정도 규칙성을 가지고 움직인다. 이에 본 연구에서는 수중에 배치된 센서 노드가 일정한 주기성을 가지고 움직이는 것을 가정한다.

4.2. 시각 동기화 프로토콜

앞선 III장을 통해 선형회귀분석을 이용한 시각 동기화 방법은 전파지연과 채널접근지연에 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 또한 타임스탬프를 전송할 때 마다 발생하는 e_i 의 크기가 동일하다면 보다 정확한 스큐예측이 가능하다는 사실도 알 수 있었다. 따라서 제안 방법에서는 이 사실에 기인하여 메시지 교환과정에서 발생하는 e_i 의 크기를 동일하게 만들어 L3와 같은 형태의 직선의 식을 얻는 것을 목표로 한다. 또한 예측된 스큐를 바탕으로 왕복지연시간을 계산하여 정확한 오프셋을 구할 것이다. 이를 위해 추가적인 한 번의 전송을 통해 채널접근지연 $e_{b,i}$ 를 타임스탬프에서 제거하는 방법과 참조노드의 전송이 동일한 위치에서 발생하여 전파지연 $e_{p,i}$ 가 일정한 값을 가지게 하는 방법을 소개한다.

4.2.1. 타임스탬프에서 채널접근지연 제거

타임스탬프는 물리계층을 제외한 모든 계층에서 기록이 가능하지만 상위계층에서 하위계층으로 패킷을 전달할 때 예측 불가능한 지연이 발생하므로 최대 하위 계층에서 기록하는 것이 바람직하다.

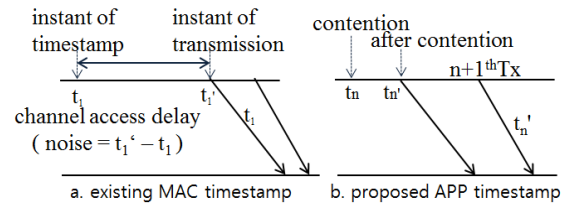


Fig. 3. Influence of channel access delay on timestamp

Fig3.a와 같이 기존의 MAC 타임스탬프 방식에서는 채널접근 지연으로 인해 타임스탬프가 기록된 시점과 패킷이 실제로 전송되는 시점과의 차이가 발생하게 된다. 이러한 채널접근지연을 타임스탬프에서 제거하기 위해 제안 방법에서는 응용계층 타임스탬프를 사용한다. 제안 방법에서는 Fig3.b와 같이 n번째 전송되는 시점을 n번째 패킷이 아닌 n+1번째 패킷에 실어 전송한다. 메시지 전송 시 센서노드는 MAC계층에서 채널을 점유한 이후 실제로 전송이 이루어지는 시점을 메모리에 저장하고 그 다음 메시지를 전송할 때 메모리에 기록된 이전 전송시점을 응용계층의 페이로드에 기입한다. 채널 점유 이후에 타임스탬프를 기록하지 못하는 이유는 물리계층에서는 패킷에 정보를 기입할 수 없기 때문이다. 수신측에서는 n+1번째 수신을 통해 채널접근지연이 제거된 n번째 타임스탬프 값을 얻을 수 있다. 이를 통해 목적노드는 아무리 많은 노드가 채널점유를 위해 경쟁하고 있더라도 채널접근지연이 제거된 타임스탬프를 사용할 수 있다. 비록 제안 방법은 추가적인 한 번의 전송을 요구하지만 다수의 송수신이 일어나는 메시지 과정에서 한 번의 추가적인 전송은 충분히 수용 가능한 오버헤드이다. 제안방법의 의사코드는 Fig4와 같다.

4.2.2. 메시지 교환 시 노드 간 상대거리 변화의 최소화

메시지를 교환할 때 노드 사이의 거리가 달라지는 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 해수운동의 특성과 센서노드가 배치되는 환경을 활용한다. 수중에 배치되는 노드의 움직임은 해류, 파랑, 조석 등과 같은 해수의 운동에 의해 발생하게 되는데 이러한 수중의 움직임은 순환적이며 일정한 방향성을 갖는다. 따라서 해수에 휩쓸려 육지로 밀려 내려가는 것을 방지하기 위해 특정 위치에 고정된 센서노드의 경우 그 움직임이 특정 반경 안에서 주기성을 가진다. 한편, 센서노드는 자이로 센서와 가속도 센서를 통해 스스로의 움직임을 실시간으로 관측할

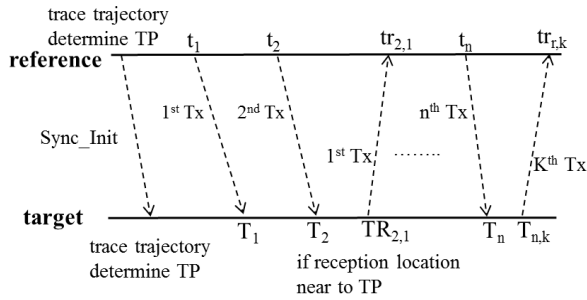


Fig. 4. Message exchange between reference and target node

수 있다. 따라서 어느 정도의 주기성을 가지고 움직이는 노드는 자신의 위치가 정해진 한 영역에 도달할 경우에만 메시지를 전송하는 것이 가능하다. 만약 노드의 운동 주기가 커지게 되면 시각 동기화 수행 시간도 길어지는 단점이 있으나 수행 시간은 동기화 방법을 평가하는 중요한 척도가 아니므로 이는 무시한다. 비록 메시지 교환 시 목적노드의 위치는 매 전송마다 달라질 수 있으나 참조노드가 전송을 수행하는 지점을 고정시켜 전파지연의 변화를 최소화 할 수 있다. 또한 목적노드가 메시지를 수신할 때 달라지는 위치는 가중치를 적용하여 보정 가능하며 이는 다음 절에서 더욱 자세히 소개할 것이다. 시각 동기화 수행 과정은 다음과 같다.

- (1) 시각동기를 위해 참조노드가 Sync_Init 메시지를 목적노드에게 전송한다. 이와 동시에 참조노드와 목적노드는 자이로 센서와 가속도 센서를 통해 움직임의 궤적을 파악한다. 센서를 통해 지속적으로 자신의 궤적을 측정하면 빠르게 시각 동기화를 수행할 수 있으나 측정을 위한 에너지 소모 및 측정 위치의 오차 누적의 문제가 발생할 수 있으므로 움직임 추정은 시각 동기화가 수행되는 동안만 진행된다. Fig2와 같이 노드 A, B가 주기성을 가지며 각각 움직일 경우, 참조 노드는 방향이 전환되는 지점, TP(Turning Point)를 파악하고 TP를 기준으로 하여 실시간적으로 변하는 자신의 위치를 (x, y, z) 3차원 평면으로 맵핑한다. 또한 가속도와 자이로 센서를 통해 현재 위치를 실시간적으로 파악할 수 있기 때문에 움직임에 무작위성이 포함된 환경에서도 노드들은 TP에 근접한 시점을 인지할 수 있다. 자신의 궤적을 파악한 참조노드는 TP 지점에서 타임스탬프가 포함된 메시지를 전송한다. 그러나 채널접근지연으로 인해 전송을 시도하더라도 임의의 시간 이후에 실제

```

[ MAC layer in nth transmission ]
void BackOff_Expired(){
    Byte sendPacket(Packet* packet){
        ...
        Pre_timeStamp = CurrentTime();
        ...
        Probe(SEND);
    }
}
[ application layer in n+1th transmission ]
void SendTimeStamp(){
    Packet packet;
    ...
    packet.preTimeStamp = Pre_timeStamp;
    ...
    SendPacketToTransport(packet);
}
    
```

Fig. 5. Pseudo-code to remove channel access delay from timestamp

전송이 발생하므로 응용계층에서의 전송은 TP 근처에 도달하는 시점부터 수행되어야 한다. TP 근처에 위치한 노드는 단위시간 당 이동거리가 상대적으로 짧기 때문에 전파지연과 채널접근지연이 있더라도 매 전송이 거의 동일한 위치에서 수행된다.

- (2) 패킷왕복시간을 계산하기 위해 목적노드는 참조노드로부터 메시지 수신 이후, 자신의 타임스탬프를 참조노드로 전송한다. 그러나 수신 때마다 메시지를 전송을 하는 것이 아니라 메시지 수신 시 자신의 위치가 TP로부터 정해진 D_{th} 보다 가까이 위치할 경우에만 전송한다. D_{th} 는 TP로부터 떨어진 거리로서 D_{th} 가 작을수록 목적노드가 TP에 가까운 위치에서 전송하지만 노드 움직임에 따라 전송이 발생되지 않는 경우가 생기므로 적절한 D_{th} 의 설정이 필요하다. 참조노드와 목적노드의 송신이 각자의 TP 주위에서 발생하므로 메시지 교환 동안 두 노드의 움직임은 거의 없다. 이후 목적노드가 자신의 TP 근처에서 메시지를 수신하더라도 이미 움직임을 예측하기에 충분한 전송을 했다면 왕복지연 시간 계산을 위한 메시지 전송을 포기한다. 목적노드는 i번째 메시지 수신을 통해 얻어진 송수신시간과 자신이 위치한 좌표, $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ 를 5-튜플의 형태 $(t_i, T_i, x_i, y_i, z_i)$ 로 저장하고 참조노드는 목적노드로부터 메시지를 받을 경우 송수신 시간을 기록한다. 메시지 전송이 끝나면 목적노

드는 P_i 의 평균값 $P_m = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 을 계산한 뒤 가중치기반 최소 자승법을 사용하여 α 를 추정한다. α 와 β 에 의해 결정되는 편차의 자승들의 모든 합은

$$\rho(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \omega_i (T_i - (\alpha t_i + \beta))^2 \quad (14)$$

로 표현되며, 두 지점 a, b간의 거리를 D_{ab} , 수중에서 진행되는 음파의 속도를 v 라고 할 때 가중치 ω_i 는

$$\omega_i = 1 - \frac{D_{im}}{v} \quad (15)$$

로 나타낸다. 오차의 제곱에 곱해진 가중치는 메시지를 수신한 위치가 P_m 에서 멀어질수록 $\rho(\alpha, \beta)$ 에 주는 영향을 축소시키는 역할을 하며, 이를 통해 목적노드의 움직임으로 인한 예측오차를 보정할 수 있다.

최종적으로

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \arg \min [\rho(\alpha, \beta)] \quad (16)$$

을 만족하는 α 를 구하면 예측 스쿼 $\hat{\alpha}$ 는

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum \omega_i T_i \sum \omega_i t_i - \sum \omega_i T_i t_i \sum \omega_i}{(\sum \omega_i t_i)^2 - \sum \omega_i t_i^2 \sum \omega_i} \quad (17)$$

이다.

위와 같은 절차를 통해 스쿼를 추정한 후 이를 바탕으로 음셋을 추정한다. Fig5와 같이 참조노드가 n번의 메시지를 전송하는 동안 목적노드는 이에 대한 응답으로 총k번의 메시지를 전송한다($k < n$). 참조노드의 i번째 메시지 전송에 대해 목적노드의 j번째 응답시점을 $TR_{i,j}$, 참조노드가 이를 수신한 시점을 $tr_{i,j}$ 라 할 때 참조노드의 i번째 전송과 목적노드의 j번째 전송에서 발생한 전파지연 $e_{p,i}$ 는

$$e_{p,i} \approx \frac{1}{2} [tr_{i,j} - t_i + \frac{TR_{i,j} - T_i}{\hat{\alpha}}] \quad (18)$$

이다.

(2)에서 e_i 는 전파지연 $e_{p,i}$ 와 채널접근지연 $e_{b,i}$ 의 합으로 표현하고 있지만 IV장의 2.1에서 제안한 방법을 통해 $e_{b,i}$ 가 타임스탬프에서 제거되므로 e_i 는 $e_{p,i}$ 와 동일하며 이를 식(2)에 적용하여 β 에 대해 정리하면

$$\beta_i = T_i - \alpha(t_i + e_{p,i}) \quad (19)$$

Simulation Parameter	Value	
skew, α	40(ppm)	
offset, β	5(s)	
simulation number	100	
D_{th}	2(m)	
# of transmission on target(k)	5	
Movement Parameter	Reference	Target
Moving range(x,y,z)	10, 4, 8	8, 3, 4
Period(T)	4(s)	3(s)
Center position(x,y,z)	(0,0,0)	(20,10,3)

Table 1. Simulation parameters

가 된다. 여기서 식(18)을 통해 구해진 $e_{p,i}$ 를 식(19)에 대입하면 구하고자 하는 음셋 β 를 계산할 수 있다. 참조노드가 전송한 i번째 메시지를 통해 얻어진 음셋을 β_i 라 할 때 추정하고자 하는 $\hat{\beta}$ 는 이들의 평균인

$$\hat{\beta} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \beta_i \quad (20)$$

이다.

이론상 양방향 메시지 교환 시 참조노드와 목적노드가 각각의 TP와 가장 가까운 지점에서 송수신한 타임스탬프를 이용하는 것이 정확한 음셋을 추정하는 방법이지만 열악한 수중채널의 특성을 고려할 때 수집된 데이터의 평균을 이용하는 것이 시스템의 신뢰성을 향상 시키는 방법이다.

V. 실험

노드의 주기적 움직임을 모델링하기 위해 노드의 궤적을 x-y평면에 대해서 타원운동으로, 깊이 정보인 z축에 대해서는 연직운동으로 추상화하였다. 또한 참조노드와 목적노드는 (x,y,z) 좌표평면상의 제한 범위 내에서 각각의 주기 T를 가지고 움직이며 노드가 TP에 근접할수록 속도는 0으로, 반대로 타원의 중심으로 접근할수록 속도를 선형적으로 증가시켰다. 실험환경 및 각 노드의 움직임을 나타내는 인자들은 Table1에 정리되어 있으며 제안 방법의 비교 대상은 TSHL과 MU-Sync로 선정하였다.

참조노드와 목적노드가 교환한 타임스탬프의 총 횟수에 따른 예측스쿼 오차의 추이가 Fig6과 같이

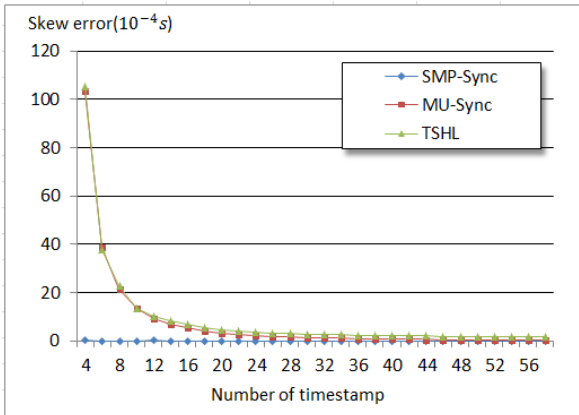


Fig. 6. Effect of the number of timestamp on skew estimation

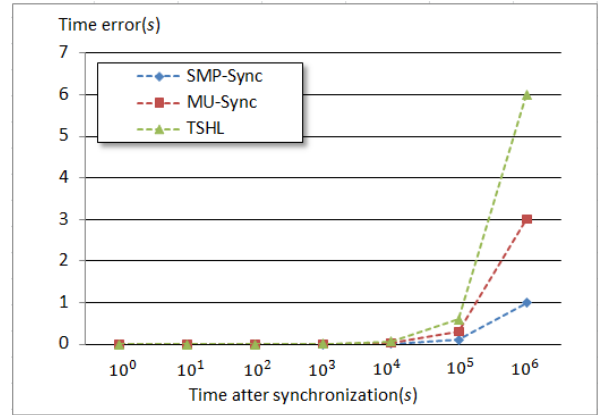


Fig. 8. The error in time estimation after time synchronization

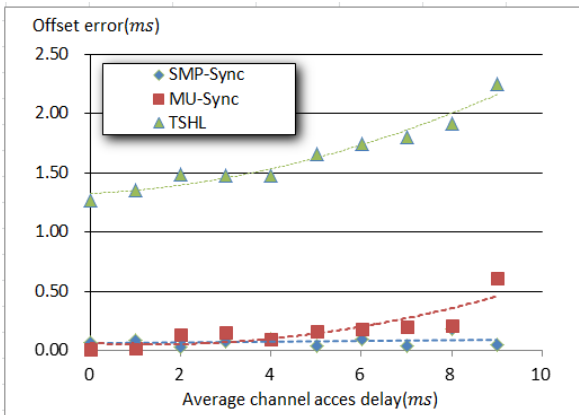


Fig. 7. Effect of channel access delay on offset estimation

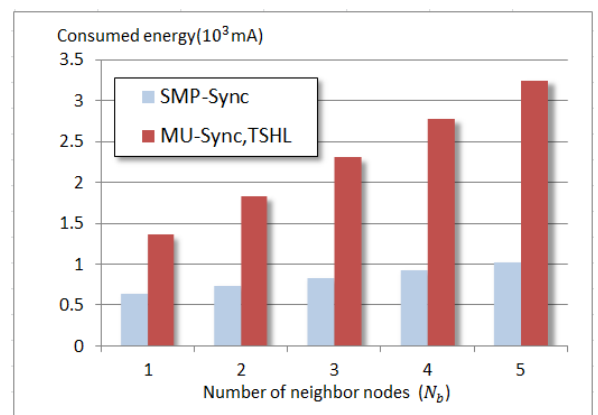


Fig. 9. Energy consumption according to the number of neighbor

나타난다. 본 실험에서 MU-Sync와 TSHL의 경우 약 50번의 메시지 교환, 즉 25번 이상의 양방향 메시지 교환을 통해 정확한 스큐 예측이 가능하였다. 비교대상 방법이 적은 수의 메시지 교환을 사용할 때 낮은 스큐 예측의 정확도를 가지는 이유는 메시지 교환 시 두 노드 사이의 거리가 일정하게 증가하거나 감소하면 스큐 예측의 정확도가 낮아지게 되는데 적은 수의 메시지 교환에서는 이런 상황이 발생하는 비중이 전체 수집 데이터 중에서 높기 때문이다. 반면 제안 방법은 참조노드가 전송하는 위치를 특정영역에 고정시키고 목적노드의 평균수신 지점을 이용하여 목적노드의 움직임으로 인한 오차를 가중치 기반 최소제곱법에서 보정하므로 메시지를 교환할 때 두 노드 사이의 거리가 거의 일정하게 유지된다. 따라서 제안 방법은 적은 수의 메시지 교환으로도 정확한 스큐를 예측할 수 있다. 그럼으로 볼 때 제안 방법의 스큐 예측오차가 0으로 나타나고 있지만 이는 제안 방법을 이용한 스큐 예측의

오차의 비례 상당히 작기 때문이다. 실제로 4번의 메시지 교환으로 예측한 오프셋의 오차는 0.023ms이며 메시지 교환 횟수가 증가할수록 비교대상과 같은 추이로 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

평균 채널접근지연을 0~10ms로 증가시키면서 예측 오프셋과 실제 오프셋 간의 차이를 측정된 결과가 Fig7과 같이 나타난다. 오차 분석 결과와 같이 비교 대상은 평균 채널접근지연이 커질수록 예측 오프셋의 값도 커지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안 방법은 타임스탬프가 채널접근지연에 영향을 받지 않으므로 오프셋 예측의 정확도가 접근지연의 크기와 관계없이 일정하다. 다만 MU-Sync가 TSHL보다 높은 오프셋 예측 정확도를 가지는 이유는 MU-Sync에서 전파지연을 타임스탬프에서 제거할 때 실제 전파지연보다 큰 값이 제거되므로 채널접근지연까지 어느 정도 제거하는 것과 동일한 효과가 있기 때문이다.

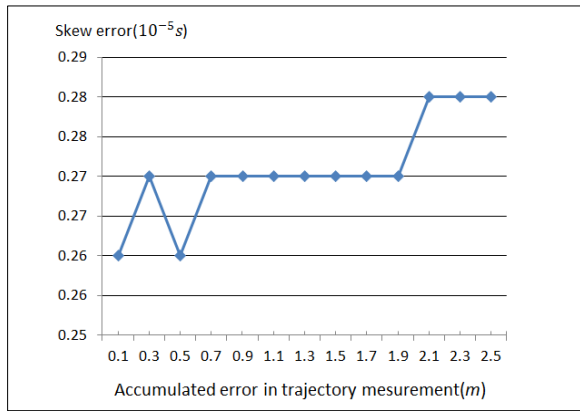


Fig. 10. Relationship between skew error and trajectory measurement error in proposed protocol

평균 채널접근지연을 10ms로 설정하여 수행한 실험결과를 바탕으로 시각 동기화 이후 두 노드 사이의 시각 오차를 측정된 결과가 Fig8과 같이 나타난다. 제안방법은 정확한 스큐와 옵셋을 예측하므로 비교대상에 비해 오랜 시간이 흐른 뒤에도 작은 시간오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안방법이 더 긴 시각 동기화 수행주기를 가질 수 있음을 의미하며 이를 통해 에너지 소비적 측면에서 효율을 가져 올 수 있다.

수면 근처에 위치한 참조노드는 전원교체가 용이하나 수중에 배치된 목적 노드의 경우 전원의 공급이나 교체가 상대적으로 어렵기 때문에 시각 동기화를 위한 에너지 소모를 최소화하는 것 또한 매우 중요하다. 하나의 목적노드가 시각 동기화 수행 동안 메시지를 수신한 횟수를 N_{rx} , 송신한 횟수를 N_{tx} 라 할 때 목적노드의 총 송수신 횟수는 비교대상과 제안 방법에서 각각

$$N_{tx} + (1 + N_b)N_{rx}, \quad (21)$$

$$k + N_b k + N_{tx} \quad (22)$$

이다. k 는 목적노드가 옵셋 예측을 위해 전송을 시도하는 횟수이고 N_b 는 자신의 전송범위 안에서 함께 시각 동기화를 수행하는 목적노드의 개수이다. 식(21)과 (22)의 비교를 통해 양방향 메시지 전송을 사용하는 비교대상 방법에서 실제 자신의 시각 동기화를 위한 송수신뿐만 아니라 이웃노드의 송신으로 인한 오버헤어링으로 인해 과도한 에너지 소비가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안 방법은 옵셋 예측을 위한 목적노드의 전송횟수를 최소화하기 때문에 송신을 위한 에너지 소비뿐만 아니라 오버헤어링으로 인한 에너지 소비도 상

대적으로 적다. 비록 제안 방법에서는 궤적을 추정하기 위해 센서를 작동시키므로 추가적인 에너지 소비가 있으나 센서노드의 에너지 소비의 주된 요인은 통신에서 발생하므로 자이로 센서와 가속도 센서를 동작하기 위한 추가적인 에너지 소비는 무시한다. 송수신을 위해 각각 18.8, 17.4mA를 사용하는 CC2420태그를 목적노드로 가정할 경우 시각 동기화를 수행하기 위해 하나의 목적노드가 소모하는 에너지의 크기는 Fig9와 같다. Fig9에서 볼 수 있듯이 비교 대상 방법에 비해 제안방법이 적은 에너지를 소모한다. 예를 들어 하나의 참조노드로부터 시각 동기화를 수행하는 이웃 노드의 개수가 5개 일 경우, 3255mA의 전력을 소비하는 비교 대상 프로토콜에 비해 제안 방법은 1027mA를 사용하므로 제안 방법을 통해 68.4%의 소비 에너지를 감소시킬 수 있다. 따라서 저전력 통신을 요구하는 수중환경에 제안 방법이 기존 방법들보다 더욱 적합하다고 할 수 있다.

마지막으로 노드의 움직임이 무작위성을 포함할 때 제안방법의 성능을 평가하였다. 한 공간에서의 해류는 짧은 시간에 그 특성이 급격하게 바뀌는 경우가 없으나 어선의 활동, 물고기 떼의 움직임과 같이 예측하지 못한 외부의 힘이 노드의 궤적을 변화시킬 수 있다. 그러나 본 연구에서 가정하고 있는 노드배치에서는 닳을 이용하여 노드의 움직임 범위를 제한시켰기 때문에, 비록 노드의 움직임에 무작위성이 포함되어 있더라도 가속도와 자이로 센서를 통해 지정한 위치로의 접근을 파악할 수 있다. 따라서 TP에서의 동일한 전송은 여전히 가능하다. 다만 움직임의 주기성이 약해질수록 이전 전송이후 다시 TP에 접근할 때까지 걸리는 시간이 길어지므로 가속도와 자이로 센서를 이용한 궤적 측정에 누적오차가 발생할 수 있다. 다시 말해, 시간이 지날수록 센서를 이용한 위치추적에 오차가 누적되어 처음 지정한 TP와 예상한 TP간에 차이가 발생한다. 제안한 방법에서 궤적측정의 정확도가 시각 동기화의 성능에 어떤 영향을 주는지를 파악하기 위해 $N \sim (\mu, 1)$ 의 분포를 따르는 오차를 궤적측정에 포함시켰고 그 평균 μ 를 0.1~3m로 증가시킬 때 예측되는 스큐의 오차를 측정하였다. Fig10에서 알 수 있듯이 궤적측정의 정확도가 떨어질수록 스큐예측의 오차도 약간의 증가를 보인다. 그러나 그 차이가 미미한 이유는 비록 처음에 지정한 TP와 다른 영역에서 전송이 발생하지만 노드는 처음과 다른 TP를 실제 자신

의 TP로 인지하여 그 영역에서 크게 벗어나지 않고 전송을 시도하기 때문이다. 또한 가중치기반 선형회귀에서 가중치를 계산할 때, TP와 수신지점과의 차이, D_{im} 에서 오차가 발생하지만 그 값이 성능에 영향을 주는 정도가 매우 작다. 결론적으로 노드의 무작위적인 움직임에도 노드 배치의 특성과 센서융합 기술을 활용하여 제안한 방법의 성능이 크게 저하되지 않음을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 수중 센서 네트워크에서 해수운동에 의한 노드의 움직임 특성과 배치되는 환경을 고려한 새로운 시각 동기화 방법을 제안하였다. 선형회귀분석을 이용하여 시각 동기화를 수행할 때 오차를 발생시키는 요인을 정의하고 수학적 분석을 통해 시각 동기화 정확도에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 기반으로 센서기술을 접목하여 참조노드가 메시지를 교환하는 시점을 조절하는 방법을 제안하였다. 또한 제안 방법에서는 기존 연구에서 간과되었던 채널접근지연을 제거하여 더욱 정확한 시각 동기화를 수행한다. 뿐만 아니라 메시지 교환 시 목적노드의 전송횟수를 최소화하여 송신을 위한 에너지와 오버헤더링으로 인한 에너지 소비를 감소시켰다. 실험을 통해 제안 방법이 기존 연구보다 시각 동기화의 정확도와 에너지 소비적 측면에서 더욱 향상된 성능을 보임을 나타내었다.

비록 제안 방법이 이론상 나은 성능을 보이더라도 실제 수중환경에서의 실험을 통해 제안 방법을 검증해야 한다. 향후 특정 위치에 고정되어 움직임 반경이 제한된 환경뿐만 아니라 자유롭게 이동하는 노드배치 환경에 적합한 시각 동기화 연구도 필요하다.

References

[1] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking," *IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC) 2006*, vol. 1, pp. 228-235, Las Vegas, U.S.A., Apr. 2006.

[2] A. A. Syed and J. Heidemann, "Time synchronization for high latency acoustic networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun.*

(*INFOCOM*), pp. 1-12, Barcelona, Spain, Apr. 2006.

[3] N. Chirdchoo, W. S. Soh, and K. C. Chua, "MU-sync: A time synchronization protocol for underwater," in *Proc. 3rd ACM Int. Workshop Underwater Networks (WUWNet) '08*, pp. 35-42, San Francisco, U.S.A., Sep. 2008.

[4] F. Lu, D. Mirza, and C. Schurgers, "D-sync: Doppler-based time synchronization for mobile underwater sensor networks," in *Proc. 5th ACM Int. Workshop Underwater Networks (WUWNet) '10*, Woods Hole, U.S.A., Sep. 2010.

[5] J. Liu, Z. Wang, Z. Peng, M. Zuba, C. Jun-Hong, and S. Zhou, "TSMU: A time synchronization scheme for mobile underwater sensor networks," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM 2011)*, pp. 1-6, Houston, U.S.A., Dec. 2011.

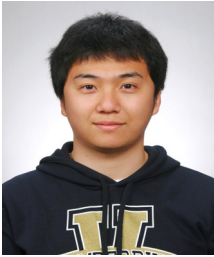
[6] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks (ELSEVIER)*, vol. 3, pp. 257-279, Feb. 2005.

[7] A. Novikov and A. C. Bagtzoglou, "Hydrodynamic model of the lower Hudson River estuarine system and its application for water quality management," *Water Resources Management*, vol. 20, no. 2, pp. 257-276, Apr. 2006.

[8] A. C. Bagtzoglou and A. Novikov, "Chaotic behavior and pollution dispersion characteristics in engineered tidal embayments: A numerical investigation," *J. Amer. Water Resources Assoc.*, vol. 43, no. 1, pp. 207-219, Feb. 2007.

[9] Z. Zhou, Z. Peng, J.-H. Cui, Z. Shi, and A. C. Bagtzoglou, "Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 10, no. 3, pp. 335-348, Mar. 2011.

김 성 렬 (Sungryul Kim)



2010년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 졸업
2010년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정
<관심분야> 에너지수급센서, 무선/이동네트워크, 수중네트워크, RFID/USN

박 성 진 (Seongjin Park)



2012년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 졸업
2012년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 에너지수급센서, 무선/이동네트워크, 수중네트워크, RFID/USN

유 영 환 (Younghwan Yoo)



1996년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사
1998년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 석사
2004년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사
2004년~2006년 신시내티대학교 전기컴퓨터공학부 연구원
2007년~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 교수
<관심분야> 무선/이동네트워크, IoT, 수중네트워크, 네트워크융합