

모바일 센서 네트워크에서 압축 센싱을 이용한 저전력 데이터 전송 시스템

홍지연*, 권정민*, 권민혜*, 박형곤^o

Compressed Sensing Based Low Power Data Transmission Systems in Mobile Sensor Networks

Jiyeon Hong*, Jungmin Kwon*, Minhae Kwon*, Hyunggon Park^o

요약

본 논문에서는 사막, 해양과 같은 개활지역에서 모바일 센서 네트워크에서 사용하는 전력량을 감소시킬 수 있는 시스템을 제안한다. 무선 센서 네트워크에서 데이터 전송 전력 소모는 거리의 제곱에 비례한다는 특징이 있다. 따라서 배터리로 동작하는 모바일 센서의 위치가 센서 데이터를 수집하는 싱크 노드와 멀리 떨어져 있을 경우, 데이터를 전송하는데 요구되는 전력 사용량이 높아지게 되어 센서의 동작 시간이 짧아지는 문제가 발생한다. 이에 따라 본 논문에서는 기존 모바일 센서의 전송 가능 거리보다 짧은 전송 거리를 설정하여 센서가 해당 거리 이내에 존재할 때만 데이터를 보내게 함으로써 필요한 전력량을 감소시키는 시스템에 대하여 제안하였다. 뿐만 아니라, 싱크노드에서는 압축 센싱을 이용하여 센서로부터 수집한 데이터를 더 적은 전송 횟수로 게이트웨이에 전송함으로써 전체 네트워크의 에너지 효율을 증가시켰다. 본 논문에서 제안한 시스템은 라즈베리 파이와 아두이노를 이용하여 실제로 구현하였으며, 싱크노드로부터 적은 데이터를 수신하여도 게이트웨이에서 원 데이터와 매우 근사적으로 복호가 가능함을 실험을 통하여 확인하였고 실제 실험 환경에서 제안된 시스템의 성능을 이론적으로 검증하였다.

Key Words : Compressed Sensing, Low Power Data Transmission, Wireless Sensor Network, Approximate Decoding

ABSTRACT

In this paper, we propose a system in a large-scale environment, such as desert and ocean, that can reduce the overall transmission power consumption in mobile sensor network. It is known that the transmission power consumption in wireless sensor network is proportional to the square of transmission distance. Therefore, if the locations of mobile sensors are far from the sink node, the power consumption required for data transmission increases, leading to shortened operating time of the sensors. Hence, in this paper, we propose a system that can reduce the power consumption by allowing to transmit data only if the transmission range of the sensors is within a predetermined distance. Moreover, the energy efficiency of the overall sensor network can even be improved by reducing the number of data transmissions at the sink node to gateway based on compressed

※ 본 논문은 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었으며 (IITP-2016-H850 1-16-1007) 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2014R1A2A1A11051 257).

♦ First Author : Ewha Womans University Department of Electronics Engineering, jiycons77@ewhain.net, 학생회원

* Ewha Womans University Department of Electronics Engineering, {jungmin.kwon, minhae.kwon}@ewhain.net, 학생회원

o Corresponding Author : Ewha Womans University Department of Electronics Engineering, hyunggon.park@ewha.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2016-08-184, Received August 5, 2016; Revised October 7, 2016; Accepted October 12, 2016

sensing. The proposed system is actually implemented using Arduino and Raspberry Pi and it is confirmed that source data can be approximately decoded even when the gateway received encoded data fewer than the required number of data from the sink node. The performance of the proposed system is analyzed in theory.

1. 서 론

정보통신 기술의 급속한 발전과 함께 모든 사물이 네트워크에 연결된다는 유비쿼터스 네트워크(Ubiquitous network)에 대한 관심이 높아져왔고, 최근 무선통신모듈 가격 하락, 스마트 센서의 대중화 등의 영향을 받아 사물인터넷(Internet of Things, IoT)이라는 새로운 용어로 다시 각광받고 있다^{1,2)}. 사물인터넷이란 사물들이 센싱, 네트워킹, 정보처리 등 지능적 관계를 형성하면서 사람의 관여 없이 데이터가 생산되고 소비되는 인프라를 말한다³⁾. 이 때 센서를 기반으로 한 지능화된 사물이 데이터를 수집하면서 데이터를 생산, 전달 및 교환할 수 있는데 이 과정에서 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)가 중요한 역할을 하고 있다⁴⁾.

무선 센서 네트워크(WSN)는 무선으로 이루어진 다수의 센서 노드와 싱크 노드로 구성되어 있다. 무선 센서 노드는 센서, 무선 통신 장치 그리고 이들의 제어 장치를 포함하며 센서로부터 데이터를 수집 및 가공하여 무선 통신으로 데이터를 전달한다. 무선 센서 네트워크를 구성하는 각 센서 노드와 싱크 노드는 제한된 리소스를 바탕으로 동작을 수행해야하기 때문에 제한된 리소스인 CPU, 메모리, 통신모듈 그리고 배터리를 효율적으로 사용하는 것이 중요하다. 특히 본 논문에서 고려하는 이동성 있는 센서의 경우 이동성을 고려하여 대용량 배터리 탑재가 불가능하기 때문에 센서 노드의 저전력 동작이 더욱 중요하다⁵⁻⁷⁾.

무선 센서 네트워크에서의 효율적인 데이터 전송 방안으로는 센서 노드들을 클러스터로 그룹화 하여 네트워크를 다수로 분할하는 계층적 라우팅이 있다. 이 중 계층적 라우팅에 해당하는 클러스터링 기법은 각 클러스터마다 헤더를 선정하여 클러스터 헤더가 싱크 노드와의 통신을 담당하는 시스템으로 소모 전력을 효과적으로 줄일 수 있다고 알려져 있으며, 대표적인 클러스터 라우팅 기반 프로토콜인 LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁸⁻¹¹⁾. 그러나 헤더를 중심으로 클러스터를 형성할 경우 헤더는 싱크 노드로 데이터를 여러 번 전송을 해야 하기 때문에 이에 따른 추가적인 전력 소모가 발생하게 된다. 뿐만 아니라 전

송 시 소모하는 전력은 데이터 전송 거리의 제곱에 비례하기 때문에 헤더와 싱크노드의 지리적 거리가 멀수록 전력 소모량이 늘어나는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 CoopLEACH(Cooperative LEACH)에서는 클러스터 헤더와 가장 가까운 보조 클러스터 헤더를 선출하여 싱크노드로 데이터를 전송하는 방법이 제안되었다¹²⁾. 그러나 CoopLEACH의 경우 싱크 노드가 센서들이 있는 장소와 멀리 떨어져 있는 곳에 위치해 있다고 가정하기 때문에 오히려 가까운 위치에 있는 센더들에 이를 적용하는데 어려움이 따르며, LEACH와 마찬가지로 센서 노드의 에너지 잔량과는 상관없이 클러스터 헤더와 보조 클러스터를 선정하기 때문에 하위 센서 노드들에 비하여 상위 헤더 노드의 수명이 먼저 줄어들어 에너지 홀 문제(Energy hole problem)을 발생시킬 수 있다¹³⁾. 따라서 본 논문에서는 모든 센서 노드가 개별적으로 전력 소모를 감소시킴으로써 클러스터 전체의 데이터가 손실되는 것을 방지하고 동시에 전력 소모 과정에서 손실된 데이터를 압축 센싱 기법으로 복구하여 무선 센서 네트워크의 데이터 통신 성능을 극대화 하였다.

본 논문에서는 사막, 해양과 같이 넓은 지역에 분포되어 있는 센서 노드와 싱크 노드의 전력 소모를 줄이기 위하여 데이터를 전송할 때 발생하는 소비전력의 감소에 초점을 맞추었다. 데이터 전송 거리에 따라 소모되는 전력량이 증가하는 무선 통신의 특징에 따라 데이터를 전송하는 전송한계범위를 설정하여 특정 거리 내에 존재하는 경우에만 데이터를 전송하도록 하고, 이를 통하여 센서 노드에서 데이터 전송 거리와 데이터 전송 횟수를 제한하여 데이터 전송 시 소모되는 전력을 감소시킨다. 뿐만 아니라 거리에 따라 센서 노드로부터 수신된 데이터의 시간 정보를 이용하여 압축 센싱(Compressed Sensing)을 기반으로 싱크 노드의 데이터 전송 횟수를 줄임으로써 전체적인 무선 센서 네트워크의 전력 소모를 감소시키는 시스템을 구현한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 압축 센싱 기법의 기본 이론에 대하여 서술하고 3장에서는 제안하고자 하는 시스템 모델과 세부 사항에 대해 서술한다. 4장에서는 해당 시스템을 구현하는 데 있어 실험 설계 내용과 실제 구현 내용을 서술하고 실험 결

과에 따른 시스템의 성능을 분석하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 압축 센싱 기법

압축 센싱 기법은 기존의 데이터보다 적은 수의 표본을 이용하여 원 데이터를 복원하는 기술로 기존의 데이터는 물론, 3D, 4K, 8K 영상과 같은 대용량 콘텐츠의 압축에서부터 무선 센서 네트워크의 저전력 통신 분야까지 널리 연구가 진행되고 있다^[14]. 압축 센싱 기법은 크게 데이터 압축 과정과 데이터 복호화 과정으로 나누어진다. 데이터 압축 과정은 수식 (1)과 같이 크기가 $(m \times n)$ 인 센싱 행렬 A 와 크기가 $(n \times k)$ 인 데이터 S 사이의 선형 결합을 통하여 이루어지며, 이 때 연산의 결과 값인 행렬 C 는 크기가 $(m \times k)$ 인 압축된 데이터를 나타낸다.

$$C = A \times S \quad (1)$$

한편, 행렬 간의 선형 결합을 통하여 데이터 압축이 발생해야 하기 때문에 행렬 A 의 크기는 $m < n$ 조건을 만족하여야 한다. 본 논문에서 센싱 행렬 A 는 이동하는 센서 노드의 위치에 따라 결정되는 값이며 자세한 시스템 설계는 3장에서 제시한다.

압축 센싱 기법의 데이터 복호화 과정은 수신된 정보 C 와 A 를 이용하여 L1-norm을 최소화 하는 해를 구하는 방식으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{\hat{H}}{\text{minimize}} \quad \|\hat{H}\|_1 \\ & \text{subject to} \quad C(1) = A \times \hat{H} \times \Psi^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Ψ 는 정규직교 변환 행렬이고, \hat{H} 은 0이 아닌 원소를 갖는 Ψ 도메인 계수로 원 데이터 S 는 $S = \hat{H} \times \Psi^T$ 로 확인할 수 있다. 즉, 압축하여 전송하였던 원 데이터 S 를 구하기 위하여 $C(1) = A \times \hat{H} \times \Psi^T$ 를 만족하는 \hat{H} 중에서 $\|\hat{H}\|_1$ 이 최소가 되는 \hat{H} 를 구하고 이를 통하여 원 데이터 S 를 복원하는 것이다. 한편, 수식 (2)를 얻기 위해서 행렬은 RIP (Restricted Isometry Property)조건을 만족하여야 한다. 모바일 무선 센서 네트워크에서 각 센서로부터 수집된 자연 데이터는 임의의 Ψ 도메인 변환을 할 경우 성감 (sparsity) 특성을 갖는다고 널리 알려져 있고^[15], 압축 센싱 기법은 Nyquist 율보다 낮게 수신된 데이터에 대

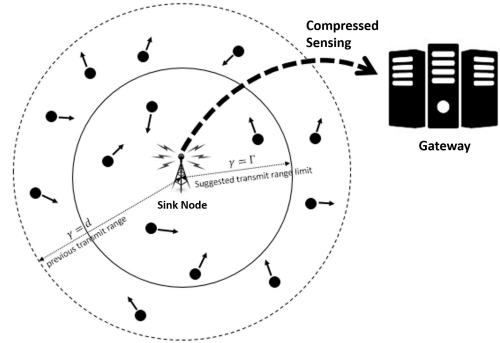


그림 1. 제안하는 시스템의 구조
Fig. 1. Structure of the proposed system

해서도 복원이 가능하기 때문에 이러한 특징을 이용하여 전송에 필요한 데이터의 수를 줄임으로써 효율적인 데이터 전송 시스템을 구성할 것을 제안한다. 따라서 본 논문에서는 수집된 데이터를 압축하여 이를 전송하는데 요구되는 전송 횟수를 줄이고 데이터를 복원하는 시스템을 구현함으로써 기존의 네트워크와 비교하여 전력 소모를 감소시키는 시스템을 구현하였다.

III. 저전력 데이터 전송 시스템

본 센서 네트워크는 사막, 해양과 같은 개활 지역에서 N 개의 이동성을 가진 센서로 이루어져 있다. 각각의 센서는 그림 1과 같이 싱크 노드로부터 일정 거리 d 이내의 구역에서 규칙성 없이 자유롭게 이동하며 데이터를 수집한다. 수집한 데이터는 무선 통신을 이용하여 싱크 노드로 전송하고, 싱크 노드는 데이터 수신 여부를 체크하고 전송 받은 데이터를 부호화 한 후 저장한다. 이 후 싱크 노드가 처리한 데이터는 게이트웨이로 전송되고 게이트웨이에서 압축 센싱 기법의 복호화 방법을 통하여 데이터를 복호화한다. 무선 센서 네트워크에서 거리에 따른 전송 전력을 감소시키기 위하여 센서가 데이터를 전송하기 전에 싱크 노드로부터 현재 위치까지의 거리를 계산하고 그 거리가 전송 한계범위인 보다 작을 경우에만 전송하도록 전송 거리를 제한한다.

제안된 시스템에서 N 개의 센서는 데이터 수집부와 위치 이동부를 반복한다. 데이터 수집부에서 센서는 일정 시간동안 G 개의 데이터를 수집하며, 수집된 데이터는 $K_i = [k_i(1), k_i(2), \dots, k_i(G)]$ 으로 나타낸다. 이 때 $k_i(\alpha)$ 는 N 개의 센서 중에서 i 번째 센서가 α 번째로 수집한 데이터를 의미한다 (단, $1 \leq i \leq N$).

위치 이동부에서는 N 개의 센서가 일정 W_1 시간 동안 데이터를 M 번 전송하는 과정을 거친다. 이때 데이터 전송과정이란 GPS를 통한 위치 확인, 싱크노드와의 거리 계산, 데이터 전송 여부 결정 그리고 데이터 전송의 네 단계를 말한다. 위치 이동부에서 센서는 각각의 전송과정의 시작 단계에서 GPS를 통해 현재 위치의 경도와 위도 값을 파악한다. 센서 노드는 해당 GPS 값을 바탕으로 싱크 노드와의 지리적 거리 r_{ij} 를 다음과 같이 지구 표면에서 두 점 사이의 거리를 계산하는 대원거리공식 (The Great-circle distance formula)을 이용하여 계산한다.

$$r_{ij} = \text{acos}(\sin\phi_0 \times \sin\phi_{ij} + \cos\phi_0 \times \cos\phi_{ij} \times \cos(\lambda_0 - \lambda_{ij})) \times 180/\pi \times 60. \quad (3)$$

한편 (3) 식은 거리를 산출할 때는 지구가 완전한 구의 형태를 가지고 있다고 가정하였으며, r_{ij} 는 i 번째 센서가 j 번째 전송과정을 시작하는 시점에서의 센서와 싱크 노드 사이의 거리, ϕ_0 과 λ_0 는 각각 싱크 노드의 위도와 경도 값, ϕ_{ij} 과 λ_{ij} 는 각각 i 번째 센서가 j 번째 전송과정을 시작하는 시점에서의 위도와 경도 값을 나타낸다 (단, $1 \leq j \leq M$). i 번째 센서는 싱크 노드와의 거리 r_{ij} 를 전송한계범위 Γ 와 비교하여 데이터 전송여부를 결정하며, 여기서 전송한계범위는 싱크 노드를 중심으로 Γ 만큼 떨어진 지역 이내를 나타낸다^[6]. 전송한계범위와 센서 및 싱크 노드 사이 거리의 관계에 따라 데이터 전송여부를 결정하게 되는데, $r_{ij} > \Gamma$ 일 경우 센서는 데이터를 전송하지 않고, $r_{ij} < \Gamma$ 일 경우 데이터를 전송한다. 이러한 조건에 따라 모든 센서는 전송과정을 M 번 반복한다.

데이터 전송 과정에서 수집된 데이터는 데이터 패킷의 형태로 전송된다. i 번째 센서가 위치 이동부에서 전송하는 M 개의 패킷 집합을 $P_i = [p_i(1), p_i(2), \dots, p_i(M)]$ 으로 나타내며, 이때 i 번째 센서가 j 번째로 전송하는 패킷 $p_i(j)$ 은 패킷 ID $I_i(j)$ 와 K_i 으로 구성된다. 패킷 ID $I_i(j)$ 는 센서 i 가 j 번째로 보내는 패킷의 ID이다. 이는 추후 싱크 노드에서 데이터 수신여부를 확인하기 위해 추가하며, 그림 2에서 센서 i 의 j 번째로 전송하는 패킷을 예로 들어 설명하였다.

싱크 노드는 N 개의 센서가 데이터를 수집하는 구간의 중심에 위치하며 센서로부터 데이터를 수집하여 필요한 형태로 가공하는 역할을 한다. 이에 따라

$$P_i(j) = \begin{array}{|c|c|} \hline I_i(j) & K_i \\ \hline \end{array}$$

그림 2. i 번째 센서가 j 번째 전송하는 패킷 구성
Fig. 2. j th packet structure from i th sensor

싱크 노드는 데이터 수신부와 데이터 처리부를 반복한다. 데이터 수신부에서 싱크 노드는 일정 L_2 식나 동안 N 개의 센서로부터 전송되는 데이터 패킷들을 수신한다. 데이터 패킷 $P_i(j)$ 을 수신하면 데이터 패킷 ID $I_i(j)$ 을 확인하여 $P_i(j)$ 의 수신 여부를 센싱 행렬 X 에 표시하고, 데이터 K_i 를 행렬 Y 에 저장한다. 데이터 패킷 수신 여부는 각 센서가 전송한계범위 내에 존재 하는 여부와 통신 채널의 환경에 의하여 결정된다.

$$X_{ij} = 1, \quad \text{if } r_{ij} \leq \Gamma \text{ and } t_{ij} \leq L_2 \\ X_{ij} = 0, \quad \text{if } r_{ij} > \Gamma \text{ and } t_{ij} > L_2 \quad (4)$$

여기서 X_{ij} 은 센싱 행렬 X 의 i 행 j 열 원소로 i 번째 센서가 j 번째로 보낸 패킷 $P_i(j)$ 이 싱크 노드에 수신되었는지 여부를 의미하고 t_{ij} 은 싱크 노드에서 패킷 $P_i(j)$ 을 수신한 시간을 의미한다. 한편, t_{ij} 은 통신 채널 환경에 따라 달라진다. $P_i(j)$ 의 데이터 K_i 은 데이터 행렬 Y 에 저장된다.

$$Y = [K_1, K_2, \dots, K_N]^T \quad (5)$$

데이터 수신부에 이어 싱크 노드의 데이터 처리부에서는 일정 W_2 시간 동안 2장에서 언급한 압축 센싱 기법 중 데이터 압축과정을 거치며, 본 시스템에서는 아래의 연산을 통하여 압축된 데이터 Z 를 얻는다.

$$Z = X^T Y \quad (6)$$

여기서 X^T 행렬의 크기는 $(M \times N)$ 으로, 데이터 압축 조건에 따라 $M < N$ 을 만족하도록 시스템을 설계한다. 따라서 기존 N 개의 데이터를 M 개의 데이터로 압축함으로써 싱크 노드에서 게이트웨이로 전송해야 하는 패킷의 수를 줄이게 된다. 이를 통하여 싱크 노드는 데이터를 전송하는데 요구되는 전력을 낮출 수 있다. 한편, 압축 센싱 기법을 이용하여 데이터를 압축하고 근사적으로 복원하였을 경우 편재 오차 (biased error)가 발생하는 문제점이 있기 때문에 각 센서에서 측정된 초기 값에 대한 정보를 추가적으로

전달함으로써 복호된 데이터의 오차를 줄이는 과정이 필요하다. 이에 따라 싱크 노드에서는 센서들의 초기 값 정보를 나타내는 데이터 E 를 아래와 같이 생성한다.

$$E = [k_1(1), k_2(1), k_3(1), \dots, k_N(1)] \quad (7)$$

그 결과 싱크 노드에서는 수식 (6)에서 얻은 압축 데이터와 함께 센서 데이터의 초기 값 패키지 E 를 게이트웨이로 전달함으로써 총 $M+1$ 번의 전송을 수행하게 된다.

게이트웨이는 싱크 노드로부터 데이터 Z 와 E 를 수신하고 수식 (2)를 통하여 압축 센싱 기법의 복호화 과정을 수행한다. 한편, 본 논문에서는 DFT (Discrete Fourier Transform)를 도메인 변환 함수 Ψ 로 사용하였다. 이후 복호된 데이터에서 각 센서의 첫 번째 값과 데이터 E 를 비교하여 복호된 값 초기 값을 조정하고 이를 통하여 편재 오차를 줄인다. 결과적으로 게이트웨이는 기존 N 개의 데이터를 전송받아야 했던 시스템과 비교하여 적은 수의 데이터로 N 개의 센서가 수집한 자연 정보를 얻게 된다.

IV. 실험

4.1 실험 설계

본 실험에서는 시스템 구현을 위해 아두이노 우노와 라즈베리 파이 3B를 사용하였다. 이동성이 높은 센서를 구현하기 위해서 아두이노를 이용하였고, 행렬 연산과 수치계산이 많은 싱크 노드의 동작에는 라즈베리 파이를 이용하였다. 센서와 싱크 노드의 무선 통신은 XBee를 통해 수행하였다.

아두이노와 라즈베리 파이는 시간에 따라 그림 3과 같이 데이터를 송수신하며 시스템을 구성한다. 아두이노의 데이터 수집부와 위치 이동부에 각각 할당된 시간을 고려하여 라즈베리 파이의 데이터 처리부와 데이터 수신부의 시간을 결정한다. 아두이노가 데이터를 송신하는 동안 라즈베리 파이는 데이터를 수신하고, 아두이노가 센서를 통해 데이터를 수집하는 동안에는 라즈베리 파이가 수신한 데이터를 처리한다. 아두이노와 라즈베리 파이는 해당 과정을 계속 반복하며, 한 패킷을 반복하는 데 걸리는 시간은 동일하게 설정하였다.

아두이노로 구현된 센서는 데이터 수집부와 위치 이동부를 수행하는 각각의 시간을 $L_1=30$ 초, $W_1=120$ 초로 설정하였고, 이에 따라 아두이노가 데이터 수집

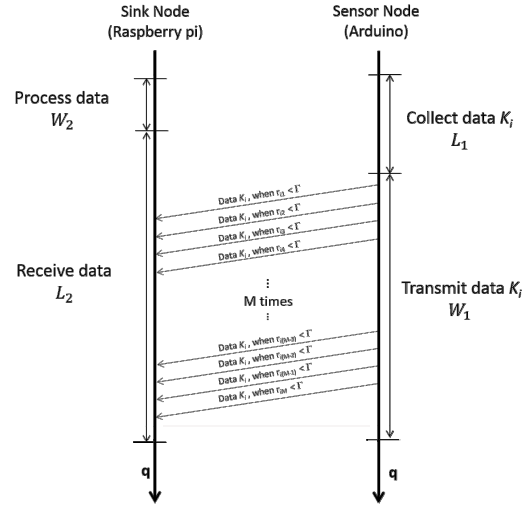


그림 3. 제안하는 시스템의 데이터 수신 과정
Fig. 3. Data transmission process of the proposed system

부와 위치 이동부를 수행하는 한 주기의 시간은 총 150초가 된다. 즉, 아두이노는 아날로그 온도센서와 연결되어 있고 30초간 30개의 데이터를 수집하고 이후 위치 이동부에서는 120초간 M 번의 전송 과정을 반복 시행한다. XBee를 통해 전송되는 데이터 패킷은 1 byte의 패킷 ID와 90 bytes의 데이터로 구성된다. 본 시스템에서 센서는 총 13개로 구성되어 있으며 모든 센서는 동일한 주기를 가진다. 센서 네트워크 구현을 위하여 총 13개의 아두이노, 13개의 온도센서, 13개의 GPS 모듈 그리고 13개의 XBee를 사용하였다. 라즈베리 파이로 구현된 싱크 노드는 데이터 수신부와 데이터 처리부의 시간을 각각 $L_2=130$ 초, $W_2=20$ 초로 설정하였다. 즉, 130초간 데이터를 수신하고 20초간 데이터를 처리하는 과정을 반복하게 된다. 이에 따라 라즈베리 파이의 한 주기 당 걸리는 시간은 아두이노와 같이 150초로 설정하였다.

4.2 실험 구현

이동하는 13개의 센서는 아두이노, LM35-DZ 온도센서, GPS 모듈 그리고 XBee로 구성되어 있으며 각 요소들은 다음 그림 4와 같이 연결되어 있다. 온도센서는 아날로그 온도센서를 사용하였고 온도에 따라 다른 저항 값을 V_{out} 으로 가진다. 아두이노는 아날로그 핀인 A0를 통하여 저항 값을 전달받아 그에 대응하는 온도 값을 데이터로 수집한다. 수집한 데이터는 바로 패킷의 K 위치에 순서대로 저장된다. 이후 데이터 수집이 끝나면 GPS 모듈에서 현재 위치에 대한 정

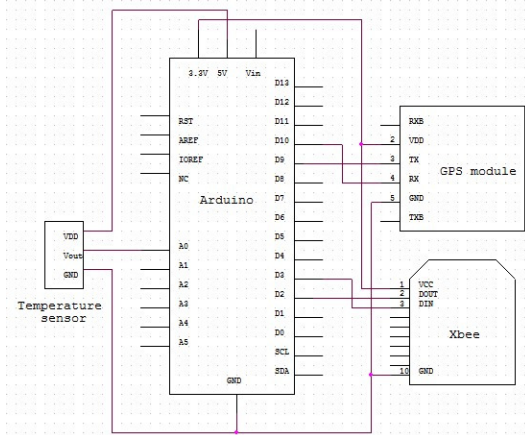


그림 4. 아두이노로 구현한 데이터 수집부 회로 구성도
Fig. 4. Arduino circuit diagram for data collection module

보를 읽어오는데, 이 때 GPS 모듈은 NMEA 형태의 가공 이전의 데이터를 전달한다. 아두이노는 NMEA 형태의 데이터를 파싱하여 현재 위치의 경도 값과 위도 값을 추출한다. 거리를 계산한 후 아두이노가 전송 한계범위 내에 있는 것이 확인되면 XBee를 통해서 싱크 노드인 라즈베리 파이로 데이터를 전송하게 된다.

본 실험에서의 센서 네트워크는 라즈베리 파이에 연결된 1개의 XBee를 중심으로 아두이노에 연결된 13개의 XBee가 방사형으로 구성되어있다. 이에 따라 XBee는 데이터를 패킷 종류, 도착 주소 또는 보내는 주소, RSSI값 등의 정보와 함께 프레임으로써 패키징화하여 전송하는 API모드로 설정하였다.

라즈베리 파이는 XBee를 통해 프레임을 수신한 후 필요한 정보를 추출하여 수집하고, 해당 데이터를 처리한 이후 게이트웨이로 데이터를 전달한다. 한편, 본

논문에서 게이트웨이는 라즈베리 파이와 유선으로 연결되어 있기 때문에 데이터 손실은 발생하지 않는다. 게이트웨이에서 수식 (2)를 이용한 데이터 복호 과정은 Intel Core i7 3.40GHz CPU, 8.00GB RAM, Windows 7 환경의 MATLAB에서 수행한다.

한편 본 논문에서 고려하는 네트워크 환경은 장애물이 없는 실외인 점에 의하여, 실험은 건물이 존재하지 않는 평지에서 진행되었다. 또한 이동하는 센서 구현을 위하여 각 아두이노는 싱크 노드인 라즈베리 파이를 중심으로 임의대로 움직이는 실험자에 의하여 이동성이 부여되었다. 이에 따라 본 실험에서 전송한 계범위 L 는 GPS 오차범위가 $\pm 3m$ 인 점과 XBee 통신의 안정성, 그리고 실험자의 이동 속도를 고려하여 10m로 설정하였고, 최대 이동 범위는 30m로 설정하였다.

4.3 실험 결과

본 실험의 싱크 노드에서는 위치 이동부에서 설정한 이동 환경을 바탕으로 수식 (4)에 따라 데이터를 수신하게 되며, 실제 측정된 센싱 행렬 X 는 그림 5와 같다. 이를 통하여 120초간 13개의 센서가 전송 과정을 각각 10번, 13번 반복 시행하였을 때 총 전송 횟수는 각각 38번, 50번이 되는 것을 확인할 수 있다.

한편, 본 실험의 자유 공간에서 전송 거리에 따른 소모 전력은 다음과 같이 전송 거리의 제곱에 비례한다고 알려져 있다.

$$P_{TX} \propto P_{RX} (4\pi d)^2 \tag{8}$$

여기서 P_{TX} 는 전송 전력이고 P_{RX} 는 수신 전력이다

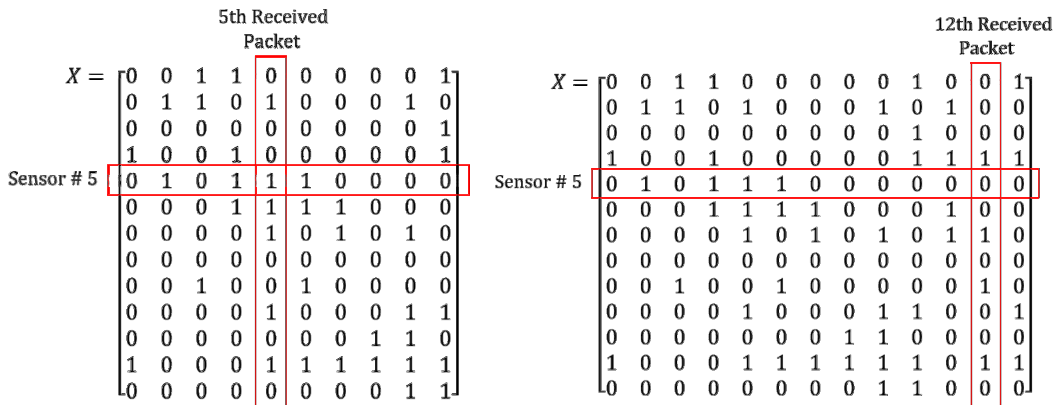


그림 5. 10번과 13번의 반복 전송 과정 중 싱크 노드에서 표시한 센싱 행렬
Fig. 5. Illustrative examples of sensing matrices at the sink node if sensors transmit their data for 10 and 13 times

며, 본 논문에서 일정한 수신율을 유지하기 위하여 P_{RX} 는 고정된 값이라 가정한다. 고려하는 모바일 센서 네트워크에서 최대 이동 범위 D 에서 이동하는 센서 N 개에 대하여 1m의 단위 거리 당 센서 노드에서의 전송 전력을 P_S 라고 하고, 싱크 노드에서 게이트웨이로 데이터를 전송하는데 요구되는 전력을 P_G 라고 할 경우, 기존 원거리에서 전송하는데 요구되는 전체 소모 전력 P_{LO} 와 제안하는 시스템에서 압축을 하지 않은 경우 소모되는 전력 P_{SH} , 그리고 압축 센싱 기법을 이용하여 데이터를 M 개로 압축 전송하는 경우의 전력 P_{CS} 를 나타내면 식 (9)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{LO} &= N \times (d_{LO})^2 P_S + N \times P_G \\ P_{SH} &= T_{SH} \times (d_{SH})^2 P_S + N \times P_G \\ P_{CS} &= T_{CS} \times (d_{CS})^2 P_S + (M+1) \times P_G \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 T_{SH} 는 제안된 시스템에서 압축을 하지 않은 상태에서 데이터를 전송하였을 때 측정된 센싱 행렬의 1의 개수이며, T_{CS} 는 제안된 시스템에서 데이터를 M 개로 압축하였을 때의 1의 개수이다.

본 실험에서 13개의 센서 최대 이동 범위가 $D=30$ 일 때, 기존 원거리 시스템의 평균 전송 거리는 확률에 따라 면적의 50%가 되는 $d_{LO} = \frac{30}{\sqrt{2}}$ m로 가정하고 제안하는 시스템의 평균 전송 거리는 전송한계범위의 경계선인 $d_{SH} = d_{CS} = 10$ m로 가정한다. 그 결과, 데이터를 압축하지 않았을 때 (즉, $M=13$) 측정된 $T_{SH}=50$ 값과 데이터를 $M=10$ 개로 압축하였을 때 측정된 $T_{CS}=38$ 를 대입하여 전력을 비교할 경우 $P_{LO} > P_{SH} > P_{CS}$ 를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 전송 소모 전력은 거리와 전송 횟수에 따라 전송 소모 전력 값이 결정되지만, 위의 예시와 같이 가정된 전송 거리와 본 실험의 센싱 행렬 및 전송 한계 범위를 바탕으로, 제안된 시스템은 기존의 원거리 시스템과 비교하여 모바일 센서 네트워크의 에너지 효율을 증가 시킬 수 있음을 알 수 있다.

다음은 센서들의 위치와 전송한계범위에 따라 결정된 센싱 행렬을 바탕으로 싱크 노드에서 13개의 센서 데이터를 M 개의 데이터로 압축하여 전송한 후 게이트웨이에서 이를 복호하였을 때 나타나는 성능에 대하여 살펴보고자 한다. 그림 6에서 확인할 수 있는 것과 같이 10개의 데이터로 압축되어 복호된 신호는 원

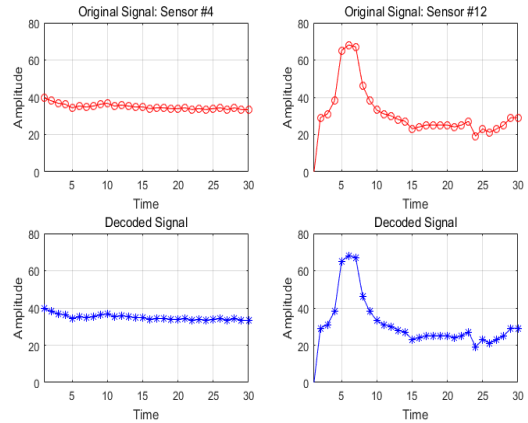


그림 6. 제안된 시스템을 이용한 온도 데이터 복구 ($M=10$)
Fig. 6. Decoded temperature data based on the proposed system ($M=10$)

신호와 매우 흡사함을 확인할 수 있다. 한편, 센서 4와 센서 12의 복호된 신호를 원 신호와 비교하였을 때 신호의 평균 제곱 오차 (Mean Square Error, MSE)를 계산하면 두 센서 모두 0.4778로 작은 값을 갖게 된다. 이외의 다른 센서에 대해서도 최소 9.1465×10^{-23} , 최대 1.9112의 작은 MSE 값을 가지게 된다. 따라서 본 시스템을 통하여 싱크노드에서 게이트웨이로 데이터를 압축하여 적은 전송 횟수로 전달하여도 거의 완벽 복원되는 것을 알 수 있다.

그림 7에서는 싱크노드에서 게이트웨이로 전송하는 데이터의 수 (M)를 조정하여 얻은 신호의 평균 제곱 오차를 나타내었다. 압축 센싱 기법을 이용하여 싱크 노드에서 전송하는 데이터의 수 (M)가 증가할수록 MSE 값이 감소하여 복원 성능이 높아짐을 알 수 있

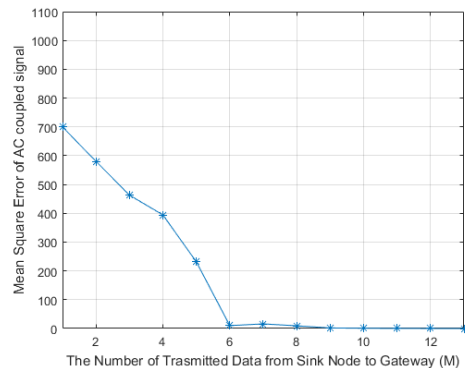


그림 7. 싱크노드에서 게이트웨이로 전송하는 데이터 수에 따른 평균 제곱 오차
Fig. 7. Mean square error for the number of transmitted data from sink node to gateway

으며, 이후 싱크 노드에서 전송하는 데이터의 수(M)가 센서 노드의 개수(N)와 13개로 동일할 경우 완벽 복원되는 것을 확인 할 수 있다. 특히 본 실험 환경에서는 데이터를 6개로 압축하였을 때부터 복호 성능이 확연히 차이나는 것을 알 수 있다. 즉, 싱크노드에서 게이트웨이로 전송하는 데이터의 수를 절반만 전송하여도 원 데이터와 거의 동일한 데이터를 얻을 수 있게 된다. 따라서 수식 (9)에서의 전송 소모 전력과 복원 성능을 고려하여 싱크노드에서 압축 정도를 결정해야 하는 것을 본 실험 결과를 통하여 확인할 수 있다.

이를 통하여 제안된 시스템이 전송 거리에 따른 센서 노드의 전송 전력 소모와 압축 센싱 기법을 이용한 싱크 노드의 전송 횟수를 줄임으로써 모바일 센서 네트워크 전체 에너지 효율을 높이며, 적은 수의 데이터를 수신하였음에도 불구하고 게이트웨이에서 이를 복호한 값이 원 데이터의 값과 흡사함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 배터리를 기반으로 동작하는 모바일 센서 네트워크에서 데이터 전송 시 발생하는 소모 전력을 감소시키는 시스템에 대하여 제안하였다. 제안하는 시스템은 사막, 해양과 같이 장애물이 없는 개활 지역에서 전송한계범위를 설정함으로써 센서 노드와 싱크 노드 사이의 전력 소모와 압축 센싱 기법을 이용하여 싱크 노드와 게이트웨이 사이의 전력 소모를 고려하였다. 그 결과 이동하는 센서 노드와 싱크 노드 사이의 전송 거리가 줄어들어 전력 소모를 효과적으로 감소시키고, 싱크노드에서 적은 전송 횟수로 데이터를 게이트웨이로 전달하게 되어 전력 소모를 감소시켰음을 아두이노와 라즈베리 파이로 구현한 실험 환경에서 확인하였다. 뿐만 아니라, 압축된 데이터를 수신한 게이트웨이에서는 압축 센싱 기법의 복호화 과정을 통해 근사적으로 데이터를 복호하여도 원 데이터와 거의 동일하게 복원되는 것을 실험을 통해 확인하였다. 향후 센서 노드의 반복된 데이터 전송에서 발생하는 전력 소모와 싱크 노드에서 게이트웨이 사이의 압축률에 따른 복호 성능을 고려한 연구를 진행하여 전력 소모를 최소화 하는 전송 거리와 압축률을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] C. Pyo, "M2M technology and its standardization trends," *oneM2M, Seoul Int.*

Conf., Jun. 2013.

- [2] H. Ju and Y. Yoo, "Efficient packet transmission utilizing vertical handover in IoT environment," *J. KIISE*, vol. 42, no. 6, pp. 807-816, Jun. 2015.
- [3] D. Ryu, S. Ho, J. Sim, and I. Cheong, "A study on the vulnerability and analysis in the wireless IoT environments," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 1093-1094, Jan. 2016.
- [4] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, pp. 1645-1660, Sept. 2013.
- [5] I. Peña-López, *ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things*, 7th Ed., ITU, 2005.
- [6] Q. Wang, M. Hempstead, and W. Yang, "A realistic power consumption model for wireless sensor network devices," *SECON '06*, pp. 286-295, Reston, VA, USA, Sept. 2006.
- [7] C. Jeon and S. Oh, "A design and implementation of database for WSN based environment monitoring system," *KIISE*, vol. 1, no. 1, pp. 136-140, 2007.
- [8] S. Park and H. Cho, "A clustering scheme to prolong lifetime of wireless sensor networks," *J. KIICE*, vol. 17, no. 4, pp. 996-1004, Apr. 2013.
- [9] S. Ko and J. Cho, "A study on cluster head selection based on distance from sensor to base station in wireless sensor network," *J. Korean Inst. Illuminating and Electrical Installation Eng.*, vol. 27, no. 10, pp. 50-58, Oct, 2013.
- [10] B. Kim and S. Yoo, "Cluster-head-selection-algorithm in wireless sensor networks by considering the distance," *J. KSCI*, vol. 13, no. 4, pp. 127-132, Jul. 2008.
- [11] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci. IEEE*, 2000.
- [12] H. Kim, S. Hong, and W. Choi, "Cooperative communication scheme considering sensor

node density in wireless sensor networks,” *J. KISS : Inf. Netw.*, vol. 41, no. 2, pp. 86-94, 2014.

- [13] M. K. Watfa, H. Al-Hassanieh, and S. Salmen, “A novel solution to the energy hole problem in sensor networks,” *Elsevier J. Netw. and Comput. Appl.*, vol. 36, no. 2, pp. 949-958, Mar. 2013.
- [14] G. Gankhuyag, E. G. Hong, G. Kim, Y. Kim, and Y. Choe, “A real-time video stitching algorithm in H. 264/AVC compressed domain,” *J. KICS*, vol. 39, no. 6, pp. 503-511, 2014.
- [15] H. H. Baek, J. W. Kang, K. S. Kim, and H. N. Lee, “Introduction and performance analysis of approximate message passing (AMP) for compressed sensing signal recovery,” *J. KICS*, vol. 38, no. 11, pp. 1029-1043, 2013.
- [16] M. Bhardwaj, T. Garnett, and A. P. Chandrakasan, “Upper bounds on the lifetime of sensor networks,” *ICC 2001*, vol. 3, pp. 785-790, Helsinki, Finland, Jun. 2001.

홍지연 (Jiyeon Hong)



2016년 8월 : 이화여자대학교 공학사
 2016년 10월~현재 : 독일 RWTH Aachen University, 석사 과정
 <관심분야> 압축 센싱, 네트워크 코딩

권정민 (Jungmin Kwon)



2015년 2월 : 이화여자대학교 공학사
 2015년 3월~현재 : 이화여자대학교 석사과정
 <관심분야> 네트워크 코딩

권민혜 (Minhae Kwon)



2011년 8월 : 이화여자대학교 공학사
 2013년 8월 : 이화여자대학교 공학석사
 2013년 9월~현재 : 이화여자대학교 박사과정
 <관심분야> 네트워크 코딩, 게임이론

박형곤 (Hyunggon Park)



2004년 2월 : 포항공과대학교 공학사
 2006년 3월 : 미국 University of California, Los Angeles (UCLA) M.S.
 2008년 12월 : 미국 University of California, Los Angeles (UCLA) Ph.D.

2010년 2월 : 스위스 Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL) 신호처리 연구실 선임연구원

2010년 3월~2016년 2월 : 이화여자대학교 조교수

2016년 3월~현재 : 이화여자대학교 부교수

<관심분야> 게임이론을 이용한 유/무선/P2P, 네트워크 분산적 자원 관리, 네트워크 코딩을 이용한 멀티미디어 전송